

Scuola di dottorato SIDRA 2008

“Introduzione al Controllo dei Sistemi Nonlineari”

Coordinatori: Alberto Isidori (Università di Roma “La Sapienza”)
Lorenzo Marconi (Università di Bologna)

Docenti: A. Astolfi, Università di Roma “Tor Vergata” e Imperial College, London
F. Celani, Università di Roma “La Sapienza”
A. Isidori, Università di Roma “La Sapienza”
L. Marconi, Università di Bologna
A. Serrani, Ohio State University

Finalità del corso

Nel corso degli ultimi 15-20 anni la letteratura dei sistemi di controllo non lineari ha visto lo sviluppo sempre più strutturato di metodi sistematici per la stabilizzazione e la regolazione “in grande” di dinamiche non lineari. I metodi di analisi e sintesi “locali” che avevano caratterizzato la letteratura specifica prima degli anni '90 hanno lasciato sempre più spazio a tecniche “quantitative” basate su un approccio “alla Lyapunov” per il controllo di dinamiche non lineari, possibilmente descritte da modelli matematici incerti, non necessariamente nell'intorno di un punto di lavoro. Gli sforzi di ricerca in questa direzione hanno portato verso lo sviluppo di una teoria non lineare di stabilizzazione e regolazione robusta semiglobale e globale, sia con retroazione dallo stato che dall'uscita, che attualmente può considerarsi completamente matura.

In questo contesto il corso si prefigge l'introduzione di alcune tecniche, oramai affermate, per l'analisi di sistemi non lineari e per la sintesi di controllori robusti sia state-feedback che output-feedback. A tale scopo la scuola presenterà, in un crescendo di contenuti, sia gli aspetti metodologici di base che alcune tecniche avanzate presentate in letteratura nel recente passato. Oltre ad aspetti metodologici, alcune lezioni saranno rivolte a presentare applicazioni di rilievo nel campo dell'ingegneria delle tecniche di stabilizzazione e regolazione presentate nel corso.

L'obiettivo prioritario del corso è presentare gli argomenti in modo auto-contenuto ed organico, al fine di comprendere in profondità le tecniche proposte, possibili applicazioni in diversi ambiti dell'ingegneria e della fisica, e possibili direzioni di ricerca future nell'ambito dei sistemi di controllo non lineare.

Più nel dettaglio il programma della scuola sarà così strutturato.

Le prime due giornate saranno completamente dedicate all'introduzione degli strumenti metodologici di base che saranno poi utilizzati nelle lezioni successive.

In particolare la prima giornata sarà dedicata alla presentazione di strumenti basilari di analisi dei sistemi non lineari con e senza ingressi. Dopo una breve introduzione alle dinamiche non lineari e ad aspetti di differenziazione rispetto ai sistemi lineari, si presenteranno le nozioni di stabilità e il criterio di Lyapunov. Saranno inoltre introdotti strumenti di analisi per sistemi non lineari in presenza di ingressi esogeni, presentando la nozioni di input-to-state stability e di passività, le loro caratterizzazioni in termini di funzioni di Lyapunov e la stabilità di sistemi interconnessi mediante il teorema del piccolo guadagno.

Nel corso della seconda giornata si presenteranno inizialmente strumenti per la caratterizzazione del comportamento asintotico di sistemi non lineari. A tale riguardo sarà introdotta la nozione di insieme “omega limite” e di risposta in regime permanente di un sistema non lineare. Si introdurrà

inoltre la classe dei sistemi non lineari descritti nella così-detta forma normale sulla quale saranno prevalentemente sviluppate le tecniche di stabilizzazione e regolazione. In questo ambito particolare enfasi sarà data al concetto di grado relativo e di “dinamica zero” per sistemi non lineari, estendendo la nozione di fase minima in un contesto non lineare. Nella parte conclusiva di questa giornata sarà affrontato il problema della regolazione robusta per sistemi lineari a fase minima in presenza di sistemi esogeni incerti (regolazione lineare adattativa) come primo esempio di regolazione non lineare.

La terza giornata, che come da tradizione della scuola è solo parzialmente dedicata alla didattica, introdurrà i risultati principali riguardanti la stabilizzazione globale, semiglobale e pratica per sistemi descritti in forma normale. A tale riguardo saranno presentate tecniche ad alto guadagno sia con retroazione dallo stato che con retroazione dall’uscita e dalle sue derivate nel caso di sistemi a fase minima.

L’argomento della stabilizzazione dalla sola uscita sarà invece affrontato nella prima parte della quarta giornata. In particolare sarà presentato un principio di separazione per sistemi non lineari basato sul progetto di un osservatore per una particolare classe di sistemi descritti in una forma non lineare di osservabilità. Nella seconda parte della giornata l’attenzione della scuola si sposterà invece ad affrontare tecniche di controllo per la particolare classe di sistemi non lineari passivi. Le tecniche di controllo che saranno presentate sono basate sull’idea di considerare il processo e il controllore come sistemi interconnessi che scambiano e dissipano energia, e permettono di ottenere un’interpretazione fisica per l’azione di controllo ottenuta. Tali argomenti saranno ulteriormente sviluppati nel corso della prima parte della quinta giornata con anche la presentazione di applicazioni ingegneristiche di rilievo.

La parte finale del corso sarà invece prevalentemente dedicata al problema della regolazione per sistemi non lineari e al progetto di regolatori basati sul principio del modello interno. Più nel dettaglio, nella seconda parte della quinta giornata, sarà presentato il problema della regolazione e un paradigma generale di progetto di regolatori basato sulla così detta “asymptotic internal model property”. In questo ambito saranno presentate alcune tecniche per la sintesi del regolatore robusto fortemente basate sulle tecniche viste nelle lezioni precedenti. Tali argomenti saranno ulteriormente affrontati nella giornata finale in cui si presenteranno gli ultimi sviluppi della teoria della regolazione non lineare con anche la presentazione di alcune applicazioni ingegneristiche di rilievo.

Ausili e materiali didattici: Le lezioni di tutti i docenti saranno svolte prevalentemente alla lavagna. Un uso molto moderato di lucidi è previsto solo per la presentazione di alcune applicazioni.

Il materiale didattico è costituito da una serie di libri di riferimento nel contesto dell’analisi e controllo di sistemi non lineari e da una raccolta elettronica di documenti e letteratura esistente che saranno seguiti nel corso delle lezioni. Tale raccolta elettronica sarà resa disponibile sia web agli studenti iscritti. L’indirizzo del sito web sarà comunicato entro la prima metà di Giugno. Il dettaglio del materiale didattico, in relazione agli argomenti specifici presentati nel corso, è presentato nella pagina successiva.

Programma e riferimenti didattici

Lunedì 14 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Introduzione ai principali fenomeni nonlineari	[Kh, § 1.1, 1.2.1, 1.2.4, 2.2, 2.4, 3.1] [Sa, § 2.5]
11:00 – 12:45	Stabilità dell'equilibrio. Il criterio di Lyapunov	[Kh, § 4.1, 4.3, 4.4] [Is, § 10.1]
15:00 – 16:30	Sistemi con ingressi	Handout_I.pdf
17:00 – 18:30	Stabilità di sistemi interconnessi	Handout_I.pdf

Martedì 15 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Insiemi limite e risposta a regime permanente	Article_I.pdf
11:00 – 12:45	Forme normali dei sistemi nonlineari	Handout_II.pdf
15:00 – 16:30	Dinamica zero di un sistema nonlineare	Handout_II.pdf
17:00 – 18:30	Regolazione: modello interno adattativo	Handout_III.pdf

Mercoledì 16 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Stabilizzazione globale, semiglobale, pratica	[Is, § 9.2, 9.3], Handout_II.pdf
11:00 – 12:45	Stabilizzazione globale, semiglobale, pratica	Handout_II.pdf

Giovedì 17 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Osservatori e principio di separazione	Handout_IV.pdf
11:00 – 12:45	Osservatori e principio di separazione	Handout_IV.pdf
15:00 – 16:30	Sistemi Hamiltoniani: preliminari	[VdS, § 3.1, 3.2, 3.3, 3.4]
17:00 – 18:30	Energy-based control: parte 1	[VdS, § 4.1, 4.1.1, 4.2, 4.3]

Venerdì 18 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Energy-based control: parte 2	[VdS, § 5.1, 5.2], Article_II.pdf
11:00 – 12:45	Energy-based control: applicazioni	Article_III.pdf, Article_IV.pdf
15:00 – 16:30	Regolazione: modello interno nonlineare	Article_V.pdf
17:00 – 18:30	Regolazione: sintesi del regolatore	Article_V.pdf

Sabato 19 Luglio 2008		
8:30 – 10:15	Progressi recenti nella teoria della regolazione non lineare	Article_V.pdf, Article_VI.pdf
11:00 – 12:45	Applicazioni della teoria della regolazione in ambiti ingegneristici	Article_VI.pdf, Article_VII.pdf

[Is] A. Isidori, *Nonlinear Control Systems II*, Springer-Verlag, 1999.

[Kh] H. Khalil, *Nonlinear Systems* (3rd edition), Prentice Hall, 2002.

[Sa] S. Sastry, *Nonlinear Systems: Analysis, Stability, and Control*, Springer-Verlag, 1999.

[VdS] A. van der Schaft, *L₂-Gain and Passivity Techniques in Nonlinear Control* (2nd edition), Springer Verlag, 1999.