

平成30年 5月28日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420418

研究課題名(和文) 高機能ロバスト非線形制御系設計法の構築

研究課題名(英文) Development of the methodologies for high-performance robust and nonlinear control system design

研究代表者

増淵 泉 (Masubuchi, Izumi)

神戸大学・システム情報学研究科・教授

研究者番号：90283150

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、線形行列不等式(LMI)に基づく制御系設計、ロバスト性解析、ハイブリッド・非線形システムの安定性解析の理論を発展させ、以下の項目に関する成果を得た。

(1) LMIによる新たな離散時間ゲインスケジュールド(GS)制御系設計法、ロバスト最適化問題の有限次元緩和と厳密性検証、GS制御系設計法の応用例、(2) 切替型のGS補償器の設計法、離散値フィードバックによるマルチエージェント系の制御、(3) リアプノフ密度を用いた不連続な右辺を持つシステムの安定性解析、リアプノフ密度を用いた解軌道の指数収束性解析、リアプノフ密度を用いた非線形時変システムの安定性解析。

研究成果の概要(英文)：This study develops the theories of control system design based on linear matrix inequalities, robustness analysis, and stability analysis of hybrid and nonlinear systems. The outcomes of this study include: (1-1) novel discrete-time gain-scheduled control system design methods based on linear matrix inequalities, (1-2) computational method for robust optimization problems and its exactness verification, (1-3) case studies of gain-scheduled control, (2-1) gain-scheduled control via parameter-dependent switching, (2-2) consensus control of multi-agent systems via discretized position feedback, (3-1) stability analysis of nonlinear systems with discontinuous right-hand side via Lyapunov densities, (3-2) exponential convergence analysis of trajectories via Lyapunov densities, and (3-3) Lyapunov density conditions for stability analysis of nonlinear time-varying systems.

研究分野：システム制御理論

キーワード：ロバスト制御 非線形制御 不連続システム ゲインスケジュールド制御 線形行列不等式 ロバスト最適化 リアプノフ密度 離散値出力による制御

1. 研究開始当初の背景

H 制御や線形行列不等式(LMI)を用いた制御法の確立によって、線形ロバスト制御理論による制御系設計の理論は一応の完成を見せ、多くの優れた実応用の成果が得られている。しかしながら、その応用を困難にする状況や、あるいは線形制御理論の範疇では扱いにくい問題が存在し、それらがロバスト制御理論やロバスト最適化に基づく制御系設計法のさらなる応用に対する障壁となっていた。本研究では特に以下の(1)-(3)の問題に注目した。

(1) ゲインスケジュールド制御法は、非線形性や時変の要素を持つ制御対象に対してロバスト制御理論を活用した制御系設計を可能にする方法であるが、離散時間システムでの設計法は連続時間のものに比べて基礎理論には研究の余地があった。また、航空機や宇宙機の制御では実応用が行われているが、制御対象が複雑な LPV システムである場合に、設計のための LMI 問題のサイズの増大や実装するゲインスケジュールド補償器の複雑化の問題が生じ、制御系設計・実装の両面が困難であるという問題があった。

(2) フィードバック制御を実装する上では観測を得るためのセンサの実装が不可欠で、無視し得ないコストである。これを軽減するために、離散値の出力を発生するセンサを用いることや、離散値の出力に応じた切替型の補償器を用いることが考えられる。これらにより、制御系の実装のコストの軽減が期待できる。しかし、制御性能を保証した補償器の系統的な設計法は知られていなかった。

(3) 非線形性の強いシステムにおいては、ゲインスケジュールド制御などの線形制御理論の延長線上のアプローチでは安定化のような基本的な問題も解決することはできず、非線形性を積極的に扱う必要がある。一つのアプローチとして、Rantzer の提案したリアプノフ密度による方法がある。この方法により、非線形システムの状態フィードバック制御問題をロバスト最低化問題に帰着してフィードバック則を求めることができる。しかし、従来法は C^1 級のベクトル場・密度関数を仮定しており、飽和などに起因するベクトル場の微分不可能性が存在する場合には適用できなかった。

2. 研究の目的

上述のように、線形ロバスト制御理論の単純な応用では解決できない問題が存在し、それらが理論の応用の可能性を小さくしている。しかし、線形ロバスト制御理論により得られた様々な技法は利用されつくしたとは言い難く、ロバスト制御を核としたさらなる研究

が必要である。本研究では、困難な制御問題を解決するための新たな定式化を含め、研究代表者これまでに行ってきた LMI に基づく制御系設計、ロバスト性解析、ハイブリッド・非線形システムの安定性解析の理論を発展させ、前項に掲げた(1)-(3)の課題を解決する高機能ロバスト非線形制御系設計の方法論を構築する。

(1) ゲインスケジュールド制御法

離散時間ゲインスケジュールド制御系設計の従来研究〔引用文献〕では、行列拡大を経由して設計用のパラメータ依存 LMI を導いているが、その際に導入される補助変数をスケジューリングパラメータについて定数にするために保守的となっている。他方研究代表者らは、従来研究とは異なる蓄積関数を用いることで、行列拡大とは異なる方法を提案した〔引用文献〕。これらの結果を拡張し、より小さな l_2 ゲインの上限を与える設計用のパラメータ依存 LMI を導出する。また、ゲインスケジュールド制御問題などをロバスト最適化として定式化して解く場合に必要有限次元緩和と厳密性検証について、これまで行われていないフルブロック型の不確かさに対する方法を構築する。応用に向けた研究として、大型宇宙構造物などにゲインスケジュールド制御系設計法を適用する。

(2) 離散値型の制御系の設計理論

スイッチドシステムの安定性解析や制御〔引用文献〕の応用として、切替型のゲインスケジュールド補償器の設計法を構築する。これにより、補償器の複雑さの問題を改善する。特に、スイッチドシステムの安定性・制御性能条件を利用して、制御性能を保証した設計を行う。また、離散値と連続値の双方をフィードバックする制御法について検討する。研究の途上で得られた新たな観点として、この問題を分散制御系において考え、離散値フィードバックによるマルチエージェント系の合意制御について考えた。

(3) リアプノフ密度による非線形システムの解析と設計

リアプノフ密度の方法〔引用文献〕を発展させるために、ベクトル場とリアプノフ密度の連続微分可能性の仮定を弱めた結果〔引用文献〕をさらに一般化し、ベクトル場の不連続性を許容する結果を導く。また、システムの何らかの制御性能を大域的に保証するリアプノフ密度の条件は研究されておらず、時変系に対する条件については、局所的な安定性を仮定する不十分な条件しか知られていなかったことに鑑み、これらの問題についても取り組んだ。

3. 研究の方法

本研究は、理論的な考察による設計条件の

導出やアルゴリズムの考案が主である。さらにそれらを計算機に実装し、制御系の解析や設計に関する数値実験を行うことにより、設計法やアルゴリズムの有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) ゲインスケジュールド制御法

LMI を用いた新たな離散時間ゲインスケジュールド制御系設計法

離散時間ゲインスケジュールド制御系の設計用 LMI として、従来研究〔引用文献〕において、補助変数を含む拡大型のパラメータ依存 LMI が用いられていたが、設計への応用では追加した補助変数はパラメータに依存しない定数とされていた。本研究では、補助変数の一部をパラメータ依存としてもなお変数変換によって設計用のパラメータ依存 LMI を導出できることを見出した。このパラメータ依存 LMI を用いた設計によって、保証できる l_2 ゲインの上限を改善できることを示した〔雑誌論文〕。

また、従来研究〔引用文献〕において研究代表者らは、一時刻前のスケジューリングパラメータの値に依存するゲインスケジュールド補償器を用いることで、 l_2 ゲイン性能を改善できる設計法を導いたが、ゲインスケジュールド補償器の構造として、〔引用文献〕の補償器の双対となるものを用いた場合の考察を行った〔学会発表〕。達成できる制御性能の優劣が、制御対象の LPV システムと補償器で選んだ構造に応じて変化することがわかった。

〔引用文献〕における研究代表者らの結果は、通常の有界実補題に基づいて、一時刻前のスケジューリングパラメータの値を活用できるように蓄積関数のクラスを選んだものであったが、さらに本研究では、拡大型の LMI を用いて一時刻前のスケジューリングパラメータの値を用いるゲインスケジュールド補償器を構成するための設計用のパラメータ依存 LMI を導出し、〔学会発表〕にて発表した。〔引用文献〕などの従来研究では、解析用の拡大型 LMI における蓄積関数や補助変数を設計問題とは無関係に選んでいるが、本研究では、設計用の LMI を構成する際に変数変換で不等式の左辺を「線形化」できる構造に注目することで新たな設計用の LMI を導いているのが特長である。数値例において比較を行い、この方法による設計用 LMI が従来研究と比較して l_2 ゲインの最も小さな上限を与えることが確認された。

ロバスト最適化問題の有限次元緩和による計算法と厳密性検証

フルブロック型の不確かさに対するロバスト SDP 問題に対して、二乗和に基づく上界緩和問題を構成した。フルブロック型の不

確かさに対する厳密性の条件から直交行列の集合上の最適化問題が導かれるが、行列指数関数を用いてこれを歪対称行列からなる線形空間上の最適化問題として定式化し、劣勾配法を用いて厳密性検証を行う数値実験を行った。その結果、本研究で提案した二乗和に基づく新たな上界緩和問題により、従来の S-procedure によるものよりも優れた結果を示す例が得られ、その厳密性が上述の探索法により検証された。

ゲインスケジュールド制御系設計法の応用例

大型宇宙構造物の姿勢制御系設計にゲインスケジュールド制御を適用する方法として、スケジューリングパラメータの三角関数を G-スケーリングを用いて厳密な上階緩和問題に帰着する方法を示した〔学会発表〕。さらに、得られた補償器の離散フーリエ展開により、スケジューリングパラメータについて簡単な係数を持つ補償器を導くことができた〔雑誌論文、学会発表〕。また、離散時間ゲインスケジュールド制御系設計法を航空機の姿勢制御問題および風力発電機の高周波制御問題に適用した。短いサンプリング時間の下での離散化においても数値的な誤差の生じにくい形の LMI を導出し、これを用いることで望ましい制御性能を達成するゲインスケジュールド補償器が得られた。

(2) 離散値型の制御系の設計理論

切替型のゲインスケジュールド補償器の設計法

ゲインスケジュールド制御系の方法論の多くは、実数値のパラメータの連続関数を係数行列に持つ LPV システムを補償器とする。本研究では、スケジューリングパラメータの値の範囲に応じて補償器の係数を切り替えることでパラメータの変動に対応するゲインスケジュールド補償器の設計法を示した。切り替えにはヒステリシスを設けてチャタリングが生じないようにした。また、本研究の特徴として、切り替え時に補償器の状態変数をリセットする機能を盛り込んでいる。さらに、補償器の状態変数のリセット則も変数変換を通して LMI によって最適化している。これによって制御性能を向上させることができることを示した〔雑誌論文〕。

離散値フィードバックによるマルチエージェント系の合意位置制御

複数のビークルなどからなるマルチエージェント系において、限られた相手との通信による合意制御が注目を集めている。本研究では、位置情報としてエージェント間の相対位置の符号みを交換するという条件のもとで合意位置制御を達成する制御則を考え、その収束性をフィリポフ解の枠組みのもとで

のリアプノフの方法により示した。各エージェントは二重積分器のダイナミクスを持つとし、制御入力他の一部のエージェントとの相対位置の符号と自身の速度の符号のネガティブフィードバックのみで構成される。相対位置の符号を検出できるエージェントの組で定義されたグラフに応じたリアプノフ関数により、合意点への収束を示した。特に、リアプノフ関数の変化率が負になることを示すために、制御対象の集合値写像の対称性に着目した解析を行った〔雑誌論文、学会発表〕。

(3) リアプノフ密度による非線形システムの解析と設計

リアプノフ密度を用いた不連続な右辺を持つシステムの安定性解析

リアプノフ密度を用いた非線形システムの安定性解析(より正確には、解軌道の平衡点への収束性の解析)においては、ベクトル場が C^1 級であることが要請される。これは、リアプノフ密度により定義された測度の解軌道に沿った変化率を定式化する際の積分の変数変換に解軌道の初期値についての微分可能性が用いられることによる。本研究では、まず〔引用文献〕の解析の結果を状態フィードバック則の設計に適用し、二乗和計画により区分的に C^1 級かつリプシッツ連続なベクトル場を持つ非線形システムの状態フィードバック則の設計法を示した〔学会発表〕。つぎに、解軌道がベクトル場の不連続面(平衡点を通る一つの超平面)において横断的な場合を考え、解軌道の収束性を証明するリアプノフ密度の満たすべき条件を示した。まず、解軌道が不連続面を複数回通過する際の、通過時刻の間隔(滞留時間)に正の下限が存在することを仮定した場合の条件を〔雑誌論文〕で示し、フィードバック則の設計への展開を〔学会発表〕で行った。〔雑誌論文〕では扱える不連続面を一般化し、滞留時間の仮定を「コンパクトな初期値の集合から出発する解軌道が有限時間を通して不連続面の個数は有限個である」という仮定に緩めた。これらの成果により、不連続な右辺を持つ非線形システムの一つのクラスに対してリアプノフ密度を用いた解析法を拡張することができた。

リアプノフ密度を用いた解軌道の指数収束性解析

リアプノフ密度を用いて、非線形システムの解軌道が平衡点に指数収束することを保証する条件を示した。拡大系を構成することで、平衡点への指数収束条件を拡大系のある不変集合への収束条件に等価変換し、後者に対するリアプノフ密度による条件を導くことで指数収束性条件を得た〔雑誌論文〕。さらに〔学会発表〕で、状態フィードバック則の設計を二乗和計画で行うための方法

について検討した。

リアプノフ密度を用いた非線形時変システムの安定性解析

時変非線形システムの安定性解析に関する結果は、従来研究では平衡点の局所的な安定性を仮定するもの〔引用文献〕しか知られていなかった。本研究では、平衡点の安定性の仮定を必要としないリアプノフ密度の条件を導いた〔雑誌論文、学会発表〕。得られた密度関数の条件は〔引用文献〕で示されたものと似た形の不等式から成るが、リアプノフ密度の積分可能性条件における積分の領域が異なっている。この領域を発見したことが時変システムに対する本研究の結果のポイントである。この結果は、外部入力信号を含むシステムなどへの応用が期待される。

<引用文献>

- J. De Caigny et al.: Gain-Scheduled dynamic output feedback control for discrete-time LPV systems, *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, Vol. 22, 2012, 535-558
増淵, 松阪, 太田: 離散時間ゲインスケジュールド制御系設計のための新たなパラメータ依存LMI, *システム制御情報学会論文誌*, Vol. 27, 2014, No. 2, 36-41
増淵, サイ: ハイブリッドシステムの制御 V - スイッチドシステムの解析と制御, *システム/制御/情報*, Vol. 52, 2008, No. 1, 25-31
A. Rantzer: A dual to Lyapunov's stability theorem, *Systems & Control Letters*, Vol. 42, 2001, 161-168
I. Masubuchi and Y. Ohta: A Lyapunov-density criterion for almost everywhere stability of a class of Lipschitz continuous and almost everywhere C^1 nonlinear systems, *International Journal of Control*, Vol. 87, 2014, No. 2, 422-431
P. Monzón: Almost global stability of time-varying systems, *Proceedings of the Cngresso Brasileiro de Automatica*, 2006, 198-201

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

- Izumi Masubuchi and Yuzo Ohta: A Lyapunov-density result for stability analysis of a class of discontinuous nonlinear systems, *Proceedings of the SICE International Symposium on Control Systems 2015 (Part of the 2nd Multi-symposium on Control Systems)*, 査読有, 2015, No. 712-2

Yoshinobu Suzuki, Izumi Masubuchi, and Yuzo Ohta: Gain-scheduled control of attitude of a satellite: synthesis via G-scaling, Proceedings of the SICE Annual Conference 2015, 査読有、2015, 1009-1012

Izumi Masubuchi and Yuta Yabuki: Improved results on discrete-time gain-scheduled controller synthesis via parameter-dependent LMIs, Proceedings of the 2016 SICE International Symposium on Control Systems, 査読有、2016, No. 3A4-3

Izumi Masubuchi and Yuzo Ohta: Analysis of almost-everywhere stability of a class of discontinuous systems via Lyapunov densities, Proceedings of the 15th European Control Conference, 査読有、2016, 567-574

Izumi Masubuchi, Shota Ishii, Yuzo Ohta, and Masami Saeki: Gain-scheduled control via switching of LTI controllers and state reset, Asian Journal of Control, Vol. 18, 査読有、2016, No. 5, 1619-1629

Izumi Masubuchi and Takahiro Kikuchi: Lyapunov density for almost attraction of nonlinear time-varying systems: a condition without assuming local stability, Proceedings of the 25th Mediterranean Conference on Control and Automation, 査読有、2017, 196-173

Izumi Masubuchi and Shohei Sakaguchi: Consensus-based rendezvous control of double integrators via binary relative positions and velocity feedback, IMA Journal of Mathematical Control and Information 掲載決定、査読有、2017, dnx033

電子版 DOI: 10.1093/imamci/dnx033
Tsukasa Sakaguchi and Izumi Masubuchi: Exponential convergence analysis of nonlinear systems via Lyapunov densities, Proceedings of the SICE Annual Conference 2017, 査読有、2017, 369-372

[学会発表](計10件)

鈴木芳信、増淵泉、太田有三: 人工衛星を対象とした G スケーリングによるゲインスケジュールド補償器の設計, 第 58 回システム制御情報学会研究発表講演会、2014

鈴木芳信、増淵泉、太田有三: 人工衛星の姿勢制御におけるゲインスケジュールド補償器の簡単化について, 計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会、2015

高木淳平、増淵泉、太田有三: リアプノ

フ密度を用いた区分的 C^1 システムの非線形制御則の計算、第 59 回システム制御情報学会研究発表講演会、2015

高木淳平、増淵泉、太田有三: リアプノフ密度による不連続なベクトル場を持つ非線形システムの安定解析およびその計算法、第 58 回自動制御連合講演会、2015

矢吹裕大、増淵泉、太田有三: 1 時刻前のスケジューリングパラメータ値を併用する離散時間ゲインスケジュールド制御器の性能について、第 58 回自動制御連合講演会、2015

阪口宰、増淵泉: リアプノフ密度による非線形システムの指数安定性の解析、平成 28 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会、2017

阪口翔平、増淵泉: 二値の観測量を用いた二重積分器のダイナミクス持つマルチエージェントシステムの合意位置制御、平成 28 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会、2017

矢吹裕大、増淵泉: 拡大 LMI を用いた 1 時刻前のスケジューリングパラメータ値を併用する離散時間ゲインスケジュールド制御器の設計、平成 28 年度計測自動制御学会関西支部・システム制御情報学会若手研究発表会、2017

菊池貴大、増淵泉: リアプノフ密度による非線形時変システムの収束性の解析、第 61 回システム制御情報学会研究発表講演会、2017

阪口宰、増淵泉: リアプノフ密度による非線形システムの指数収束性を有するフィードバック制御、第 5 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム、2018

[その他]

研究代表者ウェブページ:

<http://www2.kobe-u.ac.jp/~msb>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

増淵 泉 (MASUBUCHI, Izumi)

神戸大学・大学院システム情報学研究所・教授

研究者番号: 90283150