

# Fondamenti di automatica

---

**Dr. Davide M. Raimondo**

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Università degli Studi di Pavia

[davide.raimondo@unipv.it](mailto:davide.raimondo@unipv.it)

# Informazioni utili

---

- Due classi in parallelo: A-K (Ferrari-Trecate) e L-Z (Raimondo)
- Orario lezioni (L-Z)
  - 9-11 (aula EF2) e 16-18 (aula EF1), Giovedì 11-13 (aula EF2), Venerdì 11-13 (aula EF2)
- Laboratori (L-Z)
  - Giovedì 11-13, aule C1-B2 (le date verranno comunicate in seguito)
- Orario ricevimento: Mercoledì 11.00-12.30
  - Ufficio: Laboratorio di Identificazione e Controllo di Sistemi Dinamici, piano C)

# Informazioni utili

---

- Sito web di riferimento

<http://sisdin.unipv.it/>

→ Teaching → Fondamenti di automatica

- Testo consigliato

P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni “Fondamenti di Controlli Automatici”

3<sup>a</sup> ed., 2008, McGraw-Hill, Italia

# Informazioni utili

---

- Modalità d'esame

- una prova scritta di 3 ore su tutti gli argomenti del corso

Appunti e calcolatrici grafiche NON sono ammesse agli esami

- Iscrizioni agli appelli

- vanno effettuate dalla propria pagina studente nel sistema web d'Ateneo

Le iscrizioni terminano 7 giorni prima della prova.

# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si **comporti in modo prestabilito** agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.

# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si comporti in modo prestabilito agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.



Sistema fisico

# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si comporti in modo prestabilito agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.



Comportamento desiderato

# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si comporti in modo prestabilito agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.



Variabili



# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si comporti in modo prestabilito agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.

La determinazione dell'andamento delle variabili di controllo viene compiuta da un organo detto **controllore** o **regolatore**.

# Il problema del controllo

---

Il **problema del controllo** consiste nel far sì che un processo si comporti in modo prestabilito agendo opportunamente sulle **variabili** che ne influenzano il comportamento.

La determinazione dell'andamento delle variabili di controllo viene compiuta da un organo detto **controllore o regolatore**.



# Problema di controllo

---

- **Definizione più formale**

Imporre che l'andamento nel tempo di alcune variabili di processo (dette **controllate**) sia il più simile possibile a quello di alcune variabili assegnate (dette **di riferimento o set-point**) agendo su altre variabili (dette **manipolabili o di controllo**)

# Esempio

---

**Automobile su strada pianeggiante:** controllo di velocità e traiettoria

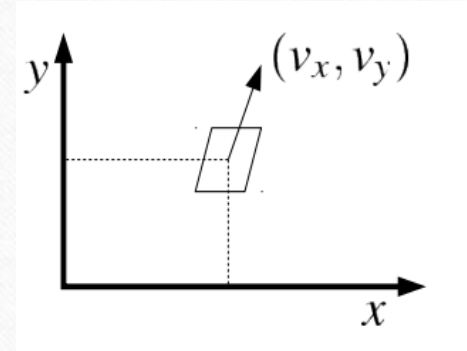
- Traiettoria
  - Si stima la posizione dell'auto
  - Si agisce sul volante
- Velocità
  - Si misura la velocità dell'auto (tachimetro)
  - Si agisce sui pedali (acceleratore e freno) e sul cambio



# Esempio

## Automobile su strada pianeggiante: controllo di velocità e traiettoria

Imporre che l'andamento di alcune variabili di processo (dette controllate) sia il più simile possibile a quello di alcune variabili assegnate (dette di riferimento o set-point) agendo su altre variabili (dette manipolabili o di controllo)



- 4 variabili controllate (2 di posizione e 2 di velocità) e 4 variabili di riferimento
- 4 variabili di controllo (posizioni del volante, dell'acceleratore, del freno e del cambio)
- N.B.: la coppia dell'albero motore non è una variabile di controllo

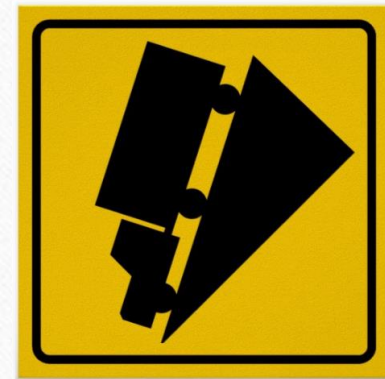
# Disturbi

---

Un disturbo è una variabile non manipolabile che agisce sul processo “dall'esterno”.  
Esso può essere misurato o meno.

## Automobile: esempi di disturbi

- Pendenza della strada
- Carico della macchina
- Forza esercitata dal vento
- Condizioni dell'asfalto
- ...



**Il controllo deve essere efficace anche in presenza dei disturbi !**

# Classificazione controlli

## Classificazione

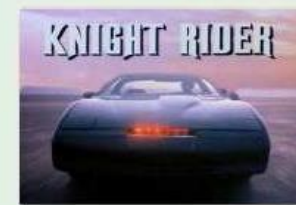
- **naturali:** il processo è dotato in un meccanismo di autoregolazione
- **artificiali:** il controllore è un'entità esterna al processo
  - **Manuali:** azione di controllo esercitata dall'uomo
  - **Automatici:** azione di controllo esercitata da un dispositivo progettato appositamente



Naturali



Manuali



Automatici

# Classificazione controlli

## Classificazione: esempi

All'interno del corpo umano esistono molti sistemi di controllo naturali

- 1 Tenere costante la pressione arteriosa
- 2 Fare in modo che il ritmo del battito cardiaco sia il più adeguato alle diverse condizioni di sforzo
- 3 Tenere costante la temperatura corporea
- 4 Consentire movimenti complessi delle varie parti del corpo senza perdita dell'equilibrio da parte dell'individuo
- 5 Tenere costante la concentrazione di glucosio nel sangue





# Classificazione controlli

## Controllo artificiale

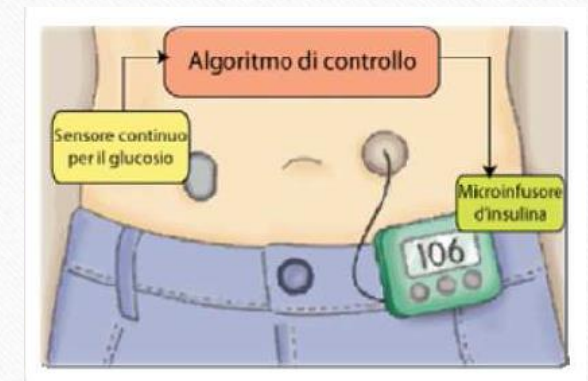
A seguito di **malattie** i controllori naturali possono produrre dei **malfunzionamenti**. In questo caso possono essere sostituiti da opportune terapie che svolgono il ruolo di controllori artificiali.

- 1 **Controllo manuale:** iniezioni multiple nell'arco della giornata (coincidenti con il momento dei pasti) e misurazione della glicemia con penne pungidito e lancette
- 2 **Controllo automatico:** sensore di glucosio sottocutaneo e microinfusore di insulina



# Controlli automatici

- Esempi di controllo automatico: «**pancreas artificiale**»
  - Obiettivo: migliorare la vita dei pazienti diabetici
  - Metodo: sostituire al controllo manuale un controllo automatico
- Set-up
  - Monitoraggio continuo del glucosio sottocutaneo (tempo di campionamento 1 min)
  - Microinfusore di insulina sottocutaneo (cambio valori di insulina ogni 5/30 min)
- Disturbi
  - I pasti sono un ingresso non manipolabile



# Controlli automatici

---

- Esempi di controllo automatico: **climatizzazione di un edificio**
  - Temperature degli ambienti = variabili controllate
  - Temperature desiderate = variabili di riferimento
  - Portate d'aria nei locali = variabili di controllo
  - (modifi cabili tramite saracinesche)
  - Temperatura esterna, insolazione = disturbi



Controllore: modifica automaticamente le temperature agendo sulle portate d'aria e compensando, allo stesso tempo, l'effetto dei disturbi

# Controlli automatici

---

Moltissimi dispositivi, per funzionare in modo efficiente fanno uso di controlli automatici. Automatica = “the hidden technology” (K. Åstrom)

- Esempi in **autoveicoli** moderni:
  - Controllo delle emissioni
  - Controllo del minimo
  - Servosterzo
  - Controllo della trazione
  - Climatizzazione
  - Sospensioni attive
  - Autonomous driving ...



# Controlli automatici

---

Moltissimi dispositivi, per funzionare in modo efficiente fanno uso di controlli automatici. Automatica = “the hidden technology” (K. Åstrom)

- Esempi in **autoveicoli** moderni:
  - Controllo delle emissioni
  - Controllo del minimo
  - Servosterzo
  - Controllo della trazione
  - Climatizzazione
  - Sospensioni attive
  - Autonomous driving ...



# Controlli automatici

---

Moltissimi dispositivi, per funzionare in modo efficiente fanno uso di controlli automatici. Automatica = “the hidden technology” (K. Åstrom)

- Esempi in **autoveicoli** moderni:
  - Controllo delle emissioni
  - Controllo del minimo
  - Servosterzo
  - Controllo della trazione
  - Climatizzazione
  - Sospensioni attive
  - Autonomous driving ...



# Controlli automatici

- Impianti di produzione di energia elettrica (controllo di turbine, controllo della frequenza di rete...)
- Strumentazione in ambito sanitario (respirazione automatica, dialisi, controllo dell'anestesia ...)
- Impianti chimici (regolazione di pressione, temperatura, livello, concentrazione e portata ...)
- Elettrodomestici (frigorifero, condizionatore, CD player ...) e apparecchiature elettroniche
- Controllo attivo di strutture
- Sistemi ambientali (depuratori, bioreattori ...)
- Controllo cooperativo di veicoli autonomi
- ...



# Controlli automatici

---

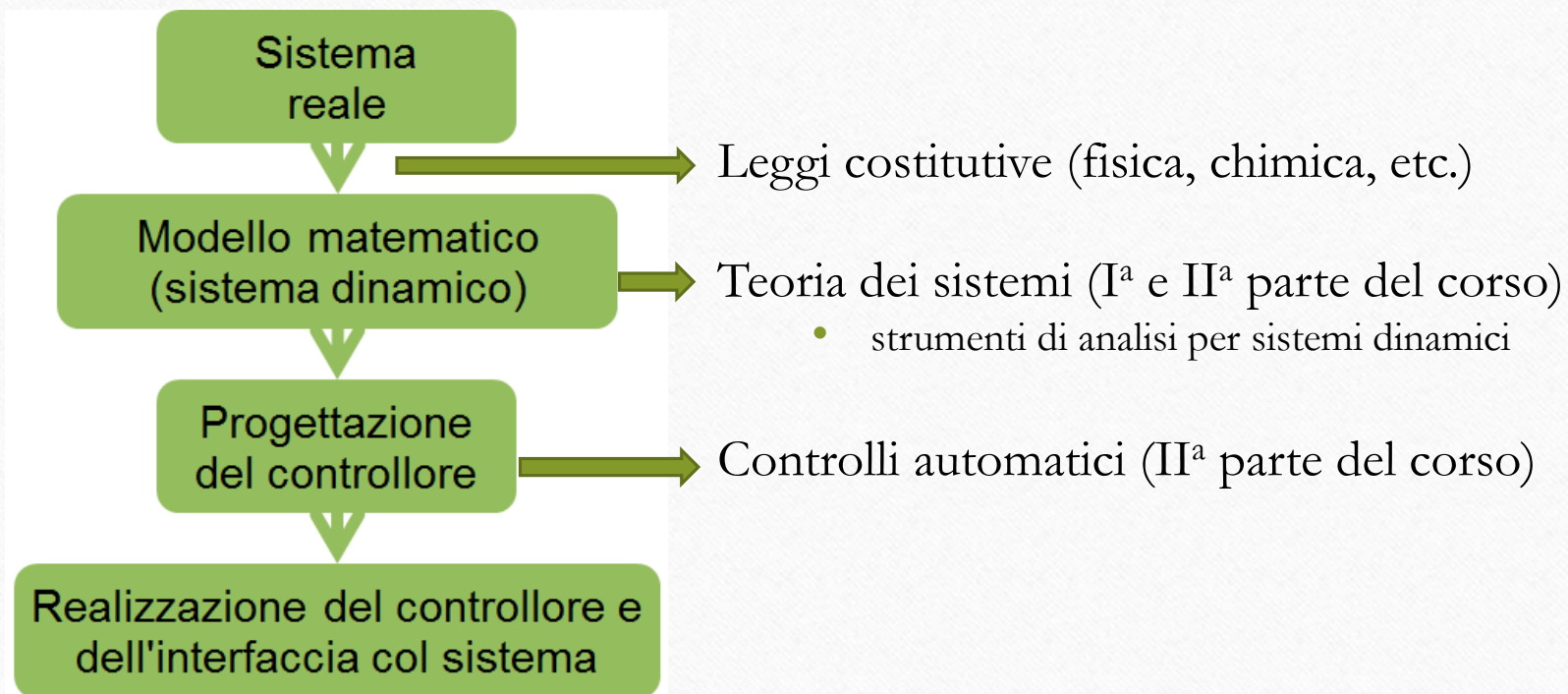
- Impianti di produzione di energia elettrica (controllo di turbine, controllo della frequenza di rete...)
- Strumentazione in ambito sanitario (respirazione automatica, dialisi, controllo dell'anestesia ...)
- Impianti chimici (regolazione di pressione, temperatura, livello, concentrazione e portata ...)
- Elettrodomestici (frigorifero, condizionatore, CD player ...) e apparecchiature elettroniche
- Controllo attivo di strutture
- Sistemi ambientali (depuratori, bioreattori ...)
- Controllo cooperativo di veicoli autonomi
- ...

Automatica = rassegna di tecniche sviluppate  
ad hoc per ogni processo ? **NO** ...



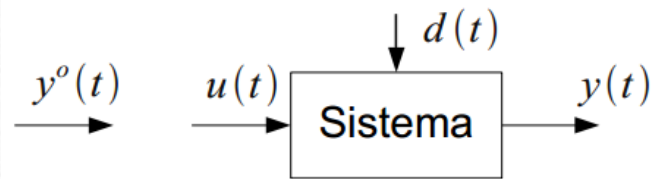
# Automatica

Automatica = sviluppo di metodi quanto più possibile indipendenti dal contesto applicativo



# Elementi di un problema di controllo

---



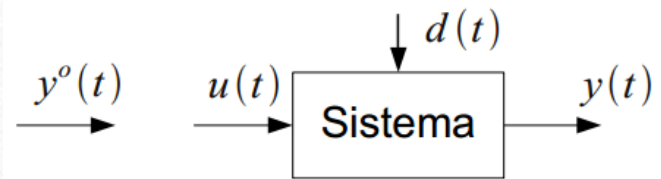
$u(t)$ : variabili di controllo

$d(t)$ : disturbi (ingressi)

$y(t)$ : variabili controllate (uscite)

$y^o(t)$ : variabili di riferimento (setpoint)

# Elementi di un problema di controllo

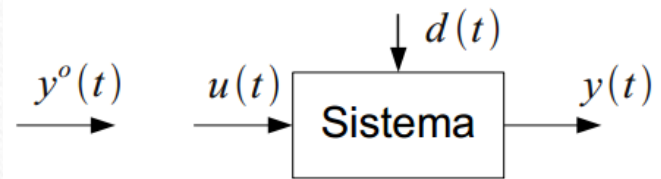


$u(t)$ : variabili di controllo  
 $d(t)$ : disturbi (ingressi)  
 $y(t)$ : variabili controllate (uscite)  
 $y^o(t)$ : variabili di riferimento (setpoint)

## Problema di controllo:

determinare ad ogni istante di tempo  $u(t)$  tale che l'errore  $e(t) = y^o(t) - y(t)$  sia "accettabilmente piccolo" per tutti gli "andamenti ragionevoli" di  $y^o(t)$  e  $d(t)$

# Elementi di un problema di controllo



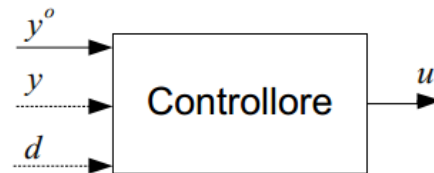
$u(t)$ : variabili di controllo  
 $d(t)$ : disturbi (ingressi)  
 $y(t)$ : variabili controllate (uscite)  
 $y^o(t)$ : variabili di riferimento (setpoint)

## Problema di controllo:

determinare ad ogni istante di tempo  $u(t)$  tale che l'errore  $e(t) = y^o(t) - y(t)$  sia "accettabilmente piccolo" per tutti gli "andamenti ragionevoli" di  $y^o(t)$  e  $d(t)$

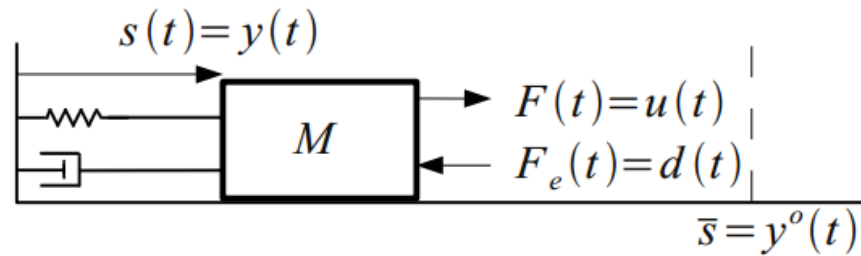
## Controllore:

- riceve sempre  $y^o$
- può ricevere o meno le misure di  $y$  e  $d$



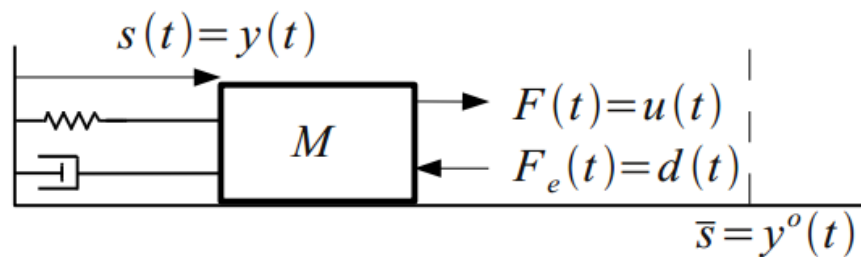
**Modello matematico del processo (sistema sotto controllo):** descrive come  $y$  dipende da  $u$  e  $d$

# Esempio sistema massa-molla



- $M$ : massa
- $h > 0$ : coeff. attrito viscoso
- $k > 0$ : costante elastica
- $F(t)$ : forza motrice (variabile di controllo)
- $F_e(t)$ : forza esterna costante di valore incerto (disturbo)
- $s(t)$ : posizione della massa (variabile controllata)

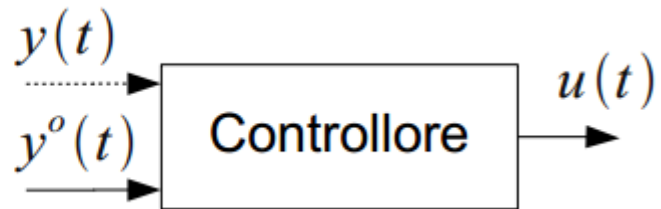
# Esempio sistema massa-molla



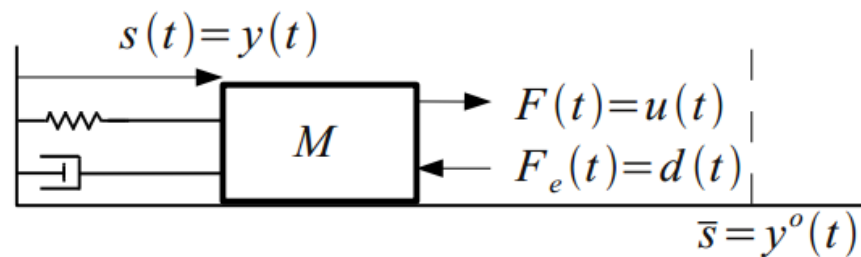
- $M$ : massa
- $h > 0$ : coeff. attrito viscoso
- $k > 0$ : costante elastica
- $F(t)$ : forza motrice (variabile di controllo)
- $F_e(t)$ : forza esterna costante di valore incerto (disturbo)
- $s(t)$ : posizione della massa (variabile controllata)

**Obiettivo:** mantenere la massa in una posizione  $\bar{s}$  costante nel tempo (setpoint:  $y^o(t) = \bar{s}$ ) agendo su  $F(t)$

**Controllore (da progettare):**



# Esempio sistema massa-molla

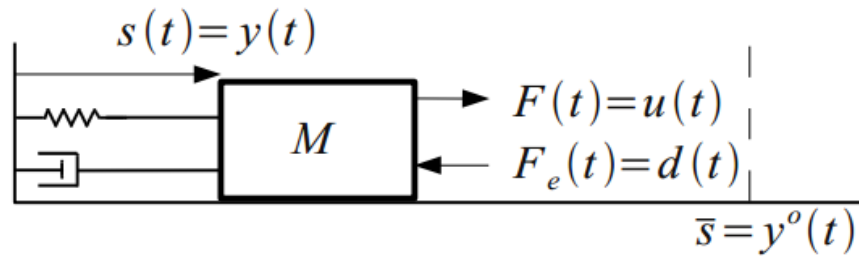


$M$ : massa  
 $h > 0$ : coeff. attrito viscoso  
 $k > 0$ : costante elastica  
 $F(t)$ : forza motrice (variabile di controllo)  
 $F_e(t)$ : forza esterna costante di valore incerto (disturbo)  
 $s(t)$ : posizione della massa (variabile controllata)

**Ipotesi:** condizioni statiche = tutte le variabili sono costanti nel tempo

Modello statico del processo:  $s$  costante  $\Rightarrow \ddot{s} = \dot{s} = 0 \Rightarrow u = ky + d$

# Primo progetto del controllore



$M$ : massa  
 $h > 0$ : coeff. attrito viscoso  
 $k > 0$ : costante elastica  
 $F(t)$ : forza motrice (variabile di controllo)  
 $F_e(t)$ : forza esterna costante di valore incerto (disturbo)  
 $s(t)$ : posizione della massa (variabile controllata)

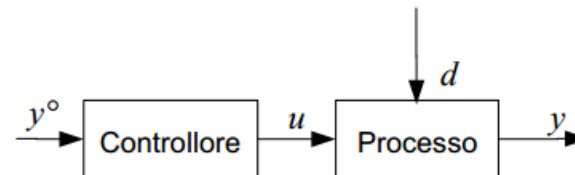
## Primo progetto del controllore:

**Ipotesi:** è noto il valore nominale del disturbo:  $d = 0$

**Modello nominale del processo:**  $y = \frac{u}{k}$

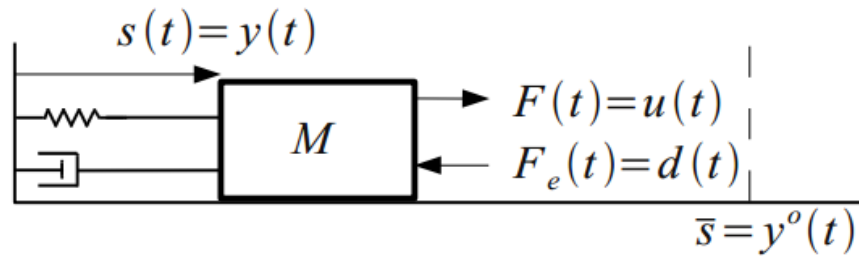
**Controllore:**  $u = k y^o$

**Sistema di controllo:**  $y = \frac{u}{k} = k \frac{y^o}{k} = y^o$





# Primo progetto del controllore



$M$ : massa  
 $h > 0$ : coeff. attrito viscoso  
 $k > 0$ : costante elastica  
 $F(t)$ : forza motrice (variabile di controllo)  
 $F_e(t)$ : forza esterna costante di valore incerto (disturbo)  
 $s(t)$ : posizione della massa (variabile controllata)

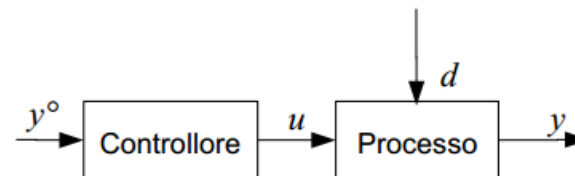
## Primo progetto del controllore:

**Ipotesi:** è noto il valore nominale del disturbo:  $d = 0$

**Modello nominale del processo:**  $y = \frac{u}{k}$

**Controllore:**  $u = k y^o$

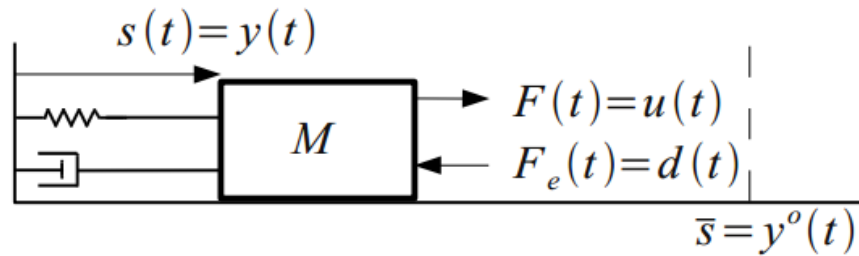
**Sistema di controllo:**  $y = \frac{u}{k} = k \frac{y^o}{k} = y^o$



## Vantaggi

- Se il disturbo è realmente nullo, l'obiettivo di controllo è raggiunto
- Non è richiesto di misurare la posizione

# Primo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$   
Controllore:  $u = ky^o$

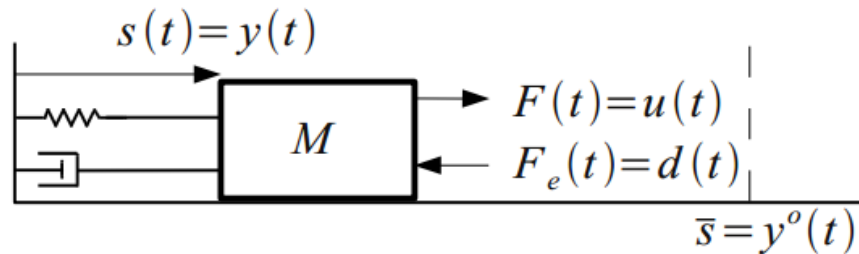
**Svantaggi: le prestazioni degradano quando**

1) il disturbo è diverso da quello nominale  $d = d_1 \neq 0$

Si consideri l'errore  $e = y^o - y$

**Sistema di controllo:**  $ky^o = ky + d_1 \Rightarrow ke = d_1 \Rightarrow e = \frac{d_1}{k}$

# Primo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$

Controllore:  $u = ky^o$

**Svantaggi: le prestazioni degradano quando**

1) il disturbo è diverso da quello nominale  $d = d_1 \neq 0$

Si consideri l'errore  $e = y^o - y$

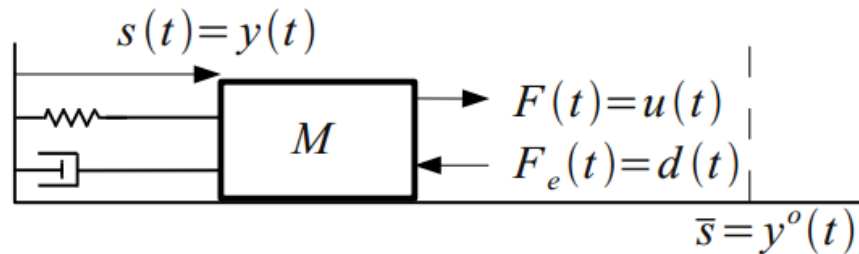
$$\text{Sistema di controllo: } ky^o = ky + d_1 \Rightarrow ke = d_1 \Rightarrow e = \frac{d_1}{k}$$

2) il modello del processo non è preciso

$$\text{Processo reale: } y = \frac{u}{k_1} \quad k_1 \neq k$$

$$\text{Sistema di controllo reale: } y = \frac{k}{k_1} y^o \Rightarrow e = y^o \left( \frac{k_1 - k}{k_1} \right) \neq 0$$

# Primo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$

Controllore:  $u = ky^o$

**Svantaggi: le prestazioni degradano quando**

1) il disturbo è diverso da quello nominale  $d = d_1 \neq 0$

Si consideri l'errore  $e = y^o - y$

$$\text{Sistema di controllo: } ky^o = ky + d_1 \Rightarrow ke = d_1 \Rightarrow e = \frac{d_1}{k}$$

2) il modello del processo non è preciso

$$\text{Processo reale: } y = \frac{u}{k_1} \quad k_1 \neq k$$

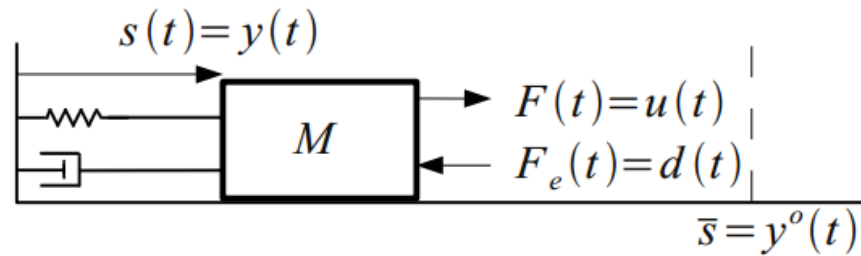
$$\text{Sistema di controllo reale: } y = \frac{k}{k_1} y^o \Rightarrow e = y^o \left( \frac{k_1 - k}{k_1} \right) \neq 0$$

**Errore statico proporzionale alle incertezze**

- $d_1 \neq 0$
- $k_1 \neq k$

Ragione: la variabile di controllo dipende **solo** dal set-point e dal modello del sistema

# Secondo progetto del controllore

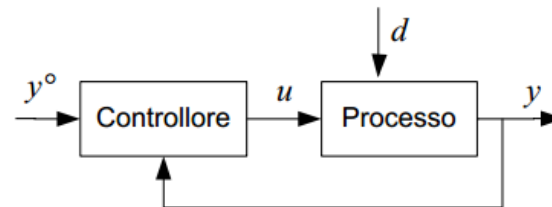


**Processo:**  $u = ky + d$

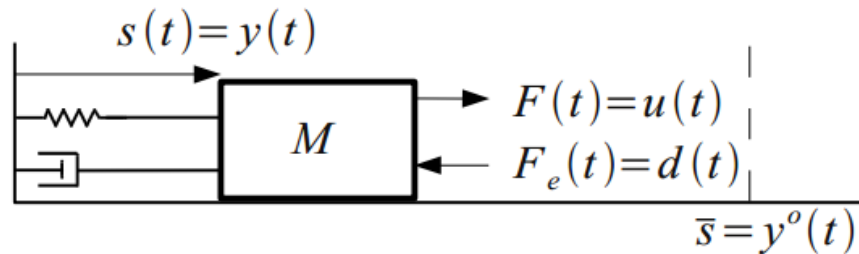
**Secondo progetto del controllore:**

**Controllore:**  $u = ky^o + \mu(y^o - y)$ ,  $\mu > 0$ : parametro di progetto (da scegliere)

**Sistema di controllo:**  $ky^o + \mu(y^o - y) = ky + d$



# Secondo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$

## Vantaggi - parte 1

- Se il disturbo è nullo, l'errore è nullo (come nel primo progetto)
- Se  $d = d_1 \neq 0$  si ha

$$e = \frac{d_1}{k + \mu}$$

(e quindi  $e \sim 0$  se  $\mu \gg 0$ )

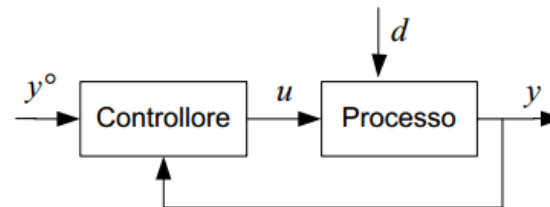
- L'errore è comunque inferiore a quello ottenuto dal primo progetto (migliore reiezione dei disturbi)

## Secondo progetto del controllore:

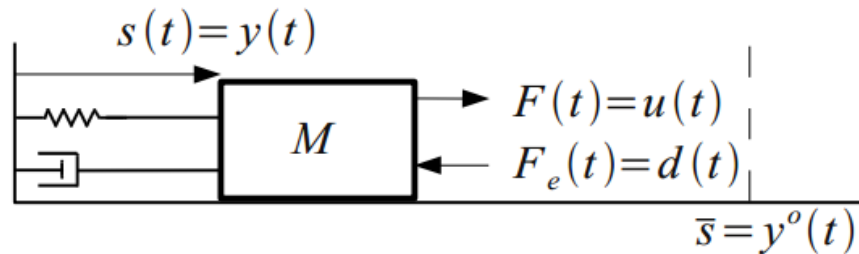
Controllore:  $u = ky^o + \mu(y^o - y)$ ,  $\mu > 0$ : parametro di progetto (da scegliere)

Sistema di controllo:  $ky^o + \mu(y^o - y) = ky + d$

Errore:  $e = y^o - y \Rightarrow (k + \mu)e = d$



# Secondo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$

## Vantaggi - parte 2

- Se il modello del processo non è preciso, cioè  $y = \frac{u}{k_1}$ ,  $k_1 \neq k$ , si ha

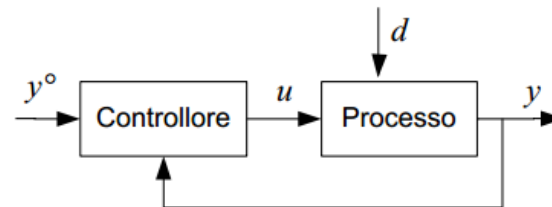
$$e = \frac{k_1 - k}{k_1 + \mu} y^o \quad (\text{ed } e \sim 0 \text{ se } \mu \gg 0)$$

- L'errore è comunque inferiore a quello ottenuto dal primo progetto (migliore robustezza rispetto ad errori di modellizzazione)

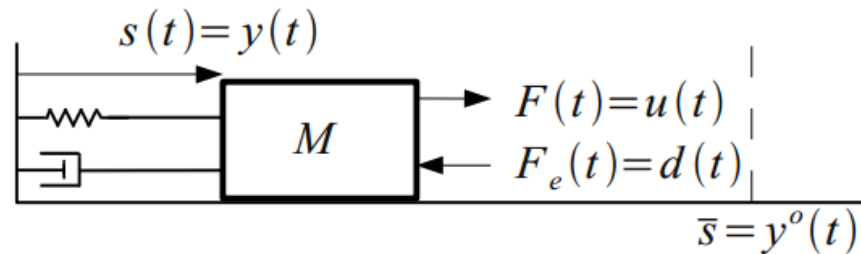
## Secondo progetto del controllore:

Controllore:  $u = ky^o + \mu(y^o - y)$ ,  $\mu > 0$ : parametro di progetto (da scegliere)

Sistema di controllo:  $ky^o + \mu(y^o - y) = ky + d$



# Secondo progetto del controllore



Processo:  $u = ky + d$

## Vantaggi – parte 2

- Se il modello del processo non è preciso, cioè  $y = \frac{u}{k_1}$ ,  $k_1 \neq k$ , si ha

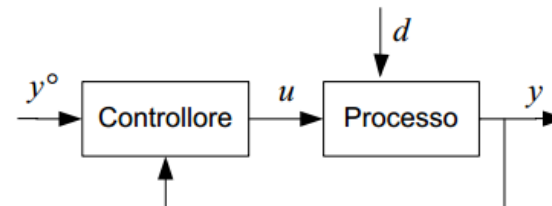
$$e = \frac{k_1 - k}{k_1 + \mu} y^o \quad (\text{ed } e \sim 0 \text{ se } \mu \gg 0)$$

- L'errore è comunque inferiore a quello ottenuto dal primo progetto (migliore robustezza rispetto ad errori di modellizzazione)

## Secondo progetto del controllore:

Controllore:  $u = ky^o + \mu(y^o - y)$ ,  $\mu > 0$ : parametro di progetto (da scegliere)

Sistema di controllo:  $ky^o + \mu(y^o - y) = ky + d$



**Svantaggi:** Il controllore utilizza la **variabile controllata**  $y$  che deve essere misurata

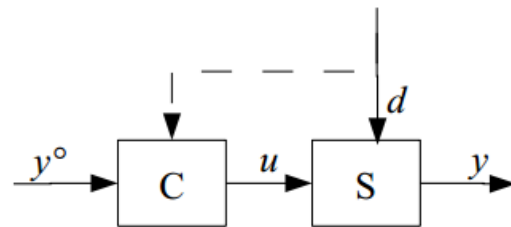
- *Questo è un prezzo che si paga spesso volentieri pur di ridurre l'errore!*



# Classificazione: schema di controllo feedforward

---

**Controllo in anello aperto (feedforward):** il controllore utilizza solo il setpoint ed, eventualmente, il disturbo

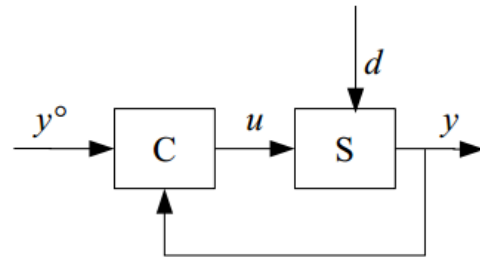


**Primo controllore (sistema massa-molla):**  $u = ky^o \Rightarrow$  feedforward

Se il disturbo è misurato ed utilizzato dal controllore si parla di schema con compensazione del disturbo

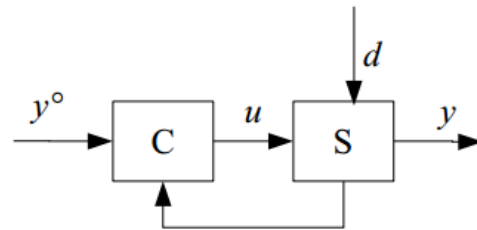
# Classificazione: schema di controllo feedback

Controllo in anello chiuso in retroazione (feedback): il controllore utilizza il setpoint e la variabile controllata



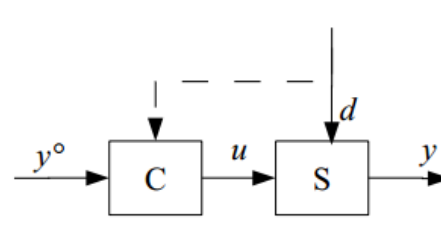
Secondo controllore (sistema massa-molla):  $u = ky^o + \mu (y^o - y) \Rightarrow$  feedback

**Variante:** invece che la variabile controllata, viene retroazionata una **variabile misurabile** che dipende dalla variabile di controllo

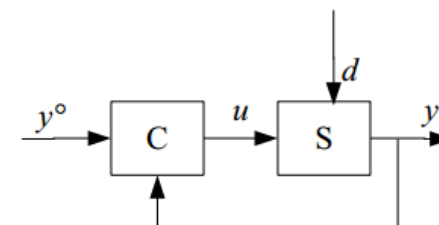


# Feedforward vs. feedback

In base alle osservazioni fatte:



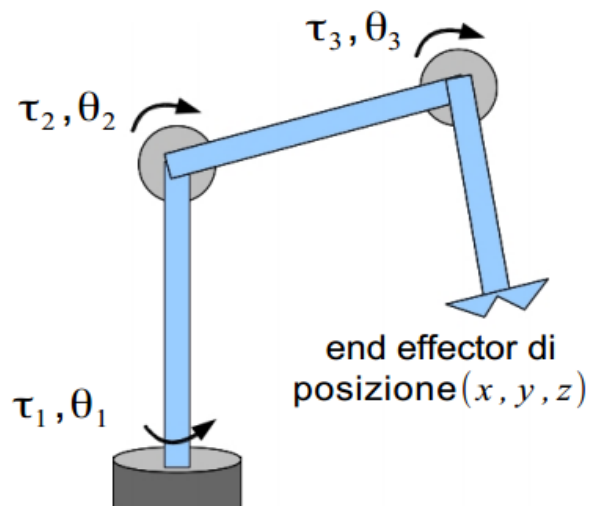
Anello aperto



Anello chiuso

Misura della variabile controllata	Non richiesta	Necessaria
Robustezza rispetto ad errori di modellizzazione	Bassa	Alta
Reiezione dei disturbi	Bassa	Alta

# Esempio: controllo di posizione di un robot



$\tau_i(t)$ : coppie ai link  
 $\theta_i(t)$ : posizioni angolari  
 $i=1,2,3$

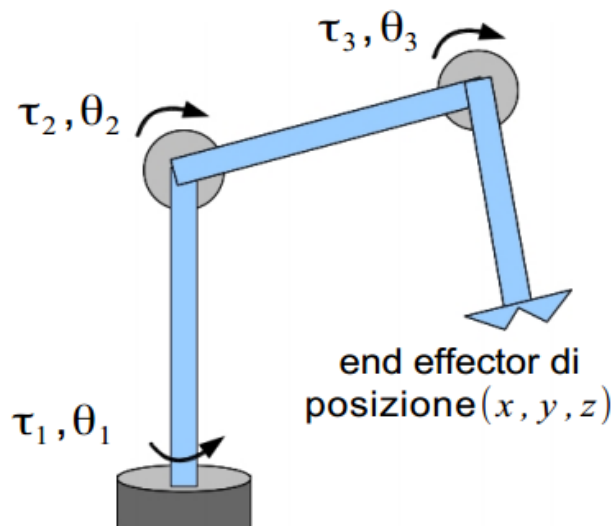
Un giunto = un grado di libertà



l'end effector si può muovere in 3D

**Obiettivo:** far seguire all'end effector una traiettoria assegnata  $(x^o(t), y^o(t), z^o(t))$

# Esempio: controllo di posizione di un robot



*Variabili controllate:*  $(x, y, z)$

*Variabili di controllo:*  $(\tau_1, \tau_2, \tau_3)$  attuate tramite motori calettati ai giunti

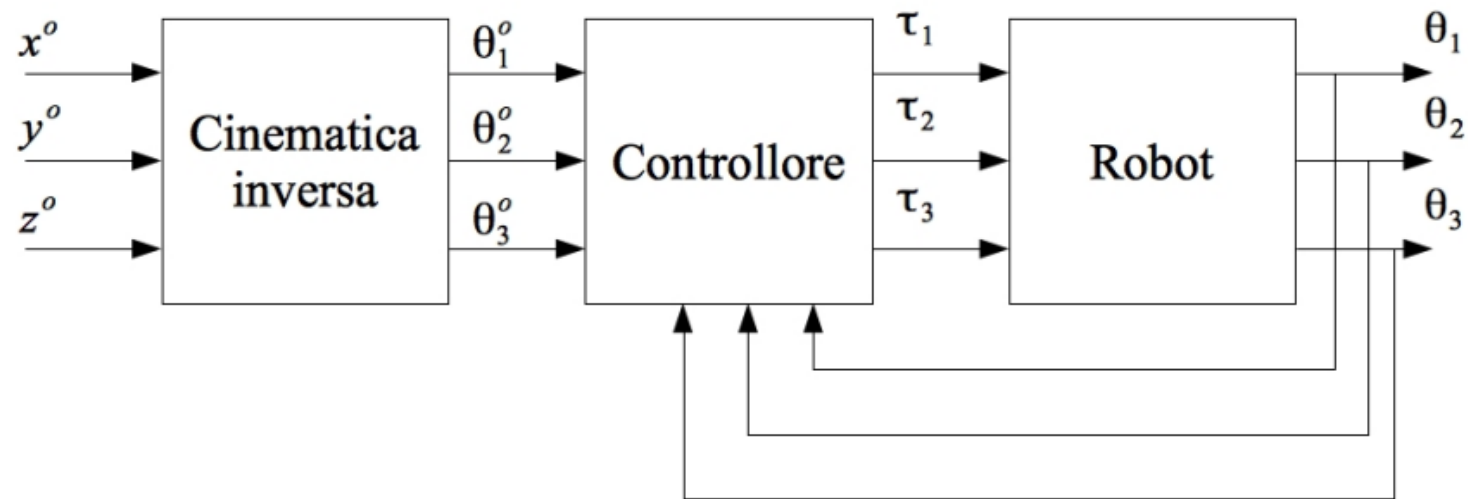
*Variabili misurate:*  $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$  tramite encoders

**Problema:** le variabili controllate NON sono direttamente misurabili

**Idea:** da  $x^o, y^o, z^o$  si ricavano i setpoint  $\theta_1^o, \theta_2^o, \theta_3^o$  tramite la "cinematica inversa"

# Esempio: controllo di posizione di un robot

## Schema di controllo feedback



Le nuove variabili controllate sono  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  e  $\theta_3$

# Strumentazione

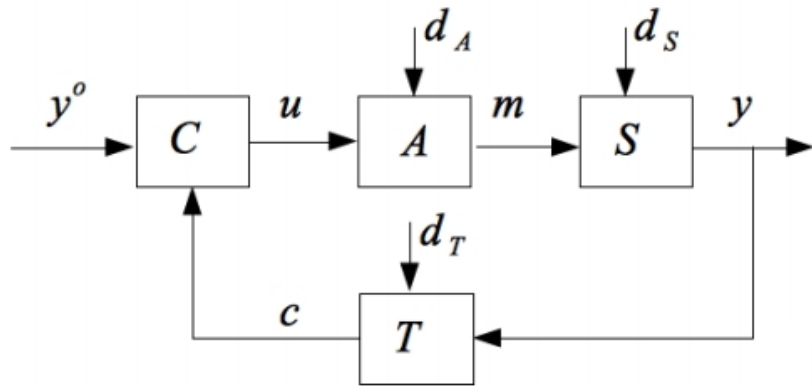
---

**Strumentazione:** dispositivi che interfacciano il processo con il controllore

**Trasduttori:** misurano una grandezza fisica (variabili controllate, disturbi etc.)  
e la convertono in una grandezza fisica compatibile con la tecnologia  
del controllore

**Attuatori:** convertono le variabili in uscita dal controllore nella grandezza fisica  
propria delle variabili manipolabili che influenzano il processo

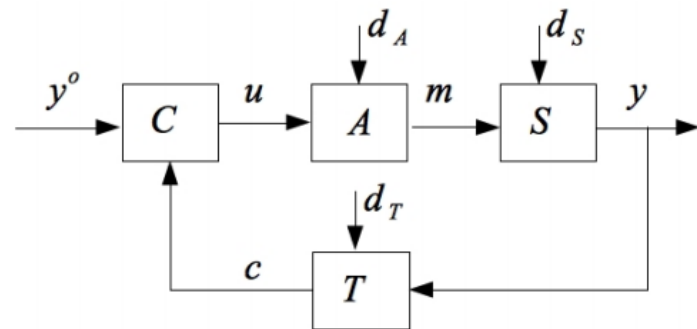
# Schema di controllo feedback con strumentazione



Elementi	Variabili	
$S$ : processo	Ingressi:	$y^o$ : setpoint $d_A$ $d_S$ $d_T$ : disturbi
$T$ : trasduttore		
$C$ : controllore	Segnali interni	$c$ : misura di $y$ $u$ : variabile di controllo
$A$ : attuatore		$m$ : variabile manipolabile $y$ : variabile controllata



# Schema di controllo feedback con strumentazione



## Esempio: strumentazione del robot

**Attuatori:** motori calettati ai giunti

**Trasduttori:** encoders

- Quanti trasduttori? Uno per ogni variabile scalare misurata
- Quanti attuatori? Uno per ogni variabile manipolabile

