

エントロピー正則化を活用した最適制御設計

伊藤海斗*

*東京工業大学情報理工学院 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259
*School of Computing, Tokyo Institute of Technology, 4259 Nagatsuta-cho,
Midori-ku, Yokohama, Kanagawa, Japan
*E-mail: ka.ito@c.titech.ac.jp

キーワード：最適制御 (optimal control), 確率システム (stochastic system), 非線形システム (nonlinear system), 最大エントロピー法 (maximum entropy method).
JL 0010/23/6210-0637 ©2023 SICE

1. 研究略歴

筆者は、確率的な振る舞いをするシステムの解析・制御の研究に取り組んできた。システムを乱すやっかい者としての確率性を考慮した解析・制御^{1),2)}だけでなく、むしろ確率性を活用することで制御系設計における何かしらの恩恵を享受するための研究も行ってきた^{3),4)}。恩恵の一例として、信号に確率雑音を印加することで、信号に含まれるプライバシー情報が秘匿され、プライバシー保護を考慮した制御系設計が可能になる。受賞論文では、確率性を活用する立場の研究を行っており、最適制御器の効率的設計に取り組んでいる。

2. 受賞論文の紹介

最適制御問題は、強化学習やニューラルネットワークの学習など、さまざまな場面で現われ、その重要性はますます増している。離散時間非線形システムに対して最適フィードバック制御方策を求める問題は、ベルマン方程式を解いて価値関数を求める問題に帰着する。しかし、状態空間の次元が高いとベルマン方程式を数値的に解くことは非常に難しく、この困難性をいかに回避するかが中心的課題となる。これに対し本研究では、エントロピー正則化が施された最適制御問題を考えた。具体的には、状態から制御入力を定める条件付き分布 (制御方策) のエントロピーがコストに含まれる問題である。これにより最適制御方策は、状態値が定まっても最適入力値が確定的に定まらない「確率的」な方策になる。通常最適制御では確定的な方策が最適解になることと対照的である。単に確率性が生じるだけでは制御性能が落ちるなど、欠点が目立つのだが、それを十分に補う以下の利点が本研究で明らかになった。確率雑音のみで駆動されるシステムの状態量標本を用いて、正則化最適制御の価値関数がモンテカルロ近似できるという性質である。これにより、シミュレーションによる標本生成で価値関数が容易に計算可能となった。特筆すべき点として、本結果は一般の非線形システム・コスト関数で成り立ち、幅広い問題に適用可能である。

3. 今後の展望

受賞論文後の研究として、システムの状態が従う確率分布を目標分布へ効率よく制御する最適制御問題に筆者は取り組んでいる⁴⁾。本問題でもエントロピー正則化を施すことで、線形システムに対する最適制御方策が陽に求まるなど、理論解析における正則化の恩恵が明らかになった。受賞論文において、非線形最適制御の数値計算が容易になる正則化の利点が示されていることから、確率分布の非線形最適制御においてもエントロピー正則化を利用した数値計算法の開発を検討している。

(2023 年 8 月 4 日受付)

参考文献

- 1) K. Ito, K. Kashima, M. Kato, and Y. Ohta: Stochastic Model-based Assessment of Power Systems Subject to Extreme Wind Power Fluctuation, *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, 14-1, 67/77 (2021)
- 2) K. Ito, T. Ikeda, and K. Kashima: Sparse Optimal Stochastic Control, *Automatica*, 125, Art. no. 109438 (2021)
- 3) K. Ito, Y. Kawano, and K. Kashima: Privacy Protection with Heavy-tailed Noise for Linear Dynamical Systems, *Automatica*, 131, Art. no. 109732 (2021)
- 4) K. Ito and K. Kashima: Maximum Entropy Optimal Density Control of Discrete-time Linear Systems and Schrödinger Bridges, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Early Access, <https://doi.org/10.1109/TAC.2023.3305319>

受賞種別 [研究奨励賞]

論文タイトル [離散時間エントロピー正則化最適制御と雑音応答の関係について]

発表講演会名 [第 64 回自動制御連合講演会]

[著者紹介]

伊藤海斗君 (正会員)



2017 年京都大学工学部卒業, 2019 年同大学院情報学研究所修士課程修了, 同年川崎重工業 (株) 勤務, 2022 年同研究科博士後期課程修了。同年東京工業大学情報理工学院助教となり, 現在に至る。2021 年日本学術振興会特別研究員 (DC2)。確率システムの解析・制御・最適化およびその応用に関する研究に従事。2022 年度計測自動制御学会論文賞武田賞を受賞。博士 (情報学)。