

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14301

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26289130

研究課題名(和文) 確率ゆらぎと相互作用し機能する制御系の設計論：不変測度解析と応用

研究課題名(英文) Control systems that utilize interaction with environmental fluctuation

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) 12,400,000円

研究成果の概要(和文)：「確率揺らぎと相互作用し機能するメカニズム」の解明を目指した理論・応用研究を実施した。理論研究においては、環境ゆらぎの有効性の定量化を可能にする不変確率測度に関するいくつかの数学的結果を導いた。さらに、副産物として、可制御性と機械学習に関する新たな理論結果も明らかにした。また、応用研究として、1. 通信ネットワーク設計、2. 薬物代謝メカニズム解析、3. 風力連係時の電力ネットワークの評価手法の構築への適用を行った。

研究成果の概要(英文)：Toward better understanding of systems that utilize mutual interaction with probabilistic fluctuation, we conducted theoretical and application research on such systems. From a theoretical point of view, we clarified mathematical properties of invariant probability measure that enable quantify the positive effect of environmental fluctuation. Also, as a byproduct, a novel relationship between controllability and machine learning was revealed. For application research, the theoretical results were applied to 1. communication network design, 2. analysis of medicine metabolism mechanism, and 3. development of evaluation method for the impact of wind power fluctuation on power system quality.

研究分野：制御工学

キーワード：制御工学 情報通信工学 薬学 機械学習

1. 研究開始当初の背景

物理システムに加わる雑音の影響の解析に端を発し、1960年頃にカルマンフィルタやLQG制御が確立するなど、古くから着実に確率システムに関わる研究はなされてきた。この状況の中、2000年以降、遺伝子発現・量子力学系・通信ネットワークなどの制御が現実味を帯びるとともに、2011年の大震災以降は、不確実性の高いクリーンエネルギーの利用に対する需要から、確率システム制御のニーズ面での環境が劇的に変化している。一方で、これまでの理論研究においては、確率ゆらぎは不確実性を増大させる望ましくない要因として扱われてきた。これは、確率ゆらぎによる頑強性の獲得などが周辺分野で注目されていることとは対照的である。確率的なゆらぎの利用も近年試みられているが、ここでも本質的にはランダムイズドアルゴリズム・確率勾配法など非線形最適化手法、もしくは焼きなまし法などのメタヒューリスティクスの援用にとどまっているのが現状である。すなわち、生体系にみられるような(ときに非線形な)動特性と確率ゆらぎが巧みに相互作用するようなメカニズムの解明にはほど遠い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、広いクラスの確率システムの統計的性質の解析をおこなった「若手研究A(H21-H24)」の基礎研究を発展させ、システム制御に関する以下の課題の推進を通じて、前項で述べたような「確率揺らぎと相互作用し機能する」メカニズムの解明に貢献することである。

- (1) 確率ゆらぎとの相互作用により同定・制御精度および異常検出能力を高める制御系の解析・設計理論基盤の確立：不変確率測度アプローチ
- (2) 制御・同定・異常検出手法の実応用：創薬支援とネットワーク化制御

3. 研究の方法

本研究では、確率不変測度を用いて

- ・ ゆらぎによる白色化と状態依存性の相互作用の解析・設計による同定精度・制御性能の改善
- ・ 状態推定のモデルミスマッチ感度の解析による高精度な異常検出

のための理論基盤を構築し、応用研究としては

- ・ イミプラミン代謝メカニズムの数値モデリング
- ・ ネットワーク化制御系の制御・同定精度およびセキュリティ改善手法の開発

を実施した。

4. 研究成果

まず、フィードバック系における雑音の影響を評価する理論基盤を整備した。具体的には、システムに意図的に雑音を印加することで、量子化誤差軽減やシステム同定精度向上させる手法を提案するとともに、通信ネットワークを介した制御系における侵入検知問題へも応用可能であることも示した。また、不変確率測度の近似計算により、これらの効果を定量的に評価する手法も与えた。さらに、この結果を拡張し、非ガウス性外乱下の制御システムのモデリング・解析のための理論基盤を確立し、風力発電の出力変動が電力系統へ及ぼす影響の評価手法としても有効であることを示した。

情報通信に携わる連携研究者グループにおいては、継続的に自己組織化型のポテンシャルベースのルーティング制御などの性能向上を目指した研究を実施した。ネットワークトラフィックの確率的モデリングや予測・推定、Effective leadership modelを用いたポテンシャルルーティングに関する研究をすすめてつつ、グラフ信号処理の考え方にもとづいた、新しい時空間プロファイルのモデリング手法も提案した。

薬学応用に関しては、継続してシトクロムP450およびその還元酵素であるCRPを大腸菌を用いて大量発現させ、イミプラミンの代謝に関する種々の条件検討を行った。実験データを説明するパラメータの同定に部分的には成功したものの、得られた結果は可解釈性に乏しく、さらに検討が必要である。

また、当初計画していなかった研究成果として、雑音環境下における可制御性とデータ駆動型モデル低次元化手法の新しい理論的関連を明らかにした。この結果は、制御工学における最も古い概念の1つである可制御性グラミアンを矛盾のないかたちで非線形システムへと拡張できることを示すものである。さらに、この結果を足掛かりとして、深層学習などの学習理論的手法を制御工学における問題に活用する研究を展開した。例えば、雑音除去自己符号化器と呼ばれる非線形の特徴量抽出手法を援用し、計算誤差などに対してロバストなモデル低次元化手法の提案をおこなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 7 件)

Kenji Kashima, Hiroki Aoyama, Yoshito Ohta, "Stable process approach to analysis of systems under heavy-tailed

noise: Modeling and stochastic linearization,” to appear in IEEE Transactions on Automatic Control, 2019 (査読有)
DOI: 10.1109/TAC.2018.2842145

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, “ Self-organizing control mechanism based on collective decision-making for information uncertainty,” ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, vol. 13, Issue 1, Article No. 7, (査読有)
DOI: 10.1145/3183340

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, “ Hierarchical optimal control method for controlling large-scale self-organizing networks,” ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, vol. 12, Issue 4, Article No. 22, 2017 (査読有)
DOI: 10.1145/3124644

Yuta Okumura, Kenji Kashima, Yoshito Ohta, “ Iterative path integral approach to nonlinear stochastic optimal control under compound Poisson noise,” Asian Journal of Control, Vol. 19, Issue 2, pp. 781/786, 2017 (査読有)
DOI: 10.1002/asjc.1402

Kenji Kashima, “ Noise response data reveal novel controllability Gramian for nonlinear network dynamics,” Scientific Reports, 6, 27300, 2016 (査読有)
DOI: 10.1038/srep27300

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, “ Controlling large-scale self-organized networks with lightweight cost for fast adaptation to changing environments,” ACM Transactions on Autonomous and Adaptive Systems, vol. 11, Issue 2, Article No. 9, June 2016 (査読有)
DOI: 10.1145/2856424

加嶋 健司, 井上 大輔, “ ネットワーク化制御系における確率雑音の白色化効果と非再現性の同時活用,” 計測自動制御学会論文誌, Vol. 50, Issue 10, pp. 712/720, 2014 (査読有)
DOI: 10.9746/sicetr.50.712

[学会発表](計 25 件)

Kazuhiro Shimizu, Hayato Nakada, Kenji Kashima, “ Experimental study on sparse modeling of a diesel engine air path system,” 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), pp. 1421/1426, 2017 (査読有)
DOI: 10.1109/CCTA.2017.8062659

Yuji Nagasawa, Kenji Kashima, “ Control-oriented denoising autoencoder: Robustified data-driven model reduction,” 20th IFAC World Congress, 2017 (査読有)
DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.579

Takuya Ikeda, Kenji Kashima, “ Path planning and state estimation based on sparsity-in-time,” 20th IFAC World Congress, 2017 (査読有)
DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2458

Kenji Kashima, “ Nonlinear model reduction by deep autoencoder of noise response data,” 55th IEEE Conf. Decision and Control (CDC), pp. 5750/5755, 2016 (査読有)
DOI: 10.1109/CDC.2016.7799153

Kenji Kashima, “ Optimality of simulation-based nonlinear model reduction: Stochastic controllability perspective,” 2016 American Control Conf. (ACC), pp. 7243/7248, 2016 (査読有)
DOI: 10.1109/ACC.2016.7526816

Kenji Kashima, Hiroki Aoyama, Yoshito Ohta, “ Modeling and linearization of systems under heavy-tailed stochastic noise with application to renewable energy assessment,” 54th IEEE Conf. Decision and Control (CDC), pp. 1852/1857, 2015 (査読有)
DOI: 10.1109/CDC.2015.7402480

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, “ Hierarchical optimal control method for controlling self-organized networks with light-weight cost,” IEEE GLOBECOM 2015, pp. 1/7, 2015 (査読有)
DOI: 10.1109/GLOCOM.2015.7417665

Kenji Kashima, Daisuke Inoue, “ Replay attack detection in control systems with quantized signals,” 2015

European Control Conf. (ECC), pp. 782/787, 2015 (査読有)
DOI: 10.1109/ECC.2015.7330637

Naomi Kuze, Daichi Kominami, Kenji Kashima, Tomoaki Hashimoto, Masayuki Murata, "Enhancing convergence with optimal feedback for controlled self-organizing networks," IEEE 80th Vehicular Technology Conference (IEEE VTC 2014-fall), pp. 1/7, 2014 (査読有)
DOI: 10.1109/VTCFall.2014.6965964

〔その他〕

招待講演

Kenji Kashima, "Guided Self-Organization in Engineering and Science," Keynote Speech by 2016 SICE Takeda Award Winner, Tsukuba, Japan, 2016

加嶋 健司, "モデル低次元化の基礎理論と研究動向," 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, チュートリアル講演, 大阪, 2015

解説記事

加嶋 健司 "ディジタル化制御系の線形解析," システム/制御/情報, Vol. 60, Issue 5, pp. 193/198, 2016

岸田 昌子, 加嶋 健司 "反応移流拡散系の制御と安定性," 計測と制御, Vol. 55, Issue 4, pp. 350/355, 2016
DOI: 10.11499/sicej1.55.350

ホームページ等

JST プレスリリース
<https://www.jst.go.jp/pr/info/info1323/>

日経新聞オンライン版
https://www.nikkei.com/article/DGXLRSP481275_R30C18A5000000/

6. 研究組織

(1) 研究代表者

加嶋 健司 (KASHIMA, Kenji)
京都大学・大学院情報学研究科・准教授
研究者番号: 60401551

(2) 研究分担者

宇野 公之 (UNO, Tadayuki)
大阪大学・大学院薬学研究科・教授
研究者番号: 00183020

山下 沢 (YAMASHITA, Taku)
武庫川女子大学・薬学部・准教授
研究者番号: 70398246

辻野 博文 (Tsujino, Hirofumi)
大阪大学・大学院薬学研究科・助教
研究者番号: 10707144

(3) 連携研究者

太田 快人 (OHTA, Yoshito)
京都大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 30160518

大木 健太郎 (OHKI, Kentaro)
京都大学・大学院情報学研究科・助教
研究者番号: 40639233

村田 正幸 (MASAYUKI, Masayuki)
大阪大学・大学院情報学研究科・教授
研究者番号: 80200301

小南 大智 (KOMINAMI, DAICHI)
大阪大学・大学院経済学研究科・助教
研究者番号: 00709678

(4) 研究協力者

なし