

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 13 日現在

機関番号：32619

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25420451

研究課題名(和文)量子化誤差を有する切替えシステムの実用安定化

研究課題名(英文)Practical stabilization of switched systems with quantization errors

研究代表者

サイ 貴生 (Zhai, Guisheng)

芝浦工業大学・システム理工学部・教授

研究者番号：30304190

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)：本研究では、量子化誤差を有する複数のサブシステムから構成された切替えシステムの実用安定性と安定化問題を考える。量子化誤差の存在によって各サブシステムが共通な平衡点をもたないため、本研究は切替えシステムが望ましい平衡点へ実用漸近安定性を達成するための、量子化器パラメータの調整法及び切替えアルゴリズムを提案する。さらに、量子化器の影響を考慮して切替えアフィンシステムの二次安定性とL2ゲイン解析について考え、結果を拡張した。即ち、各サブシステム行列の凸結合が安定となり、ドリフト項の凸結合がゼロである条件の下で、切替えシステムの二次安定化を実現するための切替えアルゴリズムを提案した。

研究成果の概要(英文)：We have considered practical stability and stabilization of switched systems composed of several subsystems that do not have common equilibrium points and have quantization errors. We have proposed how to adjust quantization parameters together with switching laws such that the state of switched systems converge to certain desired point in the sense of practical asymptotic stability. Furthermore, considering quantizers' feature, we have studied quadratic stabilization and L2 gain property of switched affine systems. We have shown that if a convex combination of subsystem matrices is Hurwitz and another convex combination of affine vectors is zero, then we can design a state-dependent switching law and an output-dependent switching law such that the entire switched system is quadratically stable. The result has been extended to L2 gain analysis under state feedback, and to the case where the convex combination of affine vectors is nonzero.

研究分野：工学

キーワード：切替えシステム 量子化誤差 実用安定化 リヤプノフ関数 漸近安定性と安定化

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、単一の制御器で望ましい性能を達成できないシステムに対して、複数の制御器と適切な切替え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、おのこ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。典型的な例は量子化信号が各システムに存在する場合である。量子化信号(単純なケースはデータの丸めによるもの)がコンピュータやインターネットを介して制御やセンシングを行う環境に必ず存在することはよく知られている。本研究では最も一般的な量子化信号を想定し問題設定をしている、具体的に、信号 $z(t)$ が量子化器を経て $q(z(t))$ になり、 $|q(z(t))-z(t)| < \Delta$ を満たす誤差が生じる。この誤差の影響で (Δ が $z(t)$ の定数倍でなければ) 平衡点が変動してしまい、単一のシステムでも所定の平衡点へ収束しないことが多い。本研究で注目すべきことは、切替えシステムについて各サブシステムが共通な平衡点をもたなくても、適切な切替え法の下で、システムは通常のリヤプノフ安定と似たような振る舞いをもち、望ましい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”(finite-time stability)や“究極有界”(ultimate boundedness)などの概念に対する拡張となっている。既存研究として、代表者らの論文[1]では切替え連続時間システムの実用安定性を解析し、[2]では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。いずれの論文も望ましい平衡点を中心とする微小領域 ε -近傍(neighborhood)への収束を達成する“ ε -実用安定性”である。しかし、[1],[2]は各サ

ブシステムの平衡点のダイナミクスまで考慮・議論していないし、外乱抑制性能も考えていない。

参考文献:

[1] Zhai, Michel: On Practical Stability of Switched Systems; [Proceedings of the 41st IEEE CDC](#), 2002. Also in [International Journal of Hybrid Systems](#), Vol.2, No.2, pp.141-153, 2002.

[2] Xu, Zhai: On Practical Stability and Stabilization of Hybrid and Switched Systems; [IEEE Transactions on Automatic Control](#), Vol.50, No.11, pp.1897-1903, 2005.

[3] Zhai, Xu, He: On Practical Asymptotic Stabilizability of Switched Affine Systems; [Nonlinear Analysis: Hybrid Systems](#), Vol.2, No.1, pp.196-208, 2008.

[4] Xu, Zhai, He: Some Results on Practical Stabilizability of Discrete-Time Switched Affine Systems; [Nonlinear Analysis: Hybrid Systems](#), Vol.4, No.1, pp.113-121, 2010.

2. 研究の目的

本研究では、量子化誤差を有する複数のサブシステムから構成された切替えシステムの実用安定性と安定化問題を考える。量子化誤差の存在によって各サブシステムが共通な平衡点をもたないため、本研究の目標は切替えシステムが望ましい平衡点へ実用漸近安定性を達成するための、量子化器パラメータの調整法及び切替えアルゴリズムを提案することである。さらに、実用漸近安定化に加えて外乱抑制のために L_2 ゲイン解析と設計まで結果を拡張する。

3. 研究の方法

まず、量子化信号が存在しない切替え・ハイブリッドシステムについて -実用漸近安定性が達成する切替え信号を与え、その切替え信号のもとで量子化誤差が各サブシステムのフィードバックループに生じた場合に全体システムの振る舞いを定量的に解析する。量子化信号はコンピュータ制御の環境であれば必ず存在するが、本研究では主に(1)制御器(コントローラ)からサブシステムへの入力 $u(t)$;(2)サブシステムから制御器(コントローラ)への入力 $x(t)$ (あるいは $y(t)$)に対する(異なる)量子化器を想定する。それぞれの量子化パラメータが μ_1 と μ_2 ならば、

サブシステムへの真の入力は $\mu_1 q_1(u(t)/\mu_1)$ で、コントローラへの入力は $\mu_2 q_2(x(t)/\mu_2)$ となる。さらに、状態依存型切替え信号の場合はその入力も $\mu_3 q_3(x(t)/\mu_3)$ の形をとる。これらの量子化信号の存在でシステムの平衡点が移動し、各種安定性も保証できなくなる。そこで、参考文献[1],[2]で提案している不変集合に基づくアプローチを切替え・ハイブリッド系へ拡張し、システムの振る舞い(各サブシステムの平衡点の移動と ε -実用漸近安定性を達成する上界 ε)を定量的に評価する。さらに、漸近安定性の度合いを示す不変集合の大きさを徐々に減少させることによって、切替え・ハイブリッドシステムの ε -実用漸近安定性を所定レベルに達成する。理論的な証明は基本的に区分的リヤプノフ(あるいはリヤプノフライク)関数アプローチを用いて行われる。

次に、あらかじめ設計された切替え信号のもとで、全体システムが同じ実用漸近安定上界 ε を達成するための量子化パラメータ調整アルゴリズムを提案する。状態や入力に量子化器が存在する場合は文献[1],[2]のアプローチを拡張すれば調整できるが、切替え信号の入力に量子化が生じる場合は切替えアルゴリズムのロバスト性に関連して議論しなければならない。この部分は文献[3]のアプローチを参考して拡張する。さらに、量子化パラメータを調整することによって実用漸近上界 ε が下げられるか、 L_2 ゲインがどこまで達成できるか、を検討する。量子化パラメータと切替え信号を同時に設計して ε -実用漸近安定性と外乱抑制性能を達成することを目指す。そのため、(1)量子化パラメータを固定して切替え信号のクラス(パラメトリゼーション)を設計する;(2)切替え信号のクラスから、量子化パラメータを動かすことによってより小さな漸近安定上界 ε と合理的な L_2 ゲインを達成する切替え信号を選択する、という二段階に分けて研究を進める。

参考文献:

[1] Zhai, Chen, Imae, Kobayashi: Hybrid Stabilization of Discrete-Time LTI Systems with Two Quantized Signals; *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol.15, No.4, pp.509-516, 2005.

[2] Zhai, Mi, Imae, Kobayashi: Design of H_∞ Feedback Control Systems with Quantized Signals; *シミュレーション(日本シミュレー*

ション学会誌) Vol.24, No.2, pp.122-127, 2005.

[3] Lin, Zhai, Antsaklis: Optimal Persistent Disturbance Attenuation Control for Linear Hybrid Systems; *Nonlinear Analysis*, Vol.65, No.6, pp.1231-1250, 2006.

4. 研究成果

最初の3年間では当初の研究計画通り、量子化信号が生じた場合に切替え・ハイブリッドシステムが ε -実用漸近安定性を達成する十分条件とその切替えアルゴリズムを提案していた。具体的には、各サブシステムの平衡点移動を見積もり、 ε -実用漸近安定性を達成できる ε の上界を評価して漸近安定性の度合いを示す不変集合の大きさを徐々に下げていくアプローチを用いた。理論的な証明は区分的リヤプノフ関数を使って行われた。

最終年度では量子化器による影響を考慮して時変型切替えアファインシステムの安定性と L_2 ゲイン解析・設計について考察し、研究結果を拡張した。具体的に、各サブシステムのシステム行列の凸結合が安定行列となり、ドリフト項(常数ベクトル)の凸結合がゼロである条件の下で、切替えシステムの二次安定化を実現するための切替えアルゴリズムを提案した。ドリフト項(常数ベクトル)の凸結合がゼロでない場合は収束可能集合を考えることができる。更に、外乱入力と制御出力を有するアファイン切替えシステムについて、同じサブシステムの結合条件に基づき、安定化と L_2 ゲイン指標を達成するための切替えアルゴリズムを提案した。この成果は将来に一般の切替え非線形システムの漸近安定化に対しても線形近似を考えることによって拡張できると考える。また、量子化入力をもつマルチエージェントシステムの同期問題にも適用できると期待している。

本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。なお、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で論文を発表している。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)

Zhaoxia Duan, Guisheng Zhai, Zhengrong Xiang: Exponential Consensus for Hierarchical Multi-Agent Systems with Switching Topology and Inter-Layer Communication Delay; *IET Control Theory & Applications*, Vol. 10, No. 4, pp. 451-460, 2016. 査読有 .

Weiming Xiang, Guisheng Zhai, Corentin Briat: Stability analysis for LTI control systems with controller failures and its application in failure tolerant control; *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 61, No. 3, pp. 811-816, March 2016. 査読有 .

Weiming Xiang, Jian Xiao, Guisheng Zhai: Dissipativity and dwell time specifications of switched discrete-time systems and its applications in H-infinity and robust passive control; *Information Sciences*, Vol.320, pp.206-222, November 2015. 査読有 .

Guisheng Zhai: A Generalization of Graph Laplacian with Application to Distributed Consensus Algorithm; *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, Vol.25, No.2, pp.353-360, June 2015 . 査読有 .

Ning Chen, Guisheng Zhai, Yuqian Guo, Weihua Gui, Yiaoyu Shen: Parametric Stabilization of Quantized Interconnected Systems with Application to Coupled Inverted Pendulums; *Asian Journal of Control*, Vol.17, No.3, pp.1061-1069, May 2015 . 査読有 .

Guisheng Zhai, Chi Huang: A Note on Basic Consensus Problems in Multi-Agent Systems with Switching Interconnection Graphs; *International Journal of Control*, Vol.88, No.3, pp.631-639, March 2015. 査読有 .

Zhaoxia Duan, Guisheng Zhai, Zhengrong Xiang: State Consensus for Hierarchical Multi-Agent Dynamical Systems with Inter-Layer Communication Time Delay; *Journal of the Franklin Institute*, Vol.352,

Issue 3, pp.1235-1249, March 2015 . 査読有 .

Weiming Xiang, Guisheng Zhai, Jian Xiao: Stability Analysis and Failure Tolerant Control for Discrete-Time Linear Systems with Controller Failure; *International Journal of Control*, Vol.88, No.3, pp.559-570, March 2015. 査読有 .

[学会発表](計5件)

Chi Huang, Guisheng Zhai, Wenzhi Li: Quadratic Stabilization and L2 Gain Analysis of Switched Affine Systems; *Proceedings of the 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC2017)*, Chongqing, China, Paper ID: 1121, May 28-30, 2017. 査読有 .

Chi Huang, Guisheng Zhai, Gesheng Xu: An Algebraic Approach to Designing Consensus Algorithm of Networked High Dimensional Agents; *Proceedings of the 36th Chinese Control Conference (CCC2017)*, Dalian, China, Paper ID: 1422, July 26-28, 2017. 査読有 .

Huang, Daniel Ho, Guisheng Zhai: Distributed stabilization of fuzzy networked systems with event-based sampling scheme; *Proceedings of the 34th Chinese Control Conference (CCC2015)*, Hangzhou, China, July 28-30, 2015, pp. 7475-7480, July 2015. 査読有 .

Chi Huang, Daniel Ho, Guisheng Zhai, Lulu Li: Input-to-state synchronization of complex dynamical network with time-varying delays; *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference (CCC2014)*, Nanjing, China, July 28-30, 2014, pp. 1511-1516, July 2014. 査読有 .

Guisheng Zhai: Basic Consensus Problems in Multi-Agent Systems with Switching Interconnection Graphs; *Proceedings of 2013 CACS International Automatic Control Conference (CACS2013)* (Nantou, Taiwan, December 2-4, 2013), Paper: T1-4 1014, December 2013 . 査読有 .

〔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〕

ホームページ等：なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

サイ 貴生 (Zhai, Guisheng)
芝浦工業大学・システム理工学部・教授
研究者番号：30304190

(2) 研究分担者

尾崎 克久 (Ozaki, Katsuhisa)
芝浦工業大学・システム理工学部・准教授
研究者番号：90434282

(3) 連携研究者

()

研究者番号：

(4) 研究協力者

Xuping Xu
California Baptist Univ.・Professor

Daniel W.C. Ho
City University of Hong Kong・Professor

Chi Huang
Taiyuan Univ. Technology・Professor