

令和 6 年 6 月 9 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K04112

研究課題名（和文）周波数領域における非線形システム同定についての実用化検討

研究課題名（英文）Practical Study of Nonlinear System Identification in the Frequency Domain

研究代表者

足立 修一（Adachi, Shuichi）

慶應義塾大学・理工学部（矢上）・教授

研究者番号：40222624

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：機械学習の適用検討が十分でないものに非線形動的システムがある。この非線形動的システム同定問題に対して、新しいモデル縮約法を提案することを目的とした。本研究では、計算負荷を切り替え可能な深層ニューラルネットワーク（DNN）を1回の学習で構築する方法を提案し、数値例を通してその有効性を確認した。また、機械学習で研究されている問題を制御理論の枠組みで解釈することにより、新たな知見を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

現在活発に研究されているAIの分野の機械学習は、制御理論の分野では非線形システム同定に対応する。二つの分野の共通点が多いにも関わらず、それらの融合研究は進んでいない。本研究では、制御理論の視点から機械学習を考察することにより、さまざまな知見を得ることができた。また、申請者が長年研究を進めてきた、本研究に関連するシステム同定の著書をまとめており、その社会的意義は大きいと思われる。

研究成果の概要（英文）：There are nonlinear dynamic systems where the application of machine learning in AI has not been adequately explored. This study aims to propose a new model reduction method for the identification problem of the nonlinear dynamic systems. In this research, a method was proposed to construct deep neural networks (DNNs) capable of switching computational loads in a single learning process, and its effectiveness was confirmed through numerical examples. Additionally, new insights were gained by interpreting problems studied in machine learning within the framework of control theory.

研究分野：制御工学

キーワード：非線形システム同定 深層学習 周波数 制御 モデル縮約

## 1. 研究開始当初の背景

- (1) AI の理論研究や実社会での応用が精力的に行われている。AI の主要な研究分野に強化学習と機械学習があり、それらは制御理論の分野と密接に関係している。たとえば、AI における「強化学習」を制御理論の言葉で表すと「適応最適制御」になる。このように、ほぼ同じ概念を分野が異なると違う専門用語で呼ぶことがよくある。しかし、両分野の研究の交流は十分であるとはいえなかった。
- (2) 機械学習において深層学習が最も精力的に研究されている。深層学習が得意とする分野が明らかになってきた一方で、まだ研究が十分でない分野がある。その一つが、制御理論で対象としている動的システムである。深層学習に代表される機械学習は制御理論ではシステム同定に対応する。本研究では、動的非線形システムに対する学習問題、すなわち、非線形システム同定問題に焦点を絞って研究を進める。

## 2. 研究の目的

- (1) 制御理論のシステム同定とAIの機械学習の目的は、共に対象のブラックボックスモデリングという意味で一致しているが、対象とするシステムや、モデリング法が異なる。その相違点と類似点を明確にすることをめざす。
- (2) 本研究では、非線形動的システムをモデリングの対象とする。これまでシステム同定の主な対象は線形システムであり、線形性のために「周波数」という「時間や空間」以外の仮想的な特徴量を用いることができた。それに対して、複雑な非線形システムを対象とする機械学習では、これまで周波数を利用することは陽には考えられていなかった。そこで、本研究では、非線形動的システムの同定問題を、制御理論の立場から「周波数」のような仮想的な特徴量を用いて、解析することをめざす。そして、新たな非線形システム同定法を考案する。

## 3. 研究の方法

- (1) 3名の研究者が分担・協力して、非線形動的システム同定についての理論的検討とその実用化検討を行った。
- (2) 理論面では、主に Deep Neural Network(DNN) を用いた非線形システム同定の研究に注力した。定期的にオンラインで研究ミーティングを行い、理論検討を進めた。また、2023年11月には研究集会を京都で開催し、対面で活発な研究ディスカッションを行った。
- (3) 応用面ではつぎの3つの実問題について検討した。自動車ガソリン過給エンジンのモデリング、電気自動車の二次電池の非線形モデリング、鉄鋼圧延プロセスのモデリング、である。それぞれ企業との共同研究により得られた知見やデータを活用し、理論の実用化検討を行った。

## 4. 研究成果

- (1) 理論面 深層ネットワークを用いた非線形システム同定の理論的な検討を行い、新たな非線形動的システム同定法を提案した(引用文献)。

製造業の開発現場では、モデルを用いた開発が一般化してきた。開発現場のさまざまな工程でモデルを用いることで、製品の性能と品質の向上に加えて、開発期間短縮や開発効率向上が実現されている。このとき、各工程で用いられるモデルには、対象の複雑な非線形性を捉える精度要求とともに計算負荷要求があり、これらの要求をバランスよく満足するモデルをタイムリーに準備することが求められる。実際の開発現場では、第一原理モデリングなどですでに構築された詳細モデルを元に縮約することで、精度と計算負荷のバランスを取ったモデルを準備することが多い。この精度と計算負荷のバランスを取る作業は、自動化が困難なことから開発期間短縮のボトルネックとなりうる。したがって、モデル縮約の工程を、事前に自動で実行可能な工程と設計段階で担当者が行なう工程に分け、後者に必要な期間を低減することが望ましい。

Deep Neural Network(DNN)を用いたモデルは、多項式近似のようなモデルと比較して、不連続な切り替えなど、対象がもつ複雑な非線形性を高精度に予測できることが期待される。DNNを縮約して精度と計算負荷のバランスを取る方法に枝刈りがある。枝刈りでは、学習済みのDNNのパラメータのうち冗長なものを削除し、その構造を保持したままDNNの再学習を行なう。しかし、この再学習には多大な時間を必要とすることから、人手が入る設計工程の中での再学習は避けたい。

そこで、本研究では、計算負荷を切り替え可能なDNNを1回の学習で構築する方法を提案した。この方法は、計算負荷を容易に切り替え可能とするためのモデル構造と、その構造に適した学習法で構成されている。まず、図1に示したように、ネットワークの各層がモジュール化され、深い層のモジュールから取り外し可能なモデル構造をとる。これは、ネットワークの各層が直接出力に影響を与えられるような経路を既存のDNN構造に追加することによって実現される。このモデル構造によって、学習後に深い層のモジュールを削除して層数を削減することで、速やかにモデルを縮約することが可能になる。つぎに、学習法に関して、再学習を行なわなくとも縮約後のモデルの精度が保たれる評価関数を提案した。具体的には、縮約前のモデルの出力誤差を評価するのではなく、縮約後のモデルの出力誤差の加重平均を評価することで、縮約後のモデルの精度を高く維持することをめざした。

提案法を数値例に適用することにより、再学習を伴う従来の枝刈りと同等以上の精度の縮約モデルが得られることが明らかになった。また、提案した学習法を用いることで、モデルパラメータが局所最適解にトラップされにくくなる効果が得られた。

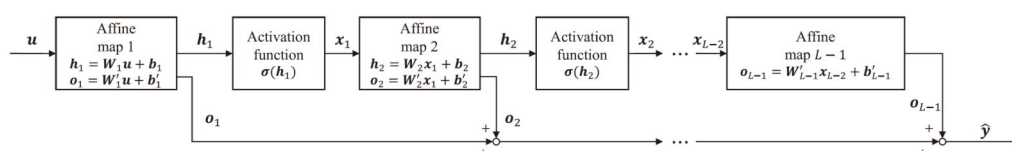


図1 深層非線形ARX モデル構造

(2) 応用面 複雑な非線形性をもつ自動車ガソリンエンジンのモデリングを行った。

自動車業界では、CO<sub>2</sub> 排出量低減の対策としてガソリンエンジンの熱効率向上技術の開発に取り組んでいる。たとえば、ターボチャージャを燃費向上の目的として使用するダウンサイジング過給ガソリンエンジン（以降、過給エンジン）が実用化されている。過給エンジンは、複雑な非線形特性をもち、複数のアクチュエータが装備された多入力多出力系である（図2参照）。さらに、制御システムの目標値近傍に存在するノッキングと呼ばれる異常燃焼状態を回避するために、定められた制約範囲内での制御が求められる。従来のエンジン制御で広く用いられているマップ制御やルールベース制御ではこのような複雑な制御対象を扱うことが難しいため、モデルベース制御の導入が望まれていた。

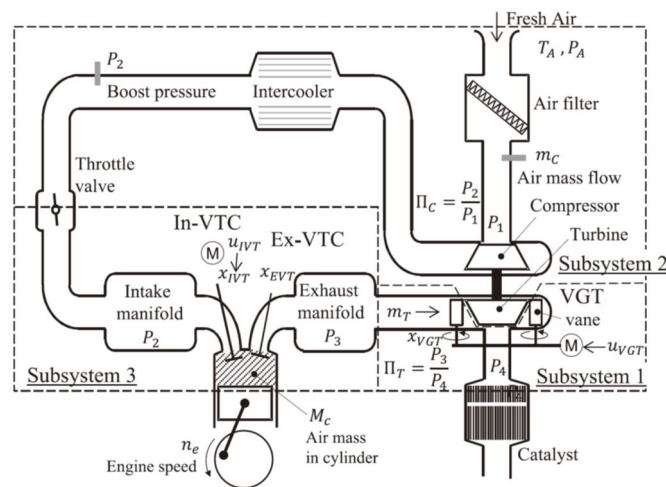


図2 過給ガソリンの模式図

過給エンジンは制約をもつ多入力多出力の非線形システムであり、このような制御対象に有用な制御系設計法として非線形モデル予測制御（Nonlinear Model Predictive Control: NMPC）がある。NMPCでは制約付きの非線形最適化問題をオンラインで解くため計算コストが高くなりやすい。NMPCの最適化計算ではプラントモデルが反復計算されるため、計算コストができるだけ低いプラントモデルが求められる。また、自動車用エンジンでは、さまざまな動作点での動作の保証が必要であるため、プラントモデルは高精度かつ高い汎化能力をもつことが求められる。

本研究では過給圧制御システムにNMPCを適用するために、過給エンジンの高精度かつ低計算コストなモデルを提案した（引用文献）。提案するモデルの構築法は大きく三つのステップで構成される。第一ステップでは、過給エンジンを構成する要素システムごとに、計算コストを低減する制御指向モデルを構築した。計算コストの低減は、実験モデルのlasso回帰による多入力多項式の項数削減と物理モデルの低次多項式

近似により実現した。第二ステップでは、要素モデルを結合して過給エンジンの非線形状態空間モデルを導出した。このモデルはウィナー・ハマーシュタインモデルの構造となるため、過給エンジンのシステム同定が容易になる。第三ステップとして、物理モデルでは高精度に表現しきれない過給エンジンの非線形特性を表現するために、定常誤差補償モデルを導入した。この誤差補償モデルにもlasso回帰を用いることで、計算コストの増加を抑えつつモデル精度を向上した。提案法によって導出された過給エンジンのモデルはNMPCで課題となる計算コストを低減しつつ、高い推定精度を保つことができることを、実機エンジンの実験データを用いて明らかにした。

- (3) 啓蒙活動 本研究で中心的課題であるシステム同定に関して、申請者は長年にわたって研究を続けてきた。理論的な研究だけでなく、システム同定の実システムへの応用についても数々の知見を得てきた。本研究では、それらの研究成果を著書『続々 制御工学のこころ ~確率システム編~』としてまとめた。発行は早くても1年後であると思われるが、技術者・研究者に対するこの著書の社会的意義は大きいと考えている。

#### <引用文献>

高野靖也，川口貴弘，朝見 聡，佐々木理沙子，杉元聖和，進矢義之，足立修一：モデル軽量化のためのモジュール構造をもつ深層ニューラルネットワークの提案，計測自動制御学会論文集，Vol.59，No.8，pp.353-361，2023.

上野将樹，八田羽謙一，織田信之，足立修一：物理モデリングとシステム同定の融合による過給ガソリンエンジンの制御指向モデリング，計測自動制御学会論文集，Vol.58，No.8，pp.390-398，2022.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 川口貴弘, 大山隆景, 丸田一郎, 長村謙介, 片芝惇平, 足立修一	4. 巻 52
2. 論文標題 $\mu$ -マルコフモデルを用いた二次電池の実効抵抗の逐次推定	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 1323-1328
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 上野将樹, 八田羽謙一, 織田信之, 足立修一	4. 巻 58
2. 論文標題 物理モデリングとシステム同定の融合による過給ガソリンエンジンの制御指向モデリング	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 390-398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 上野将樹, 八田羽謙一, 河村泰二郎, 織田信之, 足立修一	4. 巻 54
2. 論文標題 車載ECU性能を考慮したミラー過給エンジンの非線形モデル予測制御	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 自動車技術会論文集	6. 最初と最後の頁 94-99
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 青山千仁, 川口貴弘, 足立修一	4. 巻 59
2. 論文標題 持続的外乱の存在下におけるシステム同定モデルの選定と可同定性条件	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 289-296
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 高野靖也, 川口貴弘, 朝見 聡, 佐々木理沙子, 杉元聖和, 進矢義之, 足立修一	4. 巻 59
2. 論文標題 モデル軽量化のためのモジュール構造をもつ深層ニューラルネットワークの提案	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 353-361
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 片桐拓真, 青山千仁, 成岡 優, 二宮哲次郎, 足立修一	4. 巻 71
2. 論文標題 実験用航空機『飛翔』搭載エンジンの回転数制御システムの同定	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本航空宇宙学会論文集	6. 最初と最後の頁 218-221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Masaki Ueno, Kenichi Hattaha, Nobuyuki Oda, and Shuichi Adachi
2. 発表標題 Non-linear Model Predictive Control for Turbocharged Gasoline Engine in Consideration of Performance of On-Vehicle ECU
3. 学会等名 6th IFAC Conference on Engine and Powertrain Control, Simulation and Modeling (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Seiya Takano, Takahiro Kawaguchi, Satoshi Asami, Risako Sasaki, Yoshiyuki Shinya, and Shuichi Adachi
2. 発表標題 A Study of Retraining-free Pruning for Deep Neural Networks
3. 学会等名 2022 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yukihito Aoyama, Takahiro Kawaguchi, and Shuichi Adachi
2. 発表標題 System Identification of Linear Systems in the Presence of Persistent Disturbances using Asymptotic Identification Method
3. 学会等名 2022 SICE Annual Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Seiya Takano, Takahiro Kawaguchi, Satoshi Asami, Risako Sasaki, Seiya Sugimoto, Yoshiyuki Shinya, and Shuichi Adachi
2. 発表標題 A Deep Neural Network with Module Architecture for Model Reduction and its Application to Nonlinear System Identification
3. 学会等名 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Takahiro Kawaguchi, Ichiro Maruta, and Shuichi Adachi
2. 発表標題 System identification with piecewise-constant finite impulse response model and its statistical property
3. 学会等名 22nd IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高野靖也, 川口貴弘, 朝見 聡, 佐々木理沙子, 足立修一
2. 発表標題 自動微分を用いた深層 NARX モデルの LPV システムとしての解釈
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 青山千仁, 川口貴弘, 足立修一
2. 発表標題 一定値外乱と正弦波外乱が存在する線形システムの同定
3. 学会等名 第64回自動制御連合講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青山千仁, 土生晋太郎, 片桐拓真, 成岡 優, 二宮哲次郎, 足立修一
2. 発表標題 実験用航空機『飛翔』搭載エンジンの回転数制御システムの同定
3. 学会等名 第60回飛行機シンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片桐拓真, 青山千仁, 成岡 優, 二宮哲次郎, 足立修一
2. 発表標題 飛行データを用いた実験用航空機『飛翔』搭載エンジンの回転数制御システムの同定
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 片桐拓真, 青山千仁, 成岡 優, 二宮哲次郎, 足立修一
2. 発表標題 実験用航空機『飛翔』搭載エンジンの回転数制御システムの同定
3. 学会等名 計測自動制御学会 第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 青山千仁, 川口貴弘, 鈴木 敦, 下田直樹, 足立修一
2. 発表標題 持続的外乱の存在下におけるシステム同定とモデル予測制御への適用
3. 学会等名 計測自動制御学会 第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 東 美波, 高野靖也, 川口貴弘, 足立修一
2. 発表標題 ニューラルネットワークを用いた非線形 LFR システムの同定
3. 学会等名 計測自動制御学会 第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 上野将樹, 八田羽謙一, 足立修一
2. 発表標題 車載コンピュータの性能を考慮したミラー過給エンジンの非線形モデル予測制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 第10回制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川口貴弘, 丸田一郎, 足立修一
2. 発表標題 ステップ応答値の予測のための区分定数有限インパルス応答モデルを用いたシステム同定法
3. 学会等名 第66回自動制御連合講演会
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担者	丸田 一郎  (Maruta Ichiro)  (20625511)	京都大学・工学研究科・准教授   (14301)	
研究 分担者	川口 貴弘  (Kawaguchi Takahiro)  (00869844)	群馬大学・大学院理工学府・助教   (12301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------