

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

**Study on Self-Organizing Quasi-Linear
ARX RBFN Model and Its Application to Adaptive
Control of Nonlinear Systems**

申 請 者

Sutrisno IMAM

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

2017 年 1 月

実世界の多くのシステムは複雑な非線形特性を持っている。このようなシステムに対しても良好な制御性能を追求したいという現実的な要求に応じて、非線形モデルに基づく制御系設計と解析理論が近年注目を集めている。モデルの構造やパラメータなどに関する事前情報が十分でない場合には、非線形システムを有効に同定できる非線形モデルが必要になる。そのための非線形モデルとして、従来ではニューラルネットワーク (Neural Network: NN) や放射基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN) などが多く利用されているが、NN や RBFN などのブラックボックスモデル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課題が残されている。

本論文では、上記課題の解決を目指し、多様な線形特性を持つ準線形 ARX 放射基底関数ネットワーク (AutoRegressive eXogenous inputs RBFN: ARXRBFN) モデルの同定と制御系設計を行っている。準線形 ARXRBFN モデルは、コアモデル部分とマクロモデル部分という 2 つの部分から構成されている。コアモデルは RBFN で構成され、モデルの表現の柔軟性を実現している。一方で、マクロモデルは線形 ARX モデルと類似の多様な線形特性を有する ARX マクロモデルで構成され、モデルの利用しやすさを実現している。本論文では、準線形 ARX モデルに埋め込まれている RBFN に対して、自己組織化モジュールを導入し、自己組織化準線形 ARXRBFN モデルを提案している。また、準線形 ARXRBFN モデルの線形特性を生かして、線形・非線形コントローラ間 (第 3 章) 或いは線形・非線形予測モデル間 (第 4 章) のスイッチング制御により、制御系の安定性と制御精度を同時に保証した非線形システムの高性能制御法について述べている。

以下に、本論文の構成と各章の概略について述べ、評価を与える。

第 1 章「Introduction」では、非線形システム、準線形 ARXRBFN モデル、およびモデルに基づいた制御系について述べ、本研究の背景・目的を明らかにしている。

第 2 章「A Self-Organizing Quasi-Linear ARX RBFN Model」では、自己組織化準線形 ARXRBFN モデルの同定について述べている。準線形 ARXRBFN モデルを構築するためには、3 つのステップがある。ステップ 1 では、制御系の設計などの応用に利用しやすい構造を持つマクロモデルを構成し、非線形システムを「システムの状態に依存する係数」を持つ線形 ARX マクロモデルで表現する。ステップ 2 では、この状態に依存する係数を多入力多出力 RBFN でパラメータ化することによって、準線形 ARXRBFN モデルを構成する。ステップ 3 では、モデルの構造最適化およびモデルのパラメータ推定を行う。従来では準線形 ARXRBFN モデルに埋め込まれている RBFN の構造が固定されているが、準線形 ARXRBFN モデルの予測性能を向上させるため、応用毎に RBFN の構造を最適化する必要がある。そこで本論文では、まず、RBF (Radial Basis

Function) ノードの活性化係数としてノード発火率 A_f を導入し、ノード発火率 A_f がある閾値 A_{f0} を超えた RBF ノードを超活性化ノードとみなし複数のノードに分裂させる。また、ノード間の相互情報量 $m(Q_k)$ を導入し、RBF ノードはその出力ノードとの相互情報量 $m(Q_k)$ がある閾値 m_0 より小さいとき貢献のないノードとみなされ削除される。このように RBF ノードを追加したり削除したりすることにより自己組織化が行われ、準線形 ARXRBFN モデルの構造最適化を実現される。性能評価の数値例では、RBF ノードの数 M を初期値として 2,4,6,8 と 4 通りに設定したが、いずれの場合でも自己組織化アルゴリズムを適用することによって M が 4 に収束する。従来 (L.Wang, 2012) の $M=6$ に固定された場合には二乗平均平方根 (Root Mean Square: RMS) 予測誤差が 0.073 であるのに対して、本論文の自己組織化アルゴリズムで最適化された $M=4$ の場合には RMS 予測誤差が 0.015 となり、準線形 ARXRBFN モデルにおける自己組織化モジュールの有効性が明らかにされている。

第 3 章「Adaptive Switching Control Based on the Self-Organizing Quasi-Linear ARX RBFN Model」では、自己組織化準線形 ARXRBFN モデルに基づいた非線形システムのスイッチング適応制御系について述べている。準線形 ARXRBFN モデルは非線形モデルであるが、サブモデルとして線形モデルが含まれている。本論文では、この特性を生かして、準線形 ARXRBFN モデルに基づいてシステムの線形予測器と非線形予測器を両方同定し、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。なお、非線形適応制御系では準線形 ARXRBFN 予測器の優れた予測能力により高い制御精度が期待できる。提案手法では、線形適応制御系と非線形適応制御系をもとに、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を導入し、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。これにより制御系の安定性を保証しながら制御精度をも向上させる非線形システムの適応制御を実現している。

従来研究 (Y.Fu, 2007, L.Wang, 2010) では、制御系の安定性を示す指標 J_1 と J_2 はそれぞれ線形予測誤差と非線形予測誤差に基づいて構成されているが、予測誤差がよく変動するので、 J_2 が J_1 より短時間に大きくなっても制御系が必ずしも不安定になることがないため、従来のスイッチング制御では線形適応制御系への不要なスイッチングが多く、制御精度が低下するという問題点がある。そこで本論文では、二つの改良方法を提案している。ひとつは、移動平均フィルタを導入し、短時間ではなくより長い時間には J_2 が J_1 より大きくなった場合に制御系が不安定になると判断する。もうひとつは、 J_2 が J_1 の最大値より大きくなった際のみ制御系が不安定になると判断する。このように改良したスイッチング制御法に対して、従来と同じ条件で、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、従来のスイッチング制御では RMS

制御誤差が 0.106 であるのに対して、移動平均フィルターを導入したスイッチング制御では RMS 制御誤差が 0.087 となり、 J_1 の最大値に基づいたスイッチング制御では RMS 制御誤差が 0.048 となっている。これにより、提案した改良スイッチング制御では、無駄なスイッチングが著しく減少して制御精度が向上していることを明らかにされている。

第 4 章「An IENN Controller Based on the Self-Organizing Quasi-Linear ARX RBFN Prediction Model」では、準線形 ARXRBFN 予測モデルに基づいた IENN (Improved Elman NN) 非線形制御系について述べている。従来のスイッチング制御では、線形・非線形コントローラ間のスイッチング制御により、制御系の安定性と制御精度を同時に保証しているが、第 3 章のように改良しても制御精度が低い線形コントローラへ度々スイッチングすることで制御系の制御精度が低下する恐れがある。そこで本章では、IENN コントローラの設計で準線形 ARXRBFN 予測モデルに基づいた非線形制御系を構築し、予測モデルの予測誤差を有界にすることで制御系の安定性を保証する。そのために、スイッチング機構は第 3 章のように線形・非線形コントローラ間ではなくシステムの線形予測器と非線形予測器との間に導入し、予測誤差の有界である準線形 ARXRBFN スwitching 予測モデルを構築している。性能評価の数値例において、第 3 章のようなスイッチング制御では制御精度（制御系出力の理想出力に近い度合）が 95.03% であるのに対して、本章の IENN 非線形制御系では制御精度が 97.87% である。これにより、本章の準線形 ARXRBFN スwitching 予測モデルに基づいた IENN 非線形制御系の有効性が明らかにされている。

第 5 章では結論として、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、本論文では、1) モデルの構造を自動的に最適化できる自己組織化準線形 ARXRBFN モデルの提案；2) 予測誤差が有界である準線形 ARXRBFN スwitching 予測モデルの提案；3) 安定性と制御精度を同時に保証するためのスイッチング機構の改良を行っている。また、これらを非線形システムの適応制御系の設計に適用しその有効性を検証している。さらに、制御系安定性の理論的な証明と数値シミュレーションにより提案法の有効性を明らかにしている。これらの成果はニューロコンピューティング、システム制御分野の発展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。

2017 年 1 月 19 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(早稲田大学)	吉江 修
	早稲田大学	教授	博士(工学)(早稲田大学)	藤村 茂