

Corso di Informatica Industriale

Prof. Giorgio Buttazzo

Dipartimento di Informatica e Sistemistica
Università di Pavia

E-mail: buttazzo@unipv.it

Informazioni varie

- Telefono: 0382 - 505.755
- Email: buttazzo@unipv.it
- Dispense: on line
- Esame: 2 prove scritte

Scopo del corso

- Uso del calcolatore nei sistemi di controllo
- Interfacciamento con sensori e attuatori
- Condizionamento dei segnali
- Periferiche di comunicazione
- Elaborazione sensoriale

3

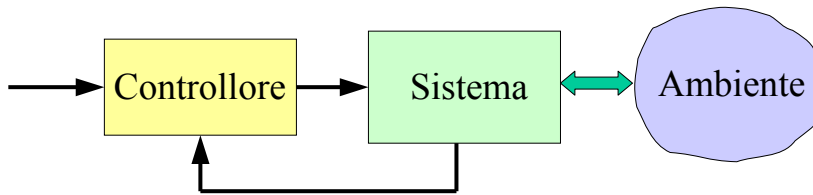
Definizioni generali

In ogni applicazione di controllo si possono distinguere 3 componenti:

- il **sistema** da controllare
 - può includere sensori e attuatori
- il **controllore**
 - invia gli ingressi al sistema in funzione di un obiettivo di controllo prefissato
- l'**ambiente** in cui il sistema opera

4

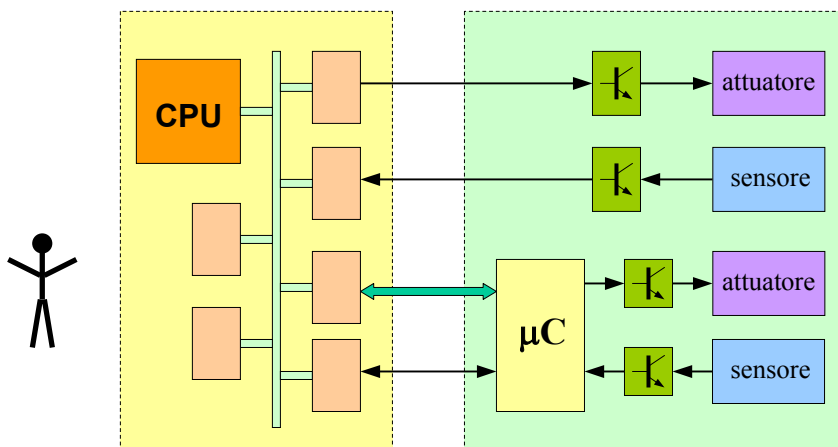
Schema a blocchi



A seconda delle interazioni tra ambiente e sistema controllato, possiamo distinguere tre tipi di sistemi di controllo.

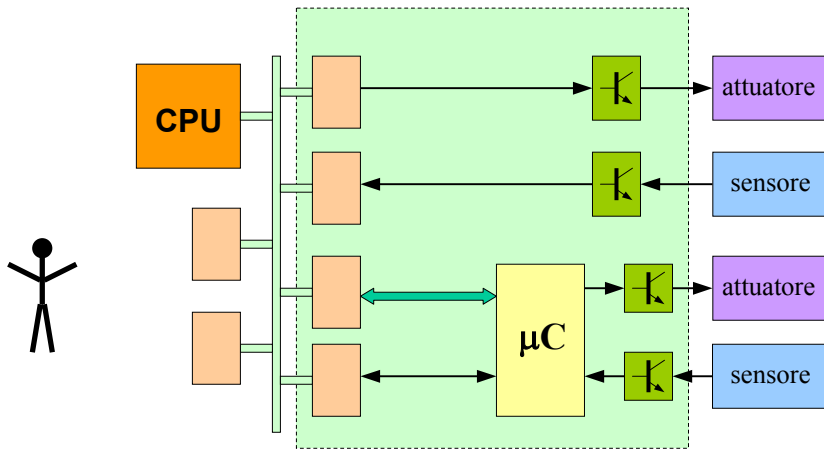
5

Schema a blocchi dettagliato



6

Parte trattata dal corso



7

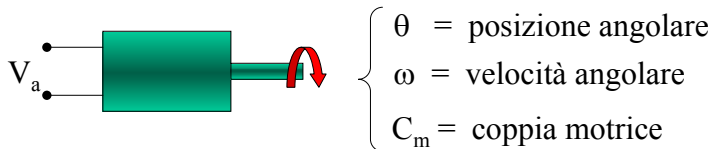
Attuatori

- Idraulici
 - Pneumatici
- } → Elevata potenza, ma
Fortemente non lineari
difficoltà di controllo fine
- Motori elettrici → Minor potenza, ma
maggiore controllo
- ⇒ A passo, a cc, servomotori
- A memoria di forma (SMA) → Bassa potenza
Bassa velocità
Piccolo ingombro

8

Motori cc

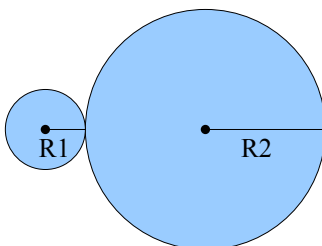
- Convertono energia elettrica in energia meccanica
- A parità di tensione, un motore assorbe corrente in proporzione alla coppia resistente.
 - ⇒ **Corrente di stallo**: corrente massima che un motore può assorbire alla tensione nominale.
 - ⇒ **Coppia di stallo**: coppia fornita ad albero bloccato, con tensione nominale e corrente massima.



9

Riduttori

- I motori cc sviluppano alte velocità a bassa coppia
- Coppie elevate possono essere ottenute attraverso opportuni riduttori.



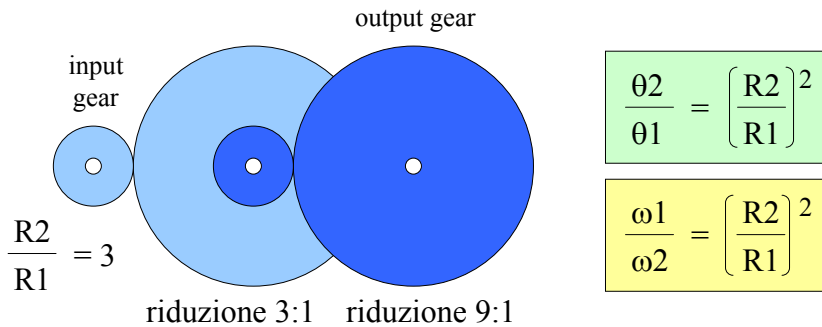
$$\frac{\theta_2}{\theta_1} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

10

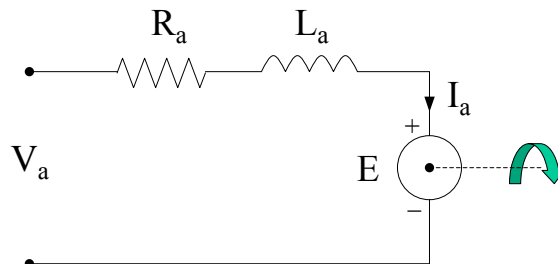
Riduttori serie

- Mettendo due riduttori in serie i rapporti si moltiplicano:



11

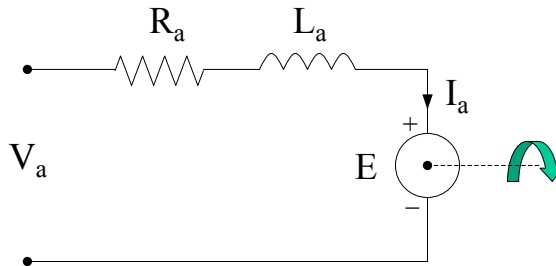
Motori cc: circuito equivalente



$$\left\{ \begin{array}{l} V_a = \text{tensione di alimentazione} \\ I_a = \text{corrente di alimentazione} \\ R_a = \text{resistenza di armatura} \\ L_a = \text{induttanza di armatura} \\ E = \text{forza contro elettromotrice} \end{array} \right.$$

12

Motori cc: equazioni



$$E = K_t \omega$$

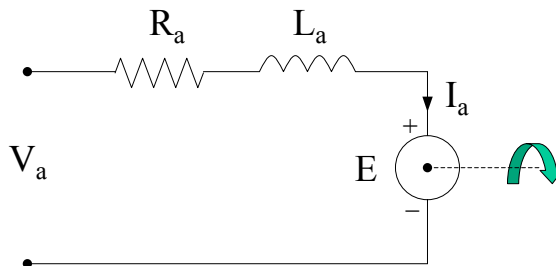
$$V_a = E + R_a I_a$$

$$C_m = K_t I_a$$

K_t = costante di coppia

13

Motori cc: potenza assorbita



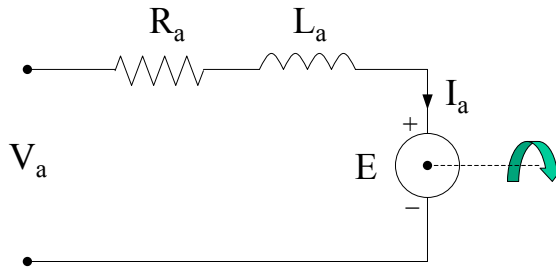
Potenza assorbita: $P_a = V_a I_a = E I_a + R_a I_a^2$

Potenza
meccanica

Potenza
persa nel rame

14

Motori cc: potenza meccanica

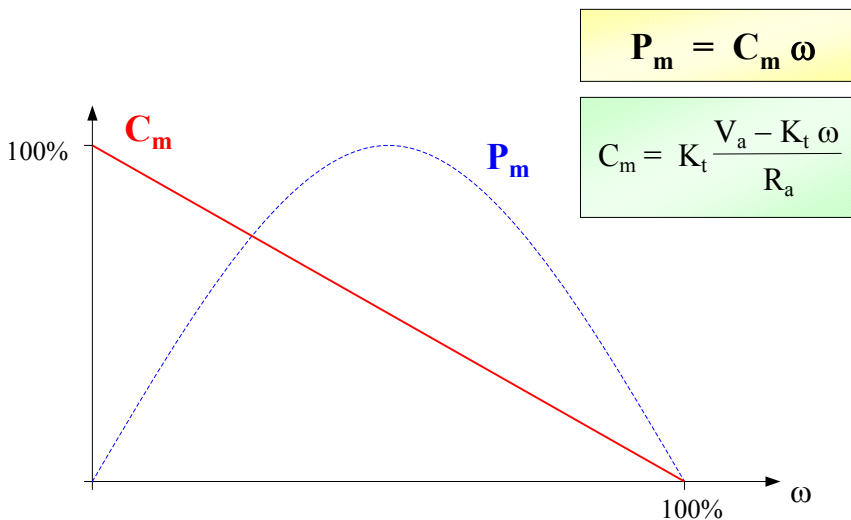


Potenza meccanica: $P_m = E I_a = C_m \omega$

$$C_m = K_t I_a \quad \left\{ \begin{array}{l} I_a = \frac{V_a - E}{R_a} \\ E = K_t \omega \end{array} \right. \Rightarrow C_m = K_t \frac{V_a - K_t \omega}{R_a}$$

15

Motori cc: caratteristiche



16

Motori cc: pilotaggio

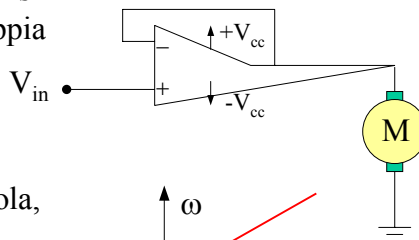
- I motori assorbono molta corrente, rispetto ai normali circuiti elettronici, pertanto richiedono speciali circuiti di pilotaggio (**driver di potenza**).
 - ⇒ Assorbimento del processore M68HC11: 5 mA
 - ⇒ Assorbimento di un piccolo motore cc: 0.5 ÷ 1 A
- Si possono avere due tipi di pilotaggio:
 - ⇒ lineare
 - ⇒ On/Off

17

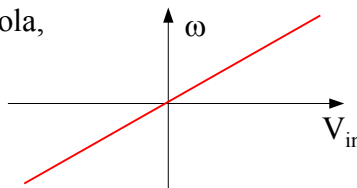
Motori cc: pilotaggio lineare

- Il motore è collegato ad un circuito elettronico che genera una tensione continua di controllo:

Per avere rotazioni nei due sensi occorre un'alimentazione doppia che fornisca $+V_{cc}$ e $-V_{cc}$



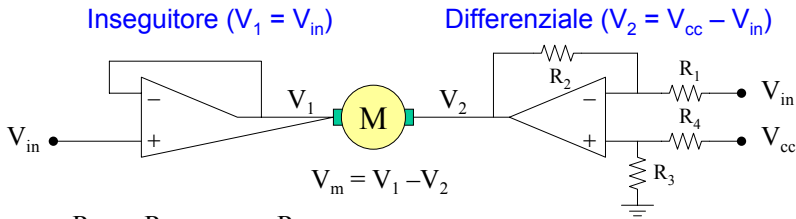
Se la coppia resistente è piccola, la velocità angolare ω risulta proporzionale a V_{in}



18

Motori cc: pilotaggio lineare

- Se non si dispone di due alimentazioni ad elevata potenza si può utilizzare un circuito a ponte:



se $\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_3}{R_4}$ $V_2 = \frac{R_2}{R_1} (V_{cc} - V_{in})$

Per cui, se $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$ si ha:

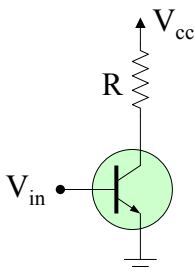
$$V_m = V_1 - V_2 = 2V_{in} - V_{cc}$$

V_{in}	V_1	V_2	V_m
0	0	V_{cc}	$-V_{cc}$
$V_{cc}/2$	$V_{cc}/2$	$V_{cc}/2$	0
V_{cc}	V_{cc}	0	V_{cc}

19

Motori cc: pilotaggio on/off

- Il pilotaggio lineare fa dissipare troppa potenza e può essere usato solo per motori di pochi watt.
- Per ridurre la potenza dissipata, si usano transistor che lavorano solo in saturazione/interdizione:



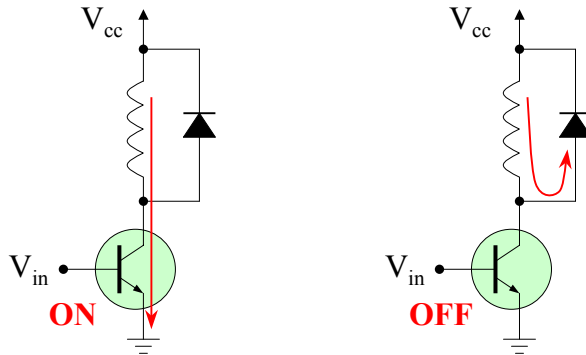
$$\text{Potenza dissipata: } P_d = V_{ce} I$$

- Se il transistor non conduce, $I = 0$ e $P_d = 0$
- Se il transistor è in saturazione, $V_{ce} \cong 0$, (tutta la caduta avviene su R) e $P_d \cong 0$.

20

Motori cc: pilotaggio on/off

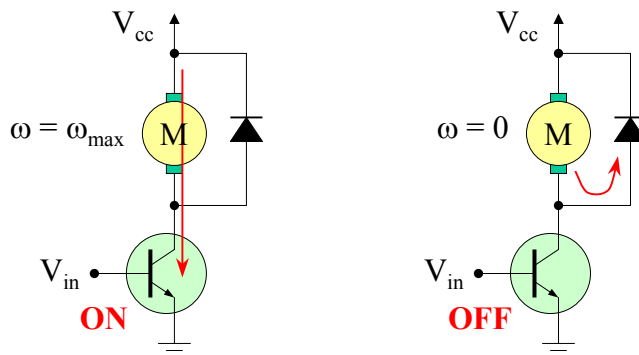
- Per carichi induttivi, occorre mettere in parallelo un diodo per consentire alla corrente di defluire quando il transistor si interdice:



21

Motori cc: pilotaggio on/off

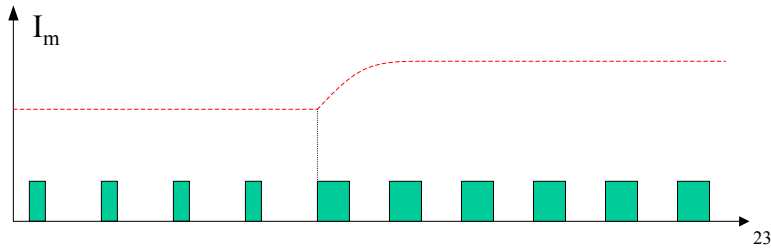
- Con questa tecnica, però, il motore o è fermo o gira alla massima velocità (solo in un verso):



22

Motori cc: pilotaggio PWM (Pulse Width Modulation)

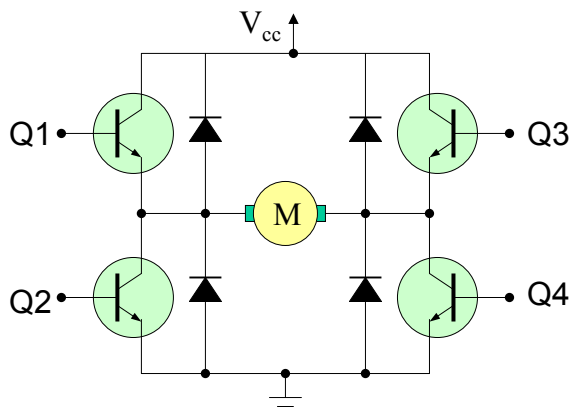
- Per controllare la velocità con la tecnica on/off, si può pilotare il transistor con un'onda quadra.
- Se la frequenza è abbastanza elevata (qualche KHz), la corrente media nell'induttore diventa costante e proporzionale al duty cycle del segnale:



23

Motori cc: H-bridge driver

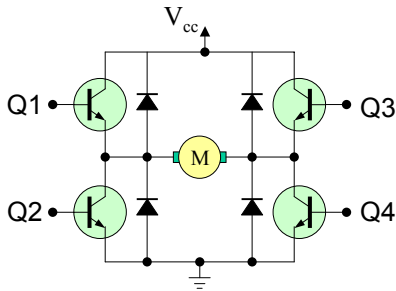
- Per consentire il controllo PWM bi-direzionale con singola alimentazione si usa il seguente circuito:



24

Motori cc: H-bridge driver

- E' necessaria un'apposita elettronica per pilotare i transistor in modo da ottenere le rotazioni giuste:



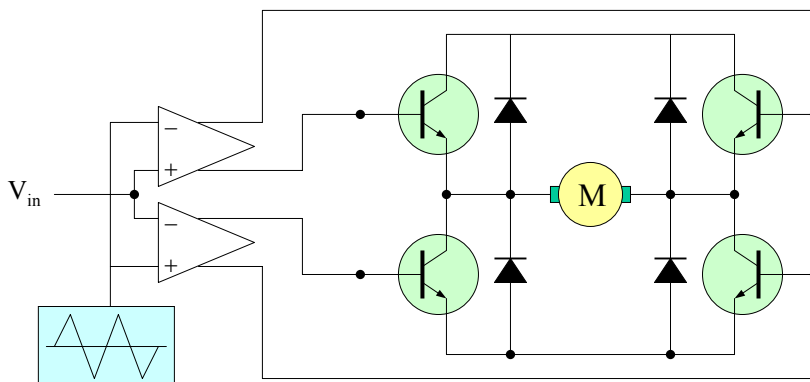
Modi di funzionamento

Q_1 e Q_4	rotazione oraria
Q_2 e Q_3	rotazione antioraria
Q_1 e Q_2	Q_1 e Q_2 si bruciano
Q_1 o Q_3	azione frenante per E
tutti spenti	lento rallentamento

25

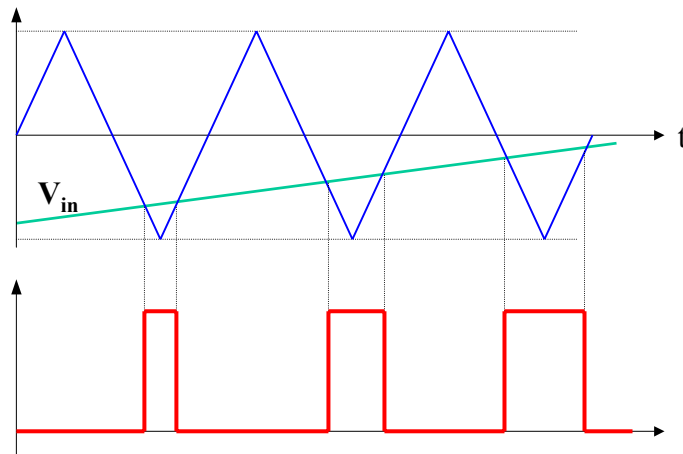
Motori cc: H-bridge driver

- E' necessaria un'apposita elettronica per pilotare i transistor in modo da ottenere le rotazioni giuste:



26

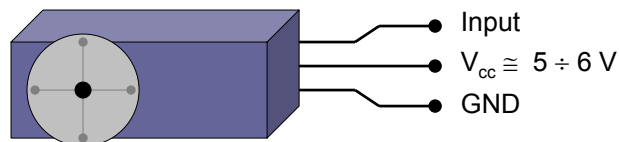
Convertitore tensione - duty cycle



27

Servomotori

- Sono motori in corrente continua che integrano:
 - ⇒ Motore
 - ⇒ Riduttore
 - ⇒ Elettronica di controllo
 - ⇒ Controllo di posizione

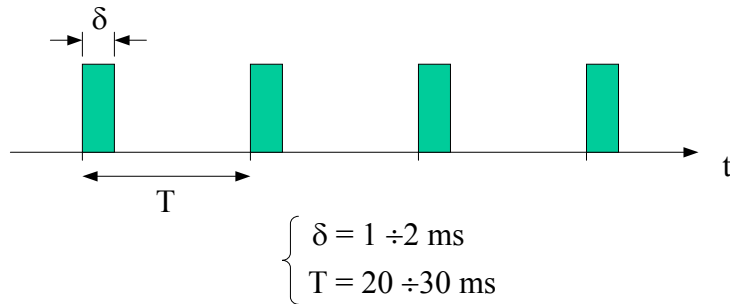


Range angolare: $[-90, +90]$
Coppia massima: $3 \div 20 \text{ Kg} \cdot \text{cm}$

28

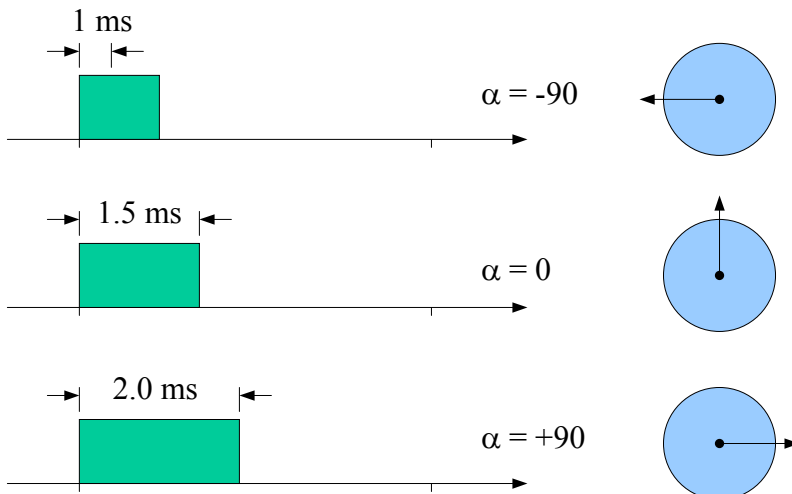
Servomotori: funzionamento

- Sono controllati mediante impulsi modulati in durata Pulse Width Modulation (PWM):
- La posizione dell'albero è proporzionale alla durata del duty cycle δ/T



29

Servomotori: funzionamento



30

Motori cc: funzione di trasferimento

	nel tempo	in frequenza
Coppia di inerzia	$C_i = J_t d\omega/dt$	$C_i = J_t \omega s$
Coppia attrito dinamico	$C_a = B\omega$	$C_a = B \omega$

J_t = inerzia sull'albero
 B = coeff. attrito dinamico

$$C_m = C_i + C_a$$

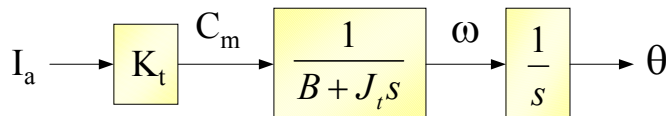
$$\begin{cases} C_m = K_t I_a \\ C_m = J_t \omega s + B \omega \end{cases} \quad \rightarrow \quad K_t I_a = (J_t s + B) \omega$$

$$\omega = \frac{K_t}{J_t s + B} I_a$$

31

Motori cc: funzione di trasferimento

$$\omega = \frac{K_t}{J_t s + B} I_a \quad \omega = d\theta/dt \quad \omega = \theta s$$

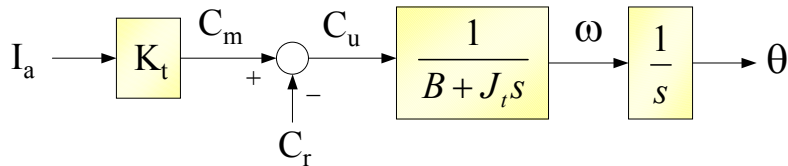


$$G(s) = \frac{\theta(s)}{I_a(s)} = \frac{K_t}{s(J_t s + B)}$$

32

Motori cc: funzione di trasferimento

Se C_r è una coppia resistente esterna si ha:

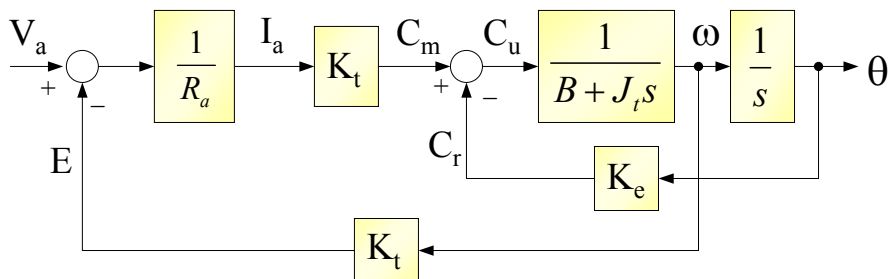


$$\theta = \frac{K_t I_a - C_r}{s(J_t s + B)}$$

33

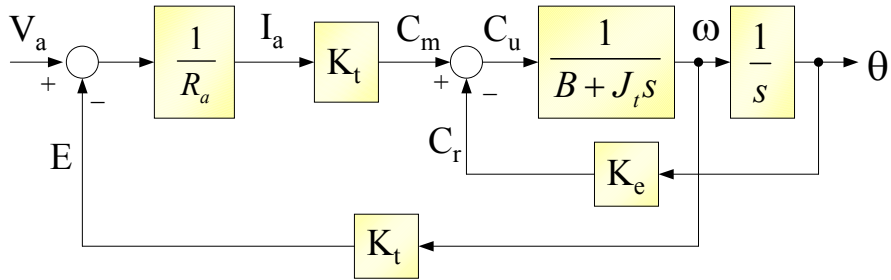
Motori cc: funzione di trasferimento

Considerando:
$$\begin{cases} I_a = \frac{V_a - E}{R_a} = \frac{V_a - K_t \omega}{R_a} \\ C_r = K_e \theta \quad (\text{carico elastico}) \end{cases}$$



34

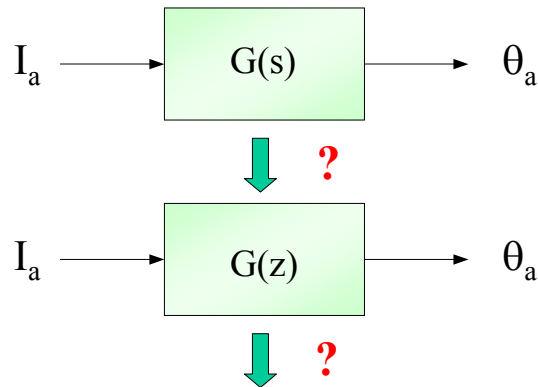
Motori cc: funzione di trasferimento



$$H(s) = \frac{\theta(s)}{V_a(s)} = \frac{K_t/R_a}{J_t s^2 + (B + K_t^2/R_a)s + K_e}$$

35

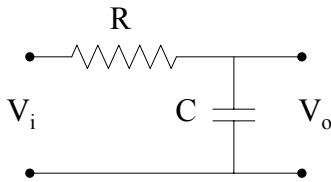
Motori cc: discretizzazione



$$\theta_a(k) = f[\theta_a(k-1), I_a(k-1), I_a(k-2), \dots]$$

36

Esempio: filtro passa basso



$$\begin{cases} V_o = \frac{1}{Cs} I \\ I = \frac{V_i - V_o}{R} \end{cases} \quad V_o = \frac{V_i - V_o}{RCs}$$

$$V_o(RCs + 1) = V_i \quad \longrightarrow \quad \frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{RCs + 1}$$

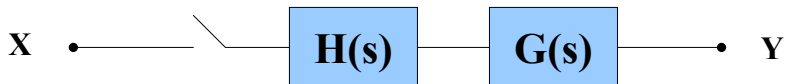
ponendo $\alpha = \frac{1}{RC}$ si ha:

$$G(s) = \frac{\alpha}{s + \alpha}$$

37

Calcolo della Z-trasformata

L'espressione discreta di $G(s)$ si calcola utilizzando un circuito di sampling and hold:



$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = Z \left[\left(\frac{1 - e^{-st}}{s} \right) G(s) \right] = (1 - z^{-1}) Z \left[\frac{G(s)}{s} \right]$$

38

Calcolo della Z-trasformata

Per il filtro passa basso si ha:

$$G(z) = (1 - z^{-1})Z\left[\frac{\alpha}{s(s + \alpha)}\right]$$

$$G(z) = \frac{(z-1)}{z} \frac{(1-p)z}{(z-1)(z-p)} \quad \text{dove} \quad \left(p = e^{-\alpha T}\right)$$

$$G(z) = \frac{1-p}{z-p} = \frac{(1-p)z^{-1}}{1-pz^{-1}}$$

39

Espressione a tempo discreto

Quindi si ha:

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(1-p)z^{-1}}{1-pz^{-1}}$$

$$Y(z) = pY(z)z^{-1} + (1-p)X(z)z^{-1}$$

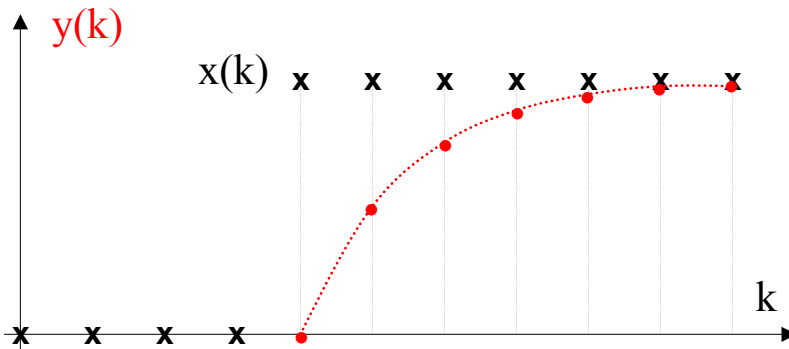


$$y(k) = py(k-1) + (1-p)x(k-1)$$

40

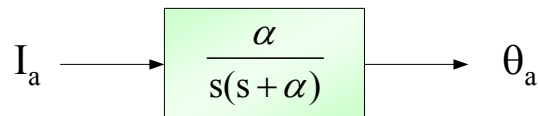
Espressione a tempo discreto

$$y(k) = py(k-1) + (1-p)x(k-1)$$



41

Motore cc: espressione discreta

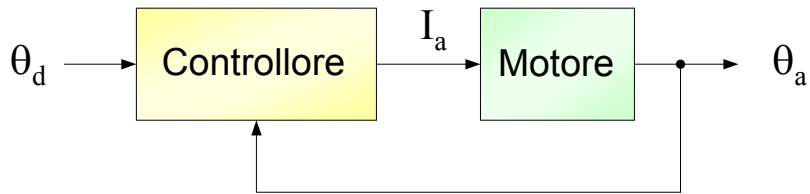


posto $p = e^{-\alpha T}$ si ha:

$$y(k) = (1-p)x(k-1) + (1+p)y(k-1) - py(k-2)$$

42

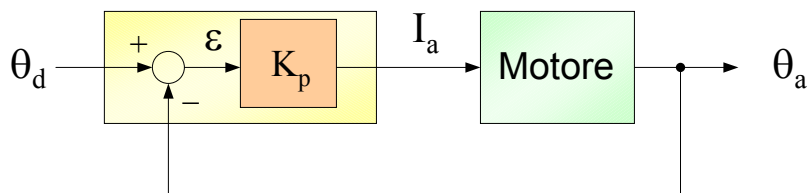
Motori cc: controllo di posizione



43

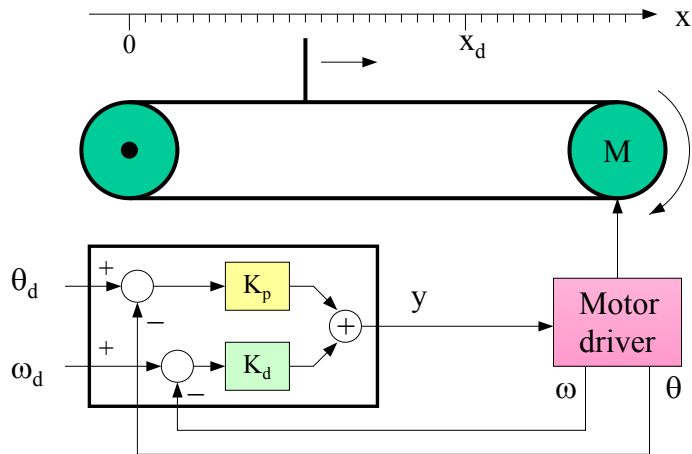
Motori cc: controllo di posizione

Controllo Proporzionale



44

Controllo di posizione con reazione tachimetrica



45

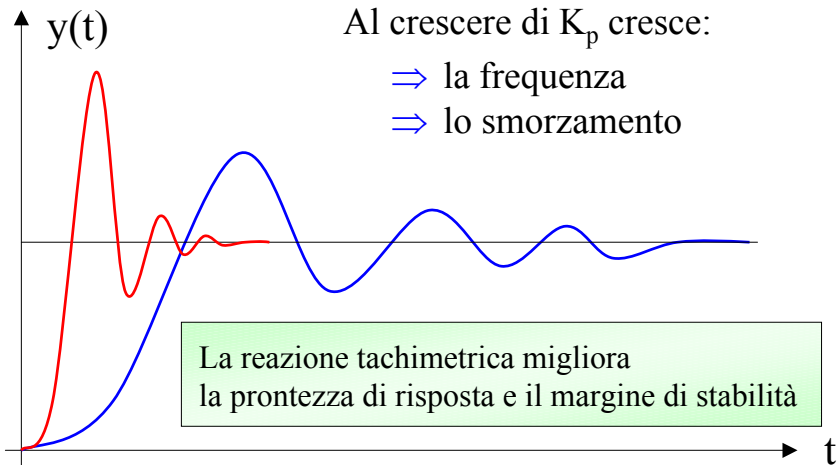
Regolatore PD

```
TASK    pos_control()
{
int     xd, vd, x, v;
float   y, Kp, Kd;

    while (1) {
        get_gains(&Kp, &Kd);
        get_setpoint(&xd, &vd);
        read_sensors(&x, &v);
        y = Kp*(xd - x) + Kd*(vd - v);
        output(y);
        task_endcycle();
    }
}
```

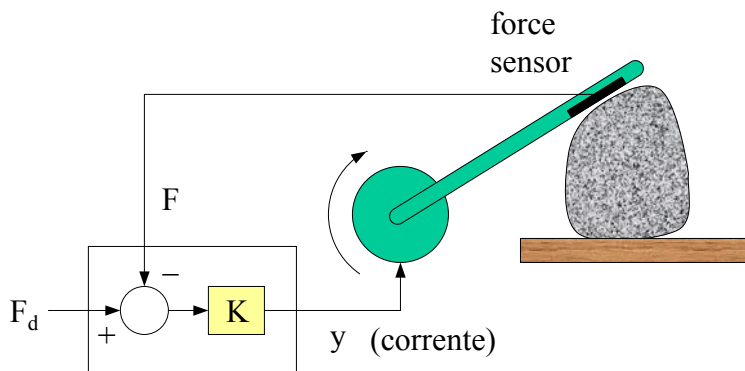
46

Vantaggi del controllo PD



47

Controllo di forza



48

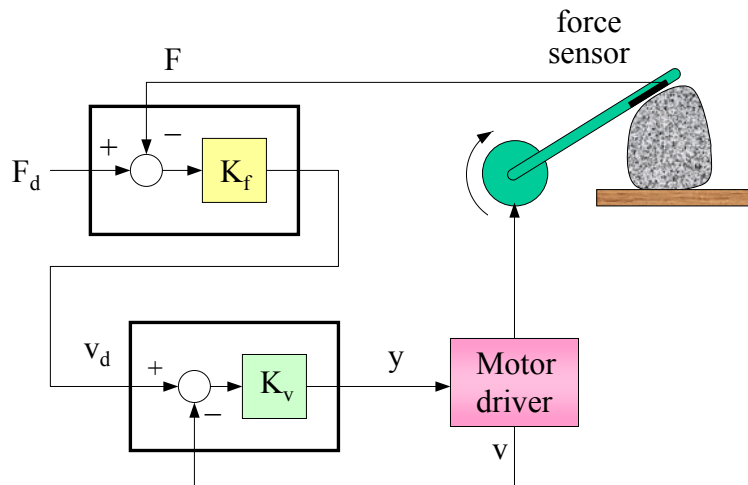
Force feedback loop

```
TASK force_control ()
{
float Fd, F;
float y, K;

while (1) {
    K = read_gain();
    Fd = desired_force();
    F = read_force();
    y = K*(Fd - F);
    output(y);
    task_endcycle();
}
}
```

49

Controllo multi-livello



50