

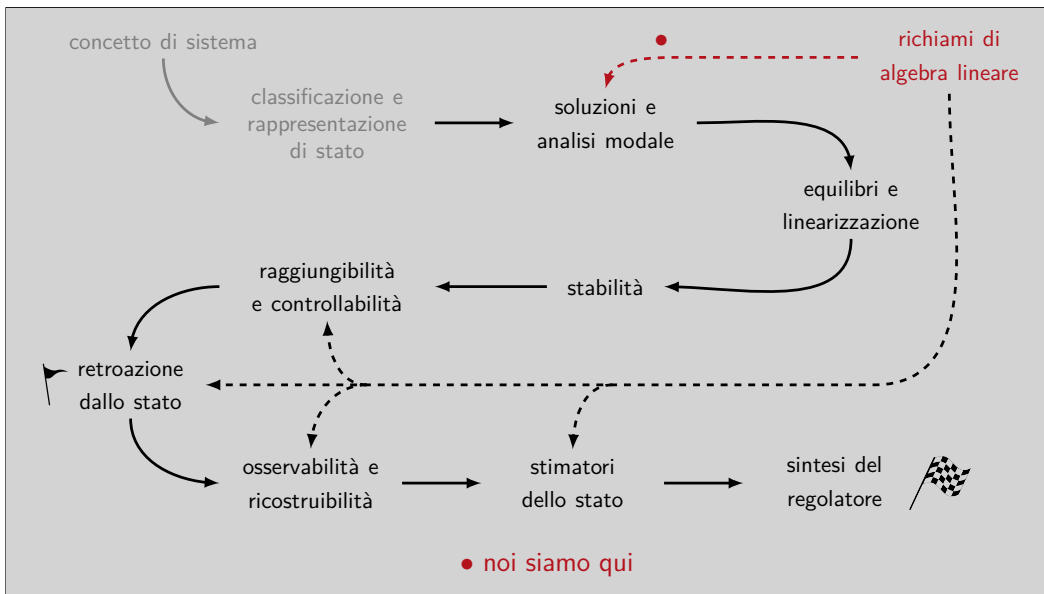
Teoria dei Sistemi e Controllo Ottimo e Adattativo (C. I.)

Teoria dei Sistemi (Mod. A)

Docente: Giacomo Baggio

Lez. 5: Forma di Jordan e Polinomio Minimo

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccatronica
A.A. 2019-2020



Nelle scorse lezioni

- ▷ Motivazione: soluzioni di un sistema autonomo
- ▷ Calcolo dell'esponenziale di matrice: metodo diretto
- ▷ Concetti base di algebra lineare
- ▷ Calcolo dell'esponenziale di matrice: diagonalizzazione
- ▷ Forma canonica di Jordan: idea generale

In questa lezione

- ▷ Forma canonica di Jordan: costruzione
- ▷ Forma canonica di Jordan: algoritmo generale
- ▷ Forma canonica di Jordan: osservazioni
- ▷ Polinomi annullatori e polinomio minimo

Forma di Jordan: idea generale

$F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ con autovalori $\{\lambda_i\}_{i=1}^\ell$

$\nu_i =$ molteplicità algebrica λ_i

$g_i =$ molteplicità geometrica λ_i

Caso 1: $\nu_i = g_i$ per ogni $i \implies F$ diagonalizzabile ✓

Caso 2: Esiste i tale che $\nu_i > g_i \implies F$ non diagonalizzabile ✗

↓

Non esistono ν_i vettori lin. indep. in $\ker(F - \lambda_i)$

Però possiamo aggiungere agli autovettori di λ_i altri $\nu_i - g_i$ vettori lin. indep. in modo da formare ν_i vettori lin. indep.!

Tante scelte possibili, ma ne esiste una "furba"...

Fatto importante

$\ker(F - \lambda_i I)^\ell \subseteq \ker(F - \lambda_i I)^{\ell+1}$, per ogni $\ell = 1, 2, 3, \dots$

ed esiste $\bar{\ell}$ tale che $\dim \ker(F - \lambda_i I)^{\bar{\ell}} = \nu_i$

Forma di Jordan: costruzione

$F \in \mathbb{R}^{10 \times 10}$ con 1 autovalore λ_1 con $\nu_1 = 10$ e $g_1 = 5$

$\dim \ker(F - \lambda_1 I) = 5$ v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 autovettori lin. indep.

$\dim \ker(F - \lambda_1 I)^2 = 8$ v_6, v_7, v_8

$\dim \ker(F - \lambda_1 I)^3 = 9$ v_9 autovettori generalizzati

$\dim \ker(F - \lambda_1 I)^4 = 10$ v_{10}

$\{v_1, \dots, v_{10}\}$ base di \mathbb{R}^{10}

Forma di Jordan: costruzione

$v_{10} : (F - \lambda_1 I)^4 v_{10} = 0, (F - \lambda_1 I)^3 v_{10} \neq 0$

$\omega_9 \triangleq (F - \lambda_1 I) v_{10} : (F - \lambda_1 I)^3 \omega_9 = 0, (F - \lambda_1 I)^2 \omega_9 \neq 0$

$v_9 \leftarrow \omega_9$

$\omega_8 \triangleq (F - \lambda_1 I) \omega_9 : (F - \lambda_1 I)^2 \omega_8 = 0, (F - \lambda_1 I) \omega_8 \neq 0$

$v_8 \leftarrow \omega_8$

$\omega_5 \triangleq (F - \lambda_1 I) \omega_8 : (F - \lambda_1 I) \omega_5 = 0$

catena di autovettori generalizzati
 $\mathcal{C}_1 = [\omega_5, \omega_8, \omega_9, v_{10}]$

$v_5 \leftarrow \omega_5$

Forma di Jordan: costruzione

$$\mathcal{C}_1 = [\omega_5, \omega_8, \omega_9, v_{10}]$$

$$\mathcal{C}_2 = [\omega_4, v_6]$$

$$\mathcal{C}_3 = [\omega_3, v_7]$$

$$\mathcal{C}_4 = v_2$$

$$\mathcal{C}_5 = v_1$$

matrice di cambio base

$$T = [\mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3, \mathcal{C}_4, \mathcal{C}_5]$$

$$\text{oppure } T = [\mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3, \mathcal{C}_5, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_1]$$

$$\text{oppure } T = [\mathcal{C}_5, \mathcal{C}_4, \mathcal{C}_1, \mathcal{C}_2, \mathcal{C}_3]$$

...ma mai spezzare le catene!

Forma di Jordan: costruzione

che forma ha $F' = T^{-1}FT$?

$$(F - \lambda_1 I)\omega_5 = 0 \implies F\omega_5 = \lambda_1 \omega_5$$

$$(F - \lambda_1 I)\omega_8 = \omega_5 \implies F\omega_8 = \omega_5 + \lambda_1 \omega_8$$

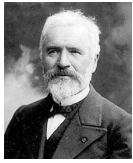
$$(F - \lambda_1 I)\omega_9 = \omega_8 \implies F\omega_9 = \omega_8 + \lambda_1 \omega_9$$

$$(F - \lambda_1 I)v_{10} = \omega_9 \implies Fv_{10} = \omega_9 + \lambda_1 v_{10}$$

$$F\omega_4 = \lambda_1 \omega_4 \quad F\omega_3 = \lambda_1 \omega_3 \quad Fv_2 = \lambda_2 v_2 \quad Fv_1 = \lambda_1 v_1$$

$$Fv_6 = \omega_4 + \lambda_1 v_6 \quad Fv_7 = \omega_3 + \lambda_1 v_7$$

Forma di Jordan: costruzione



$$F_J \triangleq F' = T^{-1}FT =$$

$$\left[\begin{array}{cccc|cccc|c|c} \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 \\ \hline 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 \end{array} \right]$$

Forma di Jordan: caso generale

F ha autovalori $\{\lambda_i\}_{i=1}^{\ell}$ (possibilmente con $\nu_i > g_i$)

Fatto importante: autovettori (veri o generalizzati) corrispondenti ad autovalori diversi sono linearmente indipendenti.

$$F_J = T^{-1}FT = \left[\begin{array}{c|c|c|c} J_{\lambda_1} & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & J_{\lambda_2} & \ddots & \vdots \\ \hline \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \hline 0 & \cdots & 0 & J_{\lambda_{\ell}} \end{array} \right] \quad J_{\lambda_i} = \left[\begin{array}{c|c|c|c} J_{\lambda_i,1} & 0 & \cdots & 0 \\ \hline 0 & J_{\lambda_i,2} & \ddots & \vdots \\ \hline \vdots & \ddots & \ddots & 0 \\ \hline 0 & \cdots & 0 & J_{\lambda_i,\ell_i} \end{array} \right] \quad J_{\lambda_i,j} = \left[\begin{array}{cccc} \lambda_i & 1 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_i & \ddots & \vdots \\ \vdots & \ddots & \ddots & 1 \\ 0 & \cdots & 0 & \lambda_i \end{array} \right]$$

blocco di Jordan

miniblocco di Jordan

Forma di Jordan: algoritmo generale

1. Data $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$, calcolare autovalori λ_i , molt. algebriche ν_i e geometriche g_i
2. Per tutti i λ_i tali che $\nu_i = g_i$ calcolare ν_i autovettori lin. indep.
3. Per tutti i λ_i tali che $\nu_i > g_i$ (se esistono) calcolare ν_i vettori lin. indep. completando i g_i autovettori con $\nu_i - g_i$ autovettori generalizzati in

$$\ker(F - \lambda_i I)^2, \ker(F - \lambda_i I)^3, \dots, \ker(F - \lambda_i I)^{\bar{e}}$$

4. Calcolare le catene di Jordan partendo dagli ultimi autovettori generalizzati
5. Calcolare la matrice di cambio di base T ottenuta concatenando le catene
(nell'ordine inverso e senza spezzarle!)
6. $F_J = T^{-1}FT$

Forma di Jordan: osservazioni

1. La forma canonica di Jordan F_J è univocamente determinata a meno di una permutazione dei suoi blocchi/miniblocchi.
2. Dimensione blocco = molteplicità algebrica autovalore corrispondente
Dimensione miniblocco = lunghezza catena corrispondente
Numero miniblocchi = molteplicità geometrica autovalore corrispondente
3. Per calcolare F_J non è sempre necessario il calcolo esplicito delle catene!!!

(i) $F : \lambda_1 = 1, \nu_1 = 2, g_1 = 1, \lambda_2 = 5, \nu_2 = 2, g_2 = 2$

(ii) $F : \lambda_1 = 2, \nu_1 = 3, g_1 = 2$

(iii) $F : \lambda_1 = 2, \nu_1 = 3, g_1 = 1$

Polinomio annullatore di una matrice

Definizione: Un polinomio $p(x) = a_\ell x^\ell + a_{\ell-1} x^{\ell-1} + \dots + a_1 x + a_0$ si dice *polinomio annullatore* di $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ se

$$p(F) = a_\ell F^\ell + a_{\ell-1} F^{\ell-1} + \dots + a_1 F + a_0 I = 0.$$

$$p(F) = 0 \iff p(T^{-1}FT) = 0, \quad T \in \mathbb{R}^{n \times n} = \text{matrice di cambio di base}$$

$$\iff p(F_J) = 0$$

$$\iff p(J_{\lambda_{i,j}}) = 0, \quad \forall i, j$$

Polinomio annullatore di una matrice

$$\begin{aligned} p(x) = (x - x_1)^{\alpha_1} \dots (x - x_\ell)^{\alpha_\ell} &\implies p(F) = (F - x_1 I)^{\alpha_1} \dots (F - x_\ell I)^{\alpha_\ell} \\ &\implies p(J_{\lambda_{i,j}}) = (J_{\lambda_{i,j}} - x_1 I)^{\alpha_1} \dots (J_{\lambda_{i,j}} - x_\ell I)^{\alpha_\ell} \end{aligned}$$

Per avere $p(F) = 0$:

- $p(\lambda_i) = 0$, per ogni autovalore λ_i di F
- $\alpha_i \geq$ dimensione del più grande miniblocco associato a $\lambda_i \triangleq h_i$

Polinomio minimo di una matrice

Definizione: Il polinomio annullatore di $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ di grado più piccolo possibile si dice *polinomio minimo* di F e verrà denotato con $\Psi_F(x)$.

$$\Psi_F(x) = (x - \lambda_1)^{h_1} (x - \lambda_2)^{h_2} \cdots (x - \lambda_\ell)^{h_\ell}$$

Notare che: $\nu_i \geq h_i$

Teorema di Cayley–Hamilton



Teorema: Il polinomio caratteristico di $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ è sempre un polinomio annullatore di F stessa:

$$\Delta_F(F) = 0.$$

Più precisamente $\Delta_F(x)$ è un multiplo di $\Psi_F(x)$ e

$\Delta_F(x) = \Psi_F(x)$ quando F ha un solo miniblocco per ogni autovalore!