

2023 年度年次報告書

数学と情報科学で解き明かす多様な対象の数理構造と活用

2021 年度採択研究代表者

園田 翔

理化学研究所 革新知能統合研究センター
研究員

複雑データに内在する深層構造の理論と応用

研究成果の概要

本研究課題では、写像を深さ方向に分解する方法(深層分解)の理論と方法を開発する。特に、深層学習によって得られる中間情報表現の性質を明らかにし、写像やデータの「深さ」を定式化し、次世代の情報技術へ展開することを目指して研究を遂行している。

(1) 群作用を中間層とする形式的な深層ネットワーク(形式的 DNN)に対するリッジレット変換を導出した。これは世界初の DNN に対するリッジレット変換であり、深層分解理論のマイルストーンとなる結果である。機械学習の国内学会 IBIS2023[15]および表現学習の国際会議 NeurReps2023[1]にて発表した。

(2) 群不変関数から一般のニューラルネットと対応するリッジレット変換を誘導する統一的な方法を開発した。証明は Schur の補題を用いて簡潔だが、結果は適用範囲が広く強力である。(1)の結果はこの理論の系である。前年度開発した Fourier 変換を経由する方法よりも直接的である。機械学習の国内学会 IBIS2023 および表現学習の国際会議 NeurReps2023[2]にて口頭発表した。本発表に関し、IBIS2023 にて優秀プレゼンテーション賞ファイナリスト。

(3) 国際共同研究。ニューラルネットのパラメータ分布が有界領域に制限されている場合(怠惰学習やランダム特徴量など)に、表現力が制限される度合い(近似下限)を定量的に求める公式を導出した。機械学習のトップ会議 ICML2023 にて発表した[3]。

(4) 国際共同研究。リッジレット変換から高速にサンプリングするための量子計算アルゴリズムを開発した。機械学習のトップ会議 ICML2023 および量子計算の国際会議 AQIP2023 にて発表した[4]。韓国成均館大学(SKKU)より集中講義依頼。

(5) 人との対話を通じて数学問題に回答する LLM システムを開発し、マークアップ言語を導入することで正答確率が向上することを実験的に示した。得られた結果を記号 AI の国際会議 SNL2023 と定理証明支援系の国際会議 AITP2023 にて発表した。

(6) LLM による数学定理の自動証明。英語で記述された数学の文章に、Lean で記述されたソースコードを対応付けたデータセットを作成した。

【代表的な原著論文情報】

1. S. Sonoda, Y. Hashimoto, I. Ishikawa, M. Ikeda, "Deep Ridgelet Transform: Voice with Koopman Operator Proves Universality of Formal Deep Networks", to appear in Proceedings of the second NeurIPS Workshop on Symmetry and Geometry in Neural Representations, PMLR xxx:xxx-xxx, (2023).
2. S. Sonoda, H. Ishi, I. Ishikawa, M. Ikeda, "Joint Group Invariant Functions on Data-Parameter Domain Induce Universal Neural Networks", to appear in to appear in Proceedings of the second

NeurIPS Workshop on Symmetry and Geometry in Neural Representations, PMLR xxx:xxx-xxx, (2023).

3. M. Li, S. Sonoda, F. Cao, Y. Wang, J. Liang, "How Powerful are Shallow Neural Networks with Bandlimited Random Weights?", Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning, PMLR 202:19960-19981, (2023).
4. H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Hayakawa, S. Sonoda, "Quantum Ridgelet Transform: Winning Lottery Ticket of Neural Networks with Quantum Computation", Proceedings of the 40th International Conference on Machine Learning, PMLR 202:39008-39034, (2023).