

平成30年6月4日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K00330

研究課題名(和文) 深層学習の実践的モデル設計理論の確立

研究課題名(英文) a practical designing theory for deep learning models

研究代表者

安田 宗樹 (Yasuda, Muneki)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20532774

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：確率的情報処理と情報統計力学理論を用いて深層学習モデルに対する数学的・情報理論的背景の定式化と、具体的な高効率計算アルゴリズムの開発を目指す。当該研究期間内で得た主な成果は以下のようなものである。(1) 深層ボルツマンマシンにおける事前学習の数理的背景を明らかにした。(2) 制限ボルツマンマシンに対する新しい一般的な数学定理を得た。この定理は、確率推論において平均場近似を利用する場合、モデル全体に統計操作をするよりも一部の変数(層)を周辺化操作で消去してから操作した方がより良い結果を得られるということを保証する。(3) 深層システムに対する高速なノイズ耐性検査アルゴリズムを開発した。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to find a mathematical and information theoretical background of deep learning systems and to obtain effective algorithms for them in terms of the techniques in the probabilistic information processing and in the information statistical mechanics. We obtained the following results during this research period. (1) clarifying a mathematical background of the pre-training in deep Boltzmann machines, (2) a novel general theorem for restricted Boltzmann machines (RBMs) that states that, when mean-field methods are employed, inference results obtained from marginalized models are more accurate than those obtained from original models, and (3) a very fast test method for noise robustness of deep neural networks.

研究分野：統計的機械学習

キーワード：深層学習 統計的機械学習 確率的情報処理 情報統計力学 理論解析 アルゴリズム開発

## 1. 研究開始当初の背景

深層学習(ディープラーニング)は多層の階層構造を持った機械学習のモデル(図1)に対する機械学習の技法であり、現実の種々のデータを用いて課題解決のための適切なモデリングを行うためのデータ駆動型の理論である。

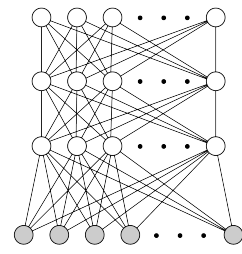


図1 多層ネットワーク構造をもった深層学習モデル

ある。深層学習の登場からおおよそ10年ほど経った現在、深層学習を基礎とした情報処理システムは従来のシステムを圧倒的に凌駕する性能を示してきており、現在のそして確実に近未来の情報処理システムの土台を担う根幹技術の一つとして急速に認識され始めている。多くのパターン認識等のシステムにおいて従来法を圧倒する性能を示す深層学習は、企業や研究所・大学などの多くの研究者の研究対象になっており、アプリケーションレベルでは日々進化を遂げている。

しかしながら、華々しい発展を見せる一方で、実はそこには大きな問題点が存在する。深層学習モデルに対する事前学習と呼ばれる学習法は非常に発見的な方法であるため、性能に対する数理的な根拠がまったくないのである。つまり、“何故良いのかは分からないが、使ってみると確かに性能が良い”という、ある種のブラックボックス的要素を強く持つのである。また、“多層といっても一体何層にするべきか？”や“各層のノード数はいくつにするべきか？”等の設計時の疑問に対する指針的な数理理論も存在しないため、設計者は試行錯誤で設計する必要がある。よって、深層学習のモデル数理やアルゴリズム数理を明らかにすることは、単に学術的に重要であるだけでなく、設計の指針的数理という意味で実装の場面への貢献が可能なのである。

## 2. 研究の目的

深層学習の数理に注目しそこにメスを入れる理論的研究成果は、この時代もっとも必要とされているものの一つであることは間違いない。しかしながら、対象のビッグデータや深層学習そのものの構造的複雑さから目ぼしい成果は未だないというのが現状である。研究代表者は、今に至るまで深層学習に対する研究と並行して、マルコフ確率場(ボルツマンマシン)と呼ばれる確率モデルに対する確率的予測と統計的機械学習の理論的・応用的研究を精力的に進めてきた。マルコフ確率場は本計画研究で注目する確率的深層学習モデルをも包含する、より一般的な枠組みをもつ確率モデルである。そこでは従来の確率・統計理論や情報理論のみでなく、

情報統計力学理論と呼ばれる統計物理学由来の情報処理理論を基礎に発展してきた確率的情報処理分野の手法が主要なアプローチとなっている。情報統計力学はそもそも、複雑な構造をもつ確率モデルに対する解析を前提にした情報処理理論であるので、複雑な確率的課題によく適合するのである。このような理由から確率的情報処理分野の解析技術を深層学習の数理解析へと転用することが深層学習の数理解析への強力な突破口になると強く期待される。

## 3. 研究の方法

当研究課題は以下の3つの課題からなる。

【課題1】深層学習モデルの数理的構造の定性的知見

【課題2】深層学習モデルに対する機械学習(事前学習)の数理解とその発展

【課題3】深層学習モデルのより効率的な実装法の開発

深層学習モデルの良さはその階層構造にこそ起因していると考えられているが、そこにあるのは直観的な解釈とそれを後押しするいくつかの実験結果のみであり、数理的裏付けがなされていない。【課題1】はモデルの構造の特徴を確率的情報処理分野の手法を利用して解析的に評価し、階層構造の定性的数理を明らかとする研究である。また、深層学習モデルに対する学習法(事前学習)は非常に貪欲的で、かつ発見的でありその数理的詳細はよく分かっていない。【課題2】は事前学習が実際にはどのような学習となっているのかを数理的に明らかとし、それを考察研究である。【課題1】と【課題2】から得られる数理的知見を背景に、深層学習モデルのより良いアルゴリズム理論を【課題3】で開発する。

## 4. 研究成果

本研究課題によって得られた主な成果を以下に述べる。

(1) 深層ボルツマンマシンの事前学習の変分原理からの再解釈

深層ボルツマンマシンに対する事前学習を変分原理の観点からの再解釈を与え、その内部に潜む数理構造を統計力学的に解釈可能とし、更に、そのアルゴリズムは尤度関数の下限を確かに最適化するものになっていることを示した。これは、深層ボルツマンマシンに対する世界初の知見であり、上記【課題1】と【課題2】に対する直接的な成果のひとつとなっている。

(2) 制限ボルツマンマシンに対する高精度

## 計算アルゴリズム理論の開発

制限ボルツマンマシンは2部グラフ構造のマルコフ確率場であり、深層モデルの基本

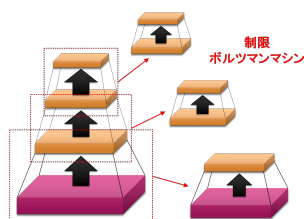


図2: 深層ボルツマンマシンと制限ボルツマンマシン

コンポーネントとなっている(図2)。制限ボルツマンマシンに対する統計理論の発展は深層モデルの基礎理論向上につながる。当成果は、制限ボルツマンマシンに対して新しい数学的知見を得た。統計推論の際、制限ボルツマンマシン全体を扱うよりも、一端周辺化操作により層を減らしてから統計的推論を行った方が(平均場近似という計算手法を用いる場合には)より高品質の計算結果を得ることができるということを情報理論の

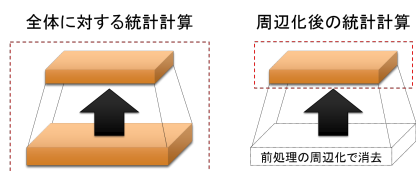


図3: 周辺化後のモデル上での推論計算(右図)の方が高性能観点から証明した(図3)。つまり、制限ボルツマンマシンに対する推論アルゴリズムの設計指針である。この成果は、制限ボルツマンマシンに対する非常に強力な、一般的な理論成果であり、上記【課題1】と【課題3】に対する直接的な成果のひとつとなっている。

### (3) 深層モデルに対する高速なノイズ耐性検査アルゴリズムの開発

入力にノイズが混じると、それに応じてシステム出力はノイズの影響により変化する。頑健なシステムであるためには、ノイズに対して頑健である(多少のノイズでは出力が変化しない)必要がある。通常の場合、システムのノイズ耐性検査は、実際に入力に人工的なノイズを加えて出力の変化を見るのだが、この方針では、ノイズの多様性に応じて膨大な回数の入出力処理をする必要がある。提案法では、だた一回の入出力処理だけで深層システムのノイズ耐性を定性的に測ることを可能としている。この成果は、上記【課題3】に対する直接的な成果のひとつとなっている。

### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計15件)

(1) Muneki Yasuda, Hironori Sakata, Seung-II Cho, Tomochika Harada, Atushi Tanaka, and Michio Yokoyama: A fast test method for noise robustness of deep neural networks, Proceedings of the 2017 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2017), pp.46-49, 2017. (査読有り) DOI: なし

(2) Muneki Yasuda and Shun Kataoka: Solving Non-parametric Inverse Problem in Continuous Markov Random Field using Loopy Belief Propagation, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.86, No.8, Article ID:084806, 2017. (査読有) DOI: 10.7566/JPSJ.86.084806

(3) Shun Kataoka, Takuto Kobayashi, Muneki Yasuda and Kazuyuki Tanaka: Community Detection Algorithm Combining Stochastic Block Model and Attribute Data Clustering, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.85, No.11, Article ID:114802, 2016. (査読有) DOI: 10.7566/JPSJ.85.114802

(4) Muneki Yasuda: Relationship between PreTraining and Maximum Likelihood Estimation in Deep Boltzmann Machines, Proceedings of the 19th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS2016), pp.582-590, 2016. (査読有) DOI: なし

(5) Chako Takahashi and Muneki Yasuda: Mean-Field Inference in Gaussian Restricted Boltzmann Machine, Journal of the Physical Society of Japan, Vol.85, No.3, pp.034001, 2016. (査読有) DOI: 10.7566/JPSJ.85.034001

[学会発表](計44件)

(内: 招待講演23件、国際学会10件)

(1) 鈴木美香, 安田宗樹: 誤ラベルを含むデータ集合を用いた統計的機械学習, 情報処理学会第80回全国大会(2018年3月13日, 早稲田大学) 【学生奨励賞受賞】

(2) 高橋茶子, 安田宗樹: 深層ボルツマンマシンに対する高性能な平均場近似アルゴリズム, 情報処理学会第79回全国大会(2017年3月17日, 名古屋大学) 【学生奨励賞受賞】

(3) Muneki Yasuda: Relationship between pre-training and

maximum likelihood estimation in deep Boltzmann machines, Workshop on Statistical Physics of Disordered Systems and Its Applications (SPDSA2017), (Feb. 8-9, 2017, Sendai, Japan)

【国際：招待講演】

( 4 ) Muneki Yasuda:

Approximate techniques for Boltzmann machines, The fifth International Conference on Continuous Optimization (ICCOPT2016) (August 8, 2016, National Graduate Institute for Policy Studies, Japan)

【国際：招待講演】

( 5 ) Muneki Yasuda:

Effective Learning Algorithms for Boltzmann Machines, Probabilistic Graphical Model Workshop: Sparsity, Structure and High-dimensionality (March 24, 2016, Tokyo, Japan)

【国際：招待講演】

〔図書〕(計1件)

安田宗樹 他5名, 近代科学社, 深層学習, 2015, 総ページ数 267

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.adv-pip.yz.yamagata-u.ac.jp/~muneki/index.html>

研究業績等はすべて上記のホームページで公開している。

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

安田 宗樹 (Muneki Yasuda)

山形大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：20532774

(3)連携研究者

片岡 駿 (Shun Kataoka)

小樽商科大学・商学部・准教授

研究者番号：50737278