

Teoria dei Sistemi e Controllo ottimo (TSC)

Docente: Giulia Michieletto

Lez. 0: Introduzione al Corso

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

A.A. 2023-2024

Introduzione al Corso



- ▶ metodo Kipling 5W1H
 - ▷ [who] docente e studenti
 - ▷ [where & when] lezioni e esame
 - ▷ [how] esame e didattica
 - ▷ [what] contenuti e programma
 - ▷ [why] motivazione

Docente - contatti

Giulia Michieletto, PhD

a.k.a *prof. Michieletto*



complesso San Nicola
piano 1, ufficio 330b



complesso Barche
ex-aula F, C-SQUARE Lab



giulia.michieletto@unipd.it

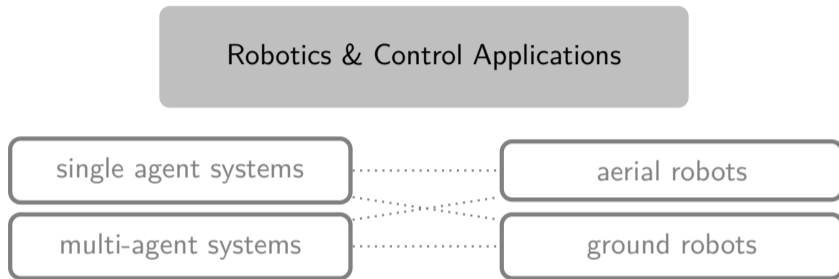
ricevimento dopo lezione
o su appuntamento
(da concordarsi via *mail*)

netiquette

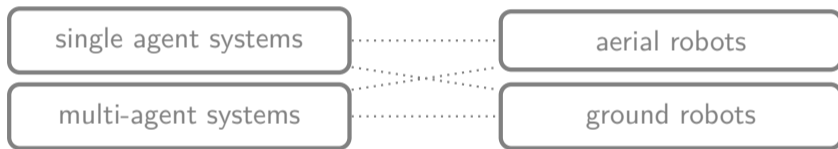
1. usare l'indirizzo email istituzionale
2. in oggetto usare il tag [TSC2324]
3. introdursi in modo appropriato e salutare cortesemente
4. fare richieste sensate e attendere pazientemente la risposta

Docente - ricerca

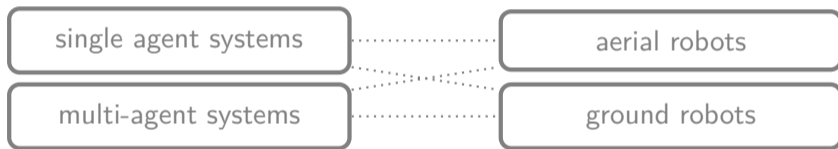
Robotics & Control Applications



Robotics & Control Applications



Robotics & Control Applications



Studenti



Lezioni - calendario



Lunedì	12.30-14.30	Aula VM19
Mercoledì	14.30-16.30	Aula VM16
Giovedì	14.30-16.30	Aula VM15



unordinary lessons

lez. MATLAB&Simulink-based Aula VM13

Lezioni - calendario



Lunedì	12.30-14.30	Aula VM19
Mercoledì	14.30-16.30	Aula VM16
Giovedì	14.30-16.30	Aula VM15



unordinary lessons

lez. MATLAB&Simulink-based Aula VM13

lezioni di teoria



esercitazioni/lab/extra



Lezioni - calendario



Lunedì	12.30-14.30	Aula VM19
Mercoledì	14.30-16.30	Aula VM16
Giovedì	14.30-16.30	Aula VM15



unordinary lessons

lez. MATLAB&Simulink-based Aula VM13

lezioni di teoria



esercitazioni/lab/extra



quarto d'ora accademico?

Lezioni - esercitazioni/laboratori

unordinary lessons: lez. MATLAB&Simulink-based

Lezioni - esercitazioni/laboratori

unordinary lessons: lez. MATLAB&Simulink-based

MATLAB&Simulink?

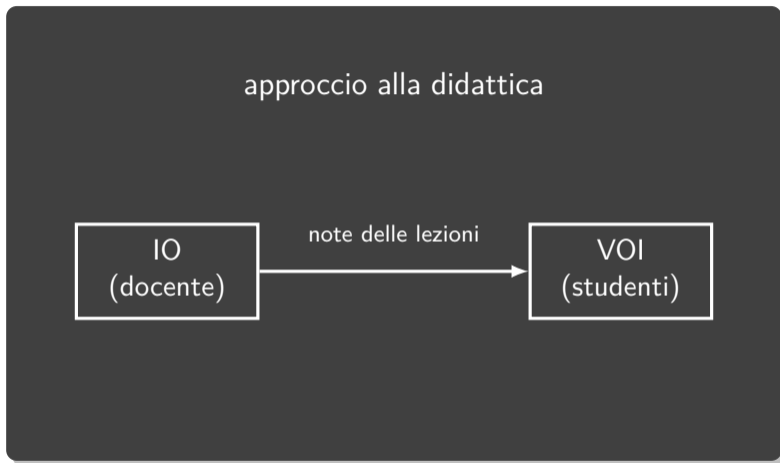
Lezioni - esercitazioni/laboratori

unordinary lessons: lez. MATLAB&Simulink-based

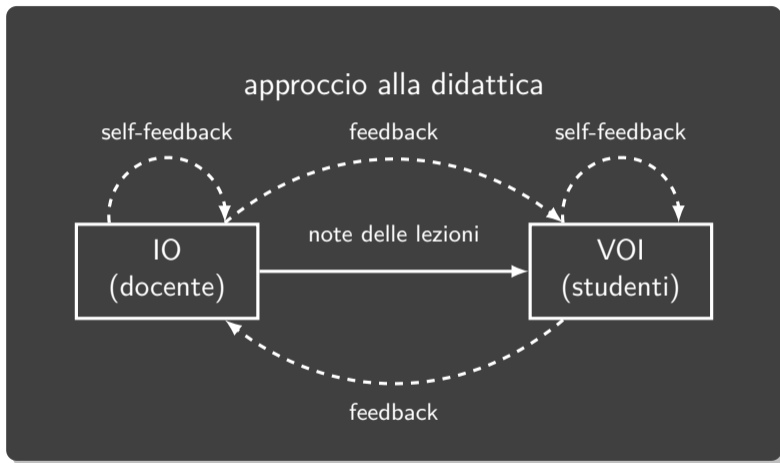
MATLAB&Simulink?

1. Installazione da sito `mathworks`: licenza campus gratuita per studenti UniPD (login con mail istituzionale)
2. Alternativa all'installazione: macchina virtuale Progetto Taliercio 2020

Didattica - approccio



Didattica - approccio



*J. Hattie, H. Timperley. "The power of feedback." *Review of educational research* 77.1 (2007): 81-112.

Didattica - materiale

▶ note delle lezioni

disponibili nella pagina moodle del corso

▶ testi per consultazione

- M. Bisiacco, S. Braghetto. *Teoria dei sistemi dinamici*. Soc. Ed. Esculapio, 2010
- E. Fornasini. *Appunti di teoria dei sistemi*. Ed. Libreria Progetto Padova, 2013
- M. Bisiacco, G. Pillonetto. *Sistemi e modelli*. Soc. Ed. Esculapio, 2017

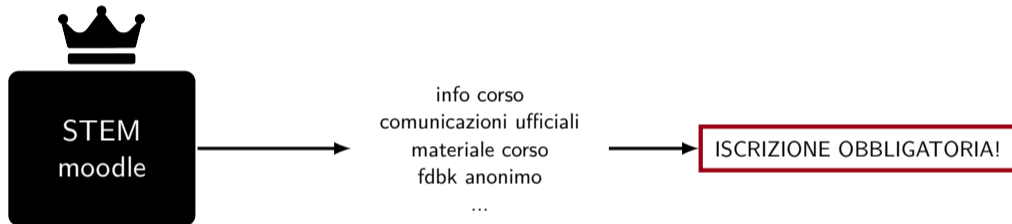
Didattica - materiale

- ▶ note delle lezioni
disponibili nella pagina moodle del corso



- ▶ testi per consultazione
 - M. Bisiacco, S. Braghetto. *Teoria dei sistemi dinamici*. Soc. Ed. Esculapio, 2010
 - E. Fornasini. *Appunti di teoria dei sistemi*. Ed. Libreria Progetto Padova, 2013
 - M. Bisiacco, G. Pillonetto. *Sistemi e modelli*. Soc. Ed. Esculapio, 2017

Didattica: strumenti



Didattica - obiettivi generali

1. sviluppare un approccio analitico alla formulazione e risoluzione di problemi pratici
2. stimolare la curiosità verso la teoria dei sistemi e dei controlli e le sue applicazioni
3. fornire strumenti matematici e computazionali propedeutici al percorso di studi
4. favorire il superamento dell'esame con un buon voto

"Ciò che impari oggi, domani lo saprai. Ciò che non impari oggi, domani non lo saprai."- Proverbio cinese

Esame - modalità

- A.** una prova scritta finale: 4 esercizi + 2 domande [24pt]
due prove in itinere *a sorpresa*: 2 esercizi + 1 domanda [12pt+12pt]
- B.** un homework da consegnare prima della prova scritta finale [8pt]
- C.** una prova orale [4pt]
obbligatoria solo per chi deve registrare l'esame da 12 CFU

▷ homework: breve relazione scritta sul controllo di un sistema dinamico reale, da affrontare utilizzando MATLAB-Simulink e da redigere **individualmente**

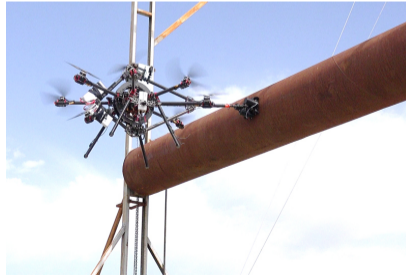
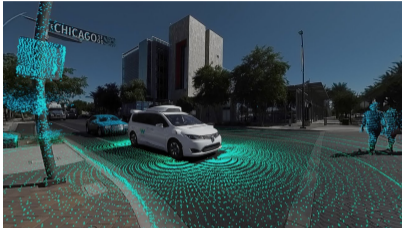
$$\text{voto} = \alpha \frac{32}{36} (\text{pt}_A + \text{pt}_B + \text{pt}_C) + (1 - \alpha)(\text{pt}_A + \text{pt}_B), \quad \alpha \in \{0 = \text{NO orale}, 1 = \text{SI orale}\}$$

arrotondamento naturale e LODE se voto ≥ 30.5

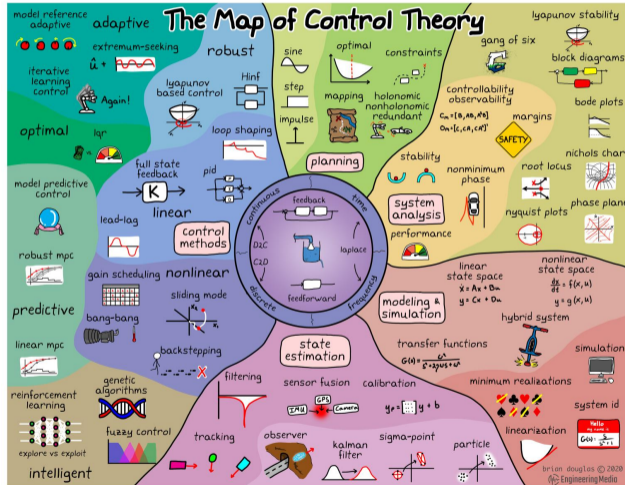
Esame - appelli

- I appello** consegna hw: 24.06.2024 ore 23:59
prova scritta: 27.06.2024 ore 9:00-13:00 aula VM17
- II appello** consegna hw: 15.07.2024 ore 23:59
prova scritta: 18.07.2024 ore 9:00-13:00 aula VM17
- III appello** consegna hw: 26.08.2024 ore 23:59
prova scritta: 29.08.2024 ore 9:00-13:00 aula VM17
- IV/V appello** TBD

Contenuti - control engineering



Contenuti - control theory



Contenuti - panoramica generale

- Modelli, soluzioni, stabilità di sistemi dinamici
- Analisi e regolazione di sistemi dinamici lineari
- Controllo ottimo di sistemi dinamici lineari
- Simulazione di sistemi reali in MATLAB-Simulink

Contenuti - programma indicativo

- Modelli di stato lineari/non-lineari a tempo continuo/discreto
- Soluzioni di sistemi lineari e analisi modale
- Stabilità di sistemi lineari e non-lineari (cenni)

modelli
soluzioni
stabilità

Contenuti - programma indicativo

- Modelli di stato lineari/non-lineari a tempo continuo/discreto
- Soluzioni di sistemi lineari e analisi modale
- Stabilità di sistemi lineari e non-lineari (cenni)

- Raggiungibilità e controllabilità di sistemi lineari
- Problema di regolazione e controllo in retroazione
- Osservabilità e ricostruibilità di sistemi lineari
- Stimatori dello stato e sintesi del regolatore

modelli
soluzioni
stabilità

analisi e
regolazione

Contenuti - programma indicativo

- Modelli di stato lineari/non-lineari a tempo continuo/discreto
- Soluzioni di sistemi lineari e analisi modale
- Stabilità di sistemi lineari e non-lineari (cenni)

- Raggiungibilità e controllabilità di sistemi lineari
- Problema di regolazione e controllo in retroazione
- Osservabilità e ricostruibilità di sistemi lineari
- Stimatori dello stato e sintesi del regolatore

- Controllo ottimo a orizzonte finito/infinito

modelli
soluzioni
stabilità

analisi e
regolazione

controllo
ottimo

Contenuti - programma indicativo

- Modelli di stato lineari/non-lineari a tempo continuo/discreto
- Soluzioni di sistemi lineari e analisi modale
- Stabilità di sistemi lineari e non-lineari (cenni)

modelli
soluzioni
stabilità

- Raggiungibilità e controllabilità di sistemi lineari
- Problema di regolazione e controllo in retroazione
- Osservabilità e ricostruibilità di sistemi lineari
- Stimatori dello stato e sintesi del regolatore

analisi e
regolazione

- Controllo ottimo a orizzonte finito/infinito

controllo
ottimo

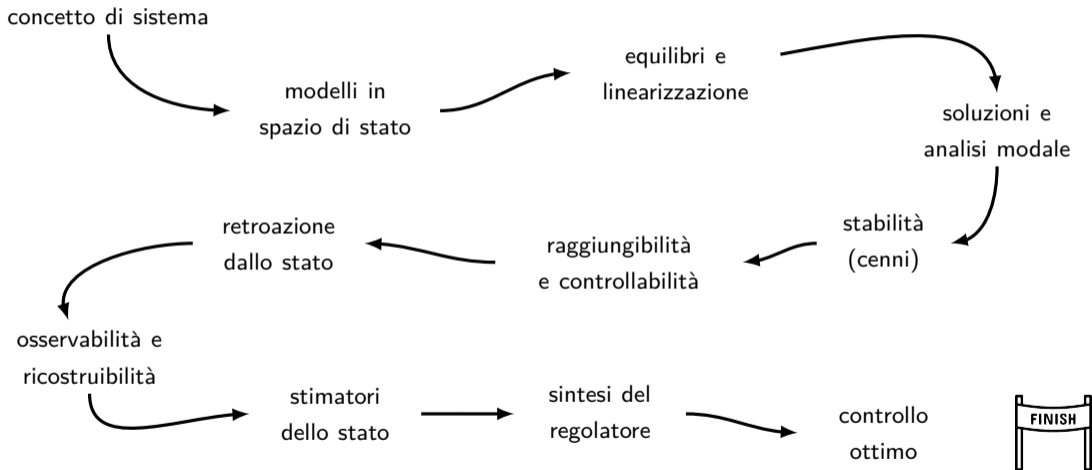
+ simulazione di sistemi reali in MATLAB-Simulink

Contenuti - programma indicativo

- Modelli di stato lineari/non-lineari a tempo continuo/discreto
- Soluzioni di sistemi lineari e analisi modale
- Stabilità di sistemi lineari e non-lineari (cenni)
- Raggiungibilità e controllabilità di sistemi lineari
- Problema di regolazione e controllo in retroazione
- Osservabilità e ricostruibilità di sistemi lineari
- Stimatori dello stato e sintesi del regolatore
- Controllo *ottimo* a orizzonte finito/infinito

modellare e
analizzare
un sistema
al fine di
controllarlo
(*al meglio*)

Contenuti - roadmap



Contenuti - starting point: concetto di sistema

“Nell’ambito scientifico, qualsiasi oggetto di studio che, pur essendo costituito da diversi elementi reciprocamente interconnessi e interagenti tra loro o con l’ambiente esterno, **reagisce o evolve** come un tutto, con proprie **leggi generali.**” [Treccani]

Contenuti - starting point: concetto di sistema

“Nell’ambito scientifico, qualsiasi oggetto di studio che, pur essendo costituito da diversi elementi reciprocamente interconnessi e interagenti tra loro o con l’ambiente esterno, **reagisce o evolve** come un tutto, con proprie **leggi generali.**”



dinamica

[Treccani]



matematica

Contenuti - starting point: concetto di sistema

“Nell’ambito scientifico, qualsiasi oggetto di studio che, pur essendo costituito da diversi elementi reciprocamente interconnessi e interagenti tra loro o con l’ambiente esterno, **reagisce o evolve** come un tutto, con proprie **leggi generali.**”

↓
dinamica

[Treccani]
↓
matematica

Teoria (Matematica) dei Sistemi (Dinamici):

analisi e controllo di **sistemi dinamici** descritti da **modelli matematici**

Contenuti - starting point: concetto di sistema

“Nell’ambito scientifico, qualsiasi oggetto di studio che, pur essendo costituito da diversi elementi reciprocamente interconnessi e interagenti tra loro o con l’ambiente esterno, **reagisce o evolve** come un tutto, con proprie **leggi generali.**”

[Treccani]

↓
dinamica

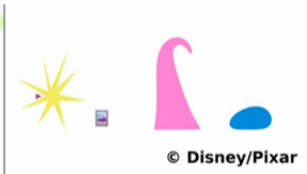
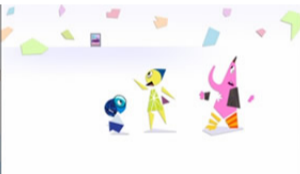
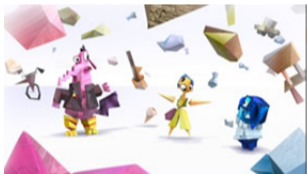
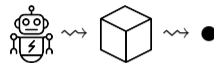
↓
matematica

Teoria (Matematica) dei Sistemi (Dinamici):

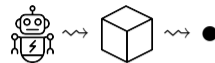
analisi e controllo di **sistemi dinamici** descritti da **modelli matematici**

systema = modello matematico

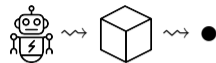
Contenuti - dal sistema al modello matematico



Contenuti - dal sistema al modello matematico

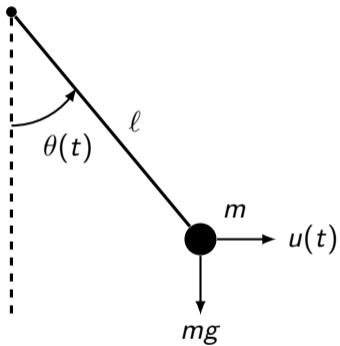


Contenuti - dal sistema al modello matematico

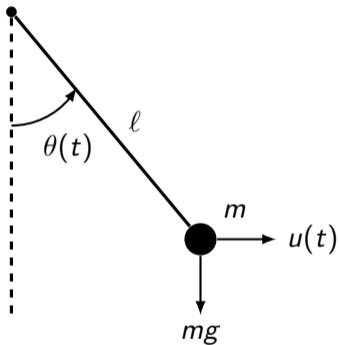


- ▶ **approcci model-based** che sfruttano leggi fisiche e relazioni causa-effetto
- ▶ **approcci data-driven** che sfruttano dati sperimentali, osservazioni e misure

Contenuti - esempio semplice di sistema

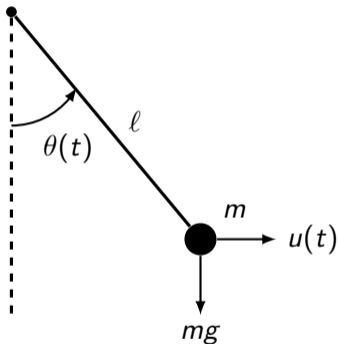


Contenuti - esempio semplice di sistema



$$m\ell^2 \ddot{\theta}(t) = -mg\ell \sin \theta(t) + u(t)\ell \cos \theta(t)$$

Contenuti - esempio semplice di sistema



$$m\ell^2 \ddot{\theta}(t) = -mg\ell \sin \theta(t) + u(t)\ell \cos \theta(t)$$

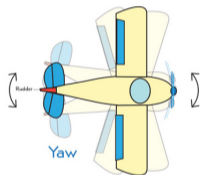
- per $u(t) = 0$ dove si va a posizionare il pendolo?
- come scegliere $u(t)$ per posizionare il pendolo ad un angolo desiderato θ^* ?

Contenuti - esempio di sistema più complesso



$\theta_1 =$ angolo rollio

$\alpha_1 =$ incl. alettone



$\theta_2 =$ angolo imbardata

$\alpha_2 =$ incl. timone



$\theta_3 =$ angolo beccheggio

$\alpha_3 =$ incl. equilibratore

\mathbf{x} = posizione centro di massa dell'aereo

θ = orientamento dell'aereo

α = angoli delle superfici di controllo

\mathbf{u} = spinta propulsiva

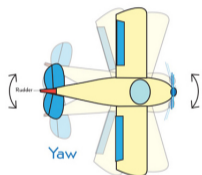
[Image credits: howthingsfly.si.edu]

Contenuti - esempio di sistema più complesso



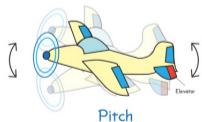
$\theta_1 =$ angolo rollio

$\alpha_1 =$ incl. alettone



$\theta_2 =$ angolo imbardata

$\alpha_2 =$ incl. timone



$\theta_3 =$ angolo beccheggio

$\alpha_3 =$ incl. equilibratore

\mathbf{x} = posizione centro di massa dell'aereo

θ = orientamento dell'aereo

α = angoli delle superfici di controllo

\mathbf{u} = spinta propulsiva

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{x}} &= f_1(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \theta, \dot{\theta}, \alpha, \mathbf{u}) \\ \ddot{\theta} &= f_2(\theta, \dot{\theta}, \alpha, \mathbf{u})\end{aligned}$$

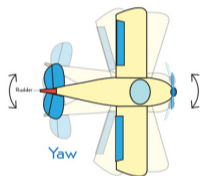
[Image credits: howthingsfly.si.edu]

Contenuti - esempio di sistema più complesso



$\theta_1 =$ angolo rollio

$\alpha_1 =$ incl. alettone



$\theta_2 =$ angolo imbardata

$\alpha_2 =$ incl. timone



$\theta_3 =$ angolo beccheggio

$\alpha_3 =$ incl. equilibratore

[Image credits: howthingsfly.si.edu]

\mathbf{x} = posizione centro di massa dell'aereo

$\boldsymbol{\theta}$ = orientamento dell'aereo

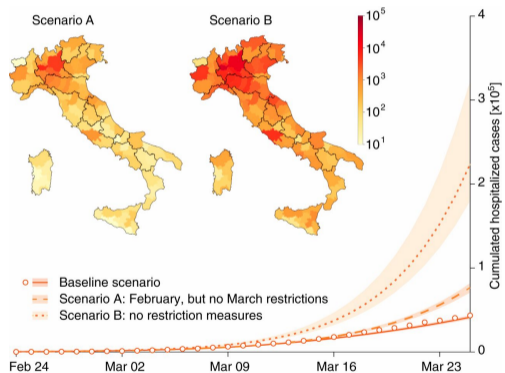
$\boldsymbol{\alpha}$ = angoli delle superfici di controllo

\mathbf{u} = spinta propulsiva

$$\begin{aligned}\ddot{\mathbf{x}} &= f_1(\mathbf{x}, \dot{\mathbf{x}}, \boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u}) \\ \ddot{\boldsymbol{\theta}} &= f_2(\boldsymbol{\theta}, \dot{\boldsymbol{\theta}}, \boldsymbol{\alpha}, \mathbf{u})\end{aligned}$$

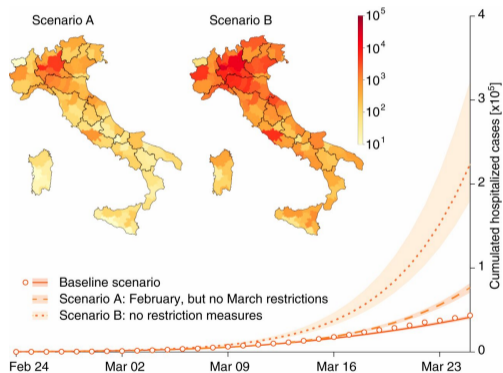
- per $\mathbf{u} = \text{cost.}$ e $\boldsymbol{\alpha} = 0$ quando si ha moto rettilineo uniforme ($\ddot{\mathbf{x}} = 0, \ddot{\boldsymbol{\theta}} = 0$)?
- con moto rettilineo uniforme come scegliere $\boldsymbol{\alpha}$ per mantenere il volo "stabile"?

Contenuti - esempio di sistema molto “popolare” negli ultimi anni

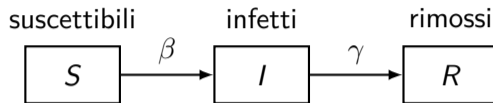


[Image credits: PNAS 117 (19) 10484-10491]

Contenuti - esempio di sistema molto “popolare” negli ultimi anni

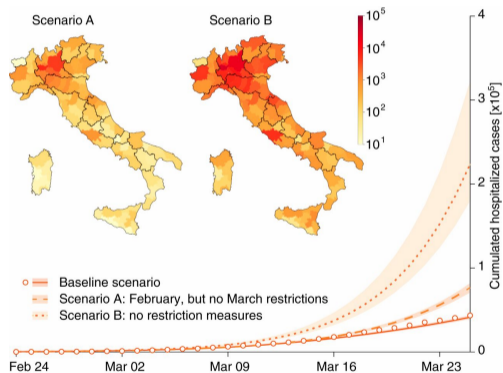


[Image credits: PNAS 117 (19) 10484-10491]

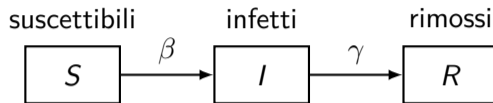


$$\dot{S} = -\beta SI, \quad \dot{I} = \beta SI - \gamma I, \quad \dot{R} = \gamma I$$

Contenuti - esempio di sistema molto “popolare” negli ultimi anni



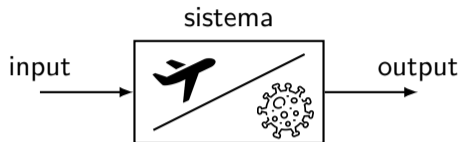
[Image credits: PNAS 117 (19) 10484-10491]



$$\dot{S} = -\beta SI, \quad \dot{I} = \beta SI - \gamma I, \quad \dot{R} = \gamma I$$

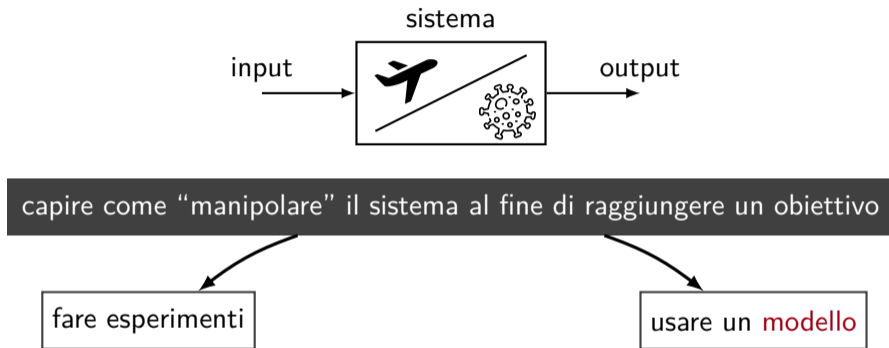
- come evitare lo scoppio di un'epidemia?
- come limitare gli effetti di un'epidemia?
- come distribuire i vaccini?

Motivazione - teoria dei sistemi

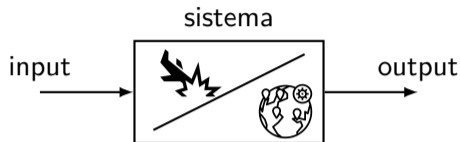


capire come “manipolare” il sistema al fine di raggiungere un obiettivo

Motivazione - teoria dei sistemi



Motivazione - teoria dei sistemi



capire come “manipolare” il sistema al fine di raggiungere un obiettivo

fare esperimenti

usare un **modello**

- *costoso*
- spesso *pericoloso*
- a volte *impossibile!*

Motivazione - teoria dei sistemi



capire come “manipolare” il sistema al fine di raggiungere un obiettivo

fare esperimenti

- *costoso*
- spesso *pericoloso*
- a volte *impossibile!*

usare un **modello**

- *simulare* il sistema
- *analizzare* il sistema
- *controllare il sistema*

*minor
costi e rischi!*

Motivazione - teoria dei sistemi

attenzione però a fidarsi ciecamente di un modello !!



“All models are wrong,
but some are useful.”

– George Box

Motivazione - controllo ottimo



capire come "manipolare" il sistema al fine di raggiungere un obiettivo

usare un **modello**

- *simulare* il sistema
- *analizzare* il sistema
- *controllare il sistema*

Motivazione - controllo ottimo



capire come "manipolare" il sistema al fine di raggiungere un obiettivo

controllo classico (Ctrl Aut)

$C(s)$ - controllore PID progettato in frequenza per assicurare prestazioni del sistema in cc

▽ soluzione applicabile ai **solli sistemi SISO**

usare un **modello**

- *simulare* il sistema
- *analizzare* il sistema
- *controllare il sistema*

Motivazione - teoria dei sistemi

controllo ottimo: soluzione applicabile ai sistemi MIMO



“The curse of dimensionality
has been broken.”

– Richard Bellman

Domande?

Teoria dei Sistemi e Controllo ottimo (TSC)

Docente: Giulia Michieletto

Lez. 0: Introduzione al Corso

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

A.A. 2023-2024

✉ `giulia.michieletto@unipd.it`