

令和 4 年 5 月 24 日現在

機関番号：14603

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2018～2021

課題番号：18K19821

研究課題名(和文) 深層学習の理論解析による次世代脳型人工知能技術の開発

研究課題名(英文) Development of New Generation Artificial Intelligence Based on Theoretical Analyses of Deep Learning

研究代表者

池田 和司 (Ikeda, Kazushi)

奈良先端科学技術大学院大学・先端科学技術研究科・教授

研究者番号：10262552

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、深層学習の要素技術を理論解析することで、計算機資源とビッグデータに頼る従来の試行錯誤研究から脱却し、次世代脳型人工知能の開発を目指したものである。ブラックボックスと言われる深層学習であるが、その性能の一部は理論的に解析可能である。近年の深層学習の主流であるResNetを解析したところ、ResNetの特徴であるショートカットが汎化ギャップの上限を小さくすること、また1層ではなく2層をショートカットすることで上限はさらに小さくなることが示された。またその他の技術についても理論的な評価が与えられ、これらの結果は深層学習の設計指針に有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習がこれほど注目されているにもかかわらず、その理論的背景は明らかではなかった。その原因の一つは、深層学習は構造的には1980年代のネオコグニトロンと同等であり、その学習方法にプレトレーニングやドロップアウト、あるいは確率降下法などのヒューリスティックな工夫を組み合わせたもので、どの要素がどのような効果を持つのかがわかりにくかったためである。日本神経回路学会などでもBeyond Deep Learningが議論されるなど、次世代脳型人工知能の開発にはまず深層学習の仕組みを明らかにする必要があり、本研究によりいくつかの要素技術の本質的な役割が解明された。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this project is to analyze the effects of heuristic techniques for deep learning from the theoretical viewpoint since the theoretical results give insight to design a better/more efficient neural network/learning algorithm. Our analysis on a ResNet shows that shortcuts in a ResNet decrease an upper bound of the generalization cap and that a ResNet with two-layer skips has a lower upper-bound than one with one-layer skips. Some other heuristics are analyzed and they are also useful for the design of deep learning.

研究分野：機械学習

キーワード：深層学習 ResNet 汎化ギャップ

1. 研究開始当初の背景

ビッグデータ時代の情報処理には人工知能 (AI) が重要であることが広く知られるようになったことで、Google、Facebook、Baidu などのいわゆるビッグテックが専門の研究所を、日本政府もまた理研 AIP を作り、人工知能の研究を進めるようになった。AI の中心的な技術は神経回路網を多層化した深層学習であり、当初から現在に至るまで、ほぼあらゆる AI タスクにおいてトップの成績をおさめてきた。実際、深層学習に基づく AI は自動運転車やロボット制御、AI スピーカーなどに実装され、すでに実生活に溶け込んでいる。しかしその実装には多くの試行錯誤が必要であり、理論研究はほとんど見られなかった。

研究代表者は数理工学をバックグラウンドとしており、これまで機械学習や適応フィルタアルゴリズムの理論解析研究を推進してきた。研究開始当初は機械学習の応用研究に従事するようになったが、その間に機械学習研究は大きく様変わりし、機械学習=人工知能=深層学習になってしまっていた。それでも理論研究が少ない原因の一つは、深層学習は構造的には 1980 年代のネオコグニトロンと同等であり、その学習方法にプレトレーニングやドロップアウト、あるいは確率降下法などのヒューリスティックな工夫を組み合わせたものであり、どの要素がどのような効果を持つのかがわかりにくいためである。日本神経回路学会などがめざす Beyond Deep Learning と呼ばれる次世代脳型人工知能の開発には、深層学習の本質的な仕組みを解明する必要がある。

2. 研究の目的

本研究は、現在は試行錯誤が中心の人工知能 (AI) 研究の転換をめざすものである。当時から現在まで、AI 研究の中心は深層学習であるが、その開発はビッグデータと試行錯誤に依存している。これに対抗して AI 研究をリードするには、データや計算機の規模に頼ることなく、理論研究を進めるしかない。1980 年代の第 2 次ニューロブームを見ても、理論を持たなかったニューラルネットワークは統計的学習理論に裏付けられたサポートベクトルマシンの後塵を拝することになった。すなわち Beyond Deep Learning を実現するには深層学習の仕組みを理論的に明らかにすることでそれを凌駕する新たなアルゴリズムを開発するしかない。そこで本研究では、深層学習の要素技術を理論解析し、次世代脳型人工知能の開発を目指すことを目的としていた。

3. 研究の方法

深層学習におけるコア技術は、確率降下法、プレトレーニング、ドロップアウト、ショートカット、の 4 つである。本研究ではそれぞれについて、機械学習の理論解析手法すなわち統計的漸近論、情報理論、統計的漸近論、情報幾何学を用いてその性質を明らかにする予定であった。しかし研究開始後、深層学習の理論解析に汎化ギャップを評価する方法および固有値を計算する方法が有効であることが示されたため、本研究でも方針を転換し、これらの手法によりショートカットおよびドロップアウトの影響を解析することとした。

4. 研究成果

汎化ギャップを評価する方法、フィッシャー情報行列の固有値を評価する方法などにより、深層学習の性能を理論的に解析可能であることがわかったことから、近年特に注目されている ResNet を中心的に研究し、ResNet の特徴であるショートカット(スキップコネクション)の有無が汎化能力に与える影響を評価した。その結果、ショートカットは汎化ギャップの上限を小さくすること、また 1 層ではなく 2 層をショートカットすることで上限はさらに小さくなることが示された (図 1)。さらに、ドロップアウトとその亜種であるストキャスティックデプスについて、フィッシャー情報行列の固有値を評価した。その結果、これらの技術により収束が速くなることが理論的に示された。また、バッチ正規化が収束を加速することも理論的に示された。

上記以外にも、さらに 2 つの学習理論研究を行った。一つ目は観測されるデータに偏りがある、truncated data と呼ばれる状況における高次元データのスパース推定問題である。通常の LASSO による正則化ではバイアスが残ることから、それを解決する方法として非凸正則化項を利用し、それを効率的に計算する方法を提案した。さらにその収束性に関する理論的な解析を行った。その結果、提案手法は LASSO よりもよい性質を持つことが示され、この事実は計算機実験でも実証された。この成果は論文投稿準備中である。

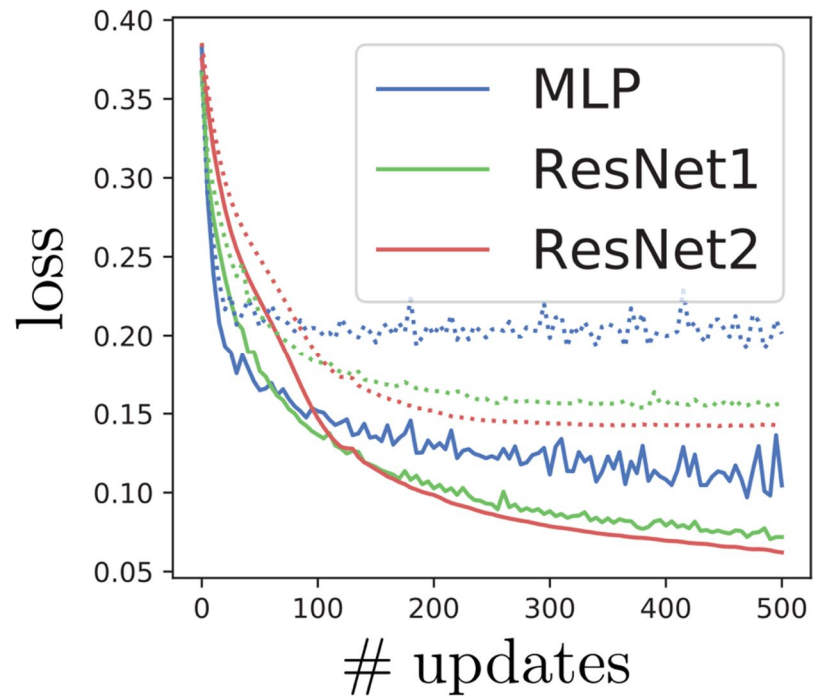


図 1 ResNet の学習曲線

二つ目は ニューラルネットワークの学習曲線であり、真の関数が Barron 空間と呼ばれる関数クラスの場合の収束性を理論的に評価した。その結果、パラメータ最適化により、従来よりタイトな誤差上限が実現できることが示された。この成果は論文投稿中である。

[1] Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda: Theoretical analysis of skip connections and batch normalization from generalization and optimization perspectives, APSIPA Transactions on Signal and Information Processing, vol.9, e9 (2020)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件／うち国際共著 1件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Renzo Roel P. Tan, Jun Kawahara, Kazushi Ikeda, Agnes D. Garciano, Kyle Stephan S. See	4. 巻 47
2. 論文標題 Concerning a Decision-Diagram-Based Solution to the Generalized Directed Rural Postman Problem	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IAENG International Journal of Computer Science	6. 最初と最後の頁 302-309
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 村山 未来, 永澤 美保, 片山 真希, 池田 和司, 久保 孝富, 山川 俊貴, 藤原 幸一, 菊水 健史	4. 巻 70
2. 論文標題 心拍変動を用いた運動中のイヌの情動評価の試み	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 動物心理学研究	6. 最初と最後の頁 15-18
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2502/janip.70.1.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 上田江里子, 久保孝富, 村重哲史, 永澤美保, 池田和司, 瀧本-猪瀬彩加	4. 巻 70
2. 論文標題 ウマ (Equus Caballus) とヒトにおける歩行同期の実証的研究	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 動物心理学研究	6. 最初と最後の頁 27-39
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2502/janip.70.2.1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda	4. 巻 9
2. 論文標題 Theoretical analysis of skip connections and batch normalization from generalization and optimization perspectives	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 APSIPA Transactions on Signal and Information Processing	6. 最初と最後の頁 e9
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1017/ATSIP.2020.7	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Paul Rossener Regonia, Ryosuke Tani, Atsushi Ishizumi, Hisao Yanagi, Kazushi Ikeda	4. 巻 207
2. 論文標題 Predicting the band gap of ZnO quantum dots via supervised machine learning models	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optik: International Journal for Light and Electron Optics	6. 最初と最後の頁 164469
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.ijleo.2020.164469	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Bryan Lao, Tomoya Tamei, Kazushi Ikeda	4. 巻 2
2. 論文標題 Data-efficient framework for personalized physiotherapy feedback	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Frontiers in Computer Science	6. 最初と最後の頁 3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fcomp.2020.00003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

[学会発表] 計15件 (うち招待講演 5件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Panyawut Sri-iesaranusorn, Saeka Shimochi, Naoaki Ono, Enrah Yatkin, Hidehiro Iida, Kazushi Ikeda, Junichiro Yoshimoto
2. 発表標題 Quantification Analysis of Behavioral Changes after Sciatic Nerve Ligation in Rats
3. 学会等名 APSIPA-ASC (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古庄康隆, 池田和司
2. 発表標題 Stochastic depthが勾配降下法の学習速度に与える影響の理論解析
3. 学会等名 情報理論的学習理論ワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄康隆, 池田和司
2. 発表標題 ResNetとbatch normalizationによるデータ分離能力の向上
3. 学会等名 情報論的学習理論と機械学習研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄康隆, 池田和司
2. 発表標題 古典的なニューラルネットワークの問題点と加算型及び結合型ショートカットによる改善
3. 学会等名 情報論的学習理論と機械学習研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄康隆, 池田和司
2. 発表標題 Fixup initializationの理論解析: 学習の高速化とResNetの汎化能力向上
3. 学会等名 情報論的学習理論と機械学習研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Overview: Theoretical properties of deep learning methods
3. 学会等名 APSIPA-ASC (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 ResNet and batch normalization improve data separability
3. 学会等名 Asian Conference on Machine Learning (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Generation and visualization of tennis swing motion by conditional variational RNN with hidden Markov model
3. 学会等名 Asian Conference on Machine Learning: Trajectory, Activity, and Behaviour workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Theoretical analysis of the fixup initialization for fast convergence and high generalization ability
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning: Understanding and Improving Generalization in Deep Learning workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Additive or concatenating skip-connections improve data separability
3. 学会等名 International Conference on Machine Learning: Understanding and Improving Generalization in Deep Learning workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄泰隆, 池田和司
2. 発表標題 ニューラルネットワークの隠れ層のユニット数とReLU関数が汎化能力に与える影響の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会IBISML研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄泰隆, 池田和司
2. 発表標題 Batch-normalizationがResNetのFisher情報行列に与える影響の理論解析
3. 学会等名 電子情報通信学会IBISML研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Effects of Skip-Connection in ResNet and Batch-Normalization on Fisher Information Matrix
3. 学会等名 脳と心のメカニズム冬のワークショップ
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 古庄泰隆, 池田和司
2. 発表標題 ニューラルネットワークの埋め込み安定性と汎化能力の関係
3. 学会等名 第14回コンピューテーショナル・インテリジェンス研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasutaka Furusho, Kazushi Ikeda
2. 発表標題 Non-asymptotic analysis of Fisher information matrices of Multi-layer perceptron, ResNet, and Batch-normalization
3. 学会等名 6th INCF Japan Node International Workshop: Advances in Neuroinformatics (国際学会)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------