

Fondamenti di Automatica

Giorgio Battistelli

Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione, Università di Firenze



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DINFO
DIPARTIMENTO DI
INGEGNERIA
DELL'INFORMAZIONE

Organizzazione del corso

Orario

- Orario delle lezioni
 - lunedì 16:50 – 19:00, aula 001 Plesso Morgagni
 - mercoledì 8:40 – 10:50, aula 003 Plesso Morgagni
 - venerdì 14:30 – 16:40, aula 002 Plesso Morgagni
- modalità mista in presenza/a distanza
- Ricevimento su Meet (o in presenza se consentito)
 - appuntamento via mail
 - disponibilità per mercoledì pomeriggio e almeno un altro giorno nella settimana

Contenuti del corso

Il corso coinvolge tre macro-blocchi:

- **Modellistica**
modelli di sistemi dinamici, esempi, simulazione
- **Analisi di sistemi dinamici**
comportamento sul breve e lungo periodo, equilibri, stabilità, analisi armonica
- **Sistemi di controllo**
retroazione su stato e uscita, retroazione statica e dinamica, controllori PID, osservatori dello stato

Prerequisiti

- Analisi matematica (numeri complessi, derivate e integrali, equazioni differenziali, ecc.)
- Geometria e algebra lineare (matrici, vettori, determinanti e sistemi di equazioni lineari, ecc.)

Obiettivi del corso

Obiettivi specifici: fornire gli strumenti necessari all'analisi dei sistemi dinamici e alla progettazione di sistemi di controllo automatico a retroazione ed in particolare:

- conoscenza dei modelli di stato e ingresso-uscita
- capacità di analizzare le proprietà strutturali di un dato modello
- conoscenza dei fondamenti teorici del controllo in retroazione sullo stato e sull'uscita
- capacità di progettare un sistema di controllo in retroazione per sistemi lineari

Obiettivi extra: approccio critico, rigore analitico, capacità di astrazione

Modalità d'esame

- **Esame orale** con esercizi + domande teoriche
- Esercizi volti a verificare
 - la capacità di analizzare le proprietà strutturali di un sistema dinamico
 - la capacità di progettare un sistema di controllo in retroazione per sistemi lineari
- Quesiti e domande teoriche volti a verificare la conoscenza dei modelli di sistemi dinamici, e delle principali tecniche di analisi e sintesi dei sistemi di controllo in retroazione
- Precedenze
 - Analisi matematica I (o Elementi di analisi matematica)
 - Geometria e algebra lineare/calcolo numerico
- Date appelli per l'anno 2022: 14 giugno, 29 giugno, 19 luglio, 13 settembre

Materiale del corso

Per preparare l'esame:

- Slides, note del corso, esercizi (anche con soluzione) disponibili su Moodle

Per approfondimenti:

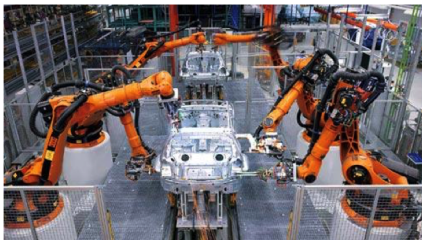
- Benvenuti, De Santis, Farina: Sistemi dinamici – modellistica, analisi e controllo, Mc Graw-Hill, 2009.
- Basso, Chisci, Falugi: Fondamenti di automatica, CittàStudi, 2007.
- Bolzern, Scattolini, Schiavoni: Fondamenti di controlli automatici, Mc Graw-Hill, 2015.
- Astrom, Murray:
[Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers](#), Princeton University Press, 2008.

Introduzione al corso

Cos'è l'automatica?

Cos'è l'automatica?

L'automatica studia come utilizzare la tecnologia per rendere i **sistemi** (informatici, elettronici, meccanici, mecatronici, ecc.) in grado di funzionare **in modo automatico**, ossia senza l'intervento dell'uomo.



Sistema dinamico

L'automatica studia i **sistemi dinamici**

Sistema: oggetto composto da più parti o elementi interagenti tra loro che si comporta come un tutt'uno e interagisce con l'ambiente esterno secondo proprie regole

Sistema dinamico: sistema che presenta al proprio interno quantità che evolvono nel tempo

I sistemi possono essere:

- **Naturali:** corpo umano, cellula, atmosfera, ecosistema, sistema solare, ...
- **Artificiali:** computer, smartphone, automobile, aereo, robot, internet, ...

Il ruolo dell'automatica

L'**automatica** studia i sistemi dinamici

In particolare, essa si occupa di analizzare le proprietà dei sistemi dinamici al fine di **predire** e, se possibile, **influenzare** il loro comportamento

- Applicazioni in molte aree dell'ingegneria e delle scienze:
 - sistemi di elaborazione dell'informazione
 - reti informatiche e di comunicazione
 - dispositivi robotici e mecatronici
 - processi industriali e di produzione
 - sistemi e reti di trasporto
 - sistemi di distribuzione dell'energia
 - sistemi di natura ambientale, biologica e biomedicale
- L'automatica utilizza **modelli matematici** per **astrarre** dal dominio applicativo particolare e **unificare** le metodologie di analisi e progetto

Argomenti del corso

- 1 **Modellistica:** costruire modelli matematici di sistemi (con particolare attenzione a quelli di interesse per l'ingegneria informatica)
- 2 **Analisi e simulazione:** studiare le proprietà strutturali dei sistemi dinamici e, in particolare,
 - come evolvono nel tempo
 - come interagiscono con l'ambiente esterno
- 3 **Sintesi/progettazione** di sistemi di controllo in grado di garantire che il sistema si comporti nel modo desiderato **automaticamente**, ossia senza l'intervento dell'uomo

Esempio: sistema scolastico

- Vogliamo descrivere l'andamento del numero di studenti che frequentano il primo anno di studi in una scuola, dove:
 - Gli studenti si iscrivono all'anno $t \in \mathbb{Z}$ per l'anno $t + 1$
 - Una percentuale $\alpha \in (0, 1)$ di studenti abbandona gli studi
 - Una percentuale $\beta \in (0, 1)$ di studenti vengono promossi
- $x(t)$ numero di studenti nell'anno t
- $u(t)$ numero di nuovi studenti iscritti
- **Modello di sistema scolastico:**

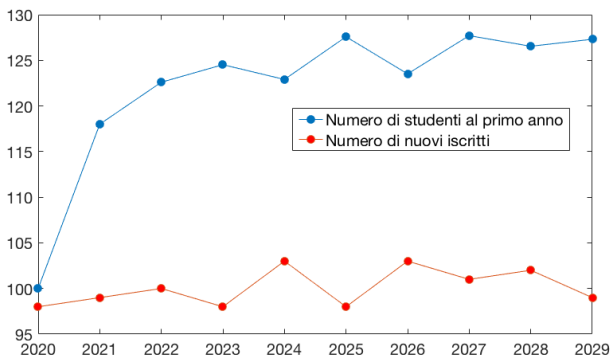
$$x(t + 1) = x(t) - \alpha x(t) - \beta x(t) + u(t)$$

Esempio: sistema scolastico

- **Modello di sistema scolastico:**

$$x(t+1) = x(t) - \alpha x(t) - \beta x(t) + u(t)$$

- Questo modello descrive un sistema dinamico che evolve nel tempo, e può essere usato per fare previsioni sull'andamento del sistema
- Predizione su 10 anni con $\alpha = 0.1$ e $\beta = 0.7$, assumendo 100 studenti inizialmente presenti e una media di 100 nuovi iscritti all'anno

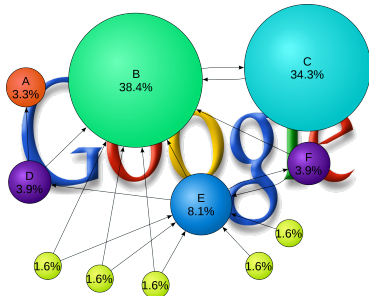


Esempio: PageRank

PageRank: algoritmo per assegnare un peso a ciascuna pagina web che ne quantifica l'importanza relativa
Utile per decidere l'**ordine** (ranking) con cui presentare i risultati di una ricerca

PageRank si basa su

- Modello dinamico per descrivere la navigazione di un utente nel World Wide Web (modello tipo *random walk*)
- Predizione della probabilità asintotica di finire in ciascuna pagina web



Esempio: modelli epidemiologici

Modelli epidemiologici: servono per modellare la diffusione di un virus o altro agente patogeno all'interno di una popolazione

NEWS | IN DEPTH

PANDEMIC Q&A

Fauci's straight talk

To many watching the White House press briefings on the coronavirus pandemic, veteran public health expert Anthony Fauci has become the voice of science and reason on how the country should respond. He made national news this week for his careful but candid assessment to Science's Jon Cohen of the challenges of working for President Donald Trump during the crisis. "When you're dealing with the White House, sometimes you have to say things one, two, three, four times, and then it happens. So, I'm going to keep pushing," says Fauci, longtime director of the National Institute of Allergy and Infectious Diseases. His full interview is at <https://scim.ag/QAFauci>.

Q: The first question everyone has is how are you?

A: Well, I'm sort of exhausted. But other than that, I'm good. I mean, I'm not, to my knowledge, coronavirus infected. To my knowledge, I haven't been fired [laughs].

Q: How are you managing to not get fired?

A: To [Trump's] credit, even though we disagree on some things, he listens. He goes his own way. He has his own style. But on substantive issues, he does listen to what I say.

Q: You've been in press conferences where things are happening that you disagree with, is that fair to say?

A: Well, I don't disagree in the substance. It is expressed in a way that I would not express it, because it could lead to some misunderstanding about what the facts are about a given subject.



Dutch models of COVID-19 are designed to help prevent overloading of hospitals and the need to transfer patients.

CORONAVIRUS

With COVID-19, modeling takes on life and death importance

Epidemic simulations shape national responses

By Martin Enserink and Kai Kupferschmidt

Jacco Wallinga's computer simulations are about to face a high-stakes reality check. Wallinga is a mathematician and the chief epidemic modeler at the National Institute for Public Health and the Environment (RIVM), which is advising the Dutch government on what actions, such as closing schools and businesses, will help control the spread of the novel coronavirus in the country.

depended on their work. Entire cities and countries have been locked down based on hastily done forecasts that often haven't been peer reviewed. "It's a huge responsibility," says epidemiologist Caitlin Rivers of the Johns Hopkins University Center for Health Security, who co-authored a report about the future of outbreak modeling in the United States that her center released this week.

Just how influential those models are became apparent over the past 2 weeks in the United Kingdom. Based partly on modeling

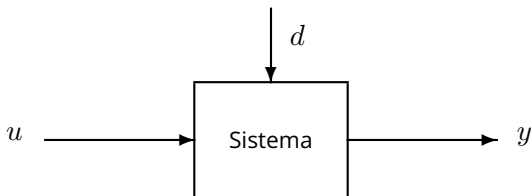
La sfida dell'automatica

- I **sistemi naturali** hanno già al loro interno sistemi di controllo!
Esempio nel corpo umano: regolazione della temperatura corporea, della respirazione, del battito cardiaco, del livello di glucosio nel sangue, il coordinamento viso-motorio, ...
- **Sfida dell'automatica:** conferire forme di **intelligenza** ai sistemi artificiali che li rendano in grado di
 - **funzionare automaticamente**
 - **adattarsi** alle incertezze dell'ambiente esterno come fanno i sistemi naturali

Esempio: controllo del traffico in un router, controllo di assetto di un aeroplano, sistema di guida autonoma, ...

- Alla base del sistema di controllo c'è il concetto di **retroazione** o **feedback**

Ingressi e uscite di un sistema



- Un sistema interagisce con l'ambiente esterno attraverso
 - **Ingressi**: quantità/variabili attraverso cui l'ambiente esterno influenza l'evoluzione del sistema
 - **Uscite**: quantità/variabili che forniscono all'esterno informazioni sull'attuale configurazione del sistema (in figura y)
- Gli ingressi possono essere
 - **Manipolabili**: possono essere opportunamente modificate e quindi rappresentano **variabili di controllo** (in figura u)
 - **Non manipolabili**: non possono essere modificati e quindi rappresentano **disturbi** (in figura d)

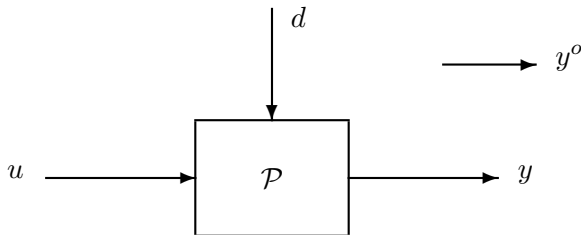
Problema del controllo

Elementi fondamentali del problema di controllo:

- **Sistema da controllare** \mathcal{P} anche detto **processo** o **impianto**
- **Modello matematico** del sistema da controllare
- **Variabili di controllo** u
- **Disturbi** d : possono essere misurabili o non misurabili
- **Variabili di uscita** y misurabili
- **Variabili di riferimento** y^o : definiscono l'andamento desiderato per le uscite del sistema

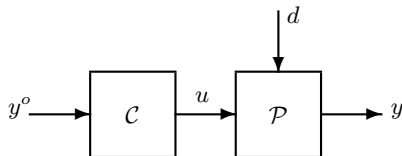
Nota: nell'intelligenza artificiale (es. reinforcement learning) il controllo viene spesso chiamato **azione** o **decisione**.

Formulazione del problema del controllo

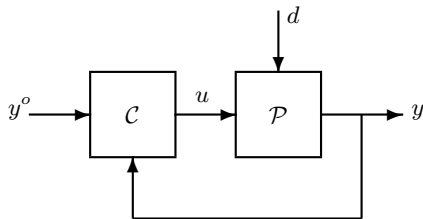


Problema del controllo: determinare il valore da attribuire alla variabile di controllo u in modo tale che l'andamento della variabile controllata di uscita y risulti sufficientemente vicino a quello desiderato y^o , qualunque sia (entro certi limiti) il valore dei disturbi d .

Schemi di controllo

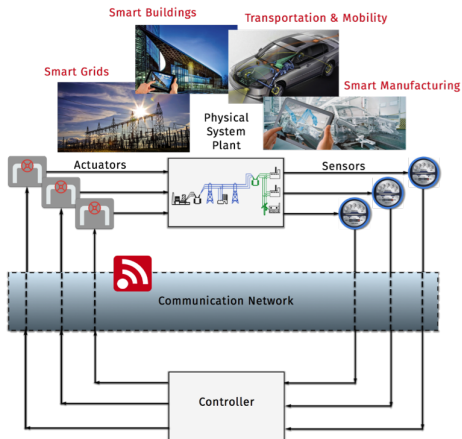


Schema di controllo ad **anello aperto**



Schema di controllo ad **anello chiuso** (in retroazione/feedback)

Controllo in feedback

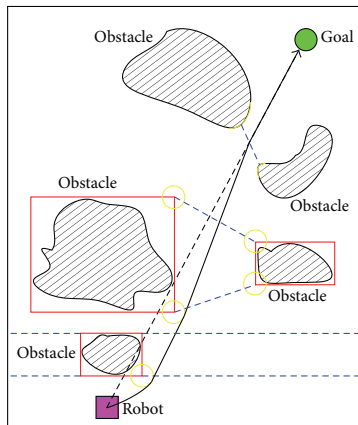


Controllo in feedback: Il sistema di controllo o controllore, sulla base delle informazioni fornite dai sensori, decide in tempo-reale come agire sul sistema per farlo comportare nel modo desiderato.

Esempio: navigazione di un robot mobile

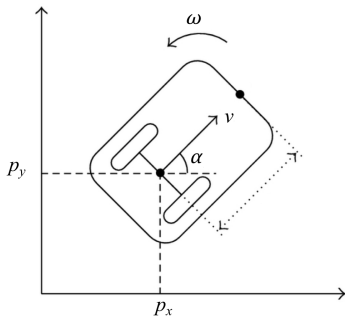
Obiettivo: portare il robot mobile da una configurazione iniziale a una configurazione finale (goal) evitando gli ostacoli

- **Controlli:** segnali di comando da inviare ai motori (es. velocità di avanzamento e velocità angolare)
- **Uscite:** informazioni odometriche (misure dell'angolo di sterzo e delle distanze percorse dalle ruote), GPS, immagini acquisite con telecamere, infrarossi, ecc.



Esempio: navigazione di un robot mobile

- Per descrivere un robot mobile nel piano (moto 2D) un semplice modello è il cosiddetto **uniciclo**



$$\dot{p}_x(t) = v(t) \cos \alpha(t)$$

$$\dot{p}_y(t) = v(t) \sin \alpha(t)$$

$$\dot{\alpha}(t) = \omega(t)$$

(p_x, p_y) posizione

α orientazione

ω velocità angolare

v velocità di avanzamento

- La configurazione del robot è definita da posizione e orientazione (p_x, p_y, α)
- I controlli sono velocità angolare e velocità di avanzamento $u = (\omega, v)$