

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

## Teoria dei Sistemi (Mod. A)

## Programma finale del corso

Riferimenti:

[D] Dispensa sulla prima parte del corso (disponibile su moodle).

[BB] M. Bisiacco, S. Braghetto, “Teoria dei Sistemi Dinamici”, Società Editrice Esculapio, 2<sup>a</sup> Ed., 2010.

[F] E. Fornasini, “Appunti di Teoria dei Sistemi”, Edizioni Libreria Progetto, Padova, 2015.

## Parte I: Modelli, soluzioni, stabilità di sistemi dinamici

| Lezione | Data     | Argomenti trattati  | Riferimenti  |
|---------|----------|---|--|
| #1      | 28/02/22 | Introduzione al corso. Programma preliminare e obiettivi del corso. Definizione generale di sistema dinamico.   | [F, §1.1]  |
| #2      | 02/03/22 | Classificazione dei sistemi dinamici. Rappresentazione esterna. Rappresentazione interna o di stato e proprietà di separazione. Sistemi lineari in rappresentazione di stato. Principio di sovrapposizione degli effetti. Vantaggi della rappresentazione di stato. | [D, §1.1, 1.2]<br>[BB, §1.1, 1.2]<br>[F, §1.2–1.5]               |
| #3      | 03/03/22 | Esempi di modelli di stato lineari a tempo continuo e a tempo discreto. Passaggio da funzione di trasferimento di sistema SISO a modello di stato. Esempi di modelli di stato non lineari.  | [D, §1.3, §2.2]  |
| #4      | 03/03/22 | Traiettorie di stato e ritratto di fase di un sistema. Punti di equilibrio con e senza ingressi. Stabilità semplice e asintotica. Linearizzazione di sistemi.   | [D, §1.4-1.5, 3.1]<br>[BB, §2.1-2.2, 2.5, 3.2]<br>[F, §1.6, 3.1] |
| #5      | 07/03/22 | Richiami di algebra lineare. Spazi vettoriali e trasformazioni lineari. Fatti base su matrici.  | [F, §A.1-A.2, A.4]   |
| #6      | 09/03/22 | Complementi di algebra lineare. Calcolo inversa e determinante di matrice. Matrici triangolari e triangolari a blocchi. Forma canonica di Jordan.   | [D, §A.3.2]<br>[BB, §1.5-1.6]<br>[F, §A.7-A.8]                   |
| #7      | 10/03/22 | Soluzioni di sistemi lineari autonomi a tempo continuo (evoluzione libera). Esponenziale di matrice e sue proprietà. Calcolo diretto dell'esponenziale di matrice.  | [D, §A.1-A.2]<br>[BB, §1.3-1.4]<br>[F, §2.5]                     |

|     |          |   |   |
|-----|----------|---|---|
| #8  | 10/03/22 | Introduzione a Matlab®.   |   |
| #9  | 14/03/22 | Calcolo dell'esponenziale di matrice tramite Jordan. Modi elementari a tempo continuo e loro carattere. Evoluzione complessiva di un sistema lineare a tempo continuo nel dominio del tempo e di Laplace. Matrice di trasferimento. Equivalenza algebrica di sistemi.           | [D, §2.1, A.3]<br>[BB, §1.3,1.7-1.8,3.1]<br>[F, §2.5-2.6, §1.7] |
| #10 | 16/03/22 | Soluzioni di sistemi lineari autonomi a tempo discreto (evoluzione libera). Calcolo della potenza di una matrice tramite Jordan. Modi elementari a tempo discreto e loro carattere. Evoluzione complessiva di un sistema lineare a tempo discreto nel dominio del tempo e Zeta. | [BB, §3.5-3.7]<br>[F, §2.1-2.4]                                 |
| #11 | 17/03/22 | Stabilità asintotica, semplice e BIBO di sistemi lineari. Teorema di linearizzazione per la stabilità di equilibri di sistemi non lineari.  | [D, §3.2, 3.3]<br>[BB, §2.2, 2.5]<br>[F, §2.2, 2.5]             |
| #12 | 17/03/22 | Simulazione della dinamica (linearizzata e non) di un segway in Matlab®.  |   |

## Parte II: Analisi e controllo di sistemi dinamici lineari

| Lezione | Data     | Argomenti trattati  | Riferimenti                          |
|---------|----------|---|--------------------------------------|
| #13     | 21/03/22 | Raggiungibilità e controllabilità di sistemi dinamici: definizioni generali. Raggiungibilità di sistemi lineari a tempo discreto: proprietà degli spazi raggiungibili e criterio di raggiungibilità del rango. Raggiungibilità di sistemi algebricamente equivalenti. | [BB, §4.1-4.2]<br>[F, §5.1]          |
| #14     | 23/03/22 | Calcolo dell'ingresso a energia minima per sistemi lineari a tempo discreto. Spazi $F$ -invarianti e caratterizzazione geometrica dello spazio raggiungibile. Forma di Kalman di raggiungibilità. Test PBH di raggiungibilità e autovalori non raggiungibili.         | [BB, §4.2-4.4]<br>[F, §5.4, 5.7-5.8] |
| #15     | 24/03/22 | Controllabilità di sistemi lineari a tempo discreto: proprietà degli spazi controllabili, criterio di controllabilità tramite sottospazi. Caratterizzazione della controllabilità tramite forma di Kalman. Test PBH di controllabilità.                               | [BB, §4.5]<br>[F, §5.2]              |
| #16     | 24/03/22 | Raggiungibilità di sistemi lineari a tempo continuo: criterio di raggiungibilità del rango. Equivalenza tra raggiungibilità e controllabilità di sistemi lineari a tempo continuo.  | [BB, §4.6]<br>[F, §5.3]              |
| #17     | 28/03/22 | Introduzione al problema del controllo. Retroazione statica dallo stato e dall'uscita di sistemi lineari. Esempio di controllo in retroazione statica dallo stato e dall'uscita della posizione dell'albero di un motore elettrico.                                   | [F, §6.1]                            |

|     |          |  |                                       |
|-----|----------|--|---------------------------------------|
| #18 | 30/03/22 | Matrice di retroazione di sistemi lineari algebricamente equivalenti. Sistema retroazionato e forma di Kalman. Controllo in retroazione per sistemi singolo ingresso: allocazione degli autovalori e raggiungibilità. Metodo diretto di allocazione degli autovalori. Controllori dead-beat.   | [BB, §5.1]<br>[F, §6.1, 6.4, 6.8]     |
| #19 | 31/03/22 | Controllo in retroazione dallo stato della dinamica (linearizzata) di un segway in Matlab®. Discretizzazione di sistemi lineari continui tramite campionamento e interpolazione di ordine zero.  | [F, §9.3]                             |
| #20 | 31/03/22 | Controllo in retroazione per sistemi con più ingressi: lemma di Heymann. Stabilizzabilità di sistemi a tempo continuo e discreto.  | [BB, §5.2-5.3]<br>[F, §6.5]           |
| #21 | 04/04/22 | Osservabilità e ricostruibilità di sistemi dinamici: definizioni generali. Stati indistinguibili e non osservabili. Osservabilità di sistemi lineari a tempo discreto: proprietà degli spazi non osservabili e criterio di osservabilità del rango. Spazio non ricostruibile e criterio di ricostruibilità per sistemi lineari a tempo discreto. | [BB, §6.3-6.5]<br>[F, §7.1-7.2]       |
| #22 | 06/04/22 | Osservabilità di sistemi lineari a tempo continuo. Equivalenza tra osservabilità e ricostruibilità di sistemi lineari a tempo continuo. Sistema duale e sue proprietà. Forma di Kalman di osservabilità. Test PBH di osservabilità. Proprietà equivalenti all'osservabilità. Proprietà equivalenti alla ricostruibilità.                         | [BB, §6.1-6.2, 6.5]<br>[F, §7.3, 7.4] |
| #23 | 07/04/22 | Stimatori ad anello aperto e chiuso. Rivelabilità di sistemi a tempo continuo e discreto. Regolatore: definizione ed equazioni dinamiche. Principio di separazione e condizioni di esistenza di regolatori stabilizzanti e dead-beat.  | [BB, §6.6, 7.1]<br>[F, §7.6-7.7]      |
| #24 | 07/04/22 | Controllo tramite regolatore della dinamica (linearizzata e non) di un segway in Matlab®.  | [F, Esempio 7.7.1]                    |