

氏 名 ( 本 籍 )	川 福 基 裕 ( 静岡県 )
学 位 の 種 類	博 士 ( 工学 )
学 位 記 号 番 号	甲第 115 号
学 位 授 与 年 月 日	平成 12 年 3 月 24 日
専 攻	生産開発システム工学専攻
学 位 論 文 題 目	ニューロコントローラを用いたフレキシブルシステムの制御に関する研究 (Positioning Control of Flexible Systems using Neuro Controllers)
学位論文審査委員	(主査) 教 授 堀 康 郎 (副査) 教 授 武 藤 高 義 教 授 川 崎 晴 久 助教授 佐 々 木 実

## 論文内容の要旨

今日の工学分野における大きな課題として、機械システムの小型化、軽量化、高速・高精度化が挙げられる。しかしながら、ミクロンレベルの精密位置決めなどの限られた範囲におけるある程度の高精度化を除き、産業界で用いられているロボットアームをはじめとする一般的な機械システムでは小型化、軽量化、高速・高精度化は、現在のところあまり進んでいないように思われる。その理由は、小型軽量化に伴い顕著となる環境変化や外乱の影響、高速運動によって発生する弾性振動に対して、動的機構系を剛体として考えてきた今までのコントローラの設計仕様では対応しきれないためであると考えられる。また、環境変化に対する信頼性及びロバスト性を考慮に入れた制御系を設計する場合、予想される変動の中で最悪の場合に備える「最悪状態設計」を行うことになり、パラメータ変動等がないような通常の状態での制御性能を劣化させる可能性がある。パラメータ変動や外乱がない通常の場合と、パラメータ変動等がある場合の両方において所期の制御性能が発揮されるような適応的な動作が可能な制御系の実現は、現代制御理論の適用では不可能である。

一方、ニューラルネットワークは、脳の神経回路網における情報処理メカニズムをまねてモデル化された並列分散処理システムであり、非線形処理能力・学習能力・汎化能力・最適化能力等を有することから、従来の制御理論では困難であった非線形システムに対する有効な制御系を構成できる事が期待され、研究が盛んに行われている。また、制御系でのニューラルネットワークの学習方法は、誤差逆伝搬法を用いることが一般的であるが、精度よく学習を収束させるためには、非常に長い学習時間を必要とすることが問題であり、リアルタイムで学習を行わせることが困難である。誤差逆伝搬法における学習時間短縮に関する研究もなされてはいるが、制御系分野においては、実システム

上での実装の問題も絡んでくることから、未だにリアルタイムでの学習に耐えうる学習方法についての研究はなされていない。

そこで、本論文では分布定数系で表現されるフレキシブルシステムの位置追従制御系に対してニューラルネットワークを用いた制御法の確立を目的として、各種ニューラルネットワークコントローラの制御性能について比較・検討を行い、高性能化のための研究を行うとともに、ニューラルネットワークを使用した場合の学習速度の向上についても研究を行っている。

制御対象のフレキシブルアクチュエータには、微小変位制御用素子として最近注目されている高分子圧電素子アクチュエータを用いている。高分子圧電素子は、温度変化に伴う位置変位のドリフトや応力-歪曲線のヒステリシスなどの非線形性が強い反面、ソフトマテリアルであること及び生体へのなじみもよいことから、高分子圧電素子を用いたアクチュエータは、医学・生物学等の分野への適用も期待されている。さらに高分子圧電素子アクチュエータは、駆動点と観測点が同一部にとれるcolocatedな制御系を構成でき、安定に制御しやすいという利点も持っている。

このような非線形性が強い制御対象に対して、有効な制御系設計が可能となれば、他の柔軟構造物（例えば軽量化されたロボットアーム等）についても適用が可能となり、広く機械工学・産業界・工業界に貢献できるものと考えられる。

本研究において得られた結果を要約すると次のようになる。

1. システムの内部状態量を用いる「LQGフィードバック誤差学習法」を提案し、従来の方法と性能の比較を行い、温度変化などの環境変化によってアクチュエータの動特性が変化した場合においても、本ニューロコントローラを用いた場合の制御結果は良好な結果を示しており、本研究で提案した「LQGフィードバック誤差学習法」は環境変化にも適応でき、ロバスト性にも優れた性能を有していることがわかった。
2. 未知プラントへの対応を考慮し、間接法である「改良型ニューラルネットワークセルフチューニングPID制御系」を提案した。このとき、立ち上がり時の過剰な制御入力を押さえるために、ニューラルネットワークの評価関数に制御入力を加える事を提案し、数値シミュレーション及び実装実験結果において、提案した評価関数を用いた場合、立ち上がり時の振動を抑えながらも、速やかな立ち上がりを示していることから、「改良型ニューラルネットワークセルフチューニングPID制御系」の有効性が示された。
3. 直接学習法において制御系の安定性を確保するために、「目標値自己補正型ニューラルネットワーク制御系」を提案した。この制御系を用いて学習の高速化について比較・検討を行い、また誤差逆伝搬法の学習時に用いる重み係数や学習率による過学習などへの影響について検討を行った。その結果、安定で高速な学習過程を得ることが可能であることが示された。
4. 学習速度のより一層の高速化のために、学習率可変型の適応学習則に免疫制御則を適用する「適応免疫制御型ニューラルネットワーク制御系」を提案した。これにより、通常のニューラルネットワークと比較して学習回数、学習速度が速くなる事がシミュレ

ーションと実装実験結果より明らかになり、「適応免疫制御型ニューラルネットワーク制御系」の有効性が示された。

以上の結果から、ニューラルネットワークを用いた制御系において、本論文で提案した各制御法を用いることで、環境変化や外乱の影響を受けやすく、パラメータ変動がある分布定数系で表されるようなフレキシブルシステムに対しても、内部状態量などについての事前情報の有無に関わらずに高速・高精度な先端位置追従ニューロコントローラを構築できることが分かった。

## 論文審査結果の要旨

この論文は分布定数系で表現されるフレキシブルシステムの先端位置追従制御における制御系設計法の研究に関するものである。制御法としてはニューラルネットワークを用い、各種コントローラを提案し、それらの制御性能について比較・検討を行い、高性能化を図るとともに、ニューラルネットワークを使用した場合の学習の高速化も図ったものである。本論文の成果とその評価は以下の通りである。

1. ニューラルネットワークのシステム制御への適用について従来の論文を整理し、ニューラルネットワークの適用例を直接法と間接法に分けて、それぞれの方法の得失を明らかにするとともに、結合係数の学習法についても、逐次修正型と一括修正型に大別し、それぞれの特徴を明らかにしている。これらの結果をもとに、本研究では環境変化に起因する動特性の変化を有し、内部状態が十分得られないような分布定数系システムの制御器にニューラルネットワークを適用することを目標としたところに特徴がある。過去の論文の課題が十分検証され、本研究の位置づけ、方向付けが正しく行われたことが認められる。

2. 制御対象としたシステムの内部状態量をニューラルネットワークを用いて学習する「LQGフィードバック誤差学習法」を提案した。この方法は、LQG制御器を用いて内部状態量を推定し、ニューラルネットワークの直接法の一つであるフィードバック誤差学習法において、推定した状態量を学習させることにより、高精度な制御入力を獲得することを目的としたものである。従来の方法と比較した結果、従来のPID制御器を用いた場合に比べて、速応性、応答波形の滑らかさなどの観点で優れており、温度、湿度などの環境変化によってアクチュエータの動特性が変化した場合においても、良好な制御ができるロバスト性を有していることを示している。

3. 未知プラントへの対応を考慮し、間接法である「改良型ニューラルネットワークセルフチューニングPID制御系」を提案した。この方法はPID制御系において、PIDゲインをニューラルネットワークにより適応的に調整するものである。この制御系において、立ち上がり時の過剰な制御入力を押さえるために、ニューラルネットワークの評価関数に制御入力を加える事を提案している。数値シミュレーション及び実装実験結果において、提案した評価関数を用いた場合、立ち上がり時の振動を抑えながらも、速やかな立ち上がりを示す制御系を実現しており、内部状態が事前に把握出来ないシステムの制御

にとって極めて有効な方法であると考えられる。

4. 直接学習法において制御系の安定性を確保するために、「目標値自己補正型ニューラルネットワーク制御系」を提案した。この方法は、外乱などによる過学習を防止するため、制御系に閉ループ系を加え、安定化制御を閉ループ系で行うとともに、ニューラルネットワークが新しい目標値を出力する目標入力フィルタの役割をさせるものである。この制御系を用いて学習の高速化について比較・検討を行い、また誤差逆伝搬法の学習時に用いる重み係数や学習率による過学習などへの影響について検討を行い、安定で高速な学習過程を得ることが可能であることを示している。

5. 学習速度のより一層の高速化のために、「適応免疫制御型ニューラルネットワーク制御系」を提案した。この方法はニューラルネットワークの学習において、学習率可変型の適応学習則に免疫制御則を適用するものである。この方法により、通常のニューラルネットワークと比較して学習回数が減り、学習速度が速くなる事がシミュレーションと実装実験結果より明らかになり、提案した制御系の有効性が示された。

以上、要するに、本論文は、ニューラルネットワークを用いた各種制御法を提案し、それらの制御法を用いることにより、環境変化や外乱の影響を受けやすく、パラメータ変動があるシステム、あるいは非線形性の強いシステムに対して、内部状態量の事前情報の有無に関わらずに高速、高精度な制御ができることを示したものである。さらに提案された制御法は一般の柔軟構造物についても適用可能であり、学術上及び産業応用上寄与することが大であると結論できる。

よって本論文は博士（工学）の学術論文として価値あるものと認める。

## 最終試験結果の要旨

平成12年2月15日に学位論文の内容を中心として、またこれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。