

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 4 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K18113

研究課題名（和文）ポスト深層学習時代を見据えた深層ニューラルネットの輸送理論解析

研究課題名（英文）Transportation analysis of deep neural networks

研究代表者

園田 翔（Sonoda, Sho）

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

研究者番号：00801218

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：愛媛大・石川勲氏と理研・池田正弘氏との共同研究を軸として、積分表現理論の研究が飛躍的に進展した。特に、多様体上の全結合層や信号空間上の群畳み込み層など多様な隠れ層に対してリッジレット変換を導出するための一般的な方法を見出し、積分表現理論の適用範囲が飛躍的に向上した。また、積分表現理論や輸送理論をきっかけとして、量子機械学習や神経科学、調和解析、確率的数値解析、制御理論、微分方程式論など関連分野の研究者との共同研究が多く立ち上がった。一方、輸送理論の研究は各論的な段階であり、基礎理論の整備が必要と考える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

一般に学習済ニューラルネット（NN）の情報処理様式を外部から読み解くことは難しい。NNが誤動作しないよう制御するため、ホワイトボックス化が求められる。積分表現と輸送解釈はいずれも、NNを線形空間という性質の良い空間で表現する方法論であり、ホワイトボックス化の有力候補である。積分表現の強みであるリッジレット変換は特定の全結合型NNに限って発見されていたが、本研究により現代的なNNに対して機械的に導出できるようになり、NNのホワイトボックス化に貢献した。

研究成果の概要（英文）：Joint research with Dr. Isao Ishikawa (Ehime Univ.) and Dr. Masahiro Ikeda (RIKEN) has led to dramatic progress in integral representation theory. In particular, we have found a general method for deriving ridgelet transforms for various hidden layers, such as fully-connected layers on manifolds and group convolution layers on signal spaces, which has dramatically improved the applicability of integral representation theory. Moreover, the integral representation theory and transport theory have triggered many collaborative researches with researchers in related fields such as quantum machine learning, neuroscience, harmonic analysis, probabilistic numerical analysis, control theory, and differential equation theory. On the other hand, research on transport theory is still at the case-by-case stage, and I believe that a more fundamental theory needs to be developed in future.

研究分野：機械学習

キーワード：ニューラルネット ホワイトボックス化 積分表現理論 リッジレット変換 Neural ODE カーネル求積 非コンパクト対称空間 群畳み込み

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

本研究課題を構想していた 2017 年度は、GAN や Neural ODE、群畳み込みネット、AlphaGo などが登場して、深層学習がそれまでのパターン認識タスクから様々なタスクへと展開していく転換期であった。当時の技術革新の体感スピードを踏まえ、研究課題の最終年度を迎える 2021 年度にはポスト深層学習時代が到来していることを予感した。すなわち、深層学習の動作原理を洗練して、当時の深層学習よりも優れた学習アルゴリズムが登場した時代である。

当時の深層学習が克服すべき課題として、ニューラルネットのホワイトボックス化を挙げた。ホワイトボックス化とは、学習済ニューラルネットの情報処理メカニズムを明らかにすることである。一般に学習済ニューラルネットの情報処理メカニズムを外部から読み解くことは難しい(ブラックボックス的)。ニューラルネットの動作を予測し、誤動作を起こさないよう制御するために、ホワイトボックス化は解決すべき課題であると考えた。

2. 研究の目的

上記背景を踏まえ、本研究課題では深層ニューラルネットの輸送解釈と積分表現理論の観点からポスト深層学習に向けた技術開発を目指した。特に、ブラックボックスとも呼ばれる深層ニューラルネットの情報処理メカニズムを明らかにする「ニューラルネットのホワイトボックス化」を念頭に置いて研究を遂行した。

3. 研究の方法

本研究課題遂行の足場となる積分表現と輸送解釈は、申請者がそれまでに研究開発を続けてきた解析理論である。

まず積分表現は、隠れ 1 層の全結合型ニューラルネットを積分作用素として表現した数学モデルである。積分表現理論はニューラルネットの関数近似能力を解析するための理論として 1990 年代に発達した。その後、カーネル法の興隆に伴って理論の主役は積分表現理論から再生核理論に移行したが、深層学習理論の有力な道具として今日再び注目を集めている。

一方、輸送解釈とは、残差接続を持つ深層ニューラルネットを常微分方程式として表現した数学モデルであり、2017 年頃に同時多発的に登場した。申請者もまた 2017 年にこのアイデアに思い至ったひとりである。積分表現と輸送解釈はいずれも、ニューラルネットの非線形パラメータを無限次元空間に持ち上げることで線形パラメータを得る方法であり、ホワイトボックス化の有力な突破口となりうると考えられる。

4. 研究成果

(1) 積分表現理論の研究は、愛媛大・理研の石川勲氏と理研・慶応大の池田正弘氏との共同研究を軸として大きく進展した。

石川氏・池田氏との共同研究により、有限幅・隠れ 1 層全結合型ニューラルネットの正則化付き経験最小二乗解が過剰パラメータ極限でリッジレット変換に収束することを明らかにした。この結果により、隠れ 1 層全結合型ニューラルネットの学習済パラメータを解析する問題はリッジレット変換を調べる問題に帰着できることが明らかになった(ICML2018WS, AISTATS2021 他にて発表)。

隠れ 1 層ニューラルネットの学習済パラメータはリッジレット変換で記述されることが分かっているにも関わらず、Fourier 変換ほど単純明解ではない。その原因の一つとして、パラメータの冗長性(非自明な零空間の存在)が挙げられる。石川氏・池田氏との共同研究により、リッジレット変換論を応用して零空間の構造を決定することに成功した(投稿中、応用数学会より受賞 1 件)。

上述の研究過程で、リッジレット変換を導出するための一般的な方法を見出すことができた。これを応用して、石川氏・池田氏との共同研究により、多様体(非コンパクト対称空間)上で定義された全結合層や、信号空間(二乗可積分関数)上の群畳み込み層など、多様な隠れ層に対して統一的な方法でリッジレット変換を導出できるようになり、積分表現理論の適用範囲が飛躍的に向上した(ISAAC2021, ICML2022 にて発表)。

リッジレット変換は Fourier 変換のように具体的に解を表示できる．このことを応用し，確率的数値解析(カーネル求積)を用いてリッジレット変換を離散化することで高速に最小二乗解を構成するアルゴリズムを提案した．この研究は連続無限幅の隠れ 1 層ニューラルネットと有限幅の隠れ 1 層ニューラルネットの数学的な関係を明らかにする目的に貢献した (ICML2019WS, MCM2019 他にて発表)．

このほか，積分表現理論の一連の研究をきっかけとして，関連する共同研究が多く立ち上がった．まず，ランダム特徴量学習の理論的な最適分布からサンプリングするための量子計算アルゴリズムを開発する量子機械学習の共同研究へと発展するきっかけとなった (NeurIPS2020 他にて発表)．また，NTK 理論にインスパイアされた深層連続神経場の研究 (ACML2019WS にて発表) や，変動指数 Besov 空間におけるニューラルネットの汎化誤差理論の研究 (国内研究会にて発表)，帯域制限された隠れ 1 層ニューラルネットの近似下限を計算する国際共同研究 (投稿中) にも発展した．

(2) 一方，輸送理論の研究は萌芽的段階にあり，未解決問題が山積している．

制御理論の研究者と国際共同研究を展開し，制御理論の観点から neural ODE を高速かつ安定的に学習させる方法を開発した (NeurIPS2021 にて発表)．

微分方程式論の研究者と研究グループを立ち上げ，国際学会 DEDS2021 を開催した．Neural ODE のベクトル場が k -ReLU ネットの場合に，対応する連続フローを有限深層ニューラルネットで離散化した場合の近似誤差が Barron 型評価に従うことを明らかにした．この評価は深さ方向と幅方向の同質性を示唆しているが，幅方向を空間的・深さ方向を時間的と捉える観点からはむしろ異質性を示唆する評価が期待される．

積分表現理論は調和解析や関数解析という盤石な数学理論に基礎付けられているのに対し，輸送理論は基礎となる数学理論が未整備であり，従って各論的な段階であると考えている．この見立てに基づき，今後は深さ方向の調和解析を創出する研究を構想している．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件 / うち国際共著 2件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Sho Sonoda, Isao Ishikawa, Masahiro Ikeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Fully-Connected Network on Noncompact Symmetric Space and Ridgelet Transform based on Helgason-Fourier Analysis	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning	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 Stefano Massaroli, Michael Poli, Sho Sonoda, Taiji Suzuki, Jinkyoo Park, Atsushi Yamashita, Hajime Asama	4. 巻 34
2. 論文標題 Differentiable Multiple Shooting Layers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 16532-16544
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 S. Sonoda, I. Ishikawa, M. Ikeda	4. 巻 130
2. 論文標題 Ridge Regression with Over-Parametrized Two-Layer Networks Converge to Ridgelet Spectrum	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 24th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics	6. 最初と最後の頁 2674-2682
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 園田翔	4. 巻 50
2. 論文標題 ニューラルネットの関数解析的方法と無限次元零空間	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 285-316
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 H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda, M. Koashi	4. 巻 33
2. 論文標題 Learning with Optimized Random Features: Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rank Assumptions	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Advances in Neural Information Processing Systems	6. 最初と最後の頁 13674-13687
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 Sho Sonoda, Noboru Murata	4. 巻 20
2. 論文標題 Transport Analysis of Infinitely Deep Neural Network	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Machine Learning Research	6. 最初と最後の頁 1 ~ 52
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 Sonoda Sho, Nakamura Keita, Kaneda Yuki, Hino Hideitsu, Akaho Shotaro, Murata Noboru, Miyauchi Eri, Kawasaki Masahiro	4. 巻 108
2. 論文標題 EEG dipole source localization with information criteria for multiple particle filters	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 68 ~ 82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.neunet.2018.08.008	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 Nakamura Keita, Sonoda Sho, Hino Hideitsu, Kawasaki Masahiro, Akaho Shotaro, Murata Noboru	4. 巻 1
2. 論文標題 Localizing Current Dipoles from EEG Data Using a Birth-Death Process	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 2018 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)	6. 最初と最後の頁 2645 ~ 2651
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/BIBM.2018.8621504	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 中村圭太, 園田翔, 日野英逸, 川崎真弘, 赤穂昭太郎, 村田昇	4. 巻 2018-MPS-118
2. 論文標題 生成・消滅過程に基づくEEGデータの電流ダイポール推定	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 研究報告数理モデル化と問題解決 (MPS)	6. 最初と最後の頁 1~8
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66件 (うち招待講演 32件 / うち国際学会 25件)

1. 発表者名 Sho Sonoda, Isao Ishikawa, Masahiro Ikeda
2. 発表標題 Fully-Connected Network on Noncompact Symmetric Space and Ridgelet Transform based on Helgason-Fourier Analysis
3. 学会等名 The 39th International Conference on Machine Learning (ICML2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Stefano Massaroli, Michael Poli, Sho Sonoda, Taiji Suzuki, Jinkyoo Park, Atsushi Yamashita, Hajime Asama
2. 発表標題 Differentiable Multiple Shooting Layers
3. 学会等名 The 35th Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.Sonoda, H. Yamasaki, S. Subramanian, and M. Koashi
2. 発表標題 Quantum algorithm for sampling optimal random features
3. 学会等名 RQC-AIP Joint Seminar (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda and M. Koashi
2. 発表標題 Regression and Classification with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rankness Assumptions
3. 学会等名 Quantum Techniques in Machine Learning (QTML) 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda and M. Koashi
2. 発表標題 Regression and Classification with Optimized Random Features: Applications of Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rankness Assumptions
3. 学会等名 21th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S.Sonoda, I.Ishikawa, M.Ikeda
2. 発表標題 Ridgelet transform on the matrix space
3. 学会等名 13th International ISAAC Congress (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 非コンパクト対称空間上の連続ニューラルネットとそのリッジレット変換
3. 学会等名 2021年度応用数学合同研究集会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 群畳み込みニューラルネットのリッジレット変換
3. 学会等名 第24回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2021)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 重み付きSobolev空間におけるニューラルネット積分表現作用素の有界性
3. 学会等名 実解析学シンポジウム2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 積分表現ニューラルネットが定める積分方程式の一般解
3. 学会等名 日本応用数理学会2021年度年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 ニューラルネットの零空間の精密構造と統計的役割
3. 学会等名 2021年度 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 積分表現でニューラルネットを理解する
3. 学会等名 2021年度第5回マス・フォア・イノベーションセミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 Ghosts in Neural Networks
3. 学会等名 第1回AI数理セミナー（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sonoda, I. Ishikawa, M. Ikeda
2. 発表標題 Ridge Regression with Over-Parametrized Two-Layer Networks Converge to Ridgelet Spectrum
3. 学会等名 The 24th International Conference on Artificial Intelligence and Statistics (AISTATS2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda, M. Koashi
2. 発表標題 Learning with Optimized Random Features: Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rank Assumptions
3. 学会等名 20th Asian Quantum Information Science Conference (AQIS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Yamasaki, S. Subramanian, S. Sonoda, M. Koashi
2. 発表標題 Learning with Optimized Random Features: Exponential Speedup by Quantum Machine Learning without Sparsity and Low-Rank Assumptions
3. 学会等名 The 34th Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 積分幾何学に基づくニューラルネットの新しい再構成公式
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔, 石川勲, 池田正弘
2. 発表標題 オーバーパラメタライズされた有限ニューラルネットの最適解
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2020)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔, Ming Li
2. 発表標題 ランダムニューラルネットの近似下限評価
3. 学会等名 2020年度 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sonoda
2. 発表標題 Characterizing Deep Learning Solutions by Using Ridgelet Transform
3. 学会等名 Differential Equations for Data Science 2021 (DEDS2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 積分幾何学に基づくニューラルネットのパラメータ分布再考
3. 学会等名 第23回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2020)・企画セッション「学習理論」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層学習を微分方程式で記述する
3. 学会等名 第41回IBISML研究会・企画セッション「ダイナミクスと機械学習の接点」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sonoda
2. 発表標題 Harmonic Analysis for Neural Networks and its Applications
3. 学会等名 Applied and Computational Math Seminar, National University of Singapore (online) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 連続ニューラルネットのリッジレット変換による解析
3. 学会等名 2020年度第2回明治非線型数理セミナー (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sonoda
2. 発表標題 A New Reconstruction Formula of Neural Networks based on Radon Transform and Its Applications
3. 学会等名 The 1st Machine Learning Zoom Seminar (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Sonoda
2. 発表標題 Functional Analysis Methods for Neural Network Theory
3. 学会等名 The 20th AIP Open Seminar (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kaito Watanabe, Kota Sakamoto, Ryo Karakida, Sho Sonoda, Shunichi Amari
2. 発表標題 Random neural field learning: Formalization and numerical experiments via NTK
3. 学会等名 ACML 2019 Workshop on Statistics & Machine Learning Researchers in Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Continuous Model of Deep Neural Networks
3. 学会等名 IIT-RIKEN Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Generalized kernel quadrature for synthesizing neural networks
3. 学会等名 Generalized kernel quadrature for synthesizing neural networks Data Science, Statistics & Visualization (DSSV2019), a satellite conference of the 62nd World Statistics Congress, promoted by IASC (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Stein's method for computing inverse operators
3. 学会等名 ICML 2019 Workshop on Stein's Method in Machine Learning and Statistics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Coordinate-free approaches to neural networks
3. 学会等名 PAIR-AIP Joint Research Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層学習の汎化誤差評価
3. 学会等名 理研AIP数学系合同セミナー
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 連続ニューラルネットの諸相
3. 学会等名 情報系 WINTER FESTA Episode 5
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 渡部海斗, 坂本航太郎, 園田翔, 唐木田亮, 甘利俊一
2. 発表標題 ランダム神経場の学習 -NTKによる定式化と実験的検証-
3. 学会等名 第22回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 谷口晃一, 池田正弘, 園田翔, 大野健太, 鈴木大慈
2. 発表標題 ReLU深層ニューラルネットワークの一般化されたBesov空間での関数近似能力について
3. 学会等名 第22回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 山崎隼汰, Sathyawageeswar Subramanian, 園田翔
2. 発表標題 量子コンピュータによる高速ランダム特徴量サンプリング
3. 学会等名 第22回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2019)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hayata Yamasaki, Sathyawageeswar Subramanian, Sho Sonoda, Masato Koashi
2. 発表標題 Fast quantum algorithm for data approximation by optimized random features
3. 学会等名 量子情報技術研究会 (QIT)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 Barron評価を達成するニューラルネットの構成法
3. 学会等名 日本応用数理学会2019年度年会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 カーネル求積による浅いモデルの学習法
3. 学会等名 2019年度 統計関連学会連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 ニューラルネットの連続モデル
3. 学会等名 福岡大学 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層ニューラルネットについて
3. 学会等名 第6回日本橋確率論セミナー (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Continuous Model of Deep Neural Networks
3. 学会等名 South China Normal University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 ニューラルネットの連続モデル
3. 学会等名 大阪大学 数理・データ科学セミナー 数理モデルセミナーシリーズ 第24回 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 連続モデルによるニューラルネットの解析
3. 学会等名 金沢大学 第2回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 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Continuous Model of Deep Neural Networks
3. 学会等名 Theory towards Brains, Machines and Minds, RIKEN CBS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Continuous Model of Deep Neural Networks
3. 学会等名 Peking University (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Numerical Integration Method for Training Neural Networks
3. 学会等名 The 12th International Conference on Monte Carlo Methods and Applications (MCM2019) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 最適制御にもとづく機械学習の試み
3. 学会等名 Workshop on Transport at Metropolitan (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakamura Keita, Sonoda Sho, Hino Hideitsu, Kawasaki Masahiro, Akaho Shotaro, Murata Noboru
2. 発表標題 Localizing Current Dipoles from EEG Data Using a Birth Death Process
3. 学会等名 IEEE BIBM 2018 workshop on Machine Learning for EEG Signal Processing (MLESP 2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho Sonoda, Isai Ishikawa, Masahiro Ikeda, Kei Hagihara, Yoshihiro Sawano, Takuo Matsubara, Noboru Murata
2. 発表標題 Integral representation of shallow neural network that attains the global minimum
3. 学会等名 The First Japan-Israel Machine Learning Workshop (JIML) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho Sonoda, Isai Ishikawa, Masahiro Ikeda, Kei Hagihara, Yoshihiro Sawano, Takuo Matsubara, Noboru Murata
2. 発表標題 An explicit expression for the global minimizer network
3. 学会等名 ICML 2018 Workshop on Theory of Deep Learning (TDL) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 カーネル求積による積分変換の計算
3. 学会等名 第21回 情報論的学習理論ワークショップ(IBIS2018)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中村圭太, 園田翔, 日野英逸, 川崎真弘, 赤穂昭太郎, 村田昇
2. 発表標題 生成・消滅過程に基づくEEGデータの電流ダイポール推定
3. 学会等名 第33回 IBISML研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層学習入門
3. 学会等名 理研AIP数学系合同セミナー(招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Continuous Model of Deep Neural Networks
3. 学会等名 Invited Lecture at Max Planck Institute for Intelligent Systems(招待講演)(国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 Inverse problem in denoising autoencoder
3. 学会等名 2019 RIMS 共同研究 「偏微分方程式に対する逆問題の数学解析とその周辺」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 数値積分によるニューラルネットの学習
3. 学会等名 2018 RIMS 共同研究 「次世代の科学技術を支える数値解析学の基盤整備と応用展開」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層学習入門
3. 学会等名 第21回 情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2018) チュートリアル (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 機械学習と解析学
3. 学会等名 第3回東京実解析セミナー (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層ニューラルネットの数理
3. 学会等名 山形大学DS推進室キックオフミーティング (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層ニューラルネット理論の近況
3. 学会等名 日本数学会2018年度秋季総合分科会 応用数学特別セッション「機械学習の数学的課題: 深層学習の理論を中心に」 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層ニューラルネットの数理
3. 学会等名 津山高専人工知能研究講演会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Sho Sonoda
2. 発表標題 Mathematical Models of Neural Networks
3. 学会等名 Brawijaya University Seminar on Mathematical Analysis and Its Application (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 大域最適解を与えるニューラルネットの積分表現
3. 学会等名 第3回統計・機械学習若手シンポジウム「統計・機械学習の交わりと広がり」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層学習の基礎理論と発展
3. 学会等名 第37回日本医用画像工学会大会 (JAMIT2018) シンポジウム2「深層学習の基礎理論と発展」(招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 園田翔
2. 発表標題 深層ニューラルネットの数理モデル
3. 学会等名 名古屋工業大学講演会「最適輸送と機械学習理論の周辺」(招待講演)
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

日本応用数理学会 2021年度若手優秀講演賞, "積分表現ニューラルネットが定める積分方程式の一般解", 園田翔, 2022年6月.
--

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 Quantum Machine Learning Seminar	開催年 2021年～2021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			
中国	浙江師範大学			
オーストリア	IQOQI Vienna			
英国	Oxford University	Alan Turing Institute		
中国	浙江師範大学			
ドイツ	Max Planck Institute			
中国	Zhejiang Normal University	China Jiliang University	Peking University	
オーストラリア	The University of New South Wales			
ドイツ	Robert Bosch GmbH			
ドイツ	University of Tuebingen	Robert Bosch GmbH		