

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K06498

研究課題名（和文）深層学習の諸技術を応用したデータ駆動型制御系設計

研究課題名（英文）Data-Driven Control System Design Using Various Techniques of Deep Learning

研究代表者

若佐 裕治（Wakasa, Yuji）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：60263620

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、近年発展が著しい深層学習（Deep Learning）の諸技術をデータ駆動型制御系設計法に適用し、その実用性と汎用性の向上を目的として、最新のニューラルネットワーク構造を用いた制御器とそのデータ駆動型調整法を開発した。また、深層強化学習の応用によって、参照モデルの設定を不要とするデータ駆動型制御系設計法の開発を行うとともに、その際に必要となる制御性能評価の過程を高速化するための応答予測法を開発した。さらに、制御技術者の制御特性評価を代替するニューラルネットワークによる評価モデルの構築方法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、データをいかに上手く扱うかという技術である「データサイエンス」、そして人工知能の急速な発展を支える技術である「深層学習」という、科学技術において近年注目された二つの技術を制御工学分野で応用、発展させたという点で学術的意義があると考えられる。また、高度な理論の知識を必要とせず、複雑なシステムを統一的に扱える制御系設計の枠組みを構築することは、実用性の高い技術の開発という観点から社会的意義があると考えている。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have developed the latest neural network structure-based controllers and their data-driven tuning methods by applying various deep learning techniques in order to improve their practicality and versatility. We have also developed data-driven control system design methods without a reference model by applying deep reinforcement learning. In particular, we have improved response prediction methods so that control performance evaluation is accelerated in the control system design process. Furthermore, we have proposed a method for constructing an evaluation model using a neural network that can represent the control engineer's knowledge and insight for control characteristics.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：制御系設計 深層学習 データ駆動制御

1. 研究開始当初の背景

制御対象のモデル化の過程を経ることなく、入出力データから直接制御器パラメータ調整を行う手法である Virtual Reference Feedback Tuning (VRFT) や Fictitious Reference Iterative Tuning (FRIT) は、簡便でありながら実用上十分な制御性能を与える制御系設計手法として、研究者のみならず現場の技術者からも注目されていた。とくに、この種のデータ駆動型制御系設計法の適用対象を拡げるために、不感帯やヒステリシスなどの非線形性を有する制御対象に対して、制御器だけでなく非線形補償器を含めて調整を行う拡張型の VRFT、FRIT も提案されていた。

しかしながら、i) 制御対象がどのような非線形性を含むかという事前情報を設計者が把握している必要がある、ii) 制御対象のモデル化は不要であるものの、参照モデルという重要な設計パラメータを設計者が設定しなければならない、iii) 一般的な制御系構造に対応する制御器設計ではなく、限定的な制御系の構造を与えた上で、その制御器や補償器のパラメータのファインチューニングを行う用途を主に想定している、など実用性と汎用性の点で、さらなる改善の余地が残されていた。

一方、画像分類、音声認識、自然言語処理の分野において、深層学習 (Deep Learning) の有効性が認識され、他の多くの分野でも人工知能が注目されていた。この背景には、計算機能力の向上のみならず、深層学習自体におけるさまざまな要素技術の進展があった。深層学習は多層のニューラルネットワークによる学習である。制御分野においても、かつて 1990 年前後にニューラルネットワークに基づくアプローチが活発に研究されたが、当時は多層ではなく主に 3 層 (中間層は 1 層) のニューラルネットワークが扱われていた。当時に比較して、画像分野等で近年飛躍的な成果があったことに鑑みて、制御分野においても少なからずその効果があると考えられた。その一方で、深層学習技術を積極的に制御分野に応用した研究は、ごく一部の研究を除いて、ほとんど存在しない状況であった。

2. 研究の目的

上述の研究背景から、深層学習の諸技術を VRFT や FRIT などに積極的に応用することによって、データ駆動型制御系設計法の実用性と汎用性を向上させることを研究の目的とした。具体的には、以下のような課題に取り組んだ。

- (1) 最新のニューラルネットワーク構造を用いた制御器とそのデータ駆動型調整法の開発
- (2) 強化学習の応用によって参照モデルの設定を不要とするデータ駆動型制御法の開発
- (3) 制御性能評価の過程を高速化するための応答予測法の開発
- (4) 制御技術者の制御特性評価を代替するニューラルネットワークによる評価モデルの構築

3. 研究の方法

研究の目的に挙げた各課題に対して、それぞれ以下のような方法によって研究を推進した。

(1) LSTM (Long Short-Term Memory) とよばれる再帰型ニューラルネットワークを制御器として用い、VRFT によって、LSTM の重み調整を行う制御器調整法について検討した。LSTM は標準的な再帰型ニューラルネットワークに比べ、いわゆる勾配消失問題という学習過程の問題を解決する方法であり、時系列データを扱う言語処理、動画処理への応用に実績がある。さらに、計算時間の短縮の観点から、LSTM の代替ニューラルネットワークを検討し、オフライン制御器調整だけでなく、オンライン制御器調整への発展を試みた。

(2) データ駆動型制御である FRIT において、制御対象のモデルは不要であるものの、所望の応答を与える参照モデルが必要である。一般に、制御系設計者が参照モデルを設定するには制御対象の深い知識や、試行錯誤による労力が必要である。そこで、制御技術者に要求される技量や労力を軽減させることを目的として、深層強化学習を導入した制御器パラメータ自動調整法を検討した。

(3) 上記(2)において、FRIT 自体は 1 回の実験によるデータ取得で制御器調整が可能であるが、深層強化学習を利用して参照軌道への追従性能を評価する際に、多くの反復実験を必要とすることが問題であった。この問題を解決し、制御器調整法全体において反復実験を完全に不要にするため、データ駆動型応答予測によって制御性能を評価する方法を検討した。

(4) 制御技術者が通常直感的に行う制御特性の評価を制御技術者に代わってニューラルネットワークが行うシステムの開発を試みる。時間応答、周波数応答などの多くの制御特性が可視化されたグラフを用いて評価されることに注目し、画像分野で進展が著しい畳み込みニューラルネットワーク (CNN: Convolutional Neural Network) を適用した。

4．研究成果

各課題に対して、つぎのような研究成果を得た。

(1) まず、LSTM と VRFT を組み合わせることにより、同一構造の制御器によって、データのみから、制御対象に含まれるさまざまな非線形性に対応可能な制御器調整法を提案した。提案法をシミュレーションだけでなく、DC モータ制御システムに適用し、実機実験によって有効性を確認した。提案法は、制御対象に含まれる非線形性の事前情報を必要としない汎用的な方法であるが、高性能な計算機においても計算に数時間を要することが少なくない。したがって、この手法をオンライン処理に発展させることは難しく、オフライン処理に限定されるという問題があった。

そこで、LSTM の代替として、ESN (Echo State Network) とよばれる再帰型ニューラルネットワークの使用を検討し、ESN と VRFT を組み合わせたデータ駆動型制御器調整法を提案した。ESN は出力層のみの学習によって、高速な学習を可能にするニューラルネットワークであり、複雑な非線形時系列データの予測モデルとして、近年注目されている。提案法は LSTM を用いた場合よりも、同程度の制御性能を達成するために要する計算時間は格段に短縮できることがわかった。その結果、ESN と VRFT を組み合わせたデータ駆動型制御器調整法をオンライン処理に発展させることが可能となった。本手法の有効性を形状記憶合金アクチュエータ制御システムによって検証した。

(2) FRIT と深層強化学習を組み合わせ、一組の実験データから制御系の応答を予測しながら、参照モデルの調整を自動で行う手法を提案した。深層強化学習は深層学習と強化学習を組み合わせた人工知能分野の新しい技術であり、その中でも 2016 年に提案された比較的新しく、評価の高い Asynchronous Advantage Actor-Critic (A3C) とよばれる手法を用いた。また、深層強化学習で用いる報酬を計算する際に用いる正規化パラメータの与え方、および FRIT を実行する上で必要な参照モデルパラメータを深層強化学習を用いて連続的に変化させる方法を考案し、DC モータ制御システムで実験検証した。その結果、設計者の意図を反映させた制御器調整の自動化が行われ、提案法の有効性が確認できた。

(3) まず、FRIT を応用したデータ駆動型応答予測法を(2)で開発した手法に組み入れることによって、反復実験による制御性能の評価が不要となる制御器調整法の有効性を確認した。FRIT は制御出力に注目した調整法であるため、制御入力に注目する VRFT よりも直感的に理解しやすい側面もっているが、FRIT は計算上、制御器の逆モデルを必要とするため、逆モデルを得ることが困難な制御器には適用できない。その反面、VRFT では制御器の逆モデルを必要としない。そこで、制御器が複雑であり、逆モデルが得られないような制御系への(2)の手法の展開を考慮して、VRFT を応用したデータ駆動型応答予測法を開発した。さらに、VRFT による制御器調整において、入出力データにプレフィルタを適用することで、調整後の精度が向上することが知られているが、このプレフィルタを VRFT に基づく応答予測手法に適用し、応答予測の精度を向上させる手法を提案した。

(4) 制御技術者が直感で行っている制御特性の評価を容易に行う評価モデルを構築する方法を提案した。技術者とシステムの対話的なやりとりによって評価基準を明らかにし、得られた評価基準を CNN によって学習することで、技術者ひとりひとりに合ったシステム設計を可能とした。また、その有効性を確認するため、深層学習フレームワークの一種である TensorFlow を用いて CNN に基づくシステムを構築し、実験による検証を行った。実験による検証の結果、制御技術者が直感的に判断している部分を CNN によって学習させることを通して、制御特性評価のノウハウを効率よくニューラルネットワークに持たせられることを確認した。

上記(1)～(4)の一連の研究により、深層学習の諸技術をデータ駆動型制御系設計法に応用、発展させるという当初の目的を達成したと考えている。また、学生による学会発表のうち、5件において、優秀賞、奨励賞を受賞し、高い評価を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 12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 Yuji Wakasa, Kyosuke Nakatani, Shoichi Murakami, and Ryosuke Adachi	4. 巻 15
2. 論文標題 Data-driven tuning of LSTM controllers for systems with nonlinearities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Innovative Computing, Information and Control - Express Letters	6. 最初と最後の頁 421-427
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24507/icipel.15.05.421	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 Shoichi Murakami, Kyosuke Nakatani, Yuji Wakasa, and Ryosuke Adachi	4. 巻 -
2. 論文標題 Data-driven tuning of ESN controllers for systems with nonlinearities	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2021	6. 最初と最後の頁 381-384
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 Eiji Masuda, Yusuke Matsuda, Yuji Wakasa, and Ryosuke Adachi	4. 巻 13
2. 論文標題 Solution to DC optimal power flow problems with demand response via distributed asynchronous primal-dual algorithms	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/jcmsi.13.66	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 Ryosuke Adachi, Yuji Wakasa, and Koichi Kobayashi	4. 巻 V1199-01.18
2. 論文標題 On minimum time control for dynamical transportation using ADMM	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. 21st IFAC World Congress	6. 最初と最後の頁 -
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 Ryosuke Adachi and Yuji Wakasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Continuous-time algorithm for consensus optimization over P2P networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2020	6. 最初と最後の頁 513-516
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 松田佑介, 若佐裕治	4. 巻 139
2. 論文標題 完全分散型高速化ADMMによる直流最適潮流問題の解法	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 725-731
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.139.725	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 Yusuke Matsuda, Yuji Wakasa, and Eiji Masuda	4. 巻 -
2. 論文標題 Fully-distributed accelerated ADMM for DC optimal power flow problems with demand response	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. 12th Asian Control Conference	6. 最初と最後の頁 740-745
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 Eiji Masuda, Yusuke Matsuda, and Yuji Wakasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Solution to DC optimal power flow problems via distributed asynchronous primal-dual algorithms	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2019	6. 最初と最後の頁 1408-1411
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 無
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 Ryosuke Adachi and Yuji Wakasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Continuous-time consensus optimization via fully distributed dual decomposition	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proc. SICE International Symposium on Control Systems 2020	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 Yuji Wakasa and Katsuya Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Data-driven tuning for LSTM recurrent neural network-based controllers	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 1476-1479
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 志賀大輔, 若佐裕治, 中村 龍	4. 巻 31
2. 論文標題 緩やかな変化を考慮した粒子群最適化による太陽光発電システムの最大電力点追従制御	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 システム制御情報学会論文誌	6. 最初と最後の頁 250-256
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 Yusuke Matsuda and Yuji Wakasa	4. 巻 -
2. 論文標題 Fully-distributed accelerated ADMM and its application to DC optimal power flow problems,	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2018	6. 最初と最後の頁 23-26
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 Yuji Wakasa, Nobuyuki Yamamoto, and Katsuya Yamamoto	4. 巻 -
2. 論文標題 Controller tuning and nonlinear compensation based on multilayer neural networks	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proc. SICE Annual Conference 2017	6. 最初と最後の頁 244-248
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 Yuji Wakasa and Shojiro Adachi	4. 巻 12
2. 論文標題 Fictitious reference iterative tuning considering friction	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEJ Trans. Electrical and Electronic Engineering	6. 最初と最後の頁 796-797
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1002/tee.22468	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 -

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 磯兼優治, 村上将一, 若佐裕治, 足立亮介
2. 発表標題 エコステートネットワークを用いたオンライン型データ駆動制御
3. 学会等名 第30回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 川本祐輔, 足立亮介, 若佐裕治
2. 発表標題 二次ダイナミクスを有するマルチエージェントシステムのネットワーク構造に基づく安定化
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加藤秀一, 若佐裕治, 足立亮介
2. 発表標題 非線形要素を含む制御対象のデータ駆動型応答予測
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 仲谷享輔, 若佐裕治, 足立亮介
2. 発表標題 非線形要素を考慮したLSTMによるデータ駆動型制御器調整
3. 学会等名 第29回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 若佐裕治
2. 発表標題 データ駆動制御に関する最近の研究動向
3. 学会等名 日本鉄鋼協会, 計測・制御・システム分野における産学若手交流セミナー(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 宮城 詢, 若佐裕治, 足立亮介
2. 発表標題 非同期交互方向乗数法の高速度と直流最適潮流問題への応用
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立亮介, 田中大介, 若佐裕治
2. 発表標題 人口移動を含むSIRモデルのネットワーク構造に基づいた安定解析
3. 学会等名 第8回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤穂波, 若佐裕治
2. 発表標題 深層学習による制御特性の評価モデルの構築
3. 学会等名 第63回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立亮介, 若佐裕治, 小林孝一
2. 発表標題 最適制御に基づくグラフ上の動的輸送問題の解法
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐倉 康, 若佐裕治, 足立亮介
2. 発表標題 プレフィルタを適用した制御系の応答予測
3. 学会等名 第28回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 足立亮介, 若佐裕治, 小林孝一
2. 発表標題 ADMMを用いたグラフ上の動的輸送
3. 学会等名 システム数理と応用研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮城 詢, 松田 佑介, 舩田 栄次, 若佐 裕治, 足立 亮介
2. 発表標題 交互方向非厳密ニュートン法を用いた直流最適潮流問題の高速分散解法
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西田将志, 山本克也, 若佐裕治
2. 発表標題 深層学習による制御器パラメータ調整
3. 学会等名 第35回センシングフォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本克也, 川本郁也, 西田将志, 若佐裕治
2. 発表標題 強化学習を用いた制御器パラメータの自動調整
3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川本郁也, 山本克也, 若佐裕治
2. 発表標題 非線形要素をもつ制御対象の応答予測に関する研究
3. 学会等名 第27回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 村上将一, 山本克也, 若佐裕治
2. 発表標題 強化学習を用いた制御器パラメータの自動調整と実験検証
3. 学会等名 第6回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松田佑介, 若佐裕治
2. 発表標題 完全分散型高速化ADMMによる直流最適潮流問題の解法
3. 学会等名 第62回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 原田 守, 若佐裕治
2. 発表標題 ベイズ最適化による太陽光発電の最大電力点追従制御
3. 学会等名 第35回センシングフォーラム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 若佐裕治, 桑原智生
2. 発表標題 ドローン制御のためのシステム構成と制御器調整
3. 学会等名 第60回自動制御連合講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山本克也, 若佐裕治
2. 発表標題 LSTMニューラルネットワークによる制御器調整
3. 学会等名 第26回計測自動制御学会中国支部学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 若佐裕治, 山本克也
2. 発表標題 LSTMニューラルネットワーク制御器のデータ駆動型調整
3. 学会等名 第5回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2018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
---------------------------	-----------------------	----

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
---------	---------