



SAPIENZA  
UNIVERSITÀ DI ROMA



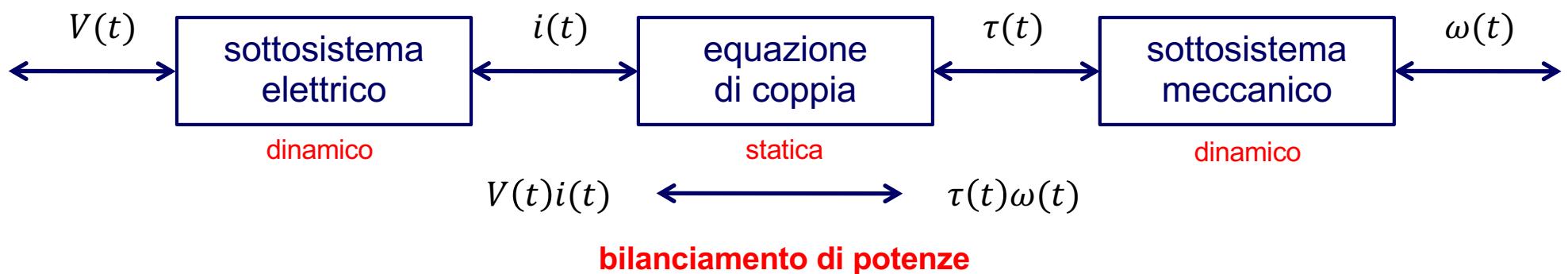
# Attuazione e controllo del moto

Automazione

Alessandro De Luca

# Sistemi di movimentazione automatica

- azionamenti elettrici e attuatori elettromeccanici per il moto
- trasduttori
  - ➔ dispositivi che convertono energia da una forma in un'altra (elettrica in meccanica o viceversa, termica in meccanica o viceversa, ...)
  - ➔ **sensori**
    - misurano grandezze fisiche e le convertono in un dominio proprio (elettrico, pneumatico o idraulico) utile per elaborare il contenuto informativo
  - ➔ **attuatori**
    - trasformano informazione di comando in potenza nel dominio fisico del sistema sui quali agiscono
- **trasduttori elettromeccanici**
  - ➔ sottosistemi elettrico e meccanico accoppiati da un campo elettromagnetico
  - ➔ **generatori:** conversione energia meccanica  $\Rightarrow$  elettrica
  - ➔ **motori:** conversione energia elettrica  $\Rightarrow$  meccanica



Gli azionamenti elettrici sono dispositivi per la

- conversione controllata di energia elettrica in meccanica
- trasduzione “di potenza”
  - ➔ imposizione del moto ad un carico meccanico

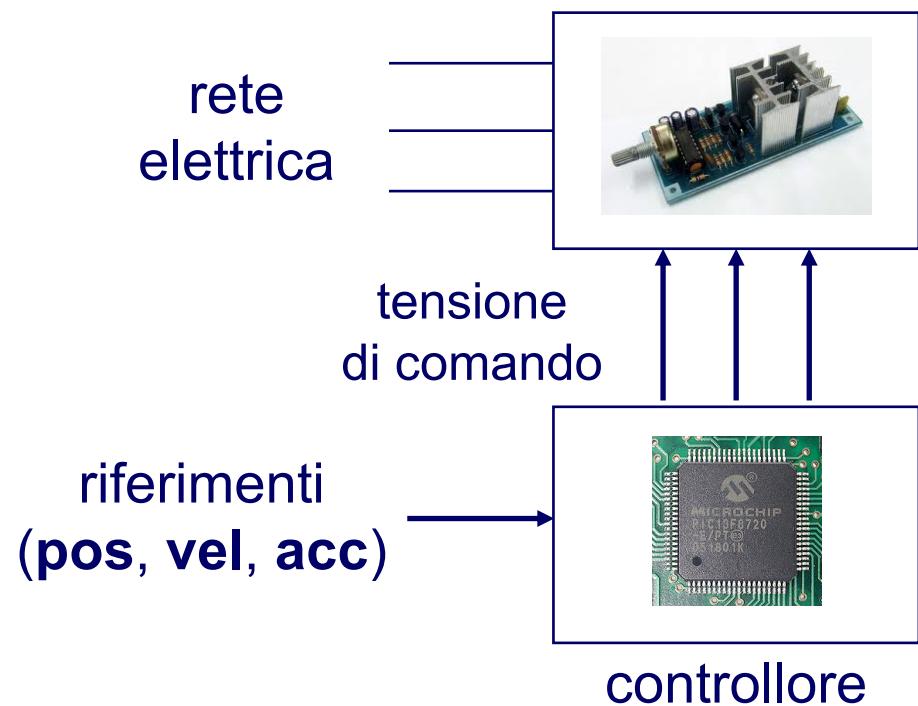
Tre componenti fondamentali

- amplificatore/convertitore di potenza
  - ➔ piccole potenze: amplificatori analogici lineari
  - ➔ grandi potenze: componenti elettronici di tipo switching (migliore rendimento) comandati con tecniche di modulazione (PWM)
- motore elettrico
  - ➔ diverse tipologie: alimentato in corrente continua (DC) o alternata (AC), brushless, passo-passo (stepper), asincrono (a induzione), sincrono, ...
- controllore
  - ➔ leggi a feedback (ad es., PID) e generazione di riferimenti

# Azionamenti elettrici

- attua la tensione richiesta dal comando proveniente dal controllo

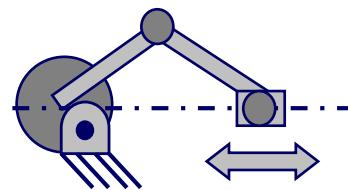
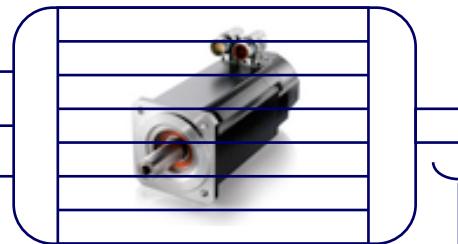
amplificatore



parti in moto relativo interagenti magneticamente

- motori rotatori (decisamente i più diffusi) o lineari
- con riduttori del moto

motore elettrico



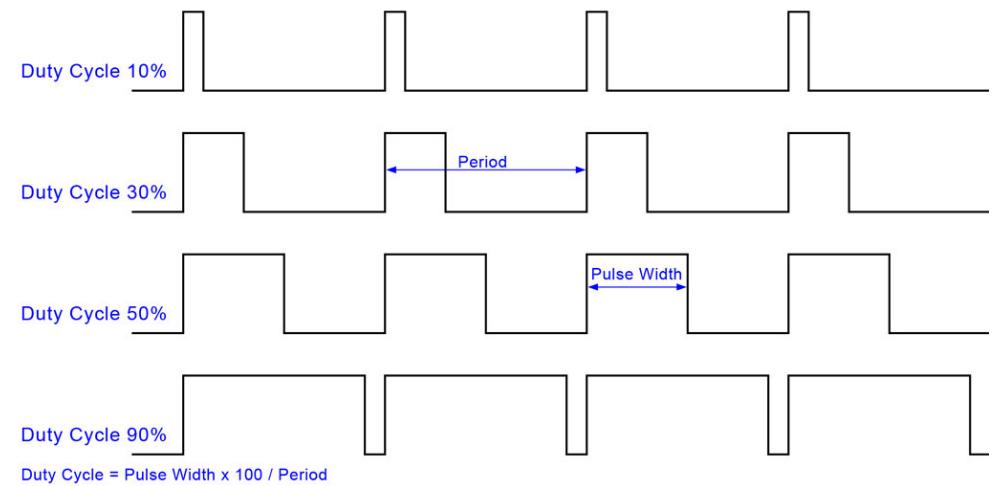
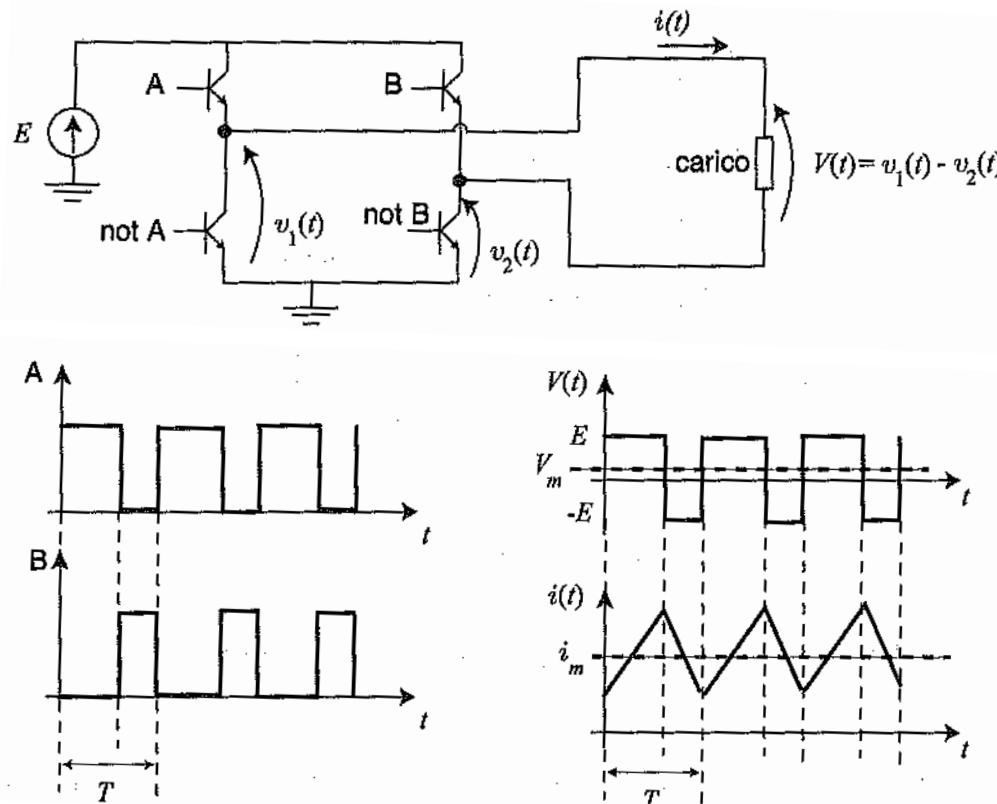
carico cinematico

- tipicamente digitale
- regolazione o ...
- ... inseguimento di posizione o velocità
- controllo di coppia

# Duty cycle in PWM

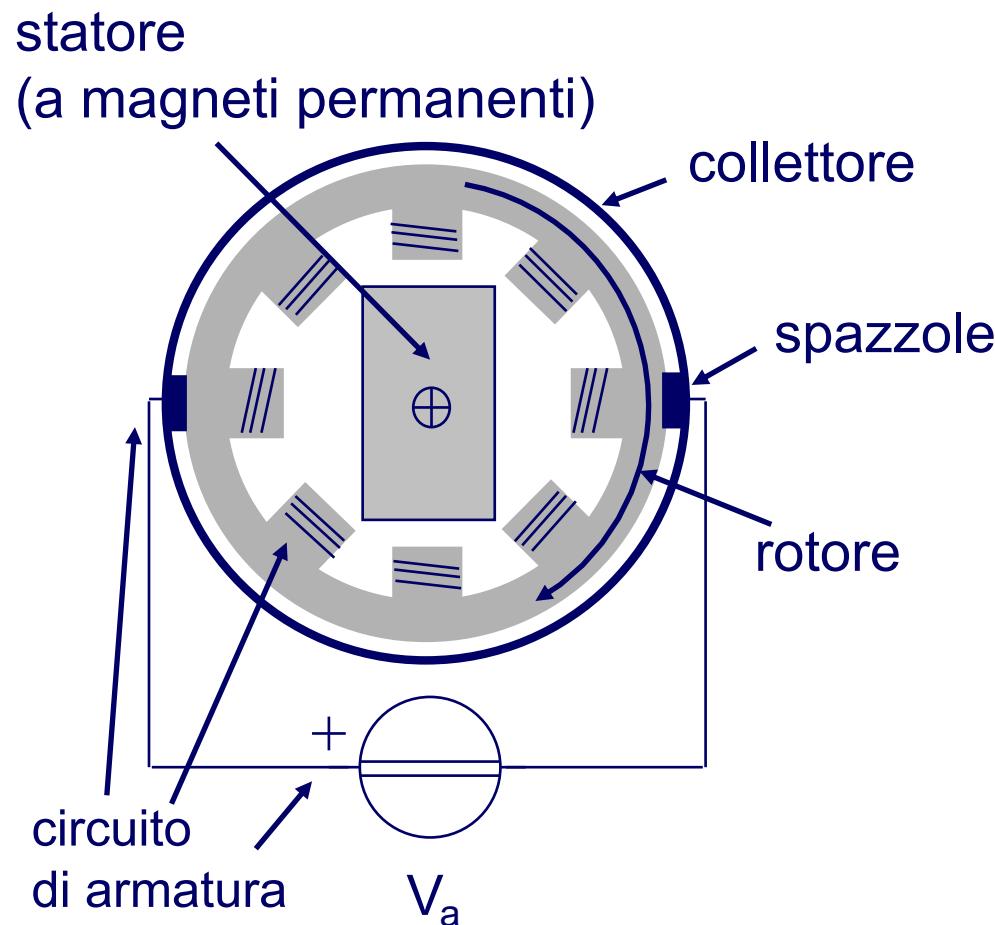
Amplificatore di potenza con componenti elettronici di tipo switching

- dalla tensione costante E si generano, mediante 4 interruttori on/off, due onde quadre in contro-fase (A e B, e i loro negati) di durata variabile (e complementare) nel periodo T
- grazie alla “modulazione” degli interruttori, si fornisce al motore una tensione media  $V_m$  pari a una frazione desiderata di E  $\Rightarrow V_m$  è **proporzionale al duty cycle (=  $T_{on}/T \%$ )**

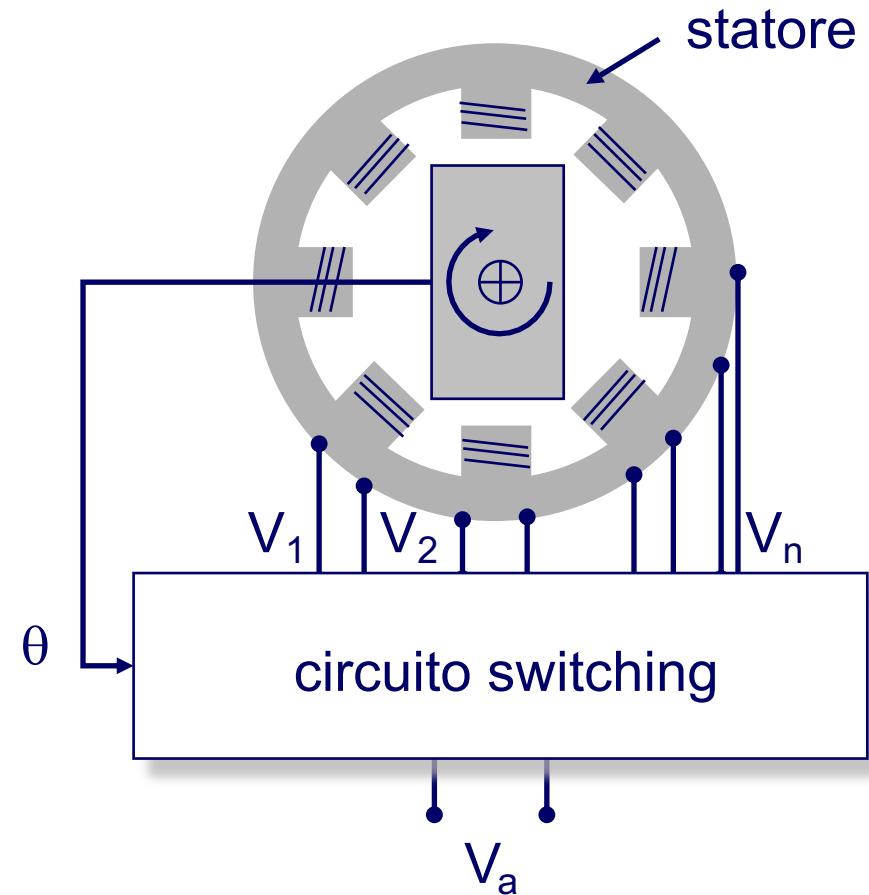


- bassa potenza dissipata dagli **switch** negli stati ON e OFF (solo durante un transitorio di 100ns c'è sia tensione che corrente)
- elevata frequenza  $f=1/T$  (ad es., 50 KHz) rispetto alle variazioni desiderate di  $V_m$

Nei motori elettrici, due schemi realizzativi di principio



motore con spazzole  
alimentato in corrente continua

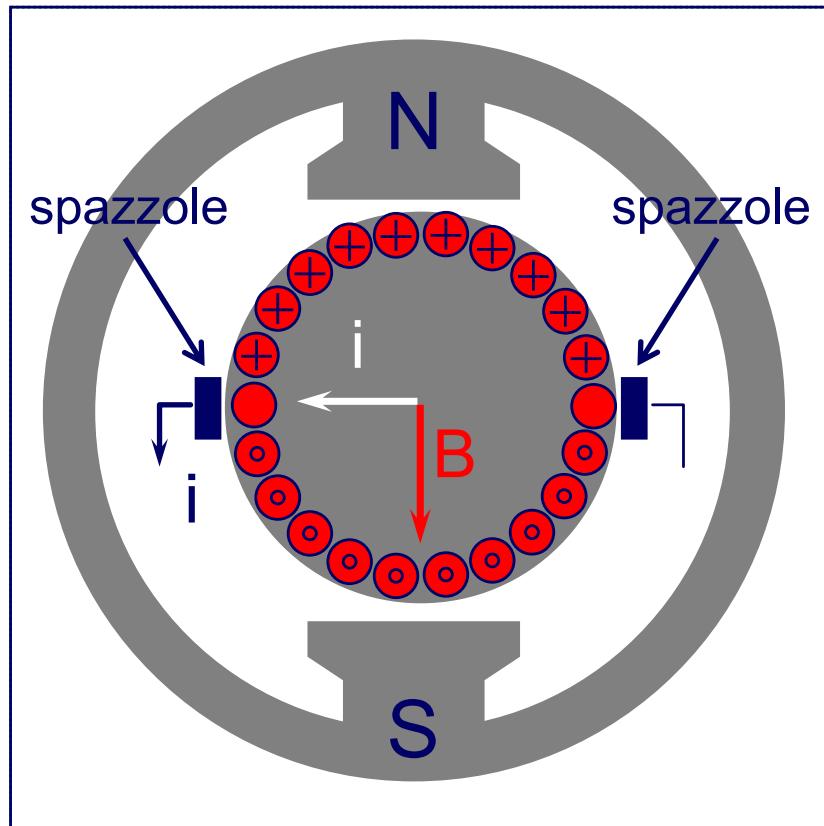


motore sincrono “brushless”  
pilotato con elettronica switching

## Caratteristiche generali

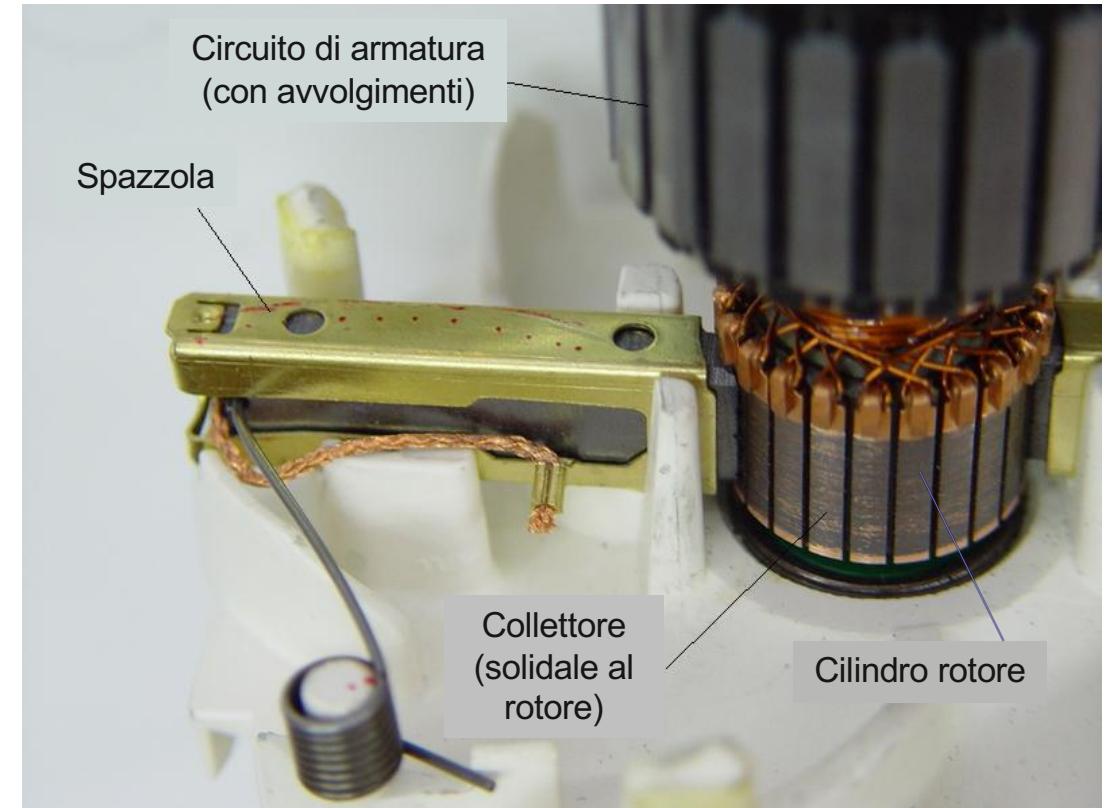
- circuito di rotore a collettore
- alimentabile in corrente continua (Direct Current = DC)
- diverse configurazioni: qui a magneti permanenti
- largo utilizzo, anche se in progressivo calo
- costruzione complessa, ma modello matematico semplice
  - ➔ altri motori, più semplici dal punto di vista costruttivo e meno costosi, hanno modelli matematici più complessi ma che con opportune elaborazioni possono essere ricondotti ad una forma molto simile a quella del motore DC

## avvolgimenti e collettore (con spazzole)



convenzione  
per le correnti  $i$   
nelle spire:

entrante      uscente  
      +            -  
      dal foglio

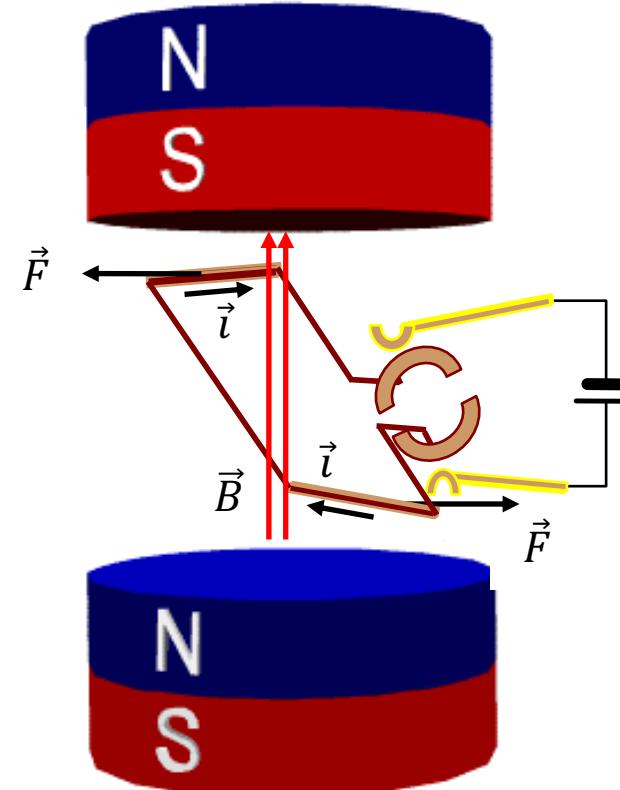
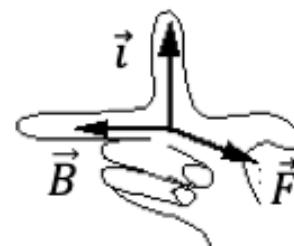


$i = i_a$  = corrente di alimentazione  
sul circuito d'armatura

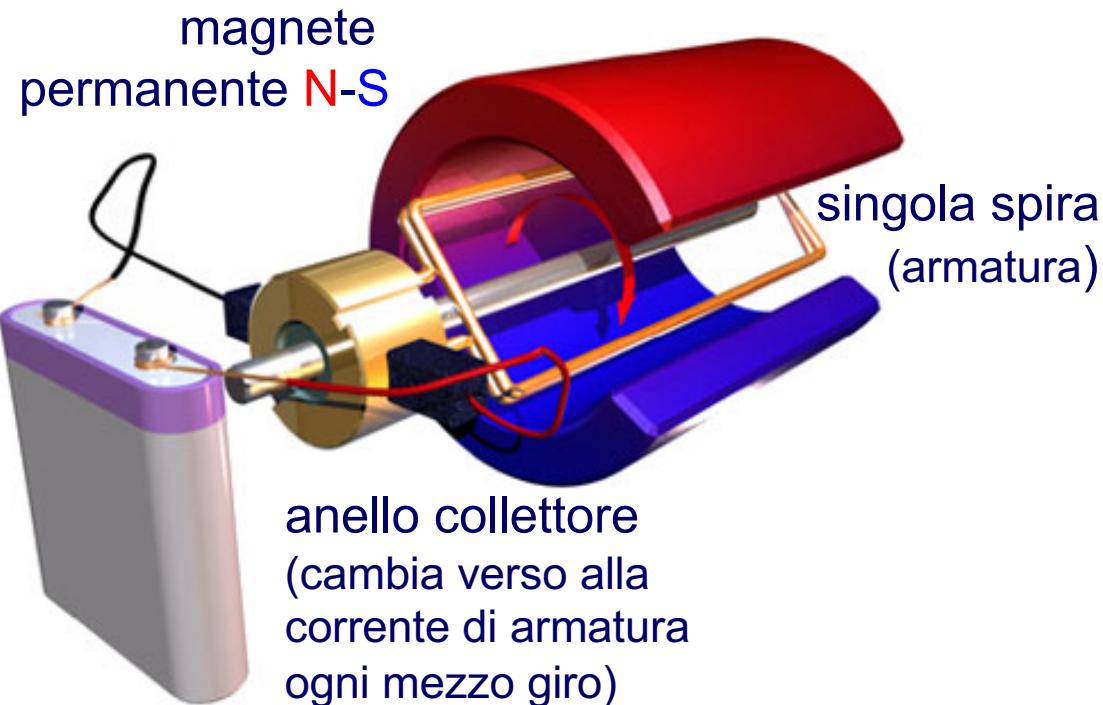
basato sulla legge di Lorentz

- campo magnetico  $B$  costante (con verso da polo N a polo S)
- corrente  $i$  costante e perpendicolare al campo magnetico

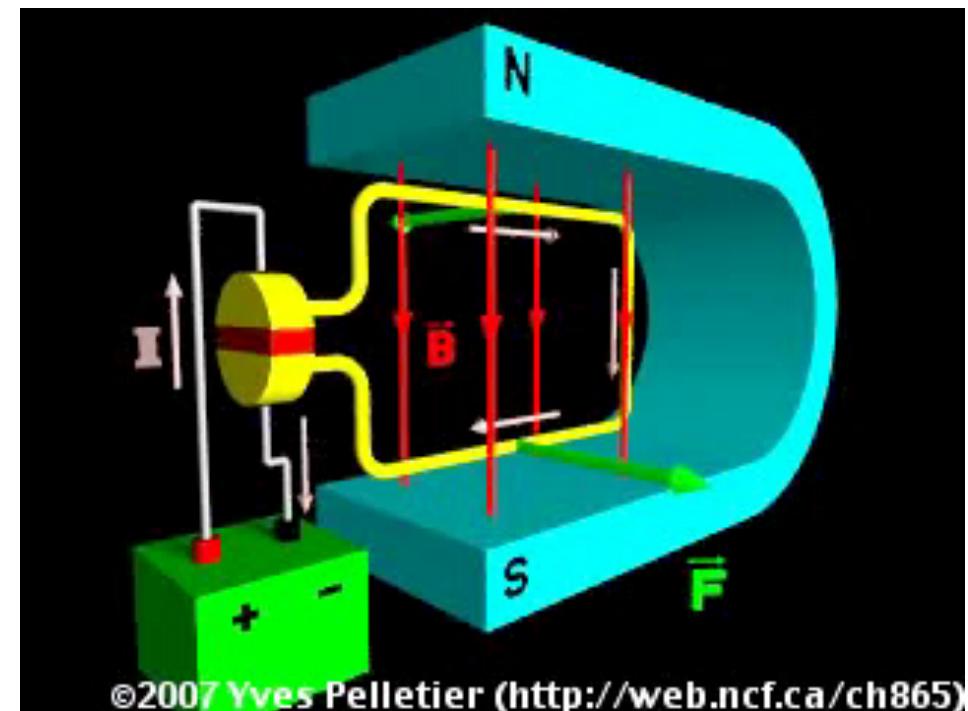
$$\vec{F} = L(\vec{i} \times \vec{B})$$



regola della mano destra  
per il prodotto vettore:  
indice  $\times$  medio = pollice



alimentazione in  
corrente continua (c.c.)

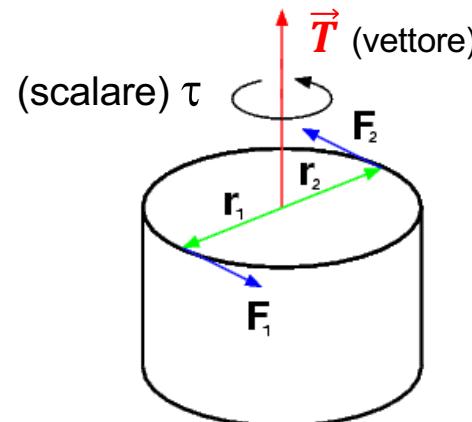


$$\vec{F} = L(\vec{l} \times \vec{B})$$

utilizzando una sola spira

- momento torcente (coppia)

$$\vec{T} = (\vec{r}_1 \times \vec{F}_1 + \vec{r}_2 \times \vec{F}_2)$$



notazione per la **coppia scalare**:

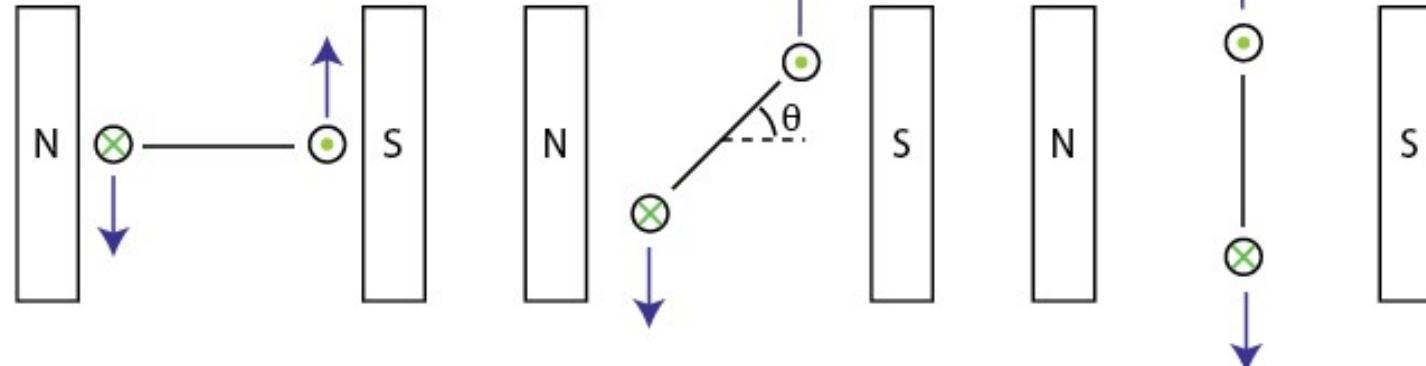
$$\tau = \pm |\vec{T}|$$

intensità del **vettore** di coppia con segno (per convenzione, positiva se in senso antiorario)

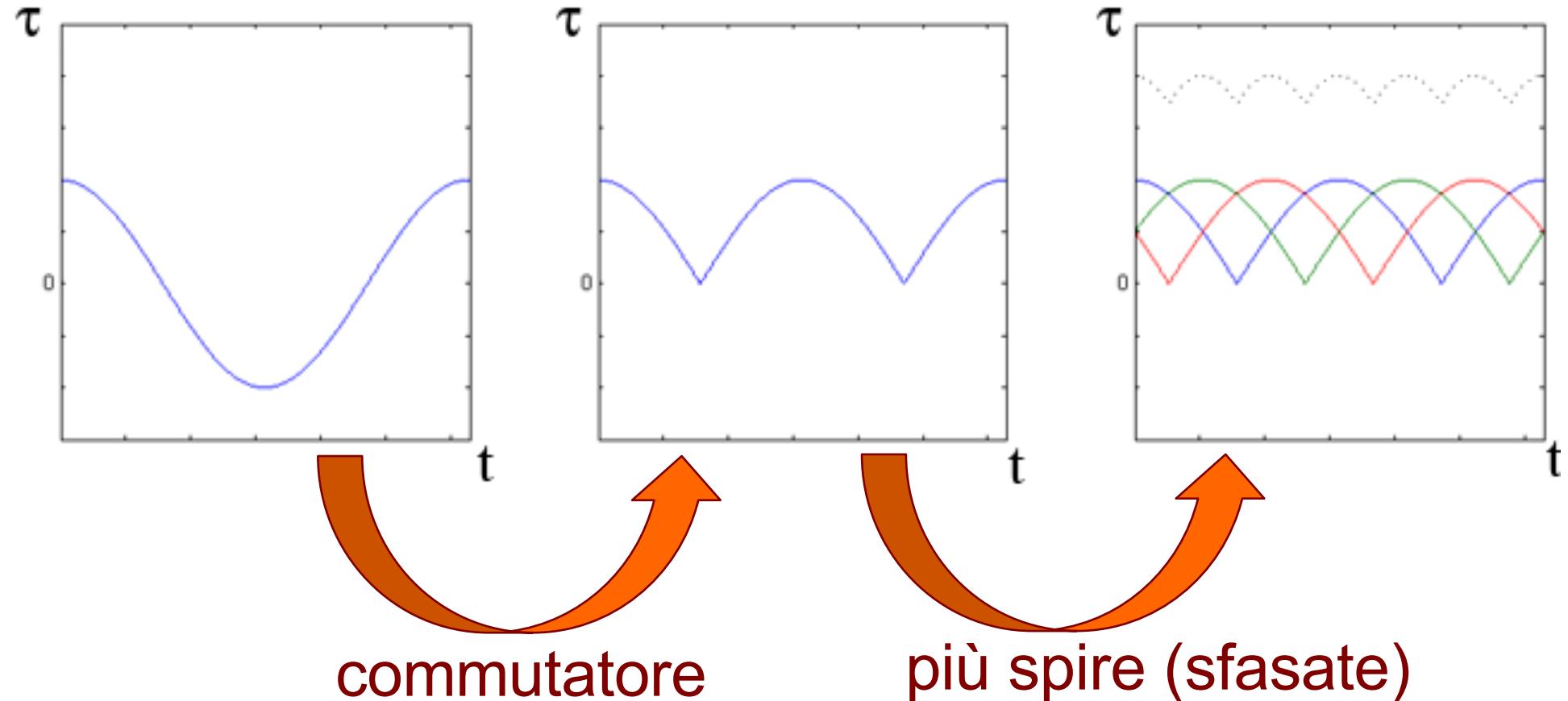
- nel caso di una singola spira, la coppia va a zero a multipli di  $180^\circ$  al variare dell'angolo tra la forza generata e il braccio di rotazione

⊗ current into page

⊗ current out of page

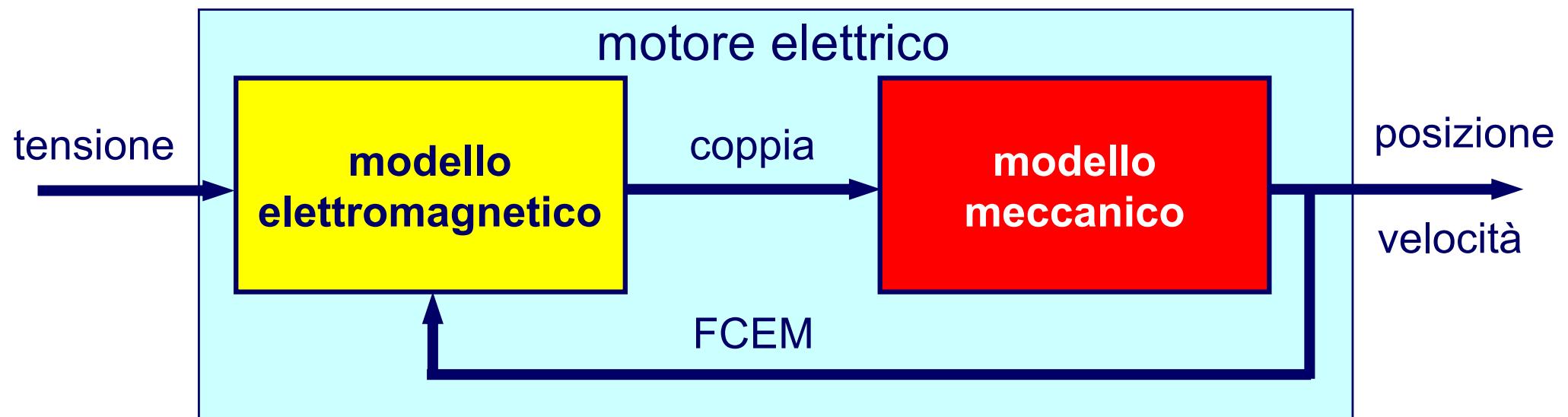


- il commutatore permette di avere una coppia sempre nello stesso verso di rotazione, ma non elimina le oscillazioni (“**ripple**”)
- per limitare il ripple di coppia (e aumentare il valore della coppia prodotta) si usano più spire (“**poli**”)



# Motore DC: modellistica

- ❑ modello elettromagnetico: equazione di bilancio circuitale (tensioni nella “maglia” di ingresso)
- ❑ produce una coppia **proporzionale** alla corrente
- ❑ modello meccanico: equazione di bilancio delle forze (qui, coppie)
- ❑ è sempre presente una forza contro-elettromotrice (FCEM o “Back EMF”) proporzionale alla velocità (per il bilancio energetico)

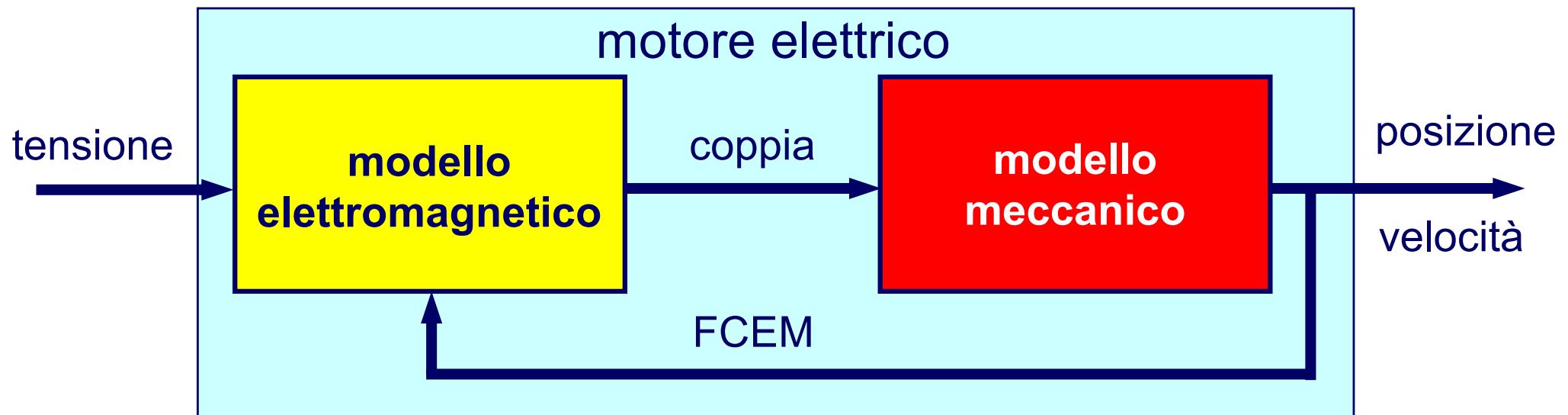


# Motore DC: limiti fisici

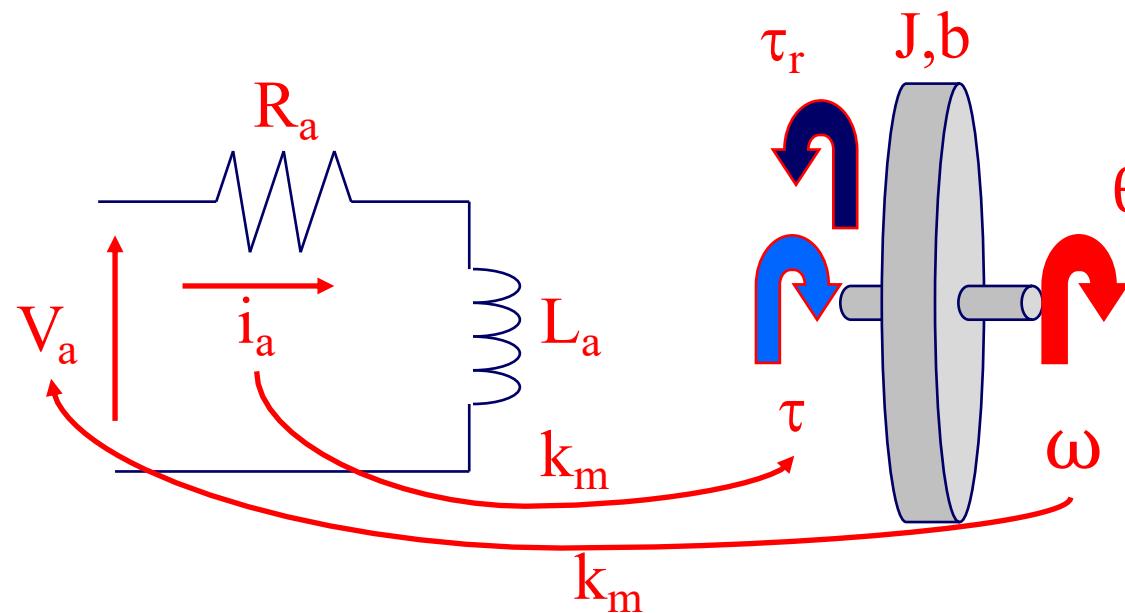
- nella modellistica ci si limita a un comportamento nel dominio **lineare**, tenendo presente che gli azionamenti elettrici hanno limiti di
  - ✓ tensione massima
  - ✓ corrente massima

che si traducono in limiti per

- ✓ velocità massima per il motore
- ✓ coppia efficace (o rms = root mean square) e coppia di picco massima erogabile dal motore



# Motore DC: modello matematico



\* = stesso valore  
numerico usando  
le unità SI !!

## □ parametri

$R_a$  resistenza di armatura

$L_a$  induttanza di armatura

$k_m$  coefficiente\* di coppia e FCEM

$J$  inerzia del rotore

$b$  coefficiente di attrito

## □ variabili

$i_a$  corrente di armatura

$\omega$  velocità del rotore

$\theta$  posizione del rotore

$V_a$  tensione di ingresso

$\tau_r$  coppia di carico (disturbo)

# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \quad \rightarrow$$

modello elettrico

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \quad \rightarrow$$

modello  
meccanico

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \rightarrow$$

# Motore DC: modello matematico

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \rightarrow$$

FCEM

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \rightarrow$$

coppia prodotta

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \rightarrow$$

integratore

bilanciamento di potenze nell'accoppiamento

$$P_{elet} = V_{cem} i_a = \tau_m \omega = P_{mecc}$$
$$\tau_m = k_m i_a \quad k_m \left[ \frac{\text{Nm}}{\text{A}} \right]$$

coppia prodotta dal motore

$$\tau_m \omega = k_m i_a \omega = V_{cem} i_a$$

$$V_{cem} = k_m \omega \quad k_m [\text{V} \cdot \text{s}]$$

# Motore DC: regime a tensione costante

- supponiamo di alimentare il motore con una **tensione  $V_a$  costante**
- dopo un transitorio, si raggiunge una situazione di regime (*perché?*) con corrente costante e velocità angolare costante
- si possono valutare allora le **caratteristiche statiche** del motore (ad es., la velocità di regime  $\omega^*$  o la capacità di bilanciare una coppia  $\tau_r^*$  sul carico)

$$\frac{di_a}{dt} = 0 \xrightarrow{} V_a - R_a i_a - k_m \omega = 0 \quad \frac{d\omega}{dt} = 0 \xrightarrow{} k_m i_a - b\omega - \tau_r = 0$$

- risolvendo il sistema algebrico, si hanno le relazioni di regime

$$\omega^* = \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \left( \frac{k_m}{R_a} V_a - \tau_r^* \right)$$

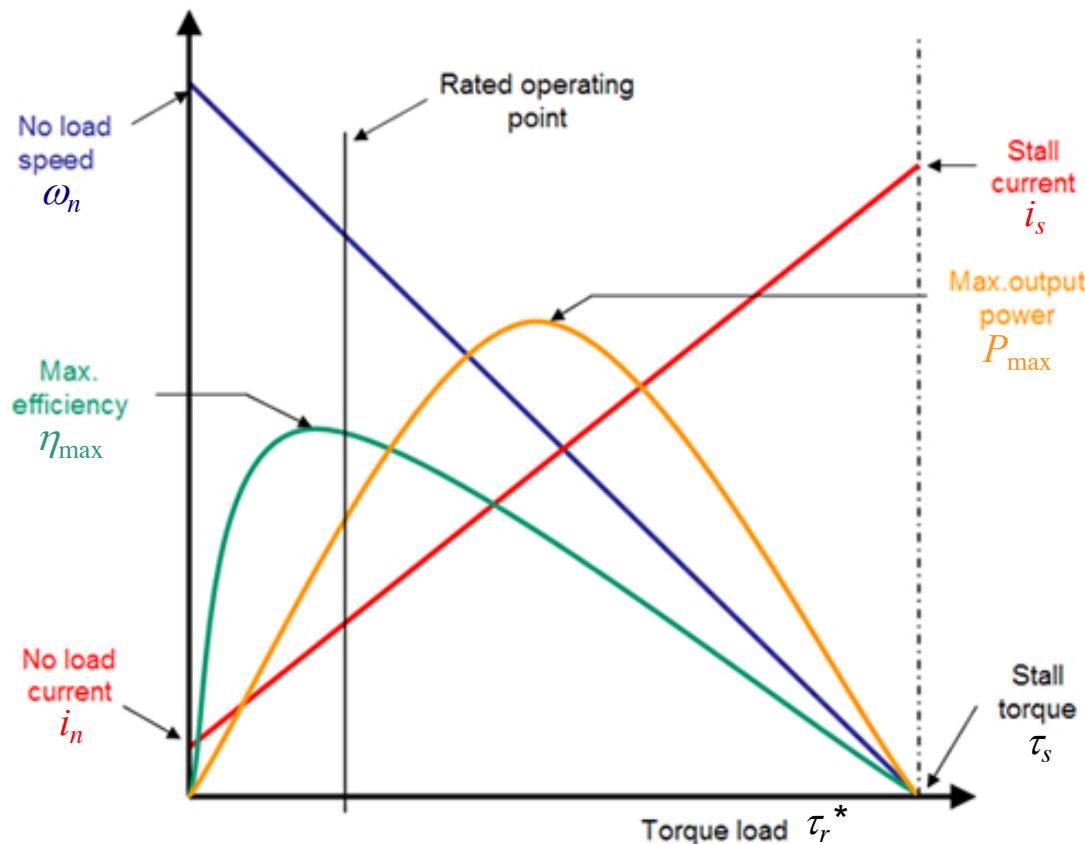
$$\tau_r^* = \frac{k_m}{R_a} V_a - \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right) \omega^*$$

$$i_a^* = \frac{1}{R_a} \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} (bV_a + k_m \tau_r^*)$$

$$= \frac{1}{R_a} (V_a - k_m \omega^*)$$

⇒ se ne possono tracciare gli andamenti ('affini', ossia lineari con offset) in funzione di  $\tau_r^*$  o di  $\omega^*$

# Motore DC: caratteristiche statiche



- coppia e corrente di stallo (= al max carico)

$$\tau_s = \tau_r^* \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{k_m}{R_a} V_a \quad i_s = i_a^* \Big|_{\omega^* = 0} = \frac{V_a}{R_a}$$

- velocità e corrente a carico nullo

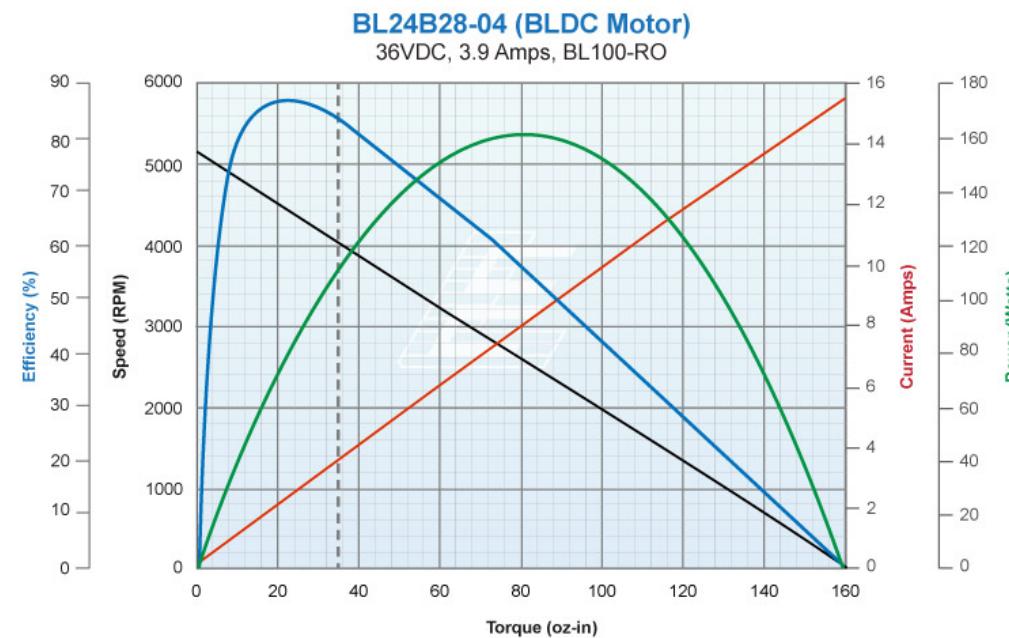
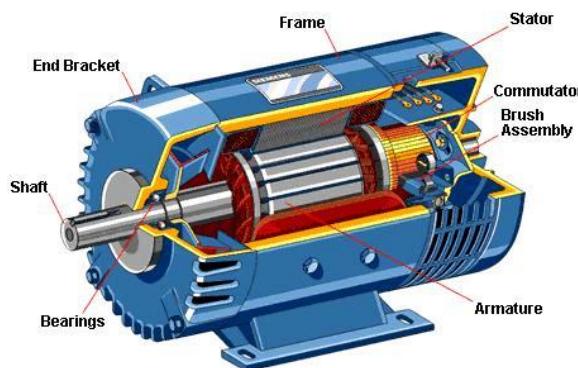
$$\omega_n = \omega^* \Big|_{\tau_r^* = 0} = \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \tau_s \quad i_n = i_a^* \Big|_{\tau_r^* = 0} = \frac{b}{k_m} \omega_n$$

- potenza in uscita a regime (quadratica)

$$\begin{aligned} P^* &= \tau_r^* \omega^* = \tau_s \omega^* - \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right) \omega^{*2} \\ &= \left( b + \frac{k_m^2}{R_a} \right)^{-1} \left( \tau_s \tau_r^* - \tau_r^{*2} \right) \end{aligned}$$

- la massima potenza si ha quando  $\frac{dP^*}{d\tau_r^*} = 0 \Rightarrow \tau_r^* = \frac{\tau_s}{2}$  (per  $\omega^* = \frac{\omega_n}{2}$ )  $\Rightarrow P_{max} = \frac{\tau_s \omega_n}{4}$
- l'efficienza è data da  $\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{\tau_r^* \omega^*}{V_a i_a^*}$  (non lineare), con valore massimo  $\eta_{max}$  pari a ... (esercizio)

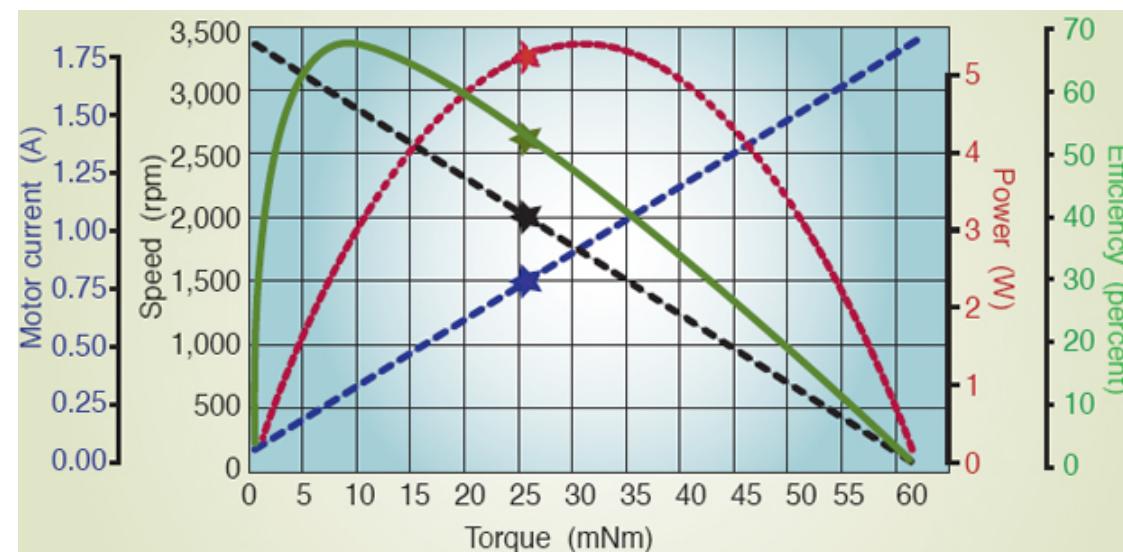
# Motore DC: caratteristiche statiche



motore di  
media taglia  
160W

a regime, per tensione  
applicata  $V_a$  costante

conversione SI  $\Leftrightarrow$  US  
1 Nm = 141.61 oz-in  
100 oz-in = 0.70 Nm



motore di  
piccola taglia  
5.5W

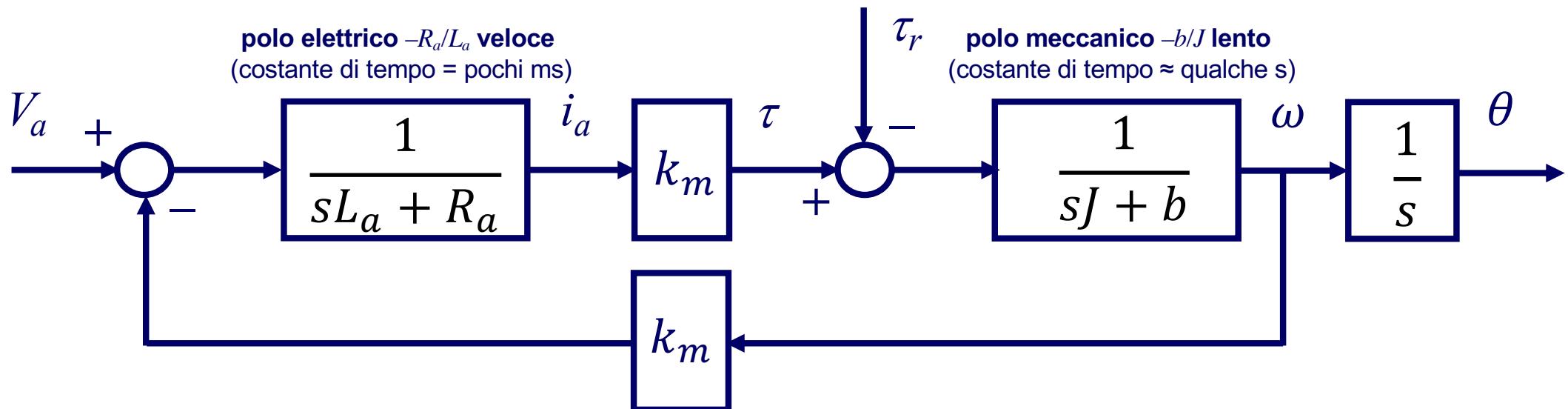
# Schema a blocchi del motore DC

$$L_a \frac{di_a}{dt} = V_a - R_a i_a - k_m \omega \quad \Rightarrow \quad \frac{i_a}{V_a - k_m \omega} = \frac{1}{sL_a + R_a}$$

nel dominio  
della trasformata  
di Laplace

$$J \frac{d\omega}{dt} = k_m i_a - b\omega - \tau_r \quad \Rightarrow \quad \frac{\omega}{k_m i_a - \tau_r} = \frac{1}{sJ + b}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega \quad \Rightarrow \quad \frac{\theta}{\omega} = \frac{1}{s}$$



Domande classiche:  $G(s) = \omega(s)/V_a(s)$ ? Stabilità (ad anello aperto)? “Luogo delle radici” al variare di  $k_m > 0$ ?

# Progetto del controllore

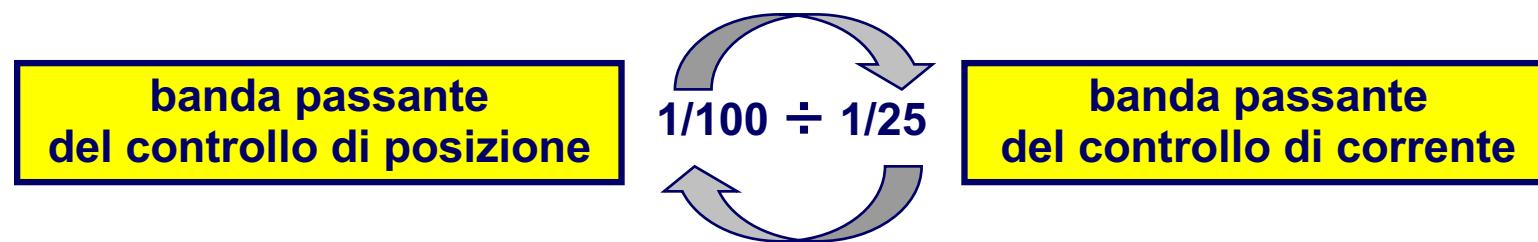
## □ obiettivi di controllo

- ➔ stabilità (meglio, *robusta*: anche in condizioni operative incerte)
- ➔ *inseguimento* di un riferimento desiderato di posizione  $\theta_{rif}(t)$
- ➔ *reiezione* dei disturbi di coppia non nota  $\tau_r(t)$

## □ progetto “centralizzato” o “in cascata” (per successivi anelli/loop) del controllore

- ➔ difficile il primo, vantaggioso il secondo sotto l’ipotesi di *idealità* degli anelli interni
- ➔ tre anelli di feedback (e azioni di feedforward) su **corrente, velocità e posizione**

## □ separazione dinamica



## □ limitazioni nell’implementazione

- ➔ saturazioni ‘fisiche’ di tensione e corrente
- ➔ rumori
- ➔ limite inferiore sul tempo di campionamento
- ➔ banda dell’anello di corrente tipicamente  $0.5 \div 1 \times 10^4$  rad/sec
- ➔ banda dell’anello di posizione circa 400 rad/sec

# Azioni di controllo in avanti (feedforward)

---

## □ richiami sull'uso del feedforward

- ➔ comandi ad anello aperto per compensare **disturbi noti** e/o per eseguire in modo accurato **traiettorie di riferimento note e arbitrarie** (ma sufficientemente “smooth”)
- ➔ sono definiti in **condizioni nominali** (è richiesta in generale un'accurata conoscenza del modello e dei parametri del processo)
- ➔ i comandi sono basati sulla **inversione ingresso-uscita** del modello dinamico del processo di interesse (ad anello aperto o ad anello chiuso)
- ➔ per sistemi dinamici lineari, tale inversione può effettuarsi nel dominio del tempo o nel dominio di Laplace (o anche di Fourier, se gli andamenti sono periodici)
- ➔ i comandi in avanti si calcolano in modo diretto per processi stabili o instabili, ma senza zeri o **solo con zeri “a fase minima”** ( $\Rightarrow$  asintotica stabilità del sistema inverso)
- ➔ non si ha un “vincolo di causalità” per il processo inverso, proprio perché l’andamento completo del riferimento (o del disturbo compensato) è **noto a priori**
- ➔ per la riproduzione **esatta** (da  $t = 0$  in poi) di una traiettoria di riferimento in uscita, è necessario che il sistema (processo e eventuale controllore) si trovi in un ben definito stato iniziale, funzione della traiettoria desiderata e delle sue derivate all’istante  $t = 0$
- ➔ il feedforward non viene **quasi mai usato da solo**, ma in combinazione con una legge di controllo in feedback che garantisca la stabilità del sistema ad anello chiuso

# Azioni di controllo in avanti (feedforward)

- uso combinato del controllo in feedback e dei comandi di feedforward
  - ➔ in presenza di **parametri incerti** (ad esempio, note solo delle stime approssimate  $\hat{J}$ ,  $\hat{b}$  dell'inerzia  $J$  e del coefficiente viscoso  $b$ ) e/o per condizioni iniziali non “matched” con quelle richieste, il feedforward calcolato darà luogo ad **errori**
  - ➔ la sola azione in **feedback**, oltre a permettere stabilità ad anello chiuso, fornisce già **riproduzione** di classi di riferimenti canonici (di tipo polinomiale e sinusoidali)
    - **senza** necessità di conoscere i valori dei parametri del processo
    - **senza** necessità di conoscere le ampiezze dei riferimenti
    - **solo** a regime permanente (cioè a valle di un periodo transitorio)
  - ➔ l'azione di feedback garantirà **stabilità asintotica** e **robustezza** di comportamento rispetto a incertezze e/o errori iniziali, mentre le azioni di feedforward miglioreranno le **prestazioni**, in particolare per la riproduzione di **riferimenti con andamento temporale complesso**
  - ➔ due **schemi alternativi** per l'aggiunta dell'azione di feedforward al controllo in feedback
  - ➔ illustriamo questi concetti in un problema di controllo della velocità angolare  $\omega$ , quando l'ingresso è la coppia  $\tau$  (è un sotto-caso parziale del controllo del motore DC)

# Esempio di uso del feedforward

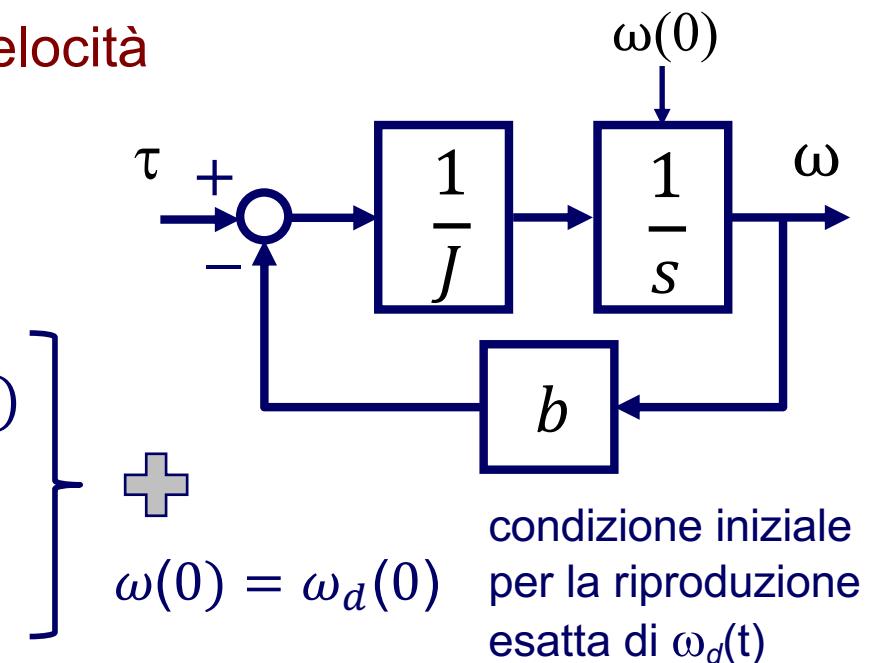
- inversione ad anello aperto nel controllo di velocità

$$J\dot{\omega} + b\omega = \tau \quad \xrightarrow{\text{nel dominio del tempo}} \quad P(s) = \frac{1}{sJ + b} \quad \xrightarrow{\omega}$$

$$\omega = \omega_d(t) \Rightarrow \tau = \tau_d(t) = J\dot{\omega}_d(t) + b\omega_d(t)$$

con Laplace  $\Leftrightarrow$

$$\tau_d(s) = P^{-1}(s)\omega_d(s) = (Js + b)\omega_d(s)$$



- controllore PI (ad es., per avere errore nullo a regime per velocità  $\omega_d$  costante)

Block diagram of a PI controller:

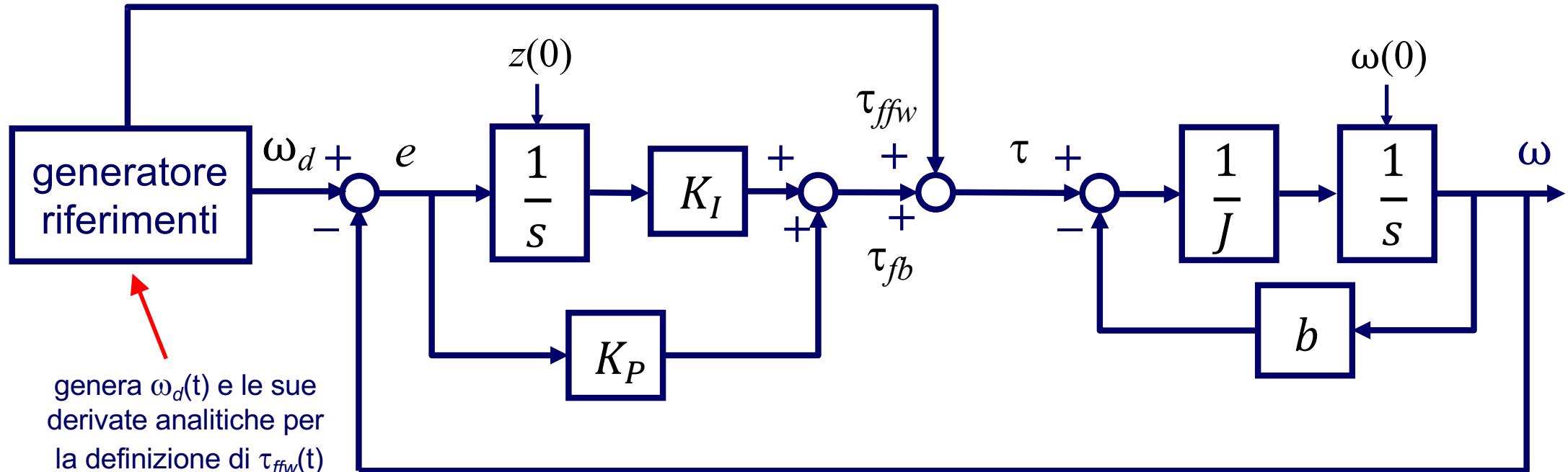
$$C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} = \frac{K_P s + K_I}{s} \quad F(s) = P(s)C(s) \quad K_F = \frac{K_I}{b}$$

$$W(s) = \frac{F(s)}{1 + F(s)} = \frac{K_P s + K_I}{J s^2 + (b + K_P)s + K_I} \quad K_W = W(0) = 1$$

$$W_e(s) = 1 - W(s) = \frac{(J s + b)s}{J s^2 + (b + K_P)s + K_I} \quad W_e(0) = 0$$

# Esempio di uso del feedforward

- controllo PI in feedback e aggiunta dell'azione di feedforward a livello di coppia



$$\omega = \omega_d(t) \Rightarrow \tau_{ffw}(t) = J\dot{\omega}_d(t) + b\omega_d(t)$$

$$PI \Rightarrow \tau_{fb}(t) = K_P(\omega_d(t) - \omega(t)) + K_I \int_0^t (\omega_d(\sigma) - \omega(\sigma)) d\sigma$$

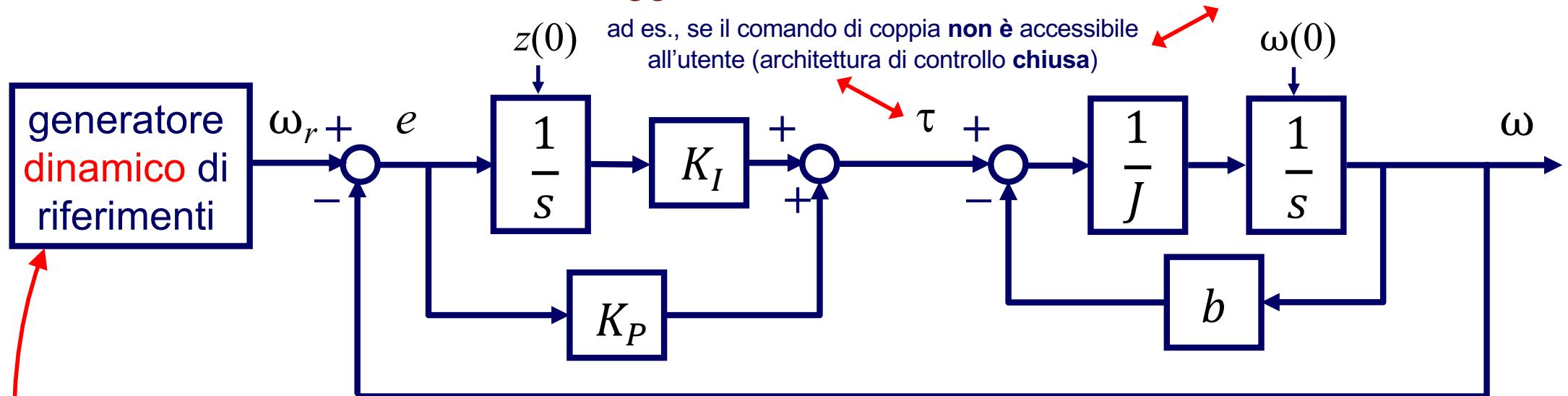
$$\left. \begin{aligned} \tau &= \tau_{fb} + \tau_{ffw} \end{aligned} \right\}$$

+ condizioni iniziali degli integratori  
 (stati del processo e del controllore)  
 per la riproduzione esatta di  $\omega_d(t)$

$$\omega(0) = \omega_d(0) \quad z(0) = 0$$

# Esempio di uso del feedforward

- controllo PI in feedback con aggiunta del feedforward a livello di riferimento



$$\omega = \omega_d(t) \quad \& \quad W(s) = \frac{\omega(s)}{\omega_r(s)} = \frac{K_P s + K_I}{J s^2 + (b + K_P)s + K_I} \implies \omega_r(s) = W^{-1}(s)\omega_d(s)$$

$$\Rightarrow (K_P s + K_I) \omega_r(s) = (J s^2 + (b + K_P)s + K_I) \omega_d(s)$$

$$\Rightarrow \dot{\omega}_r(t) = \frac{1}{K_P} \left( J \ddot{\omega}_d(t) + (b + K_P) \dot{\omega}_d(t) + K_I (\omega_d(t) - \omega_r(t)) \right)$$

+ condizioni iniziali per la riproduzione esatta di  $\omega_d(t)$

$$\omega(0) = \omega_d(0)$$

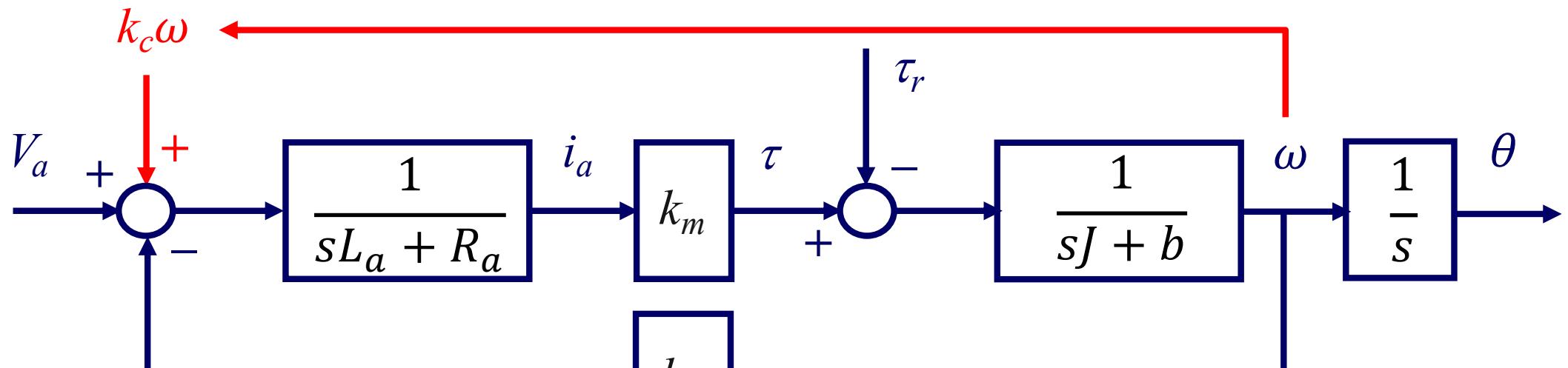
$$\omega_r(0) = \omega_d(0)$$

$$z(0) = \frac{1}{K_I} (J \dot{\omega}_d(0) + b \omega_d(0))$$

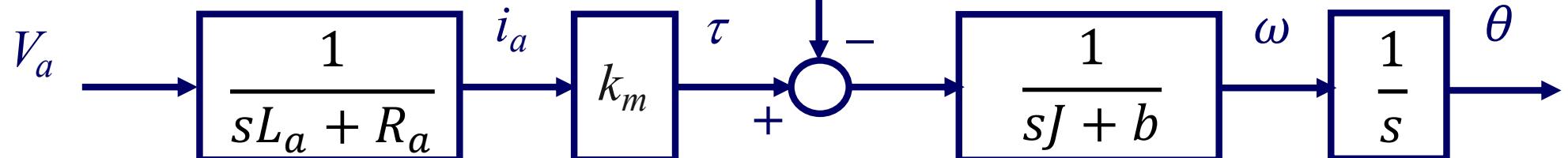
# Controllo del motore DC

cancellazione via *feedback* della FCEM attuale

- la corrente risente anche del modello meccanico e del disturbo di coppia
- cancellazione con retroazione positiva (ma problemi di *instabilità* quando  $k_c > k_m$ )



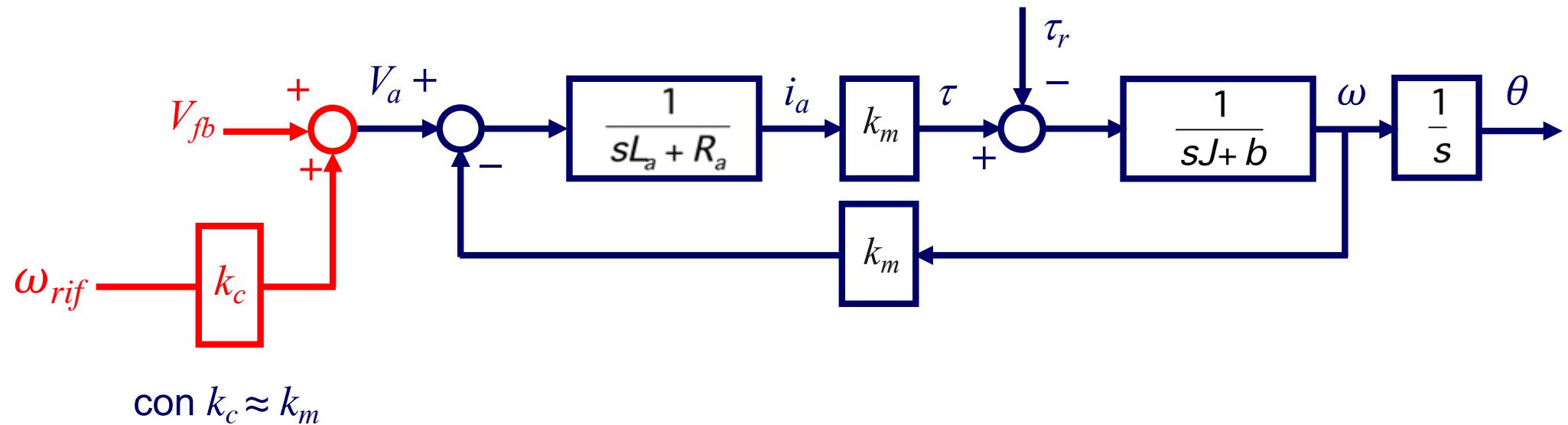
se  $k_c = k_m$



# Controllo del motore DC

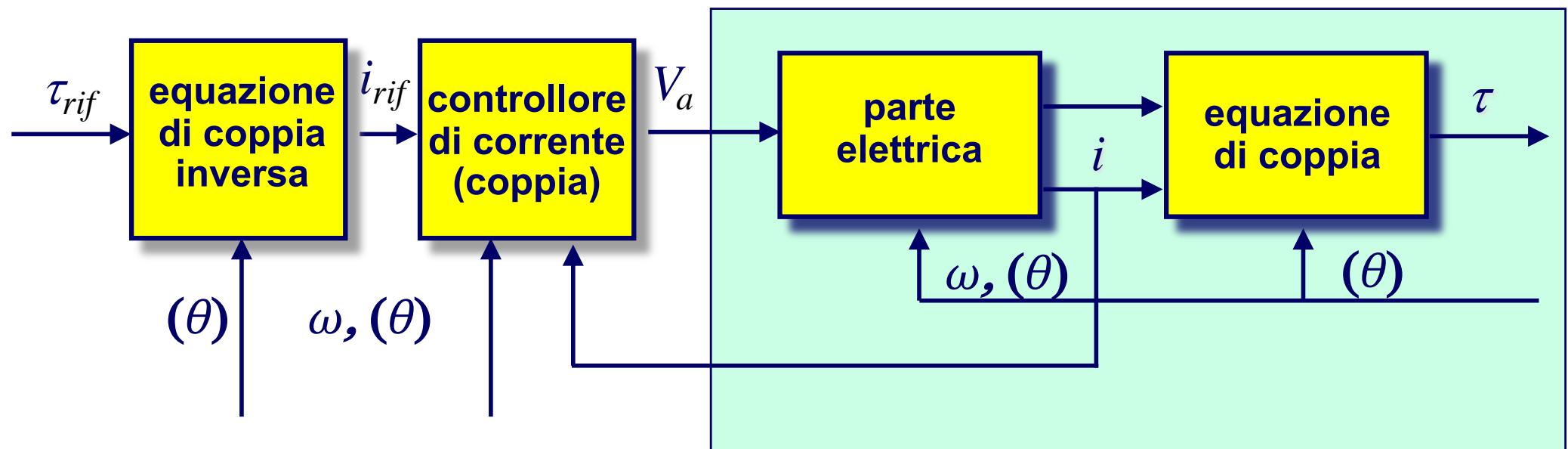
compensazione via *feedforward* della FCEM nominale

- azione in avanti per compensare, almeno in modo approssimato, il fenomeno



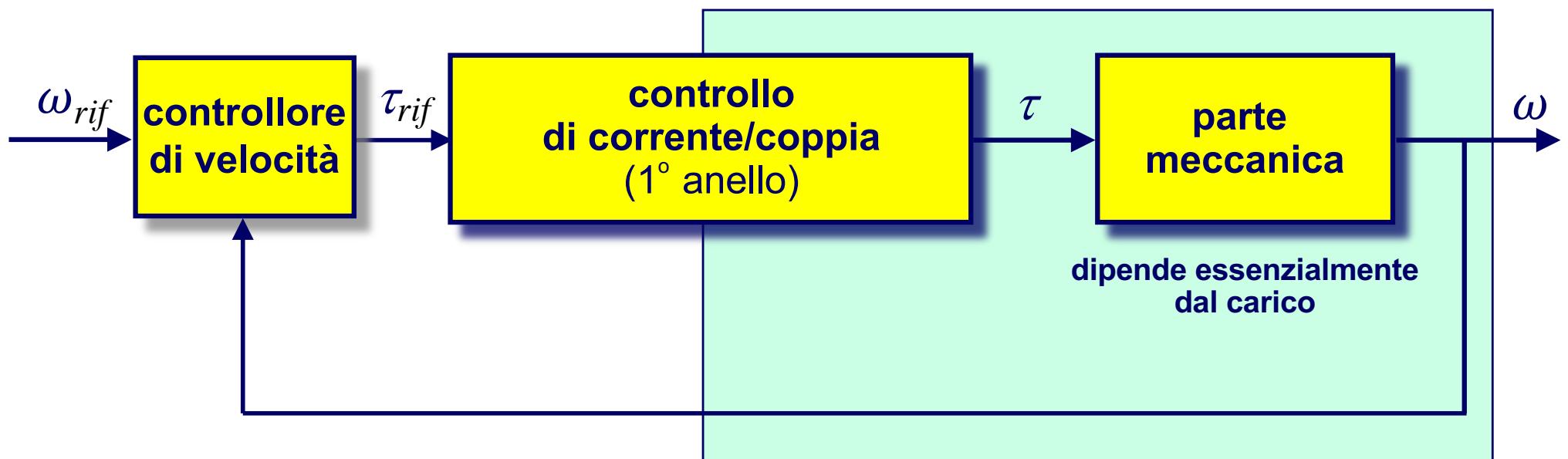
1° anello (più interno) di corrente (o di coppia)

- ❑ risente degli effetti dell'amplificatore
- ❑ risente direttamente della natura del motore
- ❑ usa la relazione coppia-corrente statica (non si ha una misura diretta di coppia)



## 2° anello (intermedio) di velocità

- ❑ l'anello più interno è visto come un attuatore “ideale” (o quasi) di coppia
- ❑ risente indirettamente della natura del motore
- ❑ risente direttamente della natura meccanica del carico



## 3° anello (esterno) di posizione

- il secondo anello interno è visto come un attuatore “ideale” (o quasi) di velocità
- risente indirettamente della natura elettrica del motore
- risente indirettamente della natura meccanica del carico

} schema di controllo  
puramente  
**cinematico**



- nel progetto effettivo
  - si parte dall’anello più esterno (assumendo gli anelli più interni come ideali) e si procede verso quelli interni
  - l’uscita di comando di un anello esterno è l’ingresso di riferimento per l’anello immediatamente più interno

Che tipo di regolatori si usano **nei diversi loop** di controllo?

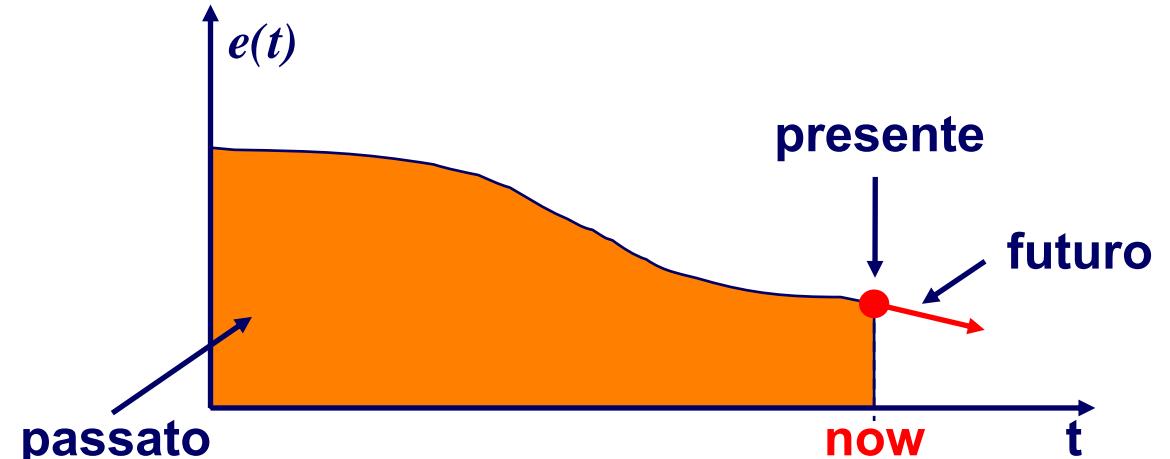
□ **caratteristiche desiderate**

- ➔ basso costo
- ➔ standardizzazione
- ➔ semplicità della legge (algoritmi complessi non servono, le limitazioni maggiori sono imposte dalla tecnologia)
- ➔ semplicità di taratura dei parametri (tuning)

□ **soluzione più comune ⇒ regolatori PID**

Quali informazioni sul segnale di errore  $e(t)$  si introducono nell'azione di controllo?

- **presente:**  $e(t)$
- **passato:**  $\int e(t)dt$
- **futuro:**  $de(t)/dt$



## Regolatore Proporzionale-Integrale-Derivativo (PID)

- produce in generale tre azioni, ciascuna proporzionale a
  - errore istantaneo (azione P)
  - integrale del segnale di errore (azione I)
  - (stima) della derivata del segnale di errore (azione D)
- è ampiamente usato in automazione (**standard**)
  - semplice da tarare (solo tre parametri)
  - con procedure automatiche (che non usano in genere informazioni sul modello)
  - comportamento piuttosto robusto rispetto a incertezze
- è un sistema dinamico (se l'azione integrale è effettivamente presente)

$$e(t) = y_{rif}(t) - y(t)$$

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right)$$

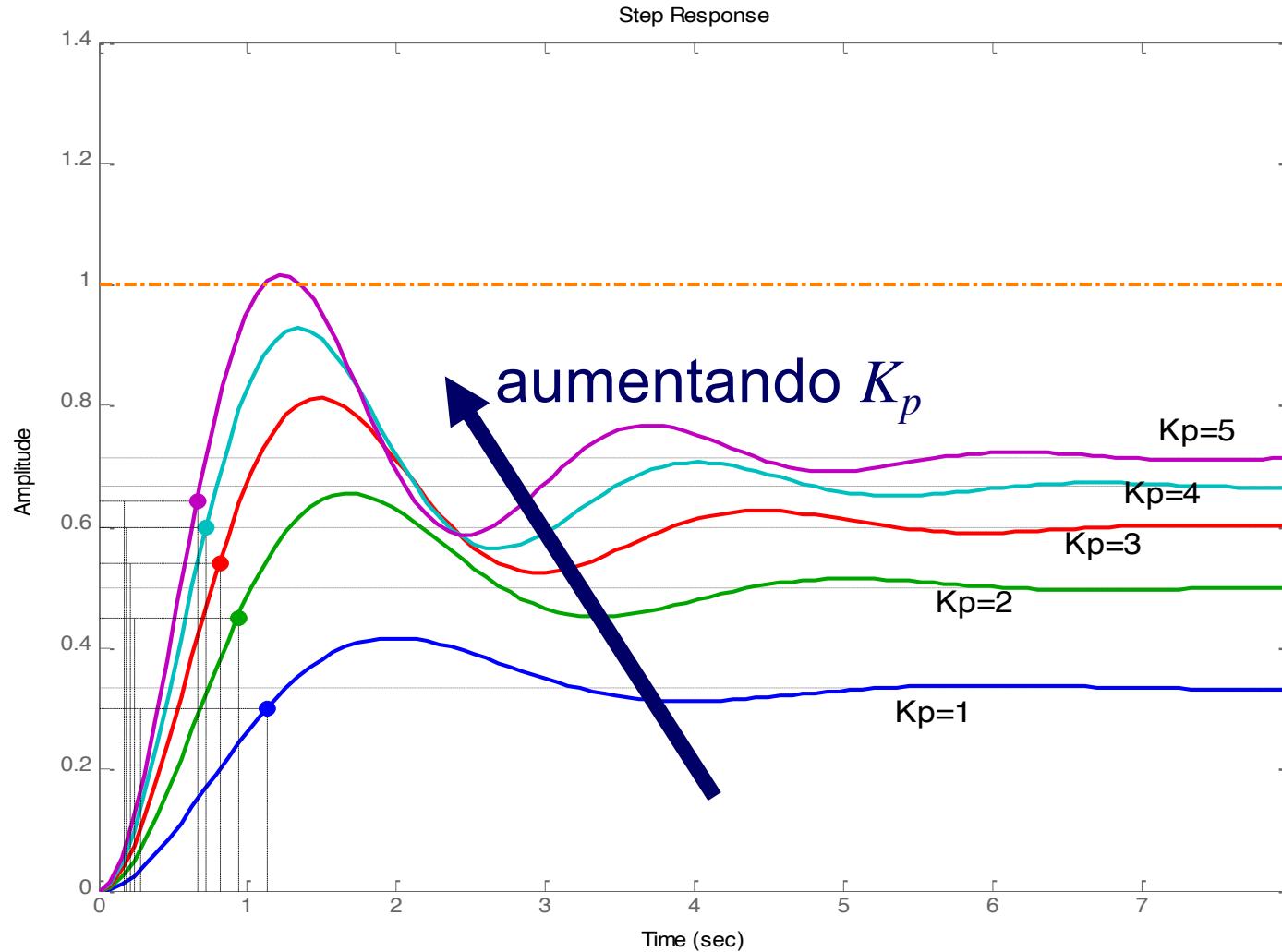
$T_i$  = tempo di integrazione  
( $K_i = K_p/T_i$ )

$T_d$  = tempo di derivazione  
( $K_d = K_p T_d$ )

## Azione P

- accelera il comportamento transitorio del sistema
- **riduce l'errore a regime**
  - per avere errore a regime nullo, il guadagno  $K_p$  dovrebbe essere infinito (per avere un'azione non trascurabile anche in presenza di errore molto piccolo)
  - per questo motivo si introduce l'azione integrale...
  - ...a meno che il processo non abbia già un'azione integrale al suo interno (sistema di controllo di tipo 1) ⇒ errore a regime in risposta a un gradino è nullo per qualsiasi  $K_p$
- svantaggio: tende a destabilizzare il sistema all'aumento del guadagno  $K_p$

## Azione P



## Azione I

- azione diversa da zero anche quando  $e(t) = 0$
- **annulla** l'errore a regime per riferimenti costanti
  - ➔ equivale ad un guadagno proporzionale infinito per segnali costanti (a frequenza nulla)
- svantaggio: tende a destabilizzare il sistema al diminuire del tempo di integrazione  $T_i$

## Azione PI

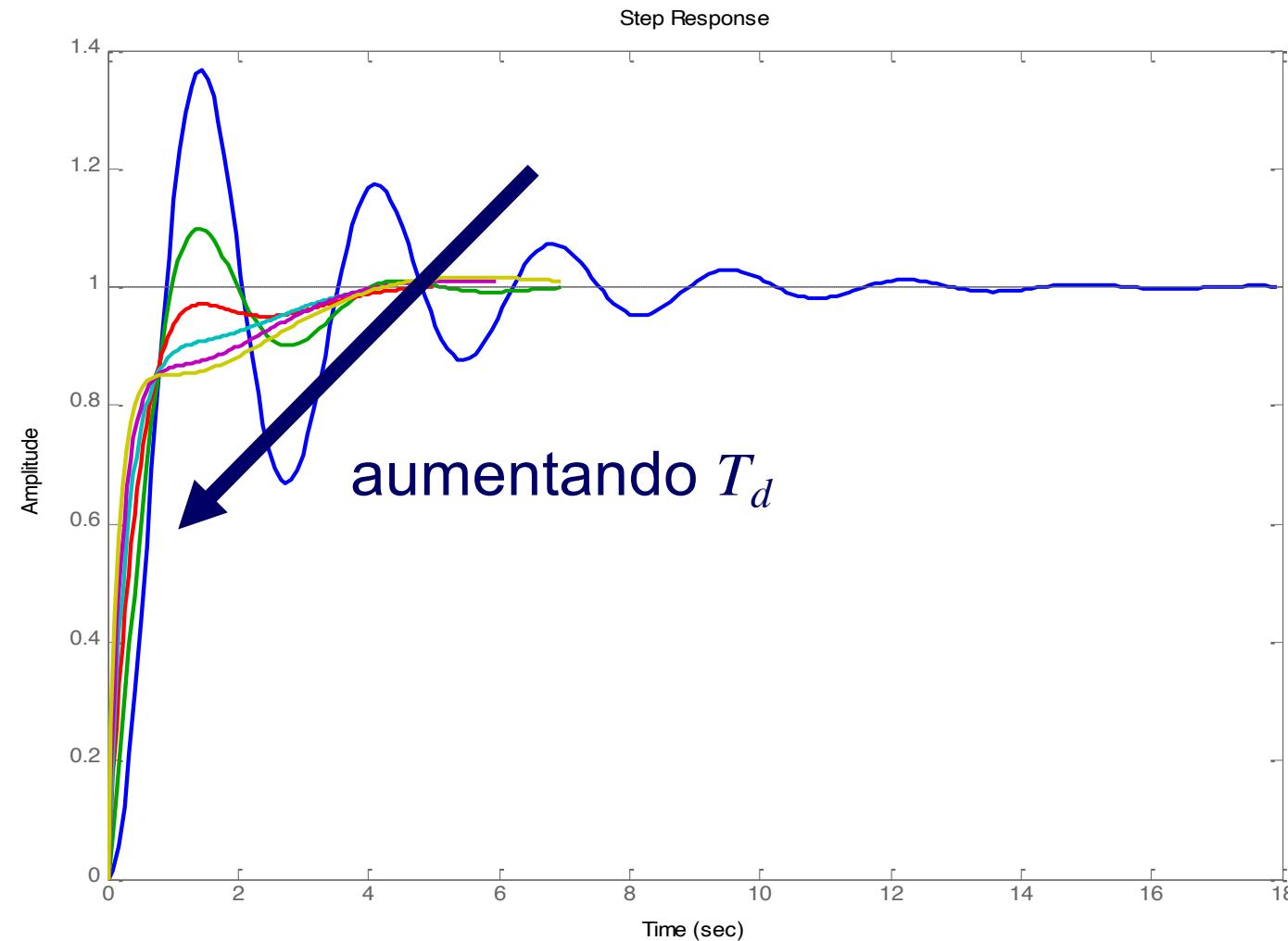
- $\approx$  guadagno + polo in  $s=0$  + rete anticipatrice opportuna

$$C(s) = \frac{K}{s} \frac{1+\tau_a s}{1+(\tau_a/m_a)s} \xrightarrow{m_a \gg \tau_a} C(s) = \frac{K}{s} (1 + \tau_a s) = (K\tau_a) + \frac{K}{s} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

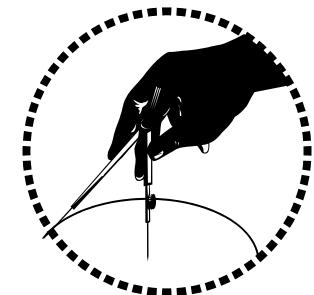
## Azione D

- azione basata su stima dell'evoluzione futura del sistema
  - ➔ per motivi di causalità, si può solo “approssimare” la derivata del segnale di errore
- **anticipa** l'errore, evitando che l'uscita si allontani dal riferimento a causa dell'accelerazione data dall'azione proporzionale
  - ➔ simile all'azione di una rete anticipatrice (zero/polo) nella sintesi in frequenza, con il polo molto in alta frequenza
- tende a stabilizzare il sistema
- svantaggio: rallenta la risposta del sistema

## Azione D



## regole di massima sulle singole azioni di controllo

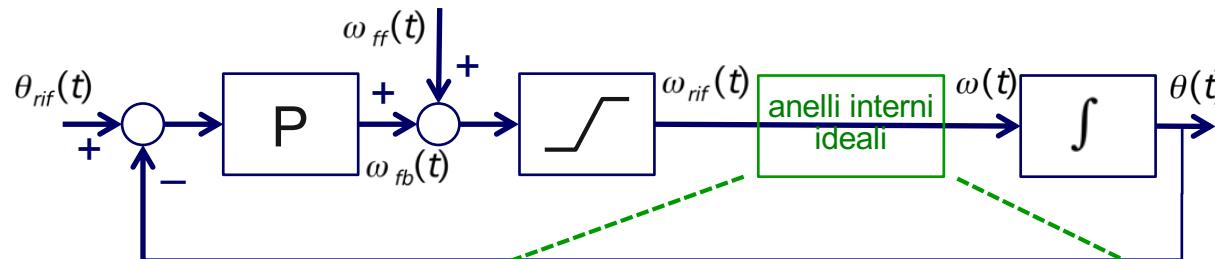


aumentando l'azione	prontezza di risposta	margine di stabilità	errore a regime
<b>P</b> $K_p \uparrow$	aumenta	diminuisce	diminuisce
<b>I</b> $T_i \downarrow$	diminuisce	diminuisce	nullo (se azione presente)
<b>D</b> $T_d \uparrow$	diminuisce	migliora (se azione presente)	ininfluente

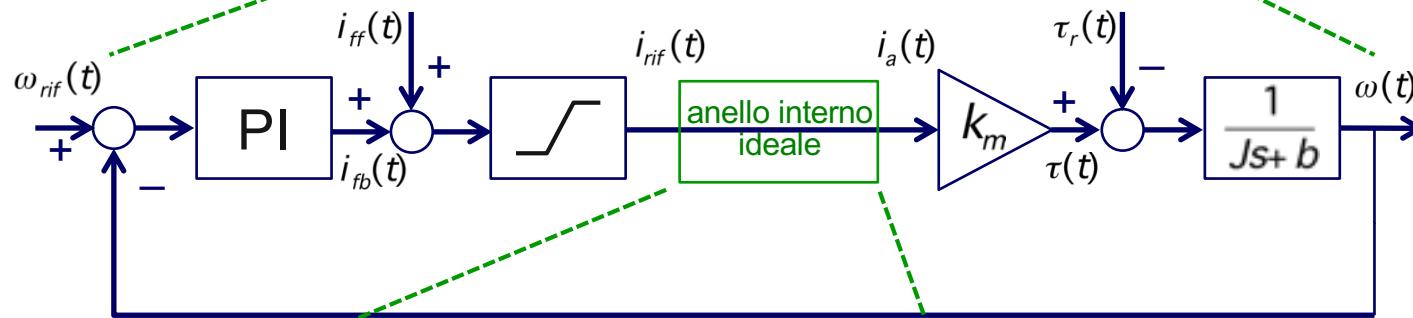
N.B. In seguito, si vedranno metodi empirici di 'auto-tuning'/sintonizzazione dei guadagni e possibili implementazioni digitali dei PID

# Progetto dei singoli anelli per un motore DC

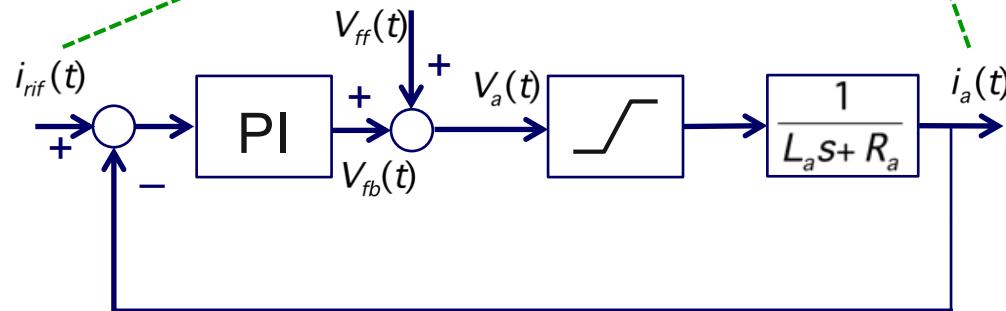
- nell'ipotesi di separazione dinamica, si procede a **ritroso dall'anello più esterno**:  
posizione  $\Rightarrow$  velocità  $\Rightarrow$  corrente



- $\Rightarrow$  regolatore **P** di posizione
- $\Rightarrow$  il processo è un integratore (sistema di tipo 1!)

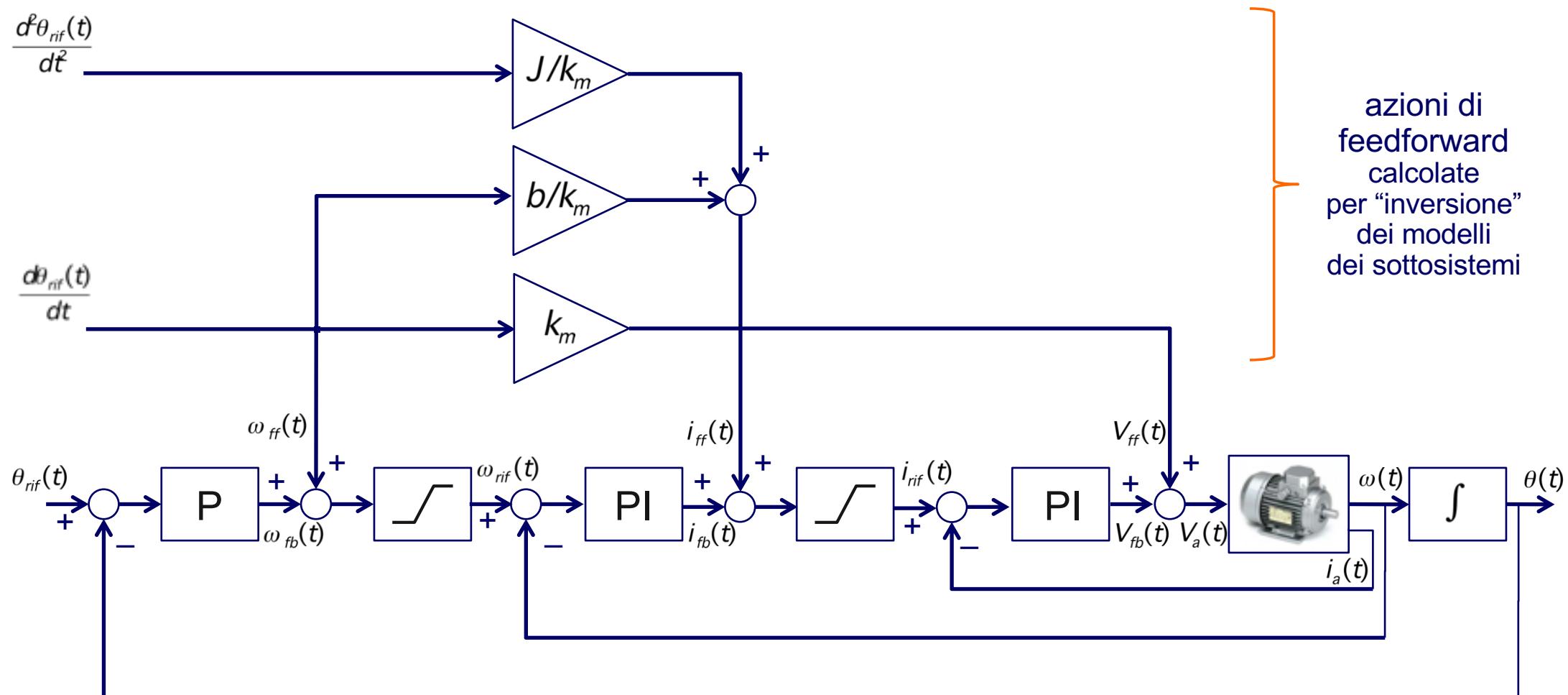


- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di velocità
- $\Rightarrow$  azione integrale per reiezione del disturbo (di coppia)



- $\Rightarrow$  regolatore **PI** di corrente
- $\Rightarrow$  azione integrale per robustezza a incertezze dei parametri elettrici

# Schema di controllo finale di un motore DC



- **anelli di feedback:** PI su corrente; PI su velocità; P su posizione
- **compensazioni (feedforward):** per inseguimento di traiettoria e rimozione FCEM



video  
(+ audio!)

## Prestazioni di un motore passo-passo e di un motore DC di taglia analoga

- a bassa, media e alta velocità v
- se si comanda  $v > 105\% v_{max}$ , lo stepper motor “perde il passo” e si blocca ...
- il motore DC mantiene un buon comportamento anche per  $v = 120\% v_{max}$

# Sincronizzazione dei moti

- se abbiamo più assi (arbitrariamente complessi) da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

video



video



Automi della Maison Roullet-Decamps, costruiti nel XIX-XX secolo

Musée de l'Automate, Souillac sur Dordogne, France

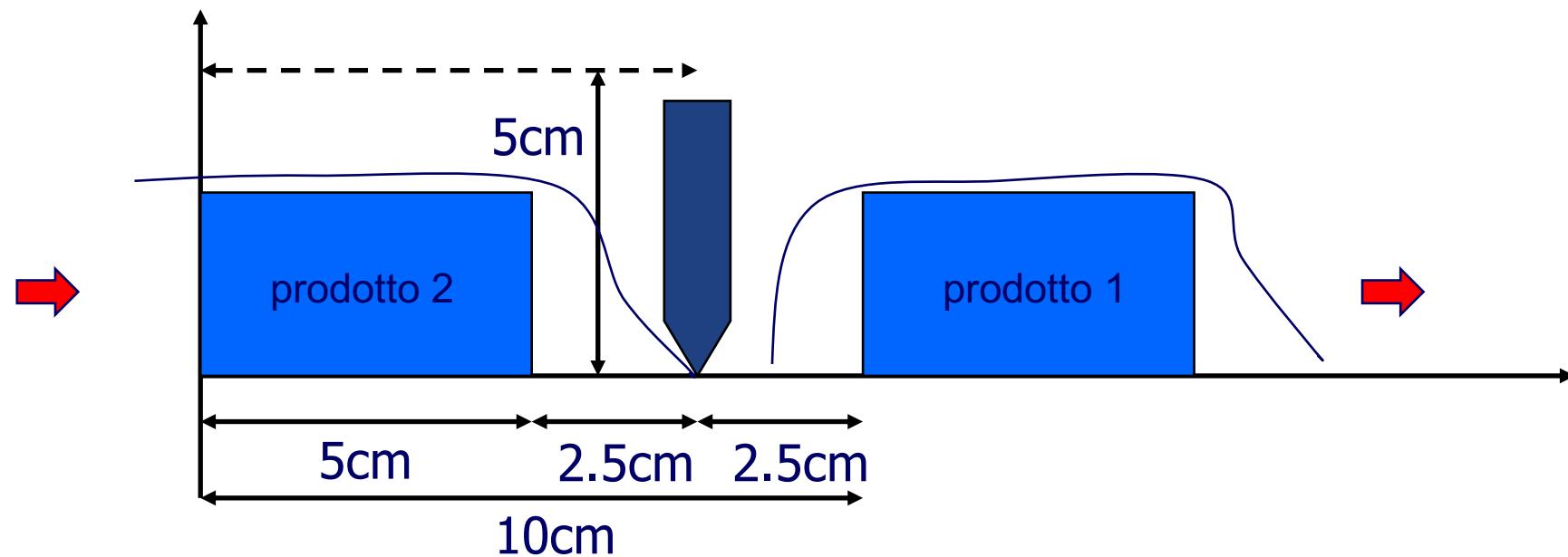
<http://www.musee-automate.fr>

(ognuno ha un solo motore)

# Sincronizzazione dei moti

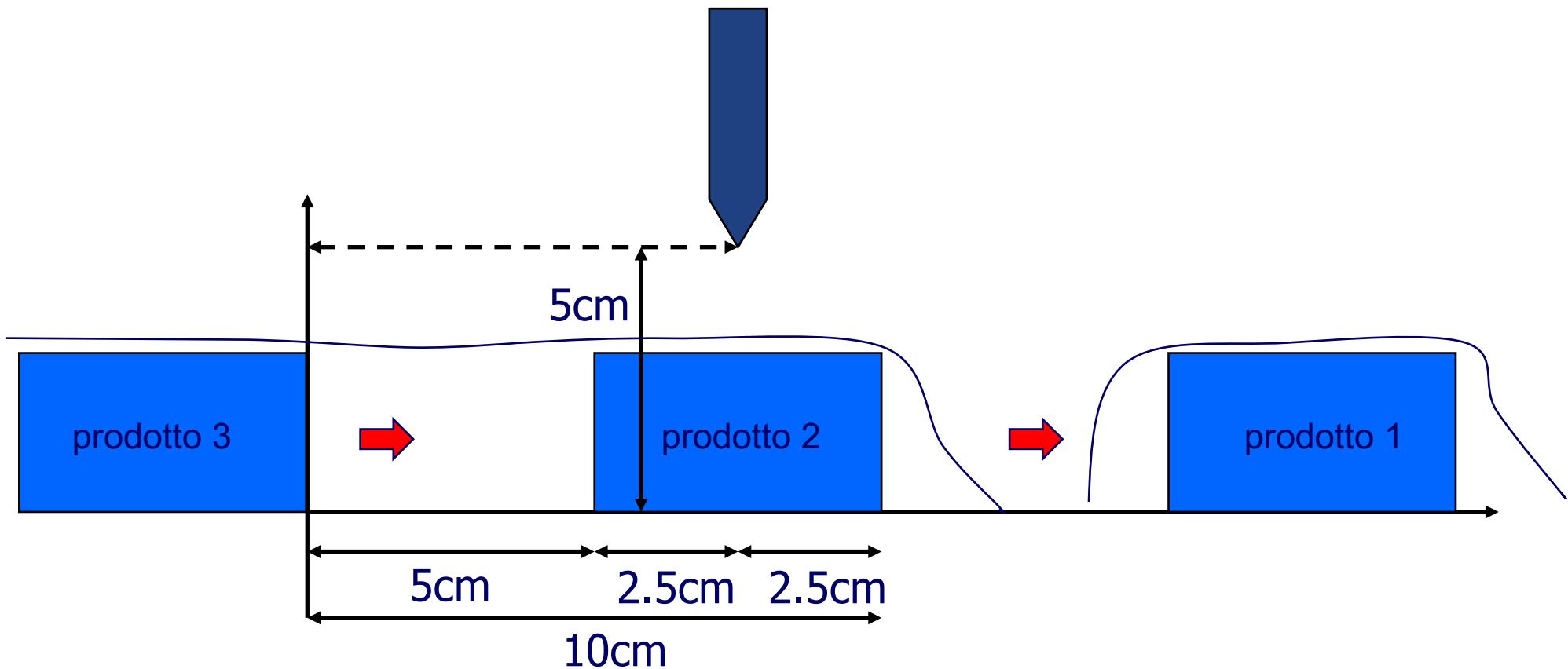
- se abbiamo più assi da muovere in modo coordinato, utilizziamo un solo attuatore o più attuatori?

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



# Sincronizzazione dei moti

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore

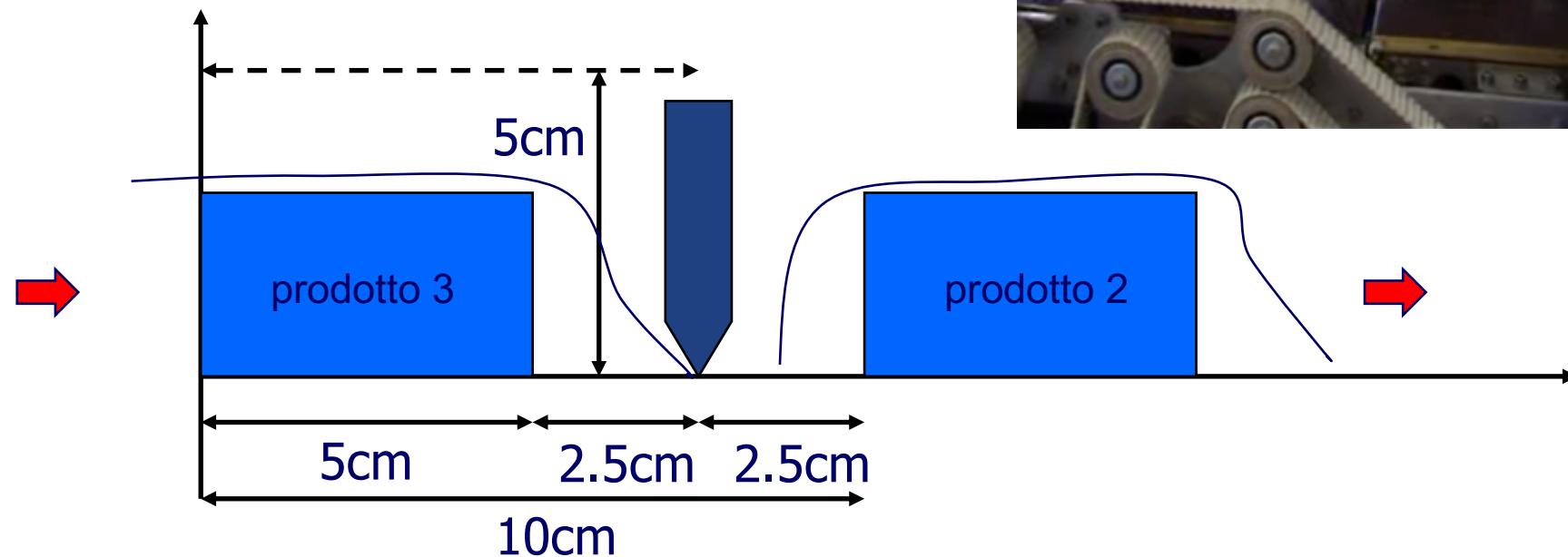


# Sincronizzazione dei moti

problema di movimentazione sincronizzata:  
taglierina di pellicola per avvolgere prodotti su nastro trasportatore



esempio di prodotto:  
pacco di 6 bottiglie  
di acqua minerale  
“imballate” in plastica

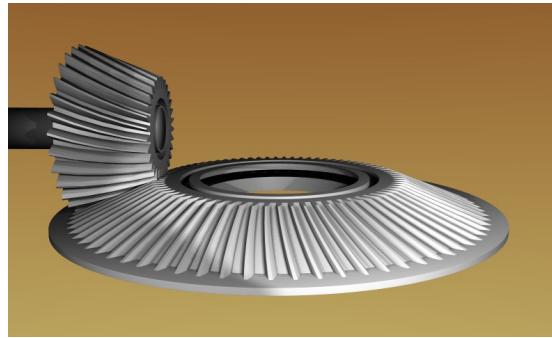


Coordinamento della movimentazione delle parti meccaniche in un sistema meccatronico

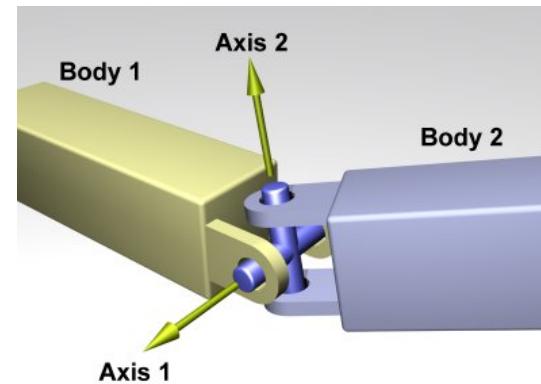
- meccanica
- elettronica
- automatica

Inizialmente il controllo e la distribuzione del moto era demandato a una serie di dispositivi meccanici (**catene cinematiche**) azionati da un'unica sorgente di moto (motore elettrico a velocità costante)

- **soluzione robusta e affidabile, ma estremamente rigida**
  - ➔ cambio formato = cambio parti meccaniche
- macchine automatiche **mono-attuatore**



ruotismi



giunti



manovellismi



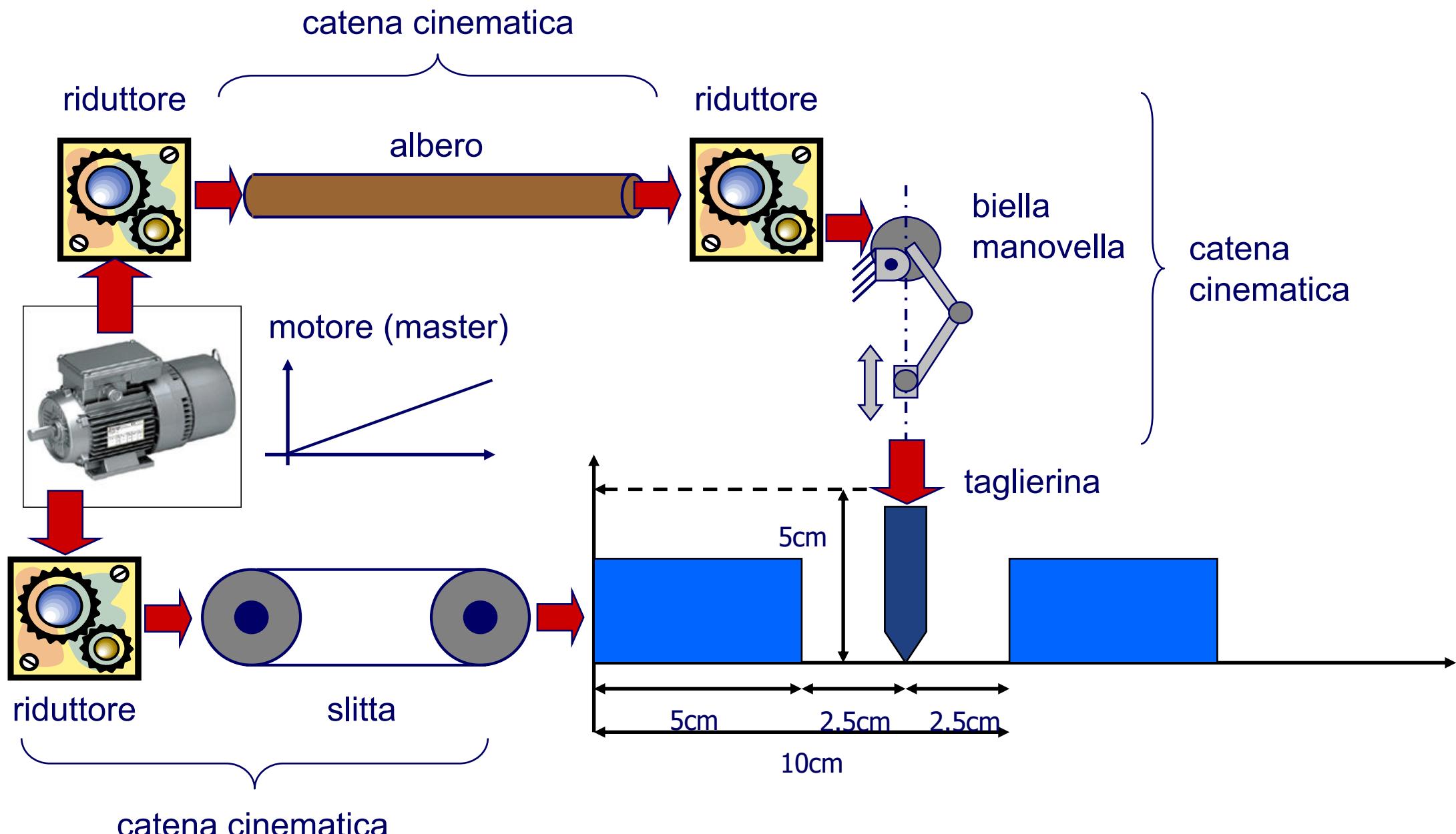
camme



cinghie/pulegge



cremagliere

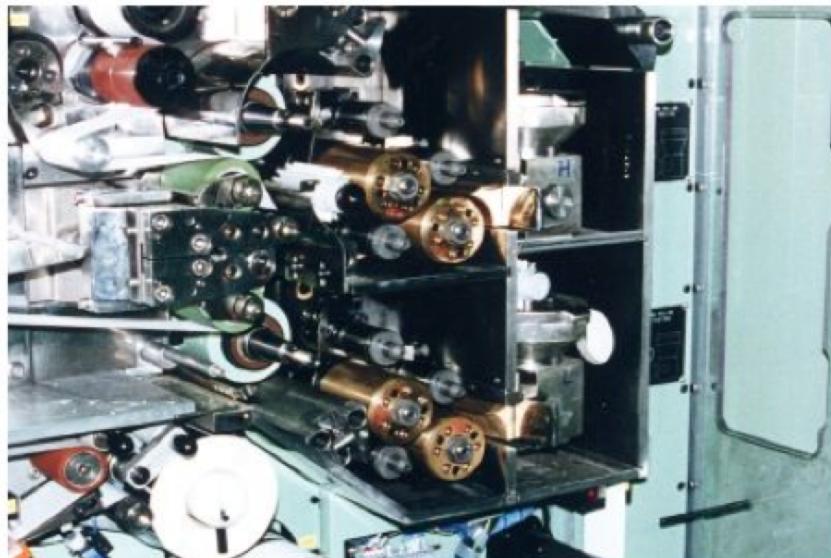


# Sincronizzazione dei moti

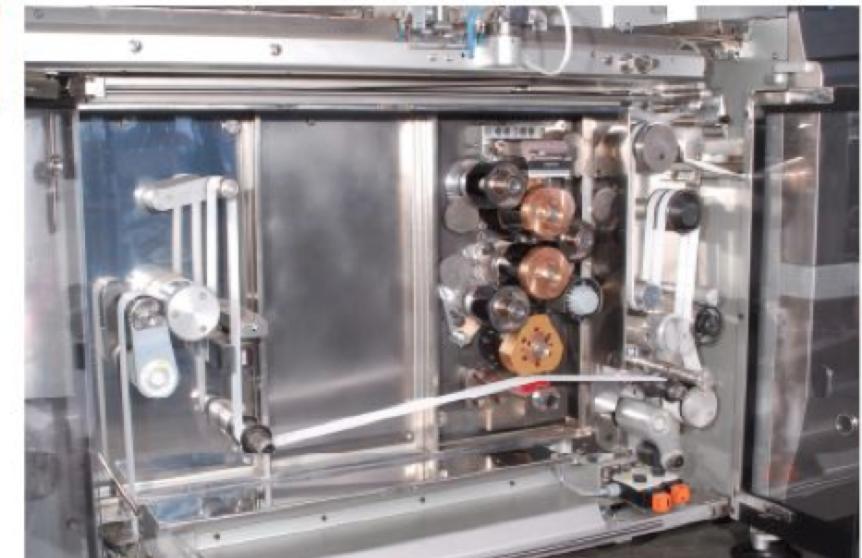
Dalla metà degli anni 1980 si è adottata una nuova soluzione basata sul controllo elettronico del moto mediante retroazione

asservire assi elettrici a riferimenti di posizione impostati via software

- asse principale (master) a cui sono sincronizzati **più** assi secondari (slave) secondo profili di moto gestiti completamente via software
- sincronizzazione basata sul concetto di “camma elettronica”
- macchine automatiche **pluri**-attuatore (integrate)

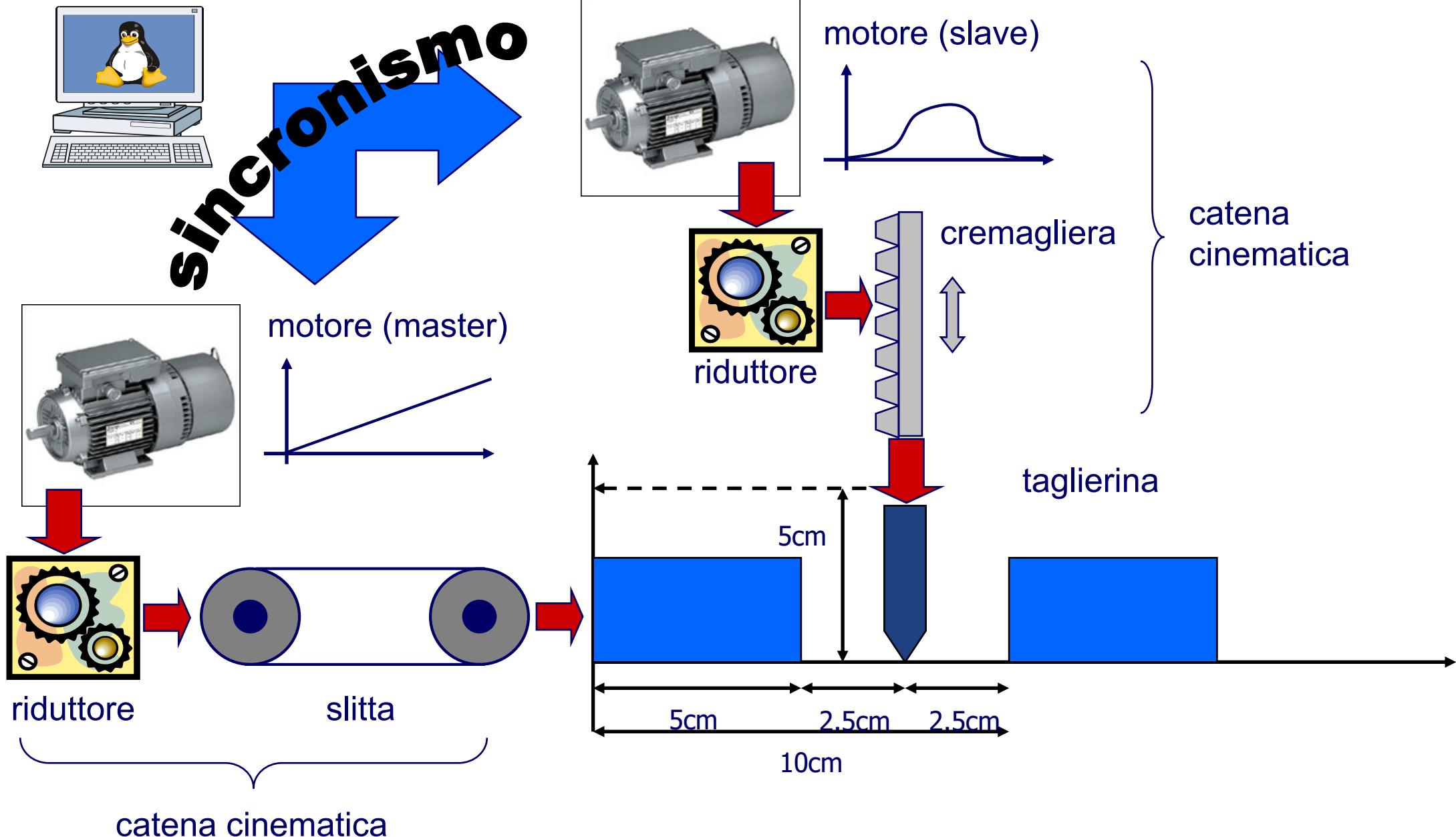


ieri



oggi

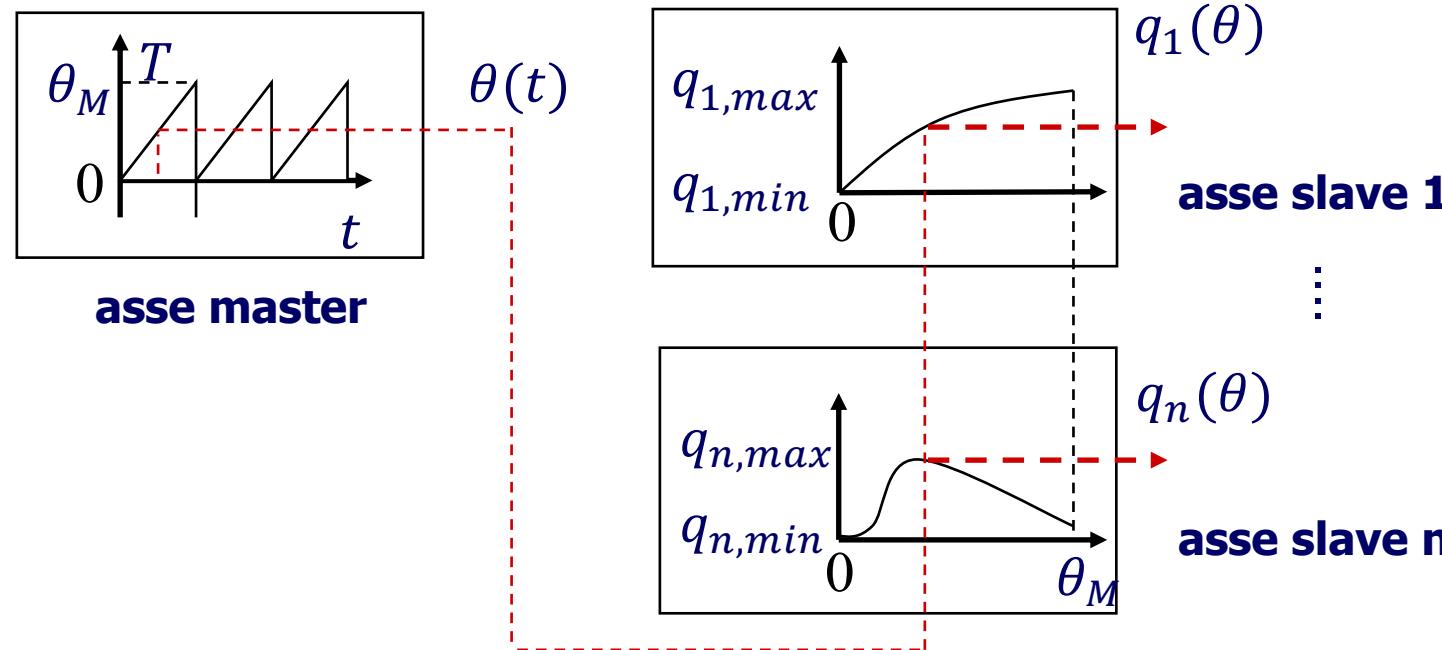
# Sincronizzazione dei moti



# Sincronizzazione dei moti

## □ sincronizzazione master-slave

- asse motore master tipicamente a velocità costante
- profili di moto degli assi dei motori slave **parametrizzati** sul profilo di moto master
- problema di inseguimento della traiettoria per un motore elettrico



- leggi orarie  $\theta = \theta(t)$  (rispetto al tempo, per il **master**)
- leggi parametriche  $q = f(\theta)$  (rispetto al parametro, per gli **slave**)
- trattazione **comune**

→ leggi polinomiali:  $q = f(\theta) = a_0 + a_1\theta + a_2\theta^2 + \cdots + a_n\theta^n$

→ doppia normalizzazione

$$\theta \in [\theta_i, \theta_f] \Rightarrow \theta_N = \frac{\theta - \theta_i}{\theta_f - \theta_i} \in [0,1]$$

$$q \in [q_i, q_f] \Rightarrow q_N = q_i + (q_f - q_i) f_N(\theta_N)$$
$$\Rightarrow f_N(0) = 0, f_N(1) = 1$$

→ condizioni (sulle derivate) al contorno (valori iniziale e finale)

- casi notevoli: cubica, quintica (con derivate al contorno nulle), ...

→ leggi trapezoidali: combinazione di tratti a derivata costante

- casi notevoli: trapezio in “velocità”, in “accelerazione” (a doppia esse)

→ splines (polinomi cubici a tratti) per interpolazione di  $n$  punti

→ analisi “spettrale” in frequenza (continuità  $\Leftrightarrow$  vibrazioni)

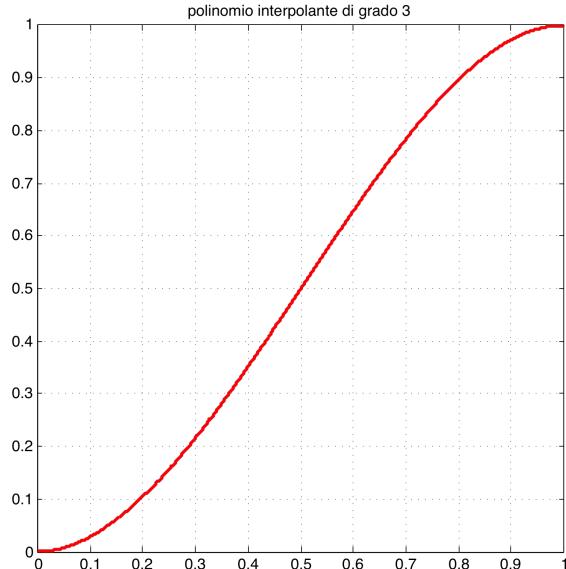
# Profili di moto

- profili binormalizzati di una cubica e una quintica (con derivate nulle al contorno)

$$f_N(\theta_N) = 3\theta_N^2 - 2\theta_N^3$$

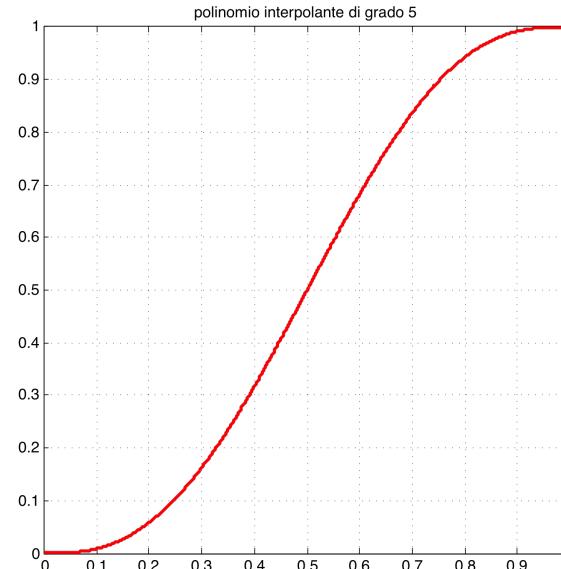
$$f_N(\theta_N) = 10\theta_N^3 - 15\theta_N^4 + 6\theta_N^5$$

posizione

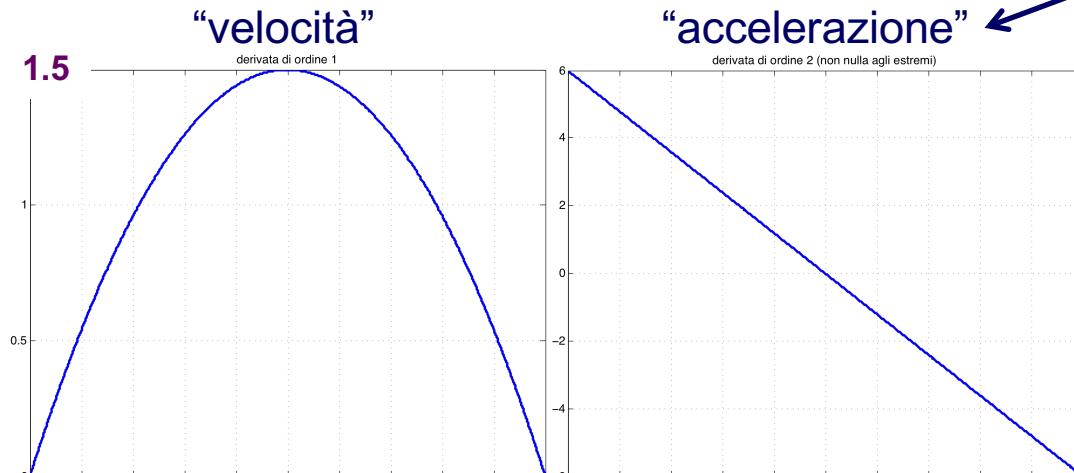


se le derivate fossero  
rispetto al tempo...

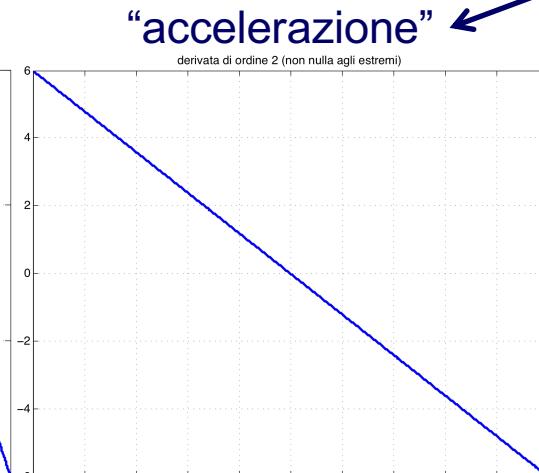
posizione



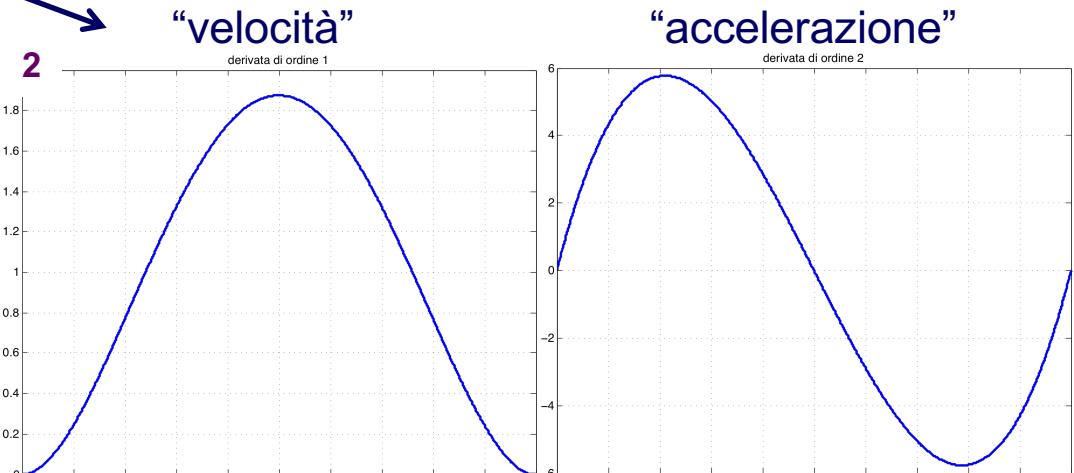
“velocità”



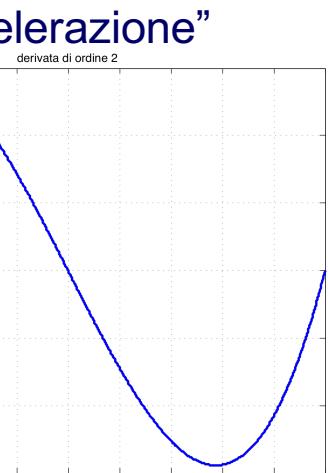
“accelerazione”



“velocità”

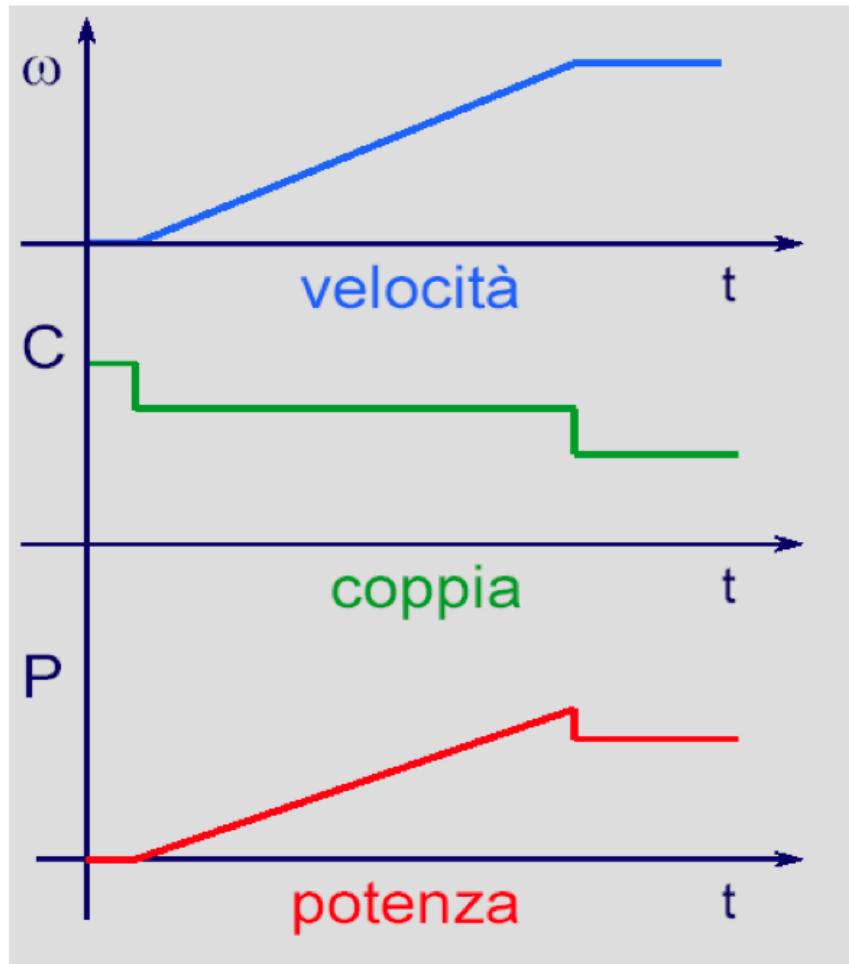


“accelerazione”

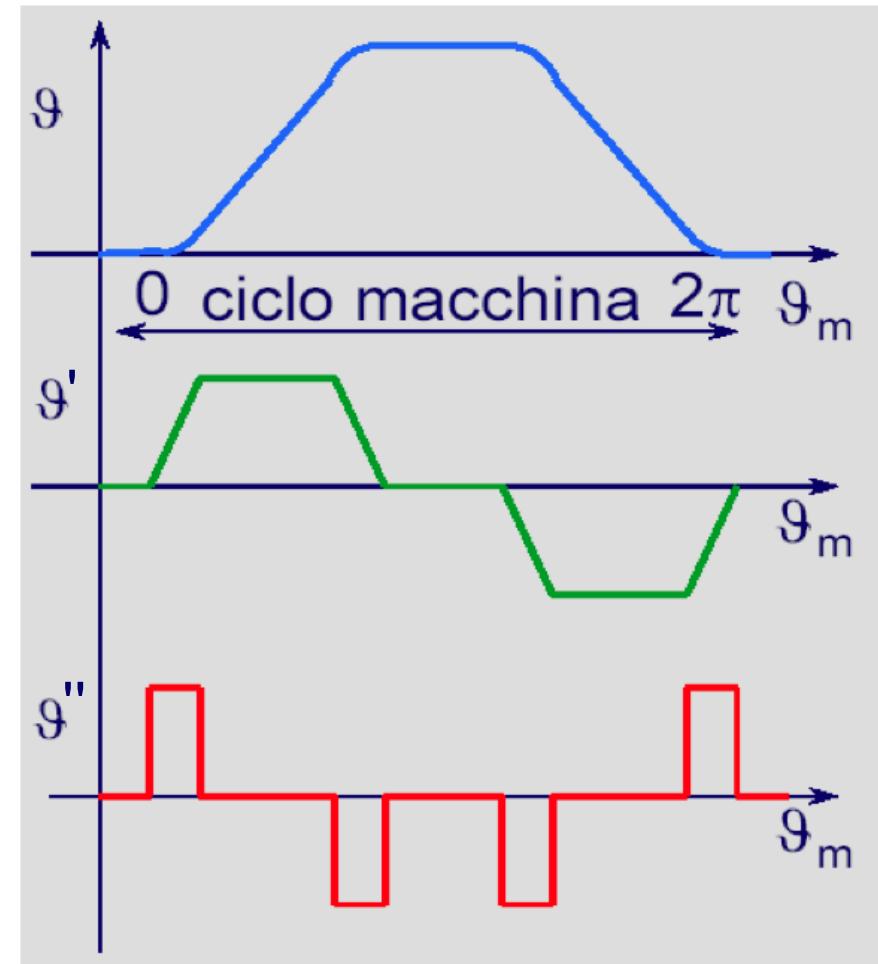


# Profili per moti uniformi o ciclici

- moto **uniforme**, ad es. rampa di velocità da fermo  $\Rightarrow$  a velocità costante di regime
- moto **ciclico**, ad es. profilo “a doppia esse” (ritorna alla posizione iniziale)



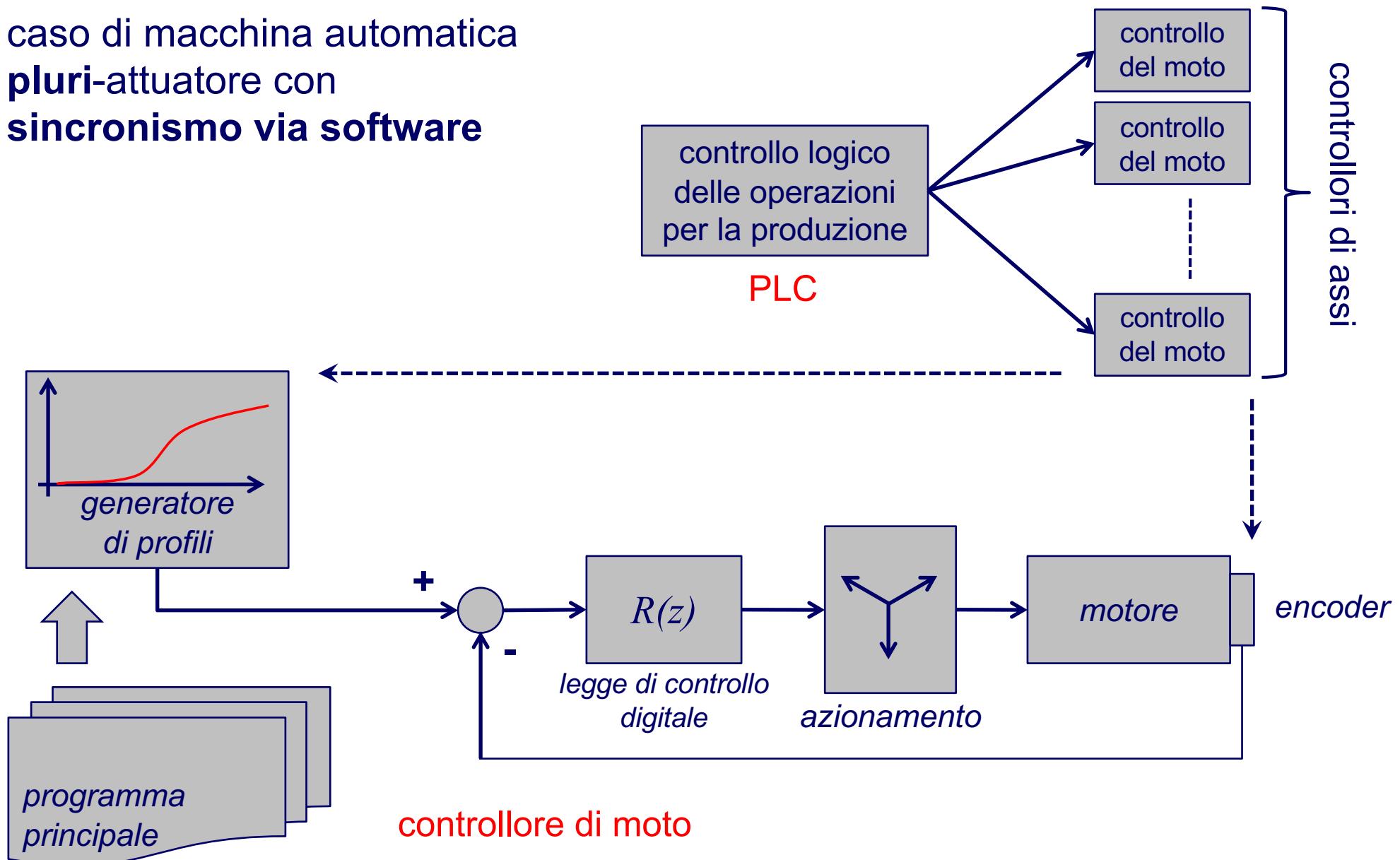
legge oraria (**nel tempo**)



legge parametrica (**nello spazio**)

# Controllo assi di una macchina automatica

- caso di macchina automatica pluri-attuatore con sincronismo via software



# Azionamenti e controllori del moto

Principali produttori (in ordine alfabetico)

- [www.beckhoff.com](http://www.beckhoff.com)



- [www.br-automation.com](http://www.br-automation.com) (ABB)



- [www.controltechniques.com](http://www.controltechniques.com) (Nidec)



- [www.rockwellautomation.com](http://www.rockwellautomation.com) (Allen Bradley)



- [www.schneider-electric.com](http://www.schneider-electric.com)



- [www.automation.siemens.com](http://www.automation.siemens.com)



## Sezioni 5.1-5.5.1



### TITOLO

**Sistemi di automazione industriale  
Architetture e controllo**

### AUTORI

Claudio Bonivento  
Luca Gentili  
Andrea Paoli

### EDITORE

McGraw-Hill