

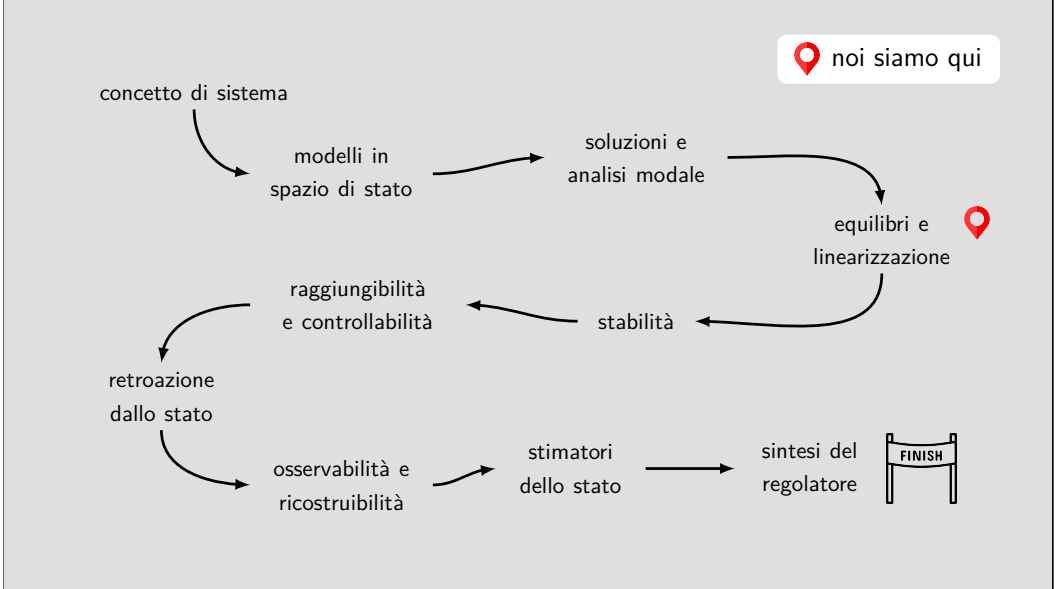
Teoria dei Sistemi e Controllo Ottimo e Adattativo (C. I.)
Teoria dei Sistemi (Mod. A)

Docente: Giacomo Baggio

Lez. 9: Equilibri e stabilità

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica

A.A. 2020-2021



In questa lezione

- ▷ Traiettorie di stato di un sistema
- ▷ Punti di equilibrio di un sistema (con e senza ingressi)
- ▷ Stabilità semplice e asintotica di un equilibrio
- ▷ Linearizzazione di sistemi non lineari

Traiettorie di stato e ritratto di fase

$$\dot{x}(t) = f(x(t)), t \in \mathbb{R}_+ \quad (\text{t.c.})$$

$$x(t+1) = f(x(t)), t \in \mathbb{Z}_+ \quad (\text{t.d.})$$

Traiettoria di stato del sistema relativa a c.i. $x(0) = x_0$: $\{x(t) \in \mathbb{R}^n, t \geq 0\}$

Ritratto di fase del sistema = insieme delle traiettorie di stato $\forall x_0 \in \mathbb{R}^n$

Traiettorie di stato e ritratto di fase di sistemi lineari: $n = 2$

$$\dot{x}(t) = Fx(t), t \in \mathbb{R}_+ \quad (\text{t.c.})$$

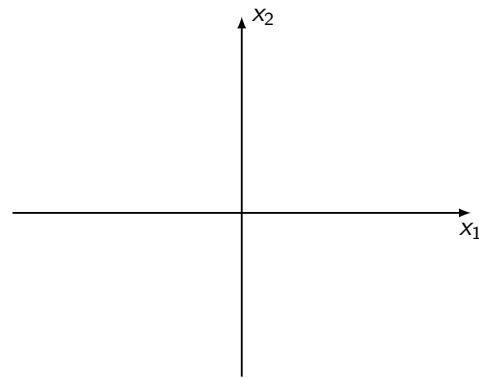
$$x(t+1) = Fx(t), t \in \mathbb{Z}_+ \quad (\text{t.d.})$$

$F \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, autovalori λ_1, λ_2

$$x(t) = e^{Ft} x_0 \quad (\text{t.c.})$$

$$x(t) = F^t x_0 \quad (\text{t.d.})$$

$\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{R}, \lambda_1 > 0 > \lambda_2$



Traiettorie di stato e ritratto di fase di sistemi lineari: $n = 2$

$$\dot{x}(t) = Fx(t), t \in \mathbb{R}_+ \quad (\text{t.c.})$$

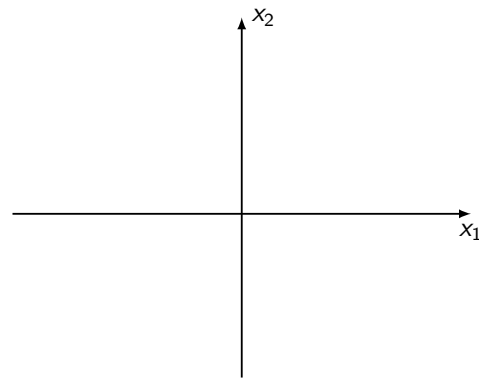
$$x(t+1) = Fx(t), t \in \mathbb{Z}_+ \quad (\text{t.d.})$$

$F \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, autovalori λ_1, λ_2

$$x(t) = e^{Ft} x_0 \quad (\text{t.c.})$$

$$x(t) = F^t x_0 \quad (\text{t.d.})$$

$\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$ (complessi coniugati)



Traiettorie di stato e ritratto di fase di sistemi lineari: $n = 2$

$$\dot{x}(t) = Fx(t), t \in \mathbb{R}_+ \quad (\text{t.c.})$$

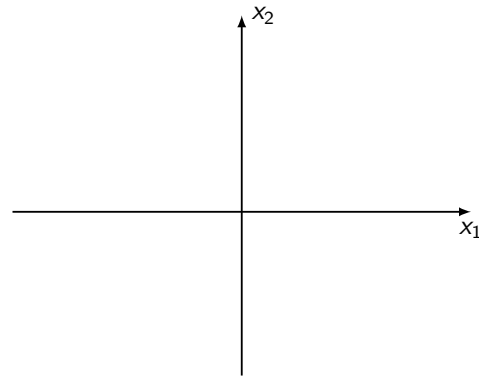
$$x(t+1) = Fx(t), t \in \mathbb{Z}_+ \quad (\text{t.d.})$$

$F \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$, autovalori λ_1, λ_2

$$x(t) = e^{Ft}x_0 \quad (\text{t.c.})$$

$$x(t) = F^t x_0 \quad (\text{t.d.})$$

$\lambda_1, \lambda_2 \in \mathbb{C}$ (complessi coniugati)



Traiettorie di stato e ritratto di fase di sistemi lineari: n generico

$F \in \mathbb{R}^{n \times n}$, autovalori $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$

$$\dot{x}(t) = Fx(t), t \in \mathbb{R}_+ \quad (\text{t.c.}) \quad x(t) = e^{Ft}x_0$$

$$x(t+1) = Fx(t), t \in \mathbb{Z}_+ \quad (\text{t.d.}) \quad x(t) = F^t x_0$$

Fatto generale: Una traiettoria $x(t)$ giace su una retta passante per l'origine se e solo se $x_0 \in \mathbb{R}^n$ è autovettore di F relativo ad un autovalore reale.

Stabilità semplice e asintotica: osservazioni

1. Le definizioni di stabilità semplice/asintotica hanno carattere **locale**. Se le condizioni valgono per ogni $x_0 \in \mathbb{R}^n$ allora si ha stabilità semplice/asintotica **globale**.
2. Per sistemi lineari si può parlare di **stabilità del sistema** invece che del punto di equilibrio. Infatti, con un cambio di variabile, si può portare l'equilibrio in $\bar{x} = 0$.
3. Per sistemi lineari **stabilità locale = stabilità globale**. Inoltre:

$$\begin{array}{lll} \text{stabilità semplice} & \iff & \begin{array}{ll} e^{Ft} \text{ limitata} & \text{(t.c.)} \\ F^t \text{ limitata} & \text{(t.d.)} \end{array} \\ \text{stabilità asintotica} & \iff & \begin{array}{ll} e^{Ft} \text{ convergente} & \text{(t.c.)} \\ F^t \text{ convergente} & \text{(t.d.)} \end{array} \end{array}$$

Linearizzazione attorno ad un equilibrio

$\dot{x} = f(x)$, $t \in \mathbb{R}_+$ sistema scalare, $\bar{x} \in \mathbb{R}$ punto di equilibrio

$$\begin{aligned} f(x) &= f(\bar{x}) + \frac{d}{dx} f(\bar{x})(x - \bar{x}) + \frac{1}{2} \frac{d^2}{dx^2} f(\bar{x})(x - \bar{x})^2 + \dots \\ &\approx f(\bar{x}) + \frac{d}{dx} f(\bar{x})(x - \bar{x}) \end{aligned}$$

Sistema linearizzato attorno a \bar{x} :

$$\dot{z} = \frac{d}{dx} f(\bar{x}) z, \quad z \triangleq x - \bar{x}$$

Linearizzazione attorno ad un equilibrio

$$\dot{x} = f(x) = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ \vdots \\ f_n(x) \end{bmatrix}, \quad t \in \mathbb{R}_+ \quad \text{sistema } n\text{-dim.}, \quad \bar{x} \in \mathbb{R}^n \text{ punto di equilibrio}$$

Jacobiano di f valutato in x

$$f(x) = f(\bar{x}) + J_f(\bar{x})(x - \bar{x}) + \dots, \quad J_f(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1(x)}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2(x)}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n(x)}{\partial x_n} \end{bmatrix}$$

Sistema linearizzato attorno a \bar{x} :

$$\dot{z} = J_f(\bar{x})z, \quad z \triangleq x - \bar{x}$$

Linearizzazione attorno ad un equilibrio: esempi

$$1. \quad \begin{cases} \dot{x} = \sin x \\ \bar{x} = 0 \\ \bar{x} = \pi \end{cases} \quad \implies \quad \begin{cases} \dot{x} = x \\ \dot{z} = -z, \quad z \triangleq x - \pi \end{cases}$$

$$2. \quad \dot{x} = \alpha x^3, \quad \alpha \in \mathbb{R}, \quad \bar{x} = 0 \quad \implies \quad \dot{x} = 0$$

$$3. \quad \begin{cases} \dot{x}_1 = -x_2 + x_1 x_2^2 \\ \dot{x}_2 = x_1 + x_2^5 \end{cases} \quad \begin{bmatrix} \bar{x}_1 \\ \bar{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \implies \quad \dot{x} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} x$$