

Corso di Laurea in Ingegneria Informatica, Elettronica e delle
Telecomunicazioni

Lezione n. 1 di Fondamenti di Controlli Automatici
prof. Aurelio Piazzì



Il controllo attivo di un processo

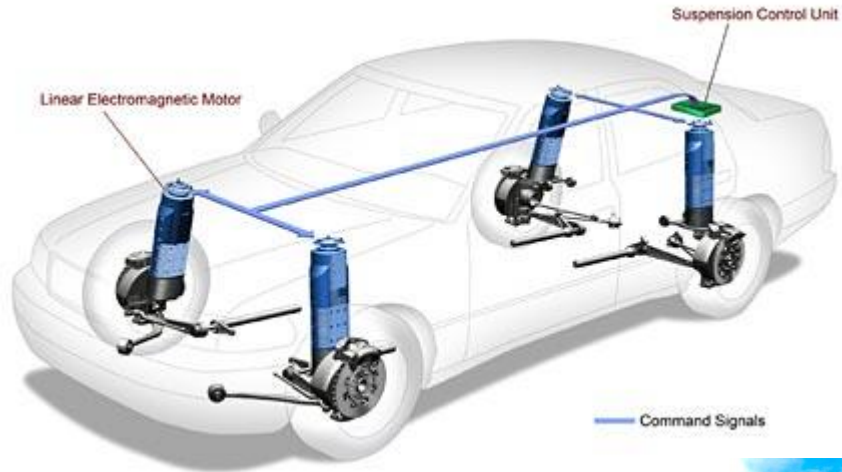
Università degli Studi di Parma – a.a. 2014-2015

- Analisi e sintesi di un **controllo attivo** (sistema automatico di controllo)
- Generalità sul concetto di **sistema dinamico** 
- I principi del controllo attivo: azione diretta (**feedforward**) e retroazione (**feedback**)



- Introduzione ai metodi di analisi e sintesi per il **controllo attivo** di un **processo**
- **Processo** = evoluzione nel tempo di ciò che caratterizza un **sistema** (fisico o non)
- **Controllo attivo**: strategia di controllo che prevede un'azione di comando esercitata sul processo

Esempi di controllo attivo



- Il controllo (attivo) risolve il problema di **imporre una modalità di funzionamento desiderato ad un processo** assegnato (il sistema controllato).



- **Modalità di funzionamento desiderato:** una **variabile** (scalare o vettoriale) del processo **coincida con una variabile (sca. o vett.) preassegnata** (segnale di riferimento o set-point):

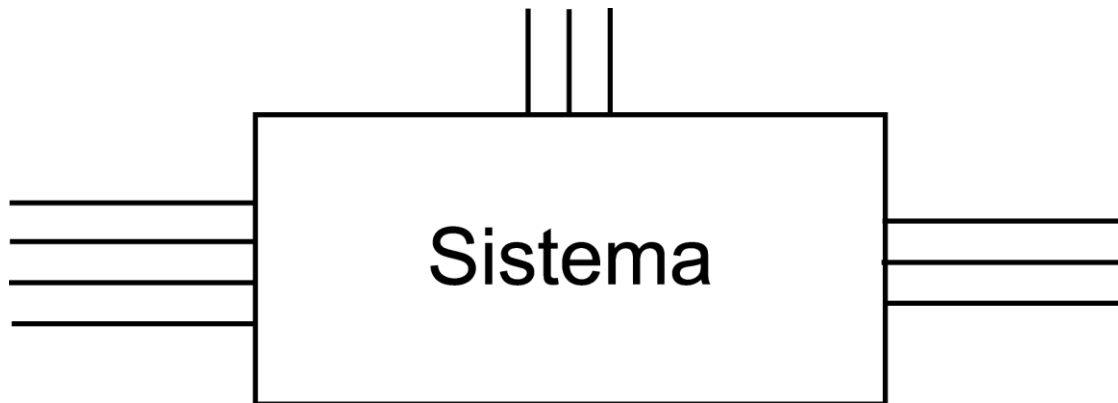
Variabile controllata = Segnale di riferimento

- Segnale di riferimento costante $\Rightarrow$ **problema di regolazione**
- Segnale di riferimento variabile $\Rightarrow$ **problema di asservimento** (*tracking problem*)

Generalità sul concetto di sistema

- (Possibile) definizione di **Sistema**: 

Un sistema è un complesso, normalmente costituito da più elementi interconnessi, in cui si possono distinguere grandezza soggette a variare nel tempo (le **variabili**).



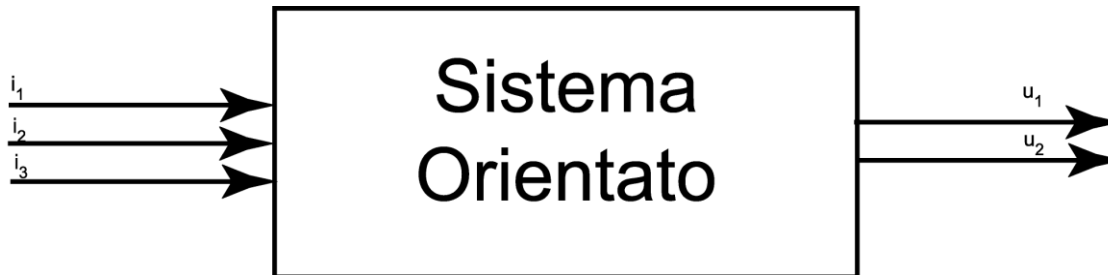
- Def. di **Segnale**: Le funzioni che rappresentano l'andamento delle variabili nel tempo si dicono segnali.

Terminologia per le variabili:

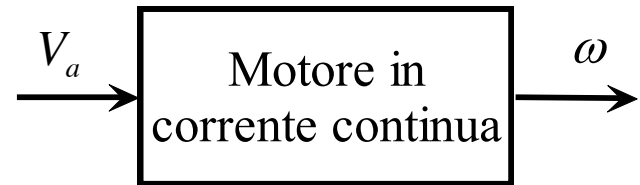
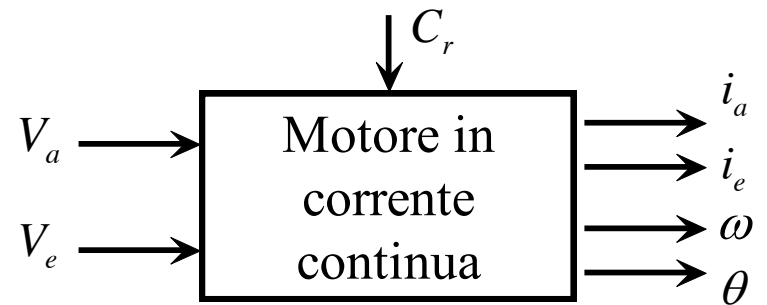
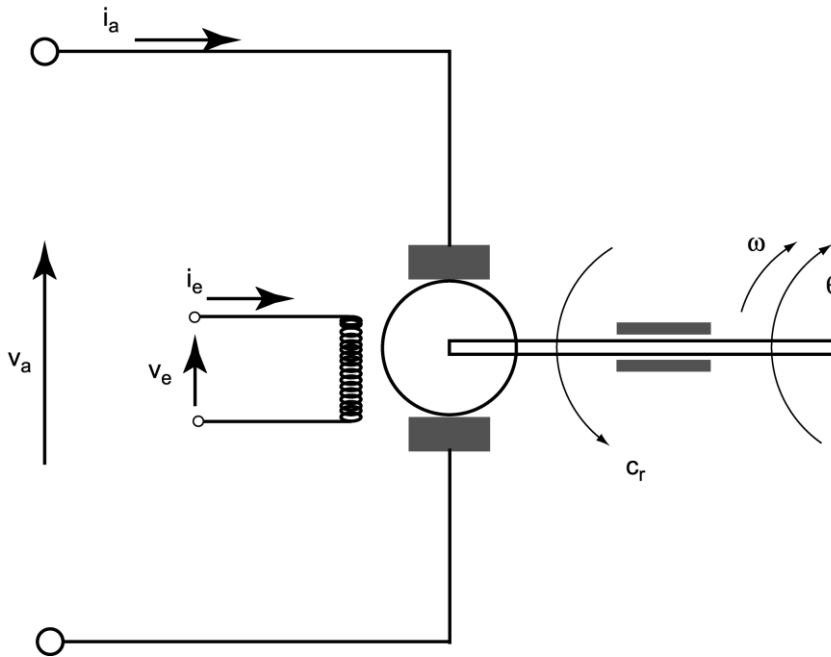
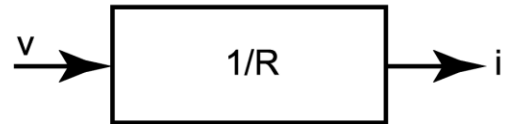
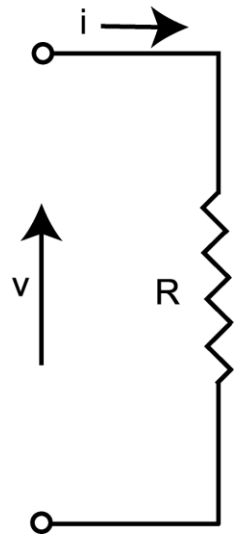
- Variabili controllate (o regolate)
- Variabile di riferimento
- Variabili manipolabili (o di controllo)
- Variabili non manipolabili (o disturbi)
- Variabili osservate (o misurate)

Nota: tratteremo solo segnali e sistemi deterministici ...

- La classificazione fondamentale delle variabili di un sistema le distingue in **variabili indipendenti (ingressi o cause)** e in **variabili dipendenti (uscite o effetti)**.
- Questa classificazione porta al concetto di **sistema orientato**:



Esempi: una resistenza elettrica, un motore in corrente continua,...

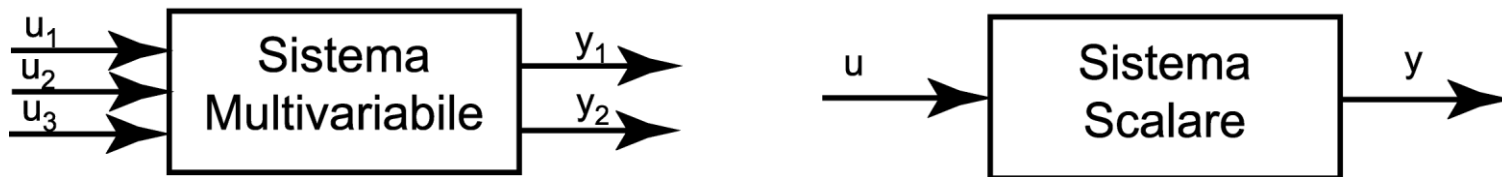


- def. di **Modello Matematico**:

Si dice m. m. la descrizione di un sistema, per esempio con equazioni e parametri, che permette di determinare i segnali delle uscite noti i segnali degli ingressi e le (eventuali) condizioni iniziali.

Esempi: equazioni differenziali, modelli operazionali, modelli frequenziali, modelli di stato,...

- Sistemi multivariabili (MIMO) e scalari (SISO):



Ci occuperemo di sistemi scalari a tempo continuo

(ed anche a tempo discreto): $u(t) \in \mathbb{R}$, $y(t) \in \mathbb{R}$, $t \in \mathbb{R}$ ($t \in \mathbb{Z}$)

- def. **Sistema statico**

Un sistema è detto statico (o puramente algebrico) quando l'uscita al tempo t dipende esclusivamente dall'ingresso al medesimo tempo t .



$$\left[\exists f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R} \quad \ni \quad y(t) = f(u(t)) \quad \forall t \in \mathbb{R} \right]$$

Un sistema statico è descritto da $y = f(u)$.

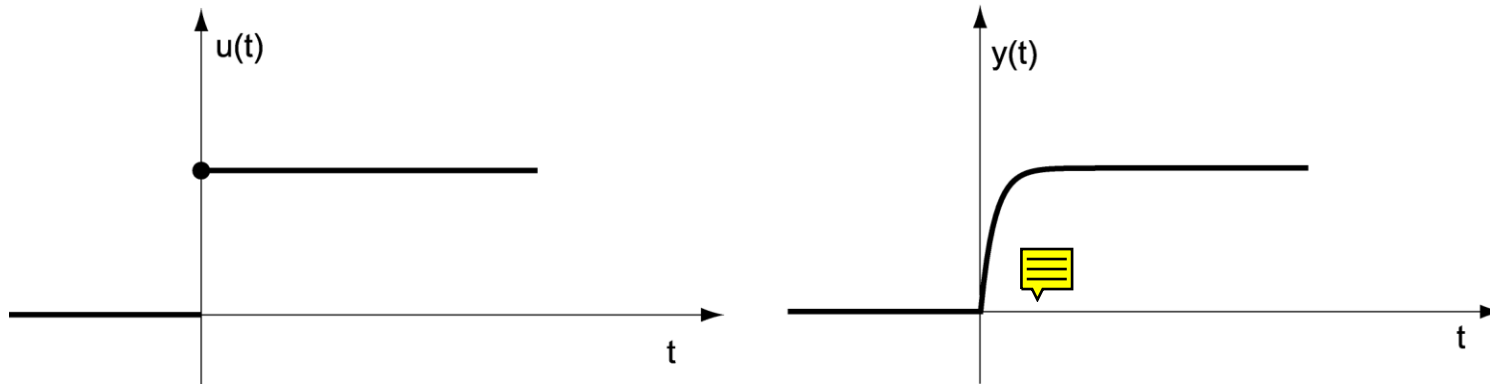
- def. **Sistema dinamico**

Un sistema è detto dinamico quando l'uscita al tempo t dipende dal segnale dell'ingresso sull'intervallo $(-\infty, t]$.

$$\left[\exists F : \mathcal{U} \rightarrow \mathcal{Y} \quad \ni \quad y(t) = F\left(u(\cdot)|_{(-\infty, t]}\right) \quad \forall t \in \mathbb{R} \right] \quad \text{☰}$$

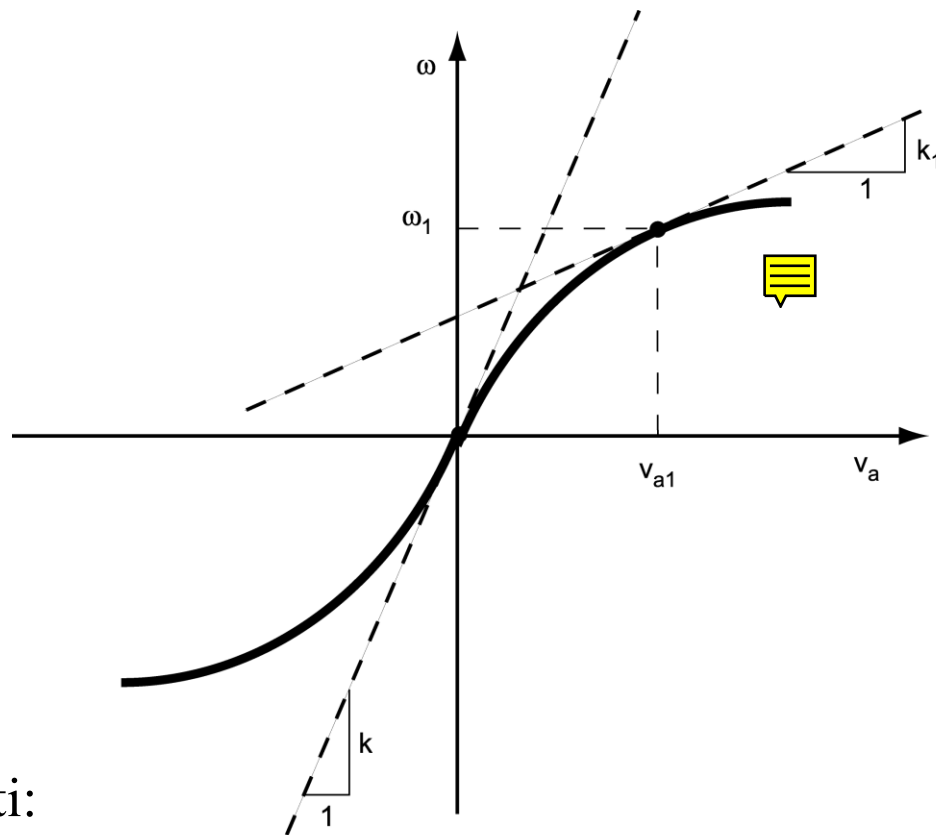
Sono **sistemi con memoria**: sono descrivibili con un funzionale o, più comunemente, da una equazione differenziale...

Esempio del comportamento di un sistema dinamico:



Per i sistemi dinamici si introducono i concetti di **sistema in quiete** (o in equilibrio) e di **sistema in condizioni asintotiche** (o stazionarie) o sistema a regime...

Esempio - Modello statico di un motore in corrente continua in condizioni stazionarie: $\omega = f(V_a)$, è la cosiddetta caratteristica statica del motore in c.c.



Modelli linearizzati:

in un intorno dell'origine $(0,0)$: $\omega = k \cdot V_a$, $k := \left. \frac{df}{dV_a} \right|_{V_a=0}$

in un intorno di (V_{a1}, ω_1) : $\omega' = k_1 \cdot V_a'$, $k_1 := \left. \frac{df}{dV_a} \right|_{V_a=V_{a1}}$, $\omega' := \omega - \omega_1$, $V_a' := V_a - V_{a1}$

def.: $\mathcal{B}$, insieme dei behaviors o behavior

$\mathcal{B}$ è l'insieme di tutte le possibili coppie causa-effetto associate ad un sistema:

☞ $\mathcal{B} := \{(u(t), y(t)) : y(t) \text{ è l'uscita del sistema corrispondente all'ingresso } u(t), \quad t \in (-\infty, +\infty)\}$

$u(t)$ e $y(t)$ tipicamente appartengono agli spazi funzionali delle funzioni continue o differenziabili a tratti...

def. **Linearità**

Un sistema si dice lineare quando soddisfa la proprietà di sovrapposizione degli effetti: $\forall (u_1, y_1), (u_2, y_2) \in \mathcal{B} \text{ e } \forall \alpha_1, \alpha_2 \in \mathbb{R} \Rightarrow$

$$\alpha_1(u_1, y_1) + \alpha_2(u_2, y_2) := (\alpha_1 u_1 + \alpha_2 u_2, \alpha_1 y_1 + \alpha_2 y_2) \in \mathcal{B}$$



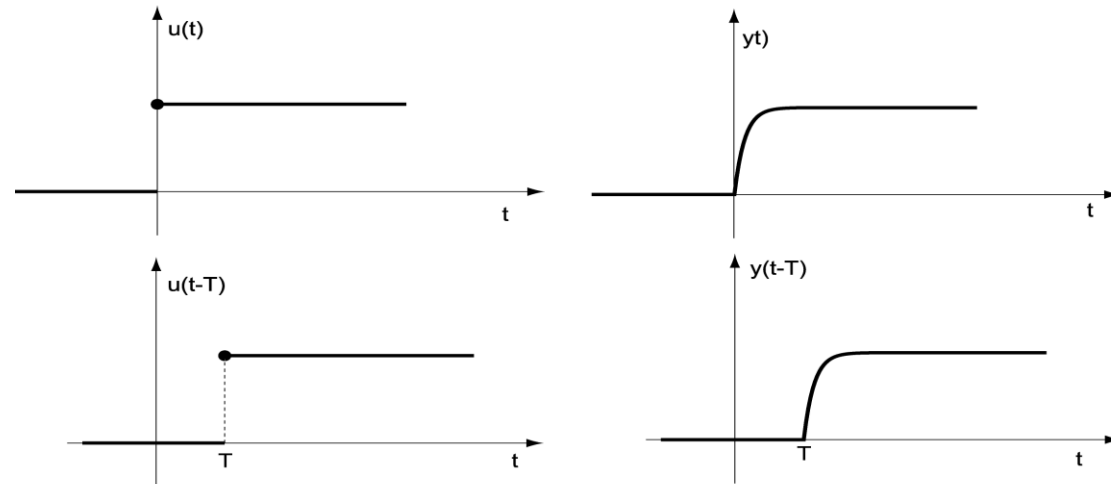
def. Stazionarietà

Un sistema si dice stazionario (invariante nel tempo) se $\forall T \in \mathbb{R}$:

$$(u(t), y(t)) \in \mathcal{B} \Rightarrow (u(t-T), y(t-T)) \in \mathcal{B}$$



Esempio:



- Ambito di studio: sistemi dinamici lineari, stazionari e a tempo continuo.

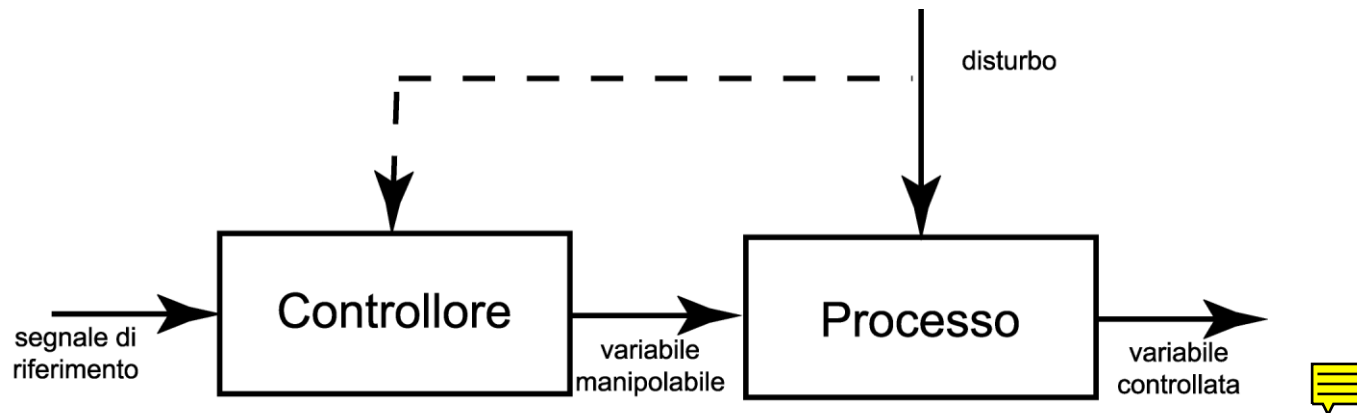
Controllo ad azione diretta e in retroazione

Il controllo (attivo) è distinguibile in

- controllo ad **azione diretta** (*feedforward*) o ad anello aperto o in catena aperta;
- controllo in **retroazione** (*feedback*) o ad anello chiuso o in catena chiusa.

Controllo ad Azione diretta (FEEDFORWARD): quando l'azione di comando dipende da

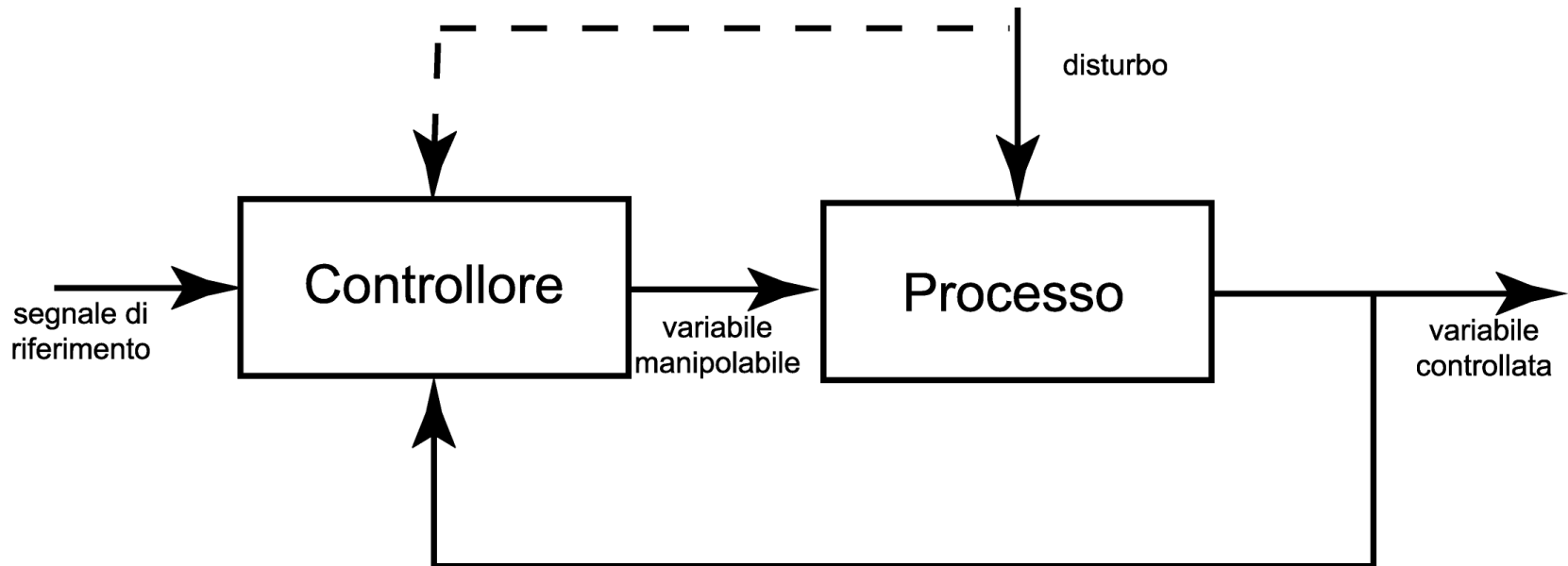
1. obiettivo perseguito (p.e. segnale di riferimento)
2. informazioni sul modello del sistema controllato
3. eventualmente, ingressi agenti sul sistema contr. (disturbi)



Schema a blocchi di un sistema di controllo ad azione diretta

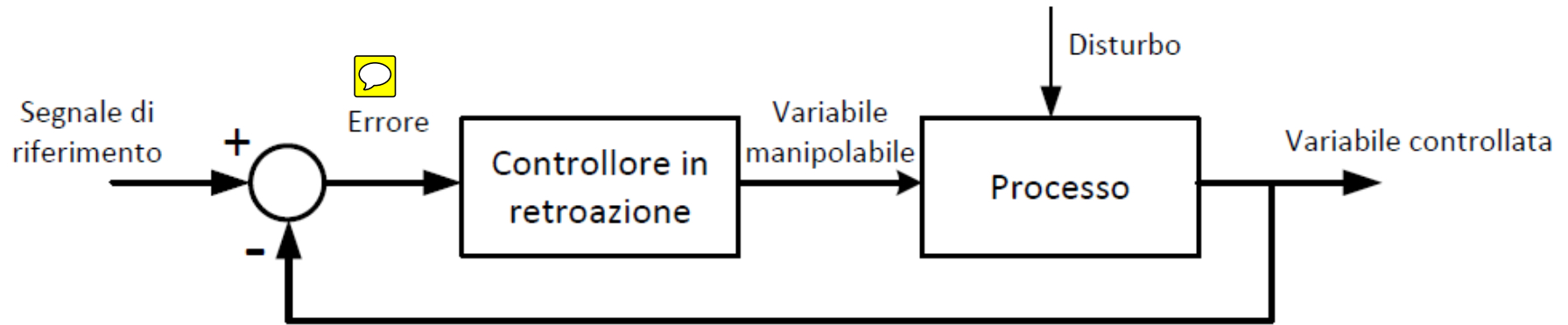
Controllo in Retroazione (FEEDBACK): quando l'azione di comando dipende da

1. obiettivo perseguito (p.e. segnale di riferimento)
2. informazioni sul modello del sistema controllato
3. eventualmente, ingressi agenti sul sistema contr. (disturbi)
4. **variabile controllata**

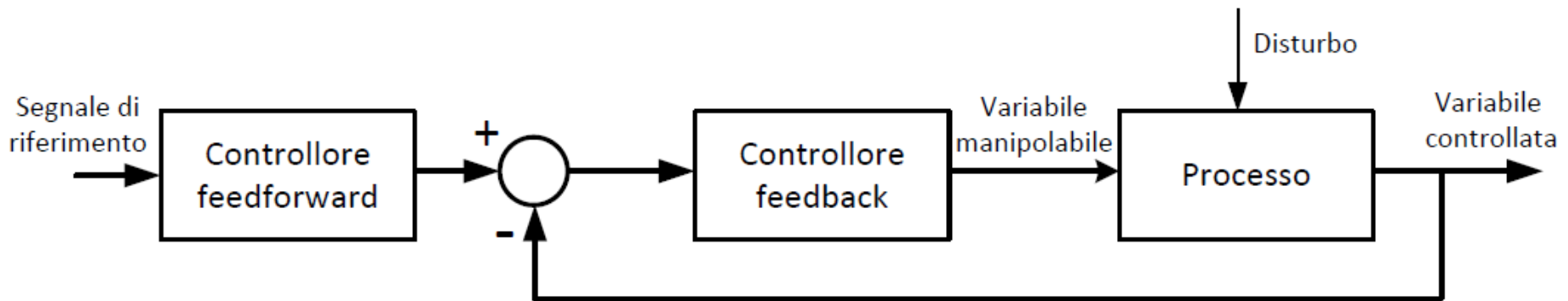


Schema a blocchi di sistema di controllo in retroazione

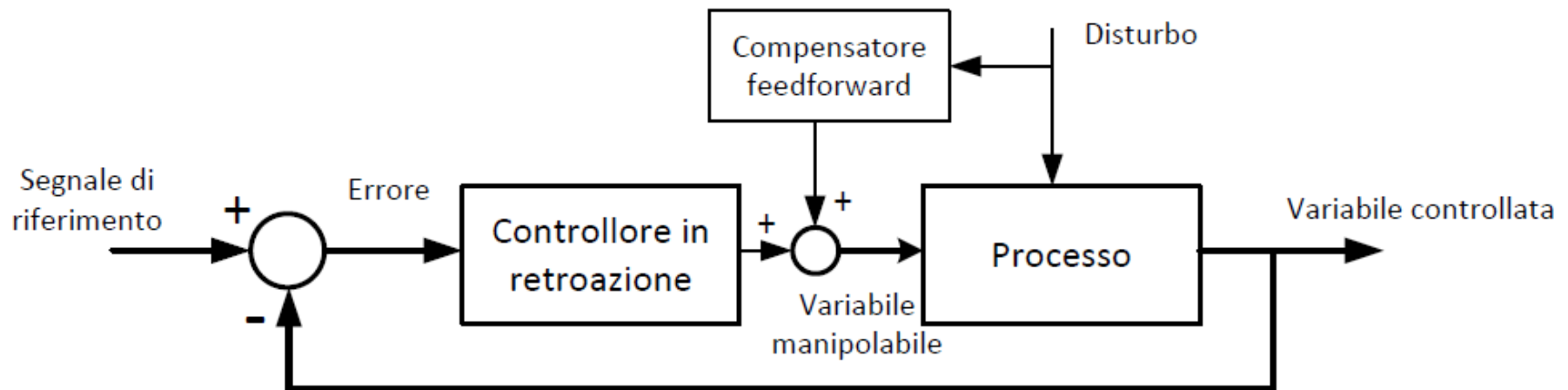
Lo schema generale di controllo in retroazione comprende i seguenti schemi:



Controllo feedback sull'errore di inseguimento



Controllo feedforward/feedback a due gradi di libertà (*two-degrees-of-freedom control*, Horowitz 1963)



Controllo feedback sull'errore di inseguimento con compensazione feedforward del disturbo

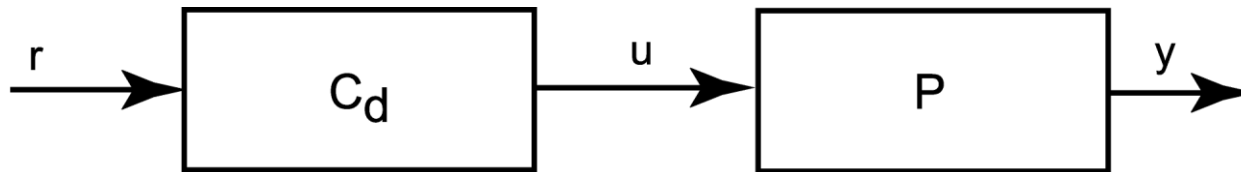
Confronto fra il controllo ad azione diretta e in retroazione

Problema: Regolazione di un processo statico di guadagno P

y = uscita del processo (v. controllata);

u = ingresso del processo (v. di controllo); r = segnale di riferimento. 

- Sistema di controllo ad anello aperto:

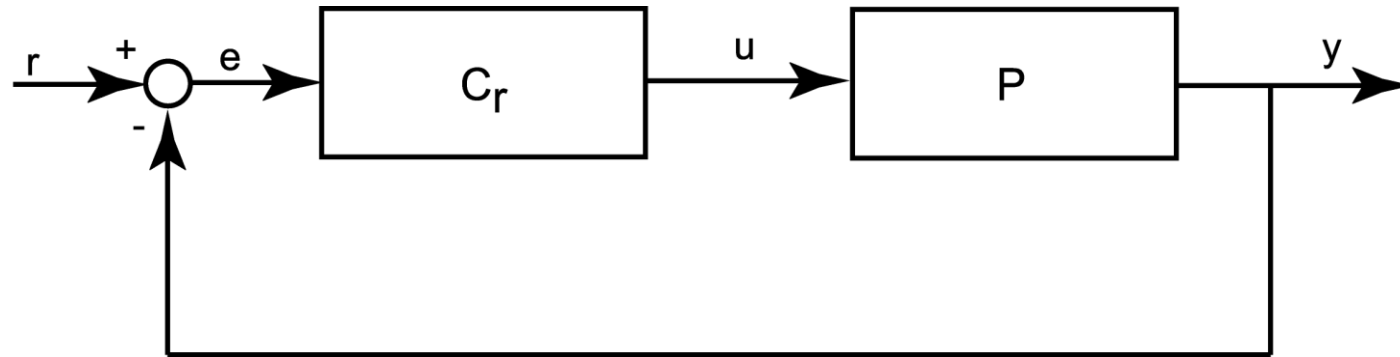


 $y = Pu = P(C_d r) = PC_d r$

$$\text{dall'obiettivo } r(t) \equiv y(t) \Rightarrow C_d = \frac{1}{P}$$

Il controllore è sintetizzato come **sistema inverso** del processo

- Sistema di controllo ad anello chiuso:



$$\{e = r - y, y = PC_r e\} \Rightarrow y = PC_r(r - y)$$

$$y = \frac{PC_r}{1 + PC_r} \cdot r$$

L'obiettivo $y(t) \equiv r(t)$ è irraggiungibile ma si può ottenere $y(t) \cong r(t)$

progettando C_r affinché $PC_r \gg 1$: $C_r \gg \frac{1}{P}$

Disamina delle strategie di controllo in condizioni perturbate



$$P \rightarrow \tilde{P} = P + \Delta P, \text{ per esempio } \Delta P = \pm \frac{1}{5} P$$

- nel controllo ad azione diretta

$$y = \tilde{P}C_d r = (P + \Delta P) \frac{1}{P} r = r \pm \frac{1}{5} r \Rightarrow \text{errore in \% } \pm 20$$

- nel controllo in retroazione

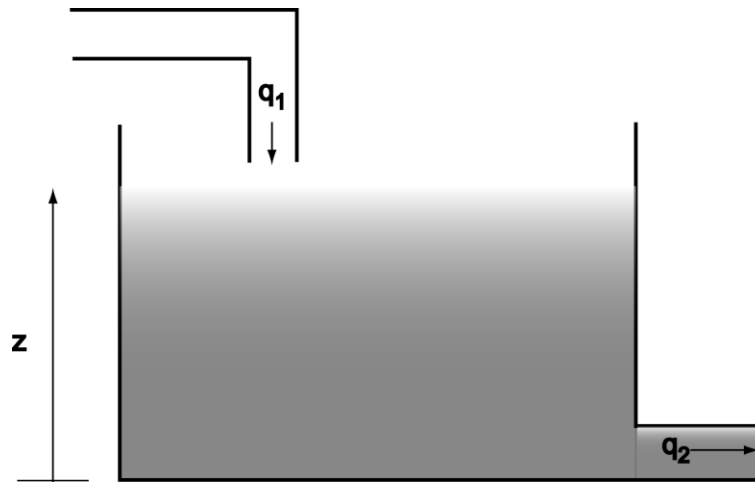
si ipotizza $PC_r = 200 \Rightarrow C_r = \frac{200}{P}, T_{yr} := \frac{PC_r}{1 + PC_r} \cong 0,995$ 

(in condizioni nominali, l'errore di **inseguimento** è circa 0,5%)

$$\tilde{T}_{yr} = \frac{\tilde{P}C_r}{1 + \tilde{P}C_r} = \frac{PC_r + \Delta PC_r}{1 + PC_r + \Delta PC_r} \in [0,9959; 0,9938]$$

l'errore di inseguimento è compreso fra 0,415% e 0,621% 

- **Conclusione:** Il controllo in retroazione è **efficace anche in presenza di perturbazioni sul processo**. Parimenti, si potrebbe dimostrare che il controllo in retroazione è efficace anche in presenza di disturbi agenti sulla variabile controllata.
- Per alcuni problemi di regolazione il controllo in retroazione è l'unico possibile ... es.: regolazione di livello in un serbatoio



Equazione differenziale del "processo" o "impianto": $\frac{dz}{dt} = \frac{1}{A}(q_1 - q_2)$

$q_1 \equiv$ portata di acqua in ingresso (variabile di controllo)

$q_2 \equiv$ portata di acqua in uscita, $q_2 = \alpha\sqrt{z}$

$$\Rightarrow \dot{z}(t) = \frac{1}{A}(q_1(t) - \alpha\sqrt{z(t)})$$

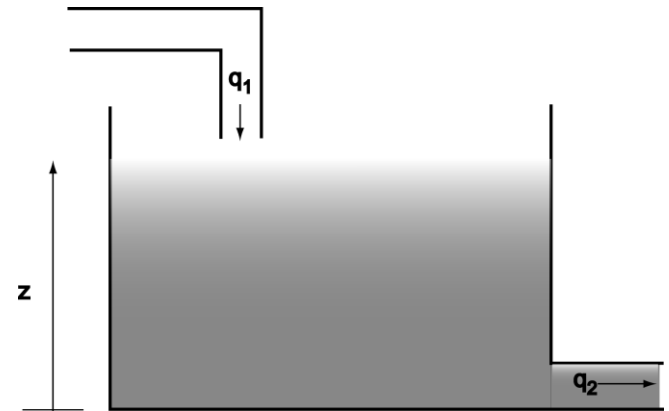
- Il controllo ad azione diretta

$$q_1(t) = \alpha\sqrt{r}$$

sicuramente fallisce (fenomeno di deriva):

$$q_2(t) = \alpha\sqrt{z(t)} + d(t) \quad \left(\text{disturbo per "correggere" il modello nominale } \alpha\sqrt{z(t)}\right)$$

$$\Rightarrow \dot{z}(t) = \frac{1}{A}(q_1(t) - \alpha\sqrt{z(t)} - d(t))$$



- Il controllo in retroazione può risolvere il problema... per esempio

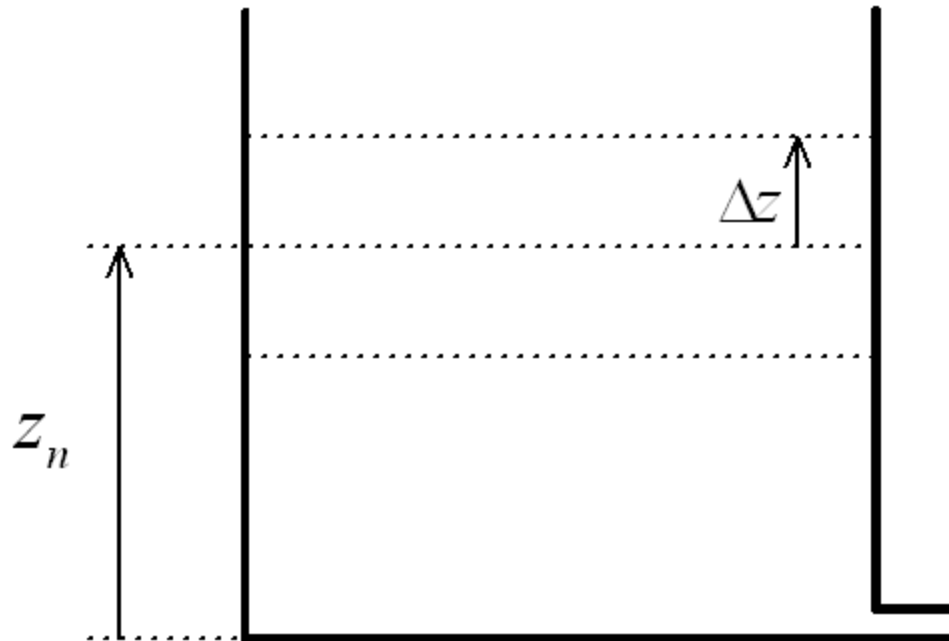
$$q_1(t) = C_r (r - z(t)) + \alpha \sqrt{r}$$

o più semplicemente

$$q_1(t) = C_r (r - z(t)) + \alpha \sqrt{z_n}$$

$z_n \equiv$ valore medio dei livelli desiderati

$$r \in [z_n - \Delta z, z_n + \Delta z]$$

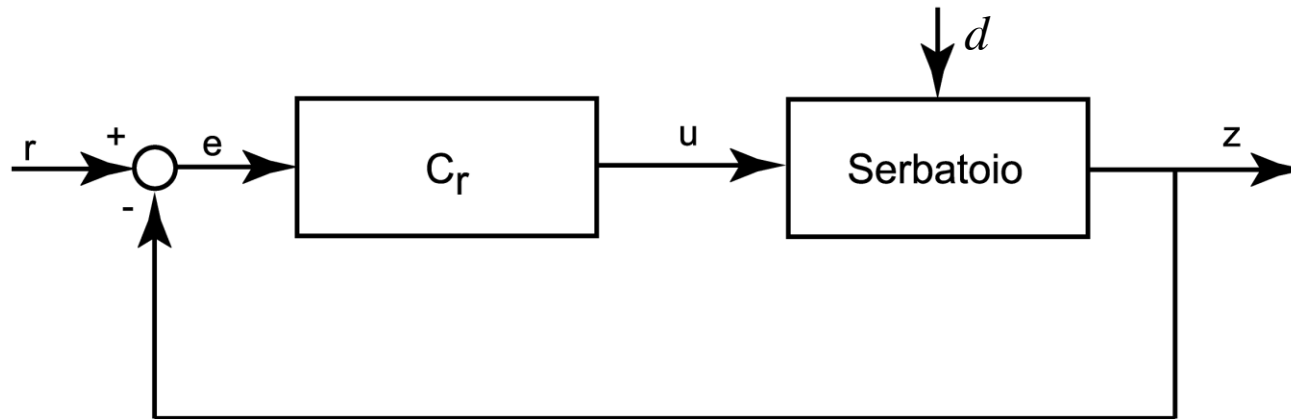


$$q_1(t) = C_r (r - z(t)) + \alpha \sqrt{z_n}$$

- Ridefinendo la variabile di controllo come $u(t) := q_1(t) - \alpha \sqrt{z_n}$,

$$\Rightarrow u(t) = C_r (r - z(t))$$

e la legge di retroazione corrisponde allo schema di figura

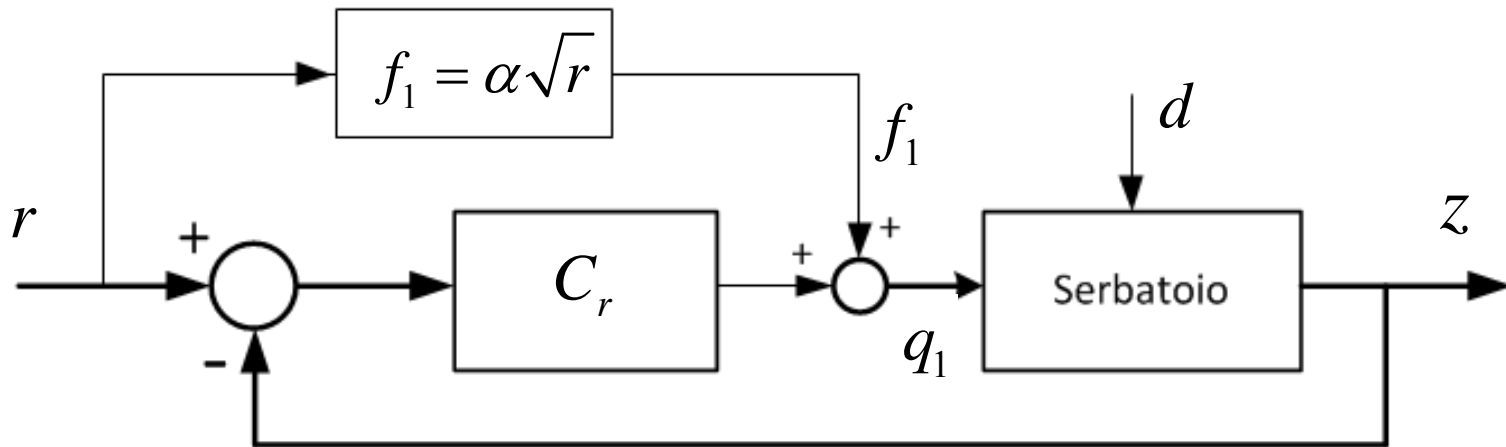


$$\text{Serbatoio: } \dot{z}(t) = \frac{1}{A} \left(u(t) + \alpha \sqrt{z_n} - \alpha \sqrt{z(t)} - d(t) \right)$$

- Se utilizzassimo la legge di controllo

$$q_1(t) = C_r (r - z(t)) + \alpha \sqrt{r}$$

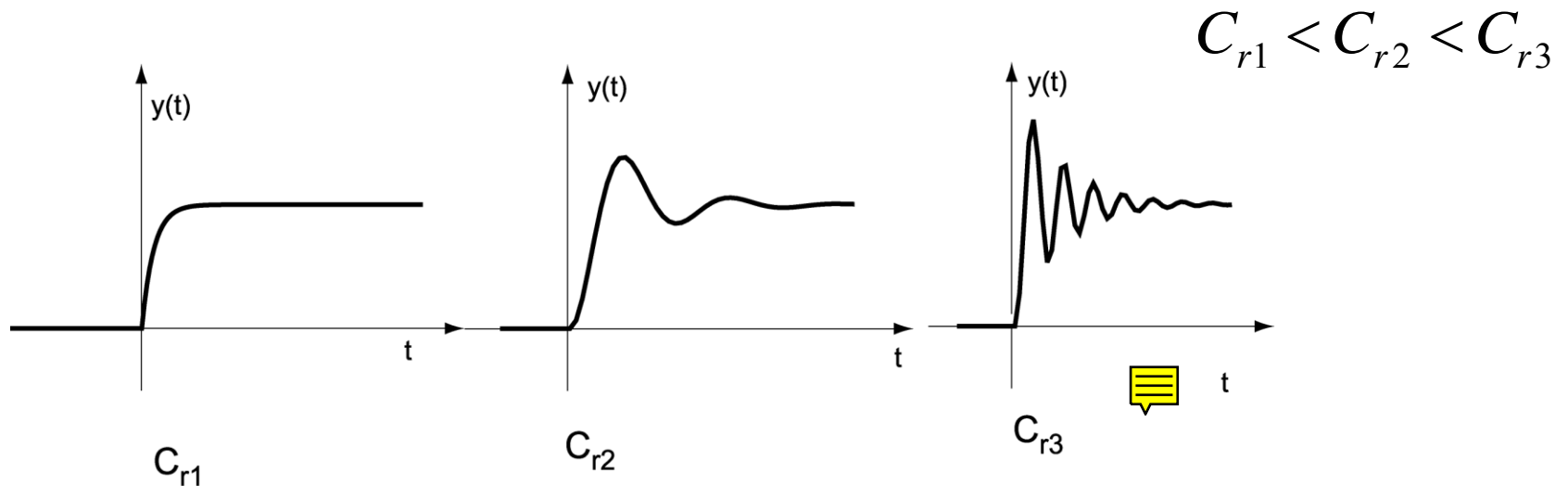
che schema otterremmo?



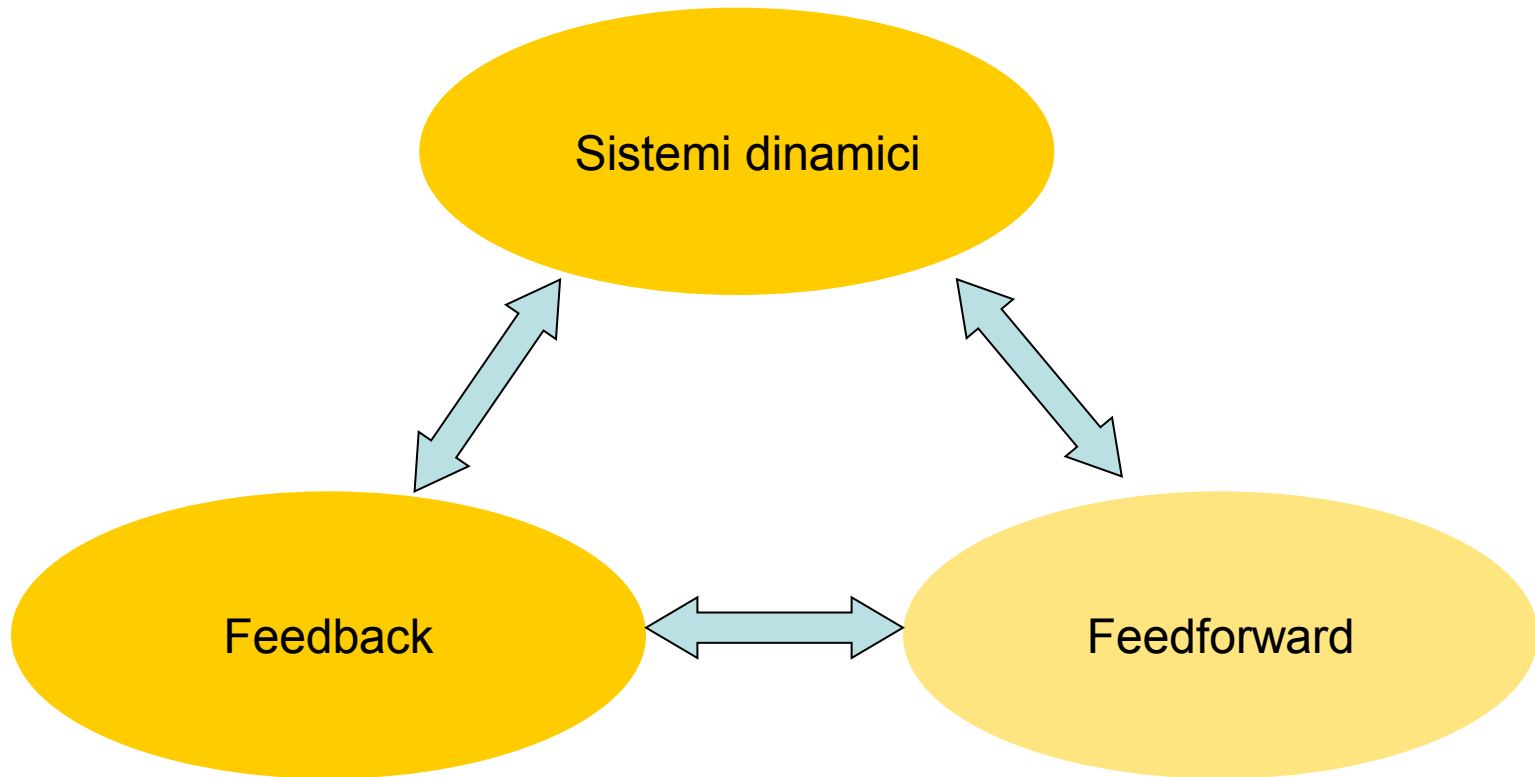
Serbatoio: $\dot{z}(t) = \frac{1}{A} (q_1(t) - \alpha \sqrt{z(t)} - d(t))$

- Il controllo in retroazione può presentare fenomeni di instabilità (anche se il sistema controllato è stabile).

Esempio: In un sistema retroazionato all'aumentare del guadagno di anello tipicamente si innesca una instabilità (p.e. auto-oscillazioni divergenti) :

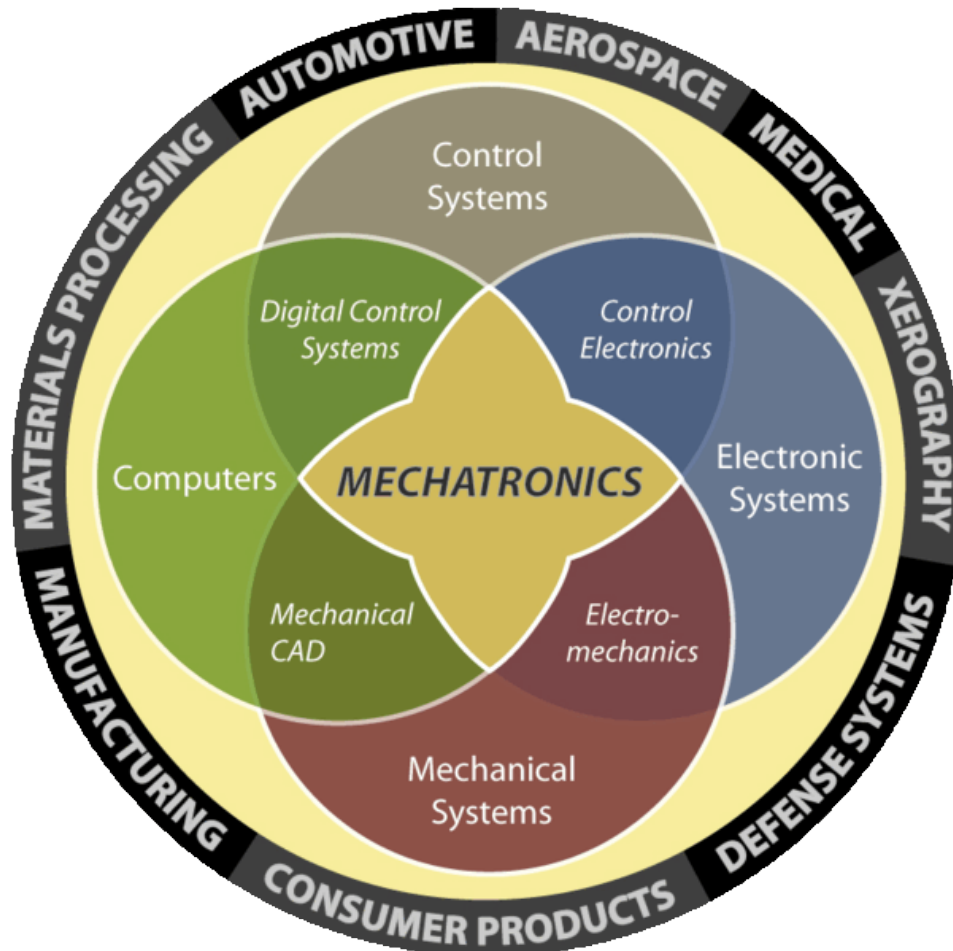


La scienza del controllo attivo



Il controllo attivo nelle applicazioni: la meccatronica

MECHATRONICS: French standard NF E 01-010 gives the following definition: “approach aiming at the synergistic integration of mechanics, electronics, control theory, and computer science within product design and manufacturing, in order to improve and/or optimize its functionality”.



Il programma in sintesi



- ❑ Metodi di analisi dei sistemi dinamici lineari scalari (SISO)
- ❑ Stabilità e sistemi in retroazione
- ❑ Progetto dei sistemi di controllo (sintesi) 
- ❑ Elementi di controllo digitale
- ❑ Cenni di modellistica

Da segnalare, ma non compresi nel programma

- ❑ Progettazione al calcolatore e simulazioni:
MATLAB (Control Systems Toolbox, Simulink); **Octave**; **Scilab** (Xcos); ecc.
- ❑ Tecnologie dei sistemi di controllo:
Sensori, attuatori, azionamenti elettrici,
PLC (programmable logic controller), microcontrollori, ecc.
Fieldbus (CAN, Modbus, Profibus, ecc.), Rel-time Ethernet
(Profinet, Powerlink, EtherCAT, ecc.)

Informazioni

- ❑ Diapositive pdf delle lezioni, materiali, avvisi su <https://didattica.unipr.it/>
- ❑ Libri consigliati:
 - G. Marro, “Controlli Automatici”, quinta edizione, Zanichelli, 2004;
 - P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni, “Fondamenti di Controlli Automatici”, terza edizione, McGraw-Hill, 2008.
- ❑ Tutorato (ing. Andrea Minari)
- ❑ Modalità dell'esame:
 1. **prova scritta in itinere + prova scritta conclusiva** (con esercizi e domande di teoria)
 2. prova scritta completa (con esercizi e domande di teoria): 2 appelli estivi, 1 appello nelle altre sessioni
 3. prova scritta semplificata (con esercizi) + prova orale
- ❑ Iscrizioni su ESSE3

Date

- ❑ **Tutorato:**
incontri col tutore ing. Andrea Munari a partire da
giovedì 12 marzo ore 9-10
- ❑ **Prova scritta in itinere (1° prova parziale)**
giovedì 9 aprile 2015 ore 9:30
- ❑ **Prova scritta conclusiva (2° prova parziale)**
mercoledì 17 giugno 2015 ore 9:30