

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

Study on Adaptive Control of
Nonlinear Dynamical Systems Based
on Quasi-ARX Models

申 請 者

WANG, Lan

情報生産システム工学専攻
ニューロコンピューティング研究

2011 年 9 月

実世界のシステムのほとんどは何らかの非線形性を持っている。このような非線形な対象システムを制御するときには、動作点近傍でテイラー展開をして一次近似システムを求め、それに対して線形モデルに基づいた制御を適用するのが基本であるが、対象システムの非線形性が強い場合には、動作点の近傍以外で十分な制御精度が得られないという問題点がある。この問題を解決するために、非線形モデルに基づいた制御を行うことが必要となる。非線形モデルとして、ニューラルネットワークなどが多く利用されているが、ニューラルネットワークでは制御系の設計が困難になるだけでなく、制御系の安定性の保証が難しいという研究課題が残されている。

本研究の目的は、線形モデルに基づいたコントローラと非線形モデルに基づいたコントローラから構成される制御系を構築し、コントローラのスイッチング制御により制御系の安定性と高い制御精度を同時に実現することである。そこで本論文では、準線形 ARX モデルに基づいたスイッチング機構を有する非線形ダイナミカルシステムの適応制御系を提案している。提案した適応制御系では、準線形 ARX モデルを使用して制御対象システムの特性を適応的に推定する。これにより線形予測器と非線形予測器を構築し、線形適応制御系と非線形適応制御系を同時に構築している。具体的には、制御系の安定性を示す指標に基づいたスイッチング機構により、制御系の安定性に余裕があるときには、非線形適応制御系を中心にして制御精度を向上させ、制御系の安定性が欠如したときには、線形適応制御系を中心にして制御系の安定性を向上させる。このように線形モデルに基づいた適応制御と非線形モデルに基づいた適応制御を自動的に切り換えることによって、制御系の安定性を保証しながら制御精度を向上することを実現している。

以下に、本論文の構成と各章の概略と評価を述べる。

第 1 章は序論であり、非線形ダイナミカルシステムおよびその準線形ブラックボックスモデリングと適応制御について述べ、本研究の背景・目的を明らかにしている。

第 2 章では、準線形 ARX ニューラルネットワーク (Quasi-ARX Neural Network: Q-ARXNN) に基づいた非線形ダイナミカルシステムのスイッチング適応制御系の構築について述べている。Q-ARXNN では、非線形システムが「システムの状態に依存する係数」を持つ ARX モデルで表現され、この係数がニューラルネットワークでパラメータ化されている。この Q-ARXNN は、線形 ARX モデルと類似の構造と特性を持つだけでなく、そのパラメータは、モデルの推定に有用な情報を持っている。本論文では、Q-ARXNN の線形部分と非線形部分を線形予測器と非線形予測器としてそれぞれ同定し、これに基づいて線形適応制御系と非線形適応制御系を同時に構築している。なお、非線形適応制御では Q-ARXNN のユニバーサル近似能力により高い制御精度が期待できる。上記線形適応制御系と非線形適応制御系をもとに、スイッチング機構を導入することにより、制御系の安定性を保証しながら制御精度を向上した非線形ダイ

ナミカルシステムの適応制御を実現している。スイッチング機構では、線形予測誤差と非線形予測誤差に基づいた制御系の安定性評価指標がそれぞれ $J_1(t)$ 、 $J_2(t)$ として導入されている。なお、線形適応制御系の安定性が保証されるので、 $J_1(t)$ は常に有界である。制御系の安定性に余裕がある状態では、 $J_2(t) \leq J_1(t)$ であり、非線形適応制御を使用して制御精度を向上させる。一方、Q-ARXNN の過学習などにより $J_2(t)$ が増加し、制御系の安定性が欠如する状態になる場合がある。その際に、 $J_2(t) > J_1(t)$ となれば、線形適応制御に切換えて制御系の安定性を確保する。また、Q-ARXNN の非線形部分のパラメータを初期値にリセットして、 $J_2(t) \leq J_1(t)$ の状態に戻す。この手法により、対象システムの非線形項が有界であるという条件のもとで、制御系が安定であることを理論的に証明している。性能評価の数値例では、従来の線形適応制御では平均制御誤差が -0.101 および分散が 0.069 であるのに対して、本論文のスイッチング機構を有する適応制御では平均制御誤差が -0.009、分散が 0.003 になり、スイッチング制御によって制御精度が大きく向上することを明らかにしている。

第 3 章では、ファジイスイッチング機構を有する非線形ダイナミカルシステムの改良型適応制御系の構築について述べている。改良型適応制御系では、第 2 章における従来のスイッチング制御系に対して次の三つの改良が行われている。① 差分表現の準線形 ARX モデルを導入し、対象システムを差分表現で記述する。これにより改良型適応制御系の適用条件を対象システムの非線形項が差分有界であると緩和する。② 準線形 ARX モデルに、RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN) を適用し RBFN の一部のパラメータを先見情報で固定する。これにより、準線形 ARX モデルに基づいた予測器は調整すべきパラメータに関し線形となる。その結果、改良型適応制御系の収束性能が大きく向上する。③ 線形適応制御信号 ($u_L(t)$) と非線形適応制御信号 ($u_N(t)$) を組合せること ($u(t) = (1-\alpha)u_L(t) + \alpha u_N(t)$) によって制御系を構築し、係数 α を 0/1 ではなくファジイメンバシップ関数で構築するファジイスイッチングにより、 $J_2(t) \leq J_1(t)$ の場合には非線形適応制御を中心に、 $J_2(t) > J_1(t)$ の場合には線形適応制御を中心に制御し、制御系の制御精度の向上と安定性の確保をする。また、対象システムの非線形項が有界でなくても差分有界であれば、制御系が安定であることを理論的に証明している。数値例の性能評価では、システムパラメータの突然変動と差分有界な非線形項を追加した場合、Q-ARXNN に基づいた従来の非線形適応制御系では 100 回の実験で 16 回しか収束せず、収束に数分間要したが、RBFN を適用した改良型スイッチング適応制御系では 100 回の実験がすべて収束し、収束時間は約従来の 30 分の 1 に短縮した。また、制御精度については、従来のスイッチング制御では平均制御誤差が -0.005、最大制御誤差が 0.819 および分散が 0.007 であるのに対して、ファジイスイッチング適応制御では平均制御誤差が -0.004、最大制御誤差が 0.201、分散が 0.003 となり、改良型適応制御系の有効性を明らかにしている。

第 4 章では、変数間に干渉を有する多入力多出力非線形ダイナミカルシステ

ムに対して、準線形 ARX モデルに基づいた PID 制御系の構築を行っている。まず準線形 ARX モデルを多入力多出力システムへ拡張し、次に準線形 ARX モデルを用いたデカップリング補償器とフィードフォワード補償器を有する多入力多出力 PID 適応制御系を構築している。さらに、一般化最小分散制御則に従ってパラメータを調整し PID 適応制御を実現している。補償器を有する多入力多出力 PID 適応制御系の安定性を理論的に証明し、数値例で制御系の性能を検証している。2 出力の数値例において、従来の PID 適応制御の平均制御誤差が $(0.066, -0.006)$ および分散が $(0.161, 0.126)$ であるのに対して、本論文の PID 適応制御の平均制御誤差と分散はそれぞれ $(-0.003, -0.003)$ 、 $(0.011, 0.006)$ と改善されている。これにより本論文の PID 適応制御系の有効性が明らかにされている。

第 5 章では、準線形 ARX モデルの同定について述べている。準線形 ARX モデルでは、「システムの状態に依存する係数」をパラメータ化する際に、ニューロファジイネットワーク (NFN) や RBFN を適用するが、NFN と RBFN の入力ベクトルの次元数が多くなるにつれ、NFN と RBFN の基底関数の数も大きくなり、その結果、準線形 ARX モデルは、パラメータの数が多くなり複雑になる。そこで本章では、非線形主成分分析 (NPCA) を用いた NFN と RBFN の入力ベクトル次元削減法を提案し次元問題を改善している。数値例では、適応制御系の調整すべきパラメータの数が、従来の準線形 ARX モデルの場合には 15309 であるのに対して、NPCA 次元削減法を適用した準線形 ARX モデルの場合には 182 と減少し、これにより適応制御系の収束性能が大きく改善されることを明らかにしている。

第 6 章は結論として、本研究の成果について総括し、今後の研究課題を論じている。

以上を要約すると、本研究は、①線形予測器と非線形予測器を同時に同定するための準線形 ARX モデリング技術、②準線形 ARX モデルに基づいた安定な線形適応制御技術と高精度の非線形適応制御技術、③制御系の安定性を確保しながら制御精度を向上するスイッチング制御技術の開発について提案している。また、制御系安定性の理論的な証明とシミュレーションによる制御系性能の検証によりその有効性を明らかにしている。これらはニューロコンピューティング、システム制御分野に寄与するところ大である。よって、本論文は、博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。

2011 年 8 月 11 日

審査員

主査	早稲田大学	教授	博士(情報工学)(九州工業大学)	古月 敬之
副査	早稲田大学	教授	工学博士（九州大学）	平澤 宏太郎
	早稲田大学	教授	工学博士（早稲田大学）	吉江 修