

平成 22 年 5 月 1 日現在

研究種目： 若手研究 (A)  
 研究期間： 平成 19 年度 ～平成 21 年度  
 課題番号： 19680012  
 研究課題名 (和文)  
 カオティックダイナミクス整合によるロボット制御のための強化学習システム  
 研究課題名 (英文)  
 Reinforced learning by the chaotic dynamics matching for robot control  
 研究代表者  
 坪根 正 (TSUBONE Tadashi)  
 長岡技術科学大学・工学部電気系・准教授  
 研究者番号： 50334694

研究成果の概要 (和文)：本研究課題は、カオス理論に基づき「制御系のダイナミクスを制約条件やタスクに応じて高速・柔軟に適応させる手法」であるカオティックダイナミクス整合を提案して、自律的に行動を獲得する強化学習システムを実現するものである。これに対して以下の成果を得た。同定学習制御パラメータに関する引き込み領域を理論的に解析し設計手法の有用性を示した。ロボット実機での制御・学習特性を明らかにした。ヒト脳情報を学習に利用するための検証を行いその可能性明らかにした。

研究成果の概要 (英文)：Chaotic dynamics matching which can be applied for a dynamics of the control systems with high-speed and flexibly according to the condition and the task based on the chaos theory is proposed. It achieves the reinforcement learning system that acquires the action autonomous. The following results were achieved. The attraction domain for the identification learning control parameter was theoretically analyzed and the availability of the design approach was shown. The control and the learning characteristic in a real robot were clarified. The possibility to use of human brain information to learning was verified.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
19 年度	6,000,000	1,800,000	7,800,000
20 年度	8,400,000	2,520,000	10,920,000
21 年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
年度			
年度			
総計	19,400,000	5,820,000	25,220,000

研究分野：

科研費の分科・細目： 情報学・感性情報学・ソフトコンピューティング B

キーワード：カオティックダイナミクス整合，ロボット制御，強化学習

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

ロボットに何らかの仕事を行わせる場合、それが高度な動作でも、人間が制御則を作りこむこと（プログラミング）で、それを遂行させることは可能である。しかし、将来日常生活環境で人間と共存し、与えられた仕事を自律的に遂行するロボットを実現する為には、固定された制御則を用いるだけでなく、動的に変化する環境の中でロボットの行動を適応的に改善する設計方針が必ず必要である。

近年ロボットが自律的に環境・行動を獲得する手法として、ロボット自身が試行錯誤して制御則を得る強化学習が注目されている。この強化学習を用いたロボット制御について、1990年代後半以降国内外で様々な研究がおこなわれている。例えば先駆的な例としてATRの銅谷氏らの研究などが有名である。また、九大の木村氏らの研究では、強化学習により歩行動作を獲得するロボット等を開発しており、商業ベースへ向けた動きも見られる。

これらの研究において、長時間に渡る学習が必要であり、実機であるロボットに学習させるのは大きな問題である。また学習過程での器物の破損など安全性の問題もあり、学習時間の短縮は最重要な研究課題の一つである。また、状態の変化に柔軟に対応出来る（つまり制御可能な状態空間が広い）ロボット制御の実現も重要な課題と言える。それが実現されれば、ホームロボットのような多様な環境の中でも自律・適応的なロボット実現に多大な貢献が期待される。

この問題に対して、カオス理論を導入して解決を図ろうという試みは国内外通して見当たらず、完全な応募者のオリジナルである。

2. 研究の目的

1) 経緯

以前（H14-16, 科研費若手B）研究代表者は新しい動的カオス制御手法（後述）を開発した。提案手法と強化学習システムを組み合わせると、高速に制御対象のダイナミクスの獲得ができ、環境の変化に柔軟に順応する（安定化制御可能な広い状態空間を持つ）新しい

ロボット制御の達成が予想された。

一方で研究代表者は、生体信号を利用した制御学習システムの研究（H18-19, 科研費基盤A, 分担者）を行っていたが、脳波等の生体信号を利用したロボット制御学習システムを実現するとき、人間に負担が掛かるため、短い学習時間が望まれ、かつ、状態の変化に対して柔軟に対応できる制御系は不可欠である。

近い将来必ず所望されるであろう、生体信号を利用した、ロボット制御・学習システムの実現のためには、本申請研究の、柔軟な制御のための高速な学習機能を実現するプロジェクトは必要不可欠である。

研究代表者は、科研費若手B, H14-16, 「多様な非線形現象を呈するスイッチング回路の合成と解析に関する研究」で、新しい動的カオス制御手法を開発した。この原理を応用すれば制御系の持つダイナミクスを状態やタスクに応じて適応（整合）出来る。本手法を「カオティックダイナミクス整合」と呼ぶことにし、本申請研究で開発、検証を行うことを目的とした。

2) 何をどこまで明らかにしようとするのか  
カオティックダイナミクス整合を利用したロボット制御のための強化学習システムの構築を行い、その基礎理論を確立させ、次の項目を明らかにする。

① 高速に

ロボット制御のための高速強化学習システムの設計。

② 柔軟に

状態の変化に対する、制御および学習の特性を明らかにする。制御可能な状態空間が広い、ロボット制御のための強化学習システムの設計。

本研究で得られた知見を元に、生体信号を利用する、より高度な次世代ロボット制御・学習システムの開発研究へ、今後邁進する。

3. 研究の方法

若手研究B（平成14-16年度）において、研究代表者は新しい動的カオス制御手法を開発した。カオスとは、無数の（不安定な）周期解を遷移しながら不規則に振舞う現象で、そ

の周期解を安定化する手法がカオス制御である。系のダイナミクスと周期解が既知なら、古典的な制御手法でも安定化できる。

これに対し研究代表者の開発した手法は、系のダイナミクスと安定化したい周期解が未知でも、その周期解を安定化させることが出来る。

この手法を利用すれば、カオスシステムに限らず非線形ダイナミカルシステムのダイナミクスや状態（安定化したい平衡点等）を同定、推定することが可能である。これを、強化学習の枠組みに組み込み「カオティックダイナミクス整合」を達成して、柔軟な制御のための高速強化学習システムを実現する「異なるダイナミクスを持つ系に対して、同じ制御測と制御パラメータを持つコントローラで安定化制御が可能な技術」を、応用する。ダイナミクスも平衡状態も異なる系の安定化が一つの整合器で達成される。制御パラメータの設計は従来手法では困難であり強化学習を用いる。しかしながら、整合器がダイナミクス同定的な機能を持つ為、少ない学習回数で探索可能である。

ロボットを使った研究と並行して、強化学習システムの電子回路による検証も行う。これより、多方面からの考察ができ、研究が滞るリスクは殆ど無かった。研究代表者はカオスシステムの回路合成等に多くの実績があり、本計画を予定通り遂行することが出来た。

実機での検証に関しては、先行研究で実現している仮想空間システムを利用した。ロボットアームが入力装置を操作し、仮想空間内のタスクを実行する。仮想空間では、初期条件やパラメータの設定が容易で、複雑なカオスダイナミクスを利用する本研究では必須であり、最初から実空間で進めるよりも効率的に研究が進められる。また、実験の開始当初に起こり得たイレギュラーな動作に対しても安全性が確保出来た。ロボットアームは、長岡技術科学大学の和田安弘研究室で所有している7自由度ロボットアームを利用した。仮想空間とロボットを繋ぐ入力装置としてPhantom Omni (ScanAble)を新規に購入し制御可能範囲の広いシステムとした。

また、制御可能な状態空間が広いロボット制御のための強化学習システムの設計を行う。

上記の成果を基に、実機によるロボット制御のための強化学習システムを実装し実空間タスクの学習実験を行い、環境の変化に対する制御・学習特性を明らかにする。実空間での空間情報の取得には3D運動計測システム OptoTrak Certus (NORTHERN DIGITAL INC.) を導入し利用した。まずは簡単なタスクとして、棒立てタスク（倒立振り課題）を実施した。単純なタスクだが、持たせる棒の形状や重さ等を変えることで環境の変化を再現できる。

#### 4. 研究成果

1) ロボットによる倒立振り安定化の達成：異なるダイナミクスを持つ系に対して、同じ制御測と制御パラメータを持つコントローラ（動的カオス制御器）で安定化制御が可能な技術を応用し、ロボットによる倒立振りの安定化制御システムを構築した。その結果、理論的にパラメータが変動した場合でも安定化が達成できることを示し、シミュレーションによっても確認した。また、実機のロボットと仮想空間を利用した強化学習による倒立振りの安定化制御の検証を行い、その有効性を確認した。更に、実空間での学習においても学習によるタスクの獲得が可能であることを示した。

2) 発振器モデルおよびニューロンモデルを用いた制御機構の開発：簡素な電子回路モデルや人工ニューロンモデルを利用して、動的カオス制御による安定化制御機構の開発を進めた。その結果、安定化のためのパラメータや初期値に対する理論的な見地を得ることが出来、強化学習システムを組み込むための基礎が完成した。また、同定学習制御パラメータに関する引き込み領域を理論的に解明し、パラメータ更新を伴う設計手法の有用性を示した。

3) ヒトの脳情報を利用した強化信号の取得：脳波計を利用した実際の測定および解析によって、強化学習に用いる強化信号をヒトの脳波から獲られる事象関連電位によって推定できる可能性を示した。

## 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5件)

- ① Tadashi Tsubone and Noriyoshi Kambayashi, Chaos and Periodic Oscillation of a Multirate Sampled-Data Dynamical System, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, E90-A, 2007, 1924-1931.
- ② Tadashi Tsubone, Koichi Sugiyama and Yasuhiro Wada, Robot task learning based on reinforcement learning in virtual space, Neural Information Processing - Letters and Reviews, 査読有, Vol. 11 No. 7, 2007, 165-174.
- ③ Tadashi Tsubone and Yasuhiro Wada, Stabilizing Unknown Periodic Orbits of a Chaotic Spiking Oscillator, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, 査読有, E92-A, 2009, 1308-1315.
- ④ 坪根正, 栗本健一, 杉山晃一, 和田安弘, 仮想空間を利用した実空間のロボットのタスク学習, 電気学会論文誌C, 査読有, Vol. 128, No. 7, 2008, 1222-1230.
- ⑤ 坪根正, 稲葉真彦, 坪内孝司, 吉永哲哉, 極めて簡素な区分定数強制発振器にみられる同期現象, 電子情報通信学会論文誌A, 査読有, J99-A, 2010, 375-383.

[学会発表] (計5件)

- ① Tadashi Tsubone, Kenichi Kurimoto, Koichi Sugiyama, and Yasuhiro Wada, Task Learning Based on Reinforcement Learning in Virtual Environment, The 15th International Conference on Neural Information Processing, 2007年11月14日, 福岡.
- ② Tadashi Tsubone and Yasuhiro Wada, A

dynamic controller with instantaneous state setting method for chaotic systems, The 15th IEEE International Workshop on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, 2007年6月24日, 徳島.

- ③ Tadashi Tsubone, Kenichi Kurimoto and Yasuhiro Wada A discrete-time control approach for stabilizing unknown steady state of chaotic systems, The 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, 2008年9月9日, ブダペスト, ハンガリー.
- ④ 栗本健一, 杉山晃一, 坪根正, 和田安弘, “仮想環境内学習システムを用いた実空間のロボットのタスク学習, 第20 回路とシステム (軽井沢) ワークショップ予稿集, 2007 年4 月, 長野.
- ⑤ 栗本健一, 坪根正, 和田安弘, 動的カオス制御法に基づいた倒立振子の安定化, 第35 回知能システムシンポジウム論文集, 1B3-2, 2008 年3 月, 東京.

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

坪根 正 (TSUBONE Tadashi)

長岡技術科学大学・工学部電気系・准教授  
研究者番号: 50334694

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし