

学位論文題名

Design of Recurrent Neural Networks for Dynamical Robot Control

(動的なロボット制御のためのリカレントニューラルネットワークの設計に関する研究)

学位論文内容の要旨

近年、実世界の中で自律的に活動するロボットや機械システムが求められ、このために環境情報に基づいて適切な行動プランを生成し、対象物との相互作用の中で目的の動作を実現する動的な情報処理及び制御手法の開発が求められている。これらを実現するためには、複雑・冗長な環境情報から必要な情報を迅速に抽出し適切な戦略を選択できること、ダイナミクスを持った対象物を巧みに操作するための精緻な行動パターンシーケンスを記憶・再生できること、さらにこれらを実現するアルゴリズム、パターンシーケンスが経験から学習されること等の課題を解決する必要がある。これらを統合的に扱うことが可能な知的情報処理の枠組みとして、高い情報処理能力、情報の記述能力を持つニューラルネットワーク、またその時変系であるリカレントニューラルネットワークが知られるが、未だロボットのような動的な制御系に対して有効な設計手順が確立されているとはいえない。本論文は、これらの課題を解決するため新たに提案するリカレントニューラルネットワークをプラットフォームに、動的システムのために一般的に適用可能な設計法を構成し、ロボットなどの動的制御へ応用することを目標に行った研究をまとめたものである。

本論文は5章からなり、第1章では序論として、本研究の背景・目的、本論文の構成・概要について述べている。

第2章では、多自由度系に適用可能な、ニューラルネットワークを用いた制御系の設計手法として、分割制御を提案している。従来のニューラルネットワークを用いた制御系は、教師信号を生成することが困難であることから、多自由度系に適用することができない。本論文では、制御対象を複数の単入力単出力系に分割し、分割後のサブシステムにニューラルネットワークを用いた制御系を適用する手法を定式化し、各サブシステムの時定数が十分に大きく異なれば、学習制御が可能であることを示している。提案手法の有効性を確認するために本論文では分割制御を倒立振り子系の安定化問題に適用している。ここでは、制御系に構造を導入して、二つの層状ニューラルネットワークを用いて2自由度系である倒立振り子を制御することにより、単一のニューラルネットワークによって獲得されなければならない機能が単純化され、漸近的な手法による学習制御が可能になることが示されている。さらに、アクティブマスダンパの制御に応用され、制御対象の運動方程式の構造に関するアприオリな知識から、分割後のサブシステムのうち一つを安定化し、残りのサブシステムをニューラルネットワークを用いた制御系により安定化されることが示される。これらの結果から、ニューラルネットワークによって倒立振り子やアクティブマスダンパの拘束条件を満たす非線形制御系が実現でき、これによって線形最適制御より優れた制御性能が得られる等の分割制御の有用性、さらに多自由度系のモジュール化による動的制御の有効な実現のための新たな知見を導いている。

第3章では、動的ロボット制御のための制御系の構成要素となりうる情報処理系として、ダイナミクスを持ちかつ解析可能なカイアニエロ・南雲型のリカレントニューラルネットワークモデルを提案している。こ

れまで、多くのリカレントニューラルネットワークモデルが提案されているが、その多くは層状ニューラルネットワークを拡張したものであり、学習アルゴリズムが勾配法を基本にしているため、周期の長いリミットサイクルや、複数リミットサイクルの学習には限界があることが知られる。そこでここでは、離散時間離散値型のleaky integrator neuron modelを構成要素とする全結合型のリカレントニューラルネットワークモデルを提案し、そのダイナミクスを数理的に詳しく解析している。このニューラルネットワークモデルは雑音環境下でも安定してリミットサイクルを発振できる性質を有することから、このモデルに複数リミットサイクルを埋め込むためのアルゴリズム、及び特定のリミットサイクルに収束するための条件とその状態空間を求めるアルゴリズムを導出している。これらの解析から、提案するネットワークは、文脈依存のリミットサイクルを複数記憶できること、外部入力によりリミットサイクル間を移動できる等の特性を有することが示される。これらの結果、提案するリカレントニューラルネットワークは、動的システムの制御系を構成するのに有用な能力を持つことが示されるが、導出された教示アルゴリズムは、教師として全てのニューロンの挙動を必要とするので、設計手法としては少数自由度系に留まるという課題も述べられている。

第4章では、以上の結果を踏まえ、リカレントニューラルネットワークの設計手法として、新たに内部コピーオペレータを伴う遺伝アルゴリズムを提案している。この内部コピーオペレータは、遺伝子の一部分を同じ遺伝子の他の部分にコピーする遺伝アルゴリズムのオペレータとして組み込まれる。これまでリカレントニューラルネットワークの設計法としては、解析的手法、また勾配法によってネットワークパラメータを調整する方法が考えられているが、それらの方法では、ポピュレーションコーディングなど、ニューロン一つ一つの挙動が特定されないコーディング方法をとる場合には直接適用できない。また通常の遺伝アルゴリズムは、大規模なニューラルネットワークの学習に対して、非常に多くの計算時間を消費する等の問題が指摘されているが、ここでは内部コピーオペレータを導入することによりこれらの問題を解決している。内部コピーオペレータを伴う遺伝アルゴリズムは、リカレントニューラルネットワークによる振動系の励振問題に適用され、内部コピーオペレータが、突然変異オペレータによって作られた機能ブロックをコピーすることによって、学習が加速されることが明らかにされる。同様に不安定系を安定化する問題においても、内部コピーオペレータが学習を加速されることが明らかにされる。交互に接続される二つの振動系を励振する問題では、内部コピーオペレータにより、リカレントネットワークが複数のパターンを記憶するのに適した構造を獲得し、学習が著しく加速されることが定量的に示されている。また応用の展開例として、リカレントニューラルネットワークが、倒立振り子系において、振子を振り上げ、倒立を保つという非線形性の高い一連の動作が獲得されることが示されている。以上の結果、内部コピーオペレータを伴う遺伝アルゴリズムにより、リカレントニューラルネットワークを構成要素とする動的なシステム制御系が効率的に構成できるという新たな知見が導かれる。

第5章では、本研究の結論として得られた結果及び展望を総括している。

最後に、本論文で提案したリカレントニューラルネットワークの理論解析及び設計法によって、それが動的なロボット制御系の構成に十分な情報処理能力及び記述能力を有すること、並びにこれまで困難であったダイナミックなニューラルネットワーク制御系が有効に設計できることを明らかにした。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 和 田 充 雄

副 査 教 授 嘉 数 侑 昇

副 査 教 授 大 内 東

副 査 助 教 授 三 上 貞 芳

副 査 教 授 山 藤 和 男

(電気通信大学大学院情報システム学研究科)

学 位 論 文 題 名

Design of Recurrent Neural Networks for Dynamical Robot Control

(動的なロボット制御のためのリカレントニューラルネットワークの設計に関する研究)

近年、実世界において自律的に活動するロボットの実現のために、その行動の制御系を層状あるいはリカレント型などのニューラルネットワークを用いて構成する研究が行われている。しかし、リカレント型のような動的なニューラルネットワークは優れた表現能力及び情報処理能力を持っているにもかかわらず、複雑な制御対象の安定化、特に一連の動的な動作を実現するための制御系の構成やその設計法は未だ確立されていない。そこで、本論文は、ロボットなど動的な制御系の構成要素として、カイヤニエロ・南雲型のリカレントニューラルネットワークに着目してその動的な特性を詳細に解析するとともに、この結果を踏まえた新たな遺伝的アルゴリズムによる学習制御系の設計法に関する研究結果をまとめたものであり、その主要な結果は、以下の点に要約される。

[1]層状ニューラルネットワークを用いた動的な制御系の設計法として分割型制御手法を提案し、これを多入力多出力制御系の安定化問題に適用してその有効性を示すとともに、未知の制御対象の分割による効率的な学習制御の可能性を示した。具体例として、倒立振り子の安定化制御問題及びアクティブマスダンパの制振制御問題に適用し、提案手法の有効性を示した。

[2]動的なニューラルネットワークとしてカイヤニエロ・南雲型のリカレント型ニューラルネットワークを対象にして、ネットワークダイナミクスの中にリミットサイクルを埋め込むための教示アルゴリズム、任意の初期状態がどのリミットサイクルに収束するかを決定する解析アルゴリズムを提案した。これにより提案したリカレントニューラルネットワークは、文脈依存性のある複数のリミットサイクルを記憶・再生できること、外部入力によってリミットサイクル間を移動できる等の情報処理能力を有することを示した。

[3]動的な制御系をリカレントニューラルネットワークにより構成する学習アルゴリズムとして、新規にコピーオペレータ付き遺伝的アルゴリズムを提案し、これが突然変異オペレータによって作られた有用機能ブロックを増殖し、学習を効果的に加速させることを示した。この結果、従来困難であった大規模なリカレントニューラルネットワーク型の動的制御系が構築可能であることを示した。

[4]動的制御系の設計への適用例として、複数のタスクを単一のネットワークを有する制御系によって実現する問題に応用し、状況に応じて動作を変更する等の柔軟な制御系が構成できることを示した。さらに性質の異なる二つのタスクによって構成される一連の動作をリカレントニューラルネットワークによって制御

する問題にも適用し、これらによって提案した設計法が有効に働くことを示した。

これを要するに、著者は、従来のニューラルネットワークに比べて複雑適応性に優れるリカレントニューラルネットワークの設計法に関し、理論モデルによるシミュレーション実験から実場面へ適用する際の具体的な構成法まで多くの新知見を得ており、ニューラルネットワーク工学をはじめシステム工学、情報工学の進歩に寄与するところ大なるものがある。

よって、著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。