

機関番号：82645

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008～2010

課題番号：20760287

研究課題名（和文） 実用的なロバストゲインスケジューリング制御器設計法の開発

研究課題名（英文） Design Method Development of Practical Gain-Scheduled Controllers

研究代表者

佐藤 昌之（SATO MASAYUKI）

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究開発本部・研究員

研究者番号：90358648

研究成果の概要（和文）：本研究では、乱気流による事故を防止する飛行制御器設計に応用可能な「実用的なロバストゲインスケジューリング制御器設計法」の開発を進め、以下の二つの特徴を有する実用的なゲインスケジュールド出力フィードバック制御器の設計法を開発した。

- ・入手したスケジューリングパラメータに含まれる不確かさに対する頑強さ
- ・スケジューリングパラメータの微分に対する依存性の排除

また、提案設計法と従来設計法との関係を明らかにした。具体的には、得られるスケジューリングパラメータが正確である場合には従来設計法と同等の性能を有する制御器が常に設計可能であること、および設計の際に用いる Lyapunov 変数の構造に制約を課した従来設計法と少なくとも同等の性能を有する制御器が常に設計可能であることを示した。さらに、一部のスケジューリングパラメータが全く観測不可能な場合への拡張も行い、より実用性の高い制御器の設計法も開発した。

研究成果の概要（英文）：This research project has addressed the design problem of Gain-Scheduled Output-Feedback (GSOF) controllers for continuous-time Linear Parameter-Varying (LPV) systems, and has proposed a new design method for the problem with the following features:

- GSOF controllers have robustness against the uncertainties in the provided scheduling parameters, and
- GSOF controllers solely depend on the provided scheduling parameters.

It has also been proved that the method can produce GSOF controllers which have the same performance as those designed by conventional methods when exact scheduling parameters are available, and that the method is no more conservative than conventional methods using structured parameter-dependent Lyapunov functions.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	700,000	210,000	910,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	1,700,000	510,000	2,210,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御理論，パラメータ依存線形行列不等式，ゲインスケジューリング

1. 研究開始当初の背景

動作環境が大きく変化するシステム（たとえば、航空機）に対しては、その環境の変化に応じて制御ゲインの調整を行う「ゲインスケジュールド（Gain-Scheduled; GS）制御」が古くから用いられてきた。しかし、旧来のGS制御は、あらかじめ選定した複数の設計点に対してそれぞれ独立に制御器を設計した後にそれらを連結させる方法であった。この場合、動作範囲全体に対する制御性能の確認は膨大なシミュレーションに依存していた。この膨大な事後解析を不要とした方法として、システムの動作状況をあらわすスケジューリングパラメータを用いて、動作範囲全体をあらわす単一のシステムを求め、それを線形パラメータ依存（Linear Parameter-Varying; LPV）システムとして表現し、このLPVシステムに対してGS制御器を設計する問題が、この15年ほど、非常に盛んに研究されている。しかし、今までの設計法には以下の欠点があった。

- GS制御器設計の際に解く必要があるパラメータ依存行列不等式（Parameter-Dependent Linear Matrix Inequalities; PDLMI）を十分条件もしくは必要十分条件により解く設計法のほとんどが状態フィードバック制御器を対象としている。

- 設計時に用いられるLyapunov変数のパラメータ依存性と得られる制御器のパラメータ依存性は独立に指定できない。

特に、2番目の課題は、結果として複雑な制御器を設計することになるため、実用上、問題となっていた。

実用的なGS制御器を簡易に設計するためには、上記の問題を解決する必要がある。

2. 研究の目的

現在よりさらに安全な航空輸送実現を目指して、乱気流による事故を防止する飛行制御器設計に応用可能な「実用的なロバストゲインスケジューリング制御器の設計法開発」の研究を行った。なお、「実用的」とは、出力フィードバック制御器であること、Lyapunov変数と制御器のパラメータ依存性を独立に指定できることを意味する。

3. 研究の方法

本研究の最終目標は、実用的なGS制御器設計法の開発である。そこで、この最終目標に向けて、以下のフェーズに分けて研究を行った。

- (1) Slack Variable (SV) 法を用いた PDLMI の厳密な解法

- (2) GS オープンループシステム設計問題
 - (3) GS 状態フィードバック制御器設計問題
 - (4) GS 出力フィードバック制御器設計問題
- なお、開発した設計法を用いて飛行制御器を設計する際には、 H_∞ 制御における重み関数などによって適切な性能指標を定める必要がある。この適切な設定のためには、あらかじめ制御によって達成可能な制御性能の推定情報が非常に役立つ。そこで、乱気流による航空機揺動の抑制可能性をモデル予測制御によって求める方法についても検討した。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」において示したように、4つのフェーズに分けて研究を進めた。研究成果もこの4つに分類して、以下に示す。

- (1) PDLMI を解く方法として広く用いられている Sums-Of-Squares (SOS) 緩和による解法は、SV法と本質的に等価である。また、PDLMIに含まれるパラメータの領域が超直方体であるならば、計算複雑度を十分に高めることで厳密に解くことが可能である。
- (2) 一部のスケジューリングパラメータが不確かさをあらわす場合、それらのスケジューリングパラメータに依存しないオープンループシステムを設計する設計法を開発した。
- (3) 入手したスケジューリングパラメータに含まれる不確かさに対する頑強さを有するGS状態フィードバック制御器設計法を開発した。
- (4) 入手したスケジューリングパラメータに含まれる不確かさに対する頑強さを有し、かつスケジューリングパラメータのみに依存するGS出力フィードバック制御器設計法を開発した。

以下に、それぞれの詳細を述べる。

- (1) : SV法を用いた PDLMI の厳密な解法
PDLMI を解く強力な方法の一つとして、SOS 緩和を用いた方法が広く知られている。その他にも、SV法や領域分割法などの有効な方法が知られているが、これらの解法の包含関係はほとんど研究されていなかった。そこで、研究代表者がその有効性を過去に示しているSV法とSOS緩和法の関係について調べ、本質的には両者が等価であることを示した。また、PDLMIに含まれているパラメータの領域が超直方体の場合には、SV法を導入する行列をパラメータ依存行列とすることで、計算複雑度を十分に高めると厳密に解けることを示した。すなわち、GS制御器設計の際に解く必要が生じるPDLMIは、非

常に複雑な計算を許容すれば、SV 法によって厳密に解けることを示した。

なお、パラメータの領域が超直方体であるという問題設定は物理システムなどを考える際には妥当である。一方で、計算複雑度を高めることは、実用性の観点から問題となる場合が多い。特に、適用先として考えている航空機運動に対する制御器設計においては、パラメータ数が少なくとも3, 4個となることから、提案解法の適用にはさらなる工夫が必要と考えられる。

(2) : GS オープンループシステム設計問題

設計の際の用いる Lyapunov 変数は全てのスケジューリングパラメータに依存させながらも、設計するシステムはスケジューリングパラメータの一部のみに依存する GS オープンループシステム設計法を開発した。これは、Lyapunov 変数に構造制約を課し、設計対象システムの安定性判別に関わる箇所には十分に複雑なパラメータ依存性（例えば、多項式型のパラメータ依存性）を許容する一方で、設計するシステムの安定性に関わる箇所はパラメータ非依存としたことにより、上記の特徴を有するシステム設計が可能となった。

なお、設計するシステムの安定性に関わる Lyapunov 変数はパラメータ非依存であるが、システムそのものをパラメータ依存にさせることが可能であることから、Lyapunov 変数と設計システムのパラメータ依存性を独立に指定することが可能である。この特徴により、観測不可能なスケジューリングパラメータ（この場合、そのパラメータはシステムの不確かさを表現していることを意味する）には依存せず、観測可能なスケジューリングパラメータのみに依存するシステムが設計できるため、実用性が高い。この問題の具体的な適用先は、フィルタ設計問題や逆システム設計問題等がある。

(3) : GS 状態フィードバック制御器設計問題

フィードバック制御器設計問題においては、(2)において採用した Lyapunov 変数の構造制約を課しても、得られる制御器のパラメータ依存性は Lyapunov 変数のそれと独立に指定できない。そこで、入手可能なスケジューリングパラメータに不確かさが存在すると仮定し、その不確かさに頑強な制御器を設計することを目指した。これは、不確かさが大きくなれば、そのスケジューリングパラメータの信頼性が低くなり、そのスケジューリングパラメータにはほとんど依存しない制御器が得られ、結果として、Lyapunov 変数と制御器のパラメータ依存性を緩く指定できると見込まれたからである。

上記の考察を元に、制御器のみならず

Lyapunov 変数も不確かさを含むスケジューリングパラメータに依存するという構造制約を課すことによって、スケジューリングパラメータに含まれる不確かさに頑強な GS 状態フィードバック制御器の設計法を新たに開発した。

(4) : GS 出力フィードバック制御器設計問題

パラメータ依存 Lyapunov 変数を用いた従来の GS 出力フィードバック制御器は、スケジューリングパラメータのみならず、その微分にも依存するという特徴を有していた。このスケジューリングパラメータの微分は、原理的に入手不可能であるため、スケジューリングパラメータの微分に依存しない制御器設計が望まれた。すなわち、(3)の方法を出力フィードバック制御器設計問題に拡張する場合には、スケジューリングパラメータの微分に対する非依存性も新たに課す必要があった。

上記の問題とスケジューリングパラメータに含まれる不確かさに対処する方法として、これらの問題となっている項を別の取り扱いやすい項に置き換えた設計問題を考案し、その問題を解くことで、所望の GS 出力フィードバック制御器が設計可能な方法を新たに開発した。さらに、一部のスケジューリングパラメータが全く観測できない場合への拡張も行った。なお、この場合は、Lyapunov 変数がパラメータに依存しない定数行列となるため、パラメータの時間変化率が有限である場合には、過度に安定性を確保した制御器設計となる。

上記の他に、乱気流による航空機揺動の抑制可能性を推定する方法について検討を行った。これは、開発した制御器設計法を用いて飛行制御を設計する場合、設計指標を適切に定める必要があり、あらかじめ制御によって達成可能な制御性能の推定情報が非常に役立つからである。なお、この問題に対しては、昨今の電子機器および観測機器の急速な発展を考慮し、何らかの観測機器によって事前に乱気流情報が入手可能な場合に対しても適用可能な方法を検討し、モデル予測制御を用いて達成可能な制御性能を推定する方法を開発した。

なお、本課題においては、飛行制御設計の際の不確かさ表現として有効性が認められている制御入力信号に対する不確定な無駄時間を導入することで、システムの不確定性を考慮した。その結果、この不確かさに頑強な制御入力を計算するためには、有限個のシステムからなるシステム集合に対する共通制御入力を探せば必要かつ十分であることを示し、具体的な制御アルゴリズムも示した。また、このアルゴリズムをオンラインで解く

シミュレーションを実施することで、不確かな無駄時間が制御入力に加わるという現実的な状況下での乱気流影響の抑制可能性が判別でき、設計指標を適切に定めることが可能となった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計5件)

1. M. Sato: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Depending Solely on Scheduling Parameters via Parameter-Dependent Lyapunov Functions, *Automatica* (accepted). (査読有り)
2. M. Sato: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters for Linear Parametrically Affine Systems, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 4, No. 2, 145/152, 2011. (査読有り)
3. M. Sato: Gain-Scheduled State-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters: Stabilizing and H_∞ Control Problems, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 3, No. 4, 285/291, 2010. (査読有り)
4. M. Sato: Gain-Scheduled Open-Loop System Design for LPV Systems Using Polynomially Parameter-Dependent Lyapunov Functions, *Systems and Control Letters*, Vol. 59, No. 5, 265/276, 2010. (査読有り)
5. D. Peaucelle and M. Sato: LMI Tests for Positive Definite Polynomials: Slack Variable Approach, *IEEE Trans. Automatic Control*, Vol. 54, No. 4, 886/891, 2009. (査読有り)

[学会発表] (計13件)

1. M. Sato and D. Peaucelle: Gain-Scheduled H_∞ Controllers being Derivative-Free of Scheduling Parameters via Parameter-Dependent Lyapunov Functions, *IFAC World Congress*, Milan, Italy, 2011 (to appear).
2. 佐藤昌之: LPV システムに対する実用的なゲインスケジュールド出力フィードバック制御器設計, 第11回制御部門大会, 沖縄, 2011年3月16日.
3. M. Sato: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters, *IEEE Conference on Decision and Control*, Atlanta, USA,

3174/3180, December 16, 2010.

4. 佐藤昌之: スケジューリングパラメータの微分に依存しないゲインスケジュールド出力フィードバック制御器設計, 第39回制御理論シンポジウム, 大阪, 2010年9月29日.
5. M. Sato: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters for Linear Parametrically Affine Systems, 第39回制御理論シンポジウム, 大阪, 2010年9月29日.
6. M. Sato: Design Method of Gain-Scheduled H_2 Filters Using Inexactly Measured Scheduling Parameters, *Int. Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems*, Budapest, Hungary, 2291/2298, July 9, 2010.
7. M. Sato, Y. Ebihara, and D. Peaucelle, Gain-Scheduled H_∞ State-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters, *American Control Conference*, Baltimore, USA, 3094/3099, July 1, 2010.
8. M. Sato: Gain-Scheduled H_∞ Filters Using Inexactly Measured Scheduling Parameters, *American Control Conference*, Baltimore, USA, 3088/3093, July 1, 2010.
9. M. Sato: Gain-Scheduled H_∞ State-Feedback Controllers Using Inexactly Measured Scheduling Parameters for Linear Parameter-Varying Systems, 第10回制御部門大会, 熊本大学(熊本), 2010年3月16日.
10. M. Sato, N. Yokoyama, and A. Satoh: Disturbance Suppression via Robust MPC using Prior Disturbance Data: Application to Flight Controller Design for Gust Alleviation, *IEEE Conference on Decision and Control 2009*, Shanghai, China, 8026/8033, December 18, 2009.
11. M. Sato: Gain-Scheduled State-Feedback Controller Design for LPV Systems via SV Approach, *ICROS-SICE International Joint Conference 2009*, Fukuoka, 3919/3924, August 20, 2009.
12. M. Sato: Parameter-Dependent Slack Variable Approach for Positivity Check of Polynomials over Hyper-Rectangle, *American Control Conference 2009*, Saint Louis, USA, 5357/5362, June 12, 2009.
13. 佐藤昌之: Parameter-Dependent Slack Variable Approach for Non-negativity Check of Polynomials over Hyper-Rectangle, 第37回制御理論シンポジウム, 鹿児島, 2008年9月18日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 昌之 (SATO MASAYUKI)

独立行政法人宇宙航空研究開発機構・研究
開発本部・研究員

研究者番号：90358648

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし