

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04255

研究課題名（和文）光の波動カオス現象に基づく情報処理と動的深層学習

研究課題名（英文）Photonic information processing based on wave chaos and dynamical deep learning

研究代表者

砂田 哲（Sunada, Satoshi）

金沢大学・機械工学系・教授

研究者番号：10463704

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,100,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、光の波動カオスを含む大自由度の動的システムに基づく情報処理システムの構築である。本研究の成果は主に以下の2つである。（1）波動カオスを生成する微小共振器をリザーバークアル回路として利用することで、サブミリ角の微小領域で大容量リザーバークアルを形成し、且つ12.5GS/sのレートでの高速処理が可能となることを示した。（2）最適制御理論に基づき動的システムに深層学習的な情報処理を担わせる理論的な枠組みを構築した。本理論を時間遅延を有するシステムに適用することで、少数の制御信号でパターン認識が可能となることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で開発した微小共振器構造に基づく光リザーバークアルチップは、微小領域にて大容量のリザーバークアルを高速かつ高効率に実行できる。さらに最適制御理論に基づき制御を合わせることで、リザーバークアルの枠組みを超えた高度な情報処理が可能となる。これにより、AI処理の超高速化や省エネ化に貢献し、且つこれまで捉えることのできた高速現象の異常検知・認識への応用も期待できる。また、光通信や光計測分野をはじめとしたさまざまな分野への波及も期待できる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to realize an information processing system based on high-dimensional dynamical systems involving wave chaos. The two main results are as follows: (i) We developed a large-capacity photonic reservoir chip based on a wave chaotic microcavity and demonstrated high-speed processing at a rate of 12.5 GS/s. (ii) We also developed a theoretical framework that enables dynamical systems to perform deep learning-like information processing based on its optimal control. We applied this theory to optoelectronic systems with time delays and showed that pattern recognition is possible with a few control signals.

研究分野：光情報処理、非線形物理

キーワード：リザーバークアルコンピューティング 波動カオス 動的深層学習 物理深層学習

1. 研究開始当初の背景

IoT 社会の到来により、人に近い端末・センサ・車両などのレイヤでも高度な情報処理が求められ、省エネ性・広帯域性・低遅延性・リアルタイム性等の様々な要件を満たす高度なエッジコンピューティング技術基盤の構築が不可欠となっている。今後、急増しかつ複雑化する情報処理のニーズに持続的に答え続けていくには、10・20年先を見据えて、計算原理やデバイスレベルで全く新しい人工知能(AI)エッジ処理技術基盤の確立が急務となっている。

AI エッジで必要とされる高度な情報処理を実現するには、脳の構造(膨大な数のニューロンと複雑なシナプス結合からなるシステム)から重要なヒントが得られると期待できる。数理物理的な観点では、脳の構造は非線形性を有する複数の要素からなる大自由度の動的システムであり、個々の要素間の相互作用ネットワークが情報処理に重要な役割を担っている。一方、自然界に目を向ければ、大自由度の動的システムは、乱流系を始め普遍的に存在する。興味深いことに、最近の研究により、自然の動的現象もリザーバー計算[1]という新規の情報処理原理に従い制御することで、予測・認識・分類といった高度な情報処理機能を発現できることがわかりつつある。このような背景において、我々は光の自然現象をリザーバー計算のリソースとして利用すれば、光の複雑多様性・並列分散処理性をフルに活かした超高速かつ高効率な知的情報処理基盤が構築できると考え、そのための準備として、デバイス設計・作製や理論モデル構築を行ってきた[1-3]。

特に、我々は「波動カオス」と呼ばれる現象に注目している。「波動カオス」とは、光や音のような波動を、ある特殊な境界条件下で束縛した際に生じる波動ダイナミクスである。例えば、スタジアム型の光共振器に閉じ込められた光は、何度も境界で反射して複雑に干渉する。スタジアム形状では、このプロセスがカオス的であるため、乱流のような空間パターンを形成する。実際、我々はマイクロサイズのスタジアム型の微小共振器を半導体上に作製し、光の波動カオスの生成に成功している[2]。

波動カオスの重要な特徴の1つは、波動カオス状態が外部刺激に敏感に応答し、その波動パターンが多様に変化することである[3]。つまり、外部からの刺激(入力情報)を、多様な空間パターンに刻印できる。言い換えれば、入力情報が、波動パターンという超高次元の特徴空間へマッピングできるともいえる。入力情報の高次元マッピングは即時的な情報処理において極めて重要であるが、既存のデジタル計算機で処理するには非常に負荷の高い過程である。しかし、光の波動カオスは、その高次元かつ多様な自由度(表現)を活かしたマッピング処理を、光のスピードで自然に任せて実行できる可能性があるが、これまでの結果[3]は数値的な見積りに過ぎない。高いポテンシャルを秘めた波動カオスを活かした新たな情報処理基盤の開拓には、波動カオスの良さを最大限に引き出す機構を理論・実験の両面から探索しなければならないと考えた。

2. 研究の目的

本研究の目的の1つは、波動カオスを最大限に情報処理に活かす手法を開拓し、その光デバイス実装によって、その情報処理原理を実証することである。これにより、波動カオスの情報処理能力や有効性を実験的に評価する。また、本研究では、カオスを含む非線形動的システムを活用する深層学習の理論的な枠組みを確立し、光の動的システムを想定した数値実験により、その有効性を検証する。これらの研究により、高速な知的情報処理の可能性を与え、光の物理現象と情報処理との新奇な融合的な展開を切り開く。

3. 研究の方法

(1) マルチモード導波路構造に基づく光リザーバー計算回路の試作・評価

本研究の目的の1つである波動カオスに基づくリザーバー計算の研究を実施する前の原理検証として、シリコンフォトニクス技術によりマルチモード導波路に基づくリザーバー計算回路チップを試作する。処理すべき信号を光にのせて入力用導波路より入射させ、リザーバーとなるマルチモード導波路へ結合させ、そこから放射される信号を光先球ファイバによるプローブや光検出器で測定して確かめる。次に、処理すべき信号を位相変調した光を本リザーバーに入射させ、リザーバー計算の方法にて処理する。代表的なタスクであるカオス時系列予測などを通じて、処理速度と性能との関係を明らかにする。

(2) 波動カオスに基づく情報処理:光デバイス実装による実証

次に波動カオス状態を生成する光デバイス(微小共振器)を試作し、波動カオス状態の生成及びその情報処理能力を実験的に明らかにする。この微小共振器もシリコンフォトニクス技術により作製する。形状としては、スタジアム形状やシナイのビリヤード型の形状を選択する。また、比較のために長方形型の微小共振器も作製する。(1)と同様の評価実験系にて、その性能を評価する。特異値分解に基づく手法により、各微小共振器リザーバーの有効次元を評価し、それがリザーバー計算性能に与える影響について調査する。

(3) 動的システムを用いた深層学習の情報処理の理論構築および検証

光システム等の動的システムに基づく新たな深層学習を提案・構築する。深層学習の根幹は、そのネットワークの多層性にあり、それゆえに超高度な情報処理を可能としている。入力層からの情報が出力層まで非線形に伝搬していくことで、多様な表現能力を獲得している。本研究では、その多層ネットワーク処理をシステムの時間発展で代替させる。すなわち、層から層への情報伝搬を動的システムの時間発展に担わせる。学習においては、Neural Ordinary Differential Equationのように最適制御のadjoint methodで実行させ、深層学習を光動的システムの最適制御問題へ帰着させる。adjoint methodを用いた最適制御の有効性は、実装が容易であり且つ高次元ダイナミクスを生成可能な光電気遅延システムにおいて、イメージ認識の機能を評価することにより検証する。

4. 研究成果

(1) マルチモード導波路構造に基づく光リザバー計算回路の試作・評価

マルチモード導波路型の光リザバー計算回路チップを試作した[4]。本リザバー回路チップは、結合導波路構造を有しており導波路幅 $30\ \mu\text{m}$ である。シングルモード導波路から入力された光はマルチモード導波路の複数の伝播モードに結合する構造となっており、伝播モードの位相速度の違いにより、光遅延を生じさせ導波路端でスペックルパターンを形成する構造をとっている。このスペックルパターンは入射光の位相変化に対して敏感に変化するため、入射光を位相変調させることで処理すべき情報をのせることができる。本研究では、このマルチモード導波路型光リザバー計算回路にて、時間変化する信号の処理が可能となることを示した[4]。本研究の結果により、光位相に情報をエンコードすることで、リザバー計算に適した高次元の波動ダイナミクスが誘起できること、位相変化のレートを高めることで、よりリザバー計算に適したダイナミクスを生成できることが判明した。本成果を参考にして、微小共振器構造に基づく光リザバー計算回路を設計・試作した。

(2) 波動カオスに基づく情報処理:光デバイス実装による実証[5, 6]

試作した微小共振器の例を図 1(a-c)に示す。長方形、円形の散乱体（ホール）を含むシナイのビリヤード型、スタジアム型の微小共振器である。これらの微小共振器はシングルモード導波路と結合しており、入力情報に基づき位相変調された光がシングルモード導波路を通じて微小共振器に結合する構成となっている。結合部分で回折した光が反射を繰り返して混合され、右側の微小共振器端から光を放射させるように設計している。評価実験系を図 1(d)に示す。微小共振器端からの放射される光の時空間ダイナミクスはファイバプローブをスキャンすることで測定し、リッジ回帰によりリザバー計算が可能となるかを調べた。

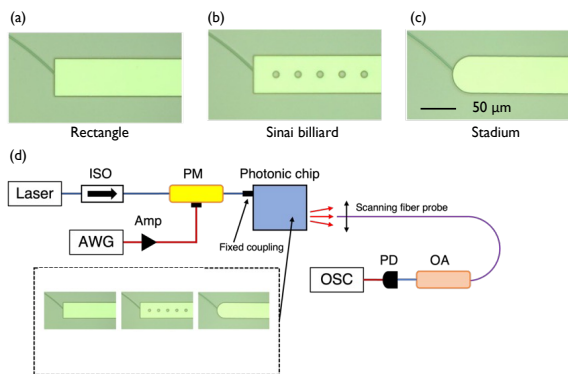


図 1. (a) 長方形, (b) シナイのビリヤード型, (c) スタジアム型の微小共振器の作製例。(d) 光リザバー計算の評価実験系。

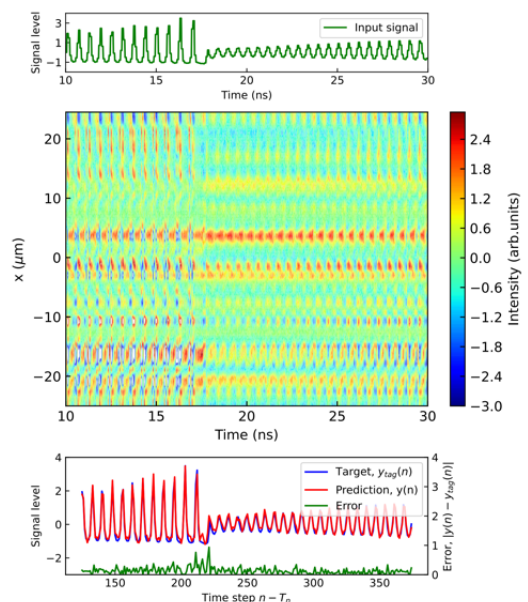


図 2. 光ニューロン場の時間応答と予測結果例。スタジアム型の微小共振器を使用し、1 ステップ先のカオス時系列予測を実行。上段は入力信号の波形、中段は入力信号にตอบสนองするチップ端面のニューロン場の時間的変化、下段は予測結果を示している。

図 2 にスタジアム型微小共振器を光リザバーとして用いた場合の、あるカオス時系列 (Santa Fe Time Series Dataset A) の 1 ステップ先の予測タスクに対する結果を示す。入力レートは

12.5GS/s である。図に示すように、入力波形に依存し且つ多様な時空間ダイナミクスが観測される。これをリザバーの応答とみなしリッジ回帰により 1 ステップ先の予測を行った。なお、学習において 3000 ポイントを training data, 1000 ポイントを test data として用いた。予測性能はテストデータに対する Normalized Mean Square Error (NMSE) により評価した。スタジアム型微小共振器の場合、その NMSE は 0.0827 ± 0.0231 という結果を得た。この NMSE は光ファイバ等を用いて構成される大型の光リザバー計算システムよりも低い値である。通常、光リザバーの物理的サイズに比例して実行的なノード数が増加するため、チップ化した場合により予測結果が得られない。しかし、このように微小共振器構造をとることで、微小領域に高次元のダイナミクスを生成できる。その高次元性により 12.5GS/s の高速レートでのリザバー計算が可能となることを明らかにした。

次に、微小共振器の形状依存性について調べたところ、微小共振器の光損失がリザバー計算性能に大きく影響することがわかった。光損失が大きい場合、光を共振器内部に十分に閉じ込めておくことができないため、過去の入力情報を保持できず（すなわち、メモリ容量が小さくなり）時系列予測処理などが困難となる。また、光損失は共振器内部で起こす混合効果を弱めるため、高次元のリザバーダイナミクスを生成することが困難となる。よって、光損失効果が十分に小さい光微小共振器が望ましいといえる。図 1(a-c) に示す微小共振器に対して、共振器の閉じ込め効果やメモリ容量を調べたところ、(b) または (c) が比較的に損失が大きい (Q 値) が低く、メモリ機能が弱いことが明らかになった。また、それぞれの微小共振器で生成されるリザバーダイナミクスの有効次元を特異値分解を用いて調べた (図 3)。スタジアム型が比較的に次元数が高く、次元数が増加するに従ってエラーの低い予測処理が可能となることが明らかにされた。以上の結果は、光リザバー計算回路を設計するための重要な指針となり得るものと考えている。

本研究で開発した光リザバー計算回路は、光信号を光のまま直接処理する場合に有効である。すなわち、本リザバー計算回路は光センシングデータの処理に対して有効であると考えられる。本研究では、スタジアム型の微小共振器を用いることで、入力光の位相を推定可能であることを示した。図 4 は、その原理検証として、ランダムに位相変調された光の位相推定を行った結果の 1 例である。微小共振器により光の位相情報は高次元の空間パターンにマッピングできるため、そのパターンから位相情報が推定可能となっている。本成果は光の高速位相推定が重要となる計測や光通信分野に応用できると考えられる。

今後、以上の成果をまとめて論文として投稿する予定である。

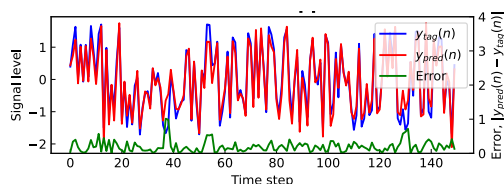


図 4. 位相推定の結果。

(3) 動的システムを用いた深層学習的情報処理の理論構築および検証[6]

本研究では、動的システムの時間発展を利用した物理ニューラルネットワークの理論的な枠組みを確立した [6]。図 5 に示すように、多層ニューラルネットワークでは層から層への情報伝播が高度な情報処理を実行するのに極めて重要な役割を担っている。多層ニューラルネットワークにおける情報伝播と動的システムの時間発展との同等性に基づき、初期状態に入力情報をエンコードすることで、非線形の動的システムの時間発展を利用した深層学習的な情報処理が可能となる。動的システムの学習は、最適制御分野で利用される adjoint 法により実行可能である。本研究では、adjoint 法により、制御信号や動的システムパラメータ、初期状態のエンコーディング方法を全て学習可能な制御手法を導出した。また、この学習手法を簡単な力学系に適用して、その情報処理がリザバー計算による高次元マッピングとは異なるメカニズムで実行されていることも示した。

また、本研究では多層ニューラルネットワークを力学系とみなして、その情報処理メカニズムを有限時間の条件付き Lyapunov 指数を用いて解析した [7]。この結果によれば、学習後の多層ニューラルネットワークは初期値（入力情報）が決定境界付近において、高い Lyapunov 指数を示すこと、逆に決定境界から離れている初期値に対しては、Lyapunov 指数が低くなることを明らかにした。MNIST 手書き文字や Fashion-MNIST 等の簡単なイメージ認識タスクにおいては、t-SNE を用いた低次元の特徴量マッピングにより Lyapunov 指数との関係を可視化することで、同様の結果を確かめた。本研究は、力学系の観点からニューラルネットワークの情報処理メカニズムに迫り、その物理実装をデザインするために重要な結果であると考えている。

文献 [6] では、遅延システムに対する最適制御学習方法についても示した。時間遅延を有する動的システムでは、space-time representation により遅延時間を単位とする仮想ネットワークを時間領域において表現することができる。この仮想ネットワークを想定した最適制御学習のアルゴリズムを開発し、図 6(a) に示す光電気遅延システムを想定した数値実験を行った。入力情

報は時系列データに変換され、本遅延システムに入力される。3周分の時間発展（中間層が3層のニューラルネットに相当）に対して少数個の制御信号の学習にて、MNIST 手書き文字を 97%の精度で認識可能であることを示した[図 6(b, c)]。また、時間遅延や遅延強度を調整することで、更なる精度向上も可能であることを明らかにした。更に、埼玉大学との共同研究により、光電気遅延システムを用いた実証実験を行い、数値計算に相当する極めて高い精度でのパターン認識が可能であることも示した[8]。

上述のとおり、時間遅延システムでは時間領域に仮想ネットワークを構築できるため、本提案手法に基づき、少数の制御信号・パラメータの学習で高い認識処理が可能となるので[図 6(c)]、光システムへの物理実装を格段に容易にできる。よって、本研究は、光の性質を生かした新奇の高速・高効率の深層学習システムへの展開を可能にする重要な成果であると考えている。

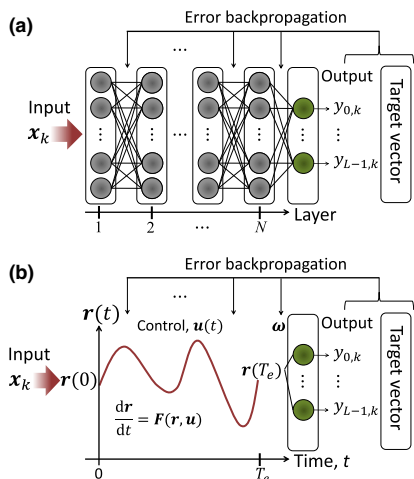


図 5. 本研究で提案した動的システムを用いた物理深層学習の概念図[6]。

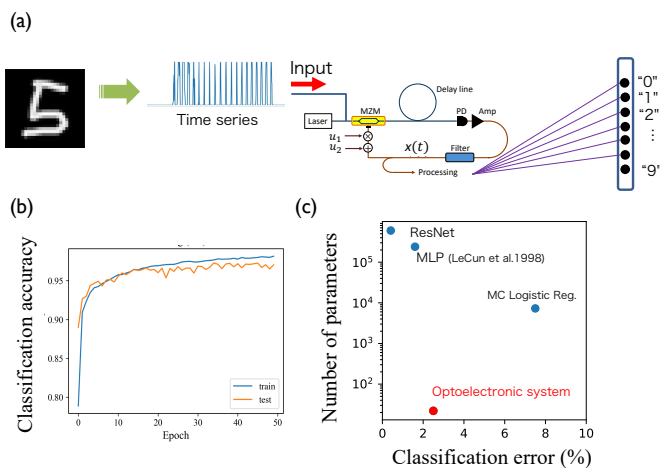


図 6. (a)光電気遅延システムへの実装イメージ。(b) MNIST 手書き文字認識タスクに対する学習曲線。(c) 代表的なニューラルネットとの精度・学習パラメータ数の比較。

参考文献

- [1] A. Uchida, K. Kanno, S. Sunada, and M. Naruse, “Reservoir computing and decision making using laser dynamics for photonic accelerator,” *J. J. Appl. Phys.* 59, 040601 (2020).
- [2] S. Sunada, S. Shinohara, T. Fukushima, and T. Harayama, “Signature of Wave Chaos in Spectral Characteristics of Microcavity Lasers,” *Physical Review Letters*, Vol. 116, 203903 (2016).
- [3] S. Sunada and A. Uchida, “Photonic reservoir computing based on nonlinear wave dynamics at microscale,” *Sci. Rep.* 9, 19078 (2019).
- [4] S. Sunada and A. Uchida, “Photonic neural field on a silicon chip: large-scale, high-speed neuro-inspired computing and sensing,” *Optica* 8(11), pp. 1388–1396 (2021).
- [5] K. Arai, T. Yamaguchi, T. Niyama, S. Sunada, “Photonic Neural Field Dynamics and its Application to Reservoir Computing,” 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2022), A5L-C-01 (2022).
- [5] 砂田 哲, “光ニューラルフィールドダイナミクス: リザーバー計算とセンシングへの展開,” 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 23a-M206-1, 東北大学 河内北キャンパス (2022).
- [6] G. Furuhashi, T. Niyama, and S. Sunada, “Physical Deep Learning Based on Optimal Control of Dynamical Systems,” *Phys. Rev. Applied* 15, 034092 (2021).
- [7] M. Kondo, S. Sunada, and T. Niyama, “Lyapunov exponent analysis for multilayer neural networks,” *NOLTA, IEICE* 12(4) 674–684 (2021).
- [8] R. Nogami, K. Kanno, S. Sunada, A. Uchida, “Experimental Demonstration of Physical Deep Learning Based on Optimal Control Using Optoelectronic Delay System,” 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA2022), B4L-C-03 (2022).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 T. Niiyama and S. Sunada	4. 巻 4
2. 論文標題 Power-law fluctuations near critical point in semiconductor lasers with delayed feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Phys. Rev. Research	6. 最初と最後の頁 43205
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevResearch.4.043205	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 Iwami Ryugo, Mihana Takatomo, Kanno Kazutaka, Sunada Satoshi, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Controlling chaotic itinerancy in laser dynamics for reinforcement learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Science Advances	6. 最初と最後の頁 abn8325
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1126/sciadv.abn8325	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. You, D. Sakakibara, K. Makino, Y. Morishita, K. Matsumura, Y. Kawashima, M. Yoshikawa, M. Tonosaki, K. Kanno, A. Uchida, S. Sunada, S. Shinohara and T. Harayama	4. 巻 24
2. 論文標題 Universal Single-Mode Lasing in Fully Chaotic Billiard Lasers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Entropy	6. 最初と最後の頁 1648
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/e24111648	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 S. Shimadera, K. Kitagawa, K. Sagehashi, Y. Miyajima, T. Niiyama, and S. Sunada	4. 巻 12
2. 論文標題 Speckle-based high-resolution multimodal soft sensing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 13096
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-17026-0	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 J. Hanawa, T. Niiyama, Y. Endo, and S. Sunada	4. 巻 30
2. 論文標題 Gigahertz-rate random speckle projection for high-speed single-pixel image classification	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 22911-22921
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.460681	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 T. Urushibara, N. Chauvet, S. Kochi, S. Sunada, K. Kanno, A. Uchida, R. Horisaki, and M. Naruse	4. 巻 6
2. 論文標題 Parallel bandit architecture based on laser chaos for reinforcement learning	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Journal of Physics Communications	6. 最初と最後の頁 65002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2399-6528/ac75ad	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 Sunada Satoshi, Uchida Atsushi	4. 巻 8
2. 論文標題 Photonic neural field on a silicon chip: large-scale, high-speed neuro-inspired computing and sensing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optica	6. 最初と最後の頁 1388 ~ 1388
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OPTICA.434918	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 Kondo Misaki, Sunada Satoshi, Niiyama Tomoaki	4. 巻 12
2. 論文標題 Lyapunov exponent analysis for multilayer neural networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 674 ~ 684
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.12.674	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 Furuhata Genki, Niiyama Tomoaki, Sunada Satoshi	4. 巻 15
2. 論文標題 Physical Deep Learning Based on Optimal Control of Dynamical Systems	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 34092
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.15.034092	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 Sunada Satoshi, Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi	4. 巻 28
2. 論文標題 Using multidimensional speckle dynamics for high-speed, large-scale, parallel photonic computing	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 30349 ~ 30349
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.399495	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 砂田哲	4. 巻 48
2. 論文標題 光の複雑系に情報処理を担わせる リザバーコンピューティングとその実装を中心に	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 228-232
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 -

〔学会発表〕 計56件 (うち招待講演 18件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 M. You, S. Shinohara, S. Sunada
2. 発表標題 Nonlinear Dynamical Simulation of the Universal Single-Mode Lasing in Fully-Chaotic Microcavity Lasers
3. 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4. 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Arai , T. Yamaguchi , T. Niiyama , S. Sunada
2 . 発表標題 Photonic Neural Field Dynamics and its Application to Reservoir Computing
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 K. Sagehashi , K. Kitagawa , T. Niiyama , S. Sunada
2 . 発表標題 Haptic Sensing Based on Deep Learning and Laser Speckles
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 R. Nogami , K. Kanno , S. Sunada , A. Uchida
2 . 発表標題 Experimental Demonstration of Physical Deep Learning Based on Optimal Control Using Optoelectronic Delay System
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1 . 発表者名 S. Kanaya , T. Takano , S. Sunada , T. Niiyama
2 . 発表標題 Analysis of Dynamical Systems Using Symbolic Regression
3 . 学会等名 2022 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (国際学会)
4 . 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sunada
2. 発表標題 Neural delay differential equations and their physical implementations
3. 学会等名 International Conference Differential Equations for Data Science 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光ニューラルネットワークコンピ ティングの動向
3. 学会等名 フotonテクノロジー技術部会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光リザバー計算回路と高速イメージ認識応用
3. 学会等名 2022年7月LQE/LSJ 合同琵琶湖研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光ニューラルフィールドと高速・高効率リザバー計算への応用
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光波動リザバーコンピューティングの展開
3. 学会等名 2022年度フォトニクス技術フォーラム 第2回研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 堀切 裕太, 荒井 航平, 山口 智也, 新山 友暁, 原山 卓久, 砂田 哲
2. 発表標題 光微小共振器を用いたリザバーコンピューティングの性能評価
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口 智也, 荒井 航平, 新山 友暁, 砂田 哲
2. 発表標題 高速スペックル投影系と光リザバー計算を用いた高速物体認識システム
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上 倫, 菅野 円隆, 砂田 哲, 内田 淳史
2. 発表標題 最適制御に基づく物理深層学習の電気光遅延システムによる実験実装
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光ニューラルフィールドダイナミクス：リザバー計算とセンシングへの展開
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 山口 智也，荒井 航平，新山 友暁，砂田 哲
2. 発表標題 光リザバー計算回路を用いた高速イメージ認識
3. 学会等名 Optics&Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲，新山 友暁
2. 発表標題 光のニューラルフィールドダイナミクス：コンピューティングとセンシング応用
3. 学会等名 Optics&Photonics Japan 2022（招待講演）
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 野上 倫，菅野 円隆，砂田 哲，内田 淳史
2. 発表標題 電気光遅延システムを用いた最適制御に基づく物理深層学習の実証実験
3. 学会等名 Optics&Photonics Japan 2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲, 新山 友暁
2. 発表標題 光の時空間ダイナミクスに基づくニューロコンピューティング
3. 学会等名 2023年電子情報通信学会 総合大会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光波動リザバーコンピューティング
3. 学会等名 光エレクトロニクス産学連携専門委員会『光の日』公開シンポジウム (第333回研究会) (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新山 友暁, 砂田 哲
2. 発表標題 戻り光のある半導体レーザーの間欠発振挙動における臨界性促進因子
3. 学会等名 2023年度第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高野 冬真, 金谷 宗一郎, 新山 友暁, 砂田 哲
2. 発表標題 機械学習を用いた力学系のモデル化
3. 学会等名 2023年度第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新山 友暁, 砂田 哲, レーム アンドレ, 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 動的システムの最適制御に基づく物理コンピューティング
3. 学会等名 2023年度第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 新山友暁, 砂田哲
2. 発表標題 べき分布にしたがう間欠的な半導体レーザー発振挙動の発生条件
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花輪仁成, 砂田 哲, 新山 友暁
2. 発表標題 ナノ秒スケール現象の検出を可能にする高速光シングルピクセル分類器
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 荒井 航平, 花輪 仁成, 山口 智也, 新山 友暁, 砂田 哲
2. 発表標題 シリコンチップ上での光のニューロン場ダイナミクスとリザパー計算への応用
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 金谷 宗一郎、高野 冬真、近堂 岬、新山 友暁、砂田 哲
2. 発表標題 Symbolic regressionを用いた力学方程式の発見
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋寺 祥、北川 慧、提橋 昂洋、新山 友暁、砂田 哲
2. 発表標題 Optical skin:機械学習と光散乱によるマルチモーダル・ソフトセンシング
3. 学会等名 第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sunada and A. Uchida
2. 発表標題 Scalable neuro-inspired photonic computing on a silicon chip
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Optical Microcavities and their Applications 2022 (WOMA2022) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 M. You, K. Makino, D. Sakakibara, Y. Morishita, S. Shinohara, S. Sunada, and T. Harayama
2. 発表標題 Universal Single-Mode Lasing in Fully-Chaotic Microcavity Lasers,
3. 学会等名 The 6th International Workshop on Optical Microcavities and their Applications 2022 (WOMA2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田哲, 古畑玄貴, 新山友暁
2. 発表標題 オンチップ・光ニューラルダイナミクス: 1000 TMAC/s演算を可能にする超高速リザバー計算に向けて
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会 第42回年次大会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 嶋寺 祥、新山 友暁、砂田 哲
2. 発表標題 ソフトマテリアル内の光散乱現象と深層学習を用いたマルチモーダルセンシング
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 砂田 哲、古畑玄貴、新山 友暁
2. 発表標題 力学系の最適制御に基づく物理的深層学習
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 新山 友暁、古畑玄貴、内田淳史、成瀬誠、砂田哲
2. 発表標題 多腕バンディット問題に対する生物種間競争ダイナミクスを利用した強化学習法
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 花輪仁成、砂田 哲、新山 友暁
2. 発表標題 超高速な光学ランダムパターンの生成と画像認識への応用
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近堂岬、砂田 哲、新山 友暁
2. 発表標題 機械学習の手法を用いた力学系の方程式抽出方法の開発
3. 学会等名 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Sunada
2. 発表標題 Photonic neural field dynamics and deep learning
3. 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Urushibara, N. Chauvet, A. Roehm, S. Kochi, S. Sunada, K. Kanno, A. Uchida, R. Horisaki, and M. Naruse
2. 発表標題 Parallel bandit architecture for reinforcement learning using chaotic laser time series
3. 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 T. Niiyama and S. Sunada
2 . 発表標題 Intermittent intensity bursts characterized by power-law statistics in delayed feedback semiconductor lasers
3 . 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 J. Hanawa, S. Sunada, and T. Niiyama
2 . 発表標題 Numerical investigation on ultrafast speckle generation and its application to image recognition
3 . 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 M. Kondo, T. Niiyama, and S. Sunada
2 . 発表標題 Learning equation of dynamical systems
3 . 学会等名 International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Sunada
2 . 発表標題 Progress in neuro-inspired photonic computing
3 . 学会等名 JSAP-OSA Joint Symposia 2021 (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1. 発表者名 ユウ ムンヨウ、牧野 航大、榊原 大介、篠原 晋、砂田 哲、原山 卓久
2. 発表標題 完全カオス共振器レーザーにおける発進モード単一化現象に関する数値的および実験的研究
3. 学会等名 第82回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 白鳥 帆香、漆原 昂、ショヴェ ニコラ、砂田 哲、菅野 円隆、内田 淳史、堀崎 遼一、成瀬 誠
2. 発表標題 フォトリック強化学習における時間割引の解析
3. 学会等名 応用物理学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Sunada, G. Furuhashi, and T. Niiyama
2. 発表標題 Physical deep learning based on dynamical systems
3. 学会等名 Dynamics Days Europe 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 砂田 哲
2. 発表標題 光リザバーコンピューティングとセンシング
3. 学会等名 電気学会北陸支部フロンティアセミナー(第25回2021年度福井セミナー)(招待講演)
4. 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Sunada
2 . 発表標題 Neuro-inspired photonic computing based on multimode waveguides
3 . 学会等名 The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP2021) (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 S. Sunada, G. Furuhata, and T. Niiyama
2 . 発表標題 Physical deep learning based on dynamical systems
3 . 学会等名 IEEE Nanotechnology council, TC-16 Quantum Neuromorphic and Unconventional Computing (招待講演) (国際学会)
4 . 発表年 2021年

1 . 発表者名 G. Furuhata, T. Niiyama, and S. Sunada
2 . 発表標題 Physical Deep Learning Based on Optoelectronic Delay Systems
3 . 学会等名 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Paper ID 9047 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Konda, T. Niiyama, and S. Sunada
2 . 発表標題 Characterizing Multilayer Neural Networks with Lyapunov Exponents
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications, Paper ID 9039 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Uchida, K. Kanno, S. Sunada, and M. Naruse
2. 発表標題 Photonic accelerator: reservoir computing and decision-making for artificial intelligence
3. 学会等名 IEEE Summer Topicals Meeting, Virtual Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 砂田哲, 古畑玄貴, 新山友暁
2. 発表標題 リザーバー計算と深層学習のフォトニック・アクセラレーション
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会シンポジウム「フォトニクスとコンピューティングの先端動向」(招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 嶋寺 祥、新山 友暁、砂田 哲
2. 発表標題 ソフトマテリアル内のスペckルを用いたマルチモーダルセンシング
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 19p-Z34-4
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近堂 岬、新山 友暁、砂田 哲
2. 発表標題 ニューラルネットワークにおける分類問題に対する動的安定性による特徴づけ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 19p-Z34-9
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 新山 友暁、古畑 玄貴、内田 淳史、成瀬 誠、砂田 哲
2. 発表標題 生物種間競争原理を利用した MAB 型強化学習問題の最適探索法
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会, 19p-Z34-16
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 砂田 哲、菅野 円隆、内田 淳史
2. 発表標題 光の時空間ダイナミクスに基づく並列コンピューティング
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 9p-Z28-4
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 古畑 玄貴、砂田 哲、新山 友暁
2. 発表標題 力学系の最適制御に基づく深層学習の情報処理
3. 学会等名 第81回応用物理学会秋季学術講演会, 9p-Z28-9
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 分析方法、及び分析システム	発明者 砂田哲、新山友暁、 花輪仁成	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-163205	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究 分 担 者	原山 卓久 (Harayama Takahisa) (70247229)	早稲田大学・理工学術院・教授 (32689)	

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