

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月5日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21560471

研究課題名（和文） 切替え・ハイブリッドシステムの実用安定性と実用安定化

研究課題名（英文） Practical stability and stabilizability of switched and hybrid systems

研究代表者

サイ 貴生（ZHAI GUI SHENG）

芝浦工業大学・システム理工学部・准教授

研究者番号：30304190

研究成果の概要（和文）：

本研究では、共通な平衡点をもたない複数のサブシステムからなる切替え・ハイブリッドシステムに対して、実用安定性と実用安定化問題を考えている。実用安定性は既存の“有限時間安定性”や“究極有界”などの概念に対する拡張で、望ましい平衡点を中心とする微小領域（ ε -近辺）への収束を目的とするものである。主要結果として、切替え積分器、切替えアファイン系から一般の切替え非線形システムまで実用安定性と実用安定化アルゴリズムを提案している。さらに、通常のリヤプノフ漸近安定性の振る舞いを意識して、実用漸近安定性や実用漸近安定化まで議論を拡張し、有効なアルゴリズムを提案している。

研究成果の概要（英文）：

In this research, we have considered practical stability and stabilizability for switched and hybrid systems composed of several subsystems that do not have common equilibrium points. Practical stability is an extension to “finite time stability” and “ultimate boundedness”, which aims at convergence to a specified small region around certain desired equilibrium point. The main contribution is to analyze practical stability and to establish practical stabilizability algorithms for switched nonlinear systems including switched integrators, switched affine systems. Furthermore, with the behavior of general Lyapunov asymptotical stability in mind, we have extended the discussion to asymptotical practical stability for switched and hybrid systems, and have proposed effective algorithms for the purpose of asymptotical practical stabilizability.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

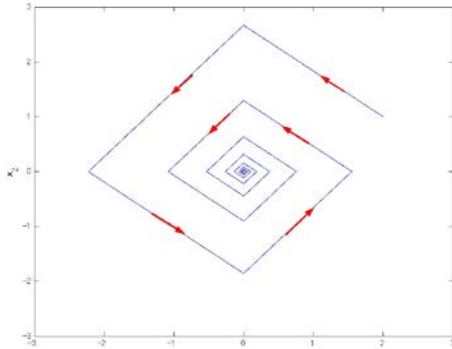
キーワード：制御理論

1. 研究開始当初の背景

近年、複数のサブシステムからなる切替え・ハイブリッドシステムに関する研究が活発に行われている。その理由は、現実シス

テムのほとんどは単一モードのダイナミクスでなく、複数のモードで記述しなければならないことにある。例えば、走っている車の位置と速度を考えた場合は、ギアシフトの位

置によって複数の異なるダイナミクスが存在する。また、知能制御分野でもよく知られているように、単一のコントローラで望ましい性能を達成できないシステムに対して、複数のコントローラと適切な切替え法則によって制御仕様を実現できる研究は数多く報告されている。その場合、おのおののコントローラと対象システムからなる閉ループ系を一つのサブシステムとして考えることができ、切替えシステムになる。



切替えシステムに関する既存研究のほとんどは全てのサブシステムが共通な平衡点をもつことを仮定しているが、実際のシステムは必ずしもその条件を満たしていない。平衡点をもたないシステムも存在する。しかし、共通な平衡点をもたなくても、適切な切替え法の下で、システムの解軌道はある平衡点へ（漸近）収束することが可能である。例えば、四つの積分器、 $S_1: dx/dt = \text{col}[-3, 2.5]$, $S_2: dx/dt = \text{col}[-2.5, -3]$, $S_3: dx/dt = \text{col}[3, -2.5]$, $S_4: dx/dt = \text{col}[2.5, 3]$ から構成された切替えシステムを考える。明らかに、全てのサブシステムには平衡点が存在しない。しかし、初期値 $\text{col}[2, 1]$ から出発して、第 I, II, III, IV象限にそれぞれサブシステム S_1, S_2, S_3, S_4 がアクティブになる場合の解軌道は上の図に示す通り、原点へ漸近収束している。

このように、共通な平衡点をもたない、あるいは平衡点すらもないサブシステムが存在しても、適切な切替え法を与えられれば、切替えシステムは通常のリヤプノフ安定と似たような振る舞いをもち、決められた点へ漸近収束することが可能である。この性質は“実用安定性” (practical stability) と定義されているが、既存の“有限時間安定性”や“究極有界”などの概念に対する拡張となっている。我々の既存研究論文では切替え連続時間システムの実用安定性を解析し、さらに一般のハイブリッド・切替えシステムに対

して実用安定性と（実用安定でないときの）実用安定化問題を考え、安定化十分条件とそれを実現するための切替えアルゴリズムを提案している。用いるアプローチは望ましい平衡点を中心とする微小領域（ ϵ -近辺 (neighborhood)）への収束を目指す“ ϵ -実用安定性”であるが、通常のリヤプノフ安定とは異なり、漸近安定も達成していない。

2. 研究の目的

これまでの研究背景を踏まえ、本研究では、共通な平衡点をもたないサブシステムからなる切替えシステムについて、 ϵ -実用安定性を ϵ -実用漸近安定性へ拡張し、システムが ϵ -実用漸近安定化できるための条件とアルゴリズムを導出する。さらに、 ϵ -実用（漸近）安定とリヤプノフ安定との関係を解明し、リヤプノフ（漸近）安定を実現する条件とアルゴリズムを提案する。

3. 研究の方法

2009年度では、平衡点をもたないサブシステムからなる切替えシステムについて、既存研究文献の ϵ -実用安定性を ϵ -実用漸近安定性へ拡張する。 ϵ -実用安定性は決められた微小正数 ϵ に対して、初期状態が望ましい平衡点（記述の都合上、原点と仮定する）の周辺にあるとき、その平衡点の ϵ -近辺 (neighborhood) へ滞留する性能である。初期状態が望ましい平衡点の周辺にないときにはその平衡点の周辺に入るように (attractive) 別の切替えアルゴリズムを開発しなければならない。考えられるアプローチとしては各サブシステムのベクトルフィールドを二つの部分に分け、一つ目は原点を平衡点とする部分で、もう一つは残りの部分である。数式で表わすと、サブシステムのダイナミクスが $dx/dt = f_i(x)$ であるとき、Part 1: $dx/dt = f_i(x) - f_i(0)$, Part 2: $dx/dt = f_i(0)$ のように分ける。

各サブシステムの Part 1 から構成される仮想切替えシステムについては共通な平衡点があるため多くの既存アプローチと結果が適用できる。各サブシステムの Part 2 は積分器で原点へ収束させる切替えアルゴリズムが場合によって存在する。この両者を合わせることによって、全体システムは望ましい吸引力 (attractivity) をもつことが考えられる。理論とアルゴリズムを確認するためのシミュレーションは研究室にある Matlab と Simulink を用いて行う。

2010年度では、 ε -実用（漸近）安定性とリヤプノフ（漸近）安定性との関係について調べる。見通しを良くするため、モデルとしてまず切替えアファインシステム（PWA）に限定して考える。一つ目の理由としてはPWAの場合に各サブシステムが線形ベクトルをもちながら通常に共通な平衡点をもたないことにある。もう一つの理由は前年度の計画と同じく、積分器を有効に利用したいことにある。シミュレーションはMatlabとSimulinkを用いて行うが、実験はサーボモータの出力レギュレーションを考えて組み立てを行う。

2011年度では、実用安定化切替え制御の枠組みを確立する。すなわち、単一システムに対して複数の仮想平衡点を設け、それぞれの平衡点に対して適切にコントローラを設計すれば、提案している切替えアルゴリズムが適用でき、望ましい平衡点へ収束することが可能になる。当然、平衡点を考慮したコントローラ候補や切替えアルゴリズムを同時に設計しなければならない。場合によって、ある種の反復計算も考えられる。応用と検証として3重水槽の水位制御を行う。そして、MatlabとSimulinkを用いてシミュレーションを行い、サーボモータ実験装置で検証を行う。

4. 研究成果

2009年度では、平衡点をもたないサブシステム（連続時間系）からなる切替えシステムについて、既存研究の ε -実用安定性を ε -実用漸近安定性へ拡張している。 ε -実用安定性は決められた微小正数 ε に対して、初期状態が望ましい平衡点（一般性を失わず、ここでは原点と仮定する）の周辺にあるとき、その平衡点の ε -近辺（neighborhood）へ滞留する性能である。初期状態が望ましい平衡点の周辺にないときにはその平衡点の周辺に入るように（attractive）別の切替えアルゴリズムを開発しなければならない。提案アプローチとして、各サブシステムのベクトルフィールドを二つの部分に分け、一つ目は原点を平衡点とする部分で、もう一つは残りの部分である。数式で表わすと、サブシステムのダイナミクスが $dx/dt=f_i(x)$ であるとき、Part 1: $dx/dt=f_i(x)-f_i(0)$, Part 2: $dx/dt=f_i(0)$ のように分ける。そして、各サブシステムのPart 1 から構成された仮想切替えシステムについては共通な平衡点があるため多くの

既存アプローチと結果が適用できる。各サブシステムのPart 2 は切替え型積分器のアイデアを用いて原点へ収束させる切替えアルゴリズムを開発している。この両者を合わせることによって、全体システムは望ましい吸引力（attractivity）をもち、 ε -実用漸近安定性を達成する。応用システムとして切替え型ディスクリプタシステムを取り上げている。理論とアルゴリズムを確認するため、MatlabとSimulinkを用いた数値シミュレーションが行われている。

2010年度では、共通な平衡点をもたないサブシステムから構成された切替えシステムについて、 ε -実用（漸近）安定性とリヤプノフ（漸近）安定性との定性・定量関係について調べた。 ε -実用安定性は決められた微小正数 ε に対して、初期状態が望ましい平衡点（一般性を失わず、ここでは原点と仮定する）の周辺にあるとき、その平衡点の ε -近辺（neighborhood）へ滞留する性能である。 ε -実用安定化は、初期状態が望ましい平衡点の周辺にないときにはその平衡点の周辺に入るように（attractive）切替えアルゴリズムを設計することである。広いクラスのハイブリッド・切替えシステムについて、我々の既存研究では ε -実用安定性を示しているが、シミュレーションや実機実験でシステムの解軌道がリヤプノフの意味で（漸近）安定であることが明らかになった。ゆえに、この両者の間にある種の因果関係があると考えられる。そこで、まずモデルとして切替えアファインシステム（PWA）に焦点を当てて考察している。その理由として、PWAの場合は各サブシステムが線形ベクトルをもちながら共通な平衡点をもたないため、我々の問題設定に適合する。さらに、これまでの研究で用いられている切替え型積分器に関する研究成果が有効に利用できる。実際の考え方として、切替え線形システムに関するアプローチと切替え型積分器に関するアプローチを融合することによって、リヤプノフ（漸近）安定化を実現できることを示している。研究成果の有効性はMATLABとSIMULINKを用いた数値シミュレーションで確認されている。

2011年度では、切替え・ハイブリッドシステムに対して ε -実用漸近安定性を解析したうえ、 ε -実用漸近化アルゴリズムを開発し、理論と実験の両面から提案アルゴリズムを確認している。具体的に、前年度までの既存

研究では切替えスカラーシステム（積分系，PWS）と切替えアファインシステム（PWA）について，実用安定性を解析し，切替えによる ε -実用安定化を達成することが可能であることを例題で検証してきたが，本年度ではこれらの成果を踏まえて， ε -実用安定性（化）を ε -実用漸近安定性（化）へ拡張する．すなわち，共通な平衡点をもたない複数サブシステムから構成された切替えシステムが ε -実用漸近安定となるような切替えアルゴリズムを提案している．具体的なアプローチとしては，適切に小さな区間を設けて，対象システムを切替え線形システム（PWL）と切替え型積分器（PWS）との並列結合に分け，それぞれの部分を ε -実用安定化することによって全体の ε -実用漸近安定化を図る．そこで重要となるのは，いかに区間を分割するかと，各区間における安定性解析に用いられる区分的リヤプノフ関数候補をどう構築するかにある．本研究ではそれぞれ，グリッド凸最適化に基づくアプローチとLMIに基づく計算方法を提案している．

研究の有効性は数値シミュレーションと実機実験の両方を用いて検証された．シミュレーションはMATLABとSIMULINKのパッケージやC言語によるプログラミングを用いて実施しているが，実機実験はサーボモータの出力レギュレーションを考えて組み立てを行っている．

本研究の結果発信については，これまで制御関連の権威ある国際会議ACC、CDC、MSCで論文を発表している．応用としてはメカトロニクスとオートメーションの国際会議ICMA、先端メカトロ関連の国際会議ICAMEchSなどにも研究成果を発表している．さらに，これらの研究成果をまとめて学術ジャーナルへ論文を投稿し，採用している．詳細は次の節を参照されたい．

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8件）

① Guisheng Zhai, Shohei Okuno, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: A New Consensus Algorithm for Multi-Agent Systems via Decentralized Dynamic Output Feedback; Journal of Intelligent & Robotic Systems, 査読有, Vol.63, No.2, 2011, pp.309-322.

DOI:10.1007/s10846-010-9458-z

② Guisheng Zhai, Xuping Xu: A Commutation Condition for Stability Analysis of Switched Linear Descriptor Systems; Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 査読有, Vol.5, No.3, 2011, pp.383-393.

DOI:10.1016/j.nahs.2011.02.002

③ Guisheng Zhai, Junya Takeda, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: Towards Consensus in Networked Nonholonomic Systems; IET Control Theory & Applications, 査読有, Vol.4, No.10, 2010, pp.2212-2218.

DOI:10.1049/iet-cta.2009.0658

④ Guisheng Zhai, Xuping Xu: A Unified Approach to Stability Analysis of Switched Linear Descriptor Systems under Arbitrary Switching; International Journal of Applied Mathematics and Computer Science, 査読有, Vol.20, No.2, 2010, pp.249-259.

DOI:10.2478/v10006-010-0018-2

⑤ Xuping Xu, Guisheng Zhai, Shouling He: Some Results on Practical Stabilizability of Discrete-Time Switched Affine Systems; Nonlinear Analysis: Hybrid Systems, 査読有, Vol.4, No.1, 2010, pp.113-121.

DOI:10.1016/j.nahs.2009.08.005

⑥ Guisheng Zhai, Xuping Xu, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: Qualitative Analysis of Switched Discrete-Time Descriptor Systems; International Journal of Control, Automation, and Systems, 査読有, Vol.7, No.4, 2009, pp.512-519.

DOI:10.1007/s12555-009-0402-6

⑦ Guisheng Zhai, Isatada Matsune, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: A Note on Multiple Lyapunov Functions and Stability Condition for Switched and Hybrid Systems; International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 査読有, Vol.5, No.5, 2009, pp.1189-1199.

<http://www.ijicic.org/>

⑧ Guisheng Zhai, Ryuen Kou, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: Stability Analysis and Design for Switched Descriptor Systems; International Journal of Control, Automation, and Systems, 査読有, Vol.7, No.3, 2009, pp.349-355.

DOI:10.1007/s12555-009-0303-8

[学会発表] (計6件)

① Guisheng Zhai, Masayuki Naka, Tomoaki Kobayashi, Joe Imae: An Approach to Simultaneous Realization of Neutral Steer and Sideslip Reduction for Four-Wheeled Electric Vehicles; Proceedings of 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, Beijing, China, August 8-10, 2011, pp.307-312.

② Guisheng Zhai, Xuping Xu, Daniel W. C. Ho: Stability of Switched Linear Discrete-Time Descriptor Systems: A Commutation Condition; Proceedings of 2011 American Control Conference, San Francisco, USA, June 29-July 1, 2011, pp.2613-2618.

③ Guisheng Zhai, Xuping Xu: Commutation Condition for Stability Analysis of Switched Linear Descriptor Systems; Proceedings of the 25th IEEE International Symposium on Intelligent Control, Yokohama, Japan, September 8-10, 2010, pp.2088-2093.

④ Guisheng Zhai, Yunya Takeda, Joe Imae, Tomoaki Kobayashi: An Approach to Achieving Consensus in Nonholonomic Systems; Proceedings of the 25th IEEE International Symposium on Intelligent Control, Yokohama, Japan, September 8-10, 2010, pp.1476-1481.

⑤ Guisheng Zhai, Xuping Xu: A Unified Approach to Analysis of Switched Linear Descriptor Systems Under Arbitrary Switching; Proceedings of The 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, December 16-18, 2009, pp.3897-3902.

⑥ Xuping Xu, Guisheng Zhai, Shouling He: On Practical Stabilizability of Discrete-Time Switched Affine Systems; Proceedings of The 48th IEEE Conference on Decision and Control, Shanghai, China, December 16-18, 2009, pp.2144-2149.

[図書] (計1件)

① Guisheng Zhai: Stability and L_2 Gain Analysis of Switched Linear Discrete-Time Descriptor Systems, (ed.) Mario Alberto Jordan, Discrete Time Systems (ISBN: 978-953-307-200-5), InTech Education and Publishing, 担当: Chapter 19 (pp.337-350), 2011.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

サイ 貴生 (ZHAI GUI SHENG)
芝浦工業大学・システム理工学部・准教授
研究者番号: 30304190

(2) 研究分担者

小林 友明 (KOBAYASHI TOMOAKI)
大阪府立大学・工学研究科・助教
研究者番号: 70364023