



Fondamenti di Automatica

Introduzione

Prof. Marcello Bonfè

Dipartimento di Ingegneria - Università di Ferrara

Tel. +39 0532 974839

E-mail: marcello.bonfe@unife.it



Università
degli Studi
di Ferrara



Introduzione

OBIETTIVI E PROGRAMMA DEL CORSO

Obiettivi formativi

- ➔ Fornire le conoscenze di base per l'analisi ed il controllo di sistemi dinamici di interesse ingegneristico (elettrici, elettronici, meccanici..)
 - Elementi di matematica e fisica
 - Analisi dei sistemi dinamici
 - Stabilità dei sistemi dinamici
 - Progetto di sistemi di controllo con specifiche:
 - nel dominio del tempo (es. errore a regime, tempo di assestamento)
 - nel dominio della frequenza (es. margine di fase)
 - Applicazioni ingegneristiche (Automazione e altro!)

slide 3

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Note

Fondamenti di Automatica è un corso da 9 CFU per il Corso di Laurea in **Ingegneria Elettronica e Informatica (Ingegneria dell'Informazione)**

Il corso è in comunanza con:

- **Controlli Automatici**, corsi da 6 CFU per il Corso di Laurea in **Ingegneria Meccanica**,
- **Fondamenti di Automatica**, corso da 9 CFU per il Corso di Laurea in **Informatica**

Il ciclo di lezioni è unico, gli studenti dei corsi da 6 CFU sono dispensati dalla frequenza alle ore di lezione nella parte finale del ciclo, per argomenti corrispondenti ai 3 CFU aggiuntivi

slide 4

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Modalità d'esame: Fondamenti di Automatica (9CFU)

➔ PARTE 1: prova scritta con

- 6 esercizi numerici (3 punti per esercizio corretto)
- 4 domande a risposta multipla (1,5 punti per ogni domanda con risposta pienamente corretta. **N.B.:** più risposte vere, fino a 3 su 4 per ogni domanda!!)
- Punteggio massimo: 24
- Soglia per accedere alla PARTE 2: 15

➔ PARTE 2: prova al computer con

- Un esercizio di progetto assistito con software **Matlab/Simulink** (7 punti per esercizio corretto in ogni sua parte)

slide 5

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Modalità d'esame: Fondamenti di Automatica (9CFU)

- ➔ **NON** è possibile svolgere la PARTE 2 prima di aver superato (soglia: 15) la PARTE 1
- ➔ La PARTE 2 può essere svolta in un appello successivo a quello in cui viene superata la PARTE 1
- ➔ La PARTE 1 e la PARTE 2 possono essere ripetute entrambe, anche in modo indipendente (rimanendo la propedeuticità della 1 per la 2)
- ➔ Qualora le PARTI 1 o 2 vengano ripetute, verrà mantenuta valida l'ultima consegnata

slide 6

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Modalità d'esame: Controlli Automatici (6CFU)

➔ PROVA SCRITTA (unica) con:

- 8 esercizi numerici (3 punti per esercizio corretto)
- 5 domande a risposta multipla (1,5 punti per ogni domanda con risposta pienamente corretta. **N.B.:** più risposte vere per ogni domanda, fino a 3 su 4!!)
- Punteggio massimo: 31,5
- Soglia (superamento esame): 18

➔ Qualora la prova scritta venga ripetuta, verrà considerata valida l'ultima consegnata.

slide 7

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Materiale didattico

➔ Dispense fornite dal docente (fonte ufficiale)

➔ Testi per approfondimento (fonti non obbligatorie) in ordine di attinenza al corso:

1. *Controlli automatici* – R.C.Dorf, R.H. Bishop (Pearson)
2. *Fondamenti di controlli automatici* – P. Bolzern, R. Scattolini, N. Schiavoni (McGraw-Hill)
3. *Controlli automatici* – G.Marro (Zanichelli)
4. *Feedback Systems* – K.J. Åström, R.M. Murray (**INGLESE** e disponibile online <http://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/>)

slide 8

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Programma del corso

1. a) Modelli matematici per sistemi dinamici

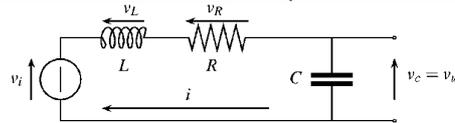
- Modelli a tempo continuo e a tempo discreto
- Modelli lineari e non lineari
- Modelli stazionari e non stazionari

STRUMENTI UTILIZZATI: MATEMATICA E FISICA

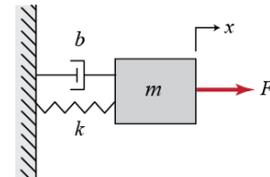
- Leggi base della fisica (mecca-tronica!!):

Ohm /

Kirchhoff,



Newton:



- Equazioni differenziali (nonlineari / lineari)

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t) \\ y(t) = g(x(t), u(t), t) \end{cases} \quad \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases}$$

slide 9

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Programma del corso - 1

1. b) Proprietà strutturali dei sistemi dinamici

- Stabilità (del moto o di stati di equilibrio) rispetto a perturbazioni dello stato iniziale e dell'ingresso
- Controllabilità e osservabilità dello stato (cenni)

STRUMENTI UTILIZZATI: ALGEBRA E GEOMETRIA

- Operazioni su matrici (prodotto, inversione, ecc.)

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad A^{-1} = \frac{\text{agg}(A)}{\det(A)} \quad P = [B \quad AB \quad A^2B \quad \dots]$$
$$\text{rango}(P) = n$$

- Calcolo e studio di autovalori

$$a(\lambda) = \det(\lambda I - A) = \lambda^n + a_{n-1}\lambda^{n-1} + \dots + a_1\lambda + a_0$$

slide 10

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Programma del corso - 1a

1. b) Più in dettaglio: analisi di sistemi dinamici lineari e stazionari

- Determinazione del moto e della risposta
- Matrice di transizione e proprietà
- Modi e proprietà (analisi modale)
- Risposta impulsiva
- Stabilità
- Controllabilità/Osservabilità

slide 11

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Programma del corso - 2

2. Sistemi lineari e stazionari ad un ingresso ed una uscita (Single Input Single Output, SISO)

- Funzioni di trasferimento (F.d.t.) e schemi a blocchi
- Passaggio da modelli ingresso-stato-uscita a F.d.t.
- Risposte canoniche
- Analisi armonica e diagrammi di Bode
- Sistemi a fase minima e formula di Bode
- Stabilità dei sistemi in retroazione
- Criterio di Routh e Nyquist
- Luogo delle radici
- Errori a regime e tipo del sistema

slide 12

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Programma del corso - 2

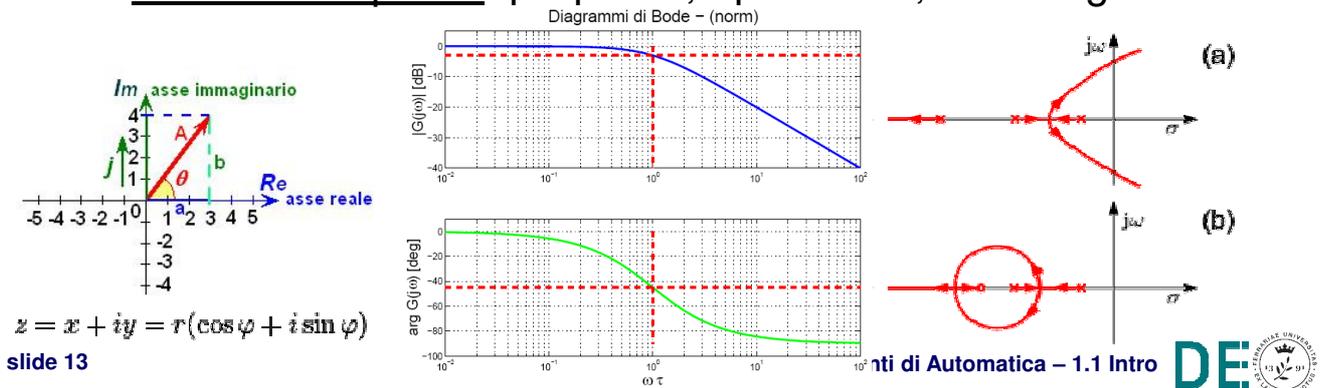
2. Sistemi lineari e stazionari ad un ingresso ed una uscita (Single Input Single Output, SISO)

STRUMENTI UTILIZZATI: ANALISI MATEMATICA

- Trasformazioni funzionali (Laplace)

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t)e^{-st} dt \quad f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma_0 - j\infty}^{\sigma_0 + j\infty} F(s)e^{st} ds$$

- Numeri complessi: proprietà, operazioni, metodi grafici

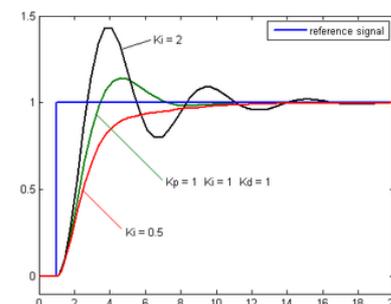
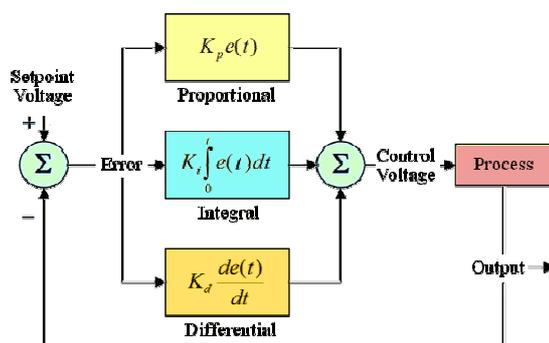


Programma del corso - 3

SOLO per Fondamenti di Automatica (9 CFU)

3. Progetto di sistemi di controllo

- Specifiche nel dominio dei tempi
- Specifiche nel dominio delle frequenze
- Sensitività, banda passante e margini di stabilità
- Reti correttive e relativa sintesi
- Regolatori standard PID e relativa sintonizzazione



slide 14

Fondamenti di Automatica - 1.1 Intro

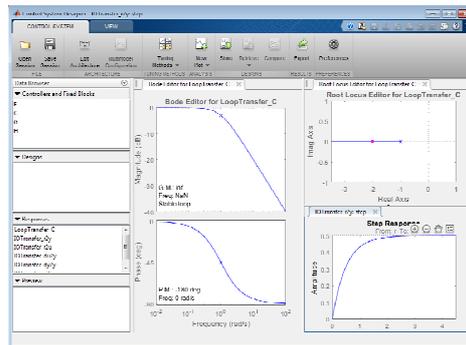
Programma del corso - 3a

Presentazioni su Matlab per tutti (registrate):

1. Modellazione e analisi di sistemi dinamici
2. Sistemi lineari e stazionari SISO

Esercitazioni in presenza per Fondamenti di Automatica (9CFU), su:

3. Progetto di sistemi di controllo



slide 15

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Introduzione CONCETTI FONDAMENTALI CENNI STORICI

slide 16

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Concetti introduttivi

- ➔ **CONTROLLO**: **azione** che si compie su un **sistema** (dispositivo, macchina, processo...) per modificarne il comportamento
 - come osservare il comportamento? **Misure**
 - come eseguire l'azione? **Variabili manipolabili**
- ➔ **Controllo manuale**: eseguito da un umano
- ➔ **Controllo automatico**: eseguito da un apparato opportunamente progettato e costruito
- ➔ **AUTOMATICA**: insieme delle discipline orientate allo studio del comportamento dei sistemi ed all'analisi e progetto del loro controllo automatico

slide 17

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Concetti introduttivi - 1

- ➔ **AUTOMAZIONE**: insieme delle tecnologie preposte alla sostituzione dell'intervento umano nella gestione e nel controllo delle operazioni di un sistema (dispositivo, macchina, processo...)
- ➔ **AUTOMAZIONE INDUSTRIALE**: l'automazione dei processi industriali di trasformazione delle materie prime e produzione di beni di consumo
- ➔ **TECNOLOGIE DEI SISTEMI DI CONTROLLO**: insieme delle attività ingegneristiche finalizzate al progetto ed alla realizzazione degli apparati (oggi tipicamente elettronici) preposti al controllo automatico di un sistema

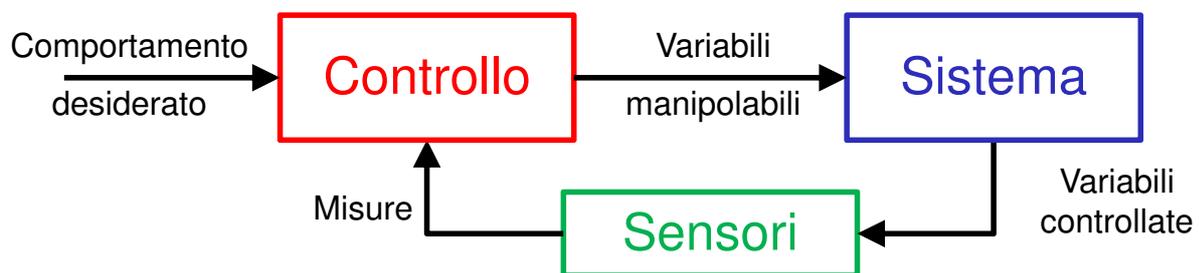
slide 18

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Concetti introduttivi - 2

- ➔ **Controllo ad azione diretta** (anello aperto, catena aperta): l'azione è determinata a priori in base al comportamento desiderato ed alle sue relazioni con le variabili manipolabili
- ➔ **Controllo in retroazione** (feedback, anello chiuso, catena chiusa): l'azione è determinata in base alle misure del comportamento effettivo del sistema ed al confronto di tale comportamento con quello desiderato



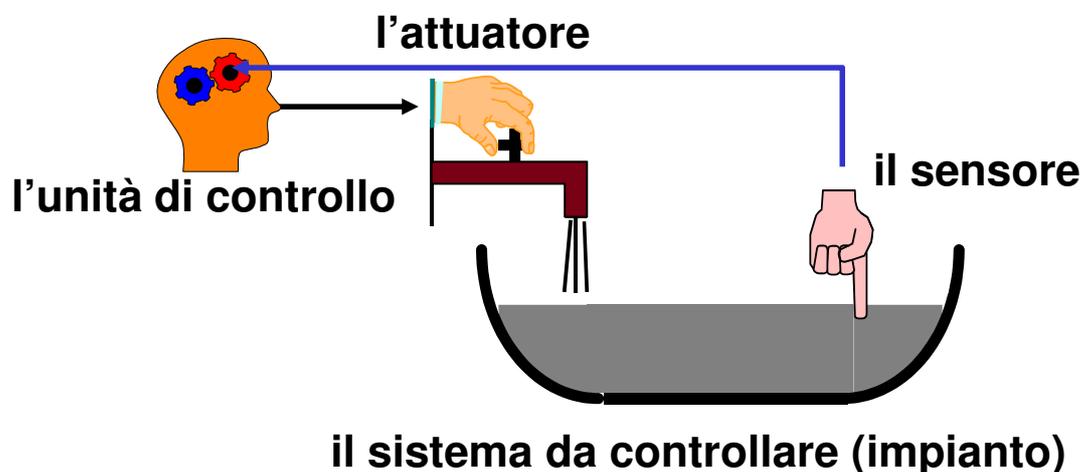
slide 19

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Esempi di sistemi e controllo

- ➔ **Regolazione della temperatura di una vasca** (controllo manuale)



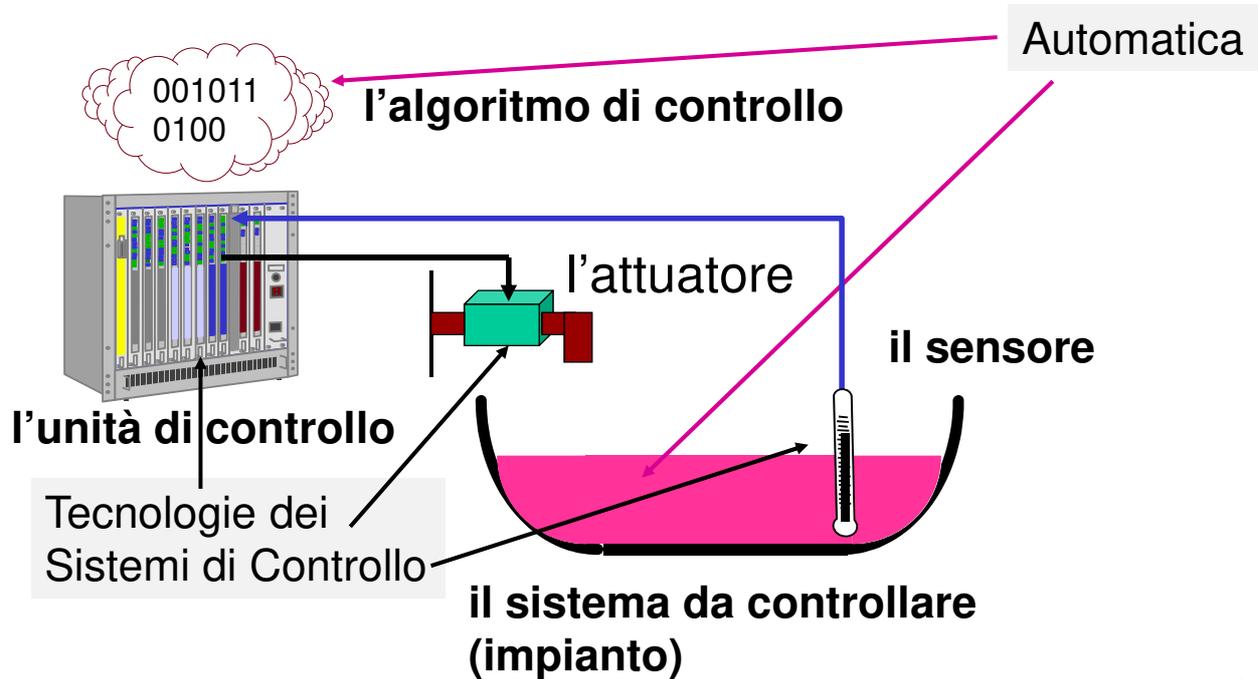
slide 20

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Esempi di sistemi e controllo

➔ Dai controlli manuali ai **Controlli Automatici**



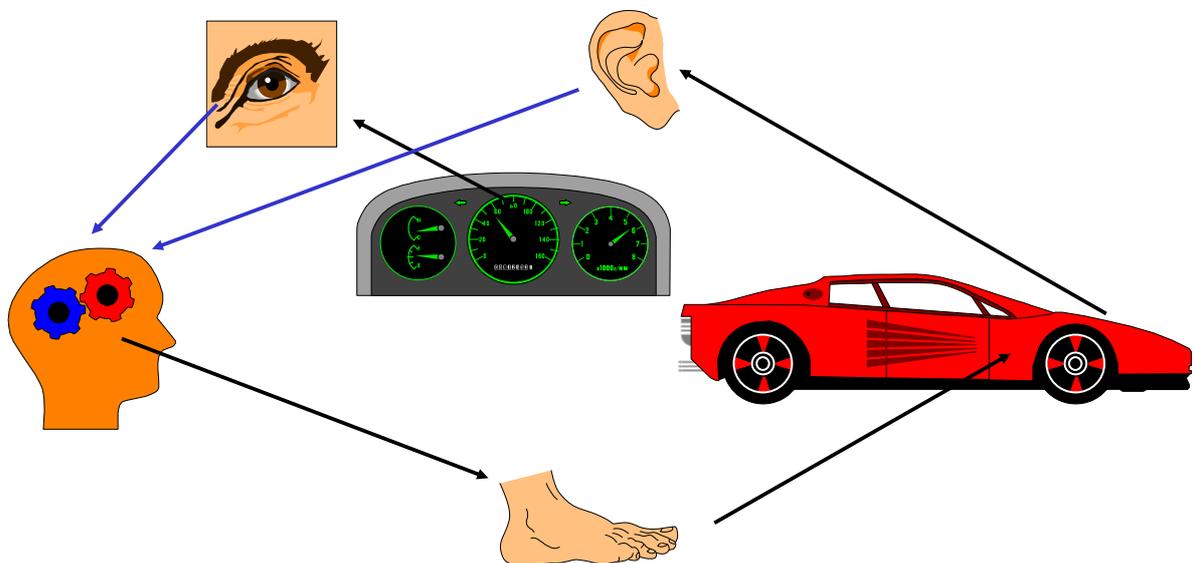
slide 21

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Esempi di sistemi e controllo

➔ **Controllo (manuale) di un'automobile**



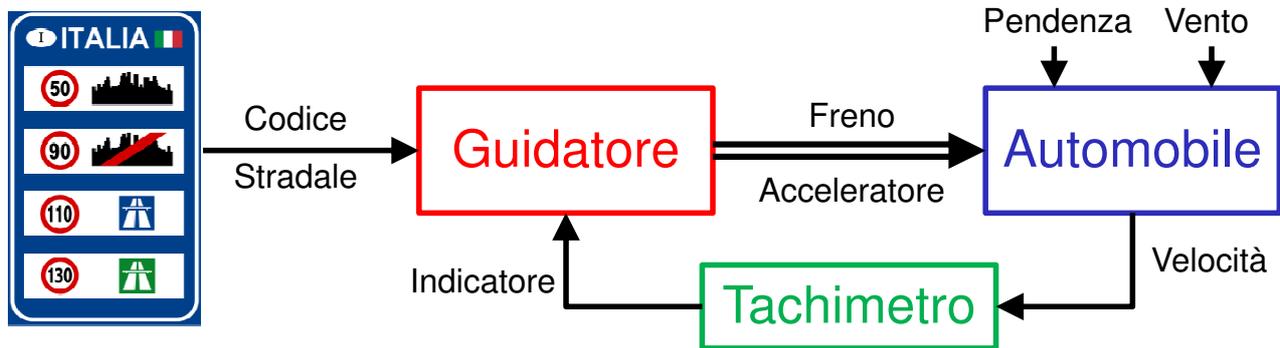
slide 22

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Esempi di sistemi e controllo

► Controllo della velocità dell'automobile



NOTA1: pendenza e vento influenzano la velocità, ma NON sono manipolabili dal guidatore. Variabili di questo tipo si definiscono **DISTURBI**

NOTA2: il Controllo Automatico della velocità esiste da molti anni nelle automobili, si chiama *Cruise-Control*

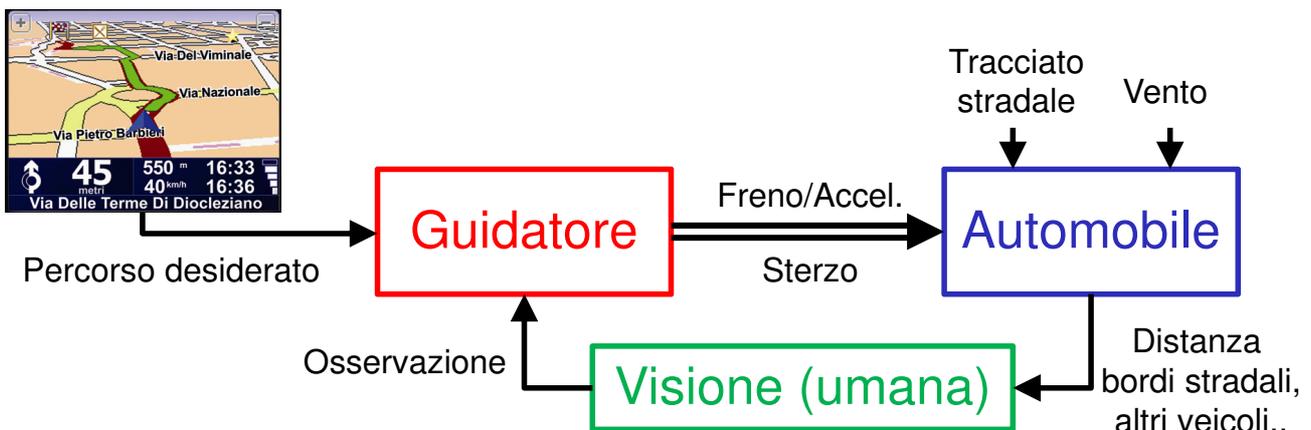
slide 23

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Esempi di sistemi e controllo

► Controllo della traiettoria dell'automobile



NOTA: i Controlli Automatici stanno "conquistando" anche queste applicazioni (v. *Park Assist*, ecc.), così come il *pilota automatico* è una realtà consolidata sui velivoli commerciali

slide 24

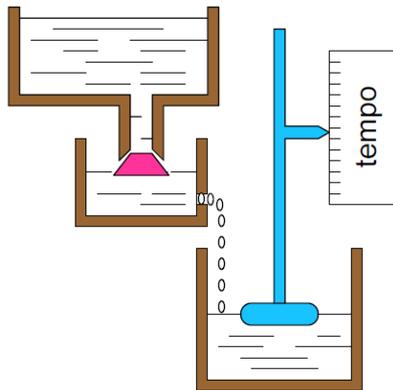
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



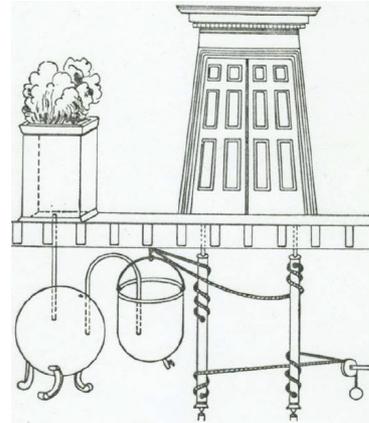
Cenni storici

► Origini (ante Rivoluzione Industriale)

- tentativi di costruzione di sistemi semi-automatici
- approccio empirico e basato sull'inventiva di pochi



Orologio ad acqua
di Ktesibios (300 a.C.)



Apertura porte tempio greco
tramite espansione aria calda

slide 25

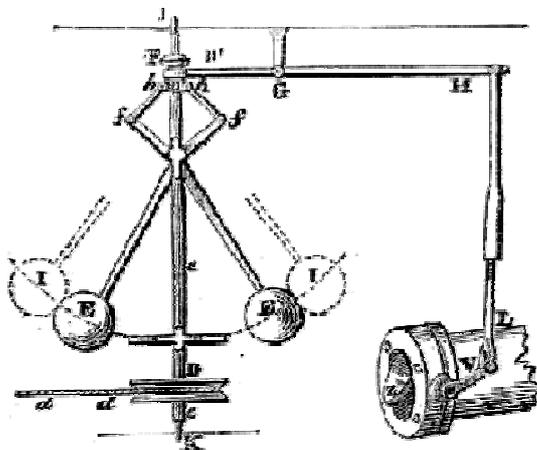
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Cenni storici - 1

► PRIMO controllore (inizio Rivoluzione Industr.)

- Regolatore centrifugo di Watt (*Flyball governor*, 1788)



Dispositivo meccanico in grado di limitare la velocità di rotazione di un motore a vapore:

all'aumentare della velocità le sfere si sollevano e, tramite il meccanismo a parallelogramma, viene chiusa progressivamente la valvola a farfalla che limita il flusso di vapore e l'energia erogata dal motore

NOTA: Watt ha in realtà razionalizzato e applicato alle macchine a vapore (il vero motore della Rivoluzione Industriale) un principio di regolazione già in uso nei mulini a vento dal XVII secolo...

slide 26

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Cenni storici - 1a

► Schema dettagliato del regolatore di Watt

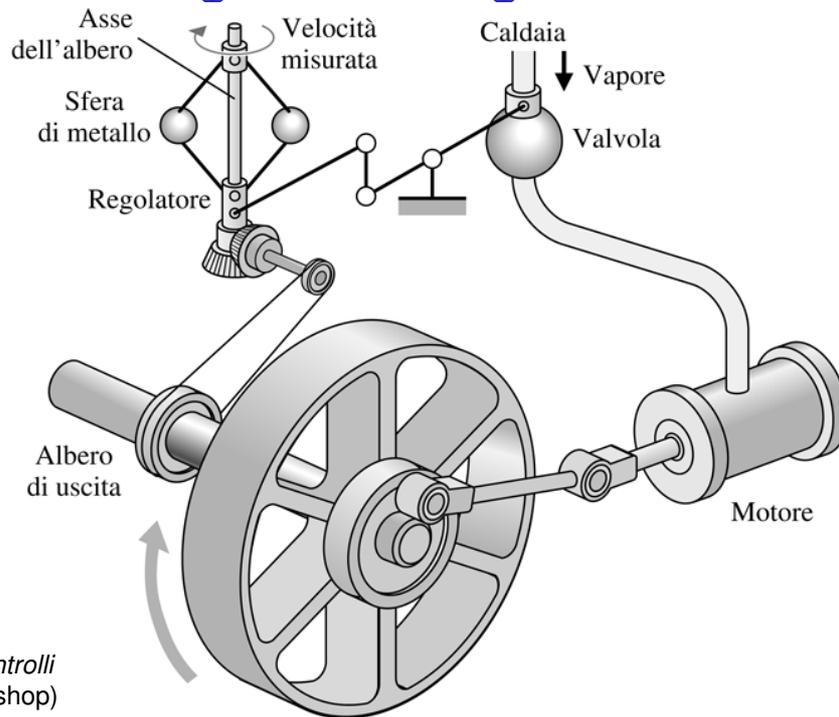


Figura tratta da *Controlli Automatici* (Dorf-Bishop)

slide 27

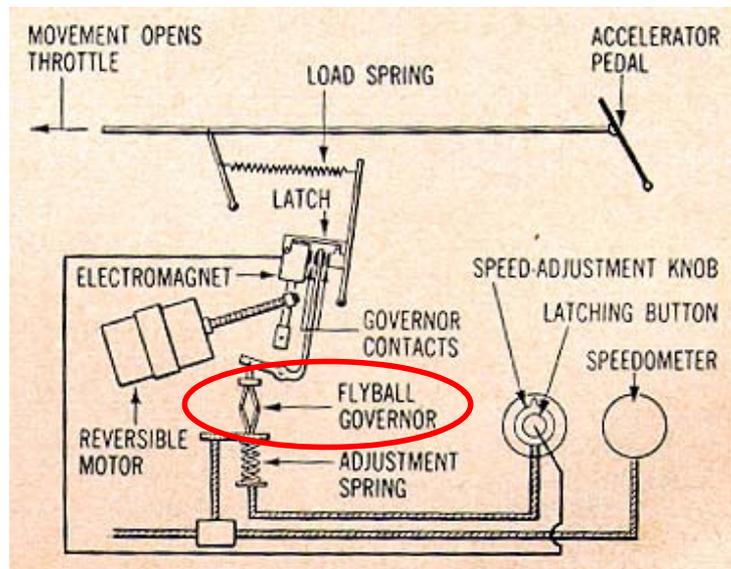
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Cenni storici - 1b

► PRIMO *cruise-control* per auto (Chrysler, 1958)

- Schema di funzionamento (NOTARE l'uso del *flyball governor* come quello di Watt)



slide 28

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Cenni storici - 2

➔ Sviluppo della teoria (post Rivoluzione Industr.)

- 1868: J.C. Maxwell inizia lo studio matematico del regolatore di Watt (e altri), con equazioni differenziali
- 1892: A.M. Lyapunov studia la stabilità delle equazioni differenziali nonlineari
- 1927: H.S. Black sviluppa l'amplificatore a retroazione negativa, da cui nasce l'elettronica moderna
- Analisi frequenziale e stabilità del dispositivo di Black:
 - 1932: H. Nyquist
 - 1940: H.W. Bode
- Post 1940: *esplosione..* **della teoria del Controllo**
 - trainata dalle applicazioni ingegneristiche, ad Ovest (NATO)
 - motivata dalla tradizione matematica russa, ad Est

slide 29

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Cenni storici - 4

➔ Pietre miliari nello sviluppo dei Controlli

- **Seconda Guerra Mondiale:**
 - autopiloti per aerei, sistemi di puntamento artiglieria pesante, radar, ...
- **Nascita dei calcolatori elettronici (anni '50):**
 - possibilità di verifica dei risultati teorici con calcoli complessi
- **Conquista dello spazio (anni '60-'70):**
 - resa possibile da sistemi di controllo sempre più sofisticati
- **Sviluppo dei microprocessori (anni '70-'80):**
 - diffusione globale della tecnologia digitale e riduzione dei costi
 - introduzione massiccia dei sistemi programmabili nell'Automazione Industriale
 - estensione delle tecnologie digitali e dell'automazione anche negli ambiti non industriali

slide 30

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Quanto sono diffusi i Controlli Automatici?

➔ I sistemi di controllo sono onnipresenti, essenziali e spesso indispensabili..

- Moltissimi beni di consumo che usiamo ogni giorno sono prodotti grazie ad un sistema di controllo automatico
- Le nostre abitazioni sono piene di controllori automatici
- Le nostre automobili sono piene di controllori automatici
- Alcuni sistemi, macchine o veicoli non potrebbero funzionare senza controllori automatici

slide 31

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Quanto sono diffusi i Controlli Automatici?

➔ *Control Systems are ubiquitous*

<http://www.ieeecss.org/general/control-systems-are-ubiquitous>



NASA Dryden Flight Research Center Photo Collection
<http://www.dfrc.nasa.gov/gallery/photo/index.html>
NASA Photo: EC91-491-6 Date: September 13, 1991

X-29 at High Angle of Attack

Il velivolo X-29 è stato progettato per essere instabile. Senza il suo sistema di stabilizzazione e controllo automatico, qualsiasi pilota lo farebbe precipitare dopo pochi secondi di volo!

slide 32

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive

► Controllo... ovunque!

– Industria manifatturiera



slide 33

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - a

► Controllo... ovunque!

– Industria manifatturiera

- Controllo del movimento (posizione, velocità) di motori elettrici e meccanismi collegati
- Controllo della temperatura per lavorazione di metalli (saldatura, fusione, ...)
- Controllo del livello di riempimento di serbatoi e contenitori per fluidi
- Controllo di pressione e portata di gas (aria, azoto) e fluidi (olio) utilizzati per azionare martinetti/cilindri (spintori, presse, ...)

slide 34

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 1

► Controllo... ovunque!

– Processi chimici / Impianti energetici



slide 35

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 1a

► Controllo... ovunque!

– Processi chimici / Impianti energetici

- Controllo del livello di riempimento di serbatoi contenenti composti per reazioni chimiche
- Controllo di temperatura e pressione all'interno dei serbatoi
- Controllo di portata dei fluidi entranti ed uscenti dai serbatoi
- Controllo del movimento di miscelatori dei composti chimici
- Controllo della potenza erogata da generatori di energia elettrica

slide 36

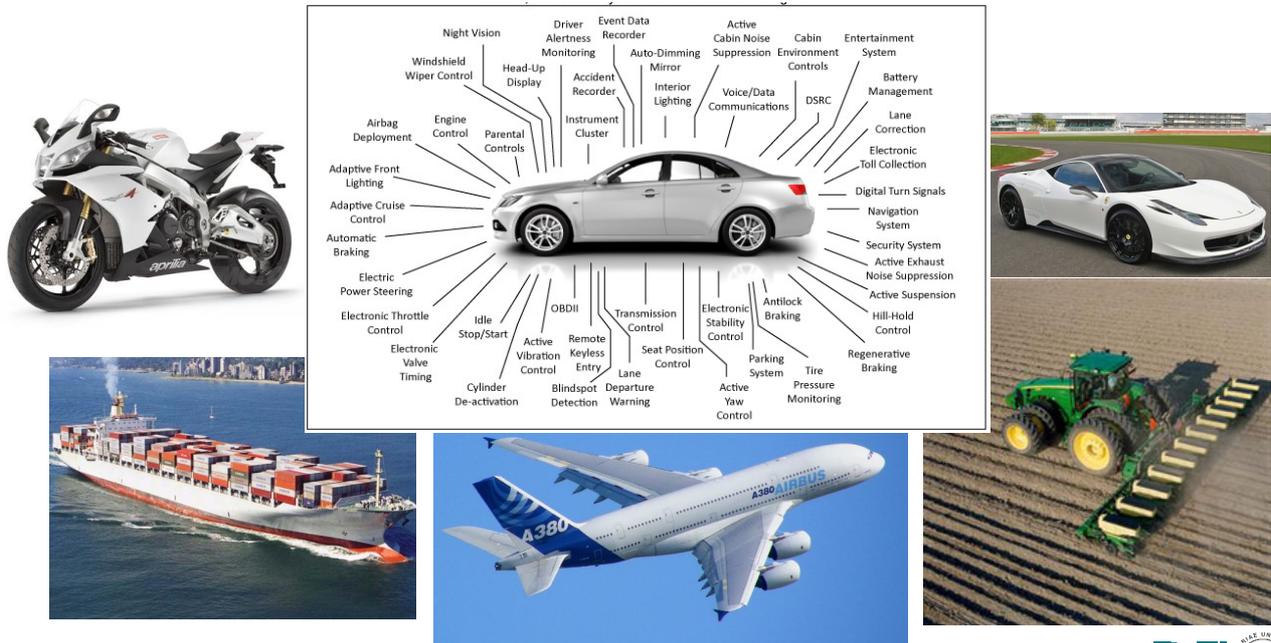
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 2

► Controllo... ovunque!

– Automobili, Motocicli, Velivoli, Imbarcazioni..



slide 37

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 2a

► Controllo... ovunque!

– Automobili, Motocicli, Velivoli, Imbarcazioni..

- Controllo dell'iniezione di carburante nei motori a combustione interna e a reazione
- Controllo della frenata (ABS) di auto e moto
- Controllo di trazione (anti-slittamento) di auto e moto
- Controllo dell'assetto (stabilizzazione e sospensioni attive) nelle automobili
- Sistemi di navigazione e guida autonoma di velivoli e imbarcazioni
- Controllo degli attrezzi agricoli e guida autonoma dei trattori per il *precision farming*

slide 38

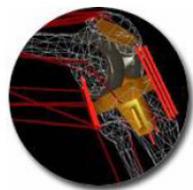
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 3

► Controllo... ovunque!

– Medicina e Chirurgia



Sullivan is the world's first recipient of a nerve/muscle graft to control a prosthesis.



slide 39

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 3a

► Controllo... ovunque!

– Medicina e Chirurgia

- Controllo di erogazione automatizzata dei farmaci
- Controllo della generazione di radiazioni e campi elettromagnetici per la produzione di immagini diagnostiche (T.A.C., R.M.)
- Sistemi robotizzati e teleoperati per la chirurgia minimamente invasiva (es. laparoscopica)
- Controllo dei movimenti di protesi attive (*mioelettriche*) per arti superiori
- Controllo dei motori elettrici nelle attrezzature per la riabilitazione motoria e l'esercizio ginnico

slide 40

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 4

► Controllo... ovunque!

– Elettronica di consumo



slide 41

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Situazione attuale e prospettive - 4a

► Controllo... ovunque!

– Elettronica di consumo

- Controllo del riscaldamento e condizionamento aria negli edifici
- Controllo di temperatura, portata fluidi e motori elettrici negli elettrodomestici
- Sistemi robotizzati per la pulizia dei pavimenti
- Controllo della messa a fuoco di video/fotocamere
- Controllo dei motori elettrici nei mezzi di trasporto personale come biciclette, *Segway*, ...
- ... ovunque serva l'erogazione controllata di energia elettrica!

slide 42

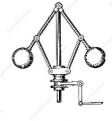
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



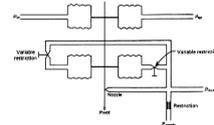
Situazione attuale e prospettive - 5

► Realizzazione fisica di Controllori Automatici:

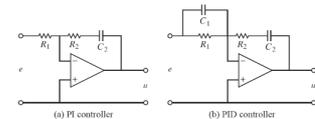
– Tramite componenti meccanici (es. regolatore centrifugo di Watt e moderni discendenti)



– Tramite circuiti pneumatici/oleodinamici (retroazione della pressione di aria/olio sulle stesse valvole che ne regolano il passaggio)



– Tramite circuiti elettronici *analogici*



– Tramite sistemi elettronici *digitali* e relativa programmazione software! → **oggi dominante**

Situazione attuale e prospettive - 6

► Per approfondimenti sulla diffusione delle tecnologie di controllo nella vita moderna:

The Impact of Control Technology
Overview, Success Stories, and Research Challenges

<http://ieeecss.org/general/impact-control-technology>

Situazione attuale e prospettive - 7

- ➡ I Controlli Automatici sono quindi ovunque..
- ➡ .. SOLO CHE non sono percepiti in modo evidente dalle persone comuni!

➡ RIASSUMENDO:

AUTOMATICA >> «*The hidden technology*»
(Karl Johan Åström)

Il problema di controllo

- ➡ Cosa accomuna tutte le applicazioni citate, indipendentemente dal tipo di sistema fisico controllato o dalla realizzazione fisica del controllore?
 - Approccio al problema
 - specifiche di controllo (prestazioni, robustezza,...)
 - Modellazione matematica di sistemi *dinamici*
 - Definizione della strategia di controllo
 - anello chiuso, *model-based*, adattativo, ecc.
 - Logica di funzionamento
 - modi operativi (avvio/arresto, standby), supervisione e diagnosi di malfunzionamenti/guasti, ...

Introduzione

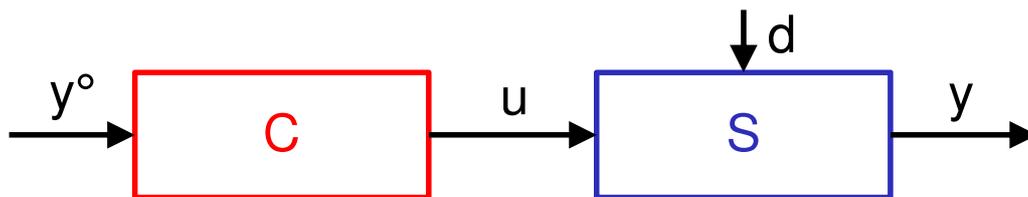
CONTROLLO E STRATEGIE

slide 47

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Notazione



- S**: sistema (o processo, o impianto, o *plant*) da controllare
u: variabile manipolabile o di controllo (*ingresso* del sistema)
y: variabile controllata (*uscita* del sistema)
d: disturbi
C: controllore
y^o: riferimento (o *set-point*) per la variabile controllata
(*ingresso* del controllore)

Problema:

- C** deve determinare ad ogni istante u in modo che y sia il più possibile simile ad y^o , anche in presenza dei disturbi d .
C può disporre delle misure di y , del modello matematico di **S**, delle misure di d o del modello matematico che lo generi

slide 48

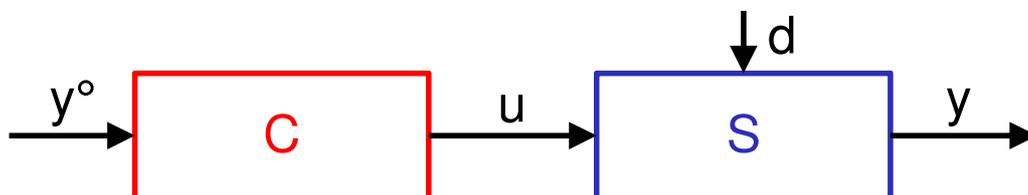
Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo

► Controllo ad **anello aperto** (*open-loop*):

- **C** utilizza solo il modello matematico di **S**, per determinare il valore di u tale che (teoricamente) y corrisponda a y°

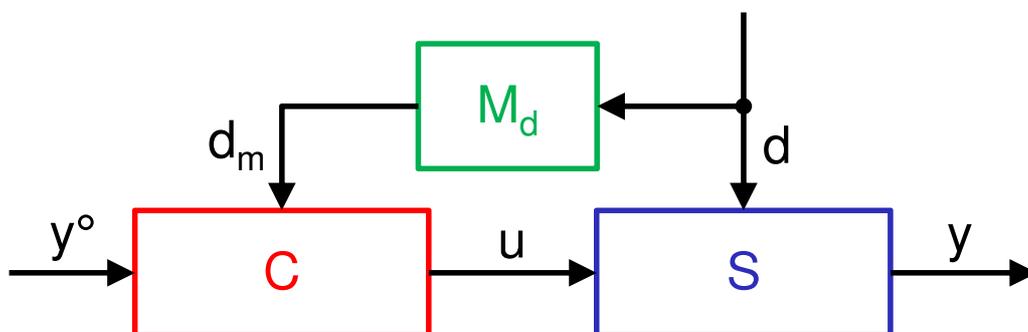


Strategia poco efficace in presenza di incertezza su S e d !
Si pensi al controllo di velocità dell'automobile, effettuato senza osservare il tachimetro e senza conoscere pendenza e/o vento!

Strategie di controllo - 1

► Controllo ad **anello aperto** (*open-loop*) con **compensazione del disturbo**:

- **C** utilizza il modello matematico di **S** e le misure di d , per attenuarne l'effetto sul valore della variabile controllata y

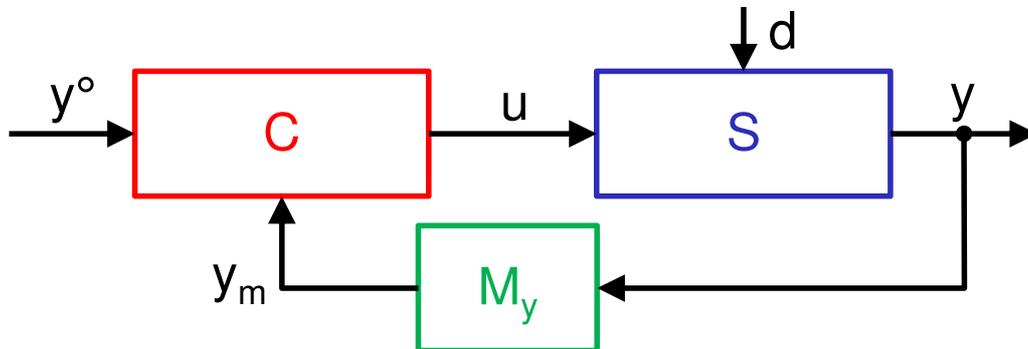


Nel controllo di velocità dell'automobile, ancora non si osserverebbe il tachimetro!

Strategie di controllo - 2

► Controllo ad **anello chiuso** (*closed-loop, feedback*):

- **C** utilizza le misure di y per confrontarle ad ogni istante con y° ed agire di conseguenza



Nel controllo di velocità dell'automobile, si considera essenziale l'osservazione del tachimetro!



Se **C** agisce in modo troppo *energico* o *brusco*, può rendere il sistema instabile!

slide 51

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro

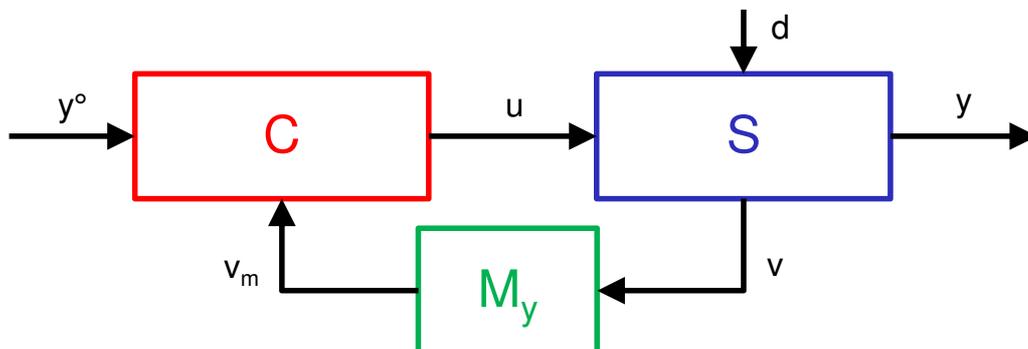


Strategie di controllo - 2a

► Controllo ad **anello chiuso** (*closed-loop, feedback*),

VARIANTE:

- **C** non utilizza le misure dirette di y , in quanto non disponibili nella pratica, ma quelle della variabile v , dipendente a sua volta da y .



slide 52

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo - 2b

- ➔ Il concetto di *feedback*, inteso come interazione tra (almeno) due sistemi ciascuno in grado di influenzare il comportamento dell'altro, è presente in moltissimi fenomeni naturali:
 - Produzione ormonale e funzioni biologiche
 - Sistema immunitario e infezioni batteriche/virali
 - Specie animali predatrici e predate
 - Fenomeni atmosferici, marini e terrestri
- ➔ «*Feedback is a central feature of life*»
(da 'The Way Life Works', di M.B. Hoagland e B. Dodson)

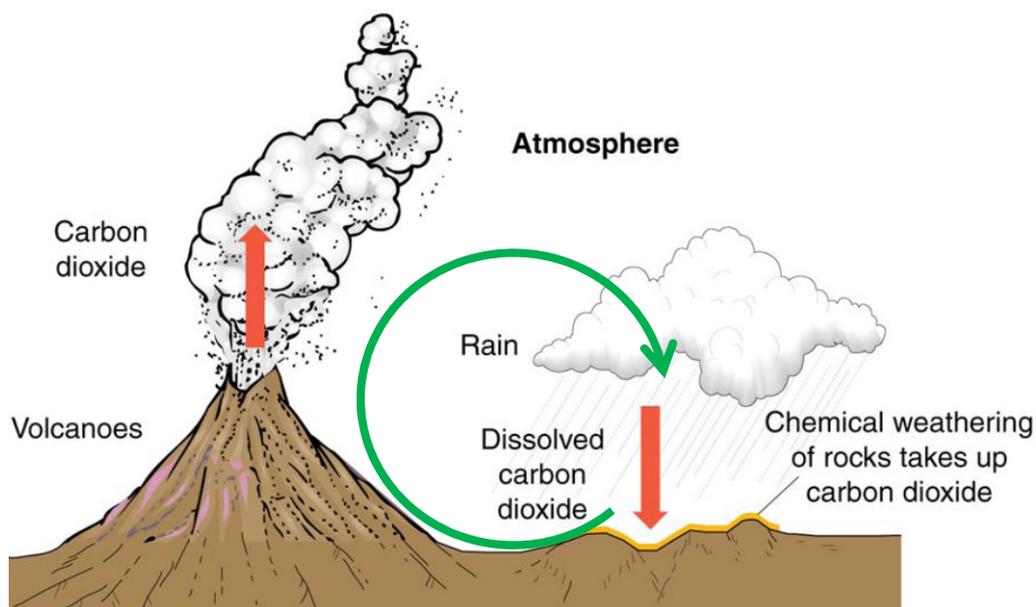
slide 53

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo - 2c

- ➔ Il *feedback* nella regolazione della temperatura sul pianeta Terra



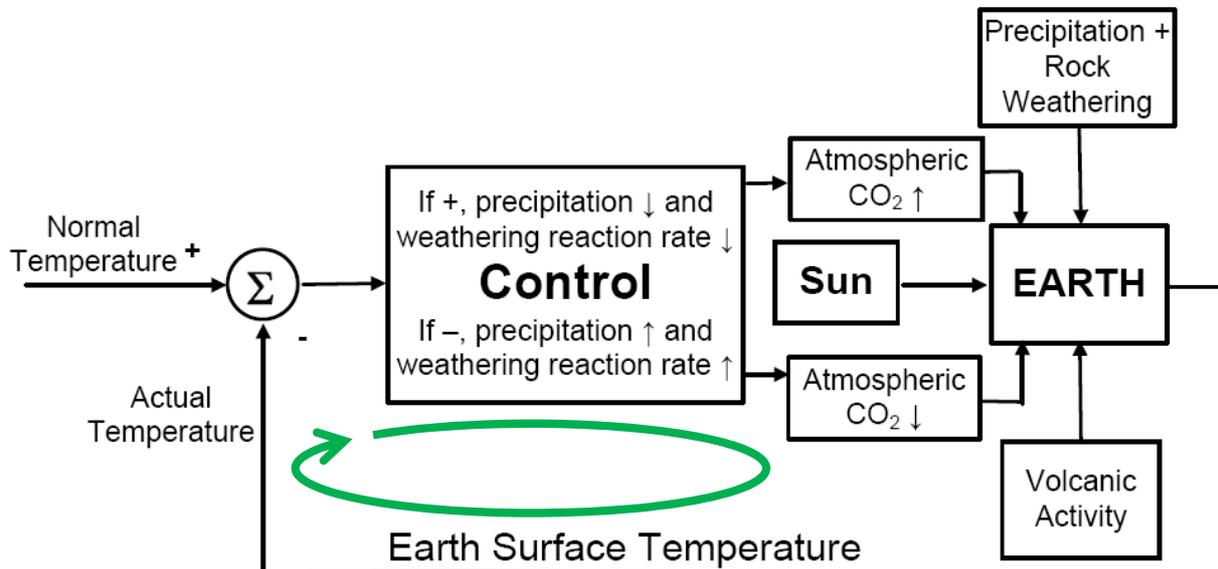
slide 54

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo - 2d

- Se la temperatura aumenta, aumentano le precipitazioni e la dissoluzione delle rocce, il che riduce il livello di CO_2 nell'atmosfera e, nel lungo periodo, anche la temperatura...
- VICEVERSA, se la temperatura diminuisce ...



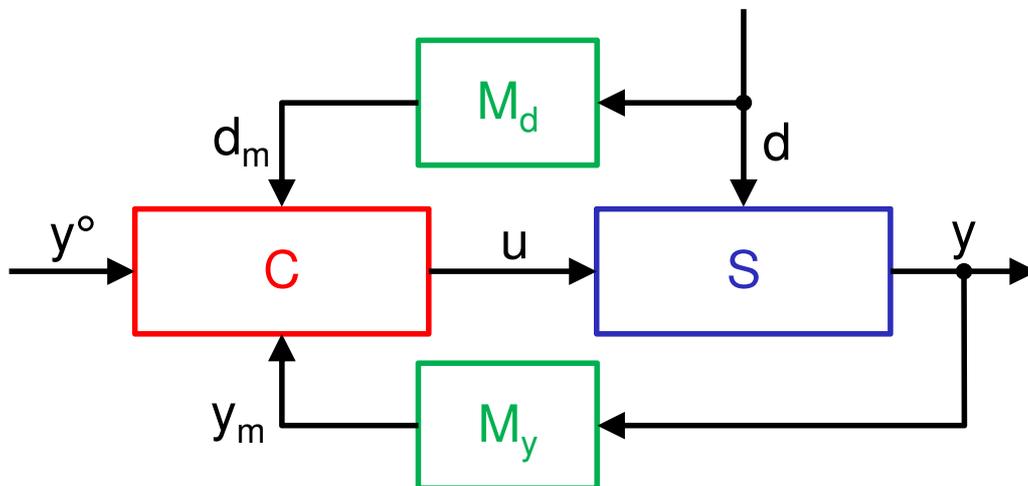
slide 55

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo - 3

- Controllo ad **anello chiuso** (*closed-loop, feedback*) con **compensazione del disturbo**:



slide 56

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Strategie di controllo - 3a

- La *compensazione del disturbo* NON è analoga all'azione di *feedback*, in quanto è determinata dalla misura di variabili che NON rappresentano il comportamento del sistema controllato, MA che lo influenzano (sono cioè analoghe alle variabili manipolabili)
- Tale tipo di controllo si può pertanto definire anche **feedforward**

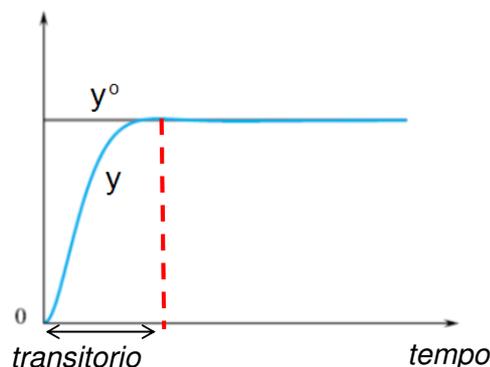
slide 57

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Requisiti di un sistema di controllo

- **Precisione statica**: quando y° è costante, anche y deve essere costante e tale che $y \sim y^\circ$



- **Precisione dinamica**: il periodo (detto *transitorio*) durante il quale y si avvicina a y° deve essere di breve durata, con oscillazioni limitate

slide 58

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



Requisiti di un sistema di controllo - 2

- **Insensibilità ai disturbi:** il controllo è in grado di limitare l'effetto di disturbi esterni sulla precisione statica/dinamica
- **Robustezza:** le specifiche sulla precisione statica e dinamica devono essere garantite anche quando il processo da controllare ha caratteristiche differenti, entro certi limiti, dal modello matematico previsto.
- **Moderazione:** il controllore non deve sollecitare il sistema da controllare con azioni troppo energiche, irregolari (indice di instabilità) o di entità eccessiva. Usualmente:

$$u_{min} \leq u \leq u_{max}$$

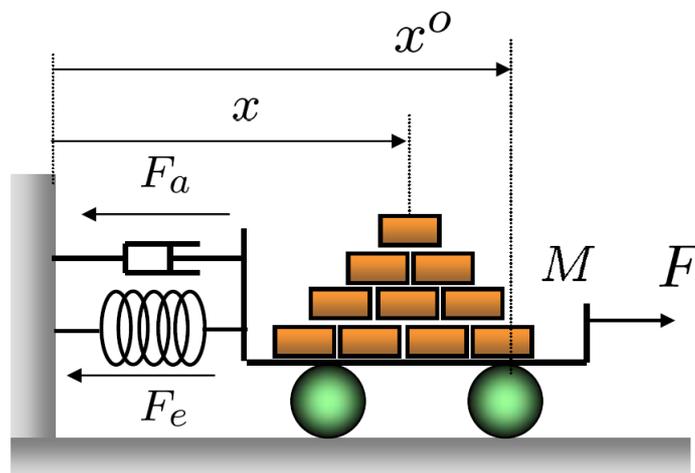
slide 59

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico)

- **Variabile manipolabile (i.e. ingresso):** forza motrice F
- **Variabile controllata (i.e. uscita):** spostamento x
- **Concetti fisici:** leggi di Newton (i.e. bilancio delle forze = massa per accelerazione), forza elastica F_e , attrito F_a



slide 60

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro

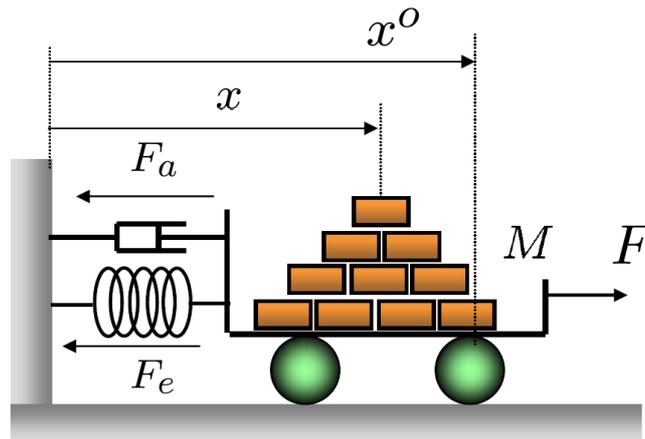


ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico)

Relazioni matematiche e notazione:

- variabili in funzione del tempo: $x(t)$, $F(t)$, ecc.
- derivate rispetto al tempo: $dx(t)/dt = \dot{x}(t)$; $d^2x(t)/dt^2 = \ddot{x}(t)$;
- forza elastica: $F_e = K_m \cdot x$
- forza di attrito: $F_a = B \cdot \dot{x}$

→ K_m e B : costanti ≥ 0



slide 61

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro

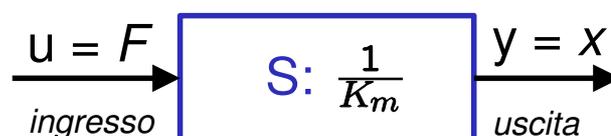


ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 1

- Si consideri dapprima il **sistema in condizioni statiche**:
 $x = \text{costante} \rightarrow \dot{x}(t) = \ddot{x}(t) = 0 \rightarrow \text{[somma forze]} = 0$

- Pertanto (notare i segni, dipendenti dal verso delle frecce nella slide precedente!!):

$$F - F_e = 0 \rightarrow \begin{cases} F = K_m \cdot x \\ x = \frac{1}{K_m} F \end{cases}$$



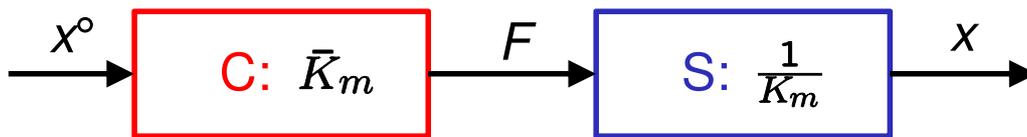
slide 62

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 2

- ▶ Si consideri il **controllo ad anello aperto**: $F = \bar{K}_m \cdot x^o$ nella quale x^o è lo spostamento desiderato (*set-point*) e \bar{K}_m è una costante fissata pari al valore nominale di K_m
- ▶ Poiché la forza calcolata dal controllore (i.e. la sua *uscita*) corrisponde all'ingresso del sistema, si può disegnare il seguente schema:



NOTA: il controllore, la cui *uscita* corrisponde all'*ingresso* del sistema controllato, è di fatto un modello reciproco del sistema stesso..

ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 3

- ▶ Con tali ipotesi l'**errore di posizione** $e = x^o - x$ risulta:

$$x = \frac{\bar{K}_m}{K_m} x^o \rightarrow e = x^o - x = x^o \left(1 - \frac{\bar{K}_m}{K_m} \right)$$

- ▶ In **condizioni nominali**:

$$K_m = \bar{K}_m \rightarrow e = 0$$

- ▶ In **condizioni perturbate**:

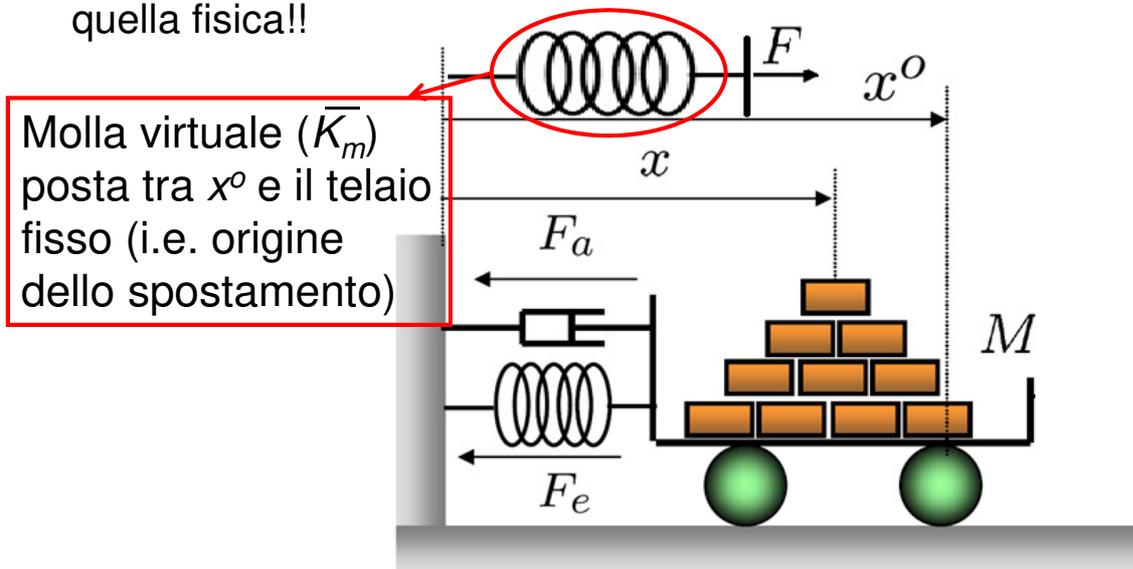
$$K_m \neq \bar{K}_m \rightarrow e = x^o \frac{\Delta K_m}{K_m} \neq 0$$

$$\Delta K_m = K_m - \bar{K}_m \neq 0$$

INCERTEZZA DI MODELLAZIONE

ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 3a

- **NOTA:** il controllore si comporta come una molla virtuale che agisce in direzione opposta a quella fisicamente presente nel sistema, in funzione dello spostamento x^o . Quest'ultimo viene raggiunto solo se la molla virtuale è esattamente identica a quella fisica!!



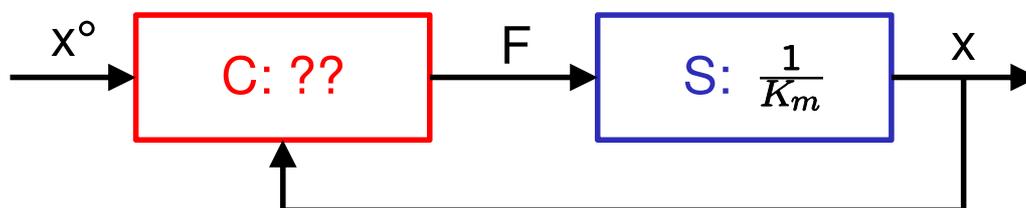
slide 65

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 4

- Si consideri ora il **controllo ad anello chiuso**, cioè dipendente sia dal *set-point* x^o che dalla misura di x :



- La scelta più semplice è quella di applicare un'azione forzante **proporzionale** all'errore (i.e. maggiore è l'errore, maggiore è la forza applicata!):

$$\Rightarrow F = K_c \underbrace{(x^o - x)}_{\text{errore}}; K_c > 0$$

NOTARE il segno dell'errore e di K_c : la forza deve spingere x verso x^o !!

slide 66

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 5

- Con tali ipotesi l'errore di posizione $e = x^o - x$ risulta:

$$x = \frac{1}{K_m} F = \frac{1}{K_m} K_c (x^o - x) \rightarrow x \left(1 + \frac{K_c}{K_m} \right) = \frac{K_c}{K_m} x^o$$

- $x = \frac{K_c/K_m}{1+K_c/K_m} x^o \rightarrow e = x^o - x = \frac{1}{1+K_c/K_m} x^o$

- Sia in **condizioni nominali** che **perturbate**, l'errore non è nullo, ma...

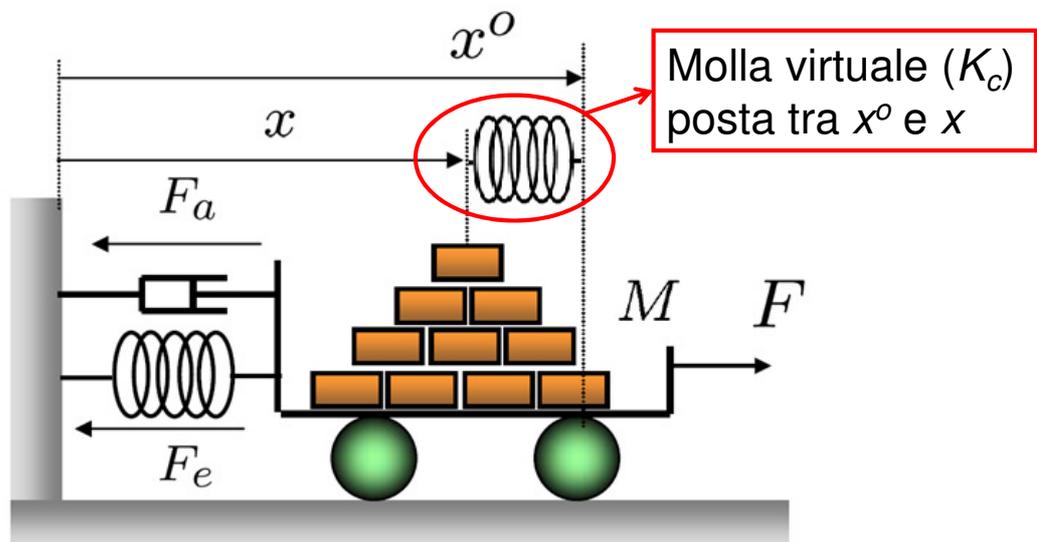
$$e \simeq 0 \quad \text{SE } K_c \gg K_m$$

PARAMETRO DI PROGETTO DEL CONTROLLORE!!

NOTA: il parametro K_c del controllore **non** deve essere molto simile a quello del sistema, come invece era nel controllo ad anello aperto!

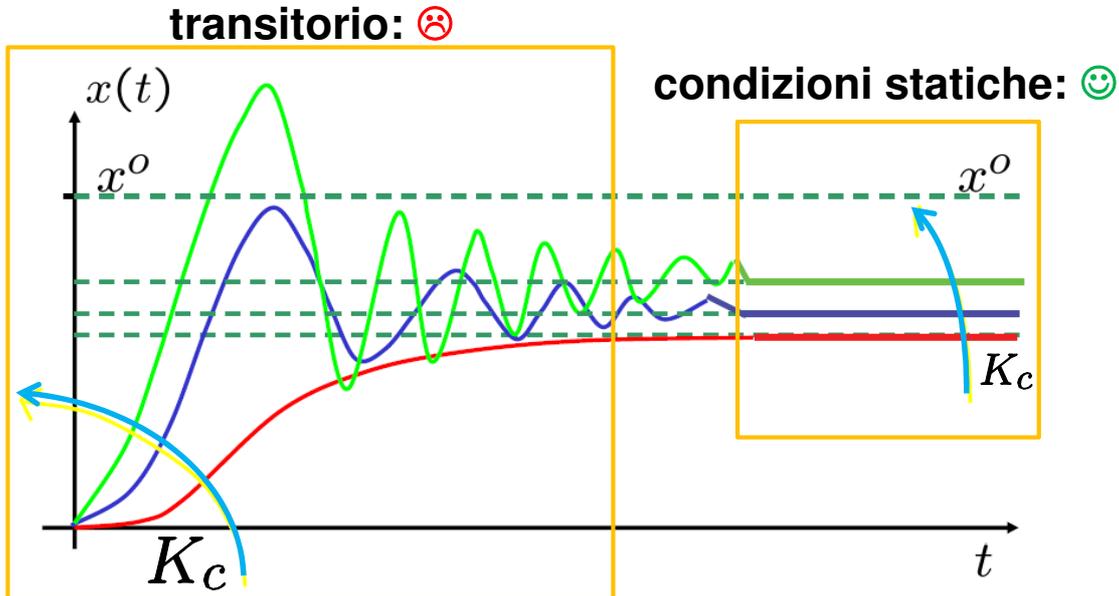
ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 5a

- NOTA:** il controllore si comporta come una molla virtuale che attrae il carrello dallo spostamento attuale verso lo spostamento desiderato x^o . Tale molla virtuale deve essere molto più "forte" (i.e. rigida) di quella fisicamente presente nel sistema!!!



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 6

- Potremmo quindi pensare di **aumentare a piacimento** K_c e ridurre a piacimento l'**errore di posizione**. In condizioni statiche è così, **ma nel transitorio...**



slide 69

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 7

- In realtà, all'aumentare del coefficiente del controllore si possono innescare notevoli oscillazioni durante il periodo transitorio iniziale!!
- Tali oscillazioni sono spiegabili solo analizzando il **modello dinamico**: **[somma forze] = $M\ddot{x}$**

$$F - F_e - F_a = M\ddot{x} \Rightarrow M\ddot{x} + B\dot{x} + K_m x = F$$



slide 70

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 8

- Applicando nuovamente il controllo ad **anello aperto**:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + K_m x = \bar{K}_m x^0$$

Termini dinamici Costante

Condizioni di equilibrio

- Risolvendo l'equazione differenziale, tramite l'equazione algebrica associata:

$$M\lambda^2 + B\lambda + K_m = 0$$

si può calcolare l'andamento nel tempo di x , in funzione delle soluzioni λ_1, λ_2 dell'equazione algebrica

ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 8a

RICHIAMO: (da https://it.wikipedia.org/wiki/Equazione_differenziale_lineare_del_secondo_ordine)

Una equazione differenziale del secondo ordine (con $y(x)$, $y'(x)$ e $y''(x)$) a coefficienti costanti, ha soluzioni basate su funzioni esponenziali, calcolabili analiticamente risolvendo la corrispondente equazione algebrica:

$$y'' + a \cdot y' + b \cdot y = 0 \rightarrow \lambda^2 + a\lambda + b = 0$$

Date le soluzioni dell'equazione algebrica, se $\lambda_1 \neq \lambda_2 \in \mathbb{R}$

$$\rightarrow y = c_1 e^{\lambda_1 x} + c_2 e^{\lambda_2 x}$$

Altrimenti, se le soluzioni sono complesse $\lambda_{1,2} = \alpha \pm i\beta \in \mathbb{C}$

$$\rightarrow y = e^{\alpha x} (c_1 \cos \beta x + c_2 \sin \beta x)$$

NOTA: I coefficienti c_1 e c_2 dipendono dalle condizioni iniziali che si vogliono imporre. Nel caso in cui il secondo membro dell'equazione sia diverso da 0, la soluzione è analoga a quella qui descritta con l'aggiunta di una $u(x)$ opportuna

ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 8b

- Nel caso considerato, la funzione di interesse è lo spostamento $x(t)$, il cui argomento è il tempo, perciò la notazione generica della slide precedente si modifica come segue **(N.B.: $M > 0, B \geq 0, K_m \geq 0$)**:

$$M\lambda^2 + B\lambda + K_m = 0 \quad \text{sol.} \rightarrow \lambda_{1,2} = \frac{-B \pm \sqrt{B^2 - 4K_m M}}{2M}$$

- Se $B^2 \geq 4K_m M \rightarrow \lambda_1, \lambda_2$ sono reali e certamente < 0 :

sol. eq. diff. $\rightarrow x(t) = c_1 e^{\lambda_1 t} + c_2 e^{\lambda_2 t}$

- Se $B^2 < 4K_m M \rightarrow \lambda_1, \lambda_2$ sono complessi, ma con parte reale certamente < 0 :

sol. eq. diff. $\rightarrow x(t) = e^{\alpha t} (c_1 \cos \beta t + c_2 \sin \beta t)$

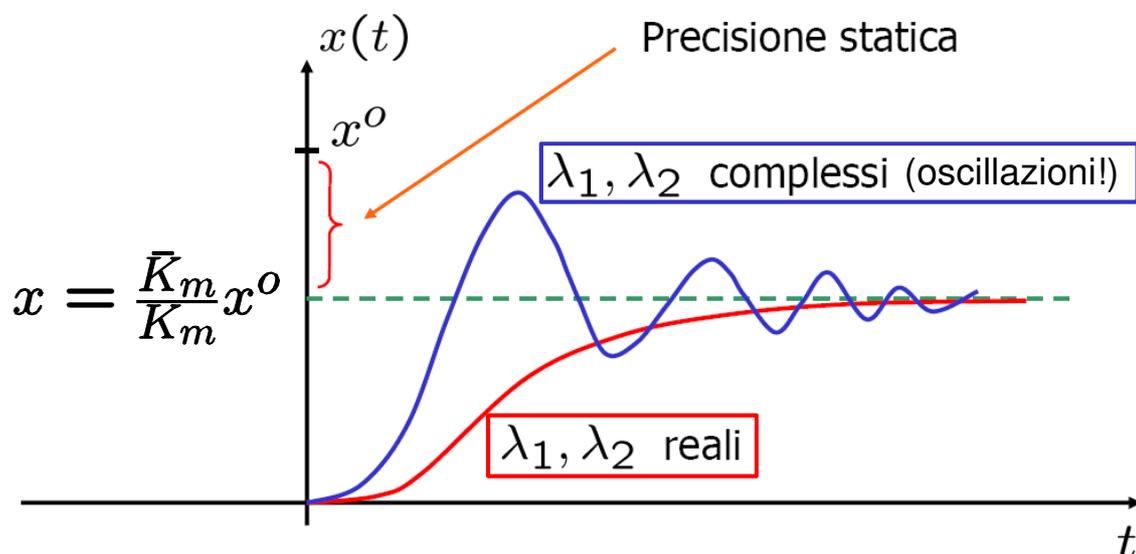
slide 73

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 9

- La **precisione statica** dipende dal controllore, ma la **precisione dinamica** dipende esclusivamente dai parametri del sistema meccanico (M, K_m, B)



slide 74

Fondamenti di Automatica – 1.1 Intro



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 10

- Applicando nuovamente il controllo ad **anello chiuso**:

$$M\ddot{x} + B\dot{x} + K_m x = K_c(x^o - x)$$

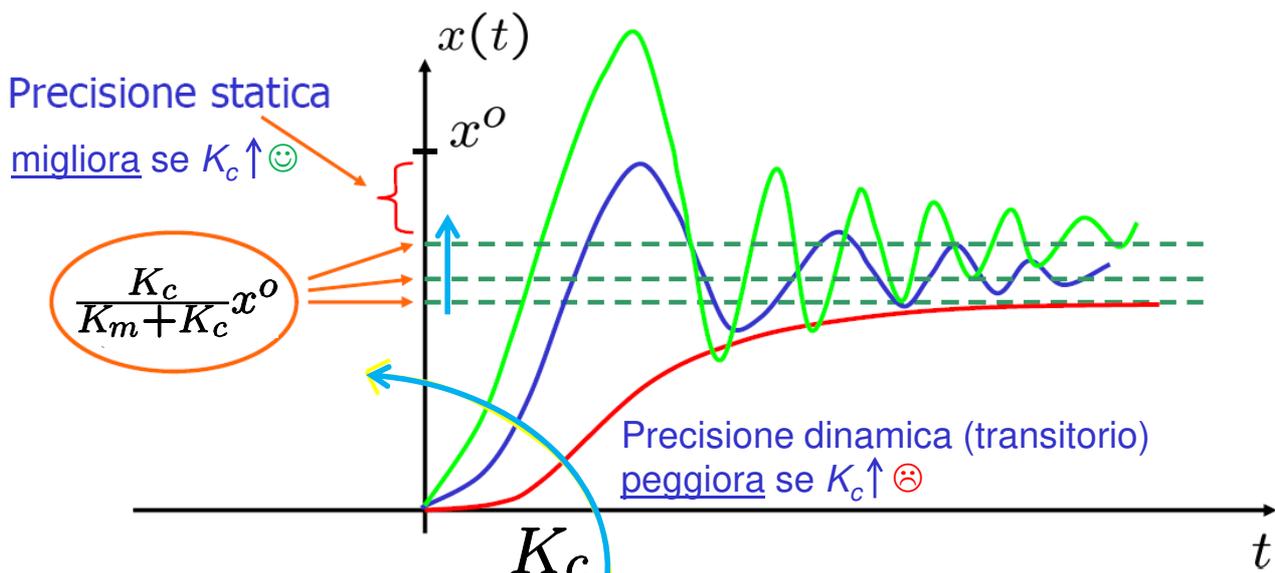
- In questo caso la soluzione dell'equazione differenziale è influenzata direttamente dal controllore:

$$M\lambda^2 + B\lambda + (K_c + K_m) = 0$$

in quanto le caratteristiche di λ_1, λ_2 dipendono anche da K_c , che quindi influenza anche il transitorio!

ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 11

- Anche la **precisione dinamica** dipende dal controllore!
- Tuttavia, gli **obiettivi** sulla precisione dinamica e su quella statica sono (in questo caso..) **contrastanti!!**



ESEMPIO: controllo di un sistema (meccanico) - 12

➔ NOTE CONCLUSIVE:

- il controllo ad anello chiuso permette comunque di ottenere date prestazioni in modo più robusto (i.e. indipendente dall'effettivo valore di K_m nel sistema fisico!) rispetto a quello ad anello aperto
- la conoscenza e l'analisi del modello matematico dinamico (i.e. equazione differenziale) sono cruciali per capire l'effetto di modifiche del parametro di progetto del controllo ad anello chiuso (K_c)!!
- nel proseguimento del corso, le equazioni differenziali **NON** verranno più risolte con i metodi visti nelle slide precedenti, ma con metodi e strumenti di analisi specifici e caratterizzanti l'Automatica stessa

Riassumendo...

- ➔ L'Automatica è una disciplina utile in pressochè ogni campo applicativo dell'ingegneria
- ➔ Il concetto di *feedback* è fondamentale nella teoria dell'Automatica, anche per le implicazioni pratiche in altre discipline, ingegneristiche.. e NON!
- ➔ I modelli matematici ottenuti dalle leggi fisiche, che descrivano le caratteristiche statiche ma **SOPRATTUTTO** dinamiche dei sistemi, e la loro analisi (che astrae dal contesto fisico!!) sono necessari per comprendere l'effetto di variazioni ai parametri di progetto dei sistemi di controllo



INTRODUZIONE

- **Obiettivi e programma del corso**
- **Concetti fondamentali e cenni storici**
- **Controllo e strategie**

FINE