

令和 6 年 6 月 17 日現在

機関番号：12301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14178

研究課題名（和文）AI技術に基づく安定性の保証付き制御手法の開発

研究課題名（英文）Development of an AI-Technology-Based Control Method with Stability Guarantees

研究代表者

川口 貴弘（Kawaguchi, Takahiro）

群馬大学・大学院理工学府・助教

研究者番号：00869844

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：システムの一部のモデルのみが既知である場合の制御手法であるレトロフィット制御に強化学習を組み合わせた新たな制御手法を提案した。具体的には、レトロフィット制御に特有の構造である整流器を保持しながら制御則の学習を行う手法を提案した。これにより、システムの安定性を理論的に保証しつつ、強化学習によって環境の変化に適応する制御が可能になった。提案法の有用性を電力システムを単純化したモデルに対する数値シミュレーションと、簡単な実機実験によって確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に、強化学習は環境の変化に適応する制御手法として知られているが、制御系の最も基本的で重要な性質の安定性を理論的に保証することが困難であった。本研究では制御を行う前のシステムが安定であるという事前情報を活用し、レトロフィット制御理論を応用することにより、強化学習による制御系の安定性を理論的に保証することができた。これにより、産業界などでの実用化の際に、学習途中での機器の暴走などを防止することが可能となる。

研究成果の概要（英文）：A novel control method that combines reinforcement learning with retrofit control, a technique used when only part of the system model is known, has been proposed. Specifically, a method for learning control laws while retaining the rectifier, a distinctive structure of retrofit control, has been investigated. This approach enables adaptation to environmental changes through reinforcement learning while theoretically ensuring system stability. The effectiveness of the proposed method has been validated through numerical simulations on a simplified power system model and simple real-world experiments.

研究分野：システム制御工学

キーワード：分散制御 強化学習 レトロフィット制御

1. 研究開始当初の背景

近年、人工知能への関心が高まっており、その社会応用が盛んに研究されている。そのなかの重要なテーマの一つが強化学習である。強化学習はボードゲームなどの分野で成功を収めている一方で、実際に産業応用されている例は少ないのが現状である。その原因のひとつは、強化学習で得られる制御系に対する品質保証が難しいことだと考えられる。現実的には、得られるデータすべてに対して品質保証を行うことは難しく、現場で強化学習を本当に使って良いのか、という不安が大きいことが問題である。

2. 研究の目的

制御系が最低限満たすべき仕様として、安定性がある。強化学習において、データ取得の際のノイズにより制御系の精度が低下し、安定性が失われることがあれば、制御対象が暴走する大きな事故につながり得る。特に、悪意をもった攻撃者によって敵対的にデータが汚される場合にはこの危険性は増大する。実際、深層学習を用いた画像認識では、人の目では認識できないノイズを画像に加えることによって認識結果を任意に操作できることが指摘されている。このことから、いかなるデータが得られたとしても、少なくとも制御系の安定性を保証することが重要である。ことから、本研究の目的はいかなるデータが得られたとしても安定性が保証できる強化学習のための原理と方法を明らかにすることである。

3. 研究の方法

任意のデータに対して、安定性の理論保証を行うために、データに依存しない制御対象の性質を利用することが必要である。そこで、分散制御系設計法のひとつであるレトロフィット制御の考え方を強化学習に取り入れることを提案する。レトロフィット制御は、制御器を付加する前のシステムがもともと安定であることを前提とし、その安定性を壊すことのない制御器を設計して実装する。言い換えれば、制御対象の持っている物理的な安定性を活用することで安定性を保証する。本研究では、この考え方を用いて安定性を確保しながらも、データの活用によって適応性を獲得する強化学習手法を検討した。

4. 研究成果

レトロフィット制御では、図 1(a)で示すように、制御対象が既知の部分と未知の部分の相互接続であると考えられる。図において、システム G は既知の部分である。また、システム G_E は未知の部分であり、変化する可能性もあるとする。ただし、 G_E の変化は、 G と G_E が接続されたシステムが安定である範囲だとする。この範囲内の任意の G_E に対して安定化を達成する制御器は必ず図 1(b)の構造を取らなければならないことが従来示されていた。この制御器のポイントは、整流器と内部制御器を接続して構成すること、内部制御器は G に接続したときに安定化を達成するものを用いること、の 2 点である。したがって、整流器は対象システムの物理特性から一意に定まる一方で、内部制御器の選び方には自由度がある。本研究では、物理特性から決まる整流器を利用しつつ、内部制御器を強化学習によって調整する、という方法によって、任意のデータに対して安定性を保証することができることを示した。

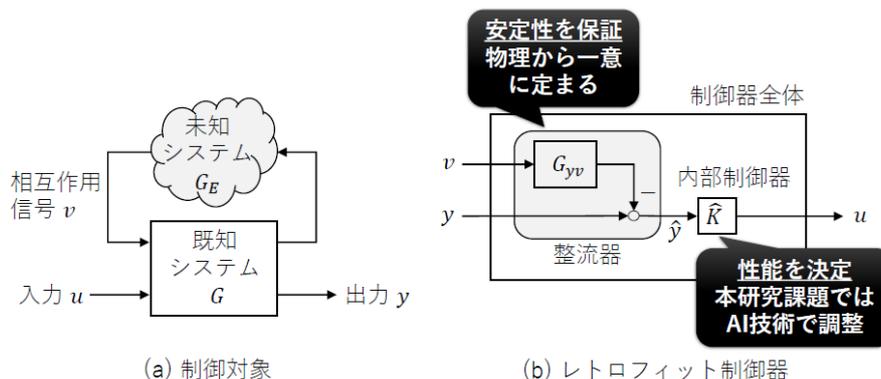


図 1 レトロフィット制御の概略

レトロフィット制御の考え方を強化学習に取り入れるためには、整流器を含んだうえで、内部制御器のみを学習する、構造付きの学習法が必要になる。一般的な強化学習アルゴリズムでは、このような構造付きの制御器を得ることは考えられていなかったが、本研究では、整流器の構造付きで内部制御器を学習する方法について明らかにした。具体的には、内部制御器の表現として、従来強化学習でよく用いられてきたARX (Auto-Regressive with eXogenous) モデル構造ではなく、FIR (Finite Impulse Response) モデル構造を用いるべきであることを明らかにした。

電力系統を単純化した図2のようなモデルを対象として提案法の有用性を確かめるシミュレーションを実施した。このシステムは3つのノードが接続されたものであり、1つのノードのモデルを既知、2つのノードのモデルは未知であるものとして強化学習を実施した。このとき、1つのノードに外乱が加わるものとし、その影響を最小化することを目的とした。

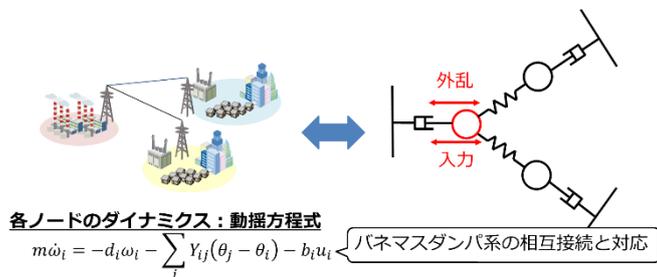


図2 対象システム

図3に提案法と従来法による強化学習の結果を示す。図において、偏差を0に近づけることが制御の目的である。図3(a)は従来の強化学習法によるものであり、学習の途中において、システムを不安定化させる制御器が得られてしまうことが示されている。一方で、図3(b)ではシステムを不安定化させることなく学習が可能であったことが示されている。また、青線で示された制御器を付加する前の結果に比べ、赤線で示された制御器付加後の結果で偏差が小さく抑えられていることが示されている。このことは、システムの安定性の理論保証と、データを利用した強化学習による環境適応が両立可能となったことを示している。このことから提案法の有用性が確かめられた。

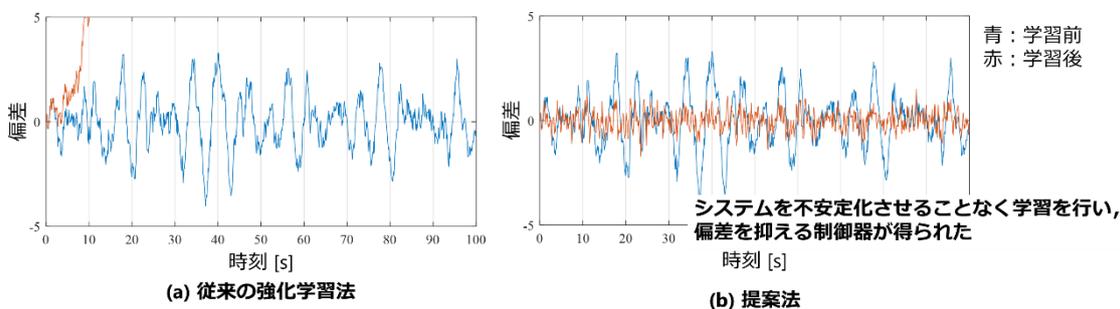


図3 強化学習の適用結果

さらに、図2と同様のシステムに対し、それぞれのノードに独立した管理者が存在することを想定したシミュレーションを行った。このとき、それぞれの管理者が互いの制御器の学習結果を知るこなく、独立に学習を行った。図4は学習の結果であり、横軸は制御器の導入数、縦軸が偏差の大きさを表している。この結果より、制御器の導入数を増やすほど制御性能の向上が見られることが確かめられた。

以上の結果から、提案法は制御系の安定性を保証しながら強化学習が可能となったこと、複数主体が関与する大規模システムへも適用可能であることを示している。これらの結果は強化学習を安全に産業応用することを可能とするものであると考えられる。

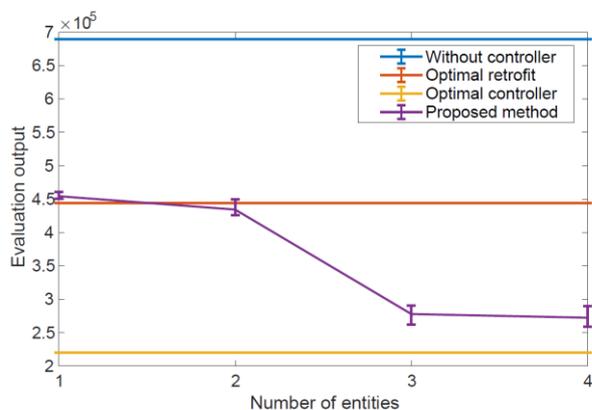


図4 複数の主体による強化学習結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 根岸航平, 川口貴弘, 橋本誠司
2. 発表標題 複数主体の存在下におけるレトロフィット強化学習法
3. 学会等名 第10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 2023年

1. 発表者名 川口貴弘
2. 発表標題 インパルス応答のモード表現に基づくカーネル正則化を用いたシステム同定法
3. 学会等名 第10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 2023年

1. 発表者名 三上凌, 川口貴弘, 橋本誠司
2. 発表標題 ブロックスパース最適化を用いたARXモデルの同定法
3. 学会等名 第10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 2023年

1. 発表者名 橋本直季, 根岸航平, 川口貴弘, 橋本誠司
2. 発表標題 カーネル正則化を用いたレトロフィット強化学習法
3. 学会等名 第10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 2023年

1. 発表者名 Kohei Negishi, Takahiro Kawaguchi, Seiji Hashimoto
2. 発表標題 Retrofit Controller Design Using a Finite Impulse Response Representation and Reinforcement Learning
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 根岸航平, 川口貴弘, 橋本誠司
2. 発表標題 強化学習と有限インパルス応答表現を用いたレトロフィット制御器の設計
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 川口貴弘
2. 発表標題 データ活用と理論保証を両立する制御理論の開発 -レトロフィット制御理論によるアプローチ-
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2022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
---------	---------