

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：12401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K15185

研究課題名（和文）光リザーバコンピューティングの多機能化と並列リザーバによる高性能化

研究課題名（英文）Performance enhancement of photonic reservoir computing based on parallel and deep architectures

研究代表者

菅野 円隆（Kanno, Kazutaka）

埼玉大学・理工学研究科・助教

研究者番号：10734890

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）：機械学習においてエネルギー効率の課題が指摘される中、高速かつ高効率な機械学習手法の一つとして、レーザーと時間遅延ループを用いる光リザーバコンピューティングが注目を集めている。本研究では、光リザーバコンピューティングを高度で多目的な情報処理に適応可能とするために、情報処理能力の向上を目的とする。

本研究成果として、光リザーバの遅延時間を介して記憶容量と非線形性を制御できることを明らかにした。またリザーバの並列化が情報処理性能の向上に有効であり、この知見は光リザーバの集積化に有用である。さらに異なるリザーバを相互結合することで、記憶容量と非線形性のいずれも必要なタスクに適用可能となることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光リザーバコンピューティングは、高速かつ高効率な情報処理を実現可能であると期待されている。特に本研究により光リザーバコンピューティングの情報処理精度を向上することで、より高度で多目的な情報処理に適応可能となり得る。特に光を用いた機械学習技術であることから、光信号のまま情報処理を行うことが可能である。例えば歪みを生じた信号を光リザーバコンピューティングに直接入力することで、信号復元の実時間処理が実現できる。またホログラフィックメモリと呼ばれる大容量記憶媒体技術において、複素光信号をリザーバコンピューティングに直接入力することで、直接観測できない複素振幅の直接再生も期待できる。

研究成果の概要（英文）：Energy efficiency issues have been pointed out in machine learning in recent years. Photonic reservoir computing using a laser and a time-delayed loop has attracted attention as a fast and efficient machine learning scheme. This research aims to improve the information processing capability of photonic reservoir computing to make it adaptable to advanced and versatile information processing.

As a result of this study, we showed that a reservoir's memory capacity and nonlinearity can be controlled via the feedback delay time of the reservoir. We also show that the parallelization of reservoirs effectively improves information processing performance in photonic reservoir computing, and this knowledge is useful for reservoir computing based on photonic integrated circuits. Furthermore, we found that mutually coupled different reservoirs in memory capacity and nonlinearity can be applied to various tasks that require both memory capacity and nonlinearity.

研究分野：光工学，機械学習

キーワード：リザーバコンピューティング 物理リザーバコンピューティング 機械学習 時間遅延システム レーザ 記憶容量 非線形性

1. 研究開始当初の背景

機械学習に関する研究が近年盛んに行われている画、従来の計算機は、エネルギー効率や処理速度などの観点で機械学習に必ずしも適していない[1]。そこで機械学習の物理実装に注目が集まっており、その1つとして時間遅延リザーバコンピューティングが挙げられる[2]。これは時間遅延ループを有する1つの非線形システムをネットワークの代わりに用いる。したがってネットワークを構成するために多くのノードを用意する必要がなく、実装が容易である。

時間遅延リザーバコンピューティングの実装手法として、レーザを用いた方法が提案されている。図1にレーザを用いたリザーバコンピューティングの概念図を示す。入力層では入力信号にマスク信号を乗算する前処理を行う。時間遅延ループを有するレーザをネットワークの代わりに使用し、これをリザーバと呼ぶ。リザーバでは、遅延ループを微小間隔 θ で区切ることでノードを仮定する。実際にはレーザの応答信号を時間方向に θ で区切り、各領域を仮想的なノードとする。また学習は出力層のみで行われるため、学習に必要なコストが非常に小さいことが特徴である。

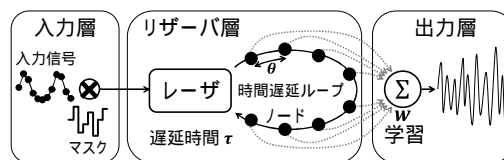


図1: レーザを用いた光リザーバコンピューティングの概念図。

レーザを用いたリザーバコンピューティングは非常に高速な情報処理を実現可能であることがこれまでに示されている[3]。しかしながら本方式は発展途上であり、多くの研究ではベンチマークタスクへの適用に留まっている。様々なタスクの実行を可能とするためには、リザーバの処理能力の向上が必要不可欠である。これに対してレーザのような物理システムは、その内部構造を変化させることについて自由度が少ない。しかしながら時間遅延リザーバでは、時間遅延フィードバックの強さや時間遅延ループの遅延時間は変化させることができる。これらのパラメータを介してリザーバの構成を変えることで、その計算能力の向上可能性を明らかにすることは課題の1つである。ここでリザーバの物理パラメータを変化させることは、関数を変化させることに相当すると考えられる。物理パラメータの変化によるリザーバの性質の変化を明らかにすることは、学術的にも応用の観点からも重要な課題である。

2. 研究の目的

本研究では、レーザを用いたリザーバコンピューティングをより高度で多目的な情報処理への適応を可能とするために、その情報処理能力の向上を目的とする。具体的には、以下に挙げる3項を本研究の目的とする。

(1) 情報処理目的に応じた物理リザーバの実現

物理システムをネットワークの代わりに用いることができるという点がリザーバコンピューティングの重要な特徴である。しかしながら一方で、物理システムはその構造を変化させることに制限があるため、計算機上で実現されたネットワークのように、情報処理目的に応じてノードを構成する関数を変化させることは難しい。これに対してレーザと時間遅延ループから実現されるリザーバでは、時間遅延ループの構造は比較的自由に变化可能であり、時間遅延ループの構造を変化させることを介して、情報処理タスクごとに適したリザーバを実現するという点に独創性がある。これにより光リザーバコンピューティングの実用化に大きく貢献できる。

(2) リザーバの並列化による情報処理能力の向上

リザーバの情報処理性能を向上させるための方法の一つは、ノード数を増加することである。時間遅延リザーバでは、時間方向にノードを定義するため、ノードを取得する時間幅を増やすことでノード数を増加することができる。しかしながらこの手法は情報処理速度とトレードオフであるとともに、リザーバの光集積化と相性が良くない。そこで複数のリザーバを並列化し、その出力からノード状態値を取得することで、リザーバ全体のノード数を増加することを考える。単一のリザーバからノード状態値を取得することと比較して、1つのリザーバから取得するノード数が少ないため、情報処理速度が向上すると期待できる。並列リザーバにより情報処理能力を向上できれば、より難しい情報処理タスクへの適用が可能である。

(3) 並列化したリザーバの多目的化と情報処理能力の関係

(1)に基づき、異なる性質を持つリザーバを実現することができれば、それらを並列化することで、全体の情報処理性能を向上できると期待される。特に異なる情報処理タスクに適したリザーバを組み合わせることで、様々な情報処理に適用可能な多目的リザーバの実現が期待できる。

3. 研究の方法

(1) 情報処理目的に応じたりザーバの実現

高い情報処理能力を有するリザーバに求められる主な性質として記憶容量と非線形性が挙げられる。どちらの性質がどの程度必要であるかは、情報処理タスクにより異なる。したがって時間遅延リザーバの遅延時間を変化させることでこれらの性質を制御できれば、目的に応じたりザーバを実現することができる。本研究では、記憶容量および非線形性を定量的に評価するため

に、関数近似タスク[4]を用いる。リザーバの遅延時間を変化させたときに、関数近似タスクの性能の依存性を調査し、記憶容量および非線形性がどのように変化するかを明らかにする。

(2) リザーバの並列化による情報処理能力の向上可能性の調査

リザーバを光集積回路化した場合について考え、リザーバの並列数を増加させたときに情報処理性能がどのように変化するかを調査する。光集積回路リザーバは、遅延時間を長くできないため、1つのリザーバから多くのノードを用意することができない。一方で、遅延時間よりも長いリザーバ応答信号からノードを取得しようとする、記憶容量が提言する。したがって並列化することにより、光集積回路リザーバの課題を解決しつつノード数を増加させることができる。具体的な性能評価タスクとして、時系列予測タスクおよび非線形チャネル等化タスクを行う。

上記に加え、リザーバの深層化が情報処理性能に与える影響について調査する。

(3) 並列化したリザーバの多目的化と情報処理能力の関係

記憶容量と非線形性のそれぞれに特化したリザーバを用意し、それらを並列に用いることで、記憶容量と非線形性の両方が必要なタスクに適用可能であることを調査する。具体的な性能評価タスクとして、時系列予測タスクおよび非線形チャネル等化タスクを行う。さらに記憶容量と非線形性のいずれも必要なタスクとして、混合関数近似タスクを用意し、情報処理性能を評価する。

4. 研究成果

(1) 情報処理目的に応じたリザーバの実現

リザーバとして、図 2(a)に示す時間遅延ダイナミカルシステムを考える。時間遅延リザーバコンピューティングでは、マスク周期 T の間隔で信号を入力する。従来法では遅延時間 τ をマスク周期 T に一致することが多い。本研究では、マスク周期 T よりも遅延時間 τ を短い値に設定する[5]。図 2(b)および 2(c)に、従来法と本手法の比較を示す。従来法の $\tau = T$ の場合(図 2(b))、マスク周期 T の間に非線形変換が1度だけ行われる。図 2(c)のように遅延時間が $\tau = T/3$ の場合を考える。マスク周期 T の間にフィードバックが3回繰り返されるため、非線形変換が3回行われる。このように τ を T よりも短い値に設定し、フィードバック回数の多いノードを実現することで、複雑な非線形性を持つノードを仮定できる。これはシステムの非線形性を向上できる可能性がある。

上述の仮定を確認するために、関数近似タスクを用いてフィードバック回数に対する非線形性および記憶容量の変化を調査した[5]。関数近似タスクは、入力信号 $u(n)$ に対し、目標関数 $d(n) = \sin[\nu \times u(n - \tau_D)]$ をリザーバに近似させるタスクである。係数 ν および遅延ステップ数 τ_D により、関数の非線形性、記憶ステップを調整できる。本研究では、非線形タスク($\nu = 2.0\pi$, $\tau_D = 0$)と記憶タスク($\nu = 0.1\pi$, $\tau_D = 2$)に対する性能を評価した。性能評価には、目標信号 $d(n)$ とリザーバの出力信号 $y(n)$ の近似誤差として規格化平均二乗誤差(Normalized Mean Square Error, NMSE)を算出して定量的に評価した。NMSE が小さいほど $y(n)$ が $d(n)$ に近いことを意味する。

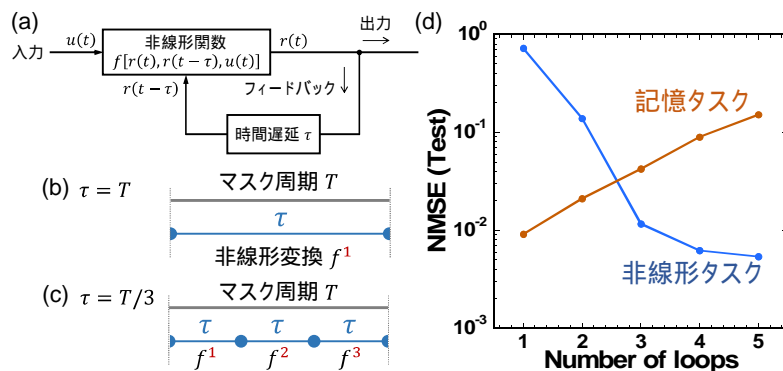


図 2 (a) 時間遅延ダイナミカルシステムの概念モデル。(b), (c) 入力信号のマスク周期 T と遅延時間 τ の関係。(b)は $\tau = T$ とした場合であり、(c)は $\tau < T$ の場合の例である。ここでは $\tau = T/3$ としている。(d) 数値シミュレーションにおける光電気フィードバックシステムを用いた関数近似タスクの結果。横軸はフィードバック回数 k であり、縦軸は近似誤差 (NMSE) である。

図 2(d)にフィードバック回数に対する NMSE の依存性を示す。リザーバとして光電気フィードバックシステムを使用した[6]。マスク周期 $T = 10 \mu\text{s}$ に設定し、リザーバの遅延時間を $\tau = T/k \mu\text{s}$ に設定した。ここで k はマスク周期 T の間にフィードバックされる回数である。図の青線および橙線は、それぞれ非線形タスクと記憶タスクの結果である。非線形タスクにおいて $k = 1$ のとき、NMSE は 1 に近く非常に悪い結果である。これは非線形関数 f による写像が1回しか行われず、リザーバの非線形性が弱いためである。しかしながら k を増加させると NMSE は急激に低下する。このようにフィードバック回数を増やすと非線形性が向上することが確認できた。これに対して記憶タスク(橙線)は逆の依存性を示す。つまり k の増加と共に NMSE が増加する。 $k = 1$ のとき、全てのノードが一つ前の入力に対する応答信号をフィードバック信号として受け取るため、高い記憶容量を持つ。しかしながら k が増加すると、マスク周期 T 内の最初の遅延時間から定義されるノード以外は、過去の入力に対する応答信号をフィードバックとして受け取ることができない。したがって記憶容量が低下する。このように遅延時間を介してリザーバの非線形性と記憶容量を制御できることが明らかとなった。また非線形性と記憶容量にトレードオフがあ

ることも分かった。このトレードオフは、一般のエコーステートネットワークでも報告されており[5]、時間遅延リザーバにおいても確認できることを本研究で示した。

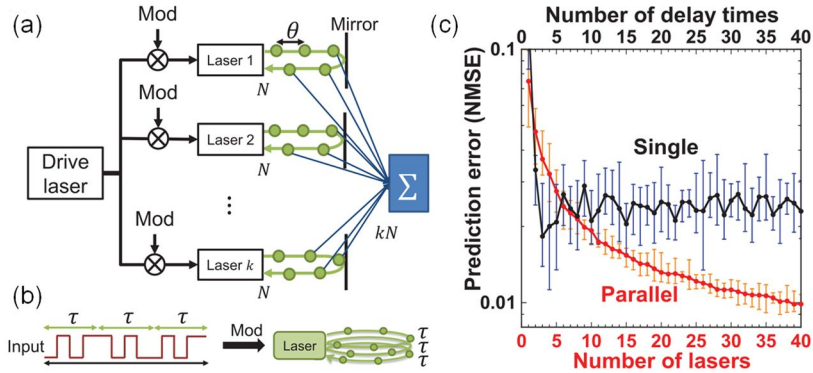


図3 (a) 並列リザーバの概念図。(b) 単体リザーバから時間方向にノード数を増加する手法の概念図。(c) カオス時系列予測タスクにおける単体リザーバと並列リザーバの数値シミュレーション結果の比較。横軸は並列リザーバの並列数または単体リザーバの時間多重化数を表す。

(2) リザーバの並列化による情報処理能力の向上可能性の調査

本研究では時間遅延リザーバの並列化を行う。ここでは光集積回路を用いたリザーバを対象とする[6]。光集積回路を用いたリザーバは、小さな領域に集積化するために遅延時間を長くすることができない。時間遅延リザーバでは、基本的には遅延時間分のリザーバ応答信号を時間方向に区切ることでノードを仮定するため、遅延時間が短い場合には多くのノードを用意することができない。そこでリザーバの並列化によるノード数の増加手法について検討を行った[7]。

図3(a)は並列化したリザーバの概念モデルである[7]。レーザを k 台用意してノードを取得する。このとき全体のノード数は kN として表される。ここで N は1つのレーザから取得するノード数である。比較として、光集積回路を用いたリザーバにおいて用いた手法を図3(b)に示す[6]。この手法では、遅延時間の k 倍の長さのリザーバ応答信号からノードを取得することでノード数を増加させている。この場合の k を時間多重化数と呼ぶことにする。

情報処理性能評価のために、カオス時系列予測タスクを用いた。このタスクは、遠赤外線レーザカオスの時系列を入力信号 $u(n)$ としたとき、リザーバに入力信号の1点先を出力させるように学習する。図3(c)は、レーザの数(または時間波形の長さを決める係数) k を変化させたときの予測誤差(NMSE)の変化を示している。ここで $k=1$ のときのノード数は $N=24$ である。 k を増やすと初めは既存手法の予測誤差の方が小さいが、すぐに並列化手法の予測誤差の方が小さくなる。また既存手法の場合、予測誤差がすぐに横ばいになる一方で、並列化手法は k の増加に対して予測誤差が単調減少している。このように光集積回路のような短い遅延時間を持つ光リザーバにおいて、並列化は情報処理性能に高い効果があることが明らかとなった[7]。

また時間遅延リザーバの深層化の研究も行った[9]。この研究では、リザーバを並列に使用した場合とリザーバを直列に繋いだ場合(深層化)について考え、さらに2つを併用したハイブリッド方式を提案し、これらのアーキテクチャに対する情報処理性能への影響を数値シミュレーションにより調査した。性能評価のためのタスクとして、記憶タスク、カオス時系列予測タスク、非線形チャネル等化タスクを行った。調査の結果、並列方式はカオス時系列予測タスクの結果が悪く、深層方式は非線形チャネル等化タスクの結果が悪くなることが分かった。このようにアーキテクチャにより苦手なタスクが存在することが明らかとなった。一方でハイブリッド方式はいずれのタスクに対しても良い性能を示す結果となった[8]。

(3) リザーバの応答出力と情報処理能力の関係

これまでの研究において、マスク周期に対して時間遅延リザーバの遅延時間の長さを変化させることで記憶容量と非線形性を調整できることが分かった。具体的には、マスク周期に対して遅延時間が非常に短ければ非線形性が向上し、マスク周期と遅延時間が同程度であれば記憶容量が向上する。記憶容量と非線形性はトレードオフの関係があるため、どちらの性質も必要であるタスクに対して、高い情報処理性能を達成することが困難であると予想される。そこで記憶容量と非線形性の片方の性質を有している時間遅延リザーバを1つずつ用意し、それらを組み合わせることで性能向上が可能であることを調査した[6]。

図4(a)は、フィードバック遅延時間を変化させたときの複合関数近似タスクの近似誤差を示している。ここで複合関数近似タスクは、以下の目標関数の出力 $d(n)$ を近似するタスクである[5]。

$$d(n) = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sin(v_i \times u(n-i)) \quad (1)$$

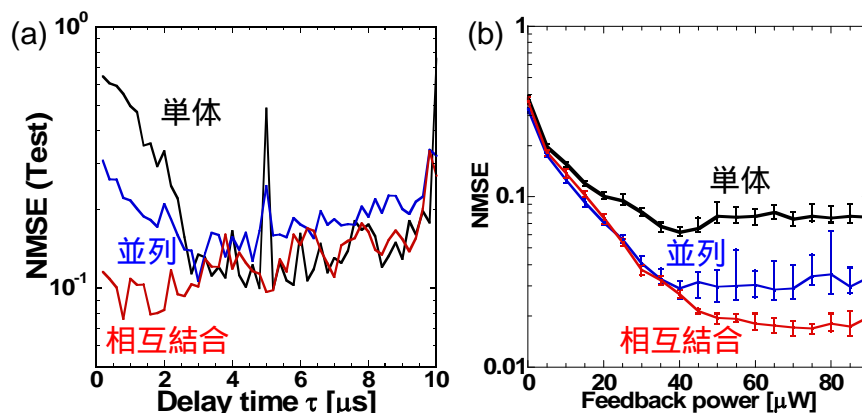


図 4 (a) 光電気フィードバックシステムにおける複合関数近似タスクのシミュレーション結果．縦軸は近似誤差．横軸は遅延時間であり，並列および相互結合システムの片方の遅延時間は $9.8 \mu\text{s}$ に固定されている．(b) 光電気フィードバックシステムにおけるカオス時系列予測タスクの実験結果．縦軸は予測誤差であり，横軸はフィードバック強度である．リザーバの遅延時間は $9.8 \mu\text{s}$ および $0.02 \mu\text{s}$ に固定されている．単体システムの遅延時間は $9.8 \mu\text{s}$ である．

ここで $v_1 = 1.0\pi$, $v_2 = 1.5\pi$, $v_3 = 0.5\pi$ である．このタスクは 3 ステップ前までの過去の入力を記憶するとともに，非線形性も必要とするタスクである．このタスクにおける近似誤差は NMSE により評価する．またリザーバとして光電気フィードバックシステムを用いた[5,10]．

図 4(a)において，黒線は単体システム，青線は並列システムの結果を示している．2 つのグラフにおいて，近似誤差が最も低い値はそれぞれ 0.096 (並列)と 0.115 (単体)であり，並列システムの方が悪化している．この理由は，並列システムそれぞれ別々に駆動しているため，過去の入力を記憶することはできるが，過去の入力に関する非線形変換を表現できないためであると考えられる．そこで 2 つのシステムを結合した相互結合システムを用意し，同様の調査を行った結果が図 4(a)の赤線である．相互結合システムにおいて最小の NMSE は 0.070 であり，単体システムおよび並列システムよりも低い近似誤差を達成することができた．この結果は，非線形性と記憶容量を持つリザーバを組み合わせることで，過去の入力に対する非線形な演算を実行できる能力を実現できるようになったことを示唆している．

さらに単体，並列，相互結合システムの比較を実験的に行った[5]．タスクとしてカオス時系列予測タスクを用いた．並列と相互結合システムの 2 つの遅延時間は， $9.8 \mu\text{s}$ および $0.02 \mu\text{s}$ に設定し，単体システムの遅延時間は $9.8 \mu\text{s}$ である．全ての手法においてマスク周期は $T = 10 \mu\text{s}$ である．図 4(b)に光電気フィードバックシステムのフィードバック強度を変化させたときの予測誤差の変化を示す．3 つの手法を比較すると，相互結合システムが最も低い予測誤差を達成できている．このように相互結合システムにおいて，2 つのリザーバの遅延時間を異なる値に設定することで，記憶容量と非線形性の両方が必要なタスクの性能が向上することが明らかとなった．

参考文献

- [1] S. Esser et al., "Convolutional networks for fast, energy-efficient neuromorphic computing," Proc. Natl. Acad. Sci. USA, **113**, 11441 (2016).
- [2] L. Appeltant et al., "Information processing using a single dynamical node as a complex system," Nat. Commun., **2**, 468 (2011).
- [3] D. Brunner et al., "Parallel photonic information processing at gigabyte per second data rates using transient states", Nat. Commun., **4**, 1364 (2013).
- [4] M. Inubushi and Y. Kazuyuki, "Reservoir computing beyond memory-nonlinearity trade-off," Sci. Rep., **7**, 10199 (2017).
- [5] K. Saito, K. Kanno, and A. Uchida, "Memory capacity and nonlinearity in electro-optic delay-based reservoir computing," Proc. of NOLTA2020, **1**, 370 (2020).
- [6] K. Takano, C. Sugano, M. Inubushi, K. Yoshimura, S. Sunada, K. Kanno, and A. Uchida, "Compact reservoir computing with a photonic integrated circuit," Opt. Express, **26**, 29424 (2018).
- [7] C. Sugano, K. Kanno, and A. Uchida, "Reservoir computing using multiple lasers with feedback on a photonic integrated circuit," IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, **26**, 1500409 (2020).
- [8] H. Hasegawa, K. Kanno, and A. Uchida, "Parallel and deep reservoir computing using semiconductor lasers with optical feedback," Nanophotonics, **12**, 869 (2022).
- [9] K. Kanno and A. Uchida, "Performance improvement of delay-based photonic reservoir computing," Chapter 16, Edited by K. Nakajima and I. Fischer, "Reservoir Computing: Theory, Physical Implementations, and Applications," Springer Verlag (2021).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 6件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Mito Ryohei, Kanno Kazutaka, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 13
2. 論文標題 Experimental demonstration of adaptive model selection based on reinforcement learning in photonic reservoir computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 123 ~ 138
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.123	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 Oda Akihiro, Mihana Takatomo, Kanno Kazutaka, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 13
2. 論文標題 Adaptive decision making using a chaotic semiconductor laser for multi-armed bandit problem with time-varying hit probabilities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Nonlinear Theory and Its Applications, IEICE	6. 最初と最後の頁 112 ~ 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/nolta.13.112	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 Yamasaki Kazuto, Kanno Kazutaka, Matsumoto Atsushi, Akahane Kouichi, Yamamoto Naokatsu, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 29
2. 論文標題 Fast dynamics of low-frequency fluctuations in a quantum-dot laser with optical feedback	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 17962 ~ 17962
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.426268	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 Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi	4. 巻 12
2. 論文標題 Photonic reinforcement learning based on optoelectronic reservoir computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 3720
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-07404-z	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 Kanno Kazutaka, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 10
2. 論文標題 Adaptive model selection in photonic reservoir computing by reinforcement learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 10062
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-020-66441-8	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 Mihana Takatomo, Fujii Kiyohiro, Kanno Kazutaka, Naruse Makoto, Uchida Atsushi	4. 巻 28
2. 論文標題 Laser network decision making by lag synchronization of chaos in a ring configuration	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 40112 ~ 40112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.411140	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 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 Kawaguchi Yu, Okuma Tomohiko, Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi	4. 巻 29
2. 論文標題 Entropy rate of chaos in an optically injected semiconductor laser for physical random number generation	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 2442 ~ 2442
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.411694	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 菅野 円隆, 内田 淳史	4. 巻 48
2. 論文標題 光結合レーザーを用いたリザーバコンピューティングの情報処理性能とリアブノフ安定性の関係	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 259 ~ 264
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 -

1. 著者名 Uchida Atsushi, Kanno Kazutaka, Sunada Satoshi, Naruse Makoto	4. 巻 59
2. 論文標題 Reservoir computing and decision making using laser dynamics for photonic accelerator	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 040601 ~ 040601
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ab7860	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 Kanno Kazutaka, Uchida Atsushi	4. 巻 1
2. 論文標題 Performance Improvement of Delay-Based Photonic Reservoir Computing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Chapter 16, Edited by K. Nakajima and I. Fischer, "Reservoir Computing: Theory, Physical Implementations, and Applications," Springer Verlag	6. 最初と最後の頁 377 ~ 396
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-981-13-1687-6_16	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 該当する

〔学会発表〕 計32件 (うち招待講演 9件 / うち国際学会 14件)

1. 発表者名 菅野 円隆
2. 発表標題 複雑光ダイナミクスに基づく機械学習手法の発展
3. 学会等名 日本磁気学会 第45回光機能磁性デバイス・材料専門研究会「AI技術の基礎と応用」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 菅野 円隆
2. 発表標題 複雑光ダイナミクスによるリザーバコンピューティングと強化学習の融合
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 Kazutaka Kanno
2. 発表標題 Complex dynamics based on photonics and its applications to machine learning
3. 学会等名 The 16th International Workshop on Optical Signal Processing and Optical Switching (IW00 2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 内田 淳史, 菅野 円隆
2. 発表標題 複雑系フォトリソニクスを用いた光リザーバコンピューティングと光意思決定
3. 学会等名 2021年 第82回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 土田 朝陽, 斎藤 健斗, 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 電気光遅延リザーバコンピューティングにおけるランダムバイアス信号を用いた性能向上
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 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 リザーバコンピューティングの実装と強化学習への応用
3. 学会等名 電気学会 光・量子デバイス研究会「パワー光源システム技術研究会」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 菅野円隆
2. 発表標題 光リザーバコンピューティングによる強化学習の実装
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 A. Uchida and K. Kanno
2. 発表標題 Photonic reservoir computing using complex laser dynamics
3. 学会等名 The 10th International Symposium on Photonics and Electronics Convergence (ISPEC2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 A. Uchida and K. Kanno
2. 発表標題 Reservoir computing with laser dynamics: Applications of photonic artificial intelligence
3. 学会等名 Optics and Photonics Japan 2020 (招待講演) (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 Photonics Society Summer Topicals Meeting Series 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 内田 淳史, 菅野 円隆
2. 発表標題 複雑系フォトニクスを用いた光人工知能: リザーバコンピューティングと意思決定への応用
3. 学会等名 第5回フォトニクスワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Iwami, T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2. 発表標題 Mode competition dynamics and decision making using a chaotic multimode semiconductor laser
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Morijiri, T. Mihana, A. Oda, R. Iwami, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2. 発表標題 Decision making using comparison of chaotic temporal waveforms in semiconductor lasers
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Takabayashi, T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2 . 発表標題 Experiment on spontaneous switching of leader-laggard relationship in coupled three semiconductor lasers for decision making
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Mihana, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2 . 発表標題 Decision making for solving competitive multi-armed bandit problem using scalable laser network
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 K. Saito, K. Kanno, and A. Uchida
2 . 発表標題 Memory capacity and nonlinearity in electro-optic delay-based reservoir computing
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 H. Hasegawa, K. Kanno, and A. Uchida
2 . 発表標題 Architectures of photonic deep reservoir computing using a semiconductor laser with optical feedback and injection
3 . 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Mito, K. Kanno, M. Naruse, and A. Uchida
2. 発表標題 Experiment on adaptive model selection using reinforcement learning in electrooptic delay-based reservoir computing
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Kanno and A. Uchida
2. 発表標題 Reinforcement learning based on electro-optic delay-based reservoir computing
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 R. Funabashi, K. Kanno, and A. Uchida
2. 発表標題 Evaluation of optical frequency dynamics in a semiconductor laser with timedelayed optical feedback
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. Okuma, Y. Kawaguchi, K. Kanno, and A. Uchida
2. 発表標題 Comparison between (,) entropy and sample entropy in a chaotic semiconductor laser
3. 学会等名 2020 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications (NOLTA 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 半導体レーザーのリザーバコンピューティングを用いた強化学習の提案
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩見 龍吾, 巳鼻 孝朋, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 マルチモード半導体レーザーのモード競合ダイナミクスを用いた意思決定における台数拡張性の調査
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高林 瑞穂, 廣田 和幹, 巳鼻 孝朋, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 3つの半導体レーザーにおける遅延カオス同期を用いた意思決定実験
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 水戸 遼平, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 電気光遅延リザーバコンピューティングにおける強化学習を用いたモデル選択実験
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 舟橋 遼, 工藤 翔大, 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 戻り光を有する半導体レーザにおける位相ダイナミクスと高速物理乱数生成
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 齊藤 健斗, 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 電気光遅延リザーバコンピューティングにおける遅延ループ数による記憶容量と非線形性のトレードオフ
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 長谷川 寛, 菅野 円隆, 内田 淳史
2. 発表標題 戻り光を有する半導体レーザを用いた光ディープリザーバコンピューティングにおける層数と性能の関係調査
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 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 フォトニックQ学習における状態探索の解析
3. 学会等名 第68回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 巳鼻 孝朋, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 半導体レーザーネットワークを用いた競合バンドフィット問題における意思決定
3. 学会等名 レーザー学会 第550回研究会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 岩見 龍吾, 巳鼻 孝朋, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 カオス発振するマルチモード半導体レーザーのダイナミクスと多腕バンドフィット問題への応用におけるスケラビリティの調査
3. 学会等名 レーザー学会 第550回研究会「レーザーのカオス・ノイズダイナミクスとその応用」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 巳鼻 孝朋, 菅野 円隆, 成瀬 誠, 内田 淳史
2. 発表標題 半導体レーザーを用いた一方向結合リング状ネットワークによる意思決定
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第41回年次大会
4. 発表年 2021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
研究協力者	斎藤 健斗 (Saito Kento)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	水戸 遼平 (Mito Ryohei)		
研究協力者	長谷川 寛 (Hasegawa Hiroshi)		
研究協力者	野上 倫 (Nogami Rin)		

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