Teoria dei Sistemi e Controllo Ottimo e Adattativo (C. I.)
Teoria dei Sistemi (Mod. A)

Docente: Giacomo Baggio

Lez. 2: Sistemi in spazio di stato

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

A.A. 2021-2022

noi siamo qui

concetto di sistema

sistemi in spazio di stato

equilibri e linearizzazione

soluzioni e analisi modale

stabilità (cenni)

raggiungibilità e controllabilità

retroazione dallo stato

osservabilità e ricostruibilità

stimatori dello stato

sintesi del regolatore

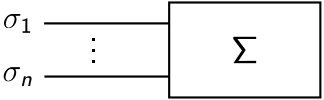
FINISH

In questa lezione

- ▷ Classificazione di sistemi
- ▷ Rappresentazione di sistemi
- ▷ Sistemi lineari in spazio di stato
- ▷ Sistemi in spazio di stato in Matlab®

Sistema

Definizione: Un qualsiasi oggetto fisico o artificiale il cui comportamento (evoluzione nel tempo) è descritto da un insieme di variabili tipicamente interagenti tra di loro.

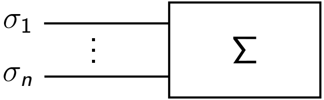


$\sigma_1, \sigma_2 \ldots, \sigma_n$ variabili descrittive d'interesse

Esempio: $\Sigma =$ appartamento, $\sigma_1 =$ temp. cucina, $\sigma_2 =$ temp. soggiorno, ...

Sistema

Definizione: Un qualsiasi oggetto fisico o artificiale il cui comportamento (evoluzione nel tempo) è descritto da un insieme di variabili tipicamente interagenti tra di loro.

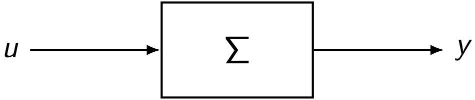


$\sigma_1, \sigma_2 \ldots, \sigma_n$ variabili descrittive d'interesse

$$\boxed{\Sigma = \text{Modello matematico che descrive l'evoluzione di } \sigma_1, \sigma_2 \ldots, \sigma_n}$$

Sistema

Definizione: Un qualsiasi oggetto fisico o artificiale il cui comportamento (evoluzione nel tempo) è descritto da un insieme di variabili tipicamente interagenti tra di loro.



In molti casi in $\sigma_1, \sigma_2 \ldots, \sigma_n$ si possono distinguere variabili di:

ingresso/input u (causa)

uscita/output y (effetto)

Esempio: automobile: $u =$ pedale acc. / sterzo, $y =$ posizione / velocità veicolo
motore elettrico: $u =$ tensione / corrente armatura, $y =$ posizione / velocità rotore

Perché studiare Σ e le sue proprietà?

Capire il funzionamento di Σ per poi **controllarlo**!

N.B. La Matematica sembra essere il linguaggio “naturale” per descrivere fenomeni fisici e ingegneristici

Classificazione dei sistemi

Σ

Deterministico: comportamento di Σ descritto da leggi deterministiche

Stocastico: comportamento di Σ descritto da leggi probabilistiche

Classificazione dei sistemi

Σ

Dinamico: valore assunto dalle variabili $\sigma_1, \ldots, \sigma_n$ ad un certo istante temporale t dipende dall'evoluzione delle stesse in determinati intervalli

Statico: valore assunto dalle variabili $\sigma_1, \ldots, \sigma_n$ ad un certo istante temporale t dipende solo dal valore assunto dalle stesse in t

Classificazione dei sistemi

Σ

dinamico

Causale: valore assunto da alcune variabili d'interesse (y) al tempo t dipende dal valore delle stesse e/o di altri variabili (u) in tempi $\leq t$

Non causale: $y(t)$ può dipendere da $y(s)$, $u(s)$, per $s > t$

Classificazione dei sistemi

Σ

Tempo invariante: legge che lega variabili di interesse indipendente da t

Tempo variante: legge che lega variabili di interesse dipendente da t

Classificazione dei sistemi

Σ

- **Lineare:** legge che lega variabili di interesse di tipo lineare
- **Non lineare:** legge che lega variabili di interesse non di tipo lineare

Classificazione dei sistemi

Σ

Tempo continuo: variabile temporale $t \in \mathbb{R}$

Tempo discreto: variabile temporale $t \in \mathbb{Z}$

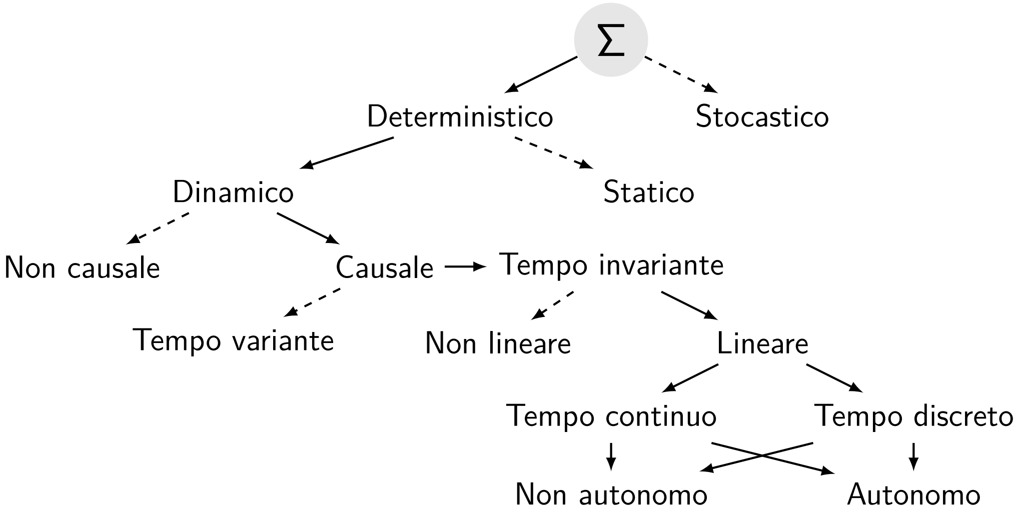
Classificazione dei sistemi

Σ

Autonomo: non ci sono ingressi ($u = 0$)

Non autonomo: ci sono ingressi ($u \neq 0$)

Classificazione dei sistemi



Rappresentazione esterna o I/O

$$u(t) \longrightarrow \boxed{\;\Sigma\;} \longrightarrow y(t)$$

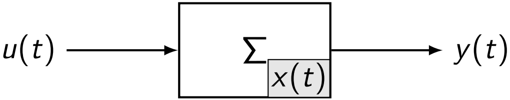
Tempo continuo: $h\left(y^{(n)}, \dots, \dot{y}(t), y(t), u^{(m)}(t), \dots, \dot{u}(t), u(t), t\right) = 0 + \text{c.i.}$

Σ lineare tempo invariante: F.d.T. (Laplace) $W(s) = Y(s)/U(s)$

Tempo discreto: $h\,(y(t-t_n), \dots, y(t-1), y(t), u(t-t_m), \dots, u(t-1), u(t), t) = 0 + \text{c.i.}$

Σ lineare tempo invariante: F.d.T. (Zeta) $W(z) = Y(z)/U(z)$

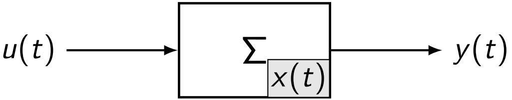
Rappresentazione interna o di stato



$$x(t) = \text{(vettore di) variabili di stato} \qquad \text{(memoria interna!)}$$

Proprietà di separazione: $x(t)$ fornisce tutta l'informazione sulla storia passata di Σ necessaria per valutare $x(t)$ e $y(t)$ ad istanti futuri (una volta noto $u(t)$).

Rappresentazione interna o di stato



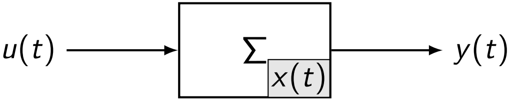
$x(t) =$ (vettore di) variabili di stato (memoria interna!)

Tempo continuo:
$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= f(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= h(x(t), u(t), t) \end{aligned} \qquad x(t_0) = x_0$$

f = mappa di transizione di stato

h = mappa di uscita

Rappresentazione interna o di stato

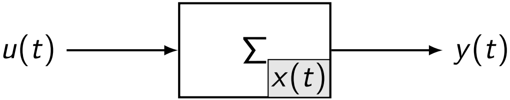


$x(t) =$ (vettore di) variabili di stato (memoria interna!)

Tempo discreto:
$$\begin{aligned} x(t+1) &= f(x(t), u(t), t) \\ y(t) &= h(x(t), u(t), t) \end{aligned} \qquad x(t_0) = x_0$$

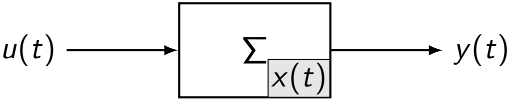
f = mappa di transizione di stato $\qquad$ h = mappa di uscita

Sistemi lineari tempo-invarianti (LTI) in spazio di stato



Σ lineare e tempo invariante $\qquad x(t) \in \mathbb{R}^n$, $u(t) \in \mathbb{R}^m$, $y(t) \in \mathbb{R}^p$

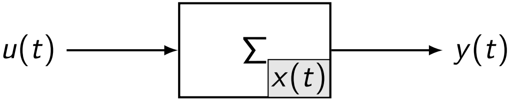
Sistemi LTI in spazio di stato



Σ lineare e tempo invariante $\qquad x(t) \in \mathbb{R}^n,\ u(t) \in \mathbb{R}^m,\ y(t) \in \mathbb{R}^p$

Tempo continuo: $\quad \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Fx(t) + Gu(t) \\ y(t) &= Hx(t) + Ju(t) \end{aligned} \qquad x(t_0) = x_0$

Sistemi LTI in spazio di stato

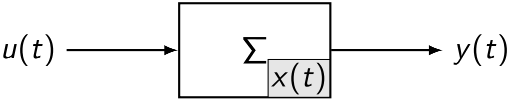


Σ lineare e tempo invariante $\qquad x(t) \in \mathbb{R}^n,\ u(t) \in \mathbb{R}^m,\ y(t) \in \mathbb{R}^p$

Tempo discreto:

$$\begin{aligned} x(t+1) &= Fx(t) + Gu(t) \\ y(t) &= Hx(t) + Ju(t) \end{aligned} \qquad x(t_0) = x_0$$

Sistemi LTI in spazio di stato



Σ lineare e tempo invariante $\qquad x(t) \in \mathbb{R}^n,\ u(t) \in \mathbb{R}^m,\ y(t) \in \mathbb{R}^p$

Sovrapposizione degli effetti

x', y' = stato, uscita di Σ con stato iniziale x_0' e ingresso u'

x'', y'' = stato, uscita di Σ con stato iniziale x_0'' e ingresso u''

$$\boxed{x_0 = \alpha_1 x_0' + \alpha_2 x_0'',\ u = \alpha_1 u' + \alpha_2 u'' \implies x = \alpha_1 x' + \alpha_2 x'',\ y = \alpha_1 y' + \alpha_2 y''}$$

Perché lo spazio di stato?

- Rappresentazione “naturale” per molti sistemi fisici (meccanici/elettrici)
- Si lavora direttamente nel dominio temporale evitando trasformate/antitrasformate
- Si gestiscono più facilmente sistemi MIMO (multi-input multi-output)
- Problemi di analisi e controllo diventano più facili da un punto di vista numerico
- La teoria dei controlli “moderna” si basa sullo spazio di stato

Comandi Matlab® – Control System Toolbox

`sys = tf(num,den)`	crea oggetto sistema LTI a tempo continuo descritto da FdT con numeratore `num` e denominatore `den` (**N.B.** `num`/`den` contengono coefficienti dei polinomi a num./den. ordinati per potenze decrescenti);
`sys = tf(num,den,Ts)`	crea oggetto sistema LTI a tempo discreto descritto da FdT con numeratore `num` e denominatore `den` e tempo di campionamento `Ts`;
`[num,den,Ts] = tfdata(sys)`	estrae numeratore e denominatore (e tempo di camp. `Ts` se a tempo discreto) della FdT che descrive sistema LTI `sys`;

Comandi Matlab® – Control System Toolbox

`sys = ss(F,G,H,J)`	crea oggetto sistema LTI in spazio di stato a tempo continuo;
`sys = ss(F,G,H,J,Ts)`	crea oggetto sistema in spazio di stato a tempo discreto con tempo di campionamento `Ts` (**N.B.** mettere `Ts=-1` per lasciare non specificato il tempo di campionamento);
`[F,G,H,J,Ts] = ssdata(sys)`	estrae matrici di stato (e tempo di camp. `Ts`, se a tempo discreto) da sistema LTI `sys`;

N.B. `tf` e `ss` possono essere anche usati per convertire un sistema LTI `sys` da rappresentazione in spazio di stato a FdT, e viceversa.