

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

2022年度
年次報告書

河原 吉伸

九州大学 マス・フォア・インダストリ研究所
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。

2022年度においては、まず、データ解析で不可欠となる確率的定式化や、それに付随する統計的性質など基礎となる数理的原理の構築を継続して進めた。例えば、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、再生核ヒルベルト空間や Sobolev 空間、Bezov 空間における数学的な条件等を調べた。¹⁾ また、作用素論的解析による動力的な情報抽出を利用した機械学習に関連して、例えば、これまで開発してきた再生核ヒルベルト C*環を教師付き学習に適用する枠組みについて提案した。²⁾ また、力学系の作用素表現を利用することで、深層平衡モデルにおける推論時の計算の欠点である root-finding を回避して同等の性能を与えるモデルを提案した。³⁾ 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縮約理論において扱える力学系の拡大に関連して、量子リミットサイクル振動子に対して Koopman 作用素論に基づいてフルに量子的な漸近位相の定義を提案した。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進めた。例えば、生物の冬眠活動の動力学の解析において、従来異なる冬眠のタイプと考えられてきた複数の冬眠生物において、共通したメカニズムが成り立っていることを解明した。⁵⁾

【代表的な原著論文情報】

- 1) Masahiro Ikeda, Isao Ishikawa, Yoshihiro Sawano, “Boundedness of composition operators on reproducing kernel Hilbert spaces with analytic positive definite functions,” *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 511(1): 126048, 2022.
- 2) Y. Hashimoto, M. Ikeda, and H. Kadri, “Learning in RKHM: a C*-Algebraic Twist for Kernel Machines,” *Proc. of the 26th Int’l Conf. on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS’23)*, PMLR 206:692-708, 2023.
- 3) T. Konishi and Y. Kawahara, “Stable Invariant Models with Koopman Spectra,” *Neural Networks*, 165: 393-405, 2023.
- 4) Yuzuru Kato and Hiroya Nakao, “A definition of the asymptotic phase for quantum nonlinear oscillators from the Koopman operator viewpoint”, *Chaos*, 32(6): 063133.
- 5) S. Gibo, Y. Yamaguchi, and G. Kurosawa, “Frequency modulated timer regulates mammalian hibernation”, *bioRxiv* 2021.11.12.468369 (2021).