

博士論文審査結果報告書

論 文 題 目

Study on Identification of Nonlinear Systems Using Quasi-ARX Models

申 請 者

Yu CHENG

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

2012 年 6 月

実世界のシステムは何らかの非線形性を持っている。非線形システムの予測や制御などを行うために、非線形モデルが必要となる。非線形モデルとして、ニューラルネットワーク (Neural Network: NN) などが多く利用されているが、応用観点からみれば、NN はシステムの予測や制御系の設計に利用しやすい構造をしていないという問題点がある。そこで本研究では、さまざまな線形特性を持つ準線形 ARX (AutoRegressive with eXogenous inputs) モデルの提案と同定を行っている。準線形 ARX 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が、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。

本研究の目的は、NN のほかに、ウェーブレットネットワーク (Wavelet Network: WN)、RBF ネットワーク (Radial Basis Function Network: RBFN)、ニューロファジィネットワーク (Neurofuzzy Network: NFN) をコアネットとして利用する場合の準線形 ARX モデルに対して、体系的な同定法を確立することである。具体的には、準線形 ARX モデルのパラメータを非線形と線形の二つのグループに分け、それぞれのパラメータを推定している。非線形グループのパラメータは、準線形 ARX モデルの構造を決定するパラメータであり、クラスタリング分割法或いはグリッド分割法によって、対象システムの入力空間の情報に基づいて求めている。一方、線形グループのパラメータは、準線形 ARX モデルの入出力マッピングを実現するパラメータで、LS (Least Squares) 法や SVR (Support Vector Regression) 法を適用して推定している。

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、準線形 ARX モデルと同定について述べ、本研究の背景・目的を明らかにしている。

第 2 章では、WN をコアネットとして利用する準線形 ARX-WN モデルのクラスタリング分割法による同定について述べている。WN は、離散型逆ウェーブレット変換の係数を求めるために NN の学習概念を応用したものであり、中間層をウェーブレット層にした 3 層 NN である。このような WN を用いた準線形 ARX-WN モデルは、線形 ARX モデルと類似の構造や特性を持つだけでなく、ウェーブレット基底関数の補間によるマルチ局所的線形モデルと解釈できる。モデルのパラメータは、ウェーブレットの平行移動、伸縮パラメータおよびウェーブレット係数からなっており、それぞれ有用な解釈を持っている。先見情報でウェーブレットの平行移動、伸縮パラメータを決定し固定すれば、準線形 ARX-WN モデルは非線形モデルでありながら、ウェーブレット係数に関して線形になる。本論文では、AP (Affinity Propagation) クラスタリング法で、対象システムの入力空間のデータ分布情報を抽出し複数個のクラスタを構築する。クラスタに対応するウェーブレットの平行移動、

伸縮パラメータは、それぞれのクラスタの情報により経験測を用いて求める。さらに、LS法により対象システムの入出力データからウェーブレット係数を求め、準線形 ARX-WN モデルの同定を実現している。シミュレーション例では、従来の WN と NN (J.Sjoberg et.al, Automatica 1995) では RMSE (Root Mean Square Error) 同定誤差が 0.050 と 0.068 であるのに対して、本論文の準線形 ARX-WN モデルでは 0.046 となり、同等以上の同定精度が得られている。また、準線形 ARX-WN モデルを非線形予測モデルとして利用し非線形適応制御を行い、準線形 ARX-WN モデルが持つ入力変数およびモデルのパラメータの線形性が非線形適応制御に非常に有用であることを明らかにしている。

第 3 章では、NFN をコアネットとした準線形 ARX-NFN モデルのグリッド分割法とファジィルール削減法による同定について述べている。準線形 ARX-NFN モデルの同定では、二つのメンバーシップ関数のデザインが必要になる。一つは、NFN における IF・THEN というファジィ規則の入力変数ごとに設定される前件部のメンバーシップ関数のデザインで、もう一つは、パラメータ化された後件部のメンバーシップ関数の入出力データからの学習によるデザインである。本論文では、グリッド分割法で対象システムの入力空間を分割し前件部のメンバーシップ関数を設計しているため、NFN の入力変数が増加するとファジィルールの数が膨大になり、LS 法で後件部のメンバーシップ関数の学習が困難になるだけでなく、モデルの汎化能力が低下する。そこで、本論文では遺伝的アルゴリズム (Genetic Algorithm: GA) による NFN の入力選択を行い、ファジィルールの数を削減している。GA によるファジィルール削減法では、モデルの入出力の線形相関係数を適応度とする BIC (Bayesian Information Criterion) のモデルの複雑さを表す項に加え、線形相関係数の絶対値が大きければ大きいほど入力変数が選択されにくくすることによって、準線形 ARX-NFN モデルの線形入力変数が NFN の入力セットに含まれないようにしている。さらに、LS 法の代わりに SVR 法を適用して準線形 ARX-NFN モデルを同定することで、次元の呪い問題に対処している。数値例では、従来の準線形 ARX-NFN モデルの場合には、ファジィルールの数と線形パラメータの数が 81 と 1220 であるのに対して、GA によるファジィルール削減法を適用した準線形 ARX-NFN モデルの場合にはそれぞれ 9 と 50 に減少し、準線形 ARX-NFN モデルの汎化能力が大きく改善されることを明らかにしている。

第 4 章では、SVR 法による準線形 ARX モデルの同定について述べている。WN、NFN や RBFN のような局所的な特性を有する基底関数ネットワークをコアネットとして用いた準線形 ARX モデルは、基底関数の補間によるマルチ局所的線形 ARX モデルとなり、先見情報を用いて基底関数のパラメータを決定し固定すれば、モデルが推定すべきパラメータに関して線形になる。本論文では、この線形性を活用し SVR 法を適用して準線形 ARX モデルの同

定を行っている。その結果、カーネル学習の観点から合成カーネルを有する SVR を実現している。クラスタリングなどの技術で抽出する対象システムの入力空間の情報に基づいて、応用対象ごとに最適なカーネルを合成し SVR 学習を実現している。このように SVR のカーネルを機械学習法により構築する点は高く評価できる。数値例では、従来の線形カーネルと RBF カーネルを持つ SVR では同定誤差がそれぞれ 0.345 と 0.258 であるのに対して、本論文の合成カーネルを持つ SVR では 0.130 となっており、また、インパルス外乱に対するロバスト性に対する 100 回の実験では、従来の LS 法では平均誤差が 0.110 ± 0.043 であるのに対して、本論文の SVR 法では 0.060 ± 0.019 となり、SVR 法による準線形 ARX モデルの外乱に対するロバスト性および同定精度が大きく向上することを明らかにしている。

第 5 章では、準線形 ARX モデルを用いた進化型多目的最適化による非線形多項式モデルの 2 ステップ同定について述べている。同定のステップ 1 では、シグモイド関数型 NN をコアネットとした準線形 ARX モデルを同定し、シグモイド関数のテイラー (Taylor) 展開により多項式モデルの候補項である単項式を生成する。項の分散およびその直交性に基づいた重要度指標で、巨大な数の単項式から多項式モデルとして必要最小限の項を含ませた適量の重要な単項式候補項を選出するというスクリーニングを行う。同定のステップ 2 では、モデルの精度とモデルの複雑さを同時に考慮した進化型多目的最適化によりステップ 1 で選ばれた重要な単項式候補項から多項式モデルとして必要最小限の項を効率よく選び出し、非線形多項式モデルの同定を実現している。性能評価の数値例では、従来の GA 法では数時間を要し同定誤差が 0.033 であるのに対して、提案する 2 ステップ同定法では数分間で同定誤差が 0.026 となり、その有効性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、準線形 ARX モデルによる非線形システムの同定において①基底関数ネットワークの構築技術、②カーネル学習技術、③2 ステップ非線形多項式モデル同定などの新しい技術を開発しその有効性を明らかにしている。これらは、計算知能工学、システム同定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。

2012 年 5 月 30 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