

令和元年6月12日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2015～2018

課題番号：15K06159

研究課題名（和文）実システムへの適用に適したロバストゲインスケジューリング制御器設計法開発と実証

研究課題名（英文）Design Method Invention of Practical Robust Gain-Scheduled Controllers and Its Verification via Application to Practical Systems

研究代表者

佐藤 昌之（SATO, Masayuki）

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・航空技術部門・主任研究開発員

研究者番号：90358648

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：PID制御器と構造制約がない制御器の中間として「オブザーバー併合型出力フィードバック制御器」が有用であること、かつ実システムに対する設計問題に頻出する複数個の不確かさ条件下における制御性能最適化を考慮して、「オブザーバー併合型出力フィードバック制御器と不確かさに対するスケールリング行列の同時設計」問題に取り組み、プラントの特性変化が利用出来る場合と利用できない場合の二つの設計法を考案した。

一方、「不確かなスケジューリングパラメータを想定したゲインスケジュールド出力フィードバック制御器設計問題」の性能改善に取り組み、従来法より性能が向上する設計法を考案し、実験用航空機への適用により有用性を示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

比例積分微分（PID）制御と呼ばれる非常に簡単な構造を有する制御器と高性能な制御性能を有する制御器の中間的な制御器として知られるオブザーバー併合型出力フィードバック制御器の設計問題に対して、繰り返し計算を用いることなく、制御性能に関するスケールリング行列も最適化する設計法を示した。

また、不確かなスケジューリングパラメータしか使用できない前提でのゲインスケジュールド制御器設計問題についても、理論的な性能改善方法を示し、改善方法が実際のシステムに対する制御器設計においても有効であることを実験用航空機の飛行制御器設計により示し、さらに実環境下での性能改善、すなわち、飛行試験による性能改善を確認した。

研究成果の概要（英文）：We investigate the design problem of observer-based output feedback controllers with the simultaneous design of scaling matrices for performance blocks. The choice of observer-based controller is the compromise between the transparency in PID controllers and good control performance in non-structured H infinity controllers. The simultaneous design of scaling matrices and controllers is imposed by considering that multiple uncertainty blocks should be incorporated when designing controllers for practical systems. For this problem, we invented design methods for robust controllers as well as gain-scheduled controllers.

We also investigated conservatism reduction in the design problem of gain-scheduled controllers depending on inexact scheduling parameters, and proposed a new design method via so-called elimination lemma. The applicability of the method was examined by designing flight controllers for experimental aircraft and conservatism reduction was confirmed by flight tests.

研究分野：制御工学

キーワード：ロバスト制御 ゲインスケジュールド制御 スケールリング行列 飛行制御

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

福島第一原子力発電所の事故に伴う放射性物質拡散の影響調査に無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle; UAV) が使用されるなど, UAV の有効性が広く認知されつつあった. しかし, ドローンと呼ばれる回転翼 UAV では飛行速度が小さいために広範囲の調査は難しく, 一方, 固定翼 UAV では飛行速度は大きいものの離着陸用の施設もしくは用地が必要となるため, 大規模災害の際には運用性に難があった. これらの長所を組み合わせた機体として, 垂直離着陸 (Vertical Take-Off and Landing; VTOL) UAV が古くから考案されてきた. しかし, 回転翼機と固定翼機の二つの特性を有することから容易に推測されるように, 飛行特性が大きく変化し, その特性変化に応じた制御器, すなわち, ゲインスケジュールド (Gain-Scheduled; GS) 制御器を設計する必要性は広く知られていた. 研究代表者は, VTOL UAV の有力な形態の一つとして提案されている Quad Tilt Wing UAV (QTWUAV) に対して, 微分先行型 PID 制御による GS 制御器を設計し, 垂直離陸, 水平飛行, 垂直着陸の一連の飛行を成功させていたが, 飛行中に振動的な挙動が見られるなど, 性能改善が必要となっていた.

一方, GS 制御器設計法として, 線形行列不等式 (Linear Matrix Inequality; LMI) を用いた設計法が約 30 年前に提案され, 様々な実システムに対する適用の報告が行われていた. しかし, PID 制御器に比べて複雑な構造, すなわち, 観測出力信号から制御入力信号までは, 一般に多入出力系 (Multiple Input Multiple Output; MIMO) であることから単一入出力系 (Single Input Single Output; SISO) への分解はできず, また, オブザーバー併合型出力フィードバック制御器のような特殊な構造を有していないために, 得られた GS 制御器の妥当性は現場のエンジニアには判別しにくいという欠点を持っていた. また, GS 制御器を設計する際のチューニングパラメータと得られた GS 制御器との関係が分かりにくいことから, 再設計の際の改善指針があいまいとなり, 妥当な GS 制御器を得るまでのチューニング回数を増加させていた. このように, 当時までに提案されていた LMI を用いた GS 制御器設計法は, 実システムに対する制御器設計問題を考えると, 必ずしも見通しが良いものではなかった.

2. 研究の目的

革新的な航空機形態である VTOL UAV の実現を目指して, 機体特性の大幅な変化および実システムにおいて不可避なモデリング誤差の両方に対応する飛行制御則設計に適用可能な「実システムへの適用に適したロバスト GS 制御器設計法開発と実証」を目的とする.

3. 研究の方法

計画当初の予定を以下に記す.

[2015 年度]

【実システムへの適用に適したロバストゲインスケジューリング制御器設計法開発】

以下の 5 つの仕様を満たす制御器として, オブザーバー併合型出力フィードバックを想定した制御器設計法を開発する.

仕様 1: スケジューリングパラメータが不正確でも制御性能を確保

仕様 2: ノンパラメトリックな不確かさに対するロバスト性能を確保するが, その際に制御性能を過度に犠牲にしないために, 異なる信号の大きさを調整するスケーリング行列の導入

仕様 3: 1 サンプルあたりのスケジューリングパラメータの変化が有限であることを考慮したパラメータ依存 Lyapunov 関数の導入

仕様 4: 設計パラメータと得られる制御器の特徴との関係が容易に関連づけられる設計法

仕様 5: 制御ゲインの役割が明確となる制御器設計法

[2016 年度]

【JAXA 所有の実験システムに対する設計による有効性および有用性確認】

2015 年度に開発する dynamic observer 併合型出力フィードバック GS 制御器設計法を用いて JAXA 所有の実験システムに対する設計および以下の点における有用性の確認を実施する.
・提案設計法における設計パラメータと得られる制御器の特徴が容易に関連づけられているか?

・得られた制御器のゲインの役割が明確になっているか?

これらを確認する適用先として JAXA 所有の実験用航空機 MuPAL- もしくは QTWUAV を想定しているが, 状況が許せば, 両方の機体に対して設計することで, 提案設計法の有効性の限界および上記二点の有用性の普遍性に関する知見を得ることが期待される. また, 実環境下における制御性能の検証として, 飛行試験による制御性能確認も実施する.

[2017 年度]

【実ミッションへの適用検討】

前年度までは, 実験システムに対する設計による設計手法の有効性確認を主に実施するが,

より提案手法の有用性を確認するために、実ミッションとして、日本原子力研究開発機構と共同で開発している放射線観測無人機への適用を検討する。この機体は、ガソリンを用いるエンジンを動力としているために、重量が 50[kg] から 40[kg] 程度まで変化する一方で、放射線観測のためには三次元空間の精密な位置制御が必要となる。特に、福島原子力発電所近くの比較的平坦な土地だけでなく、丘陵地帯における放射線モニタリングでは、地面高に依じて高度を変化させる terrain-following が必要となり、速度および機体重量に対応しながらも、それらの値はあまり正確に得られないという状況下で制御性能を向上させるという本研究応募の内容に合致した設計仕様となっている。

上記に基づき研究を進めようとしたが、予期せぬ二つの事情（研究代表者の上司が 2015 年度途中で退職し実験用航空機の管理が業務として加わったこと、および 2016 年度途中から国際共同研究「VISION」が開始されかつ当初予定していた人員が別業務に携わるようになったために VISION の管理業務も研究代表者が担う必要が発生したこと）から、本研究の進捗が遅れた。そのため、1 年間の延長を行い、以下の内容および方法で研究を進めた。

[2015 年度]

【仕様 1～3 を満たす GS 制御器の拡張、および実験用航空機 MuPAL- を用いた実証】

2014 年度までに開発した「仕様 1～3」を満たす GS 制御器の有用性を高めることを目的に、制御器に提供されるスケジューリングパラメータ内の不確かさが、絶対的な不確かさおよび比例的な不確かさの両方から構成された不確かさである場合への対応方法を検討し、もともとの設計法がスケジューリングパラメータに関して affine であることを利用することで、所望の拡張を達成する設計法を示した。また、このことにより、制御器に提供されるスケジューリングパラメータ内の不確かさをタイトに見積もることが可能となり、結果として制御性能を向上させる余地が生まれた。この事実、すなわち、スケジューリングパラメータ内の不確かさをタイトに見積もることが制御性能の向上につながることを、実験用航空機 MuPAL- に対する制御器設計において示し、実環境における性能向上も確認した。

[2016 年度]

【仕様 1～5 を満たす GS 制御器設計法開発に向けた初期結果】

仕様 1～5 を満たす GS 制御器として、スケーリング行列とオブザーバー併合型出力フィードバック GS 制御器の繰り返し最適化による設計を想定していたが、繰り返し計算を許容するならば、オブザーバー併合型出力フィードバックのような制約ではなく、PID 制御のような構造制約を課すことも可能であること、また、繰り返し計算は数値的な誤差に非常に脆弱であることから、可能な限り、one-shot での設計方法を目指した。その結果、当初目的に向けた初期結果として、設計対象であるプラントが線形時不変システムである場合に、プラントがある構造制約を仮定するならば、スケーリング行列とオブザーバー併合型出力フィードバック制御器の同時設計（ただし、大域的な最適解とは限らない）が可能であることを示した。なお、他のヒューリスティックな設計法と比較して設計時はもちろん、事後評価においても遜色ない性能を有する可能性があることを数値例により示した。

[2017 年度]

【仕様 1～5 を満たす GS 制御器設計法の開発】

2016 年度の初期結果をベースに、仕様 1～5 を満たす「オブザーバー併合型出力フィードバック GS 制御器とスケーリング行列の同時設計法」を開発し、想定する制御性能として、スケール H 性能だけでなく一般的な二次形式評価関数に対する設計法も考案した。

[2018 年度]

【実システムへの適用検討と従来 GS 制御器設計法の改良】

2017 年度に開発した設計法を用いて、実験用航空機 MuPAL- に対する設計を試みたものの、「オブザーバー併合型出力フィードバック」という構造制約から、従来 GS 制御器ほどの制御性能が達成できないという検討結果が得られ、一旦設計を中断した。

一方、その検討の中で、GS 制御器に構造制約を課さない一般的な「不確かなスケジューリングパラメータを想定した GS 出力フィードバック制御器」定式化に対する性能改善問題を再考し、不確かなスケジューリングパラメータを使用するための over-bounding 方法が必要以上に厳しい条件となっていること、消去補題と呼ばれる方法を用いることで必要以上に条件を厳しくない over-bounding が可能であることを示し、理論的な改善を保証する設計法を示した。なお、実験用航空機 MuPAL- に対する制御器設計において、従来法と比較して制御性能が向上することを確認し、さらには、実環境においても制御性能の向上を確認した。

4. 研究成果

研究成果は以下のとおりである。

- ・ 構造制約を有さない一般的な GS 出力フィードバック制御器設計法に関して
 - 提供されるスケジューリングパラメータ内の不確かさのタイプにかかわらず設計法を

考案し，結果として，不確かさのタイトなモデリングを可能とし，最終的には制御性能向上につながることを実験用航空機 MuPAL- に対する設計を用いて示した．なお，実験においても性能向上を確認した．

- 提供されるスケジューリングパラメータ内の不確かさを over-bounding する方法について，従来方法ではその方法自体が制御性能劣化につながっていたこと，および，その改善方法として，消去補題を用いた over-bounding 法が有効であることを示した．さらに，この有効性を，実験用航空機 MuPAL- に対する設計を用いて示し，実験においても性能向上を確認した．
- ・ オブザーバー併合型出力フィードバック GS 制御器設計法に関して
 - プラントにある構造制約を仮定することで，スケールド H 性能だけでなく一般的な二次形式評価形式を含むスケーリング行列とオブザーバー併合型出力フィードバック GS 制御器の同時設計法を開発した．
 - 不確かさパラメータを有する線形システムに対してロバスト制御器を設計する場合にも，同様の設計法が適用可能であることを示し，その場合の設計法を開発した．

なお，研究提案当初に想定していた UAV への適用は，UAV に関する法律の施行に伴い，UAV の実験実施が難しくなったことから中止し，実験用航空機 MuPAL- のみによる実証となった．

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 4 件)

M. Sato: Observer-Based Robust Controller Design with Simultaneous Optimization of Scaling Matrices, IEEE Transactions on Automatic Control. (accepted)

M. Sato: Gain-Scheduled Flight Controller Using Bounded Inexact Scheduling Parameters, IEEE Transactions on Control Systems Technology, Vol. 26, No. 3, pp. 1074-1082, 2018.

M. Sato: Simultaneous Design of Discrete-Time Observer-Based Robust Scaled-H Controllers and Scaling Matrices, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 11, No. 1, pp. 65-71, 2018.

佐藤 昌之：連続時間オブザーバー併合型出力フィードバック Scaled H 制御器とスケーリング行列の同時設計，計測自動制御学会論文集，Vol. 53, No. 8, pp. 455-462, 2017 .

〔学会発表〕(計 16 件)

佐藤 昌之，瀬部 昇：様々な制御器設計問題への Elimination lemma の逆方向適用，第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム，熊本，2019/03/09 .

M. Sato and D. Peaucelle: Continuous-Time Gain-Scheduled H Controllers with Causality for Scheduling Parameters via Parameter-Dependent Lyapunov Functions, IEEE CDC, Miami beach, USA, Dec. 18th, 2018, 2018.

M. Sato: Robust Gain-Scheduled Flight Controller via A New Formulation for Over-Bounding Scheduling Parameter Errors. 2nd IFAC Workshop on LPV Systems, Florianopolis, Brazil, Sept. 3rd, 2018.

M. Sato and D. Peaucelle: A New Method for Gain-Scheduled Output Feedback Controller Design Using Inexact Scheduling Parameters. IEEE CCTA, Copenhagen, Denmark, Aug. 24th, 2018.

M. Sato: Conversion from Full-Order Controllers to Observer-Structured Controllers. 26th Mediterranean Conference on Control and Automation, Zadar, Croatia, June 21st, 2018.

M. Sato: Discrete-Time Observer-Based Gain-Scheduled Output Feedback Controller Design with Simultaneous Optimization of Scaling Matrices. Asian Control Conference, Gold Coast, Australia, Dec. 20th, 2017.

M. Sato, M. Abbasghorbani, and M. H. Asemi: Continuous-Time Observer-Based Gain-Scheduled Output Feedback Controller Design with Simultaneous Optimization of Scaling Matrices. IEEE CDC, Melbourne, Australia, Dec. 12th, 2017.

佐藤 昌之: オブザーバー併合型出力フィードバック制御とスケージング行列の同時設計, 第60回自動制御連合講演会, 東京, 2017/11/11.

M. Sato: Observer-Based Continuous-Time Robust Scaled-H Controller Design with Simultaneous Optimization of Scaling Matrices. IEEE CCTA, Hawai'i, Aug. 29th, 2017.

M. Sato: Discrete-Time H Preview Feedforward Controller Using Uncertain Prior External Input Information via GKYP Lemma. IFAC World Congress, Toulouse, France, July 10, 2017.

佐藤 昌之: 不確かさをタイトにモデル化したスケジューリングパラメータを用いたゲインスケジュールド飛行制御, 第4回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, 岡山, 2017/03/08.

佐藤 昌之: ディスクリプタシステム表現と GKYP 補題に基づく不確かな事前外部入力情報を用いた離散時間フィードフォワード予見制御, 第59回自動制御連合講演会, 北九州, 2016/11/10.

M. Sato: Discrete-Time Feedforward Controllers Using Prior External Input Information via Descriptor System Representation and GKYP Lemma. IEEE MSC, Buenos Aires, Argentina, Sept. 22nd, 2016.

M. Sato: Gain-Scheduled Model-Matching Flight Controller Using Inexact Scheduling Parameters. IFAC ACA, Sherbrooke, Canada, Aug. 22nd, 2016.

M. Sato: Gain-Scheduled Output Feedback Controllers for Discrete-Time LPV Systems Using Bounded Inexact Scheduling Parameters. CDC 2015, Osaka, Japan, Dec. 15, 2015.

M. Sato: Gain-Scheduled State Feedback Controllers for Discrete-Time LPV systems Using Scheduling Parameters Affected by Absolute and Proportional Uncertainties. 1st IFAC Workshop on Linear Parameter Varying Systems, Grenoble, France, Oct. 7, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年:
国内外の別:

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名:

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。