

数学・数理科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

2020年度採択研究代表者

2021年度 年次報告書
-----------------

福水健次

情報・システム研究機構 統計数理研究所  
教授

数理知能表現による深層構造学習モデルの革新

## § 1. 研究成果の概要

本 CREST チームでは、数理的な知能表現を探求することにより、深層構造を持つ学習モデルの理論的本質を明らかにして新しいモデルを開発し、実践的知能システムを高度化していくための研究を推進している。チームは3つのグループ(数理深層モデリング G、数理表現・最適化 G、実践的学習 G)から構成されており、本年度の各 G の研究成果の概要は以下のとおりである。

数理深層モデリング G では、以下の三つの主たる成果を得た。(1) 学習データに潜在するバイアスを除外するため環境変動に影響されない推論を行う新しい枠組みを提示し、その理論的正当性と実験的な効果を示した。(2) 変分オートエンコーダの識別可能性に基づいて、介入と対照に重なりが弱い場合の因果効果推定に対する有効な方法を提案した<sup>1)</sup>。(3) ファインチューニングを行う転移学習のスケール則に関して考察し、実験と整合する理論式を導いた。

数理表現・最適化 G では、以下の三つの主たる結果を得た。(1) 高次元・無限次元入力を受け取る深層ニューラルネットワークの表現能力と予測誤差を解析し、深層学習が次元の呪いを回避することを理論的に示した<sup>2)</sup>。(2) 平均場設定におけるニューラルネットワークの理論保証付き最適化手法として粒子確率的双対座標降下法を提案した<sup>3)</sup>。(3) 過剰パラメータ化したネットワークをスパース正則化を用いて学習することで真の教師ネットワークが復元できることを示した<sup>4)</sup>。

実践的学習 G では、以下の三つの主たる成果を得た。(1) 画像劣化パラメータを知らなくても、ぼかし・ノイズ・圧縮に頑健な画像生成を行う敵対的生成ネットワークを提案した<sup>5)</sup>。(2) スパイキングニューラルネットワーク上で通常のニューラルネットワークと同等以上の品質で画像生成を可能な変分オートエンコーダを実現した<sup>6)</sup>。(3) ポアンカレ球モデルにおいて、双曲的ニューラルネットワークの新しい一般化および構築方式を示した<sup>7)</sup>。

## § 2. 研究実施体制

### (1) 数理深層モデリンググループ

- ① 研究代表者: 福水 健次 (情報・システム研究機構 統計数理研究所 教授)
- ② 研究項目
  - ・ 代数的作用や因果律などの数理構造を反映した深層モデリングの研究
  - ・ 微分方程式、確率微分方程式と深層構造モデルの融合的モデルの研究
  - ・ 深層生成モデルとカーネルベイズ法による確率推論法の研究

### (2) 数理表現・最適化グループ

- ① 主たる共同研究者: 鈴木 大慈 (東京大学大学院 情報理工学研究科 准教授)
- ② 研究項目
  - ・ 深層学習の関数表現理論
  - ・ 深層学習の冗長性と正則化理論
  - ・ 深層学習の最適化理論と実践

### (3) 実践的学習グループ

- ① 主たる共同研究者: 原田 達也 (東京大学大学院 情報理工学研究科 教授)
- ② 研究項目
  - ・ 動画像等の膨大なマルチメディアデータの認識と生成
  - ・ 画像・動画像・音声と自然言語との融合による透明性のある認識
  - ・ 効率的な時空間データ解析に基づく医療情報処理への応用

### 【代表的な原著論文情報】

- 1) P. Wu, K. Fukumizu.  $\beta$ -Intact-VAE: Identifying and Estimating Causal Effects under Limited Overlap. Intern. Conf. Representation Learning (ICLR 2022)
- 2) T. Suzuki, A. Nitanda: Deep learning is adaptive to intrinsic dimensionality of model smoothness in anisotropic Besov space. NeurIPS2021, spotlight.
- 3) K. Oko, T. Suzuki, A. Nitanda, D. Wu: Particle Stochastic Dual Coordinate Ascent: Exponential convergent algorithm for mean field neural network optimization. 10th Intern. Conf. Learning Representations (ICLR2022).
- 4) S. Akiyama, T. Suzuki: On Learnability via Gradient Method for Two-Layer ReLU Neural Networks in Teacher-Student Setting. ICML2021, PMLR 139:152--162, 2021.
- 5) T. Kaneko, T. Harada. Blur, Noise, and Compression Robust Generative Adversarial Networks. IEEE/CVF Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp.13579-13589, 2021.
- 6) H. Kamata, Y. Mukuta, T. Harada. Fully Spiking Variational Autoencoder. 36th AAAI Conf. on Artificial Intelligence (AAAI), online, 2022.

- 7) R. Shimizu, Y. Mukuta, T. Harada. Hyperbolic Neural Networks++. Intern. Conf. Learning Representations (ICLR), 25 pages, online, May 4-8, 2021.