



Università di Pisa

Registro delle lezioni

[Pagina principale](#) | [Registri delle lezioni per anno accademico](#) | [Login](#)

Andrea Caiti

Registri a.a. **2025/2026**

DATI REGISTRO

modulo	TEORIA DEL CONTROLLO
insegnamento	TEORIA DEI SISTEMI E DEL CONTROLLO (cod. 281II)
corso di studi	WIM-LM - INGEGNERIA ROBOTICA E DELL'AUTOMAZIONE
periodo	Primo semestre
responsabile	ANDREA CAITI
docenti	ANDREA CAITI
totale ore	64 (Lezione: 56 ore , Esercitazione: 8 ore)

[Calendario lezioni](#) [Dettaglio ore](#)

LEZIONI

1. [Mer 24/09/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: Richiami: l'anello di controllo in retroazione per sistemi Lineari Tempolnvarianti (LTI) Singolo Ingresso Singola Uscita (SISO). Obiettivi di un sistema di controllo automatico: prestazioni in transitorio e a regime (dinamiche e statiche). Richiami sulla trasformata di Laplace. Funzioni di trasferimento in anello aperto e in anello chiuso. La risposta armonica e la sintesi del regolatore attraverso "loop shaping" . (ANDREA CAITI)
2. [Lun 06/10/2025 08:30-10:30 \(2:0 h\)](#) lezione: Serie e trasformata di Fourier. Definizione formale, significato fisico, interpretazione astratta come base di spazi funzionali. Proprietà, relazioni e differenze con la trasformata di Laplace. Segnali standard e distribuzioni (delta di Dirac, sue derivate e suoi integrali). (ANDREA CAITI)
3. [Mer 08/10/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: Sistemi di controllo digitali: architettura generale. Regolatori digitali in ambito industriale: PLC (cenni). Campionamento di segnali analogici: modello nel tempo e in frequenza. Pettine di Dirac e sua trasformata di Fourier. Dualismo tempo/frequenza. Teorema del campionamento (o di Shannon). (ANDREA CAITI)
4. [Lun 13/10/2025 08:30-10:30 \(2:0 h\)](#) lezione: Segnali a banda limitata in pratica. Il problema del rumore: disturbi fuori banda. Filtri anti-aliasing, loro importanza. Dimensionamento del filtro anti-alias: considerazioni e regole empiriche. Segnali campionati: trasformata di Laplace della funzione campionata. La trasformata Zeta: definizione. (ANDREA CAITI)
5. [Mer 15/10/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: Trasformata zeta: proprietà. z come operatore anticipo, z^{-1} come operatore ritardo. Significato della trasformata monolaterale / bilaterale. Trasformata z di successioni elementari (gradino, esponenziale). Raggio di convergenza. Relazione fra piano s e piano z . Fascia primaria e fasce secondarie. Relazione tra fascia primaria e teorema del campionamento di Shannon. (ANDREA CAITI)
6. [Mer 22/10/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: Ancora sulle proprietà della trasformata Zeta: traslazione nel tempo, teoremi del valore iniziale e finale. Trasformata Zeta delle funzioni cisoidali. Matrice di trasferimento. Caso SISO: funzione di trasferimento. Calcolo dell'inversa di una matrice (richiami). Funzione di trasferimento ed equazione ingresso-uscita alle differenze. Equazione ingresso-uscita alle differenze come algoritmo di calcolo ricorsivo per l'implementazione di filtri digitali. (ANDREA CAITI)
7. [Lun 27/10/2025 08:30-10:30 \(2:0 h\)](#) lezione: Anti-trasformata zeta di funzioni razionali e confronto con anti-trasformata di Laplace. Unicità della corrispondenza sequenza \leftrightarrow trasformata zeta. Sviluppo di Heavyside ("sviluppo in fratti semplici") della funzione $G(z)/z$. Esempi ed esercizi. (ANDREA CAITI)

8. **Mer 29/10/2025 08:30-11:30 (3:0 h)** lezione: Anti-trasformata z : lunga divisione. Esempi. Filtri digitali e loro implementazione pratica. Progetto di filtri digitali a partire dalla loro specifica analogica. Trasformata di Tustin (trasformata bilineare, approssimante di Padè). Significato della approssimazione in termini di risposta in frequenza del filtro analogico e di quello digitale. Pre-warping. Esempi. (ANDREA CAITI)
9. **Lun 03/11/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Trasformata discreta di Fourier: calcolo con insieme finito di dati campionati. Cenni storici all'algoritmo di Fast Fourier Transform. Campionamento in frequenza risultante dalla FFT. (ANDREA CAITI)
10. **Mar 04/11/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Short Time Fourier Transform. Compromesso fra risoluzione nel tempo e risoluzione in frequenza. Anello di controllo con regolatore digitale: conversione Digitale/Analogica. Dispositivi di campionamento e tenuta (Sample & Hold) di ordine 0, 1, superiore. La trasformata di Laplace per sample & hold di ordine 0. Risposta armonica di un sample & hold di ordine 0. Approssimazione del sample&hold di ordine 0 con un ritardo fisso - razionale e dimostrazione. (ANDREA CAITI)
11. **Mer 05/11/2025 08:30-11:30 (3:0 h)** lezione: Progettazione di un regolatore digitale: dalla progettazione del regolatore analogico alla scelta del periodo di campionamento e filtro anti-alias; effetto del convertitore D/A. Considerazioni teoriche e considerazioni pratiche. Esempi ed esercizi. (ANDREA CAITI)
12. **Gio 06/11/2025 08:30-11:00 (3:0 h)** lezione: Passaggio da dominio di Laplace a dominio z mantenendo razionalità della funzione di trasferimento: metodi alternativi alla trasformazione di Tustin. Eulero in avanti, Eulero a ritroso e loro limiti. Discretizzazione di un sistema LTI SISO espresso in forma di stato: forma di stato equivalente a tempo discreto nell'ipotesi di ingresso costante a tratti. Significato, limiti, vantaggi. (ANDREA CAITI)
13. **Lun 10/11/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Assegnamento degli autovalori con retroazione dallo stato. Teorema generale. Caso SISO: assegnamento attraverso la forma canonica di controllo. Dimostrazione di necessità e sufficienza della controllabilità della coppia (A,B) per l'assegnazione degli autovalori. Caso di sistema non completamente controllabile: assegnazione degli autovalori per il solo sottosistema controllabile. (ANDREA CAITI)
14. **Mer 12/11/2025 08:30-11:30 (3:0 h)** lezione: Formula di Ackerman. Robustezza numerica della formula di Ackerman. Assegnamento dei poli con retroazione completa dello stato: caso sistemi MIMO (Multi-ingresso Multi-uscita). Assegnamento della autostruttura: procedura. Esempi ed esercizi. (ANDREA CAITI)
15. **Lun 17/11/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Raggiungibilità e controllabilità: differenza per sistemi a tempo discreto. Stabilizzabilità nel caso tempo continuo e tempo discreto. Sistemi a tempo discreto con retroazione completa dallo stato: dead beat control (controllo a tempo finito). Retroazione completa dallo stato con introduzione di integratori dell'errore di riferimento: stato aumentato, retroazione e assegnazione autovalori dallo stato aumentato. Stato non accessibile: il problema dell'osservazione dello stato; introduzione. (ANDREA CAITI)
16. **Mer 19/11/2025 08:30-09:30 (1:0 h)** esercitazione: Testi di apprendimento, in co-presenza con la prof.ssa Pallottino. (ANDREA CAITI)
17. **Mer 19/11/2025 09:30-11:30 (2:0 h)** lezione: Osservatori dello stato - struttura. Assegnamento degli autovalori dell'osservatore. Dualità dell'osservazione dello stato con il problema di controllo attraverso retroazione completa dello stato. Retroazione da stato osservato: struttura e analisi della assegnabilità degli autovalori dello stato e del sistema retroazionato. Principio di separazione. (ANDREA CAITI)
18. **Lun 24/11/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Esempi ed esercizi: Anti-trasformata Zeta, realizzazioni minime, assegnamento autovalori con retroazione dallo stato, equivalenza con l'osservazione dello stato. (ANDREA CAITI)
19. **Mer 26/11/2025 08:30-11:30 (3:0 h)** lezione: Introduzione al controllo ottimo. Esempio motivante: percorso a tempo minimo (costo minimo nell'attraversamento di un grafo). Il principio di Bellman e la Programmazione Dinamica. Cost-to-go e ricorsione a ritroso (backward) nella programmazione dinamica. Il controllo ottimo LQ (sistema Lineare e costo Quadratico) per sistemi a tempo discreto: soluzione analitica attraverso la Programmazione Dinamica. L'equazione di Riccati a tempo discreto. (ANDREA CAITI)
20. **Lun 01/12/2025 08:30-10:30 (2:0 h)** lezione: Controllo LQ a tempo discreto su orizzonte infinito. Equazione algebrica di Riccati. Controllo MPC (cenni). Programmazione dinamica nel tempo continuo: cost-to-go, equazione di Bellmann. (ANDREA CAITI)
21. **Gio 04/12/2025 08:30-11:30 (3:0 h)** lezione: Controllo ottimo LQ su orizzonte infinito nel caso tempo continuo. Equazione algebrica di Riccati. Condizioni di esistenza e unicità per soluzione definita positiva dell'equazione di Riccati. Stabilità del sistema in ciclo chiuso con controllo ottimo. Controllo LQ a tempo continuo su orizzonte finito: equazione differenziale di Riccati. Singularità e

quasi-singularità di matrici: Decomposizione ai Valori Singolari (SVD): introduzione e proprietà fondamentale. (ANDREA CAITI)

22. [Mer 10/12/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: SVD e metriche di distanza dalla singolarità. SVD e equazione dei minimi quadrati: struttura geometrica dello spazio dei dati e delle soluzioni. SVD e autovalori - numero di condizionamento di una matrice quadrata. Dominanza diagonale. Teorema di Gershgoring sugli autovalori di una matrice. Cerchi e bande di Gershgoring. Array di Nyquist. (ANDREA CAITI)
23. [Gio 11/12/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) lezione: Controllo di sistemi MIMO e disaccoppiamento. Controllo decentralizzato. Disaccoppiamento ideale (esempio per il caso 2×2). Considerazioni operative sul disaccoppiamento ideale: necessità di fase minima delle funzioni di trasferimento coinvolte, sensibilità ai ritardi di tempo. Disaccoppiamento ideale per sistemi triangolari. Disaccoppiamento semplificato. (ANDREA CAITI)
24. [Lun 15/12/2025 08:30-10:30 \(2:0 h\)](#) esercitazione: Esercizi: assegnamento degli autovalori con retroazione completa dallo stato e con retroazione da stato osservato (ANDREA CAITI)
25. [Mer 17/12/2025 08:30-11:30 \(3:0 h\)](#) esercitazione: Assegnamento degli autovalori con retroazione dallo stato inserendo integratori nella catena diretta (ANDREA CAITI)
26. [Gio 18/12/2025 08:30-10:00 \(2:0 h\)](#) esercitazione: Test di apprendimento - in co-presenza con la prof.ssa Pallottino (ANDREA CAITI)

[Calendario lezioni](#) [Dettaglio ore](#)