

# 博士論文審査結果報告書

## 論 文 題 目

**Study on Lyapunov-based Identification  
and Control of Nonlinear Systems Using  
Quasi-linear ARX Neural Network Model**

申 請 者

Mohammad Abu JAMI'IN

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

2016 年 4 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) などのブラックボックスモデルが多く利用されているが、NN 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、さまざまな線形特性を持つ準線形 ARX ニューラルネットワーク (AutoRegressive eXogenous inputs NN: ARXNN) モデルの同定と制御系設計を行っている。準線形 ARXNN モデルは、コアネットとマクロネットという二つの部分から構成されている。コアネットは NN 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、マクロネットは線形 ARX モデルと類似のさまざま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 ARXNN モデルに埋め込んでいる NN に対して、リャプノフ安定性理論を適用し、安定した収束性を保証した学習法を提案している。また、準線形 ARXNN モデルの線形特性を生かして、リャプノフ安定性理論を用いた線形コントローラと非線形コントローラのスイッチング制御により、安定性と制御精度を同時に保証した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と評価を述べる。

第 1 章「Introduction」では、非線形システム、その準線形 ARXNN モデリング、およびモデルをベースにし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「Lyapunov Learning Algorithm for Training of Quasi-linear ARXNN Model」では、リャプノフ安定性理論による準線形 ARXNN モデルの学習法について述べている。準線形 ARXNN モデルでは、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 マクロモデルで表現され、この係数が NN でパラメータ化されている。このように準線形 ARXNN モデルに埋め込んでいる NN は、従来では誤差逆伝搬法で訓練されるが、局所的ミニマムに陥る危険性がある。そこで本論文では、準線形 ARXNN モデルに対して、学習ステップ  $k$  によって決まるリャプノフ関数  $V(k)$  を定義し、 $V(k)$  は正定で、その差分  $\Delta V(k)$  は負定であるようにリャプノフ漸近安定な準線形 ARXNN モデルの学習法を導出している。従来の誤差逆伝搬法では、学習率が固定されており、大域的ミニマムへ収束する保証がないが、リャプノフ漸近安定な学習法では、学習率が適応的になっており、収束のスピードが向上しただけでなく、安定した収束性が保証されている。性能評価の数値例では、従来の誤差逆伝搬法では正規化予測誤差 (Normalized Prediction Error: NPE) が平均値 30.64 および標準偏差が

0.04 であるのに対して、本論文のリャプノフ学習法では NPE の平均値が 21.71、標準偏差がほぼゼロとなり、リャプノフ学習法が非常に安定して収束していることを明らかにしている。

第 3 章「Lyapunov Based Switching Control under Quasi-linear ARXNN Model」では、準線形 ARXNN モデルに基づいた非線形システムのリャプノフスイッチング適応制御系の構築について述べている。マクロネットとコアネットから構成される準線形 ARXNN モデルには、非線形モデルであるが、線形モデルも含まれている。本論文では、この特性を生かして、準線形 ARXNN モデルから線形予測器と非線形予測器を同定し、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、非線形適応制御系では準線形 ARXNN モデル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、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た。これにより、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とが成功した。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 (L.Wang, 2010) では、線形予測誤差と非線形予測誤差に基づいた指標でスイッチング機構が構成されるが、予測誤差での制御系安定性の評価が十分ではないため、線形適応制御系への無駄なスイッチングが多く、制御精度が低下にするという問題点がある。そこで本論文では、まず、非線形予測誤差およびその一次微分誤差と二次微分誤差から非線形適応制御系のダイナミカル状態に追従できる誤差変数  $E(k)$  を導入し、この誤差変数  $E(k)$  に基づいたリャプノフ関数  $V(k)$  を定義する。次に、 $V(k)$  は正定、その差分  $\Delta V(k)$  は半負定であれば、非線形制御システムが安定であることを利用して、リャプノフ安定性理論に基づいたスイッチング指標  $\rho$  を導出している。制御系の安定性に余裕がある状態 ( $\rho < 0$ ) では、非線形適応制御系を使用して制御精度を向上させる。一方、準線形 ARXNN モデルの過学習などにより  $\rho$  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、 $\rho \geq 0$  となれば、線形適応制御系に切換えて制御系の安定性を確保する。また、準線形 ARXNN モデルの非線形部分のパラメータを初期値にリセットして、 $\rho < 0$  の状態に戻す。このようなスイッチング手法の提案に加えてさらに、対象システムの非線形項が有界であれば、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、従来のスイッチング制御では二乗平均平方根 (Root Mean Square: RMS) 制御誤差が 0.45 であるのに対して、リャプノフ理論に基づいたスイッチング制御では RMS 制御誤差が 0.20 となっている。これにより、提案したリャプノフ理論に基づいた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を向上していることを明らかにしている。

第4章「Maximum Power Tracking Control for a Wind Energy Conversion System Based on Quasi-linear ARXNN Model」では、準線形 ARXNN モデルに基づいた風力エネルギー変換システムの最大点追従 (Maximum Power Point Tracking: MPPT) 制御について述べている。風力発電システムにおいて風の持つエネルギーからブレードの回転エネルギーへの変換効率はある風速比 (ブレード先端の速度と風速の比)  $\lambda^*$  で最大値を持つことが知られている。この変換効率を最大化するために、風速に合わせて風速比を風車に固有の値  $\lambda^*$  に維持する必要がある。MPPT 制御では、風速の変化に応じて、ブレードが風に当たる角度  $\beta$  を調整することにより、ブレードの回転角速度  $\omega_t$  を制御して風速比を  $\lambda^*$  に維持するが、この  $\lambda^*$  が  $\beta$  に関する非線形関数なので、難しい制御となっている。そこで本論文では、まず、準線形 ARXNN モデルを適用して、ブレードの角度  $\beta$  と回転角速度  $\omega_t$  との入出力関係を同定する。次に、第3章で述べた準線形 ARXNN 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法で、風速に応じたブレードの回転角速度  $\omega_t$  に対して、最適なブレードの角度  $\beta$  を繰り返し法で求めて制御する。これにより、風の持つエネルギーからブレードの回転エネルギーへの変換効率の最大化を実現している。ARMA (Autoregressive Moving Average) モデルで模擬した平均値 12.00 メートル/秒、標準偏差 1.50 メートル/秒の風に対する検証例において、従来のスイッチング制御では RMS 制御誤差が 0.29、タービンの平均出力比率 (実際出力と最適出力の比) が 0.86 であるのに対して、本論文のリャプノフスイッチング制御では RMS 制御誤差が 0.18、平均出力比率が 0.95 である。これにより、本論文のリャプノフスイッチング制御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、リャプノフ安定性理論に基づく安定した収束性を持つ準線形 ARXNN モデルの同定法およびリャプノフ安定性理論に基づいたスイッチング制御法を提案している。また、これを風力エネルギー変換システムの MPPT 制御へ適用し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。

2016 年 3 月 22 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  |