

令和 4 年 6 月 3 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2018～2021

課題番号：18H01461

研究課題名(和文) 確率可制御性縮約による機械学習援用制御手法の可解釈性獲得

研究課題名(英文) Interpretability of Machine Learning-Assisted Control Methods through Stochastic Controllability Analysis

研究代表者

加嶋 健司 (Kashima, Kenji)

京都大学・情報学研究科・准教授

研究者番号：60401551

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 8,700,000円

研究成果の概要(和文)：大量のデータと機械学習の手法を活用する制御システムは、非線形性や環境の変化への柔軟な対応力などが期待される一方で、これまで数理モデルを用いて担保されてきた理論的性能保証の欠如から、産業応用の際には漠然とした不安が拭えない。本研究では、研究代表者が提唱するデータ駆動型モデル低次元化理論に基づいて確率制御理論的解釈を与えることで、機械学習援用手法を非ブラックボックス化するための理論結果を導出した。(本課題は1年短縮終了し、基盤研究(A)21H04875にて継続実施)

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、機械学習の手法により抽出した特徴量を状態変数とする低次元モデル構築や、差分プライバシー解析、深層強化学習にもとづく自己駆動型制御システム設計、軌道の位相的性質を活用する動的システム学習とモデル予測制御への応用など、統計的学習理論とシステム制御理論の融合を推進した。社会的には、工学応用期に移行しつつある機械学習技術の信頼性向上及び実応用検証による有効性の確認をおこなった。

研究成果の概要(英文)：While control systems that utilize large amounts of data and machine learning methods are expected to have nonlinearity and the ability to flexibly respond to changes in the environment, the lack of theoretical performance guarantees that have been ensured using mathematical models so far makes it difficult to dispel vague concerns when it comes to industrial applications. In this study, we developed the data-driven model reduction theory proposed by the principal investigator and derived theoretical results for de-black-boxing machine learning-assisted methods by giving them a stochastic control theoretical interpretation.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 機械学習 情報通信工学 薬学 確率統計

## 1. 研究開始当初の背景

システム制御分野では、主として解析・制御の対象の動的挙動を数理モデル（典型的には微分／差分方程式）により記述し、その数学的構造の理解、最適な制御方策を導出してきた。しかしながら、近年では遺伝子発現ネットワーク、広地域にわたる電力管理システム、交通流を含む社会システムなど当分野で扱う対象が複雑化・高度化し、既存の（ロバスト制御理論を含む）システム制御理論を適用可能なほど簡明・高精度な数理モデルの構築を前提とすることに限界が生じつつある。一方で、こうした新しい応用分野においても、大量のデータが収集できる環境が急速に整い、その利活用手法の構築が強く求められている。例えば、超スマート社会の実現もこうしたシステム制御的課題の典型であるといえる。

## 2. 研究の目的

大量のデータと機械学習的手法を活用する制御システムは、非線形性や環境の変化への柔軟な対応力などが期待される一方で、これまで数理モデルを用いて担保されてきた理論的性能保証の欠如から、産業応用の際には漠然とした不安が拭えない。本研究の目的は、研究代表者が提唱するデータ駆動型モデル低次元化理論を発展させる以下の課題を通じて、確率制御理論的解釈を与えることで機械学習援用手法を非ブラックボックス化するための枠組みを創成し、この不安の軽減に貢献することである。

- 確率制御理論・モデル低次元化理論・教師なし学習手法を融合した、「制御系設計のための解釈可能な特徴量抽出」の理論基盤の構築
- 実応用課題を通じた有用性の検証

## 3. 研究の方法

以下に示す課題を軸に、それぞれ理論結果を導出するとともに、実応用課題に適用することで有効性を検討した。

- スパース性にもとづく特徴量抽出を制御系設計へ応用するための理論構築
- 機械学習的手法により抽出した特徴量を状態変数とする低次元モデル構築
- ネットワーク上の制御・観測ノードのスケジューリング手法の提案
- 深層強化学習にもとづく自己駆動型制御システム設計
- 軌道の位相的性質を活用する動的システム学習とモデル予測制御への応用
- 制御システムのプライバシー解析

## 4. 研究成果

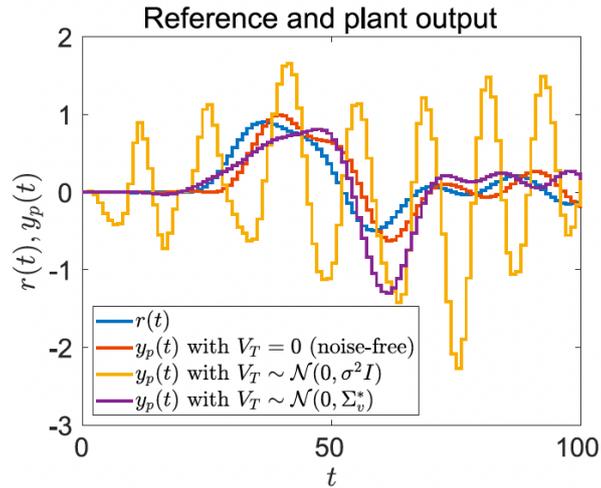
ここでは、いくつかの具体的な理論結果の説明をおこなう。

### (1) 制御システムのためのベイジアン差分プライバシー

差分プライバシーとは、類似した入力データ間の識別の難しさに基づくプライバシーの尺度である。差分プライバシー分析では、類似したデータは通常、それらの距離が所定の閾値を超えないことを意味する。そのため、プライバシー性の高い情報を含む、距離が離れているデータセットの識別の難しさは考慮されていない。この問題は静的データの差分プライバシーの研究でも指摘されており、データの事前分布を利用して外れ値データに対してもプライバシー保護レベルを提供するベイジアン差分プライバシーが提案されている。本研究では、このベイジアン差分プライバシーを制御システムに導入し、離れた入力データに対してプライバシー保証を提供し、その基本的な性質を明らかにする。例えば、プライバシーと情報価値のトレードオフを表す、希望するプライバシー保護レベルを満足する機構を設計する。

例えば、右図において青線が制御システムにおける参照信号であり、これを秘匿化したいとする。赤線は秘匿化をおこなわなかった場合の出力を表しており、青線によく追従している

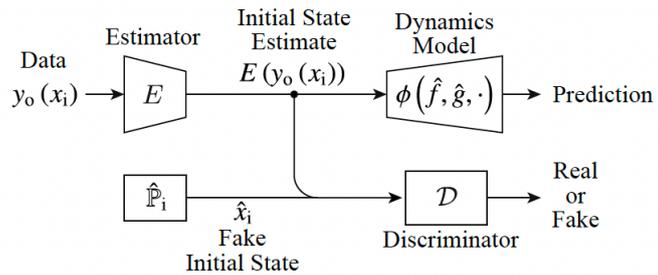
ものの、プライバシー水準は低い。一方で、黄色線は従来の差分プライバシーに基づく秘匿化を施した場合の出力であり、まったく黄色線に追従できていない。最後に、紫が提案するベイジアン差分プライバシーに基づく秘匿化をおこなった場合の出力であり、黄色線と同程度のプライバシー水準を確保しつつ、赤線に近い追従性能を達成している。これは、秘匿化対象である追従信号に関する事前情報を活用した結果である。



### (2) 敵対的学習を用いた非線形ダイナミクスと状態分布の同時同定

非線形ダイナミクスと状態分布の同時同定問題を新たに定式化し、その解法を与えた。この問題は多くの現実的な状況で実用的に有用であるが、システム同定のコミュニティではこれまで研究されてこなかった。数学的な観点から、状態分布の推定は Jensen-Shannon ダイバージェンスによる正則化として表される。この定式化の重要な特徴は、近年機械学習分野で最も重要な成果の一つである生成モデルの構築に等価であることである。このような観点から、我々は生成モデル構築のための標準的な手法である敵対的学習法を活用する同定手法を提案した。

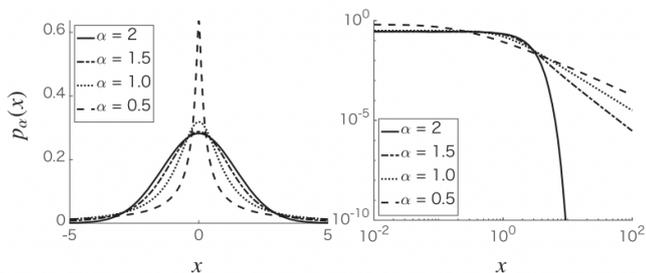
具体的には、右のように与えられた出力系列の初期状態を推定する推定器がエンコーダ、非線形ダイナミクスモデルがデコーダに対応する定式化をおこない、特徴量に対応する初期分布の整形を、機械学習分野で目覚ましい進歩があるにも関わらず、制御分野ではほぼ用いられていない敵対的学習により達成した。



### (3) 制御システムにおけるレアイベントのモデリングと評価

突発的な天候変動が深刻な影響を与える風力発電を有する電力ネットワークの安定性解析手法を拡張し、動的システムのレアイベントのモデリング・解析・制御手法の統一的な枠組みを与えた。

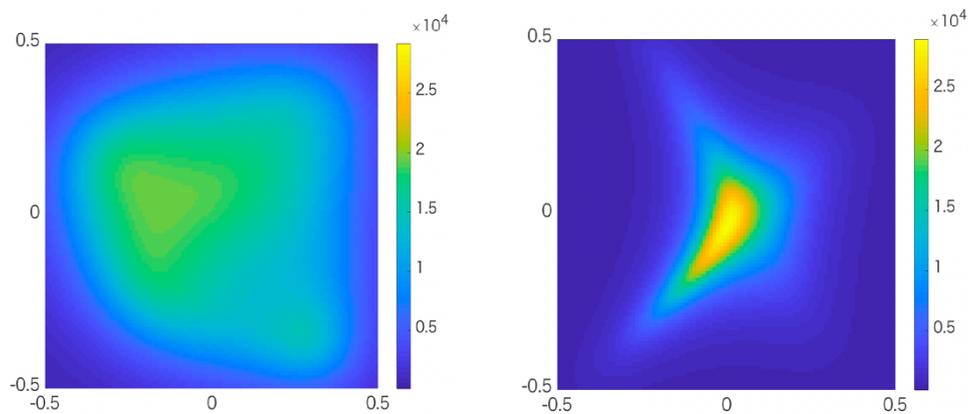
具体的には、安定分布と呼ばれるべき乗則にしたがう厚い裾をもつ確率分布（右に確率密度関数を示す）を採用することで系統的な解析・設計が可能となることを示した。



### (4) ガウス過程回帰状態空間システムの可制御性グラミアン

線形制御理論では、適切な駆動入力によって力学的状態をどれだけ効率的に目標値まで駆動できるかを定量化する、いわゆる可制御性グラミアンが重要な役割を担ってきた。一方、ビッグデータの活用により、近年、データ駆動型の確率的モデリングの枠組みであるガウス過程状態空間モデルが注目されている。本論文では、この新しいモデリングの枠組みの数理

的性質を明らかにするために、可制御性グラミアンの概念をガウス過程状態空間モデルに拡張した。さらに、その効果的な計算方法およびモデルのスパース化への応用を検討した。例として、下図の左が従来法によりガウス過程回帰状態空間モデルをスパース化した場合の精度をあらわしており、右が同程度のスパース性を有するモデルを提案法により構築した場合の精度である。これは可制御性グラミアンの解析より、中心付近が重要であることがわかった例であるが、この領域において提案法の精度が非常に高くなっている。



## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Sugiura Genki, Ito Kaito, Kashima Kenji	4. 巻 6
2. 論文標題 Bayesian Differential Privacy for Linear Dynamical Systems	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Control Systems Letters	6. 最初と最後の頁 896 ~ 901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCSYS.2021.3087096	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 Ito Kaito, Kawano Yu, Kashima Kenji	4. 巻 131
2. 論文標題 Privacy protection with heavy-tailed noise for linear dynamical systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109732 ~ 109732
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109732	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 Ito Kaito, Kashima Kenji, Kato Masakazu, Ohta Yoshito	4. 巻 14
2. 論文標題 Stochastic model-based assessment of power systems subject to extreme wind power fluctuation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration	6. 最初と最後の頁 67 ~ 77
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1080/18824889.2021.1906017	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 Kaito Ito, Takuya Ikeda, Kenji Kashima	4. 巻 125
2. 論文標題 Sparse Optimal Stochastic Control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109438
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2020.109438	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 Yu Kawano, Kenji Kashima, Ming Cao,	4. 巻 127
2. 論文標題 Modular control under privacy protection: Fundamental trade-offs	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Automatica	6. 最初と最後の頁 109518
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.automatica.2021.109518	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 該当する

1. 著者名 伊藤 海斗, 林 輝, 加嶋 健司, 加藤 政一	4. 巻 54
2. 論文標題 風力発電連係による擾乱のべき乗則の検証と確率システム解析	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 計測自動制御学会論文集	6. 最初と最後の頁 878 ~ 885
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.9746/sicetr.54.878	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 Ikeda Takuya, Kashima Kenji	4. 巻 64
2. 論文標題 On Sparse Optimal Control for General Linear Systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Automatic Control	6. 最初と最後の頁 2077 ~ 2083
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TAC.2018.2863220	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18件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 Kenji Kashima, Moe Watanabe, Ichiro Maruta
2. 発表標題 Simultaneous identification of nonlinear dynamics and state distribution using Jensen-Shannon divergence
3. 学会等名 3rd IFAC Conference on Modelling, Identification and Control of Nonlinear Systems (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenji Kashima, Misaki Imai
2. 発表標題 Controllability Gramian of nonlinear Gaussian process state space models with application to model sparsification
3. 学会等名 21th IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yu Kawano, Kenji Kashima, Ming Cao
2. 発表標題 A fundamental performance limit of cloud-based control in terms of differential privacy level
3. 学会等名 21th IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaito Ito, Takuya Ikeda, Kenji Kashima
2. 発表標題 Continuity of the value function for stochastic sparse optimal control
3. 学会等名 21th IFAC World Congress (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤海斗, 河野佑, 加嶋健司
2. 発表標題 裾の重い雑音を利用した線形システムの差分プライバシー保証メカニズム
3. 学会等名 第64回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤海斗, 河野佑, 加嶋健司
2. 発表標題 線形システムに対する裾の重い雑音を用いたプライバシー保護
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 加嶋健司
2. 発表標題 システム制御理論と機械学習
3. 学会等名 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML) 第41回研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 加嶋健司
2. 発表標題 機械学習と調和する制御理論
3. 学会等名 第4回SICEポストコロナ未来社会ワークショップ 人間行動と社会のモデリング (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹内、加嶋
2. 発表標題 分散線形レギュレータの分散設計に対する強化学習アプローチ
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 今井、加嶋
2. 発表標題 ガウス過程状態空間システムの可制御性グラミアン
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 Ikeda Takuya、Kashima Kenji
2. 発表標題 Sparse optimal feedback control for continuous-time systems
3. 学会等名 18th European Control Conference (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Ikeda Takuya、Zelazo Daniel、Kashima Kenji
2. 発表標題 Maximum Hands-Off Distributed Bearing-Based Formation Control
3. 学会等名 IEEE 58th Conference on Decision and Control (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 和田、加嶋
2. 発表標題 データ駆動アプローチにより設計された制御器の データによる品質検証について
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 今井、加嶋
2. 発表標題 ガウス過程状態空間モデルの可制御性グラミアンにもとづくスパース化
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 2020年

1. 発表者名 丸田、渡部、加嶋
2. 発表標題 勾配法にもとづくシステム同定の実装と動向
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 2020年

1. 発表者名 清水一浩，加嶋健司
2. 発表標題 エンジン吸排気系の同定における物理的知見の活用に関する一考察
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 山本一樹，加嶋健司
2. 発表標題 ネットワーク上の時空間的に滑らかなプロファイルに対する最適観測点選択
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 加嶋健司
2. 発表標題 機械学習と調和する制御理論の期待と現状
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

〔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	辻野 博文 (Hirofumi Tsujino) (10707144)	大阪大学・薬学研究科・助教  (14401)	
研究分担者	山下 沢 (Taku Yamashita) (70398246)	武庫川女子大学・薬学部・准教授  (34517)	

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			
イスラエル	Technion, Israel Institute of Technology			
オランダ	University of Groningen			