

令和 6 年 6 月 25 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K11780

研究課題名（和文）深層統計モデルによる科学的仮説検証のための非漸近推測理論の開発

研究課題名（英文）Developing a non-asymptotic inference theory for scientific hypothesis testing with statistical deep modelling

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）：本研究計画では、現代的な大自由度統計モデルの理解と活用に向けて、高次元モデルにおける統計的推定および推測の理論および手法を開発した。具体的には、パラメータにスパース性を課さない状況における高次元設定のうち、データとパラメータ数が比例関係を持ったまま発散する比例的な高次元スキームにおける推定と推論の理論を作った。より具体的には、(i)ノイズが独立性を持たない線形回帰モデルにおける推定誤差のレート評価、(ii)非線形要素を持つ高次元シングルインデックスモデルにおけるバイアス補正法および統計的推論法の開発、(iii)高次元データのスペクトル構造を用いたベイズ推定法の開発、などを推進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、現在発展の著しい深層学習や人工知能といった大規模統計モデルに対して、それらの性質や活用法を明らかにするという基礎研究の性質を持っている。これらの大規模統計モデルは高い性能を発揮してはいるが、内部がブラックボックスであったり計算コストが大きいなどの欠点も多く持っており、これらの原理を理解して効率的・安定的に運用する技術は社会に強く求められている。本研究が発展することで、大規模統計モデルの誤差を正しく補正して性能を上げたり、その予測の不安定性を評価した厳密な検定法を作ったり、学習のパラメータの選択を効率化して計算コストを下げるといった多くの実用的技術の開発が可能になる。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we developed theories and methods for statistical estimation and inference in high-dimensional models to advance the understanding and utilization of contemporary, highly flexible statistical models. Specifically, we created theories for estimation and inference in high-dimensional settings where the data and the number of parameters diverge proportionally, without imposing sparsity on the parameters.

More precisely, our work includes: (i) evaluating the rate of estimation error in linear regression models where the noise is not independent, (ii) developing bias correction methods and statistical inference methods for high-dimensional single index models with nonlinear elements, and (iii) advancing Bayesian estimation methods using the spectral structure of high-dimensional data.

研究分野：統計学・機械学習

キーワード：高次元統計 深層学習 ニューラルネットワーク 比例的高次元 統計的推論

1. 研究開始当初の背景

サイエンスの世界で深層学習への期待が高まっている。深層学習は深層ニューラルネットワークモデルを用いたデータ解析方法で、大変高い精度を発揮することから強い注目を浴びている。本来、深層学習はデータに基づく予測に特化しており、病名を予測する医療診断や、相手の行動を予測する囲碁 AI システムなどに使われている。しかし、近年は予測ではなく仮説の検証・解釈を行うサイエンスの世界でも、深層学習のポテンシャルに期待が集まっている。例えば、深層学習を用いた複雑な物理現象の再現や分子構造の生成などがすでに関心を集めており、深層学習を用いた新たな科学的発見がもたらされることが期待されている。

しかし、深層学習による仮説検証は低信頼性という重要な課題を抱えている。すなわち、深層学習の誤差評価が難しく、発見の信頼性が評価できない。通常、統計手法の誤差評価は、仮説検定や信頼区間などの統計的推論法によって行われてきた。データ分析による科学的発見は、統計的推論法を用いて誤差を考慮することで、信頼できる発見とみなされる。しかし、深層学習はそのモデルの特性から統計的推論法の開発が難しいため、得られた結果が十分に頑健かどうか確定できない。よって、深層学習による科学的発見は信頼性を獲得しづらく、新しい科学的仮説の検証や法則性の提供には未だ障害がある。

2. 研究の目的

近年強い注目を浴びるデータ解析法である深層学習は、物理法則や分子構造の探索や再現といったサイエンスの領域での使用も盛んである。しかし、仮説検定や信頼解析などの統計的推論法を深層学習に用いることは難しく、科学的仮説の厳密な検証法は十分には進展していない。これは、深層・大規模モデルでは適切な極限分布が使えないなど、複数の統計学的障害に由来する。本研究では、高次元ガウス近似などの非漸近な分布近似法を用いることでその障害を克服し、深層学習に適用可能な統計的推論の基盤を構築する。深層学習を用いた科学的仮説の検証・確定を可能にし、深層・大規模モデルによる統計的推論という新しい領域を開拓する。

3. 研究の方法

本研究は、深層学習などの深層・大規模な統計モデルのための信頼解析・検定法を開発し、深層統計モデルを用いた科学的仮説検証のための基盤理論の整備を行う。近年強い注目を浴びるデータ解析法である深層学習は、自動運転や医療診断システムの構築などの工学的な用途に留まらず、物理法則や分子構造の探索や再現といったサイエンスの領域での使用も盛んである。しかし、仮説検定や信頼解析などの統計的推論法を深層学習に用いることは難しく、科学的仮説の厳密な検証法は十分には進展していない。これは、深層・大規模モデルでは適切な極限分布が使えないなど、複数の統計学的障害に由来する。本研究では、高次元ガウス近似などの非漸近な分布近似法を用いることでその障害を克服し、深層学習に適用可能な統計的推論の基盤を構築する。その上で、物理法則の検証を用いてその有用性を確認する。

4. 研究成果

本研究計画では、現代的な大自由度統計モデルの理解と活用に向けて、高次元モデルにおける統計的推定および推測の理論および手法を開発した。具体的には、パラメータにスパース性を課さない状況における高次元設定のうち、データとパラメータ数が比例関係を持ったまま発散する比例的高次元スキームにおける推定・推論理論を構築した。

具体的な成果例を以下にあげる。

1. ノイズが独立性を持たない線形回帰モデルにおける推定誤差のレート評価

パラメータがデータ数と比例的に発散する高次元線形回帰モデルにおいて、出力値に加えられるノイズが共変量と独立ではない場合における推定量の理論を考えた。この状況は、医療統計や計量経済における欠落変数バイアスなどの状況で頻繁に現れる。本研究では、この最小二乗推定量を制約付き最適化問題の解と書き換えた上でミニマックス凸ガウス定理を用いて問題を単純化することで、この推定量に対する誤差評価を確立した。結果として、ノイズに含まれる相関構造のランクが一定の状況を満たすときに、最小二乗推定量が一致性を持つことを明らかにした。」

2. 非線形要素を持つ高次元シングルインデックスモデルにおけるバイアス補正法および統計的推論法の開発

非線形な統計モデルの代表例であるシングルインデックスモデルを考え、このパラメータが高次元（比例的高次元）である場合における推定量および統計的推論方法を考えた。この状況では、近年の研究がいくつかの統計的推論法を提案しているが、パラメータがデータより多い状況では使えないなどの限界がある。本研究では、統計物理的な方法に基づいてこのモデルの主方程式を導出したのち、逆畳み込みのテクニックを用いて極限におけるノイズを除去することで、パラメータがデータより高次元な状況でも有効な統計的推論法を開発した。加えて、非線形成分を説明するリンク関数の推定量も提案し、その理論的な有効性も示した。

3. 高次元データのスペクトル構造を用いたベイズ推定法の開発

近年、高次元統計モデルの理論として良性過適合が提案され、データのスペクトルが一定の構造を持つ場合に最小二乗推定量が一致性を持つ推定量であることが示されている。ただしこの推定量は漸近分布が導出されていなかったため、統計的推論を行うには障害があった。本研究ではベイズ推定による事後分布と信用区間の構築を目的とし、良性過適合と同等の予測誤差を実現するためのベイズ推定法の提案を行なった。具体的にはデータのスペクトルから定まる低次元空間に推定量を制約することで、予測誤差がゼロに収束するような事後分布の導出を行なった。

4. 高次元統計を活用した利益最大化問題のアルゴリズム提案

高次元統計の応用として、行動ルールに基づいて利潤を最適課する問題の一つであるバンディット問題への応用を行なった。文脈バンディット問題においては、利潤をもたらす各腕が文脈ベクトルを持ち、これが利潤に影響を与える。本研究では高次元文脈ベクトルに対して有効な高次元推定量を応用し、高い利潤を達成する戦略を開発した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計24件（うち査読付論文 18件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 24件）

1. 著者名 Akifumi Okuno, Masaaki Imaizumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Minimax Analysis for Inverse Risk in Nonparametric Planer Invertible Regression	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Electronic Journal of Statistics	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) 10.1214/23-ejs2202	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 奥野彰文, 今泉允聡	4. 巻 -
2. 論文標題 論文解説: 可逆関数推定の難しさ - 生成モデルを念頭に	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Jxiv	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) 10.51094/jxiv.616	査読の有無 無
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 Donlapark Ponnoprat, Ryo Okano, Masaaki Imaizumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Uniform confidence band for optimal transport map on one-dimensional data	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Electronic Journal of Statistics	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) 10.1214/23-ejs2211	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 Shogo Nakakita, Pierre Alquier, Masaaki Imaizumi	4. 巻 18
2. 論文標題 Dimension-free bounds for sums of dependent matrices and operators with heavy-tailed distributions	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Electronic Journal of Statistics	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) 10.1214/24-ejs2224	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 Junpei Komiyama, Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 High-dimensional Contextual Bandit Problem without Sparsity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	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 該当する

1. 著者名 Ryo Okano, Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Distribution-on-Distribution Regression with Wasserstein Metric: Multivariate Gaussian Case	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Multivariate Analysis	6. 最初と最後の頁 in press
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Sup-Norm Convergence of Deep Neural Network Estimator for Nonparametric Regression by Adversarial Training	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kazuma Sawaya, Yoshimasa Uematsu, Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Statistical Inference in High-Dimensional Generalized Linear Models with Asymmetric Link Functions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tomoya Wakayama, Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Bayesian Analysis for Over-parameterized Linear Model without Sparsity	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Toshiki Tsuda, Masaaki Imaizumi	4. 巻 -
2. 論文標題 Benign Overfitting of Non-Sparse High-Dimensional Linear Regression with Correlated Noise	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 arXiv	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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masahiro Kato, Masaaki Imaizumi, Kentaro Minami	4. 巻 PMLR 206
2. 論文標題 Unified Perspective on Probability Divergence via the Density-Ratio Likelihood: Bridging KL-Divergence and Integral Probability Metrics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Artificial Intelligence and Statistics	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 Masahiro Kato, Masaaki Imaizumi, Kentaro Minami	4. 巻 206
2. 論文標題 Unified Perspective on Probability Divergence via the Density-Ratio Likelihood: Bridging KL-Divergence and Integral Probability Metrics	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Proceedings of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 5271--5298
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 Tomoya Wakayama, Masaaki Imaizumi	4. 巻 to appear
2. 論文標題 Fast Convergence on Perfect Classification for Functional Data	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Statistica Sinica	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 Masaaki Imaizumi, Johannes Schmidt-Hieber	4. 巻 69
2. 論文標題 On Generalization Bounds for Deep Networks Based on Loss Surface Implicit Regularization	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Information Theory	6. 最初と最後の頁 1203 ~ 1223
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TIT.2022.3215088	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 Ryo Okano, Masaaki Imaizumi	4. 巻 to appear
2. 論文標題 Inference for Projection-Based Wasserstein Distances on Finite Spaces	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Statistica Sinica	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 Masaaki Imaizumi, Kenji Fukumizu	4. 巻 23
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 今泉 允聡	4. 巻 52
2. 論文標題 超曲面上に特異性を持つ関数推定における深層ニューラルネットワークの優位性	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本統計学会誌	6. 最初と最後の頁 33~51
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11329/jjssj.52.33	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 Masahiro Kato, Masaaki Imaizumi, Kenichiro McAlinn, Shota Yasui, Haruo Kakehi	4. 巻 to appear
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 none
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 Zhang Rui, Imaizumi Masaaki, Schölkopf Bernhard, Muandet Krikamol	4. 巻 11
2. 論文標題 Instrumental variable regression via kernel maximum moment loss	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Causal Inference	6. 最初と最後の頁 none
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1515/jci-2022-0073	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 A.Sannai, M.Imaizumi, M.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 on 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) 10.48550/arXiv.1910.06552	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 Frechet 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 -
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 M.Kato, M.Imaizumi, K.McAlinn, S.Yasui, H.Takehi	4. 巻 -
2. 論文標題 Learning Causal Relationships 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 該当する

1. 著者名 M.Imaizumi, H.Ota, T.Hamaguchi	4. 巻 -
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 -
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 M.Imaizumi, K.Fukumizu	4. 巻 23
2. 論文標題 Advantage of Deep Neural Networks for Estimating Functions with Singularity on Hypersurface	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 -

[学会発表] 計41件(うち招待講演 21件/うち国際学会 14件)

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Wasserstein距離推定の不確実性評価
3. 学会等名 Workshop OT 2023 (招待講演)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 High-Dimensional Estimators: Universality and Non-Linearity
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~2023年

1. 発表者名 佐藤佑真、今泉允聡
2. 発表標題 フィルターが小さい深層CNNの最適近似レート
3. 学会等名 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習と過剰パラメータの理論
3. 学会等名 フォレストワークショップ2023 (招待講演)
4. 発表年 2022年~2023年

1. 発表者名 Hikaru Ibayashi, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Why does SGD prefer flat minima?: Through the lens of dynamical systems
3. 学会等名 AAAI When Machine Learning meets Dynamical Systems: Theory and Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習と過剰パラメータの理論
3. 学会等名 国立精神・神経医療研究センターの脳病態数理・データ科学セミナーシリーズ (招待講演)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 M.Kato, K.Ariu, M.Imaizumi, M.Uehara, M.Nomura
2. 発表標題 Best Arm Identification with a Fixed Budget under a Small Gap
3. 学会等名 2023 ASA Annual Meeting (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Y. Uematsu, K. Sawaya, M. Imaizumi
2. 発表標題 High-dimensional asymptotics for single-index models via approximate message passing
3. 学会等名 CMStatistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 M. Imaizumi
2. 発表標題 Sup-norm convergence of deep network estimator for nonparametric regression with corrected adversarial training
3. 学会等名 CMStatistics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 M. Imaizumi
2. 発表標題 Theory of Deep Learning and Overparameterization
3. 学会等名 Online Asian Machine Learning School, Asian Conference on Machine Learning (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 M. Imaizumi
2. 発表標題 Hypothesis Test and Confidence Analysis with Wasserstein Distance on General Dimension
3. 学会等名 EcoSta (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 S. Nakakita, M. Imaizumi
2. 発表標題 Benign overfitting in stochastic regression
3. 学会等名 EcoSta (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 加藤真大, 今泉允聡, 石原卓弥, 北川透
2. 発表標題 Semiparametric Contextual Best Arm Identification with a Fixed Budget
3. 学会等名 IBIS2022
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 西澤渉, 今泉允聡
2. 発表標題 Dynamics of Deep Neural Network: A Functional and Diffusion Process Approach
3. 学会等名 IBIS2022
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 非スパースな高次元漸近論の理論と応用
3. 学会等名 大規模複雑データの理論と方法論 ~ 新たな発展と関連分野への応用 ~
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 メカニズムとの学際的統合による新しい分散学習理論基盤の構築
3. 学会等名 IPSJ連続セミナー2022「その先へ 情報技術が貢献できること」(招待講演)
4. 発表年 2022年 ~ 2023年

1. 発表者名 澤谷 一磨、植松 良公、今泉 允聡
2. 発表標題 High-Dimensional Asymptotics of Semiparametric Generalized Linear Models via Approximate Message Passing
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 津田 俊樹、今泉 允聡
2. 発表標題 操作変数による非スパース高次元な線形回帰モデルの良性過適合
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 岡野 遼、今泉 允聡
2. 発表標題 多変量ガウス分布間回帰
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 補正付敵対的訓練による深層ニューラルネットワーク推定量のSupノルム収束
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 若山 智哉、今泉 允聡
2. 発表標題 Benign-Overfitting of Overparameterized Bayesian Linear Regression
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 仲北 祥悟、
2. 発表標題 線形時系列モデルにおける良性過適合
3. 学会等名 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2022年～2023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 電子情報通信学会Webinarチュートリアルシリーズ（招待講演）
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 深層学習の原理に挑む理論の試み
3. 学会等名 第46回IBISML研究会
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
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 JFFoS (招待講演)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 今泉 允聡
2. 発表標題 深層学習の原理記述に向けた構造汎化理論スキームの開発
3. 学会等名 JST創発的研究支援事業「融合の場」第1回公開シンポジウム
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Shogo Nakakita, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Benign Overfitting in Overparameterized Time Series Models
3. 学会等名 Workshop on the Theory of Overparameterized Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 Masahiro Kato, Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Benign Overfitting in Conditional Average Treatment Effect Prediction with Linear Regression
3. 学会等名 Workshop on the Theory of Overparameterized Machine Learning (国際学会)
4. 発表年 2022年～2023年

1. 発表者名 H. Ibayashi, T. Hamaguchi, M. Imaizumi
2. 発表標題 Minimum sharpness: Scale-invariant parameter-robust...
3. 学会等名 ICML Workshop on Theoretic Foundation, Criticism, ... (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今泉允聡
2. 発表標題 深層学習の理論
3. 学会等名 松尾研セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masaaki Imaizumi
2. 発表標題 Implicit Regularization and Over-parameterization
3. 学会等名 知の物理学センター (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 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 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 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 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 西澤 渉, 今泉允聡
2. 発表標題 Gradient Descent Algorithm with Path Kernel-based ...
3. 学会等名 IBIS2021
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 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 AIの原理を解き明かす新理論
3. 学会等名 JST理事長記者会見
4. 発表年 2021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 H. Ibayashi, M. 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

〔図書〕 計4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 北川 源四郎、竹村 彰通、赤穂 昭太郎、今泉 允聡、内田 誠一、清 智也、高野 渉、辻 真吾、原 尚幸、久野 遼平、松原 仁、宮地 充子、森畑 明昌、宿久 洋	4. 発行年 2023年
2. 出版社 講談社	5. 総ページ数 384
3. 書名 応用基礎としてのデータサイエンス AI x データ活用の実践	

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	

1. 著者名 Charu C. Aggarwal、竹村 彰通、今泉 允聡、李 鍾贊、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	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>深層学習が優位性を発揮する特異データ空間の存在を証明 https://research-er.jp/articles/view/111826 深層学習の原理を説明する新理論 ニューラルネットワークのエネルギー曲面上の滞留現象 https://www.u-tokyo.ac.jp/focus/ja/press/z0109_00065.html 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
---------	---------