

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 19 日現在

機関番号：15401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760338

研究課題名(和文) 確率解析と統計力学に基づく非線形確率最適制御の新しい解法と学習への応用

研究課題名(英文) A new solution method for nonlinear stochastic optimal control based on stochastic analysis and statistical mechanics and its application to learning control

研究代表者

佐藤 訓志 (Sato, Satoshi)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60533643

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)：本研究ではまず、確率解析と統計力学に基づく非線形確率最適制御問題に対する反復解法を構築し、真の解に収束するための条件を明らかにした。提案手法により、これまで十分な解法がなかった非線形確率最適制御問題に対して最適フィードバック入力を得ることが可能となった。つぎに、この方法を利用して確定非線形最適制御問題の確率的な学習による解法を提案した。本手法により、試行実験の反復を行いながら、人工的に加えたノイズの共分散を零としていく極限において、確定最適制御問題の最適フィードバック入力の近似解が得られる。さらに、ロボットマニピュレータを用いた実機検証により提案手法の効果を確認した。

研究成果の概要(英文)：We have developed a new iterative solution method for nonlinear stochastic optimal control problems based on stochastic analysis and statistical mechanics. We have also clarified conditions for convergence of a sequence of iterative solutions. This method enables us to obtain an optimal feedback control input for a nonlinear stochastic optimal control problem for which a sufficient solution has not been provided so far. Then, we have proposed a stochastic approximate solution to a deterministic optimal control problem. In this method, a sub-optimal feedback control input is obtained by iteration of laboratory experiments as the covariance of an artificially added noise tends to zero. Finally, we have performed experimental verification of the proposed methods with a robot manipulator.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形制御 確率制御 最適制御

1. 研究開始当初の背景

申請者は実用上重要な、外乱やノイズを含む力学系を確率力学系と捉え、力学系特有の性質と確率解析に基づく制御手法を提案してきた。特に申請者らが提案した確率力学系の対称性を利用した学習最適制御法は、学習中の外乱を考慮しながら評価関数の期待値を最小化する最適入力、制御対象の数理モデルを用いずに生成できるという利点をもつ。しかし、この手法はフィードフォワード制御であるため、学習中の外乱は考慮できるが、得られる最適入力はフィードフォワード入力である。そのため、この入力を用いて生成される最適軌道をタスク軌道として実際に使用する際は、この軌道を別途安定化する必要があった。

2. 研究の目的

本研究では、申請者のこれまでの結果を踏まえながら、フィードバック制御として最適入力を生成する方法を考える。

具体的には以下の3つの目標を設定し、フィードバック確率最適制御の新しい解法の構築と学習への応用、またその実機検証を目的とする：**目標**「確率解析と統計力学に基づく非線形確率システム最適フィードバック入力の生成法の提案」、**目標**「目標の手法のモデルフリー学習制御への拡張」、**目標**「目標の手法の実機検証。特に歩行ロボットを用いた最適歩行軌道生成問題への適用」。

3. 研究の方法

非線形確率システムに対する確率最適制御問題は、確率ハミルトン・ヤコビ・ベルマン (SHJB) 方程式の求解問題に帰着されることが知られている。しかし、この方程式は確率解析に基づくノイズに起因する項を含む非線形2階偏微分方程式であり、一般的に解くことが難しい。そこで、申請者は統計力学の分野において Kappen により提案された経路積分確率最適制御法 (以下、経路積分法) に注目した。この方法は特別な条件の下で、SHJB 方程式にある指数変換を施すことで、非線形項が変換後に打ち消され、線形2階偏微分方程式が得られる。この方程式は線形であるだけでなく、ファイマン-カッツの公式から既知関数の期待値の形で陽に解が与えられる特別な構造をもつ。さらに、この解に経路積分解析を適用することで最適フィードバック入力も得られる。この手法は、従来法にはない多くの利点をもち、非線形確率最適制御問題の有効な解法の一つといえるが、この手法が必要とする特別な条件が、適用可能

な問題のクラスを大きく制限していることや、使われている指数関数によって数値的不安定性を引き起こし得るなどの課題もあった。

そこで、前述の目標では、より広いクラスの非線形確率システムに対して、従来法の利点を受け継ぎながら、異なる方法で非線形2階偏微分方程式を線形偏微分方程式へと帰着させ、確率最適制御の解が得られる方法を提案した。具体的には、従来法が必要とした特別な条件と指数変換を使う代わりに、各反復が線形偏微分方程式で与えられるような反復規則を提案し、逐次近似に基づく反復解法 (以下、反復型経路積分法) を構築した。各反復規則は、従来法と構造が異なるものの、こちらもファイマン-カッツの公式から陽に解が与えられる特別な構造をもっており、解の表現も与えた。ここで得られた各反復の解表現に経路積分解析を適用し、対応する準最適フィードバック入力も得た。さらに収束解析も行い、提案手法が反復を繰り返すことで元の SHJB の解に収束するための条件も明らかにした。

つぎに目標に関して、目標で構築した手法を基に、制御対象の数理モデルを用いない最適制御問題の学習的解法を提案した。この手法を簡単に述べると、確定非線形最適制御問題の確率的な学習的解法を提供する。より具体的には、まず問題設定として確定非線形システムの最適制御問題を考え、このシステムに人工的にノイズポートを付加し、評価関数の期待値を取ることで確率最適制御問題を構成する。このように構成した確率最適制御問題に対して、反復型経路積分法を適用し、確率最適フィードバック入力を反復計算していく。この反復過程において人工的に付加したノイズの分散を小さくしていくことで、最終的に元の確定非線形システムの最適制御問題に対する最適フィードバック入力を得るものである。人工的な確率システムを構成することで、反復型経路積分法において確率最適フィードバック入力の算出に必要なノイズ項の微小変化量を制御対象のモデルを用いることなく実験で得られる状態量に関するデータのみから計算することが可能になるため、確定非線形最適制御問題に対する確率的な学習的解法を与えることが可能となった。

さいごに目標に関して、理論と実機検証の両面から研究を遂行した。まず理論面では、二次元歩行ロボットモデルの不整地上の最適歩行軌道生成を非線形確率最適制御問題として定式化し、さらに提案手法に基づく解法を与え、数値シミュレーションにおいて有効性を確認した。つぎに検証でも用いる実機に関して、既存の小型歩行ロボット製品のほとんどが位置制御のみを想定しているが、提

案手法を歩行ロボットへ適用するにはトルク制御が必要となる。そこで、トルク制御が可能なロボットを製作のために、電流フィードバック制御が可能なシリアルモータを選定し、歩行ロボットを想定した複数のモータから成るリンク系についてトルク制御システムを構築した。

4. 研究成果

研究成果として、まず確率解析と統計力学に基づく非線形確率最適制御問題の反復解法である反復型経路積分法を構築し、真の解に収束するための条件も明らかにした。提案手法は先行研究である経路積分法が必要としていた、適用できる問題のクラスを大きく制限してしまう特別な条件を必要とせず、さらに数値的不安定性を引き起こし得る指数変換も用いないため、従来法の問題点を解決し、これまで十分な解法がなかった広いクラス of 非線形確率最適制御問題に対して最適フィードバック入力を得ることが可能となった。提案法における各反復規則の解の表現と対応する準最適フィードバック入力を陽に与えており、統計力学の分野で発展してきた各種のサンプリング手法を用いた効率的な数値計算法も提案している。この方法は並列計算とも相性がよく、いくつかの数値実験において実際に並列計算の有効性を確認している。このように、提案手法は反復計算により非線形確率最適制御問題の真の解への収束が保証されるという理論的な利点だけでなく、各種サンプリング手法や並列計算などの数値計算法との相性が良いという実装上の利点も持っている。

二つ目の成果として、反復型経路積分法の結果を利用した確定非線形最適制御問題の確率的な学習による解法も得られた。本手法により、試行実験の反復を行いながら、人工的に加えたノイズの共分散を零としていく極限において、確定最適制御問題の最適フィードバック入力の近似解が得られる。真の解に収束するためのノイズの共分散の収束速度に関する条件は当該研究期間内では得られなかったため、理論的な課題はまだ残るが、ロボットマニピュレータを用いた実験においては有効性が確認できた。

三つ目の成果として、まず路面勾配を確率変数として表現した不整地モデル上を運動する二次元歩行ロボットを確率システムとしてモデル化し、不整地上の最適歩行軌道生成を非線形確率最適制御問題として定式化した。さらに提案手法に基づく解法を与え、数値シミュレーションにおいて有効性を確認した。つぎに、実機検証に向けてシリアルサーボモータを用いたトルク制御可能なロボットを製作した。はじめに平面歩行ロボット

を作成し歩行実験を行ったが、学習途中における転倒の頻発が原因で学習による歩行軌道の生成は当該研究期間中には達成できなかった。しかし、モータを直列に配置し、根本リンクを台座に固定して新たに製作したロボットマニピュレータに対しては学習を行うことができ、目標軌道へ追従する入力トルクを学習により獲得することができた。

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 10 件)

1. S. Satoh and M. Saeki: Bounded stability of nonlinear stochastic systems, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.8, 2015, pp.181-187
2. 山内淳矢, 佐藤訓志, 畑中健志, 藤田政之: 視覚運動オブザーバの確率的推定性能解析, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, 2014, pp.443-451
3. S. Satoh and M. Saeki: Bounded stabilization of stochastic port-Hamiltonian systems, International Journal of Control, 査読有, Vol.87, 2014, pp.1573-1582
4. 佐伯正美, 山成真輝, 和田信敬, 佐藤訓志: モデルマッチングによるデータ駆動制御器設計のための参照モデルの選定, システム制御情報学会論文誌, 査読有, Vol.27, No.3, 2014.3, pp.73-79
5. 佐藤訓志, 藤本健治, 佐伯正美: 学習最適制御に基づく軌道学習と身体パラメータ調整による最適歩容生成, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.49, 2013, pp.846-854
6. S. Satoh, K. Fujimoto and S. Hyon: Gait generation via unified learning optimal control of Hamiltonian systems, Robotica, 査読有, Vol.31, 2013, pp.717-732
7. S. Satoh and K. Fujimoto: Passivity based control of stochastic port-Hamiltonian systems, IEEE Transactions on Automatic Control, 査読有, Vol.58, 2013, pp.1139-1153
8. T. Iwamoto, M. Saeki, S. Satoh, and N. Wada: Speeding up of calculation for mu-synthesis of low order H-infinity controllers, SICE Journal of Control,

Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.6, 2013, pp.202-207

9. 佐伯正美, 和田信敬, 佐藤訓志: 過渡応答データを用いたフィルタバンクによるゲイン推定と Extension 定理, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.49, 2013, pp.425-431

10. 佐藤訓志, 佐伯正美: 左連続動的システムにおける周期軌道の指数安定性について一般化ポアンカレ写像に基づくアプローチ, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol.48, 2012, pp.657-663

〔学会発表〕(計 5 件)

1. S. Satoh and M. Saeki: A unified approach to nonlinear stochastic control based on path integral analysis, Proceedings of SICE International Symposium on Control Systems, Tokyo, 4-7 Mar 2015

2. M. Saeki, K. Kondo, N. Wada and S. Satoh: Data-driven online unfalsified control by using analytic center, Proceedings of 53rd IEEE Conference on Decision and Control, Los Angeles, USA, 15-17 Dec 2014

3. S. Satoh and M. Saeki: A study of stochastic input-to-state stability of a class of stochastic port-Hamiltonian systems, Proceedings of Mathematical Theory of Networks and Systems, Groningen, The Netherlands, 7-11 Jul 2014

4. S. Satoh: Iterative path integral method for nonlinear stochastic optimal control, Workshop on statistical physics of inference and control theory, Granada, Spain, 12-16 Sep 2012

5. S. Satoh and M. Saeki: Bounded stabilization of a class of stochastic port-Hamiltonian system, Proceedings of Mathematical Theory of Networks and Systems, Melbourne, Australia, 9-13 Jul 2012

〔その他〕

ホームページ

http://home.hiroshima-u.ac.jp/satoh/index_ja.html

ビデオレクチャー

http://videolectures.net/cyberstat2012_satoh_optimal_control/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐藤 訓志 (SATOH SATOSHI)

広島大学, 大学院工学研究院, 助教

研究者番号: 60533643