

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	フィードバックシステムにおける安定性と次元
Title(English)	Stability and Dimension in Feedback Systems: A Differential Lyapunov Framework
著者(和文)	加藤留偉
Author(English)	Rui Kato
出典(和文)	学位:博士(工学), 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第12772号, 授与年月日:2024年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:石井 秀明,三宅 美博,小野 功,瀧ノ上 正浩,SLAVAKIS KONSTANTINO,畑中 健志
Citation(English)	Degree:Doctor (Engineering), Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第12772号, Conferred date:2024/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:,,,,,
学位種別(和文)	博士論文
Category(English)	Doctoral Thesis
種別(和文)	審査の要旨
Type(English)	Exam Summary

(博士課程)

論文審査の要旨及び審査員

報告番号	甲第		号	学位申請者		加藤 留偉	
		氏 名	職 名			氏 名	職 名
論文審査 審査員	主査	石井 秀明	教授	審査員	スラヴァキス コンスタンティノス	教授	
	審査員	三宅 美博	教授		畑中 健志		
		小野 功	教授			准教授	
		瀧ノ上 正浩	教授				

論文審査の要旨 (2000 字程度)

本論文は「Stability and Dimension in Feedback Systems: A Differential Lyapunov Framework (フィードバックシステムにおける安定性と次元)」と題し、英文による全6章から構成されている。本論文では非線形性を有するフィードバック制御系の安定性と次元に関する理論的解析を行っており、特に微分リアプノフ関数に基づく枠組みを構築している。 第1章「Introduction」では、まず動的システムの解析におけるリアプノフ理論の重要性について説明した上で、システム制御と力学系の両分野で用いられる手法に大きな違いがあり、本論文の主目的は両者の統合にあると述べている。また、本研究の背景として、フィードバック制御系に対するリアプノフの安定性理論、および力学系の複雑性を特徴付ける次元とエントロピーに関する研究を説明している。システムの次元に関連する応用として、通信制約下における制御系や力学系におけるカオス的な軌道の次元推定を挙げている。さらに、システムの局所的な性質から大局的な性質が導出できる例として、ルーリエ系の絶対安定性に関する研究を紹介している。 第2章「A Differential Lyapunov Framework」では、微分リアプノフの枠組みにおける重要な概念を紹介している。はじめに非増分・増分安定性、および微分リアプノフ関数による安定性解析について述べている。次に作用素論に基づく動的システム、その消散性に関する性質をまとめた上で、微分消散システム、特に接続構造を持つ場合について最近の研究動向を説明している。 第3章「Global Stability of Lur'e Systems」では、線形時不変システムと静的な非線形要素から構成されるフィードバック系であるルーリエ系の解析を行っている。まず、このクラスのシステムの絶対安定性に対する古典的なアプローチについて概説している。次に微分リアプノフの枠組みの下で、ルーリエ系の大域的安定性に関する十分条件および必要条件を導出している。そこでは微分リアプノフ関数としてレオーノフ形式のものを使うことを提案している。これは二次形式の関数とリアプノフ型の関数からなっており、通常の二次形式のものよりも自由度が高いため、十分条件に含まれる保守性の低減に有用であると述べている。 第4章「Lyapunov Dimension of Lur'e Systems」では、不安定な動特性を持つルーリエ系を対象に、その複雑性を測るために3章で導入された手法を一般化し、リアプノフ次元の推定問題を考えている。提案法は次元理論におけるレオーノフの手法を拡張し、フィードバック系に
--

適用したものと解釈できるとし、さらに絶対安定性に対するカルマン予想の一般化であると説明している。また本章の重要な貢献は、局所的小および大域的なリアプノフ次元が一致するような、非線形要素のクラスの特徴付けだとしている。結果の有用性を示す例として、ローレンツ系の厳密なリアプノフ次元を求めている。

第5章「Interconnection of Volume Dissipative Systems」では、入出力を有する複数のシステムを相互接続したフィードバック系に対する次元推定のための一般的な枠組みが検討されている。そこでは近年、提案された微分消散性理論が中心的な役割を果たしている。特に体積消散システムという新たなシステムのクラスを定義している。これはエネルギーが減少し、体積が縮小する散逸系を一般化したものであり、外部からのエネルギー供給および任意の次元の体積変化を扱えると説明している。加えて、次元推定におけるスミスの手法を拡張し、フィードバック系に対する結果を導出している。相互接続されたシステムの次元が個々の構成要素の次元よりも大きいことを示す重要な結果であり、フィードバック系の次元に関する研究自体が限定的なため新規性が高いと述べている。最後に、結果の適用例として、2つのローレンツ系を接続した閉ループ系に対して、次元の上界を導出している。

第6章「Conclusion」では、本論文のまとめとして、各章の内容を振り返った後、今後の研究の展望として以下の3つの方向を挙げ、期待される結果を述べている：(1) 量子化を伴うネットワーク化制御系や複雑ネットワークにおける確定接点の次元による特徴付け、(2) システムや環境の複雑さを次元やエントロピーで表現した適応・学習理論の構築、(3) リアプノフ指数・リアプノフ関数をベースとする振動理論の構築。

以上を要するに、本論文ではフィードバック構造を有する非線形システムの安定性解析や次元推定のための新たな微分リアプノフの枠組みを研究している。これは、主に閉じたシステムを扱う力学系分野の問題を、入出力を持つシステムを相互接続した場合へと拡張させた方法論の確立に大きく寄与するものである。従って、本論文は博士（工学）の学位論文として十分な価値が有るものと認められる。

注意：「論文審査の要旨及び審査員」は、東工大リサーチリポジトリ(T2R2)にてインターネット公表されますので、公表可能な範囲の内容で作成してください。