

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18114

研究課題名（和文）深層学習の原理究明に向けた関数推定理論の開発

研究課題名（英文）Development of Function Estimation Theory to Investigate the Principles of Deep Learning

研究代表者

今泉 允聡 (Imaizumi, Masaaki)

東京大学・大学院総合文化研究科・准教授

研究者番号：90814088

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：当該研究計画の概要は、深層学習の原理を説明することができる理論の構築である。深層学習は実用上で高い性能を発揮しているが、その原理は未解明の点が多く、この性能を説明できる理論は未だ発展途上である。当該研究課題では、以下のような成果を得た：(i) データを生成する真の関数が特異性などの特殊な性質を持つ場合、深層学習の優位性が示されることを証明した。(ii) 深層学習の複雑な非凸損失関数が過学習を回避できることを示す理論を開発した。(iii) 深層学習モデルでも過剰パラメータ下での二重降下現象が起こることを示した。(iv) 理論的な知見を用いて非凸最適化問題を解くアルゴリズムを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習は、その高い性能から強い注目を集め、社会の各所で応用されている重要な技術である。今回のAIブームにおいて、深層学習によって実現する技術は数多い。しかしながら、深層学習の原理は未だ十分に解明されていないのが現状である。その結果として、深層学習の欠点である膨大な計算コストや、ブラックボックスな挙動などの問題点は、未解決のまま残っている。これらの問題を根本から解決するには、基礎研究を通じて深層学習の原理を理解し、抜本的な解決手法を開発することが望まれる。本研究はその試みの一端として、深層学習という新しい技術を数学的に記述することを試み、そして深層学習の

研究成果の概要（英文）：The outline of this research plan is to construct a theory that can explain the principles of deep learning. Although deep learning has demonstrated high performance in practical applications, its principles are still largely unexplained, and a theory that can explain this performance is still under development. In this research project, we have achieved the following results: (i) We proved that deep learning is superior when the true function generating the data has special properties such as singularity. (ii) Developed a theory showing that complex non-convex loss functions in deep learning can avoid overlearning. (iii) We showed that double-descent phenomenon under over-parameterization also occurs in deep learning models. (iv) Developed an algorithm to solve nonconvex optimization problems using the theoretical findings.

研究分野：統計学、機械学習

キーワード：深層学習 関数推定 ノンパラメトリック統計 汎化誤差

1. 研究開始当初の背景

深層学習は高い性能を発揮するデータ解析技術として注目を集めているが、その実用においては計算コストの膨大化や解釈不可能性などの根本的な問題点を抱えている。これの解消を阻む要因の一つとして、その理論的な原理の多くが未解明であるという問題点がある。

2. 研究の目的

本研究の目的は、深層学習の原理や性質を明らかにする統計理論、特に関数推定のためのノンパラメトリック理論を開発することである。これに基づいてデータに即したニューラルネットワークのアーキテクチャや適切な学習法を解明する。加えて、これらの方法に基づいて深層学習の高速化を目指す手法を開発することである。

3. 研究の方法

本研究では、主に以下の二つのアプローチを考えた。

[目的1 (理論)]

推定対象となるデータ生成関数やデータ分布を特定した上で、これを推定・解析するのに適切なニューラルネットワークや学習アルゴリズムを考え、その理論を構築する。具体的には、分析対象となるデータの情報論的・幾何学的な性質を抽出し、それらの性質に適したコンパクトなネットワークの構造を明らかにする。この理論開発により、過大なネットワークを用いない深層学習を実現するための、数学的な手がかりを与える。

[目的2 (手法開発)]

明らかにした理論的性質を用いて、所与のデータから適応ネットワークを学習・選択するアルゴリズムの開発を行う。具体的には、理論的に明らかにしたニューラルネットワークの構造を最適化問題の制約として導入することで、学習するネットワークの候補を削減し最適化問題を簡素化する。これにより、少ない解析コストで、良い性能を発揮するネットワークを学習することを可能にする。

4. 研究成果

==概要==

目的1である理論研究について、本研究は深層学習を特徴づける複数の設定下で、汎化誤差解析を通して適応ネットワークを明らかにした。

本研究が考えた解析の設定は、以下の3つに大別される：

A: データを生成する関数もしくは分布自体が特殊な構造を持っており、それを近似する深層ニューラルネットワークの構造の解明が求められるもの。

B: モデルが非常に多くのパラメータを持っており、既存の統計・学習理論では過適合するとして解析が難しかったもの。

C: アルゴリズムが非凸な損失関数に直面しており、このもとでの収束保証が難しいもの。

具体的には、Aの設定に当てはまるものとして、(i)データを生成する関数が特異性を持つ状況における深層学習の優位性の発見と特徴づけ、(ii)データが低次元多様体に集中するなどの低い固有次元を持つ場合における深層構造の利点と汎化誤差改善の解明、(iii)データ生成仮定が有限群に対する不変性を持つ場合の汎化誤差の改善度合いの導出を扱った。Bの設定に当てはまるものとして、(iv)過剰パラメータな状況における深層モデルと二重効果現象の関係性の解明をおこなった。Cの設定として、(v)非凸エネルギー面におけるガウス確率勾配降下法が保証する暗黙的正則化、などのトピックを研究した。

この全ての場合において、深層学習がデータの構造に適合して誤差が改善する原理を明らかにするとともに、この研究計画の目的である適当ネットワーク構造の特定をおこなった。Aに当てはまる設定においては、データに内在する特殊な構造に適合するために、ニューラルネットワー

クが特定のモジュール構造を持つことの必要性が明らかになった。B の設定においては、ネットワークの全体の幅や最適パラメータ行列の固有値分布が重要であることを解明した。C の設定においては、損失関数の局所解の近傍における本質凸性をもたらすようなアーキテクチャが重要であることを明らかにした。

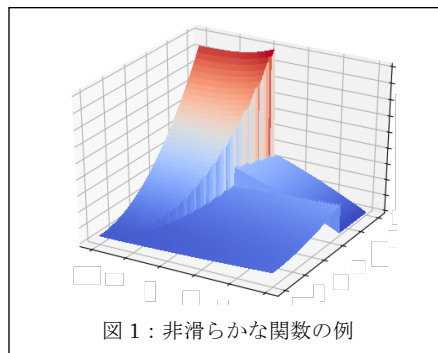
目的 2 の手法開発においては、目的 1 で解明した適応ネットワークの構造を直接ネットワーク設計に活かし、それに基づくアルゴリズムを導入した。提案法は、低コストな既存法を用いて近似対象の関数のあたりをつけるとともに、解析計算に基づいてそれに基づくニューラルネットワークのアーキテクチャを構成する。これに基づいて再学習を行うことで、アーキテクチャ設計の自動化と学習の高速化を同時に達成した。提案法はいくつかの設定のもとで想定通りの利点を発揮した。

==詳細==

目的 1: 理論研究について

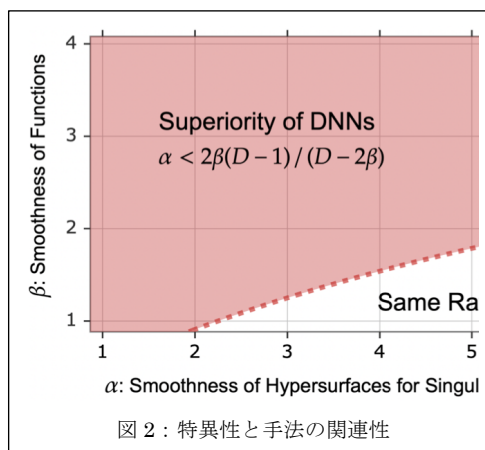
目次

- A: データ分布が特殊な構造を持つ場合
- B: モデルが過剰な数のパラメータを持つ場合
- C: 非凸な損失関数とアルゴリズムを考える場合



A-(i) データを生成する関数が特異性を持つ状況における深層学習の優位性

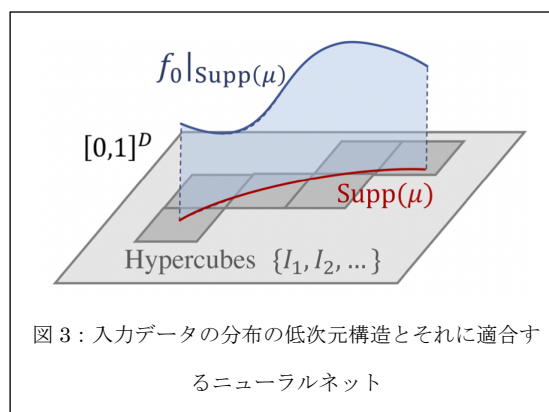
データ生成過程が十分滑らか（微分可能）な場合、深層学習ではない手法（浅い層を用いたニューラルネットワーク、カーネル法など）が理論的な最適精度を達成することが知られている。本研究はその理論の限界を克服するため設定を拡張し、非連続なデータ生成過程から得られるデータの元（図 1）で、深層学習やその他の手法がどういった精度を達成するかを分析した。その結果、あるネットワーク構造の元で、深層学習が広い他クラスの手法に優越することを明らかにした。



特に、データを生成する関数の特異性について分析した。ここで特異性とは、データ関数が非連続になる台上の点を指し、その特異性の形状についてここで注目した。結果として、データ空間において深層学習の優位性を示す図相を導出した。（図 2）。

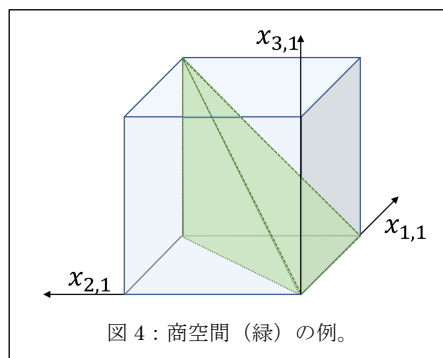
A-(ii) データが低固有次元を持つ場合における深層構造の利点

機械学習で用いられるデータは形式上高次元だが、実は高次元空間上に埋め込まれた低次元集合上に分布していることが経験的に観測されている（図 3）。これは「低次元多様体仮説」と呼ばれており、機械学習手法を設計する際の重要な要素としてよく知られている。本研究は、このようなデータ生成過程での深層学習の性質を調べ、深層学習の汎化誤差があるネットワーク構造の元で、多様体の低い次元にのみ依存し、形式上の高次元性を回避できることを明らかにした。



A-(iii) データが不変性を持つ場合の汎化誤差

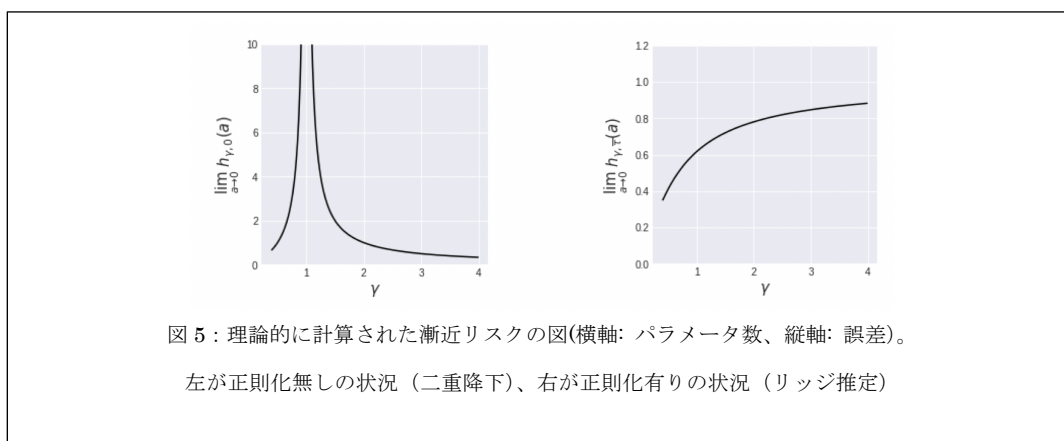
点群データ解析などに用いられるニューラルネットワークは、有限群に対する不変性を持つことが知られている。本研究では、このようなニューラルネットワー



クのもとでの汎化誤差が、不変性の度合い（例えば点の数）に対して指数的に減少することを示した。これは、部分ニューラルネットワークによって標本空間を引き戻して構成される商空間が、入力の不変構造のパラメータについて指数的に減衰することに由来する。（図4）。この関係性を表現するため、入力空間の体積に依存するエントロピー評価方法を開発した。これらの結果により、モデルに対して不変性の構造を導入するいくつかのニューラルネットワークが高い精度を達成することを理論的に示した。

B-(iv) 過剰パラメータな状況における深層モデル

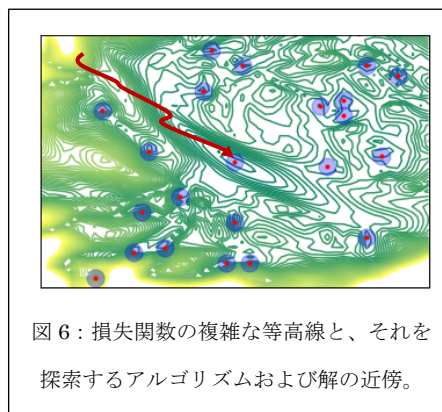
いくつかの統計モデルでパラメータの数を無限大にすると、汎化誤差の分散が減少することが知られている（例：二重降下減少）。しかし、この現象が理論的に示されるのはランダム特徴量モデルなどの線形モデルに限られていた。本研究では、深層モデルを含む広いクラスのニューラルネットワークが、一定の正則条件のもとでこの現象に従うことを示した。具体的には、並列化ニューラルネットワークや ResNet などの特有の構造が、大パラメータ極限での誤差の減少を保証することを明らかにした（図5）。



C-(v) 非凸エネルギー面におけるガウス確率勾配降下法の暗黙的正則化

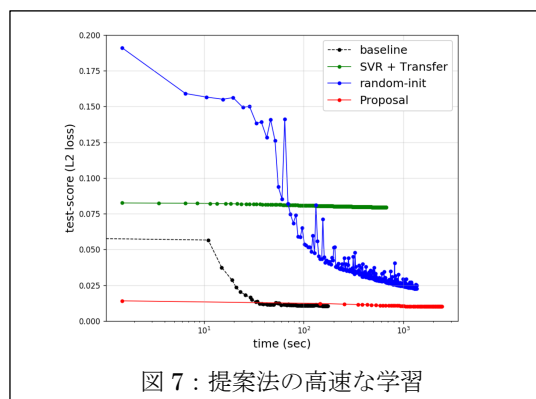
深層学習が高い性能を発揮する一つの要因として、学習アルゴリズムによる暗黙的正則化がある。すなわち、学習の過程で起こるなんらかの現象がモデルの自由度を制約しており、それが訓練データへの過適合を防いでいるというものである。この学説は一時期強い注目を浴びたが、その”なんらかの過程”の特定化が進まず、不透明な側面が残っていた。

本研究では、複雑な非凸形状を持つ損失関数の局面を考え、ガウス確率勾配降下法によるパラメータの更新が、本質凸性を持つような損失関数の局所解の近傍集合に正の確率で到達し、その到達によって暗黙的正則化が実現することを明らかにした(図6)。この時、この近傍集合におけるスペクトルが汎化誤差を記述し、パラメータ数などの名目的な値とは独立に誤差が決まることを明らかにした。



目的2：手法研究について

理論的な知見をもとに、高速学習アルゴリズムの開発を行った。名前を「モチーフ模倣法 (Motif Mimicry)」とし、事前に学習したシンプルな手法を深層ネットワークに転移することで簡単な学習を行った。提案法は、事前にSV回帰などの凸最適化で学習できるモデルをデータにフィットさせ、それを解析計算で深層ネットワークに転移させる。ここで非凸最適化は必要でないため、通常のSGDなどによる学習法よりも少ない計算リソースで高速な学習が可能になった（図7）。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 13件 / うち国際共著 3件 / うちオープンアクセス 12件）

1. 著者名 Masaaki Imaizumi, Kenji Fukumizu	4. 巻 23(111)
2. 論文標題 Advantage of Deep Neural Networks for Estimating Functions with Singularity on Hypersurfaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1 - 54
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Imaizumi Masaaki, Ota Hirofumi, Hamaguchi Takuo	4. 巻 34
2. 論文標題 Hypothesis Test and Confidence Analysis With Wasserstein Distance on General Dimension	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 1448 ~ 1487
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01501	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 M.Kato, M.Imaizumi, K.McAlinn, S.Yasui, H.Takehi	4. 巻 *
2. 論文標題 Learning Causal Models from Conditional Moment Restrictions by Importance Weighting	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Conference on Learning Representations	6. 最初と最後の頁 *
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Takeuchi Koh, Imaizumi Masaaki, Kanda Shunsuke, Tabei Yasuo, Fujii Keisuke, Yoda Ken, Ishihata Masakazu, Maekawa Takuya	4. 巻 *
2. 論文標題 Frchet Kernel for Trajectory Data Analysis	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ACM SIGSPATIAL	6. 最初と最後の頁 221-224
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3474717.3483949	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 Akiyoshi Sannai, Masaaki Imaizumi, Makoto Kawano	4. 巻 161
2. 論文標題 Improved generalization bounds of group invariant / equivariant deep networks via quotient feature spaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 PMLR: Uncertainty in Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 771-780
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 今泉 允聡	4. 巻 50
2. 論文標題 深層学習の原理解析: 汎化誤差の側面から	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本統計学会誌	6. 最初と最後の頁 257 ~ 283
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11329/jjssj.50.257	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 Kohei.Hayashi. Masaaki.Imaizumi. Yuichi Yoshida	4. 巻 108
2. 論文標題 On Random Subsampling of Gaussian Process Regression	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 PMLR: Artificial Intelligence and Statistics	6. 最初と最後の頁 2055-2065
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ryumei Nakada. Masaaki Imaizumi	4. 巻 21
2. 論文標題 Adaptive Approximation and Generalization of Deep Neural Network with Intrinsic Dimensionality	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1-38
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 今泉允聡	4. 巻 50
2. 論文標題 深層学習の原理解析：汎化誤差の側面から	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本統計学会誌	6. 最初と最後の頁 257-283
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 K.Hayashi, M.Imaizumi, Y.Yoshida	4. 巻 To appear
2. 論文標題 On Random Subsampling of Gaussian Process Regression: A Graphon-Based Analysis	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AI & Statistics)	6. 最初と最後の頁 To appear
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 M.Imaizumi, K.Fukumizu	4. 巻 84
2. 論文標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research (AI & Statistics)	6. 最初と最後の頁 869-878
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Imazumi, Takanori Maehara, Yuichi Yoshida	4. 巻 84
2. 論文標題 Statistically Efficient Estimation for Non-Smooth Probability Densities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research Workshop & Conference Proceedings (AISTATS 2018)	6. 最初と最後の頁 978-987
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Imaizumi, Kengo Kato	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 A simple method to construct confidence bands in functional linear regression	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Statistica Sinica	6. 最初と最後の頁 印刷中
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Masaaki Imaizumi, Kenji Fukumizu	4. 巻 -
2. 論文標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018年度統計関連学会連合大会講演予稿集	6. 最初と最後の頁 -
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 無
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 -

[学会発表] 計99件 (うち招待講演 66件 / うち国際学会 40件)

1. 発表者名 Hikaru Ibayashi, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Exponential escape efficiency of SGD from sharp minima
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Stability of Deep Network Estimator for Nonparametric Regression
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 顕微鏡計測インフォマティクス部会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 細谷賞セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 機械学習の数理
3. 学会等名 数学カフェ（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 中央大学理工学研究所特別講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 関数推定の理論に基づく深層学習の原理解析
3. 学会等名 微分方程式とデータサイエンス研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 On Gaussian Approximation on M-Estimator
3. 学会等名 International Chinese Statistical Association（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 統計関連学会連合大会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Implicit Regularization and Over-parameterization
3. 学会等名 知の物理学センター（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hikaru Ibayashi, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Minimum sharpness: Scale-invariant parameter-robustness of SGD
3. 学会等名 ICML Workshop on Theoretic Foundation, Criticism, Fairness (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の暗黙的正則化と過剰パラメータ化に基づく汎化誤差解析
3. 学会等名 統計数理研究所統計物理セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi, Tomoya Wakayama
2. 発表標題 Fast Convergence on Perfect Classification for Functional Data
3. 学会等名 Econometrics and Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習におけるDouble Descent 現象に関する研究紹介
3. 学会等名 横浜国立大学データサイエンスセミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ryumei Nakada, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Asymptotic Risk of Overparameterized Likelihood Models
3. 学会等名 Workshop on the Theory of Overparameterized Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習による低次元構造への適応性とフラクタル構造
3. 学会等名 先進機構セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 On Gaussian Approximation on M-estimators
3. 学会等名 数学セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis of Deep Models with Loss Surface
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi, Tomoya Wakayama
2. 発表標題 Fast Convergence on Perfect Classification for Functional Data
3. 学会等名 CM-Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Theory of Deep Learning
3. 学会等名 奈良先端科学技術大学 データサイエンス特別講義 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 損失関数の形状に基づく深層学習の汎化誤差解析
3. 学会等名 RAMP (OR学会分科会) (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の発見からもたらされる基礎理論のパラダイム
3. 学会等名 東大情報理工コンピュータ専攻講演会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 損失形状に基づく深層学習の汎化誤差解析
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 大規模モデルの複雑性尺度と情報量規準
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Hayashi, M.Imaizumi, Y.Yoshida
2. 発表標題 On Random Subsampling of Gaussian Process Regression
3. 学会等名 Artificial Intelligence and Statistics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理の理解に向けた理論の試み
3. 学会等名 諸科学における大規模データと統計数理モデリング (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理の理解に向けた理論の試み
3. 学会等名 MLSE夏合宿 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 大阪大学MMDS AI・データ利活用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical Inference on M-estimators by High-dimensional Gaussian Approximation
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning
3. 学会等名 Seoul National University Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 Statistical Inference on M-estimators by High-dimensional Gaussian approximation
3. 学会等名 東北大学データサイエンスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 九大IMI特別セミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 ビッグデータCREST合宿（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Statistical Inference on M-estimators by High-dimensional Gaussian Approximation
3. 学会等名 東北大学データサイエンスセミナー（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning
3. 学会等名 Seoul National University Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical inference on M-estimators by high-dimensional Gaussian approximation
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 大阪大学MMDS AI・データ利活用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 MLSE夏合宿 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の理論
3. 学会等名 東大松尾研 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理の理解に向けた理論の試み
3. 学会等名 諸科学における大規模データと統計数理モデリング (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K.Hayashi. M.Imaizumi. Y.Yoshida
2. 発表標題 On Random Subsampling of Gaussian Process Regression
3. 学会等名 Artificial Intelligence and Statistics (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 大規模モデルの複雑性尺度と情報量規準
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 損失形状に基づく深層学習の汎化誤差解析
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の発見からもたらされる基礎理論のパラダイム
3. 学会等名 東大情報理工コンピュータ専攻講演会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 損失関数の形状に基づく深層学習の汎化誤差解析
3. 学会等名 RAMP（OR学会分科会）（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Theory of Deep Learning
3. 学会等名 奈良先端科学技術大学 データサイエンス特別講義（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tomoya Wakayama, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Fast Convergence on Perfect Classification for Functional Data
3. 学会等名 CM-Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis of Deep Models with Loss Surface and Over Parameterization
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 統計数理研究所オープンハウス (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習による関数推定と特異性
3. 学会等名 京都大学RIMS共同研究集会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の理論
3. 学会等名 IBIS2020 企画セッション (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習入門
3. 学会等名 IBIS2020 チュートリアル (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 ビッグデータCREST合宿 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 大阪大学MMDS AI・データ利活用研究会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 AIMaP若手数学者交流会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Statistical Inference on M-estimators by High-dimensional Gaussian Approximation
3. 学会等名 日本統計学会春季集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Neural Networks via Nonparametric Statistics
3. 学会等名 理研AIP数学セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 松尾研セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の高速化にむけた適応ネットワークの数学的発見と学習法開発
3. 学会等名 さきがけ領域会議
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習・関数データ・高次元ガウス近似
3. 学会等名 Overfit Summer Seminar
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の高速化にむけた適応ネットワークの数学的発見と学習法開発
3. 学会等名 情報系WinterFesta
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の原理を明らかにする理論の試み
3. 学会等名 九大IMI特別セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical Inference on M-estimators by High-dimensional Gaussian Approximation
3. 学会等名 東北大学データサイエンスセミナー (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 深層学習の高速化にむけた適応ネットワークの数学的発見と学習法開発
3. 学会等名 さきがけ領域会議 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical inference on M-estimators by high-dimensional Gaussian approximation
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning via Nonparametric Statistics
3. 学会等名 International Chinese Statistical Association (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical inference on M-estimators by high-dimensional Gaussian approximation
3. 学会等名 CM-Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning via Nonparametric Statistics
3. 学会等名 International Statistical Institute World Statistics Congress 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical Estimation for Non-Smooth Functions by Deep Neural Networks
3. 学会等名 Joint Statistical Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning via Nonparametric Statistics
3. 学会等名 Third International Workshop on Symbolic-Neural Learning (SNL-2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 IMS-China International Conference on Statistics and Probability (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Inference on level sets in functional linear regression
3. 学会等名 Econometrics and Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning by Statistics and Learning Theory
3. 学会等名 Seoul National University Seminar (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Generalization Analysis for Mechanism of Deep Learning by Statistics and Learning Theory
3. 学会等名 Penn State University Seminar (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 Statistically Efficient Estimation for Non-Smooth Probability Densities
3. 学会等名 The 21st International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 ICML 2018 Workshop on Theory of Deep Learning (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 汎化誤差評価によるGANの理論解析
3. 学会等名 IBIS2018
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数推定の理論による深層学習の原理解析
3. 学会等名 RIMS共同研究「高度情報化社会に向けた数理最適化の新潮流」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数推定の理論による深層学習の原理解析
3. 学会等名 統計・機械学習若手シンポジウム「統計・機械学習の交わりと拡がり」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数推定の理論による深層学習の原理解析
3. 学会等名 応用数学会(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数推定の理論による深層学習の原理解析
3. 学会等名 生命医薬情報学連合大会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 非滑らかな確率密度推定の統計理論的解析
3. 学会等名 IBIS2018（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 深層学習の概要とその理論研究の現状について
3. 学会等名 SICE制御部門 データ科学とリンクした次世代の適応学習制御調査研究会（招待講演）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 Szemerédi 分割による非滑らかな密度関数の推定
3. 学会等名 統計数理セミナー
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数データ回帰の信頼バンド構成法
3. 学会等名 Overfit Summer Seminar (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 統計理論によるGANの原理解析
3. 学会等名 Preferred Networks セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 高次元ガウス近似によるM推定量の統計的推論
3. 学会等名 日本統計学会春季集会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 関数推定の理論による深層学習の原理解析
3. 学会等名 数学と諸分野の連携にむけた若手数学者交流会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 A simple method to construct confidence bands in functional linear regression
3. 学会等名 Econometrics and Statistics 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical Estimation for Non-Smooth Functions with the Regularity Lemma
3. 学会等名 Discrete Optimization and Machine Learning Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Inference on active domains of functional data via functional linear regression
3. 学会等名 Computational and Methodological Statistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Statistical Analysis for Generative Adversarial Networks
3. 学会等名 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Deep Neural Networks Learn Non-Smooth Functions Effectively
3. 学会等名 Statistics Seminar, Mathematical Institute, Leiden University (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Analysis for Deep Learning by Function Estimation Theory
3. 学会等名 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Analysis for Deep Learning by Function Estimation Theory
3. 学会等名 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Analysis for Deep Learning by Function Estimation Theory
3. 学会等名 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Analysis for Deep Learning by Function Estimation Theory
3. 学会等名 ISI-ISM-ISSAS Joint Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 Charu C. Aggarwal、竹村 彰通、今泉 允聡、李 鍾贇、今井 貴史、今井 徹、紅林 亘、齋藤 邦彦、健山 智子、寺田 裕、西出 俊、西出 亮	4. 発行年 2022年
2. 出版社 学術図書出版社	5. 総ページ数 520
3. 書名 ニューラルネットワークとディープラーニング	

1. 著者名 今泉 允聡	4. 発行年 2021年
2. 出版社 岩波書店	5. 総ページ数 126
3. 書名 深層学習の原理に迫る	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>深層学習によるデータ固有のフラクタル構造などへの適応を証明 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/articles/z0508_00102.html</p>

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1件

国際研究集会 Workshop on Functional Inference and Machine Intelligence	開催年 2020年～2020年
---	--------------------

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
---------	---------