

2023 年度年次報告書

数学・数理学と情報科学の連携・融合による情報活用基盤の創出と社会課題解決に向けた展開

2019 年度採択研究代表者

河原 吉伸

大阪大学 大学院情報科学研究科
教授

作用素論的データ解析に基づく複雑ダイナミクス計算基盤の創出

主たる共同研究者:

黒澤 元 (理化学研究所 数理創造プログラム 専任研究員)

中尾 裕也 (東京工業大学 工学院 教授)

坂内 健一 (慶應義塾大学 理工学部 教授)

研究成果の概要

本課題では、非線形力学系の作用素論的解析と、統計的機械学習の高度な学習・推論方法との融合により、ドメインで培われてきた数理モデルとデータ駆動による抽出情報をその動力学的特性を介して直接結びつけ解析・予測を行うための方法論を構築する。これにより、ダイナミクスに関連する科学的知識に対して順方向／逆方向的解析の両観点から同時にアプローチすることを実現し、データからの現象の理解に基づく新たな科学的知見の抽出や、複雑現象のより精緻な予測を可能とする新たな枠組み創出を目的としたものである。

2023年度においては、まず機械学習・数理統計グループを中心として、クープマン作用素の推定において重要となる(クープマン作用素が定義される空間を定義する)観測量の推定をニューラルネットを用いて end-to-end に行う方法を構築し、特に限られた観測から将来予測をする状況において有効であることを確かめた。¹⁾ また数学グループを中心として、推定において重要となる性質である作用素の有界性について、これまでも様々な空間における数学的な条件について研究を進めてきたが、特に、応用上も重要となる Bezov 空間における厳密な数学的条件が得られた。²⁾ 一方で、作用素論的解析の物理分野への主要な応用である位相・振幅縮約理論において扱える力学系の拡大に関連して、複数の要素からなるネットワーク結合力学系の集団振動に対して Koopman 作用素論に基づいて理論構築を行なった。³⁾ また作用素論的方法の機械学習への原理的応用に関連して、これまで開発してきた再生核ヒルベルト C^* 加群 (RKHM) の理論に基づく深層学習のモデルを提案すると同時に、 C^* 代数と Perron-Frobenius 作用素を通して解析して特に汎化誤差を作用素ノルムによって評価した。⁴⁾ さらに、開発した枠組みを複数の科学領域におけるデータ解析において適用して、それら分野における科学的知見の抽出に資する研究についても引き続き研究を行なった。本年度は例えば、動的モード分解の fMRI データへの適用による、うつ病の疾患を持つ患者と正常者との脳波ダイナミクスの差異について解析を行い、その有意な差に関する知見を得る重要な成果が得られている。⁵⁾

【代表的な原著論文情報】

- 1) T. Iwata and Y. Kawahara, “Neural dynamic mode decomposition for end-to-end modeling of nonlinear dynamics,” *Journal of Computational Dynamics*, Vol.10, No.2, pp.268-280, 2023.
- 2) M. Ikeda, I. Ishikawa, and K. Taniguchi, “Boundedness of composition operators on higher order Besov spaces in one dimension,” *Mathematische Annalen*, Vol. 388, pp.4487–4510, 2024.
- 3) P. Mircheski, J. Zhu, and H. Nakao, “Phase-amplitude reduction and optimal phase locking of collectively oscillating networks,” *Chaos* 33, 103111, DOI: 10.1063/5.0161119, 2023.
- 4) Y. Hashimoto, M. Ikeda, and K. Hachem, “Deep Learning with Kernels through RKHM and the Perron-Frobenius Operator,” *Advances in Neural Information Processing Systems*, 2023.
- 5) H. Endo, S. Ikeda, K. Harada, H. Yamagata, T. Matsubara, K. Matsuo, Y. Kawahara, and O. Yamashita, “Manifold alteration between major depressive disorder and healthy control subjects using dynamic mode decomposition in resting-state fMRI data,” *Frontiers in Psychiatry*, Vol.15, Article Number 1288808, 2024.