

2024 年度年次報告書

予測・制御のための数理科学的基盤の創出

2024 年度採択研究代表者

谷口 隆晴

神戸大学 大学院理学研究科
教授

幾何学的古典場の理論と無限次元データ科学の連携による作用素学習

主たる共同研究者:

大森 敏明 (神戸大学 大学院工学研究科 准教授)

松原 崇 (北海道大学 大学院情報科学研究院 教授)

吉村 浩明 (早稲田大学 理工学術院 教授)

研究成果の概要

作用素学習は偏微分方程式に対して、その解作用素を学習する機械学習手法である。本研究では、物理的な性質や精度が保証された信頼できる作用素学習手法の構築を目指している。

谷口グループは、他のグループと連携し、シンプレクティックな作用素学習手法の開発などに取り組んだ。開発した方法は DeepONet をベースに、近似的にシンプレクティックな方法となる。この方法は、通常の DeepONet に比較して、高い性能をもつことも実験的に確かめた。その他、作用素学習を利用したハミルトン偏微分方程式の同定手法も新たに開発した。

松原グループは、他のグループと連携して、ポアソン＝ディラック形式という解析力学の枠組みを用いて、高次元の挙動データを各要素に分割し、要素ごとの特性と要素間の結合パターンとしてモデル化する手法を開発した。また、実際に、機械系・電気回路系・油圧系など様々な現象からなる連成系を高い精度でモデル化できることを示した。

吉村グループは、余接バンドル上のディラック構造とそれに付随するラグランジュ・ディラック系の離散化に取り組んだ。具体的には、有限離散写像の構成で、底空間の取り方によって、前進差分及び後退差分の(±)タイプの離散ディラック構造を導出し、それに対応した離散ラグランジュ・ディラック力学系の定式化を行った。さらに、これらの離散ラグランジュ・ディラック系に付随するポントリヤーギン束上の離散変分構造を明らかにした。

大森グループは、多次元の動的システムを推定する枠組みとして、Stein 変分法に基づく手法を構築した。粒子フィルタを用いた従来手法では、多次元システムにおいて粒子の多様性が失われ、精度が著しく低下していた。提案手法では、Stein 変分法に基づく粒子の更新により、粒子の多様性を維持することで、多次元非線形システムの潜在変数とパラメータの高精度な同時推定が可能となった。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Razmik Arman Khosrovian, Takaharu Yaguchi, Hiroaki Yoshimura, Takashi Matsubara, “Poisson-Dirac Neural Networks for Modeling Coupled Dynamical Systems across Domains,” Proc. of The Thirteenth International Conference on Learning Representations, Singapore (2025).
- 2) Linyu Peng and Hiroaki Yoshimura, Discrete Dirac structures and discrete Lagrange-Dirac dynamical systems in mechanics, arXiv:2411.09530v1 [math-ph] 14 Nov 2024, 50pages.
- 3) Baige Xu, Yusuke Tanaka, Takashi Matsubara, Takaharu Yaguchi, Learning Hamiltonian Density Using DeepONet, arXiv:2502.19994.
- 4) Makara Yeang, Yusuke Tanaka, Takashi Matsubara, Takaharu Yaguchi, Learning Hamiltonian Partial Differential Equations Using DeepONet with a Symplectic Branch Network, Proc. Of International Conference on Scientific Computing and Machine Learning 2025, 2025.
- 5) Koshin Hagimoto, Toshiaki Omori, Data-Driven Stein Variational Method for Precise Estimation of Nonlinear Dynamical System, Nonlinear Theory and Its Applications, to appear (2025).