

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

2022 年度  
年次報告書

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) 愛媛大石川氏・理研 AIP 池田氏との共同研究。多様な設定で定義されたフーリエ変換から、対応する隠れ 1 層ニューラルネット、リッジレット変換および再構成公式を陽に構成するための一般的な指導原理を見出し、いくつかの具体例を計算した。機械学習のトップ会議 ICML2022, NeurIPS2022 にて発表した[1,2]。さらに、幾何学的な統計学(情報幾何や GSI など)の研究会を中心として、国内外で招待講演多数。これに関し前年度の発表に対して応用数理学会より表彰あり。

(2) 上述の原理を深層分解へ展開すべく、先行研究調査および関連技術習得にリソースを割いた。その結果、深層ニューラルネットを作用素的に表現する方法を創出した。まだ簡単な系に対して計算されている段階だが、深層分解を開発するうえで重要な手がかりとなりうる。NTT 橋本氏・九工大二反田氏・理研鈴木氏らとの共同研究では、Koopman 作用素ノルムに対応する新しい汎化誤差評価を計算した。得られた結果を機械学習の国内学会 IBIS2022 にて発表した[4]。

(3) 複雑データを用いた研究の一環として、東京大熊谷氏らと共同で大規模言語モデル(以下、LLM)に基づく自動研究プロジェクト(Autores)を立ち上げ、業者に実験を外注してデータを得たほか、研究補助者を雇用して論文の調査・再現実装を実施した。得られた結果を投稿中。

(4) 制御理論や量子機械学習など、本研究課題を念頭に置いた(国際)共同研究を継続している。東京大山崎氏らとの国際共同研究では、ランダム特徴量学習の最適分布やリッジレット変換から特徴量を高速にサンプリングする量子計算アルゴリズムを開発し、量子計算の国際学会 TQC2022 や機械学習の国内学会 IBIS2022 にて発表した[3,5]。

### 【代表的な原著論文情報】

#### 誌上发表:

1. S.Sonoda, I.Ishikawa, M.Ikeda, "Universality of Group Convolutional Neural Networks Based on Ridgelet Analysis on Groups", *Advances in Neural Information Processing Systems*, 35:38680-38694, (2022).
2. S.Sonoda, I.Ishikawa, M.Ikeda, "Fully-Connected Network on Noncompact Symmetric Space and Ridgelet Transform based on Helgason-Fourier Analysis", *Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning*, PMLR 162:20405-20422, (2022).

#### 学会発表(国際):

3. H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda and M. Koashi, "Quantum Machine Learning with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup without Sparsity and Low-

Rankness Assumptions", The 17th Conference on the Theory of Quantum Computation, Communication and Cryptography (TQC2022), The University of Illinois at Urbana-Champaign, July 11-15, 2022.

学会発表(国内):

4. 橋本悠香, 園田翔, 石川勲, 二反田篤史, 鈴木大慈, "Koopman 作用素を用いたニューラルネットワーク解析", 第 25 回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2022), 筑波, 2022 年 11 月.
5. H.Yamasaki, S.Subramanian, S.Hayakawa, S.Sonoda, "Quantum ridgelet transform: Winning lottery ticket of neural networks with quantum computation", 第 25 回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2022), 筑波, 2022 年 11 月.