Definizioni ed esempi di sistemi meccatronici

Ing. N.I.Giannoccaro

Modelli di sistemi

Un sistema, nell'ambito delle applicazioni di tipo meccatronico, può essere definito come un insieme di componenti o di dispositivi, opportunamente disposti e connessi, che complessivamente realizzano una operazione e svolgono la funzione richiesta al sistema stesso.

Attraverso le interconnessioni transitano quelli che si definiscono 'segnali'. In generale si parla di segnali in ingresso o 'input' del sistema e segnali in uscita o 'output'.

Il sistema complessivo può, quindi, essere suddiviso in blocchi ed ogni blocco descrive la relazione tra le variabili d'ingresso e d'uscita del rispettivo componente (attuatore, sensore,controllore, processo). Collegando i singoli blocchi si ottiene la relazione funzionale per l'intero sistema.

Si definisce modello matematico di un sistema fisico reale una o più equazioni, di struttura matematica non necessariamente definita a priori, idonee a descrivere nel tempo e nello spazio il comportamento delle variabili fisiche a cui è affidata la descrizione dello stato del sistema.

↓

La prima operazione nel processo di modellizzazione di un sistema fisico reale consiste nel selezionare un numero di variabili idonee a descrivere, nello spazio e nel tempo, lo stato del sistema in oggetto.

Caratteristiche dei modelli

Il modello di un sistema reale è sempre imperfetto.

↓

Conviene modellizzare il sistema con un modello semplice in modo da conoscere i fattori determinanti che caratterizzano il sistema. Successivamente si può incrementare la difficoltà del modello. Le grandezze che sono presenti in un modello possono essere suddivise in:

-variabili indipendenti spaziali: sono le coordinate (x,y,z) del volume di contorno del sistema fisico rispetto ad un sistema cartesiano ortogonale;

-variabili indipendenti temporali:la variabile tempo t, definita in un opportuno intervallo reale;

-variabili di stato:l'insieme delle n variabili x_i ciascuna funzione delle variabili indipendenti (t,x,y,z) alle quali si affida nel modello matematico la descrizione dello stato fisico del sistema;

-parametri di identificazione: parametri liberi che caratterizzano il comportamento matematico e che vanno determinati per opportuno confronto tra il comportamento reale del sistema e le previsioni del modello stesso.

Classificazione dei modelli

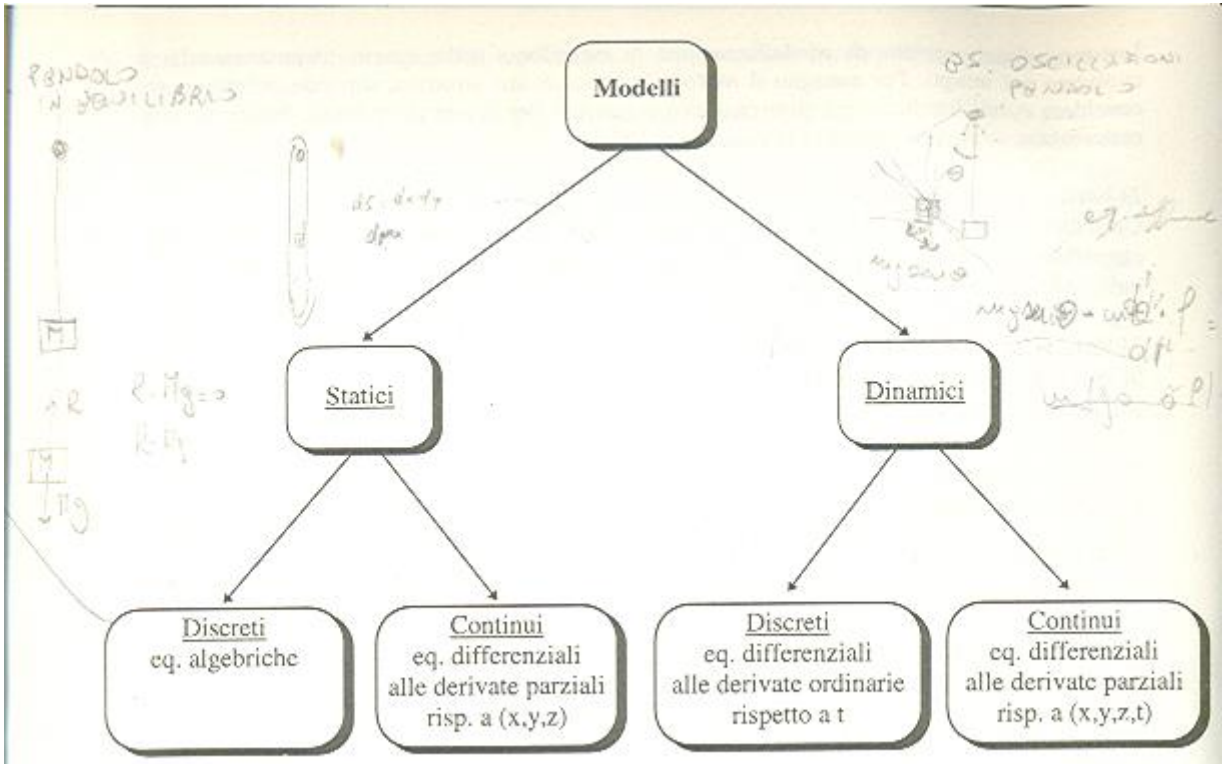


Figura 1.1 *Classificazione dei modelli*

Classificazione dei modelli

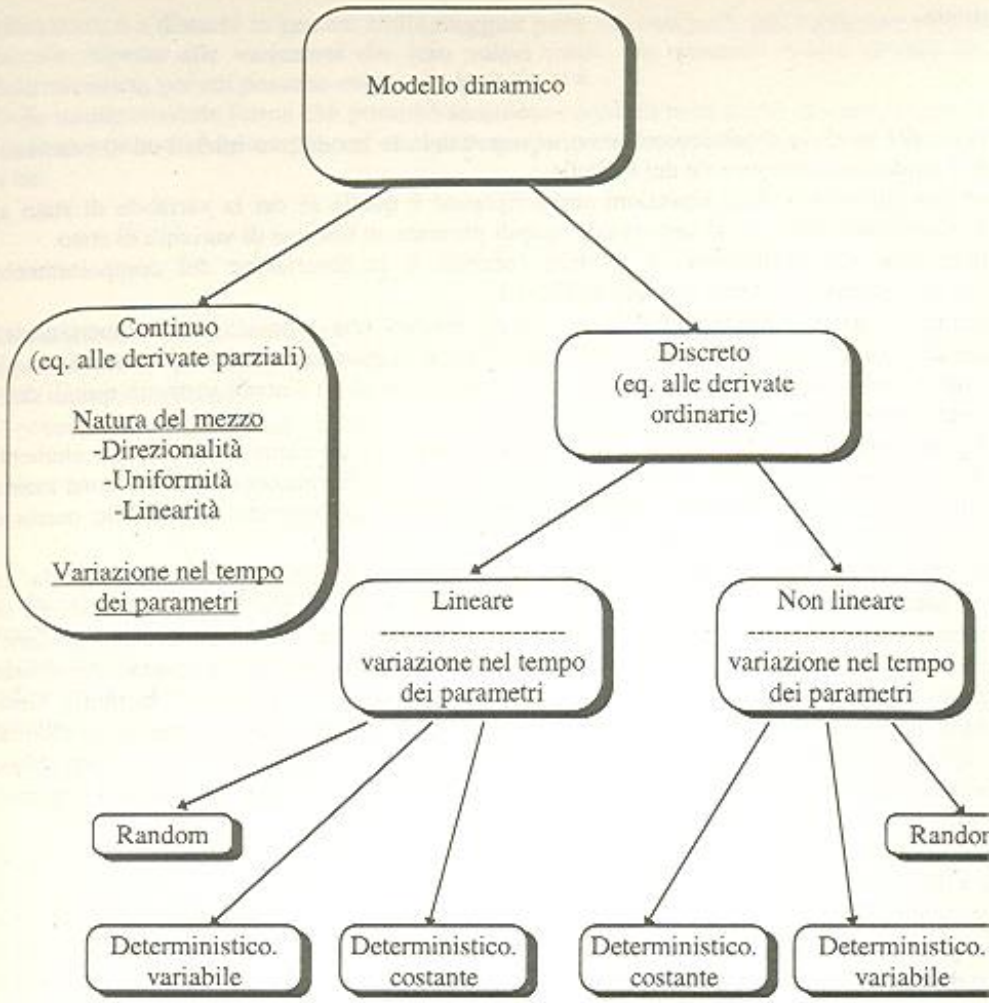


Figura 1.2 *Classificazione dei modelli dinamici*

Tipi di ingressi

Anche per i segnali di ingresso ad un sistema si può parlare di ‘modello di ingresso’.

Possono essere classificati nel seguente modo:

Ingressi deterministici (hanno una storia temporale definita da una formula matematica, da una curva grafica o da una tabella di dati).

- **periodici** (il segnale si ripete dopo un tempo pari ad un periodo).
- **transitori** (il segnale scompare o si arresta ad un valore costante dopo un intervallo di tempo).

Ingressi random (hanno un andamento nel tempo che varia continuamente e non può essere espresso da una formulazione matematica).

- **stazionari** (dividendo la storia temporale in intervalli uguali e analizzando le caratteristiche statistiche di tali intervalli, esse non variano nel tempo).
- **non stazionari** (non si riesce a trovare intervalli di tempo nei quali le caratteristiche statistiche non variano nel tempo).

Suddivisione del sistema in sottosistemi

Per modellizzare in modo modulare un sistema fisico complesso è utile procedere attraverso una serie di punti:

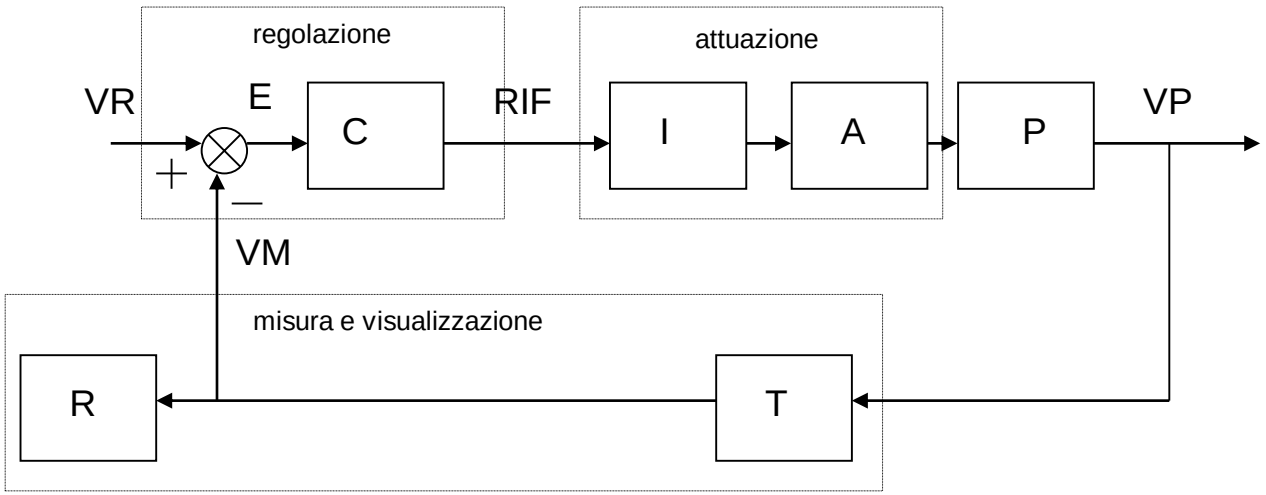
1) Suddivisione del sistema globale in un numero di sottosistemi pari alla quantità minima di sistemi fisicamente distinguibili;
2) Analisi e scelta delle grandezze in ingresso ed in uscita dal sottosistema;
3) Scrittura per ogni blocco di un numero di equazioni algebriche o differenziali funzione del numero degli stati e del numero delle uscite;
4) Assemblaggio dei blocchi.

Questo metodo è di validità generale e può descrivere sistemi di varia natura, lineari e non lineari.

Per i sistemi lineari è possibile agire impiegando strumenti quali la trasformata di Laplace o la matrice dello spazio degli stati.

Per i sistemi non lineari si possono utilizzare metodi più complessi o si può effettuare una procedura di linearizzazione rispetto ad un punto.

Schema di un dispositivo di attuazione controllato sottosistema di un sistema meccatronico



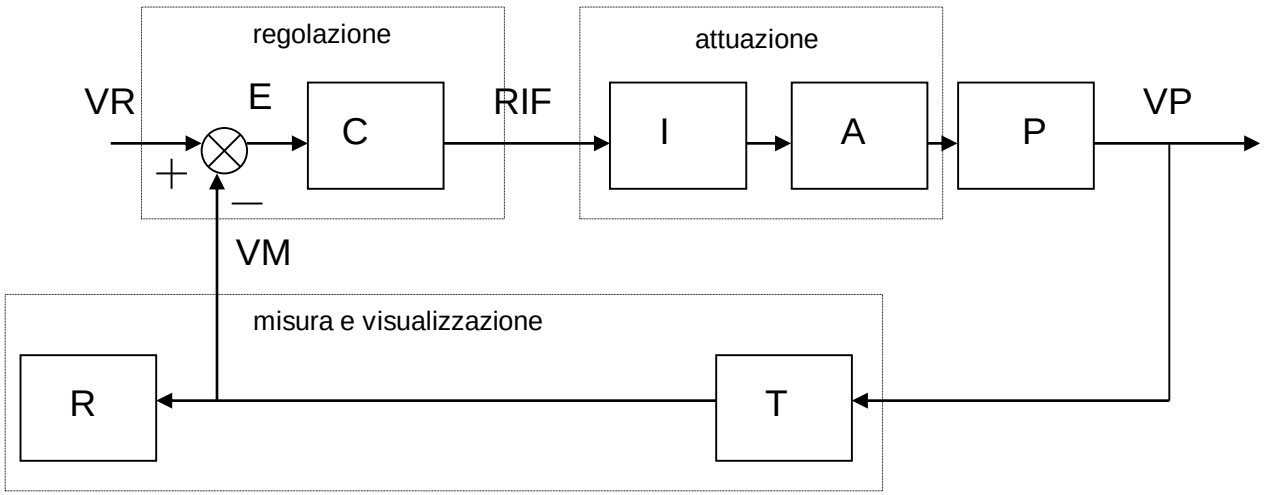
VR variabile richiesta
VP variabile di processo
VM variabile misurata
E errore
RIF riferimento all'elemento di attuazione
C compensatore
I interfaccia
A attuatore
P processo
T trasmettitore
R ricevitore

Un dispositivo di attuazione controllata è un sistema in cui è possibile controllare una specifica variabile di processo tramite organi di attuazione comandati da organi di regolazione e controllo.

Lo stato del processo è individuato dalla variabile controllata VP, le interfacce sono componenti che in funzione del segnale di riferimento che hanno in ingresso permettono di modulare la potenza erogata dagli attuatori. La retroazione non sempre è necessaria.

L'attuatore agisce sul processo attuando l'evoluzione della variabile VP. Essa entra nel blocco di misura e visualizzazione, essendo rilevata dal trasmettitore T (insieme di sensore, trasduttore e condizionatore) dal quale esce come variabile misurata VM a sua volta inviata ad un ricevitore R e, eventualmente, al blocco di regolazione.

Schema di un dispositivo di attuazione controllato sottosistema di un sistema meccatronico



VR variabile richiesta
VP variabile di processo
VM variabile misurata
E errore
RIF riferimento all'elemento di attuazione
C compensatore
I interfaccia
A attuatore
P processo
T trasmettitore
R ricevitore

La strumentazione utilizzata nei dispositivi ad attuazione controllata può essere raggruppata a seconda della funzione svolta:

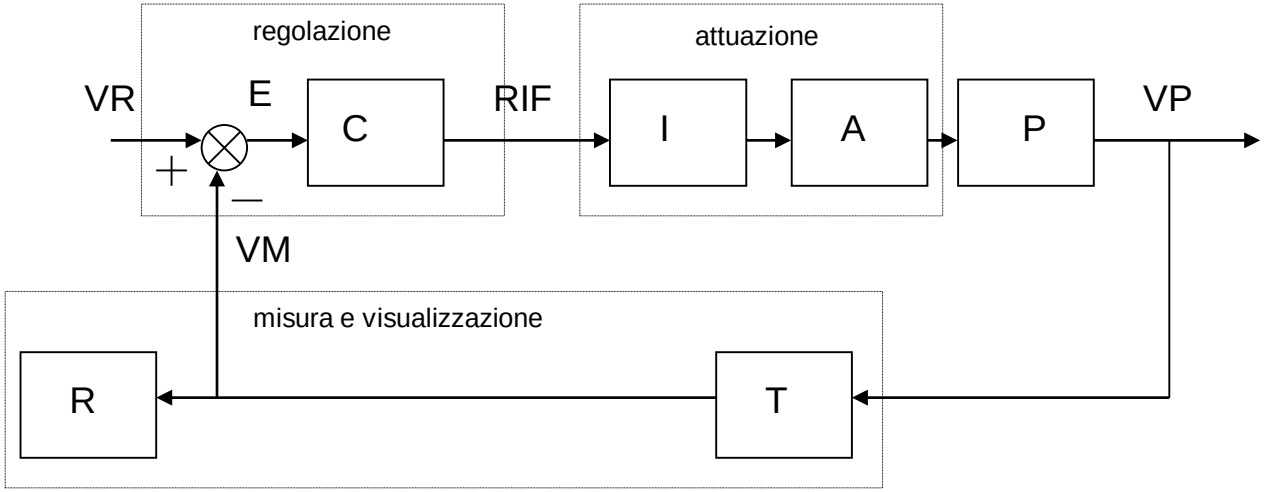
-**misura**: componenti che convertono le informazioni sullo stato del sistema e del processo (sensori,trasduttori,trasmetitori);

-**regolazione/controllo**:componenti che,partendo dalle informazioni raccolte, interagiscono con il processo (regolatori,controllori, interfacce,attuatori);

-**sorveglianza/supervisione:**componenti che permettono di osservare il funzionamento del processo (ricevitori,indicatori,interfacce,attuatori)

-**sicurezza:**componenti che garantiscono la sicurezza del processo (allarmi, blocchi, protezioni);possono interagire con regolazione ed attuatori.

Schema di un dispositivo di attuazione controllato sottosistema di un sistema meccatronico



VR variabile richiesta
VP variabile di processo
VM variabile misurata
E errore
RIF riferimento all'elemento di attuazione
C compensatore
I interfaccia
A attuatore
P processo
T trasmettitore
R ricevitore

Tutti questi componenti presentano una relazione tra ingresso ed uscita (caratteristiche statiche o dinamiche).

Spesso le caratteristiche dinamiche sono descritte da equazioni differenziali.

La possibilità di descrivere in modo matematico i vari componenti di un dispositivo di attuazione controllata e, più in generale, di un sistema meccatronico, consente in definitiva di giungere alla creazione di un modello completo del sistema, che risulta uno strumento indispensabile per una previsione delle prestazioni finali.

Esempio di progetto meccatronico:robot

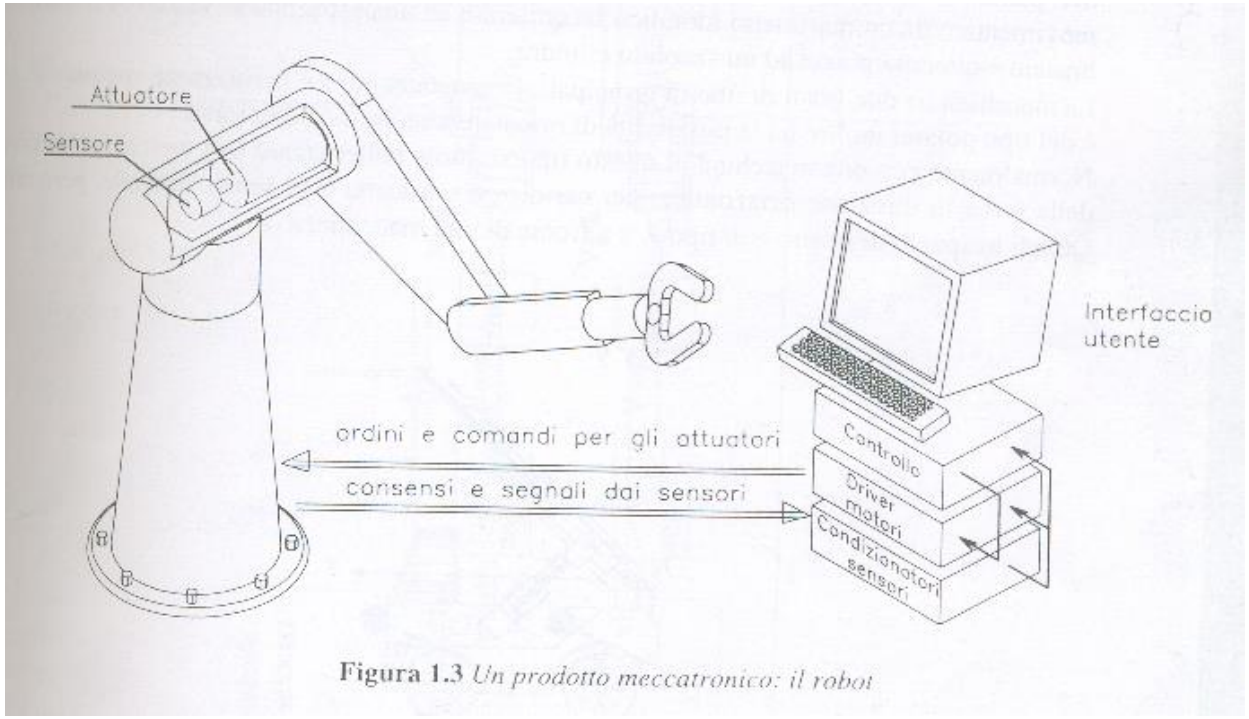


Figura 1.3 *Un prodotto meccatronico: il robot*

Attuazione del moto
Trasduttori
Unità di controllo e governo
Programma di lavoro
Interfaccia utente

Esempio di progetto meccatronico:carrello elevatore polare

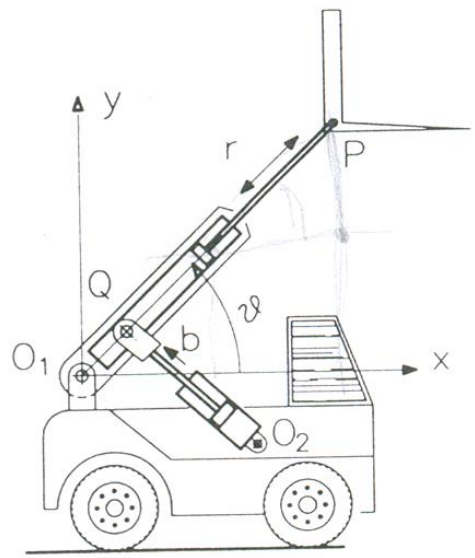


Figura 1.4 *Carrello elevatore polare*

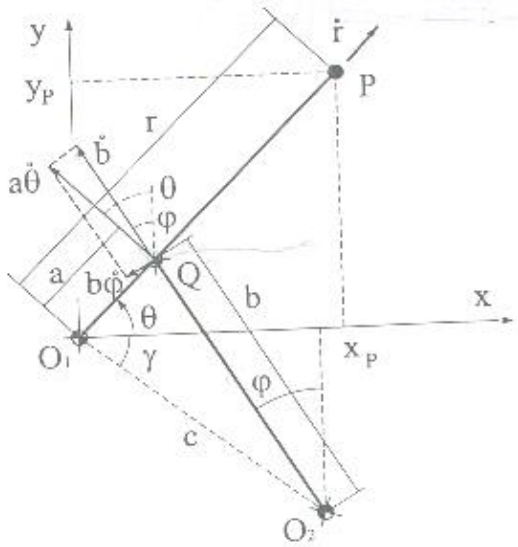


Figura 1.8 *Schema cinematico*

Valutando cinematicamente la posizione del pallet in funzione di r e θ

$$x_p = r\cos(\vartheta) \qquad y_p = r\sin(\vartheta) \longrightarrow \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -r sen(\vartheta) \\ sen(\vartheta) & r\cos(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix}$$

Esempio di progetto meccatronico:carrello elevatore polare

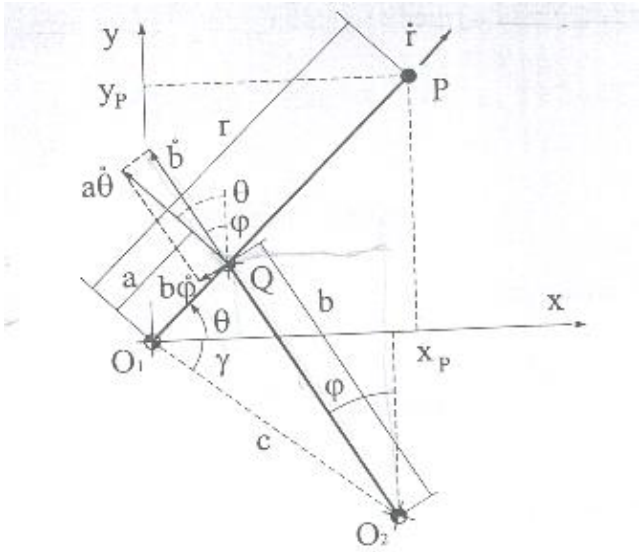


Figura 1.8 *Schema cinematico*

Dall'analisi cinematica del moto del punto Q

$$\dot{b} = a\dot{\vartheta}\cos(\vartheta - \varphi) \longrightarrow \dot{\vartheta} = \frac{\dot{b}}{a\cos(\vartheta - \varphi)}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & -r sen(\vartheta) \\ sen(\vartheta) & r\cos(\vartheta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{\vartheta} \end{bmatrix}$$

$$\downarrow$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\vartheta) & \dfrac{-r sen(\vartheta)}{a\cos(\vartheta - \varphi)} \\ sen(\vartheta) & \dfrac{r\cos(\vartheta)}{a\cos(\vartheta - \varphi)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = [J] \begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{b} \end{bmatrix}$$

J è la matrice che permette di passare dallo spazio dei giunti o degli attuatori allo spazio cartesiano.

$$\begin{bmatrix} \dot{r} \\ \dot{b} \end{bmatrix} = [J]^{-1} \begin{bmatrix} \dot{x}_p \\ \dot{y}_p \end{bmatrix}$$

In realtà θ e φ sono esprimibili in funzione di b dalla geometria del sistema (triangolo O_1,O_2,Q).

$$b^2 = a^2 + c^2 - 2ac\cos(\vartheta + \gamma)$$
$$c\cos(\gamma) - a\cos(\vartheta) = b sen(\varphi)$$

$$\longrightarrow$$

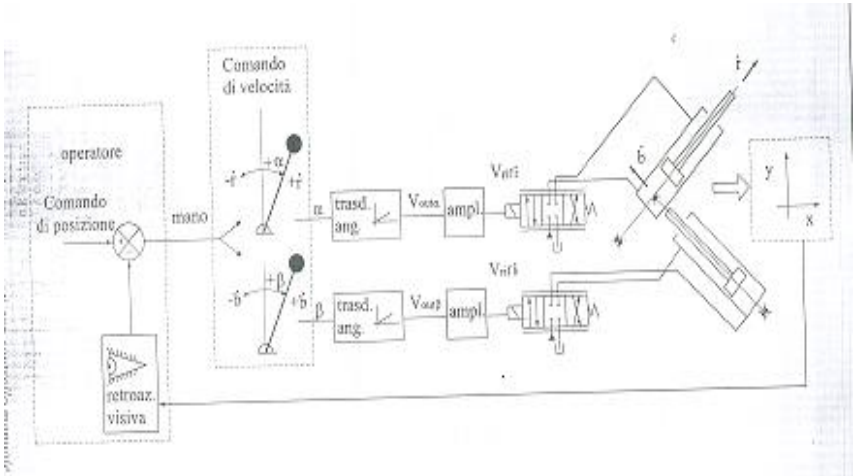
$$\vartheta = ar\cos\left(\frac{-b^2 + a^2 + c^2}{2ac}\right) - \gamma$$

$$\varphi = arcsen\frac{[c\cos(\gamma) - a\cos(\vartheta)]}{b}$$

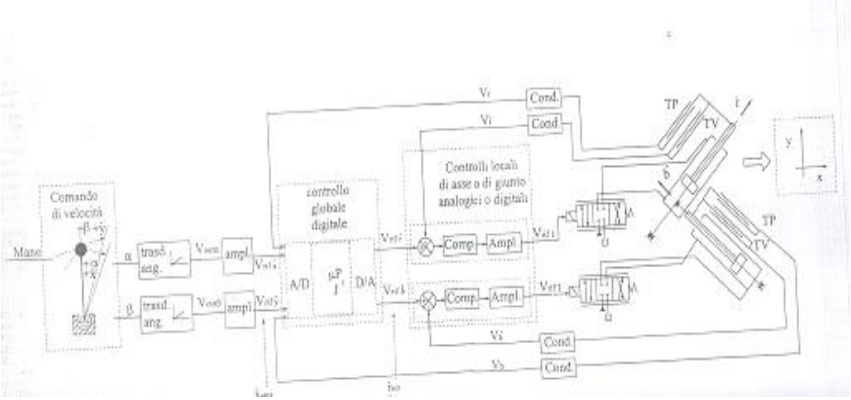
Schema funzionale del comando degli azionamenti per il carrello elevatore

Sulla base delle considerazioni precedenti si può tracciare lo schema funzionale del comando degli azionamenti ipotizzando una retroazione visiva dell'operatore che, pur operando nello spazio cartesiano del pallet (x_p,y_p), agisce comandando gli attuatori (r,b) per mezzo della matrice di trasformazione J^{-1}.

Sono presenti tutti gli elementi fondamentali di un sistema meccatronico:controlli, organi di interfaccia, trasduttori, attuatori.



Schema degli azionamenti con controllo manuale



Schema completo dei servosistemi di un carrello elevatore

Esempi di dispositivi controllati:servosistema idraulico di controllo posizione

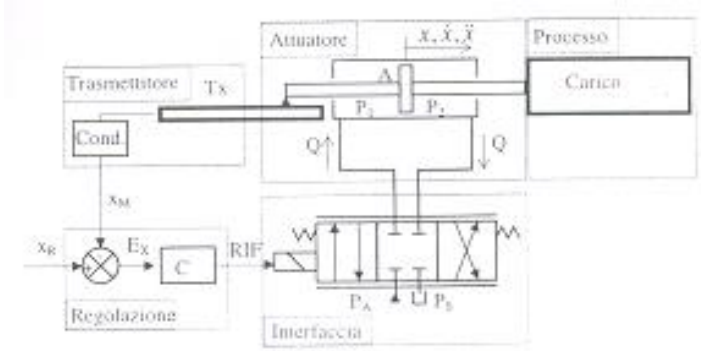


Figura 2.2 *Posizionatore idraulico*

Equazioni per il controllo:

$$Q = C_d \pi D x_v \cdot \sqrt{\frac{2(P_A - P_1)}{\rho}}$$

$$Q - A \cdot \dot{x} = \frac{V_1 dP_1}{\beta dt}$$

$$A \cdot \dot{x} - Q = \frac{V_2 dP_2}{\beta dt}$$

$$\frac{dV}{V} = \frac{-dP}{\beta}$$

Il driver della valvola determina una corrente in funzione del segnale RIF, che circola nel servosolenoide e produce una forza proporzionale ed essa.

C_d coefficiente di efflusso: rapporto tra portata marsica sperimentale e portata marsica teorica fluente attraverso la valvola, ρ densità di base

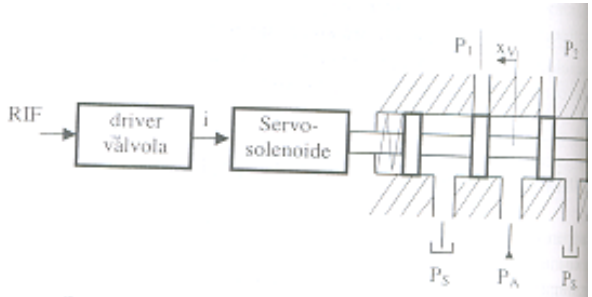


Figura 2.3 *Schema di valvola proporzionale idraulica in flusso*

X_v spostamento del cassetto elettrovalvola proporzionale RIF

Q proporzionale X_v

Velocità stelo proporzionale Q nell'ipotesi fluido perfettamente incomprimibile $\beta \rightarrow \infty$

⇒ RIF corrisponde velocità attuatore

Con un compensatore C puramente proporzionale se $E_x = x_R - x_M = 0$ ⇒ RIF=0

altimenti RIF≠0

Esempi di dispositivi controllati:controllo in anello aperto della pressione in un serbatoio

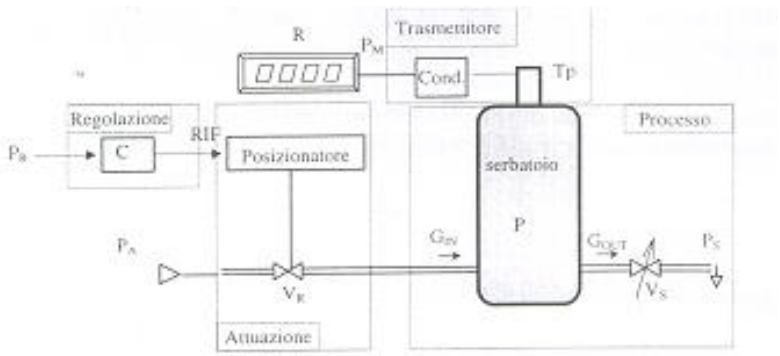


Figura 2.6 *Controllo in anello aperto della pressione in un serbatoio*

Equazioni per il controllo:

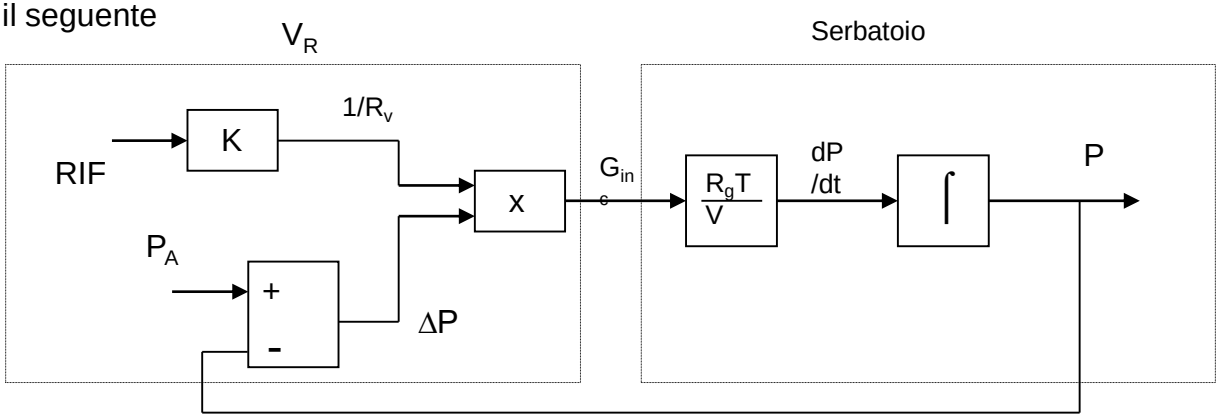
$$G_{IN} - G_{OUT} = \frac{VdP}{R_g T dt}$$

$$G_{IN} = A_v P_A \cdot \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_A}\right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_A}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \cdot \frac{2}{R_g \cdot T_A}}$$

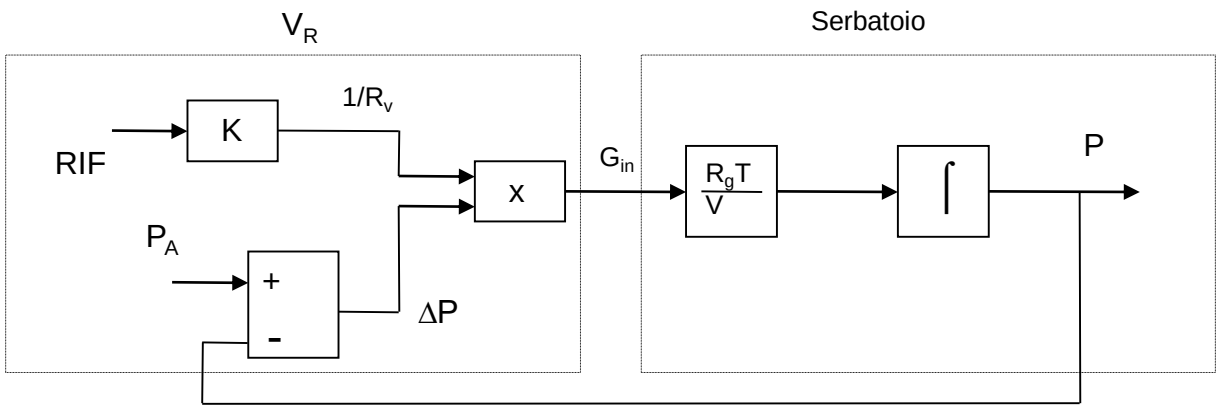
$$P_A - P = R_v \cdot G_{in}$$

$$\frac{1}{R_v} = K \cdot RIF$$

Ipotizzando una relazione lineare della portata della valvola con resistenza fluida R_V, considerando G_{out}=0 lo schema a blocchi è il seguente



Esempi di dispositivi controllati:controllo della pressione in un serbatoio parte 2



$$G_{IN} - G_{OUT} = \frac{VdP}{R_g T dt}$$

$$G_{IN} = A_v P_A \cdot \sqrt{\frac{k}{k-1} \cdot \left[\left(\frac{P}{P_A}\right)^{2/k} - \left(\frac{P}{P_A}\right)^{\frac{k+1}{k}} \right] \cdot \frac{2}{R_g \cdot T_A}}$$

$$P_A - P = R_v \cdot G_{in}$$

$$\frac{1}{R_v} = K \cdot RIF$$

Considerando un salto di pressione $\Delta P = P_A - P$ costante sulla valvola V_R e $G_{out}=0$ ottiene che il gradiente di pressione nel serbatoio è proporzionale al riferimento RIF. Nel compensatore si ottiene una legge che generi un segnale RIF funzione della pressione richiesta P_R.

$$\frac{dP}{dt} = \frac{G_{in} R_g T}{V} = \frac{P_A - P}{R_v} \frac{R_g T}{V} = \frac{\Delta P}{R_v} \frac{R_g T}{V} = \frac{K \Delta P R_g T}{V} RIF$$

$$RIF = \frac{V}{K \overline{\Delta P} R_g T} \frac{dP}{dt}$$

Esempi di dispositivi controllati:controllo di servoasse lineare elettrico

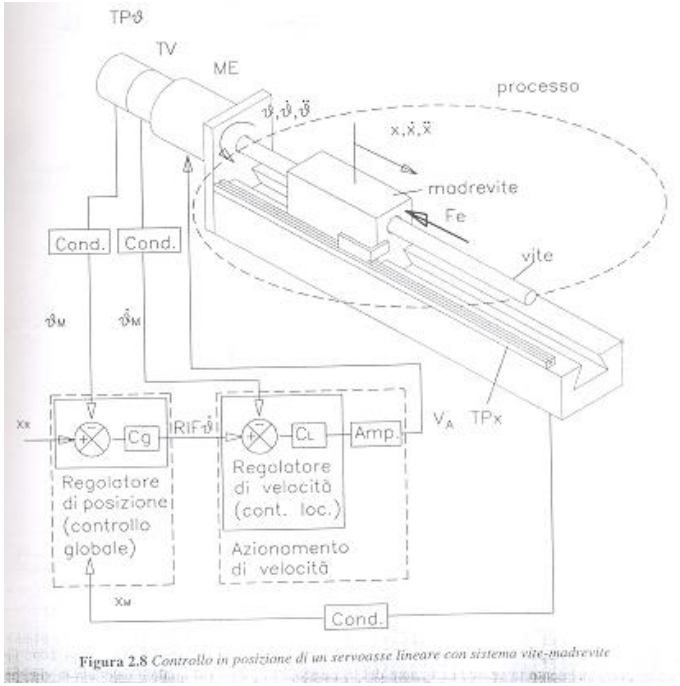
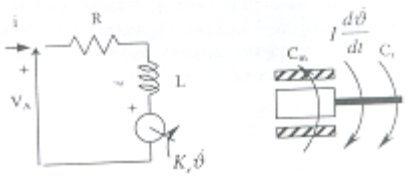


Figura 2.8 *Controllo in posizione di un servoasse lineare con sistema vite-madrevite*

Modello del motore elettrico



$$\begin{cases} V_A = Ri + L\dfrac{di}{dt} + K_e\dot{\vartheta} \\ C_m - I\dfrac{d\dot{\vartheta}}{dt} - C_r = 0 \\ C_m = K_c i \end{cases}$$

V_a tensione di armatura

i corrente di armatura

R resistenza di armatura

L induttanza di armatura

K_e costante di velocità

C_m coppia motrice

F_e forza applicata dall esterno

I momento di inerzia motore

C_R coppia resistente all'asse motore ,disturbo del sistema

K_c costante di coppia

Il servomotore elettrico è esso stesso un dispositivo di attuazione controllato costituito da un blocco di regolazione della velocità,da un attuatore (motore elettrico) e da un trasmettitore di velocità (trasduttore di velocità TV con segnale di uscita θ_m punto confrontato con il riferimento θ punto).

Sul servomotore è calettata una vite che fa muovere la madrevite su cui è applicata la forza resistente F_e e su cui si realizza il controllo di posizione.

Esempi di dispositivi controllati:controllo di servoasse lineare elettrico parte 2

Modello del sistema vite-madrevite

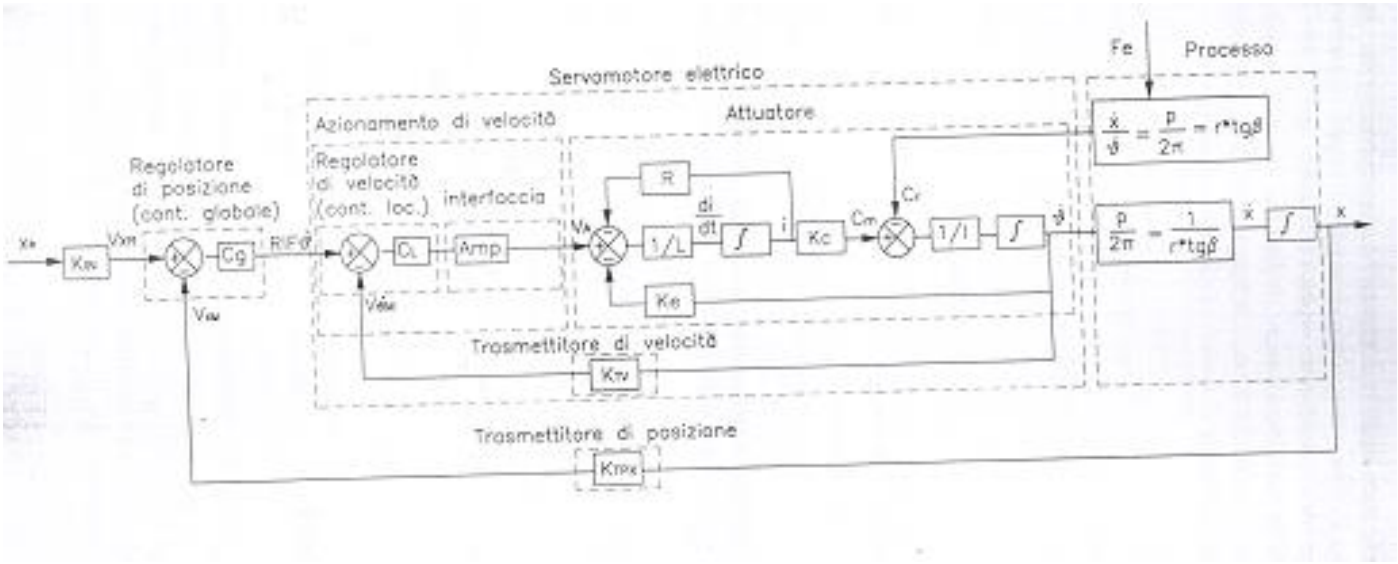
p passo elicoidale della vite,r raggio vite, β angolo di inclinazine

$$\Delta t = \frac{2\pi}{\dot{\vartheta}} = \frac{p}{\dot{x}}$$

$$p = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot tg(\beta)$$

Ipotizzando trascurabile la massa della madrevite e ridotte le forze di attrito con rendimento unitario, si può esprimere F_e in funzione di C_r.

$$F_e \dot{x} = C_r \dot{\vartheta}$$

$$\Longrightarrow \quad C_r = \frac{\dot{x}}{\dot{\vartheta}} F_e = \frac{p}{2\pi} F_e$$

Schema a blocchi complessivo