

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 15 日現在

機関番号：15401

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2010～2011

課題番号：22860041

研究課題名（和文） 外乱抑制を考慮した確率システム理論による学習最適制御の構築と歩行ロボットへの応用

研究課題名（英文） Development of learning optimal control method considering disturbance attenuation based on stochastic systems theory and its application to walking robots

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

研究成果の概要（和文）：本研究ではまず、従来の確定ハミルトン系を確率ハミルトン系として拡張し、確率受動性や、対称性などのこのシステムが有する性質を明らかにした。この対称性は、確率ハミルトン系の変分系とその随伴系の状態空間表現が、互いの時間反転となる性質である。確率システムの随伴系は後退確率微分方程式となり、計算が困難であるが、この対称性を利用することで対応する前進確率微分方程式の計算に帰着できる。つぎに、この性質を利用して確率力学系の性質に基づく新しい学習最適制御法を与えた。本手法は、評価関数の期待値の勾配方向に入力を逐次的に更新することで、評価関数の期待値を（局所的に）最小化する最適なフィードフォワード入力と対応する最適軌道を生成するものである。一般的には、この勾配を計算する際に現れる随伴系の計算のために制御対象の情報が必要となるが、本手法では前述の対称性を利用することでこの問題を回避することができる。

研究成果の概要（英文）： Firstly, we have extended conventional deterministic Hamiltonian systems to stochastic ones, and have clarified some of their properties such as stochastic passivity and symmetry. This symmetry is a property that a state-space realization of the variational system of a stochastic Hamiltonian system coincides with a time-reversal version of that of the adjoint one. Although the adjoint system is described by a backward stochastic differential equation, and it is generally difficult to be solved, the symmetric property enables us to solve the problem by calculating a corresponding forward stochastic differential equation. Secondly, we have proposed a new learning optimal control method based on the symmetric property of stochastic dynamical systems. This method generates an optimal feedforward input and a corresponding optimal trajectory, which minimize (at least locally) the expectation of a given cost function by iteratively updating the input in the gradient direction of the expectation of the cost function. In calculating the gradient, the adjoint system has to be calculated, and it generally requires the precise knowledge of the plant system. However, the proposed method can solve the problem without information of the plant system by utilizing the symmetric property.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,260,000	378,000	1,638,000
2011年度	1,160,000	348,000	1,508,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,420,000	726,000	3,146,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：制御工学

キーワード：非線形制御，確率制御

1. 研究開始当初の背景

近年の歩行ロボット技術の進歩に伴い、エネルギー効率に優れた歩行軌道(歩容)の生成手法の確立は重要な課題となっている。しかし、従来の歩行制御法は、ロボットの姿勢安定性に焦点が置かれ、エネルギー効率まで考慮されたものは多くない。また、一般に歩行ロボットは多自由度であり、歩行軌道の設計には、設計者による試行錯誤を要することが多かった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ロボットの構造に依存しない力学系の性質のみを積極的に利用し、学習制御に基づく未知の最適軌道の系統的な生成法を考案することである。さらに、確率システム理論に基づき得られた結果を確率システムへと拡張することで、学習中の外乱やノイズを陽に考慮した新しい学習法を構築する。

3. 研究の方法

本研究ではまず、先行研究により提案されているハミルトン力学系の対称性を利用した反復学習制御法を拡張し、歩行ロボットの最適歩容生成に適用できる学習法を与えた。具体的には、第一に従来の学習制御法は出力の時間微分を含む評価関数を扱うことができなかった。これは歩行ロボットの関節角速度に相当し、運動エネルギーに直接関係する変数であることから、エネルギー効率に優れた歩

行軌道の生成にはこの変数を含む評価関数を最小化する必要があった。第二に、従来法は不連続な状態遷移を含む運動を扱うことができなかった。歩行運動は着地時に不連続な速度の変化を伴うため、最適歩行軌道の生成にはこのような状態遷移の考慮は必須となる。提案した拡張法ではまずこの二点の問題を解決した。しかしこの方法は確定システムを対象とするため、つぎにハミルトン系を確率システムとして定式化を行い、この確率ハミルトン系が拡張された対称性を有する条件を与えた。この性質を利用して、確率システムへと拡張された新しい学習制御手法を与えた。

4. 研究成果

まず、擬似共役微分作用素に関する性質を導出し、これを用いた方法により、従来法が扱うことができなかった出力の時間微分を含む評価関数にも学習を適用できるようにした。また、歩行運動にともなう離散的な状態遷移を非線形写像とみなし、これを実験データから推定する方法を得た。これらを組み合わせ、歩行開始から着地直前までの連続的な軌道を前述の方法により学習し、着地による状態遷移をこの方法で推定するという拡張法を考案した。提案法により、歩行ロボットの最適歩容生成に適用できる学習法を与えた。

つぎに、外乱を含めた制御対象を確率システムと捉え、従来の確定ハミルトン系を確率ハミルトン系として拡張し、確率受動性や、

対称性などこのシステムが有する性質を明らかにした。確率受動性を利用することで、一般的に安定化が困難な非線形確率システムに対して、比較的容易に安定化制御則を設計することが可能となる。また、対称性を利用して確率力学系の性質に基づく新しい学習最適制御法を与えた。本手法は、評価関数の期待値の勾配方向に入力を逐次的に更新することで、評価関数の期待値を(局所的に)最小化する最適なフィードフォワード入力と対応する最適軌道を生成するものである。勾配の計算に現れる随伴系の計算のために、一般的には制御対象の情報が必要となるが、本手法では前述の対称性を利用することでこの問題を回避することができる。

さいごに、この手法の特徴を以下に挙げる。

- ・ ロボットの詳細な情報を必要とせず、様々な構造のロボットに普遍的に適用できる。
- ・ 学習中の外乱やノイズを陽に考慮できる。
- ・ 学習により、与えられた評価関数の期待値を最小化する最適な軌道を生成できる。

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 1 件)

1. 佐藤訓志, 藤本健治, 玄相昊: 不連続な状態遷移を考慮した学習最適制御による歩行軌道の生成手法, 日本ロボット学会誌, Vol. 29, pp. 90-100, 2011, 査読あり

[学会発表] (計 3 件)

1. Satoshi Satoh and Kenji Fujimoto: A symmetric structure of variational and adjoint systems of stochastic Hamiltonian systems, 49th IEEE Conference on Decision and Control, 15-17 Dec 2010, Atlanta, U.S.A
2. Satoshi Satoh and Kenji Fujimoto: Stabilization of time-varying stochastic port-Hamiltonian systems based on stochastic passivity, 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, 1-3 Sep 2010, Bologna, Italy
3. Satoshi Satoh, Masahito Ikeda, Kenji Fujimoto and Yoshikazu Hayakawa: Modification of learning optimal gait generation method in considering discontinuous velocity transitions, SICE 2010 Annual Conference, 18-22 Aug 2010, Taipei, Taiwan

[その他]

ホームページ等

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

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

(2) 研究分担者
()

研究者番号：

(3) 連携研究者
()

研究者番号：