



Controlli automatici per la mecatronica

Applicazione alla robotica industriale

Prof. Paolo Rocco (paolo.rocco@polimi.it)

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

Il robot industriale



Il robot si compone di:

**Struttura meccanica
con attuatori e sensori**



COMAU SpA

Unità di governo



COMAU SpA

Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [3]

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.



Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [4]

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



Controlli automatici per la meccatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [5]

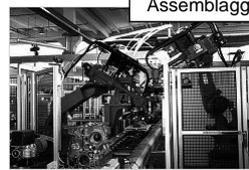
Applicazioni tipiche (COMAU SpA)



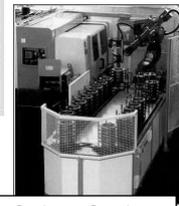
Saldatura a Punti



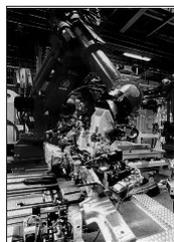
Saldatura ad arco



Assemblaggio



Carico - Scarico
Macchine



Movimentazione



Sigillatura - Siliconatura



Automazione Linee
Interpresse



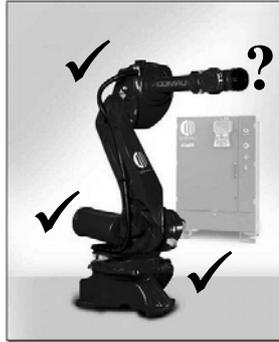
Lavorazione

Controlli automatici per la meccatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [6]

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:



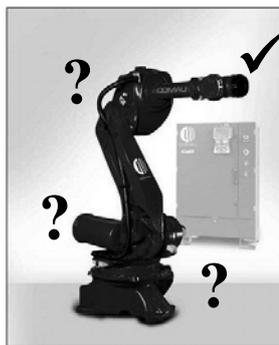
Si utilizzano appositi formalismi per descrivere la cinematica del manipolatore.

Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [7]

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:



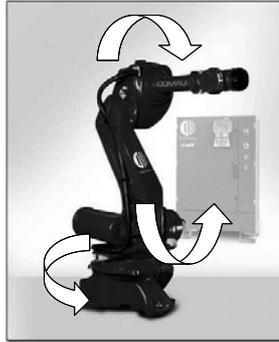
Il problema, più complesso di quello della cinematica diretta, viene risolto con algoritmi ad-hoc.

Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [8]

Dinamica



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



Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [9]

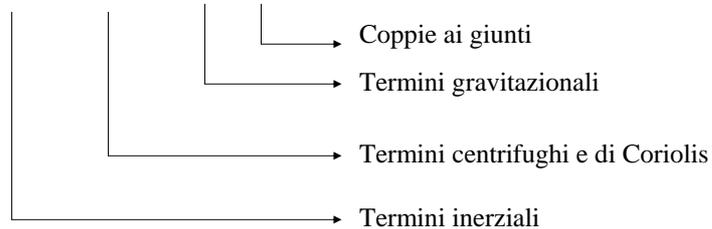
Dinamica



Nel caso di manipolatore rigido il modello è descritto da n (quanti sono i giunti) equazioni differenziali del secondo ordine.

In forma compatta vettoriale:

$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$



Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [10]

Dinamica diretta ed inversa



$$B(q)\ddot{q} + C(q, \dot{q})\dot{q} + g(q) = \tau$$

Dinamica diretta

Assegnate le coppie ai giunti $\tau(t)$, determinare le accelerazioni ai giunti $\ddot{q}(t)$ e, note le posizioni iniziali $q(t_0)$ e le velocità iniziali $\dot{q}(t_0)$, le posizioni $q(t)$ e le velocità $\dot{q}(t)$.

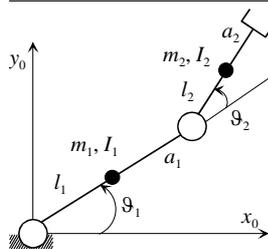
- Problema la cui soluzione è utile per la **simulazione numerica** della dinamica
- È risolvibile sia con l'approccio di Lagrange che con l'approccio di Newton-Eulero

Dinamica inversa

Assegnate le accelerazioni $\ddot{q}(t)$, le velocità $\dot{q}(t)$ e le posizioni $q(t)$ determinare le coppie ai giunti $\tau(t)$ necessarie alla generazione del movimento.

- Problema la cui soluzione è utile per la **pianificazione della traiettoria** e per il **controllo** basato sul modello.
- Si può risolvere efficientemente con l'approccio di Newton-Eulero

Manipolatore planare a due bracci



Consideriamo un manipolatore planare a due bracci, caratterizzati dalle masse m_1 e m_2 e dalle lunghezze a_1 e a_2 .

Il vettore delle coordinate generalizzate risulta:

$$q = \begin{bmatrix} \vartheta_1 \\ \vartheta_2 \end{bmatrix}$$

Le equazioni in forma vettoriale sono:

$$\begin{bmatrix} m_1 l_1^2 + I_1 + m_2 a_1^2 + m_2 l_2^2 + 2m_2 a_1 l_2 c_2 + I_2 & m_2 l_2^2 + m_2 a_1 l_2 c_2 + I_2 \\ m_2 l_2^2 + m_2 a_1 l_2 c_2 + I_2 & m_2 l_2^2 + I_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\vartheta}_1 \\ \ddot{\vartheta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2m_2 a_1 l_2 s_2 \dot{\vartheta}_2 & -m_2 a_1 l_2 s_2 \dot{\vartheta}_2 \\ m_2 a_1 l_2 s_2 \dot{\vartheta}_1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\vartheta}_1 \\ \dot{\vartheta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (m_1 l_1 + m_2 a_1) g c_1 + m_2 g l_2 c_{12} \\ m_2 g l_2 c_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix}$$

\uparrow $C(q, \dot{q})$
 \uparrow $g(q)$

Pianificazione della traiettoria



La pianificazione può avvenire:

- nello **spazio dei giunti**
- nello **spazio operativo**

La pianificazione delle traiettorie nello **spazio dei giunti** segue quanto visto per la pianificazione del moto di un singolo servomeccanismo. Si possono specificare solamente il valore iniziale e finale della coordinata di giunto o anche valori intermedi.

Si possono anche prescrivere opportuni profili di velocità ed accelerazione. Spesso si adottano profili di velocità trapezoidali con raccordi parabolici (“doppia S”) per limitare sia l’accelerazione che il jerk.

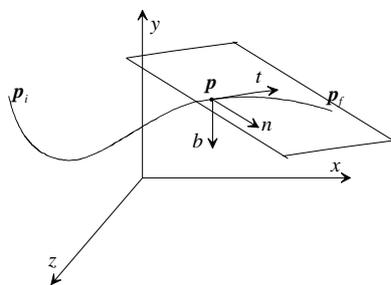
Può poi essere necessaria una **scalatura dinamica** della traiettoria, per evitare di raggiungere i limiti di saturazione degli attuatori. Per questo si può fare riferimento al modello dinamico del manipolatore.

Pianificazione della traiettoria



La pianificazione delle traiettorie nello **spazio operativo** prevede la specificazione della traiettoria che l’end effector dovrà seguire, in termini di coordinate Cartesiane.

Per questo si fa riferimento di norma ad una rappresentazione parametrica della curva che costituisce il percorso, in termini dell’ascissa curvilinea s .



$$p = p(s)$$

$$t = \frac{dp(s)}{ds}$$

$$n = \frac{d^2 p(s)/ds^2}{\|d^2 p(s)/ds^2\|}$$

$$b = t \times n$$

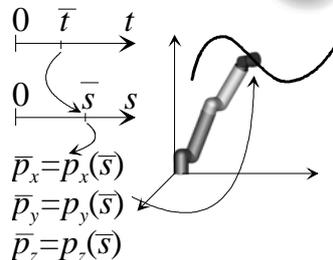
Si possono definire segmenti, circonferenze, ecc. nello spazio.

Pianificazione della traiettoria



Per la pianificazione della posizione, tenendo conto della parametrizzazione rispetto all'ascissa curvilinea $\mathbf{p} = \mathbf{p}(s)$, si può attribuire la legge oraria alla variabile $s(t)$.

Per la determinazione di $s(t)$ vale quanto detto precedentemente circa la pianificazione della traiettoria per variabili scalari.



In modo concettualmente analogo si procede anche per la pianificazione dell'orientamento, anche se la specificazione della traiettoria in termini di orientamento dell'end effector è complessa.

Programmazione



I robot vengono di norma programmati mediante i **linguaggi di programmazione** propri dei costruttori di robot (la COMAU ha sviluppato il linguaggio PDL2). In alcuni casi sono anche disponibili strumenti di simulazione evoluti a supporto della programmazione.

Modalità teaching by showing:

In alternativa, l'operatore con il teach pendant muove il manipolatore, o giunto per giunto o secondo le direzioni Cartesiane. L'operatore con il teach pendant muove il manipolatore lungo il percorso desiderato. I trasduttori di posizione memorizzano le posizioni che il robot deve raggiungere, che saranno poi riaccolte da un software di generazione della traiettoria.

Il robot sarà quindi in grado di ripetere autonomamente il movimento insegnato con apprendimento sul campo.



COMAU SpA

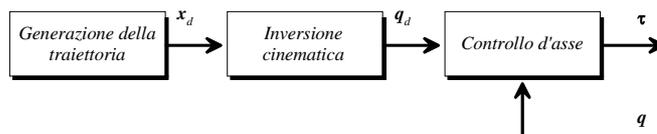
Controllo del moto



Si adottano leggi di controllo in anello chiuso per controllare il movimento del manipolatore.

Il controllo viene di norma eseguito nello spazio dei giunti (le variabili controllate sono le coordinate di giunto), anche se esistono studi sul controllo eseguito direttamente nello spazio Cartesiano (spazio operativo).

Si adotta un'architettura costituita da **tre moduli**:

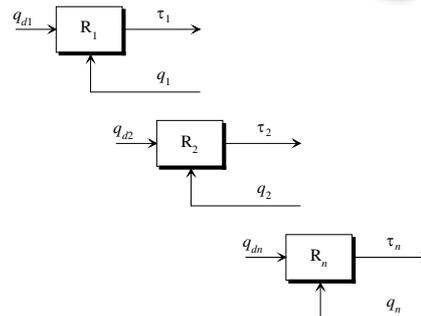


Generazione della traiettoria e inversione cinematica possono essere eseguite fuori linea, o in linea con frequenza di campionamento ridotta (100 Hz). Il controllo d'asse va eseguito in linea (in tempo reale) con frequenze elevate (≥ 1 KHz).

Controllo indipendente dei giunti



La soluzione tipicamente adottata nei controllori robotici industriali prevede che ciascuna coordinata di giunto venga controllata in un anello di controllo monovariabile, ignorando gli effetti di accoppiamento dinamico indotti dalla meccanica del robot, che vengono trattati come disturbi.

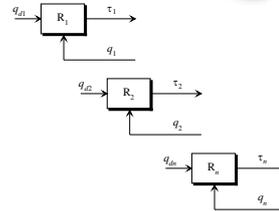


I singoli problemi di controllo sono assimilabili a quelli del controllo di servomeccanismi.

Controllo indipendente dei giunti



- Di norma si dispone, per ogni giunto, di un solo sensore di posizione lato motore.
- Si adottano leggi di controllo classiche (P/PI, PID, eventualmente filtri notch).
- L'azione integrale è utile per contrastare a regime l'effetto della gravità
- L'inerzia del carico varia al variare della configurazione del manipolatore, in particolare al variare delle posizioni dei giunti a valle.
- Il metodo si affida pesantemente all'effetto disaccoppiante degli alti rapporti di riduzione delle trasmissioni adottate nella robotica. Senza questo effetto, trascurare la variabilità dell'inerzia del carico e gli effetti di accoppiamento meccanico con gli altri giunti sarebbe poco giustificato

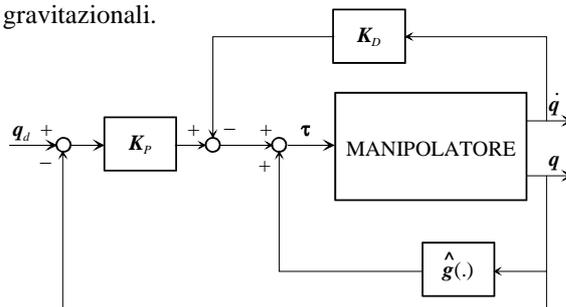


Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [19]

PD + compensazione di gravità



L'azione integrale del regolatore PID può dare problemi di stabilità in anello chiuso. Un'alternativa al controllo di tipo PID consiste nell'utilizzare un controllo PD decentralizzato corredato da un termine che compensa gli effetti gravitazionali.



K_p e K_D diagonali

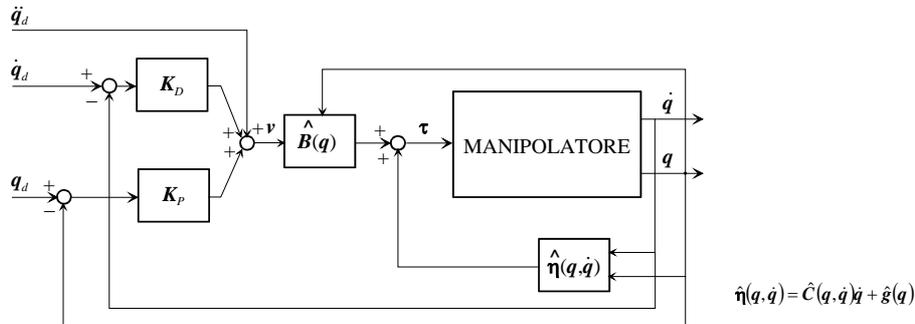
Si può dimostrare che con questo schema di controllo applicato ad un manipolatore rigido, se la stima del termine gravitazionale è perfetta, si ottiene un sistema in anello chiuso il cui punto di equilibrio (caratterizzato da errore nullo) è globalmente asintoticamente stabile.

Controlli automatici per la mecatronica - Applicazione alla robotica industriale - P. Rocco [20]

Controllo a dinamica inversa



Si può utilizzare il modello dinamico del manipolatore in uno schema di controllo centralizzato che idealmente compensa tutti gli effetti di accoppiamento meccanico tra i giunti:



Controllo a dinamica inversa



Le equazioni del sistema controllato sono:

$$\mathbf{B}(q)\ddot{q} + \boldsymbol{\eta}(q, \dot{q}) = \boldsymbol{\tau}$$

$$\boldsymbol{\tau} = \hat{\mathbf{B}}(q)\mathbf{v} + \hat{\boldsymbol{\eta}}(q, \dot{q})$$

$$\mathbf{v} = \ddot{q}_d + \mathbf{K}_D(\dot{q}_d - \dot{q}) + \mathbf{K}_P(q_d - q)$$

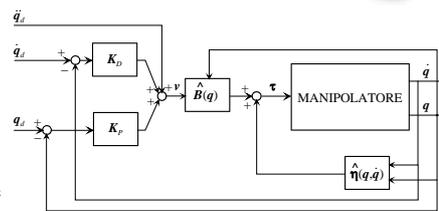
Se la conoscenza del modello matematico è perfetta ($\hat{\mathbf{B}}=\mathbf{B}$, $\hat{\boldsymbol{\eta}}=\boldsymbol{\eta}$), si ha:

$$\ddot{q} = \mathbf{v}$$

e quindi, detto $\mathbf{e}=\mathbf{q}_d-\mathbf{q}$,

$$\ddot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_D\dot{\mathbf{e}} + \mathbf{K}_P\mathbf{e} = \mathbf{0}$$

Il controllore PD “vede” un sistema completamente disaccoppiato costituito da doppi integratori, per i quali si può assegnare arbitrariamente la dinamica in anello chiuso.

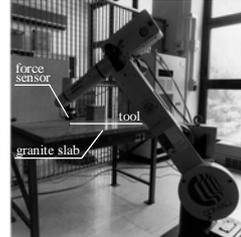


Interazione con l'ambiente



Un robot si trova comunemente ad interagire con l'ambiente di lavoro, manipolando oggetti o compiendo operazioni su superfici (si pensi a finitura, sbavatura, lavorazioni di parti meccaniche, assemblaggio).

L'ambiente circostante di norma pone dei vincoli di natura geometrica al moto del manipolatore: si sviluppa quindi un *moto vincolato*.



Utilizzare in queste condizioni una strategia di controllo puramente posizionale (la stessa adottata nel moto libero) può comportare problemi a seguito di errori di posizionamento e di incertezze nella pianificazione del compito, dovute ad una conoscenza non completa dell'ambiente.

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

Per questo occorre utilizzare dispositivi per la **misura delle forze** (e dei momenti): sono disponibili in commercio sensori che misurano tre componenti di forza e tre di momento.

Misure visive



Gli organi di visione artificiale sono sensori utili per la robotica poiché imitano il senso umano della vista e consentono misure dell'ambiente senza il contatto. Oggi esistono diversi controllori robotici che integrano sistemi di visione.

Tipicamente la visione e la manipolazione vengono combinate in una tecnica ad anello aperto: il sistema di visione guida il sistema di controllo posizionale.

Si parla in questo caso di tecniche **look-and-move**.



Alternativamente, le misure visive possono essere utilizzate direttamente in un anello di retroazione per realizzare il controllo di posizione in anello chiuso dell'organo terminale.

Si parla in questo caso di tecniche di **visual servoing**.