

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 19 日現在

機関番号：17701

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2016

課題番号：25820184

研究課題名(和文) システムノイズを最大限除去する真に実用的な非線形確率最適制御理論の構築

研究課題名(英文) Construction of nonlinear stochastic optimal control theory for attenuating system noises

研究代表者

西村 悠樹 (Nishimura, Yuki)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号：20549018

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：まず，システムノイズと安定性との関係が非干渉となるような条件を導き、概不変集合(確率1で不変集合となるような集合)への安定化が可能となる条件を導いた。次に，確率漸近安定性を保証する確率リアプノフ関数の形を二回連続微分可能に限らないようにすることで，確率漸近安定化できるシステムのクラスを拡大できることを示した。そして，確率積分入力状態安定性(確率ISS性)の十分条件を明らかにするとともに，概有界安定性を局所概漸近安定性という名前で提案した。また，ウィーナ過程が安定性を増強させる現象についての解析を押し進め，複雑な非ホロノミックシステムが白色雑音によって安定化される十分条件を導いた。

研究成果の概要(英文)：We derived conditions that stochastic stability for dynamical systems is not influenced by their system noises, and then proposed sufficient conditions that the trajectories of controlled systems converge to some (weak) invariant set. The forms of stochastic Lyapunov functions, ensuring stochastic asymptotic stability, are relaxed to non-differentiable in order to increase the number of stabilizable stochastic systems. The sufficient conditions for stochastic integral-input-to-state stability and almost sure bounded stability were also derived, respectively. And then, stabilization strategy for nonholonomic systems by adding Gaussian white noises was developed.

研究分野：制御工学

キーワード：確率システム 安定論 非線形制御 最適制御 外乱減衰

1. 研究開始当初の背景

電力供給の危機が叫ばれている昨今の日本において、電気・機械システムの省エネルギーな運用はもはや必須課題である。そのため、システムを高効率かつ安定的に運用するための最適レギュレーション技術は高度に発展させるべきである。ただし、無駄なエネルギー消費を防ぐためにも、制御モデルは実態に極力近い非線形モデルとするべきである。さらに、システムそのものを励振させるノイズ(システムノイズ)を最大限除去する方策も必要である。すなわち、高度な省エネ・システムを実現するためには非線形確率最適制御を実用レベルにする必要がある。

非線形確率最適制御のキーポイントは安定化・最適化・外乱抑制の3つである。しかし、実用面で見れば、従来の理論ではこれらの補償が不十分であった。特に、従来理論の安定性では「100%の確率での目標値への整定」を保証しない。この主原因は、従来の理論が「解軌道そのもの」ではなく「解軌道の期待値」に対して作られていることに起因する。また、外乱抑制という観点では積分入力状態安定性(iISS性)のような確定システムにおける最先端の外乱抑制技術が採用されていないことも問題であった。

2. 研究の目的

システムノイズを最大限除去しつつ最適化と安定化を実用レベルで達成するための非線形最適確率制御理論を構築することが最終目標であった。具体的には、従来理論では曖昧だった「100%の確率で目標値に整定する条件」を詳細に分析した上で、積分入力状態安定性(iISS性)を始めとする最先端の外乱除去理論を非線形確率システム向けに拡張する。そして、提案理論の实在モデルに対する有用性を示すため、実機実験で検証することを目標としていた。具体的には以下を明らかにする目的であった。

- (1) 確率システムの解過程を確率 1 で安定化・有界化するための必要十分条件を導く。
- (2) ノイズの影響を有界に保つため、iISS性を確率システムへの制御用に拡張する。
- (3) これらを統合して実用的非線形確率最適制御理論を構築する。
- (4) さらに、提案理論が実用シーンで役立つことを明らかにするため実機実験を実施する。

3. 研究の方法

まず、研究代表者のこれまでの調査結果を進展させ、「システムノイズが安定性に対して非干渉となる条件」「制御量が整定誤差内に100%収まる条件」「制御量が設定された値

より100%はみ出さない条件」を求め、確定システムに対する積分入力状態安定性(iISS性)を確率システム向けに拡張することを目的とした。その上で、これらを組み合わせることで最大限の外乱除去と最適化のもとでの安定化を分けて設計可能な新しい確率最適制御理論を導出し、それが現実モデルに有効であることを実機実験により示すことが最終目的であった。具体的な計画は以下の通り。

(1) ノイズ - 安定性間の非干渉化設計

従来の局所確率漸近安定性は「100%目標値に整定する」という性質を与えていない。しかし、現実のモデルには状態や入力に制約があるため、大域確率漸近安定性を保証するのは現実的ではない。一方、局所概漸近安定性は「100%の整定」を保証できるうえ、システムノイズが漸近安定性に対して非干渉であることまで保証できる。そこで、これを利用してシステムノイズの非干渉化を達成する制御設計手法を構築する。

(2) 概部分集合への概漸近安定化設計

システムノイズの非干渉化は有用だが、成立条件は厳しいはずである。実用的には整定精度が保証されれば良いため、その整定精度への概漸近安定化法を開発する。

(3) 概有界化制御設計

実用的には「最終的に収束させたい集合」の他に「ノイズによってはみ出して欲しくない集合」も存在する。そのための制御設計法を開発する。

(4) 確率 iISS 性の提案

入力状態安定性(ISS性)は外乱に対して状態が有界に保たれる性質である。しかし、ISS性は条件が厳しすぎるということが知られている。そこで、ISS性を緩和した積分入力状態安定性(iISS性)を確率システム用に拡張し、その性質が成り立つ必要十分条件について検討する。

(5) 実用的非線形確率最適制御理論の構築

以上の成果を統合し、実用的非線形確率制御理論を構築する。システムノイズが実際のシステムに与える影響を設計の範囲内に収めつつ、最適化と安定化を同時に達成するための制御設計手法を提案する。

(6) 実機実験

以上の理論的成果が実用的であることを確認するため、超音波モータのサーボ制御などに適用し、検討を行う。

4. 研究成果

まず、システムノイズと安定性との関係が非干渉となるような条件を導き、概不変集合(確率1で不変集合となるような集合)への

安定化が可能となる条件を導いた。次に、確率漸近安定性を保証する確率リャプノフ関数の形を二回連続微分可能に限らないようにすることで、確率漸近安定化できるシステムのクラスを拡大できることを示した。そして、確率積分入力状態安定性（確率 iISS 性）の十分条件を明らかにするとともに、概有界安定性を局所概漸近安定性という名前で提案した。また、ウィーナ過程が安定性を増強させる現象についての解析を押し進め、複雑な非ホロノミックシステムが白色雑音によって安定化される十分条件を導いた。

特に、3. で述べた(1),(2),(3),(4),(6)は概ね達成できたと言える。そのため、それらを統合すれば(5)はただちに実現できると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 7 件)

Y. Nishimura: Stabilization by unbounded-variation noises, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 26-18, 4126/4147, 2016, 査読有, DOI: 10.1002/rnc.3553.

Y. Nishimura: Stabilization by artificial Wiener processes, IEEE Transactions on Automatic Control, 61-11, 3574/3579, 2016, 査読有, DOI: 10.1109/TAC.2016.2522087.

H. Ito, Y. Nishimura: An iISS framework for stochastic robustness of interconnected nonlinear systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 61(6), 1/16, 2016, 査読有, DOI: 10.1109/TAC.2015.2471777.

西村悠樹, 吉野裕之, 田中幹也: 同次有限時間整定制御による超音波モータの位置決め制御, システム制御情報学会論文誌, 29-6, 235/241, 2016, 査読有, DOI: 10.5687/iscie.29.235.

西村悠樹, 石丸裕二, 近藤英二, 中尾光博: 同次制御に基づくアクティブ動吸振器の制振性能解析, 日本機械学会論文集, 81(832), 2015, 査読有, DOI: 10.1299/transjsme.15-00373.

Y. Nishimura: Quasi-optimal regulators for nonholonomic systems driven by rough paths, IFAC-PapersOnline, 48(13), 51-56, 2015, 査読有, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.10.213.

Y. Nishimura: Lyapunov stability for dynamical systems driven by rough paths, IFAC-PapersOnline, 48(11), 994/999, 2015, 査読有, DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.09.322.

〔学会発表〕(計 16 件)

吉野裕之, 西村悠樹: 外乱状態安定性に基づく有限時間整定制御のチャタリング低減実験, 計測自動制御学会・第3回制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月9日, 南山大学名古屋キャンパス(愛知県・名古屋市).

石丸裕二, 西村悠樹, 近藤英二: アクティブ動吸振器における外乱状態抑制性能の解析, 計測自動制御学会・第3回制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月9日, 南山大学名古屋キャンパス(愛知県・名古屋市).

佐久間悠, 西村悠樹: 超音波モータ制御のためのモデリング手法の開発, 計測自動制御学会・第3回制御部門マルチシンポジウム, 2016年3月7日, 南山大学名古屋キャンパス(愛知県・名古屋市).

西村悠樹: 非線形システムの確率漸近安定化における性質と適用可能範囲, 第58回自動制御連合講演会, 2015年11月15日, 神戸大学六甲台第2キャンパス(兵庫県・神戸市).

吉野裕之, 西村悠樹: 同次有限時間整定制御による超音波モータの位置決め制御, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015年5月22日, 中央電気倶楽部(大阪府・大阪市).

原希実, 西村悠樹: McShane型人工Wiener過程による非ホロノミックシステムの確率指数安定化, 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015年5月20日, 中央電気倶楽部(大阪府・大阪市).

Y. Nishimura: Almost restoring problem of deterministic asymptotic stability against additive noises, the 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2014年10月9日, アンティープ(フランス).

Y. Ishimaru, Y. Nishimura, E. Kondo, and M. Nakao: Control design of active dynamic vibration absorber based on homogeneous control Lyapunov functions, the 2014 IEEE Multi-conference on Systems and Control, 2014年10月9日, アンティープ(フランス).

Y. Sakuma, Y. Nishimura, E. Kondo, M. Nakao, and K. Tanaka: LQI servo control model for ultrasonic motor with nonlinear compensation, SICE Annual Conference 2014, 2014年9月10日, 北海道大学(北海道・札幌市).

Y. Nishimura: A bridge between stochastic and deterministic asymptotic stability with convergence rates and intensity rates, the 21th International Symposium on Mathematical Theory of Networks and

Systems (MTNS 2014), 2014年7月8日, フローニンゲン(オランダ).
石丸裕二, 西村悠樹, 近藤英二, 中尾光博: 同次制御リャプノフ関数に基づくアクティブ動吸振器の制御設計, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014年5月23日, 京都テルサ(京都府・京都市).
佐久間悠, 西村悠樹, 近藤英二, 中尾光博, 田中幹也: 超音波モータの非線形動特性解析とサーボ制御モデリング, 第58回システム制御情報学会研究発表講演会, 2014年5月23日, 京都テルサ(京都府・京都市).
樋口裕太郎, 西村悠樹, 近藤英二, 中尾光博: 厳密微分器による超音波モータのサーボ制御性能改善, 第46回計測自動制御学会北海道支部学術講演会, 2014年3月9日, 北海道大学工学部(北海道・札幌市).
Y. Nishimura: Stabilization of Brockett integrator using Sussmann-type artificial Wiener processes, Proc. 52nd IEEE Conference on Decision and Control, 7850/7855, 2013年12月13日, フィレンツェ(イタリア).
Y. Nishimura: Stability analysis of dynamical systems randomized by multi-dimensional Wiener processes, SICE Annual Conference 2013, 2013年9月17日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市).
西村悠樹: 再訪! 確率Lyapunov安定論, 第57回システム制御情報学会研究発表講演会(SCI'13), 2013年5月17日, 兵庫県民会館(兵庫県・神戸市).

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし

(4)研究協力者
なし

〔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

鹿児島大学工学部機械工学科西村研究室
<http://www.mech.kagoshima-u.ac.jp/~yuni-shi/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

西村 悠樹 (NISHIMURA, Yuki)

鹿児島大学・理工学域工学系・准教授

研究者番号: 20549018