

平成 30 年 6 月 19 日現在

機関番号：32657

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420428

研究課題名(和文) 切り替えシステムのロバスト安定性と外乱除去問題

研究課題名(英文) Robust Stabilization and Disturbance Decoupling for Switched Systems

研究代表者

大塚 尚久 (Otsuka, Naohisa)

東京電機大学・理工学部・教授

研究者番号：30185318

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)：研究成果は、大きく以下の4つにまとめられる。

(1) 定数入力をもつ線形切り替えシステムに対して、経路問題の定式化と可解条件が与えられた。(2) 任意切り替えのもとで、様々なタイプのフィードバック制御による切り替えシステムの外乱除去問題が定式化され、それらの可解条件が与えられた。(3) 線形切り替えシステムに対して、任意切り替えの下で、恒等および最小次元切り替えオブザーバが設計できるための条件と安定化可能条件が与えられた。(4) ある種の不確かな非線形システムに対して、様々なタイプの出力トラッキング問題が研究され、ある種の条件の下で、トラッキング制御設計が与えられた。

研究成果の概要(英文)：Research results are summarized in the following four parts.

(1) The transit problems which pass through the given neighborhood of some given objective states in turn from an arbitrary initial state for switched linear systems with constant inputs were formulated and their solvability conditions were given. (2) The disturbance decoupling problems via various types of feedback for switched linear systems were formulated under arbitrary switching and their solvability conditions were given. (3) The two designs of full order and minimal order switched observers under arbitrary switching for switched linear systems were given. (4) The various types of global practical output tracking problems by state feedback for a class of high-order uncertain non-linear systems were studied and under certain assumptions some tracking control designs for the system were given.

研究分野：数理システム制御理論

キーワード：切り替えシステム 幾何学的アプローチ 不確かさをもつシステム 外乱除去問題 安定化 非線形システム 切り替えオブザーバ

1. 研究開始当初の背景

様々な環境要素に依存してモデルが切り替わるシステム、知的制御設計の手法として目的に応じて制御則を切り替えて得られるシステムそしてスイッチング回路システムなどは、システムの族とその切り替え則から構成され、いわゆる切り替えシステムとしてその安定性の保証や制御問題の研究が重要な研究テーマとなっている。そのような中、切り替えシステムの安定性に関しては、これまで、欧米を中心に数多くの研究成果が得られてきた。しかしながら、不確かなパラメータを含む切り替えシステムのロバスト安定性に関する研究は、重要な研究テーマであるにもかかわらず、非常に少ない状況である。さらに、制御問題についても、着手していない問題が数多く存在する。

研究代表者は、これまで、ポリトープ的不確かさを含むシステムに対して、ロバスト安定性や外乱除去問題について、多くの研究を行ってきた。さらに、非線形システムの安定化可能性と出力トラッキング問題、不確かさを含む Positive システムのロバスト安定性、不確かさを含む無限次元システムのロバスト安定性と外乱除去問題についても研究を行ってきた。これらの研究の共通する考えは、システムの族を研究対象にしていることである。先に述べた切り替えシステムは、まさに、システムの族と切り替え則から構成されており、その意味で、本申請課題を研究テーマとするに至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、以下の未解決問題に挑戦することである。

(1) 切り替えシステムを構成するサブシステムに不確かなパラメータを含む場合について、そのパラメータ変動に対して、切り替えシステムがロバスト安定であるための条件を調べる。

(2) (1)の研究に加え、サブシステムのクラスに対する不変部分空間の概念（ロバスト不変部分空間）について考察し、それを切り替えシステムの外乱除去問題などの制御問題へ応用する。

本研究課題は以下の5つに分類された。

[研究課題1] (切り替えシステムの安定性と経路問題への応用)

[研究課題2] (不確かさをもつ切り替えシステムの安定性と経路問題への応用)

[研究課題3] (システムの族に対する不変部分空間と切り替えシステムの外乱除去)

[研究課題4] (不確かさをもつ Positive 線形切り替えシステムの安定性と外乱除去)

[研究課題5] (非線形切り替えシステムと無限次元線形切り替えシステムの安定性と外乱除去)

3. 研究の方法

(研究課題1, 2について)]

研究代表者は、最近の論文において、定数入力をもつ連続時間線形切り替えシステムのサブシステムが不確かなパラメータをもつとき、そのパラメータ変動にロバストな意味で切り替えシステムの初期状態が目標状態に漸近的に収束するための条件を与えた。本課題の研究計画は、いくつかの目標状態を与えたとき、各目標状態を近似的に経過し、不確かなパラメータ変動に対してもロバスト性をもつための条件について研究する。また、離散時間線形切り替えシステムについては、不確かさのない場合ですら未解決な問題である。その意味で、離散時間系の特徴を十分考慮に入れて、同問題の離散時間系についても調べる。

(研究課題3について)

研究代表者は、学術雑誌 (*Systems & Control Letters*) において、いわゆる幾何学的アプローチにより、線形切り替えシステムにおける外乱除去問題を定式化し、この問題が解けるための必要十分条件を与えた。この論文をきっかけに、イタリアの2人の研究者 (G. Conte 教授, A. M. Perdon 教授) と共同研究が始まり、最近の成果として、不確かなパラメータを含む外乱除去問題が解けるための必要十分条件が与えられた。本課題では、まず、これまで取り扱ってきた状態フィードバックから静的出力フィードバックを用いたときの問題を研究する。次に、切り替えオブザーバシステムの安定性問題についても研究する。本研究課題を遂行するためには、システムの族に対する様々な不変部分空間の性質を調べる必要があり、この分野の世界的権威である、上記2人の研究者と電子メールおよび国際会議参加等での議論を通して、研究を遂行する。さらに、線形切り替えシステムにおける動的観測出力フィードバックを用いた外乱除去問題を定式化し、この問題が解けるための条件について調べる。また、不確かなパラメータを含む切り替えシステムに対して、同問題が解けるための条件を調べる。さらには、安定性と外乱除去の併合問題についても考察する。

(研究課題4について)

Positive 線形システムは、システムの状態が非負であるようなシステムであり、その状態軌道の集合は、線形部分空間にはならない。このことから、通常の線形システムに対する不変部分空間の概念が直接適用できない状況である。しかしながら、[研究課題3]において述べられた外乱除去問題や非干渉化問題、トラッキング問題やレギュレータ問題などを研究するためには、システムの不変部分

集合の概念が必要である。研究代表者は、これまでに、Positive 線形切り替えシステムの安定性に関する研究を行い、様々なタイプの安定化可能性条件について考察してきた。このことを基礎に本課題に取り組む。

(研究課題5について)

研究代表者は、これまでに無限次元線形システム(ヒルベルト空間またはバナッハ空間上定義されたシステム)の外乱除去問題や安定性についての研究成果を得ている。一方、有限次元線形切り替えシステムの安定化と外乱除去問題についても研究成果が得られている。本研究課題では、このような研究の流れの中で、無限次元線形切り替えシステムの安定性および外乱除去問題についての第一歩を歩む。

4. 研究成果

(1) [切り替えシステムの安定性と経路問題への応用]

定数入力をもつ連続時間線形切り替えシステムが、状態フィードバックによって、二次安定化可能であるための条件について考察し、その応用として、指定された複数の状態を近似的に経路する問題、いわゆる経路問題が定式化され、問題の可解条件が与えられた。さらに、定数入力をもつ離散時間線形切り替えシステムに対して、状態フィードバックによって、二次安定化可能であるための十分条件と必要条件が調べられた。その応用として、指定された複数の状態を近似的に経路する経路問題が定式化され、問題の可解条件が与えられた。さらに、上記問題に対して、数値シミュレーションにより結果の検証を行った。得られた結果は、国際会議にて論文発表された(学会発表[3]参照)。

(2) [不確かさをもつ切り替えシステムの安定性と経路問題への応用]

定数入力をもつ連続時間線形切り替えシステムのサブシステムがポリトープの意味で不確かさをもつ場合について、状態フィードバックによって、二次安定化可能であるための条件について考察し、ロバスト経路問題が定式化され、その問題の可解条件が調べられた。本結果については、今後発表する予定である。

(3) [システムの族に対する不変部分空間と切り替えシステムの外乱除去]

①不確かなパラメータを有する線形切り替えシステムに対して、ロバスト不変部分空間の概念が調べられ、状態フィードバックを用いた切り替えシステムのロバスト外乱除去問題の定式化とその可解条件が与えられた(学術雑誌[3]参照)。

②不確かなパラメータを有する線形切り替えシステムに対して、ロバスト不変部分空間の概念が調べられ、静的出力フィードバックを

用いた切り替えシステムのロバスト外乱除去問題の定式化とその可解条件が与えられた(学術雑誌[5]、学会発表[5]参照)。

③状態フィードバックを用いた任意切り替えにおける切り替えシステムの外乱除去問題と新たな切り替え則の概念を導入し、考察された。さらに、任意切り替えにおける安定性と外乱除去の併合問題についても考察された(学術雑誌[8]参照)。

④動的補償器を用いた任意切り替えにおける切り替えシステムの外乱除去問題が定式化され、その可解条件が与えられた。さらに、任意切り替えにおける安定性と外乱除去の併合問題についても可解条件が与えられた(学術雑誌[6]参照)。

(4) [不確かさをもつPositive線形切り替えシステムの安定性と外乱除去]

Positive線形システムに対する不変部分集合を、不変部分空間と状態空間の非負象限との共通集合と考え、いくつかの基礎的な性質が得られた。今後さらに詳細に調べ、制御問題への応用を考えている。

(5) [切り替えシステムに対する、切り替えオブザーバの設計]

連続時間および離散時間線形切り替えシステムに対して、任意切り替えの下で、恒等および最小次元切り替えオブザーバが設計できるための条件と安定化可能条件が与えられた(学会発表[2]参照)。

(6) [非線形切り替えシステムと無限次元線形切り替えシステムの安定性と外乱除去]

①高次の非線形性をもつ不確かな非線形システムに対して、安定性と関連のある出力トラッキング問題に対する新たなトラッキング制御設計の方法を提案した(学術雑誌[7]、[9]参照)。

②幾つかの緩い条件の下で、不確かな非線形システムに対するプラクティカル出力トラッキングの可能性について考察し、その目的を達成させる出力補償器の構造アルゴリズムが与えられた(学術雑誌[2]参照)。

③より一般的な不確かな高次非線形システムに対する状態フィードバックによるグローバルなプラクティカル出力トラッキング問題が研究され、新しいトラッキング制御設計法が提案された(学術雑誌[1]、[4]、学会発表[4]参照)。

④不確かな非線形時間遅延システムに対する状態フィードバックによってプラクティカル出力トラッキング問題についても有益な結果が得られた(学会発表[1]参照)。

⑤無限次元線形切り替えシステムの安定性と外乱除去については、今後の研究課題として残された。

以上の研究成果は、国際会議および国際的
学術雑誌に多く発表され、その引用状況や専
門分野の研究者との議論から、この分野に与
えた影響は、少なくないと考えている。今後
は、残された未解決問題について、引き続き
研究を行い、この分野の研究を加速させたい。

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 9 件)

- [1] K. Alimhan, N. Otsuka, Abilmazhin A. Adamov: “A note on the output tracking problem of uncertain nonlinear systems with high-order nonlinearities”, *Far East Journal of Mathematical Sciences*, Vol.102, No.3, pp.537-558, 2017. (査読有), <http://dx.doi.org/10.17654/MS102030537>
- [2] K. Alimhan, N. Otsuka, and O. J. Mamyrbayev, “Global Practical Tracking by Output Feedback for Uncertain Nonlinear Systems Under A Weaker Condition”, *International Journal of Mathematical models and Methods in Applied Sciences*, Vol.11, pp.88-93, 2017. (査読有), <http://naun.org/cms.action?id=15659>
- [3] N. Otsuka, H. Saito, G. Conte and A. M. Perdon, “Robust Controlled Invariant Subspaces and Disturbance Decoupling for Uncertain Switched Linear Systems”, *IMA Journal of Mathematical Control & Information*, Oxford Univ. Press, Vol.34, Issue.1, pp.139-157, 2017. (査読有), <https://doi.org/10.1093/imamci/dnv037>
- [4] K. Alimhan, N. Otsuka, M. N. Kalimoldayev and A. A. Adamov, “Further Results on Output Tracking Problem of Uncertain Nonlinear Systems with High-Order Nonlinearities”, *International Journal of Control and Automation*, Vol.9, No.1, pp.409-422, 2016. (査読有), <http://dx.doi.org/10.14257/ijca.2016.9.1.35>
- [5] N. Otsuka, G. Conte and A. M. Perdon: “Disturbance Decoupling by Static-Output Feedback for Uncertain Switched Linear Systems”, *Far East Journal of Dynamical Systems*, Vol.26, No.2, pp.99-124, 2015. (査読有), http://dx.doi.org/10.17654/FJDSJun2015_099_124
- [6] N. Otsuka, “Disturbance Decoupling by Measurement Feedback for Switched Linear Systems”, *Systems & Control Letters*, Elsevier Science Publishers B. V., Vol.82, pp.99-107, 2015. (査読有), <https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.05.009>
- [7] K. Alimhan, N. Otsuka, A. A. Adamov, M. N. Kalimoldayev, “Global Practical Output Tracking of Inherently Non-linear Systems Using Continuously Differentiable Controllers”, *Mathematical Problems in Engineering*, Article ID 932097 (10 pages), 2015. (査読有), <http://dx.doi.org/10.1155/2015/932097>
- [8] G. Conte, A.M. Perdon and N. Otsuka, “The Disturbance Decoupling Problem with Stability for Switching Dynamical Systems”, *Systems and Control Letters*, Elsevier Science Publishers B. V., Vol.70,

pp.1-7, 2014. (査読有),

<https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2014.05.002>

- [9] K. Alimhan, N. Otsuka, M. N. Kalimoldayev and O. J. Mamyrbayev: “An Expanded Method to Robustly Practically Output Tracking Control for Uncertain Nonlinear Systems”, *International Journal of Mathematical Analysis*, Hikari Ltd, Vol. 8, No. 18, pp.865 -879, 2014. (査読有), <http://dx.doi.org/10.12988/ijma.2014.4368>

[学会発表] (計 5 件)

- [1] K. Alimhan, N. Otsuka, M. N. Kalimoldayev and N. Tasbolat, “Practical Output Tracking for a Class of Uncertain Nonlinear Time-Delay Systems via State Feedback”, *Proc. of the 2018 Asia-Pacific Conference on Applied Mathematics and Statistics (AMS2018)*, to appear, Hanoi, Vietnam, March, 2018. (査読有)
- [2] N. Otsuka and D. Kakehi : “Stabilization of Switched Linear Systems under Arbitrary Switching via Switched Observers”, *Proc. of the 2017 Asian Control Conference (ASCC 2017)*, pp.17-20, Gold Coast, Australia, December, 2017. (査読有)
- [3] N. Otsuka, and S. Sekiguchi, “Quadratic Stabilization and Transit Problems for Switched Linear Systems via State Feedback”, *Proc. of 3rd International Conference on Mathematics and Computers in Sciences and Industry (MCSI'2016)*, pp.122-127, Chania, Crete, Greece, August, IEEE, DOI 10.1109/MCSI.2016.12, 2016. (査読有)
- [4] K. Alimhan, N. Otsuka, M. N. Kalimoldayev and A. A. Adamov, “Output Tracking Problem of Uncertain Nonlinear Systems with High-Order Nonlinearities”, *Proc. of 2015 8th International Conference on Control and Automation*, pp.1-4, Jeju, Korea, November, IEEE CPS, 2015. (査読有)
- [5] N. Otsuka, G. Conte and A. M. Perdon: “Robust Controlled and Conditioned Invariant Subspaces for Uncertain Switched Linear Systems”, *Proc. of 21st International Symposium on Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS'14)*, Groningen, Netherlands, July, pp.772-775, 2014. (査読有)

[その他]

ホームページ :

<https://www.cse.dendai.ac.jp/faculty/5divisions/ru/course/mi/otsuka/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大塚 尚久 (OTSUKA, Naohisa)
東京電機大学・理工学部・教授
研究者番号 : 3 0 1 8 5 3 1 8

(2) 研究協力者

① Keylan Alimhan,

L.N. Gumilyov Eurasian National Univ. 教授

② Giuseppe Conte,

Universita Politecnica delle Marche 教授

③ Anna Maria Perdon,

Universita Politecnica delle Marche 教授

④ 関口祥汰 (SEKIGUCHI, Shota)

東京電機大学

⑤ 笥 大樹 (KAKEHI, Daiki)

東京電機大学大学院