

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04209

研究課題名(和文) アファインな非線形基底を用いたゲインスケジュールド制御法の確立

研究課題名(英文) Synthesis of gain scheduled control systems based on nonlinear affine basis

研究代表者

児島 晃 (Kojima, Akira)

東京都立大学・システムデザイン研究科・教授

研究者番号：80234756

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：ゲインスケジュールド制御は、対象の特性変化をスケジューリングパラメータに反映させて制御系を構成する手法であるが、パラメータが非線形性をもつ場合に設計が難しく、計算負荷が増大する課題を有していた。本研究では、ベジェ曲線の生成に用いられるBernstein基底に着目し、パラメータの多項式非線形性を考慮したゲインスケジュールド制御法を導いた。そして、設計条件に現れるパラメータ依存の線形行列不等式がパラメータ非依存のものに帰着され、原問題の可解性が任意の精度で検証できることを明らかにした。つぎに、これらの成果を自然エネルギー大量導入時の系統制御・機械系の制御問題に適用し、手法の有用性を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

制御システムを構成する上で重要な課題は、広い動作範囲で適切な動きを保証することであり、このような課題を克服するために、ゲインスケジュールド制御法が広く用いられてきた。しかしながら、その設計には負荷の高い計算を要し、また性能の検証が容易でないという課題があった。本研究は、これらの設計に利用可能な計算法を、Bernstein基底とよぶ非線形基底を導入することにより導き、原問題を任意の精度で解き、設計上達成できる性能を検証できることを示した。そして提案法を、自然エネルギー大量導入時の系統制御問題、機械系の制御問題に適用し、その特徴を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Parameter-dependent LMIs (linear matrix inequalities) have been playing a crucial role in characterizing the controller design for parameter varying systems, and comprehensive design methods have been established for linear parameter varying systems. However, the parameter-dependent LMIs are generally difficult to compute, and efficient computation methods have been required in order to broaden the practical application fields. In this research, we propose a computation method for polynomial parameter-dependent LMIs based on the Bernstein basis with parameter region partitioning. Furthermore, it is shown that the conservativeness of the proposed method is characterized in terms of the parameter region partitioning, and the solution accuracy is recovered at the 2nd order of the maximal region size. The proposed methods are applied to the gain scheduled control for mechatronics and power grid systems, and the features of the resulting systems are discussed.

研究分野：システム制御工学

キーワード：ゲインスケジュールド制御 線形パラメータ変動システム ロバスト制御 線形行列不等式 非線形アファイン基底

1. 研究開始当初の背景

制御系設計法は、特性変化と大域的な動作を扱う制御法へと発展を遂げ、それらのひとつにゲインスケジュールド制御法がある[1]。ゲインスケジュールド制御法は、特性変化をスケジューリングパラメータに反映させて制御系を構成する方法であり、エンジンの回転数に応じてゲインを変更する制御系など、特性を考慮した効果的な設計が可能になる。しかしながら本手法は、スケジューリングパラメータが非線形性をもつ場合に設計が難しく、パラメータの値をグリッドで近似するなど、計算負荷が増大する課題を有している[2]。

研究代表者は、ディーゼルエンジンの制御において回転数の2次多項式が含まれるゲインスケジュールド制御問題を考察し、動作領域端点のシステム表現に加え、動作領域中央に仮想的なシステムを定めて制御則を設計すると、動作領域全体の性能が適切に確保できることを見出した[3]。これらの手法は、多項式表現の非線形特性をアファインな基底上で再定義したものであり、その特徴を明らかにすれば、広いクラスのパラメータ変動システムに対して、パラメータ依存の線形行列不等式 (Linear Matrix Inequalities, LMI) に基づく設計法を系統的に導くことが可能になると期待される。

これらの過程から、研究代表者はつぎの課題に着目し、パラメータの非線形性を適切に扱うことができるゲインスケジュールド制御法の確立を研究目的に定めた。

- (a) 多項式パラメータに依存する LMI 条件に対して、可解条件 (必要十分条件) を判定するアルゴリズムを導く。
- (b) 多項式非線形性をもつ線形パラメータ変動システムに、広く適用可能なゲインスケジュールド制御法を確立する。
- (c) 結果を、代表的な構造をもつ制御問題に適用し、応用面から設計法の特徴を評価する。

2. 研究の目的

本研究では、上述の着想からパラメータの多項式非線形性を扱うゲインスケジュールド制御法を開発し、制御則の構成法を明らかにする。そして結果を、理論・応用の面から重要と考えられる自然エネルギー大量導入時の系統制御、機構的特性を考慮したマニピュレータの制御問題に適用し、その有用性を評価する。

パラメータの多項式非線形性を扱うゲインスケジュールド制御法

多項式パラメータを有する LMI の解法を導き、可解条件の判定法を明らかにする。そして多項式次数に合わせてアファインな非線形基底を導入することにより、1) 可解性に対する十分条件がパラメータ非依存の LMI により与えられること、2) パラメータの定義域を有限分割すれば、1) の結果から任意の精度で必要十分条件に接近できることを明らかにする。

自然エネルギー大量導入時の系統制御

太陽光発電・風力など自然エネルギーが大量に導入された系統では、自然エネルギーの供給変動がより大きな擾乱となり、軽負荷時の特性変化を的確に評価したロバスト制御が重要になる。本課題により、自然エネルギー大量導入時の系統特性を反映させた負荷周波数制御の課題設定を行い、系統の慣性変化を考慮した負荷周波数制御系の構成法を考察する。

機構的特性を考慮したマニピュレータの制御

多関節のロボットマニピュレータに着目し、先端負荷および姿勢の変化を考慮したゲインスケジュールド制御系を構成する。そして、これらの変化が慣性行列の変化により表わされことに着目し、軌道追従制御問題における慣性の補償効果をシミュレーション、実験により評価する。

3. 研究の方法

本研究の目的に定めた、パラメータの多項式非線形性を扱うゲインスケジュールド制御法の開発、および、自然エネルギー大量導入時の系統制御、機構的特性を考慮したマニピュレータの制御に対して、つぎの方法により研究を展開した。本研究の基幹をなす部分は課題であり、その進展に合わせて、応用課題、の研究が計画されている。

パラメータの多項式非線形性を扱うゲインスケジュールド制御法

多項式非線形をもつパラメータを考慮した LMI の解法を明らかにするためには、特にパラメータ領域の分割と解法の保守性の関係が明確になる非線形基底を導入することが必要である。本研究ではコンピュータグラフィックスにおいてベジェ曲線を生成するために用いられる多項式基底 (Bernstein 基底) を導入し、パラメータ依存の LMI をパラメータ非依存のものに変換する方法を検討した。Bernstein 基底は、パラメータ化した曲線をいくつかの孤立点 (制御点) と内挿の規則から生成するものであり、この特徴を利用すればパラメータ依存の LMI を逆にパラメータ非依存の LMI の凸結合により表現することが可能になる。本課題では、これらの特徴に着目し、複数のパラメータをもつ LMI に対して系統的な計算法を導く方法を考察している。

自然エネルギー大量導入時の系統制御

太陽光発電などの自然エネルギーが大量導入された負荷周波数制御系に着目し、慣性変化に対する調整則を導く方法を考察する。負荷周波数制御は、階層的な制御システムにより構築されており、その性能を調整するためには制御ゲインの調整則を確立する方が応用の範囲が広い。そこで、本課題においては、の成果に基づき、負荷周波数変動の抑制性能を H2 ノルムにより評価し、その性能を定数ゲイン出力フィードバック則の中で調整する方法を検討した。ここで、H2 ノルムは負荷変動など白色ノイズにより近似される変動成分を評価する上で有用であり、また

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Shogo Ikekawa, Kotaro Hashikura, Akira Kojima	4. 巻 1
2. 論文標題 A characterization of preview load frequency control in terms of power system inertia	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of SICE Annual Conference 2021	6. 最初と最後の頁 184-187
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Hitomu Saito, Akira Kojima	4. 巻 1
2. 論文標題 Gain scheduled control of a parallelogram linkage robot manipulator considering nonlinearity due to mechanical properties	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. of SICE Annual Conference 2021	6. 最初と最後の頁 1305-1308
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 児島 晃, 端倉 弘太郎	4. 巻 56
2. 論文標題 区間むだ時間系に対する有界実補題の導出	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 475-482
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.56.475	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 児島 晃	4. 巻 55
2. 論文標題 アファインな非線形基底を用いたパラメータ依存LMIの解法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 429-438
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.9746/sicetr.55.429	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akira Kojima	4. 巻 1
2. 論文標題 A calculation method of parameter-dependent LMIs on Bernstein polynomial basis: polytopic representation case	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. of 2019 IEEE 58th Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 2850-2857
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC40024.2019.9028962	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Akira Kojima	4. 巻 1
2. 論文標題 A characterization of parameter-dependent LMIs on Bernstein polynomial basis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. of 2018 IEEE Conference on Decision and Control	6. 最初と最後の頁 4687-4694
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/CDC.2018.8619253	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 池川聖悟, 児島 晃
2. 発表標題 H2制御性能に着目したゲイン調整法とその負荷周波数制御への応用
3. 学会等名 第9回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 神奈川 (Online)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 門司 達也, 齊藤 仁夢, 児島 晃
2. 発表標題 機構的特性を考慮した3自由度マニピュレータの追従制御
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会 (SC1 '22), 京都
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 池川 聖悟, 宮本 楓雅, 端倉 弘太郎, 児島 晃, 益田 泰輔
2. 発表標題 予測誤差を考慮した予見負荷周波数制御と慣性定数の評価
3. 学会等名 第63回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 齊藤 仁夢, 児島 晃
2. 発表標題 機構的特性を考慮したゲインスケジュールド制御法の開発
3. 学会等名 第63回 自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 池川聖悟, 端倉弘太郎, 児島 晃
2. 発表標題 系統慣性の変化を考慮したゲインスケジュールド負荷周波数制御法の検討
3. 学会等名 第8回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 石友真, 花房健多, 児島晃
2. 発表標題 多項式非線形基底を用いたロボットマニピュレータのゲインスケジュールド制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 村崎智文, 児島 晃
2. 発表標題 非線形特性を考慮したマニピュレータのゲインスケジュールド制御
3. 学会等名 第19 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 児島 晃
2. 発表標題 Bernstein基底を用いたパラメータ依存LMIの解法 - ポリトープ型パラメータを扱う場合 -
3. 学会等名 第6回 計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>東京都立大学システムデザイン研究科 児島研究室HP http://www.comp.sd.tmu.ac.jp/akojima-lab/index.html</p>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------