

Fondamenti di automatica

Dipartimento di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Università degli Studi di Pavia

Informazioni utili

- Due classi in parallelo:
 - Ingegneria Industriale: Prof. Raimondo (davide.raimondo@unipv.it)
 - Bioingegneria: Prof. Magni (lalo.magni@unipv.it), Prof. Toffanin (chiara.toffanin@unipv.it)
- Laboratori (le date verranno comunicate in seguito)
 - Ingegneria Industriale: Giovedì 11-13, aule C2-C3
 - **Attenzione:** per la prima settimana il laboratorio sarà Mercoledì 6 Marzo h 14-16 (C2-C3) e non Giovedì 7 Marzo (normale lezione in A2)
 - Bioingegneria: Lunedì 16-18, aule C2-C3
- Ricevimento: su appuntamento
 - Raimondo: Ufficio (piano F)
 - Magni: Presidenza (piano B)
 - Toffanin: Laboratorio di Identificazione e Controllo di Sistemi Dinamici (piano C)

Informazioni utili

- Sito web di riferimento

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

→ Teaching → Fondamenti di automatica

- Testo consigliato

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

4^a ed., 2015, 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

Per motivi organizzativi, si chiede che l'iscrizione venga effettuata **entro 7 giorni** dalla 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**.

1.



2.



3.



Controllore/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

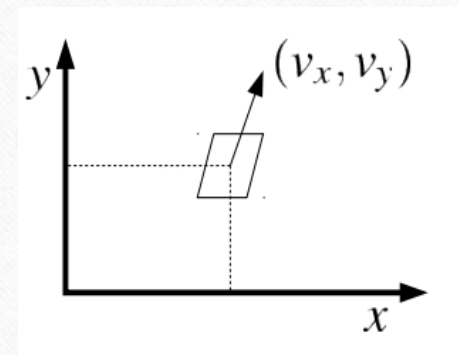
- Traiettoria
 - Si stima la posizione dell'auto
 - Si agisce sul volante
- Velocità
 - Si misura la velocità dell'auto (tachimetro)
 - Si agisce sui pedali (acceleratore e freno) e sul cambio



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)



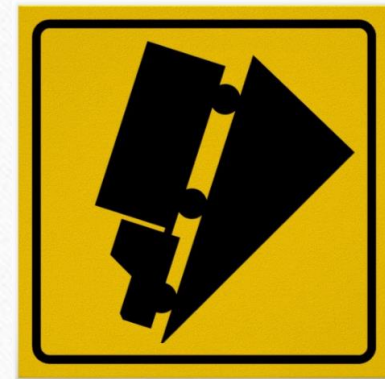
- 4 variabili controllate (2 di posizione e 2 di velocità) e 4 variabili di riferimento
- 4 variabili di controllo (posizioni del volante, dell'acceleratore, del freno e del cambio)
- N.B.: la coppia dell'albero motore non è una variabile di controllo

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

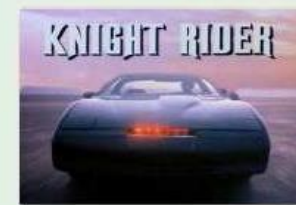
- **naturali:** il processo è dotato in un meccanismo di autoregolazione
- **artificiali:** il controllore è un'entità esterna al processo
 - **Manuali:** azione di controllo esercitata dall'uomo
 - **Automatici:** azione di controllo esercitata da un dispositivo progettato appositamente



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

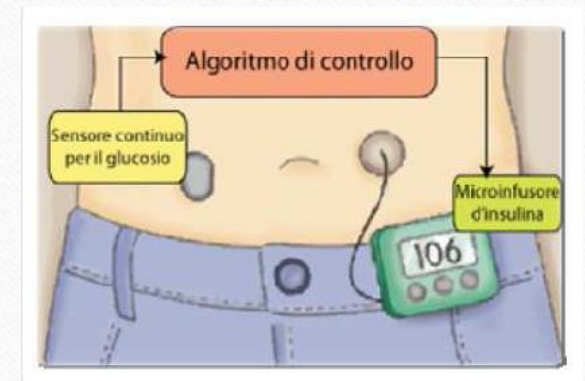
A seguito di **malattie** i controllori naturali possono produrre dei **malfunzionamenti**. In questo caso possono essere sostituiti da opportune terapie che svolgono il ruolo di controllori artificiali.

- 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
 - (modificabili 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)

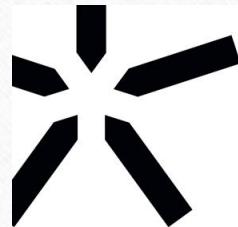
- Esempi in **autoveicoli** moderni:
 - Controllo delle emissioni
 - Controllo del minimo
 - Servosterzo
 - Controllo della trazione
 - Climatizzazione
 - Sospensioni attive
 - Autonomous driving ...



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 ...



Autonomous Driving with AMZ Racing
Powered by embotech Motion Planning

embotech*
Switzerland | autonomousdriving@embotech.com

AMZ
driverless.amzracing.ch

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
- Autonomous cameras, ...



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
- Autonomous cameras, ...

The logo for 'verity' is displayed in white lowercase letters on a black rectangular background. The letters are bold and sans-serif, with a slight shadow effect.

verity

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
- Autonomous cameras, ...



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
- Autonomous cameras, ...



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** ...

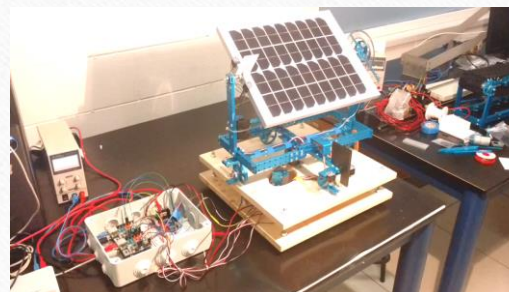
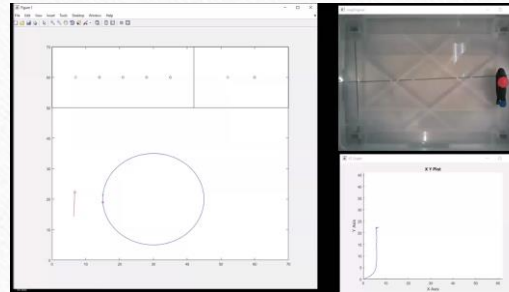
Esempi di applicazioni

tesi triennali svolte presso il
laboratorio di controllo dei processi

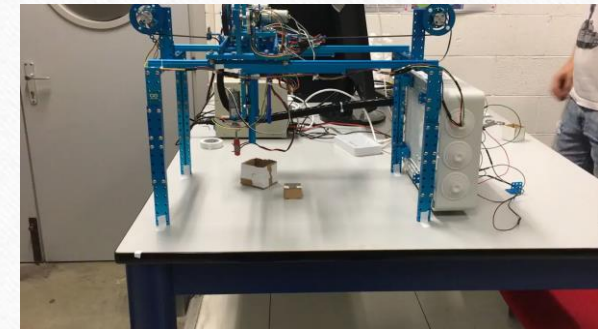
Remote Control
System for a
RC Helicopter



Controllo
Automatico di un
veicolo

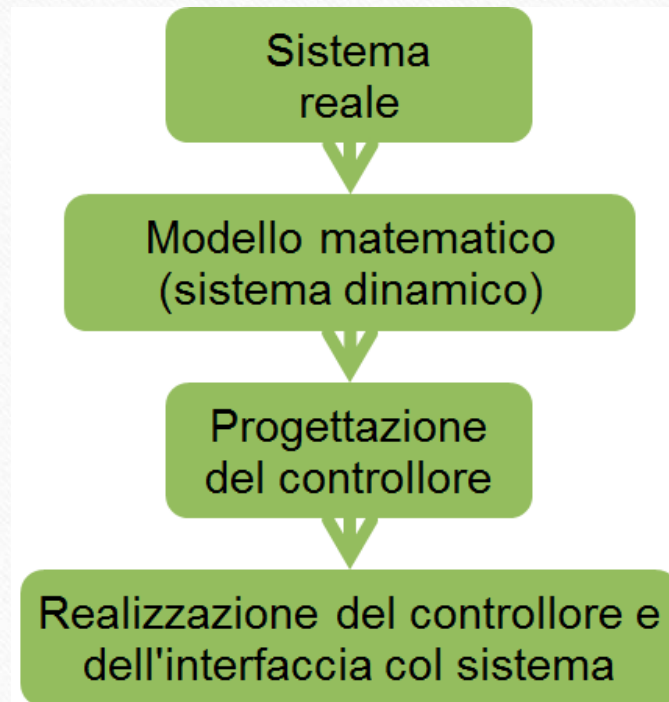


Controllo predittivo
embedded di un pendolo
inverso

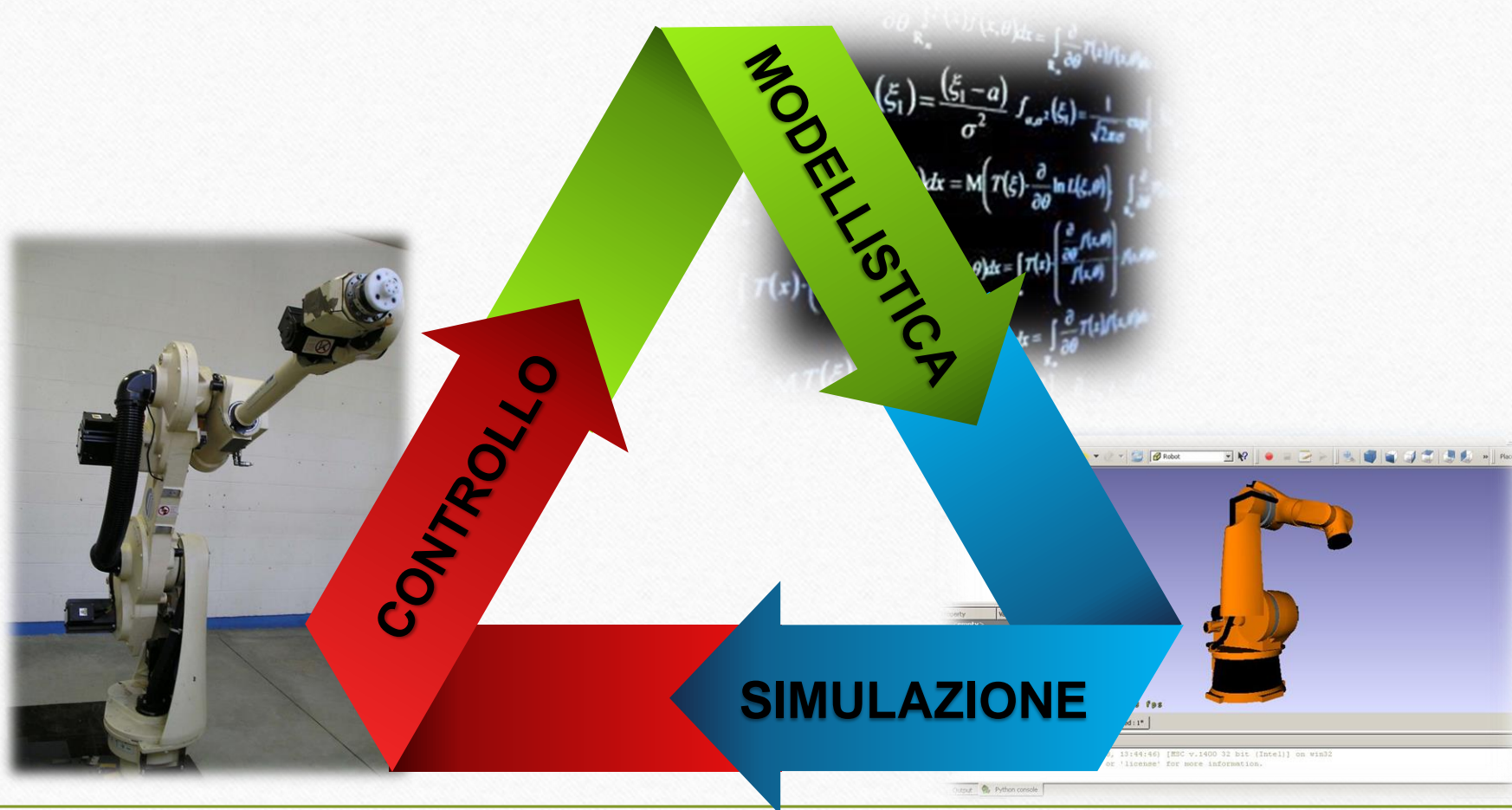


Automatica

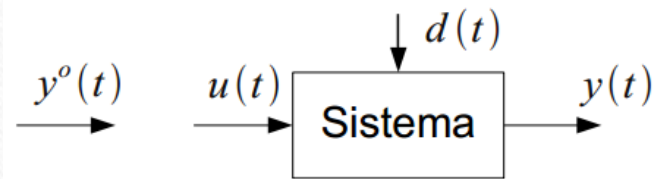
Automatica = sviluppo di metodi quanto più possibile indipendenti dal contesto applicativo



Simulazione ed esperimenti virtuali



Elementi di un problema di controllo



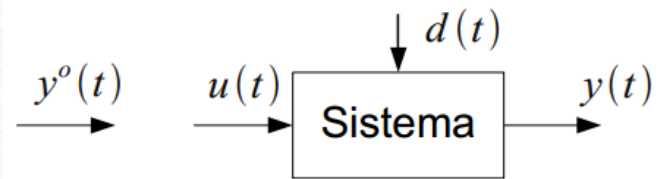
$u(t)$: variabili di controllo

$d(t)$: disturbi (ingressi)

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

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

Elementi di un problema di controllo

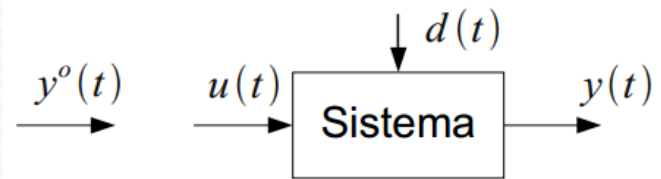


$u(t)$: variabili di controllo
 $d(t)$: disturbi (ingressi)
 $y(t)$: variabili controllate (uscite)
 $y^o(t)$: variabili di riferimento (setpoint)

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 $d(t)$

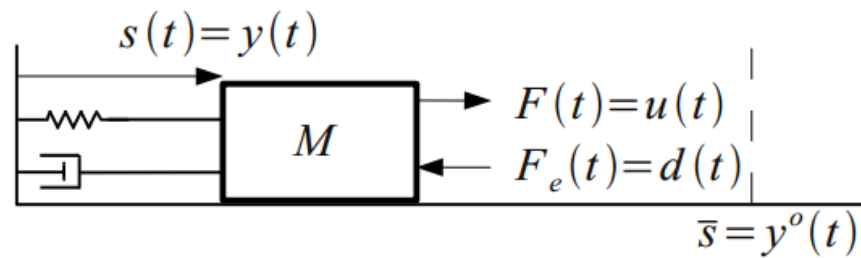
Controllore:

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



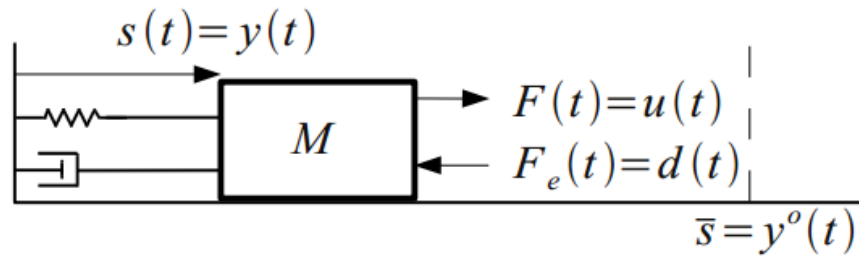
Modello matematico del processo (sistema sotto controllo): descrive come y dipende da u e d

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)

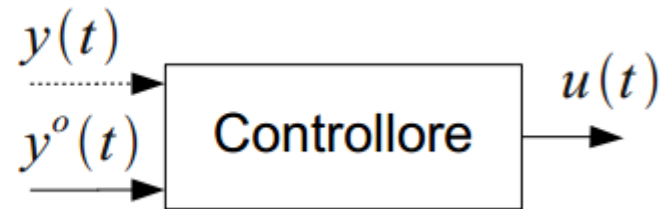
Esempio sistema massa-molla



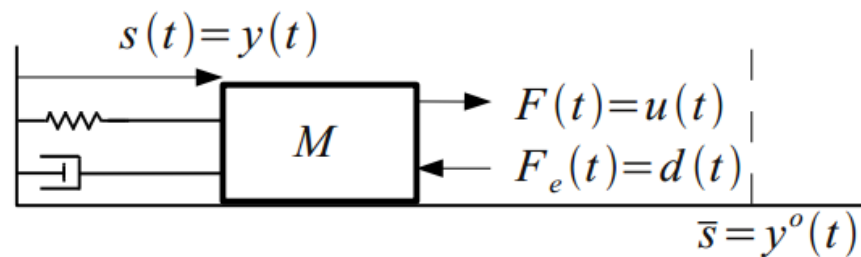
M : massa
 $h > 0$: coeff. attrito viscoso
 $k > 0$: costante elastica
 $F(t)$: forza motrice (variabile di controllo)
 $F_e(t)$: forza esterna costante di valore incerto (disturbo)
 $s(t)$: posizione della massa (variabile controllata)

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)

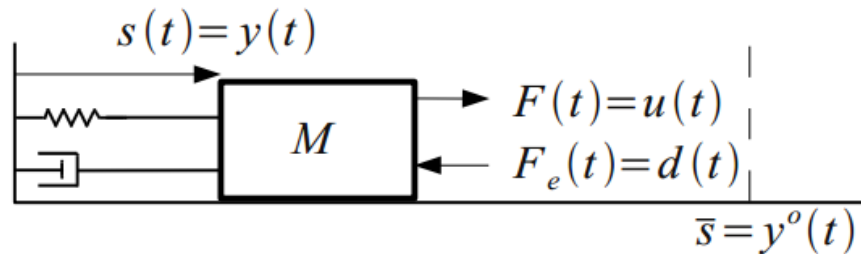
Ipotesi: condizioni statiche = tutte le variabili sono costanti nel tempo

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

$$\Rightarrow 0 = -ky + u - d$$

$$\Rightarrow y = \frac{u - d}{k}$$

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)

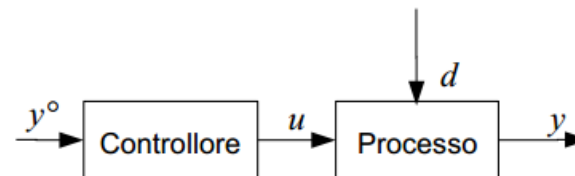
Primo progetto del controllore:

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

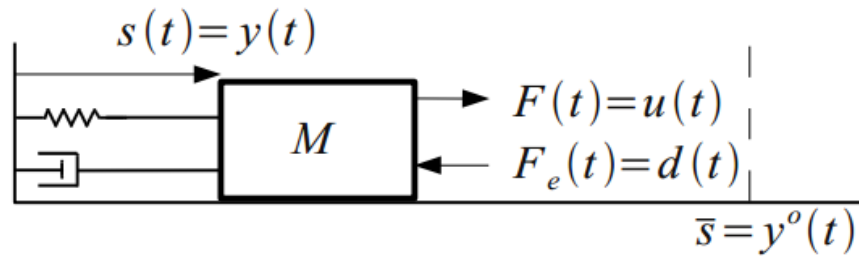
Modello nominale del processo: $y = \frac{u}{k}$

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)

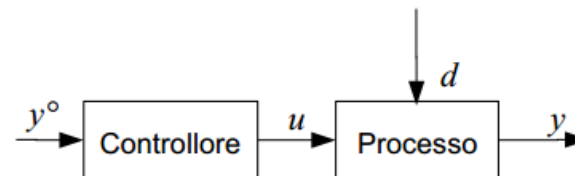
Primo progetto del controllore:

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

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

Controllore: $u = k y^o$

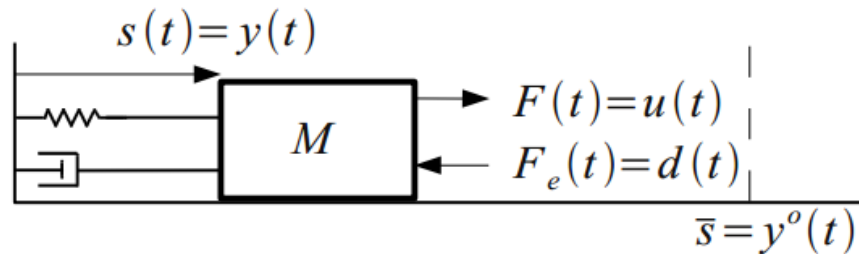
Sistema di controllo: $y = \frac{u}{k} = k \frac{y^o}{k} = y^o$



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: $u = ky^o$

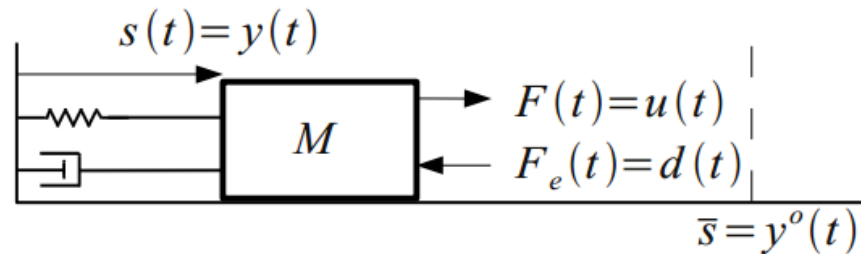
Svantaggi: le prestazioni degradano quando

- 1) il disturbo e' diverso da quello nominale $d \neq 0$

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

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

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 $d \neq 0$

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

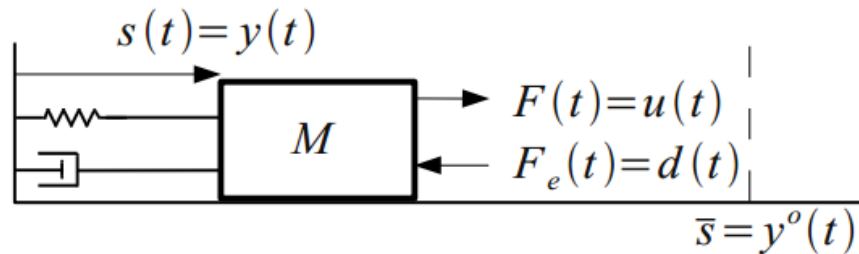
Sistema di controllo: $ky^o = ky + d \Rightarrow ke = d \Rightarrow e = \frac{d}{k}$

- 2) il modello del processo non è preciso

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

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 e' diverso da quello nominale $d \neq 0$

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

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

- 2) il modello del processo non e' preciso

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

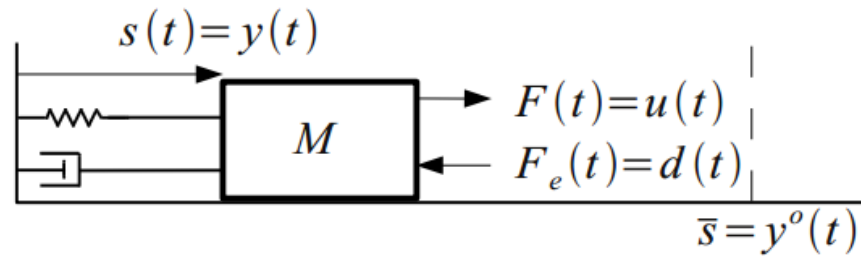
Sistema di controllo reale: $y = \frac{k}{k_1} y^o \Rightarrow e = y^o \left(\frac{k_1 - k}{k_1} \right) \neq 0$

**Errore statico proporzionale
alle incertezze**

- $d - 0$
- $k_1 - k$

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

Secondo progetto del controllore

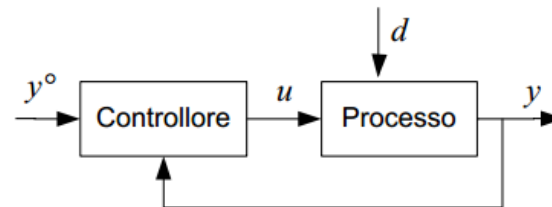


Processo: $u = ky + d$

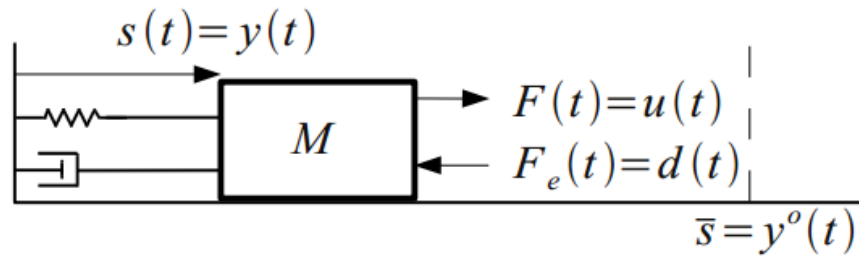
Secondo progetto del controllore:

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 $d \neq 0$ si ha

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

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

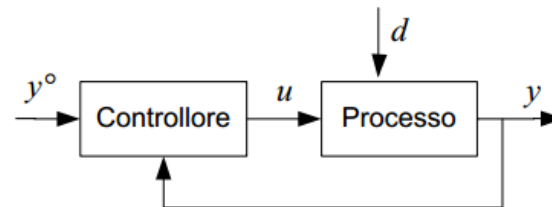
- L'errore è comunque inferiore a quello ottenuto dal primo progetto (migliore reiezione dei disturbi)

Secondo progetto del controllore:

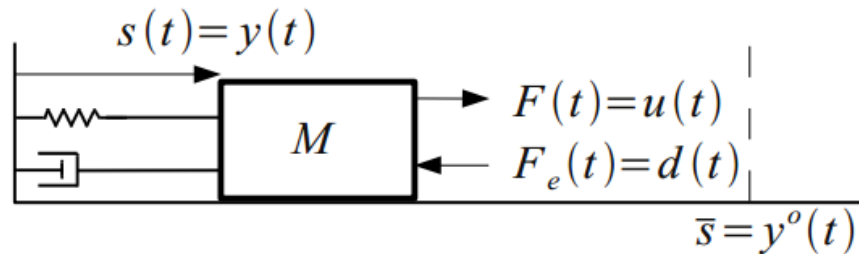
Controllore: $u = ky^o + \mu(y^o - y)$, $\mu > 0$: parametro di progetto (da scegliere)

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

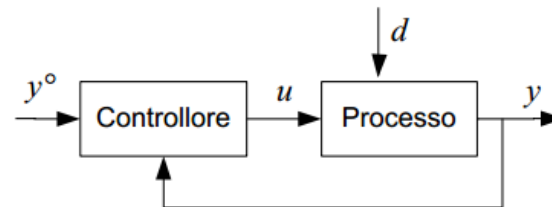
$$e = \frac{k_1 - k}{k_1 + \mu} y^o \quad (\text{ed } e \sim 0 \text{ se } \mu \gg 0)$$

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

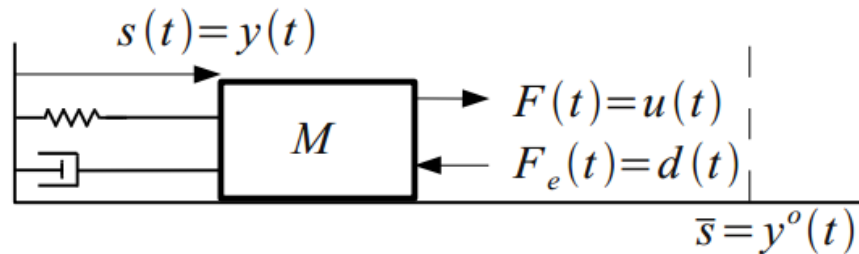
Secondo progetto del controllore:

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

Sistema di controllo: $ky^o + \mu(y^o - y) = k_1 y$



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

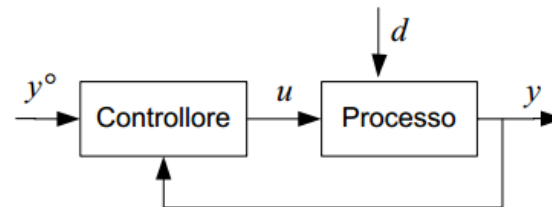
$$e = \frac{k_1 - k}{k_1 + \mu} y^0 \quad (\text{ed } e \sim 0 \text{ se } \mu \gg 0)$$

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

Secondo progetto del controllore:

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

Sistema di controllo: $ky^0 + \mu(y^0 - y) = k_1 y$

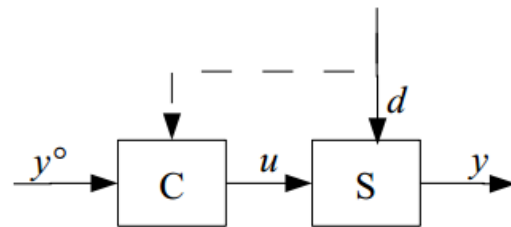


Svantaggi: Il controllore utilizza la **variabile controllata** y che deve essere misurata

- *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

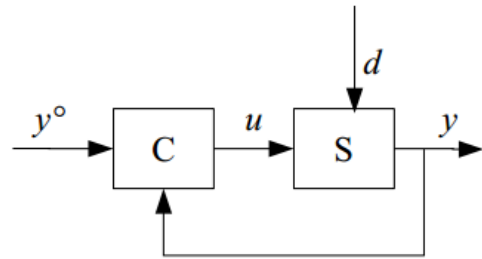


Primo controllore (sistema massa-molla): $u = ky^o \Rightarrow$ feedforward

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

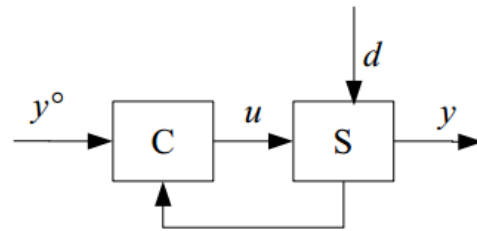
Classificazione: schema di controllo feedback

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



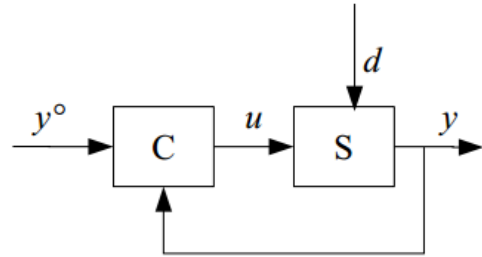
Secondo controllore (sistema massa-molla): $u = ky^o + \mu(y^o - y) \Rightarrow$ feedback

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



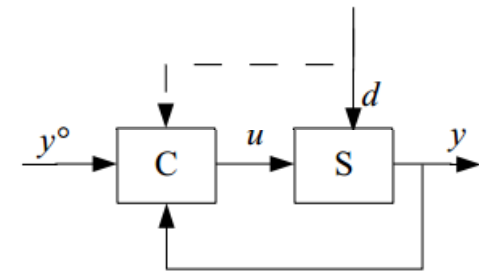
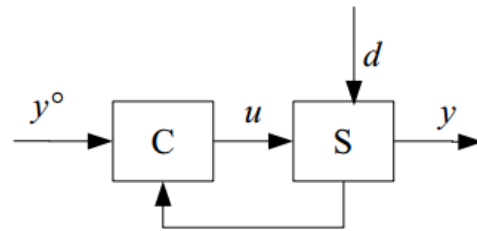
Classificazione: schema di controllo feedback

Controllo in anello chiuso o 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

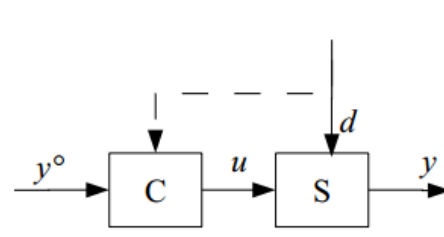
Variante: invece che la variabile controllata, viene retroazionata una variabile misurabile che dipende dalla variabile di controllo



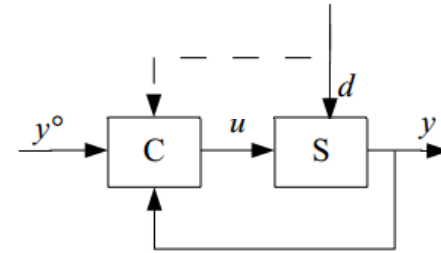
Anche in questo caso, se il disturbo e' misurato, puo' essere applicato lo schema con compensazione del disturbo

Feedforward vs. feedback

In base alle osservazioni fatte:



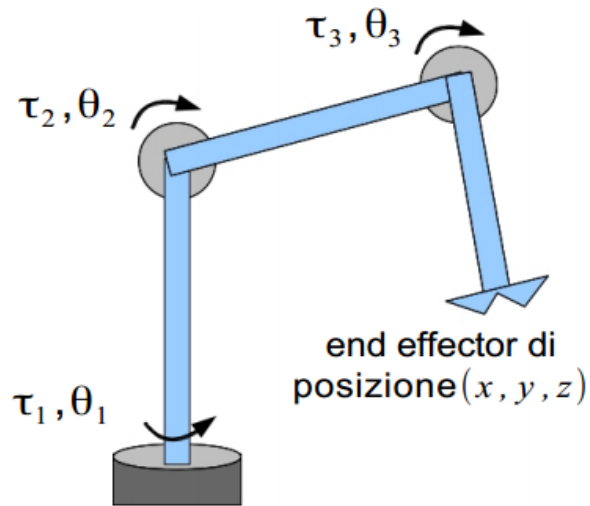
Anello aperto



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
 $i=1,2,3$

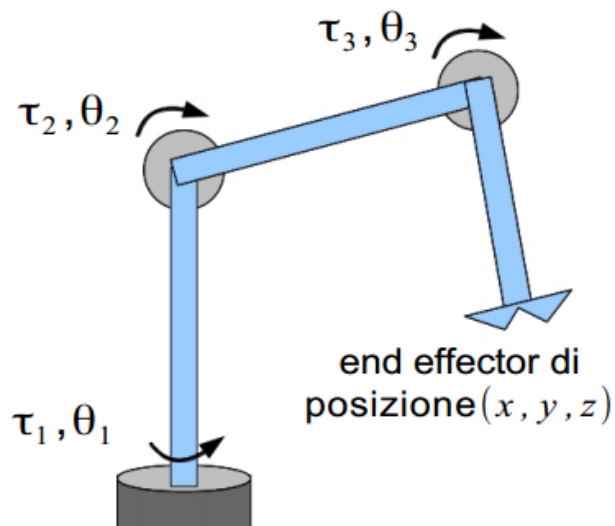
Un giunto = un grado di libertà



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: (τ_1, τ_2, τ_3) attuate tramite motori calettati ai giunti

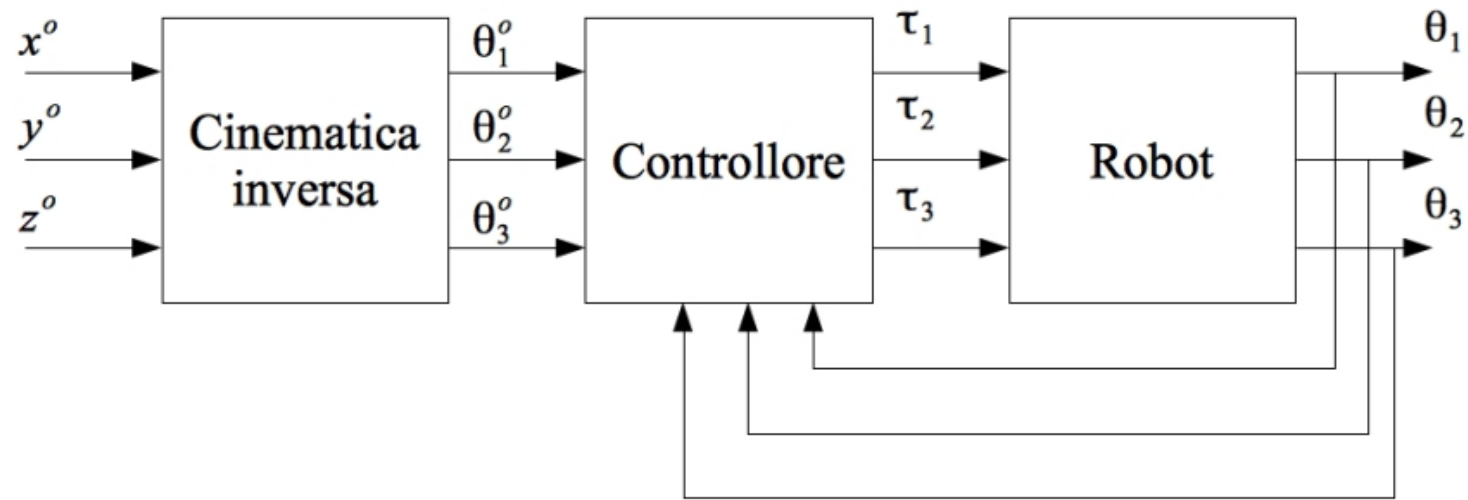
Variabili misurate: $(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$ tramite encoders

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 θ_1 , θ_2 e θ_3

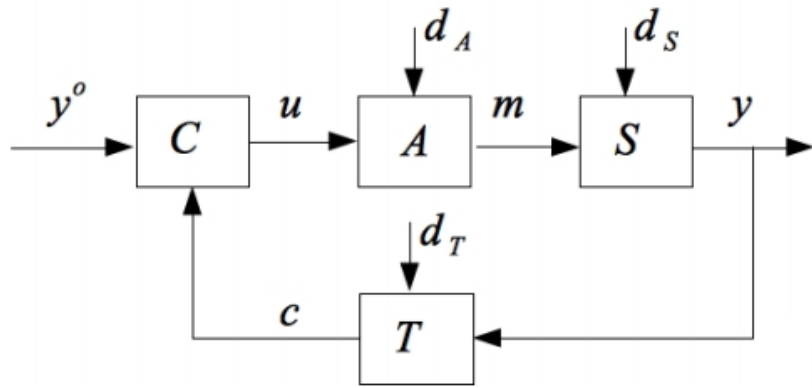
Strumentazione

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

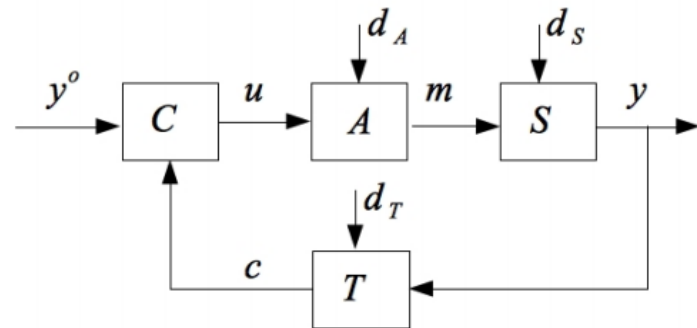
Attuatori: convertono le variabili in uscita dal controllore nella grandezza fisica
propria delle variabili manipolabili che influenzano il processo

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 m : variabile manipolabile
A : attuatore		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

