

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：82645

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23760398

研究課題名(和文) デジタル計算機を有効活用した離散時間システムに対する外乱抑制制御則開発

研究課題名(英文) Disturbance Suppression Controller for Discrete-Time LPV Systems with Digital Computers

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・航空本部・主任研究員

研究者番号：90358648

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：連続時間 Linear Parameter-Varying (LPV) システムに対して既に得ていた成果(提供スケジューリングパラメータ値と実パラメータ値の差に対してロバスト性能を保証する制御器設計)と同様の設計法を、離散時間 LPV システムに対して導出した。  
また、実験用航空機の横/方向運動に対して、対気速度をスケジューリングパラメータとして、外乱抑制とモデルマッチングを課した飛行制御器を提案法および従来法により設計し、事後解析と飛行試験により性能比較を行った。その結果、従来法による制御器では実環境における制御性能劣化が確認されたが、提案法による制御器では性能劣化は確認されず、有効性が示された。

研究成果の概要(英文)：We develop a design method of discrete-time Gain-Scheduled (GS) controllers using inexactly provided scheduling parameters for discrete-time Linear Parameter-Varying (LPV) systems, and extend the method to the case in which multiple uncertainty blocks exist for applicability improvement. We designed GS controllers, which realize disturbance suppression and model-matching for a certain model, for the lateral-directional motions of an experimental aircraft by using our method and a conventional method, and compared their performances with a posteriori analysis and flight tests. It was confirmed in the a posteriori analysis as well as flight tests that the GS controller designed with the conventional method does not guarantee the control performance assured in its design due to the inaccuracy of the scheduling parameter; however, the GS controller designed with our method guarantees the control performance assured in its design. These properties illustrate the usefulness of our method.

研究分野：制御理論

キーワード：ゲインスケジューリング制御 飛行制御 飛行試験

### 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、航空機運動)に対しては、その環境の変化に応じて制御ゲインの選択を行う「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、1) 制御器を設計する設計点を複数選び、2) 選定した設計点に対してそれぞれ独立に制御器を設計し、3) それらを何らかの方法(例えば、スケジューリングパラメータに関して区分線形な関数など)で連結させ一つの制御器とし、4) 動作範囲全体の性能確認のためのシミュレーションを実施するという方法であった。そのため、4) の段階で制御性能の検証シミュレーションが膨大になる、また4) の段階で設計仕様の充足が見られない場合にどの段階まで戻るべきか不明瞭であるなどの欠点があった。これらの欠点を克服した制御器設計法として、システムの動作環境をあらゆるスケジューリングパラメータを用いて対象システムの動特性をあらゆる線形パラメータ変動(Linear Parameter-Varying; LPV)システムを求め、このLPVシステムに対してGS制御器を設計する方法の研究が90年代以降進められ、その有効性が示されている。しかしながら、その設計法は、「スケジューリングパラメータは正確に入手可能である」という前提での設計であるが、現実のシステムではスケジューリングパラメータを計測するシステムの計測誤差は不可避であることから、この誤差による性能劣化は免れることが出来なかった。

この問題に対しては、既に連続時間LPVシステムを対象とした設計法が提案されている。しかし、得られる制御器は連続時間GS制御器である一方で、実際のシステムではデジタル計算機が用いられることがほとんどであるために、得られた連続時間GS制御器を実装するためにはその離散化を実時間処理する必要があった。最近の計算機の発展からすると、十分な計算能力を有する計算機を用いることが可能ならば、この離散化はほとんど問題にならない。しかし、航空機に搭載するシステムのように、安全上の問題などから最新の計算機を用いることが出来ない場合、実時間処理が間に合わないという可能性が十分に考えられ、連続時間GS制御器では実装面において問題があった。また、離散化処理を行う上で、逆行列演算が必要になる場合が多いが、そのような場合、その行列が特異に近い場合は逆行列が正確に求められず、結果として、制御性能の劣化だけでなく、システム全体の安全性に影響を及ぼす可能性があるなどの懸念があった。

そこで、現在使用する計算機のほとんどはデジタル計算機であることを考慮して、「スケジューリングパラメータは不正確にしか得られない」という前提に立ち、かつ実時間離散化処理が不要な離散時間GS制御器を

直接設計する方法を開発する必要があった。

### 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、航空機の乗り心地改善や乱気流による事故の防止を目的とした飛行制御則設計に適用可能な「デジタル計算機を有効活用した離散時間システムによる外乱抑制制御則開発」を目的とした研究を実施した。なお、本研究では、実システムへの搭載および実証を行うことで、実装面および性能面での実用性検証までを想定した。

### 3. 研究の方法

本研究の目的は、上述のように以下の二つである。

- (1) スケジューリングパラメータが不正確にしか得られない条件下において、離散時間LPVシステムを対象とした離散時間GS制御器設計法の開発
- (2) (1)において開発した設計法を用いた実システムによる性能検証

なお、(2)における実システムとは、JAXAが保有する実験用航空機MuPAL-を想定した。以下に、それぞれの項目について詳細を述べる。

(1) 「離散時間GS制御器設計法の開発」:  
既に、連続時間LPVシステムを対象とした同様の問題に対する設計法が提案されていることから、その方法を離散時間LPVシステムを対象とした場合に適用することとした。なお、実システムを設計対象とする場合、複数の制御仕様が課されることが多い。例えば、制御入力の高周波成分抑制と低周波数帯域における追従特性の確保などである。このような複数の設計仕様が課された場合、不確かさブロックと呼ばれる制御仕様を課するための仮想的な不確かさを複数個用いる必要がある。このような問題にも対処可能なように、スケジューリング行列を導入した設計法への拡張も検討することとした。

(2) 「開発した設計法を用いた性能検証」:  
航空機の横方向運動はスケジューリングパラメータを速度や動圧としたLPVシステムとして記述可能であることから、MuPAL-の横方向運動を対象とした突風軽減と、ある操縦特性へのモデルマッチングを課したGS飛行制御器設計問題に取り組むこととした。また、提案設計法の有効性を検証するために、スケジューリングパラメータが正確に得られると仮定した従来設計法によるGS飛行制御器も設計し、二つのGS制御器の性能比較を事後性能解析および飛行試験により実施することとした。

### 4. 研究成果

「3.研究の方法」において示したように、二つのフェーズに分けて研究を進めた。研究成果も同様に分類して、以下に示す。

### (1) 「離散時間 GS 制御器設計法の開発」

引用文献 1 において、スケジューリングパラメータが不正確にしか得られないという仮定のもと、連続時間 LPV システムを対象とした GS 出力フィードバック制御器設計問題に対する設計法が提案されている。この方法を適用することで、スケジューリングパラメータの 1 サンプリング周期あたりの変動が非常に大きい場合にも対処できる設計法として、パラメータに依存しない Lyapunov 関数を用いた誘導  $l_2$  ノルムを最小化する GS 出力フィードバック制御器設計法を最初に導出した。

現実のシステムでは、スケジューリングパラメータの 1 サンプリング周期あたりの変動が比較的小さい場合も多い。このような場合に、よりタイトに制御仕様を満足する設計法として、スケジューリングパラメータが正確に得られるという仮定の下、パラメータ依存 Lyapunov 関数を用いた誘導  $l_2$  ノルムを最小化する GS 出力フィードバック制御器設計法が引用文献 2 に示されている。そこで、引用文献 2 の方法と先に導出した設計法を組み合わせることで、パラメータ依存 Lyapunov 関数を用いた当該問題に対する設計法を導出した。また、先のパラメータに依存しない Lyapunov 関数を用いた設計法より、常により良い制御性能が得られることを示した。

### (2) 「開発した設計法を用いた性能検証」

(1) において開発したパラメータ依存 Lyapunov 関数を用いた設計法を用いて、MuPAL- の横方向運動に対する突風軽減、およびあるモデルに対するモデルマッチングを課した GS 飛行制御器を設計したが、非常に低周波帯域しかモデルマッチングが実現できないという結果が得られ、設計法の更なる改善が必要であることが判明した。

この飛行制御器設計問題では、a) スケジューリングパラメータである較正対気速度は、予め求められた幅の誤差を含んだ値として与えられ、b) 搭載アクチュエータのモデリング誤差として高周波数帯域に不確かさが存在するという条件下で、外乱抑制とモデルマッチングを実現する制御器を設計することが仕様である。ここで、b) のモデリング誤差は複数個の仮想的な不確かさで表現されることから、この特性をより正確に捉えた設計法として、先に導出していたパラメータ依存 Lyapunov 関数を用いた設計法にスケジューリング行列を導入した設計法を開発し、この設計法を用いた GS 飛行制御器を設計した。その結果、スケジューリング行列を用いない設計法と比較して高周波数帯域までモデルマッチングが可能という制御器が得られた。

また、比較対象として、スケジューリングパラメータが正確に得られるという仮定の下での設計法である引用文献 2 の方法にス

ケージング行列を導入した設計法を用いて GS 飛行制御器を設計し、二つの GS 飛行制御器を比較した結果、以下の二つの事項を事後解析により確認した。

- ・スケジューリングパラメータが正確に得られるという仮定の下で設計した GS 制御器は、スケジューリングパラメータが不正確である場合に制御性能が劣化する。

- ・一方、設計時にスケジューリングパラメータが不正確にしか得られないという条件の下で設計した GS 制御器は、上記の制御器に比べて設計時に得られる制御性能は僅かに劣化するものの、想定したスケジューリングパラメータの不正確さに対して頑強であり、設計時に得られた制御性能がパラメータの不正確さによって劣化することはない。

さらに、上記の二つの GS 飛行制御器を MuPAL- の搭載計算機に搭載した飛行実験においても、先の二つの事項が確認された。その一例として、図 1 に提案設計法により設計した GS 飛行制御器の飛行実験結果、図 2 に従来設計法により設計した GS 飛行制御器の飛行実験結果を示す。ここで、1 段目にスケジューリングパラメータである速度の時歴を青線で、2 段目および 3 段目に、マッチング対象であるモデルの動き（横方向速度  $v_a$  およびロール角  $\phi$ ）を赤線で、制御対象である MuPAL- の動きを青線で示す。また、外乱である風を 2 段目に緑線で示す。図 1 においては、青線と赤線はほとんど一致しており、モデルマッチングが達成されていることが確認できるが、図 2 においては、横方向速度  $v_a$  に徐々に大きくなるバイアス誤差が生じていることが確認できる。これらより、提案設計法の有効性が示された。

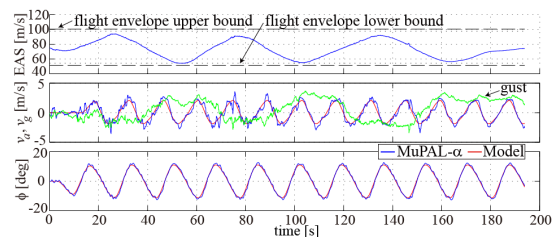


図 1 提案設計法により設計した GS 飛行制御器の飛行実験結果(第 1 段: 飛行速度(スケジューリングパラメータ), 第 2 段: 横方向速度, 第 3 段: ロール角)

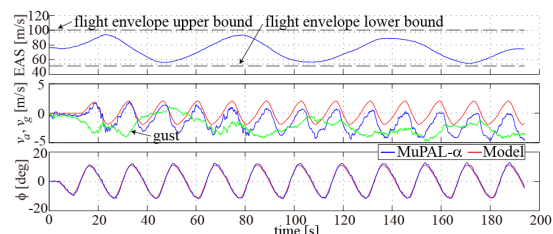


図 2 従来設計法により設計した GS 飛行制御器の飛行実験結果(第 1 段: 飛行速度(スケジューリングパラメータ), 第 2 段: 横方向速度, 第 3 段: ロール角)

なお、設計した GS 制御器の実装に関しては、

特段の配慮を行う必要はなく、実装面で十分に実用に供することが確認された。

上記の二つのフェーズにおける研究の他、得られるスケジューリングパラメータ値に含まれる不確かさがスケジューリングパラメータの値とは無関係に加わる（「絶対的不確かさ」とここでは呼ぶ）だけでなく、スケジューリングパラメータの値に比例する不確かさ（「比例的不確かさ」とここでは呼ぶ）も同時に加わった場合に対処可能な設計法を提案した。また、その際に、絶対的不確かさに対処する設計法と比例的不確かさに対処する設計法に本質的な差が無いことを示した。

#### <引用文献>

1. M. Sato and D. Peaucelle: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Using Inexact Scheduling Parameters for Continuous-Time LPV Systems, *Automatica*, Vol. 49, No. 4, pp. 1019-1025, 2013.
2. J. de Caigney, et al.: Gain-scheduled dynamic output-feedback control for discrete-time LPV systems. *Int. J. Robust and Nonlinear Control*, Vol. 22, No. 5, pp. 535-558, 2012.

#### 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3件)

1. 佐藤 昌之: 不確かなスケジューリングパラメータの使用を前提とした離散時間 Gain-Scheduled 出力フィードバック制御器設計と飛行制御則設計例, 計測自動制御学会論文集, Vol. 50, No. 11, pp. 763-774, 2014. DOI: 10.9746/sicetr.50.763 (査読有り)
2. M. Sato and D. Peaucelle: Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Using Inexact Scheduling Parameters for Continuous-Time LPV Systems, *Automatica*, Vol. 49, No. 4, pp. 1019-1025, 2013. DOI: 10.1016/j.automatica.2013.01.034 (査読有り)
3. 佐藤 昌之: 「実システムへの適用」という成熟期に入ったゲインスケジューリング制御, システム/制御/情報, Vol. 57, No. 2, pp. 73-81, 2013. (査読無し)

#### 〔学会発表〕(計8件)

1. 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, October 7 - 9, 2015. (accepted)

2. M. Sato: Discrete-Time Gain-Scheduled Model-Matching Flight Controller Using Inexact Scheduling Parameters. Proc. IEEE Conference on Control Applications, Antibes, France, Oct. 8, 2014. DOI: 10.1109/CCA.2014.6981347
3. M. Sato: Robust Gain-Scheduled Flight Controller Using Inexact Scheduling Parameters. Proc. ACC, pp. 6845-6850, Washington DC, USA, Jun. 19, 2013. DOI: 10.1109/ACC.2013.6580911
4. 佐藤 昌之: 不確かなスケジューリングパラメータを用いた航空機の横/方向運動に対するゲインスケジュールド飛行制御, 第13回制御部門大会, 福岡, 2013/03/08.
5. M. Sato: Gain-Scheduled Observer Design Using Inexact Scheduling Parameters. Proc. IFAC Symposium on Robust Control Design, pp. 363-368, Aalborg, Denmark, Jun. 21, 2012. DOI: 10.3182/20120620-3-DK-2025.00176
6. 佐藤 昌之: 離散時間 LPV システムに対する実用的なゲインスケジュールド制御器設計, 第12回制御部門大会, 奈良, 2012/03/14.
7. M. Sato: Discrete-Time Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Exploiting Inexact Scheduling Parameters via Parameter-Dependent Lyapunov Functions. Proc. CDC-ECC, pp. 1938-1943, Orlando, FL, USA, Dec. 12, 2011. DOI: 10.1109/CDC.2011.6161449
8. M. Sato: Discrete-Time Gain-Scheduled Output-Feedback Controllers Exploiting Inexact Scheduling Parameters. Proc. IEEE CACSD-SU, pp. 1032-1037, Denver, CO, USA, Sept. 29, 2011. DOI: 10.1109/CACSD.2011.6044533

#### 〔図書〕(計0件)

#### 〔産業財産権〕

出願状況 (計0件)

取得状況 (計0件)

#### 〔その他〕

なし

#### 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・航

空本部・主任研究員  
研究者番号：90358648

(2)研究分担者  
なし

(3)連携研究者  
なし