

研究終了報告書

「光波動コンピューティングの展開」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：砂田 哲

1. 研究のねらい

ポストムーア時代を支えるコンピューティング技術として、昨今のフォトニクス技術に基づく光コンピューティングは大きな注目を集めている。特に、人工知能の中核であるニューラルネットワーク(NN)を光で演算する光 NN 回路は、超高速かつ低消費電力での NN 演算を可能にするキーデバイスとして期待されているが、光の極限的な性質(広帯域性、省エネ性、多重性)を活かしきれておらず、理論・デバイスレベルにおいても多くの課題を有している。

本研究では、光特有の波動現象に注目し、その多様性・高次元性を利用した新原理・大規模 NN 計算の手法を確立し、マイクロ・ナノフォトニクス技術を用いて微小領域で大規模かつ高度な演算を可能にする光リザバー計算(再帰型 NN の一種)デバイスを実現する。これにより、コンピューティングに光の波動的性質を活かす学理の開拓、および今後のフォトニックコンピューティングの技術基盤を確立する。この目的のもと、本研究では次の3つの研究課題を設定した。それぞれの課題とその狙いについて示す：

- (1) 光波動を生かすリザバーコンピューティング(光波動コンピューティング)原理の実証及び基盤技術の確立：本研究の基本アイデアは、光波動伝搬の物理過程(反射・散乱・干渉)により形成される場を空間連続な光ネットワークとみなし、それをリザバー計算に利用することである。このアイデアの理論的基盤を確立すると同時に、本提案リザバー計算を生かすための光入出力インターフェース技術を探索する。また、物理システムの最適制御理論のアイデアに基づき、深層学習のような高度な演算を可能にするための学習手法を確立する。
- (2) 光波動コンピューティングのオンチップ化：(1)で確立した光波動コンピューティングのアイデアを光回路上に実装する。この実装には、微小領域に光を高効率に閉じ込め・制御可能な光微小共振器技術を用いる。
- (3) 光波動コンピューティングの応用展開：(2)で作製した光回路を利用して、外界の光情報をセンシングすると同時に、光で直接的に処理するシステムを構築する。特に、ナノ秒現象を捉えることのできるような高速イメージセンシングをターゲットとする。

2. 研究成果

(1) 概要

本研究の主要な成果として、次の4つを紹介する。

光波動コンピューティングの提案およびの原理実証：多重散乱を伴う光波動現象は、空間連続的な光ネットワークと数理的に同等であることに注目して、そのような光波動の場を光ニューラルフィールドという概念にまとめた[1,2]。そして、光ニューラルフィールドを光デバイス上に実装するための条件を明らかにした。原理実証として、汎用的な光通信コンポーネントであるマルチモードファイバにおけるスペckルダイナミクスを光ニューラルフィールドとして利用することで、毎秒 12.5 ギガヘルツのレートで時系列データ処理が可能であることを示した[3]。また、

本提案の光ニューラルフィールドコンピューティングは、波長多重化により、独立した複数のタスクを同時に処理可能であるため、そのデモとして、2つの独立な通信信号の並列的な同定が可能であることを示した[3]。このような独立したタスクの同時処理は、光波動現象を利用する本提案の特徴である。

高速・省電力光リザバー計算回路の実現: 上述の原理実証実験系を参考にして、光ニューラルフィールドをシリコンチップ上で生成するデバイスを作製した[1]。この光デバイスでは光ニューラルフィールドをサブミリ角スペースの微小領域にて、光伝搬現象に任せて容易に生成できる。すなわち、光の(仮想)ニューロンを微小領域に高密度かつ大規模に実装できる。これにより、実効的に大規模なニューラルネット的処理を低消費電力・低レイテンシで実行可能となることを示した[1]。具体的には、本提案の光回路により生成した光ニューラルフィールドを用いてリザバー計算が可能となることを示した。最先端の光回路と比較して、少なくとも 60 倍以上の高速性、電子回路の 100 倍以上の省エネ性を実現できる可能性を示した。

高速イメージ認識システムへの展開: 上記で述べた光リザバー計算回路は、外界からの光情報を直接、光で処理するときには有効と考えられる。本光リザバー計算回路の応用として、ナノ秒現象を直接、光でセンシングして情報処理する超高速認識システムへの展開を検討した。そのための基盤技術として、ゴーストイメージングのように測定対象の視覚情報をランダムマスクにより時系列信号へと変換させる技術を開発した[4]。本研究で開発した光ランダムパターン生成器は、従来デバイスと比較して 10 万倍以上のレートでの高速ランダムパターン生成が可能であるため、高速に時系列データへの変換が可能である。変換された光時系列データは光リザバー計算回路にて処理される。本研究では、1.78GHz のレートでイメージ認識が可能となることを実証した(論文執筆中)。なお、その他にも、光通信で重要となる光位相の高速推定処理やマルチモーダルセンシングへの展開も示した(2)詳細参照)。

深層学習的処理を取り入れた高度化: 光波動のような動的システムの最適制御の観点から、最適制御理論に基づく深層学習的処理スキームを提案した[5]。この手法を用いることで、リザバー計算のように動的システムを用いる情報処理の更なる高度化が可能となる。

以上のように、光波動コンピューティングの原理実証、高度化手法の確立、デバイス作製から、他にはない高速光センシングへの展開までの基盤技術の確立が本研究の主要な成果である。

(2) 詳細

本研究は、上述の3つの研究課題に対して研究を進め、それぞれ次のような成果を得た:

研究テーマ(1): 光波動を生かすリザバーコンピューティング(光波動コンピューティング)原理実証とプログラマブル化に向けた制御理論の確立

1-1. 光ニューラルフィールドという概念を導入した。図1のように光ニューラルフィールドは空間連続な光ネットワークとして機能し、マルチモード導波路においてスペckル場として自発的に生成可能である。研究開始当初の原理検証実験では、汎用的な光通信コンポーネントであるマルチモードファイバを用いて光ニューラルフィールドを生成し、既存研究と比較して最速の毎秒 12.5 ギガヘルツのレートで時系列データ処理が可能であることを示した[3]。また、本提案の光コンピューティングは、波長多重化により、独立した複数のタスクを同時に処理可能である

ため、そのデモとして、2つの独立な通信信号の並列的な同定が可能であることを示した。

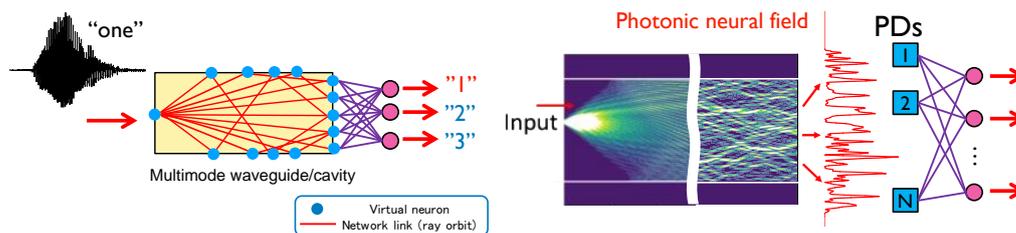


図 1.光ニューラルフィールドとそのリザーバー計算。右図のように、マルチモード導波路において光ネットワークと対応する波動場を効率的に生成でき、その波動場をリザーバー計算に利用可能(左図)。

1-2. リザーバーコンピューティングは、動的システムを用いたコンピューティングである。動的システム部分を固定化して、リードアウト部分の重みのみを学習対象とすることで学習の簡素化が可能となる点が最大の特徴である一方で、まだ簡単なタスクにおいてでしか予測・認識が達成できないという欠点がある。本研究では、動的システムの時間発展を層から層への情報伝搬とみなし、その最適制御を用いることで深層学習の情報処理が達成可能となる理論的な枠組みを構築した[5]。本手法の特徴は、遅延を有するシステムを利用することで、少数の制御信号で従来のリザーバー計算を上回る認識処理が可能となることである。多くの光ニューラルネットワーク回路が作製されているが、大規模な回路とする場合に、多くの学習パラメータを必要とする。しかし、本手法は、少数個の制御信号のみで同等の性能を達成できる。このことを簡単な光電気遅延システムを用いて示し、その実証実験も行なった(論文準備中)。

研究テーマ(2):光波動コンピューティングのオンチップ化

2-1. 光波動の空間的自由度を活かして光ニューロンを微小領域中に高密度かつ大規模に実装できる光回路を設計・試作し、これを用いてリザーバー計算が超高速かつ低消費電力で実現可能であることを示した[1]。本研究で開発した光回路では、空間的に連続に分布する光のニューロンの“場”を形成できるため、原理的に光波長スケール(数百ナノメートル)の間隔で(仮想)光ニューロンが配置されたような実装が可能となり、その高密度性を活かして最先端の光リザーバー回路チップの60倍以上の高速性、電子回路の100倍以上の省エネ性を実現できる可能性を秘めていることを明らかにした。図2に本提案の光リザーバー計算回路の概略図やコンピューティング結果の一例を示す。スパイラル型の結合マルチモード導波路構造により、ランダム結合された光ニューラルネットを4mm²内の微小領域内で高密度かつ大規模に実装可能であり、それを情報のリザーバーとして利用して、毎秒12.5ギガサンプルのレートでの時系列データ処理を示した。また、本提案の光リザーバー計算回路は、入力光の位相に敏感に応答するという特異な性質があり、これを利用することで、光位相変化の高速センシングが可能であることも示した[1]。

2-2. 光微小共振器構造を利用することで、更に高密度に光ニューラルフィールドを分布可能である。本研究では、古典・量子カオス分野でカオスピリヤードとして知られるスタジアムビリヤ

ードを設計し[2]、シリコンフォトニクスにより作製して、それを利用することで既存研究の1万倍の高密度実装が可能であることを示した(論文執筆中)。また、さまざまな形状の光ビリヤード(光微小共振器)を作製し、光閉じ込め効率が高く、光ミキシング効果が高い形状を有する場合に、時系列データの情報処理能力が最大となることを明らかにした。これらの結果は、今後のデバイス構造の改良に向けた重要な指針となる。

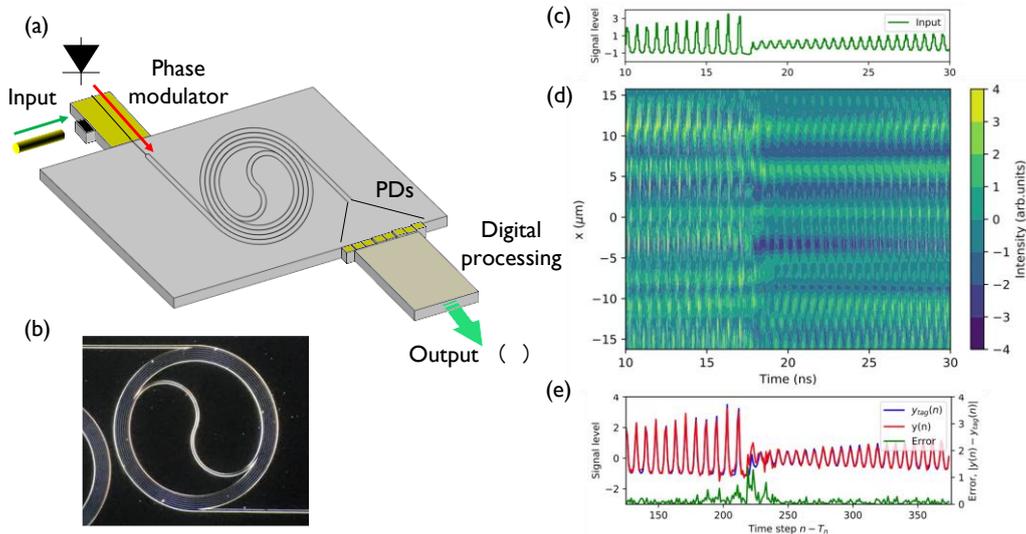


図 2: (a)光リザーバー計算回路の概略図。(b)作製した光リザーバー計算回路の写真。(c-e)カオス時系列データの予測結果。(c)入力波形、(d)光リザーバーの応答ダイナミクス、(e)演算結果とエラー。

研究テーマ(3):光波動コンピューティングの応用展開

3-1. 通常、センシング対象のイメージを処理する場合、イメージセンサで電気信号に変換する必要があるため、全体的な処理レートはイメージセンサのフレームレートで制限される。本研究では、外界の視覚情報を数十ギガヘルツのレートで取得し、光リザーバー計算回路で光信号のまま処理するシステムを構築した(論文執筆中)。このシステムでは、センシングしたい対象に光のランダムパターンを高速に投影する。その反射光は対象のイメージの情報を含む時系列データに変換されるため、時系列データの処理が得意な光リザーバー計算回路にて、光のまま処理可能となる。通常、光マスクパターンは DMD や SLM のような機器を用いることで作成できるが、そのレートはせいぜい数十 kHz である。一方、本研究で開発した光ランダム(スペックル)パターン投影システムは数十 GHz でのパターン生成が可能である。論文[4]では、数 GHz レートでのスペックル投影が可能であること、変換された時系列データをニューラルネットの入力とすることで、投影対象のイメージ認識が可能であることを示した。また、最近では、本光スペックル投影システムと 2-2.で述べた光リザーバー計算回路を組み合わせることで、1 ナノ秒以下の時間スケールで生じる現象が認識できることを示した。まだ改良が必要であるが、本システムは、原理的にサブナノ秒にせまる高速現象の認識、異常検知、トラッキング、制御などに応用可能であると考えている。

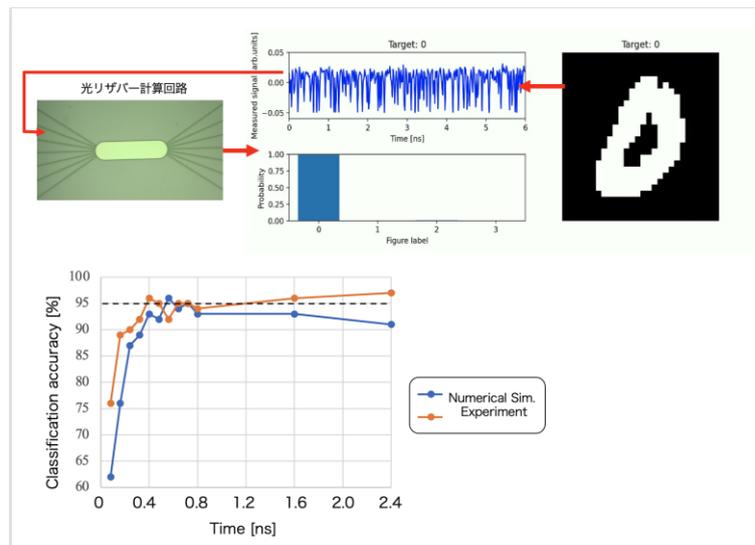


図 3. (上)光リザバー計算回路を用いたイメージ認識。(下)MNIST 手書き文字認識に対する分類性能の時系列時間との関係。

3-2. 光の波動性を利用することで、上述のイメージ認識だけでなく、外界の多様な情報・刺激を同時にセンシング可能となることも示した[6]。このセンシングの基本アイデアは、外界からの刺激に対して敏感に応答するソフトマテリアル中の光散乱を利用して、スペックル現象を生成することである。このときスペックルパターンには、さまざまな刺激情報がエンコーディングされているため、それを機械学習によりデコーディングすることで、情報が抽出できる。本研究では、シリコン中のスペックルを光リザバーとして利用することで、接触力、位置、温度といった複数の物理量を、1つの光リザバーにより同時に且つ高精度に取得できることを示した。また、このような光マルチモーダルソフトセンサをロボットハンドに搭載して、微細な凹凸情報を感知できる触覚センサとして利用できることも示した(論文執筆中)。

[1] 代表的な論文 2

[2] S. Sunada and A. Uchida, *Scientific Reports* 9, 19078 (2019).

[3] S. Sunada, K. Kanno, and A. Uchida, *Optics Express*, 28(21), 30349 (2020).

[4] 代表的な論文 1

[5] 代表的な論文 3

[6] S. Shimadera et al., *Scientific Reports* 12, 13096 (2022).

3. 今後の展開

まずは、情報の取得から処理までを一気通貫で実行できる光コンピューティングの実現を目指す。そのための重要な課題としては、もっと汎用的な使用が可能となる光リザバー計算のプログラマブル化、後段処理で使用するプログラマブル光回路、高周波回路との光電融合等がある。これらの課題の解決を目的の一つとして、学術変革領域 A「光の極限性能を生かすフォトニックコンピューティングの創成」の計画研究(2022-2026 年度)を今年度より実施中である。本学術領域では、

コンピューティングアーキテクチャから光デバイス、そして理論物理学者までの様々な研究者が集まっているため、多様な視点で開発をすすめ、独自性の高いフォトニックコンピューティングの創成に向けた研究が実施できると考えている。

次に、上述の研究テーマ(3)に関連した本研究の展開として、これまで測定が困難であったサブナノ秒スケールの超高速現象をとらえ、認識・予測・判断そして、現象のイメージ再構成までも可能にする新奇の光システムの構築を目指す。この超高速性は、光の多重化技術、すなわち、波長・偏光・空間多重化をうまく組み合わせ合わせた並列処理により可能になると期待できるため、そのような多重化が可能な光回路入力部の検討やそのためのプログラマブル光回路作製を行う。原理検証用の光回路としては、4.5年での開発を目指す。また光だけでは処理が困難な処理については、超高速高周波回路との光電融合をすすめ、上述の光イメージ認識システムを構築する。2030年頃までには、このシステムを用いた超高速トラッキングや光制御への応用を切り開く。

様々な共同研究を通じて、理論基盤を固めつつ、将来的に科学技術を切り拓くような光コンピューティング技術の開拓を目指す。

4. 自己評価

研究目的の達成状況：光波動現象の高次元性にに基づくコンピューティング手法の実証、光リザバー計算回路の実現、そして光センシングとの融合に関して、当初の目的通りの成果が概ね達成できたと考えている。また、本さがけ研究を通じて、最適制御に基づく動的システムを利用したコンピューティング手法の確立や、高速イメージ認識処理の実証という独自性の高い成果も得られた。(これらの成果については、Optica 等のインパクトファクタの高い論文誌への掲載だけでなく、さがけ期間中に国内外から合計 14 件の講演依頼をいただき、本研究をアピールできた。また、学会誌の解説記事や書籍等で、光コンピューティングに関する研究動向を含めて本研究分野の進展を紹介する機会も頂いた。)一方、本研究はデバイス・回路レベルで基盤技術の確立を目指すものであったため、それらを統合したシステムレベルの研究には至っていない。よりインパクトの高い成果にするには、光コンピューティングシステムを実際につくり、システムレベルでの評価が必要であり、これらは今後の課題として残っている。

研究の進め方：光の波動性を生かす計算の枠組みは、まだ発展途上であり、理論基盤から回路製作まで幅広く研究を行う必要があった。そのため、国内外の様々な研究グループとの議論や共同研究を通じて研究を推進してきた。研究費の大部分は、光回路評価のための装置(高速オシロスコープ、波形生成器等)の購入をあてた。なお、研究期間中に COVID-19 の感染拡大により、光回路試作が大幅に遅れるなどの事態があったが、試行錯誤しつつ研究を進めることができた。また、研究テーマ(3)については、研究開始当初は高速光通信分野への展開を想定していたが、よりインパクトの高い成果を目指し、他の光システムでは達成困難な高速イメージ認識への応用に集中する方向にシフトした。

研究成果の科学技術及び社会・経済へ波及効果：現在、光を用いたコンピューティング(特に光のニューラルネット)回路の開発は、世界的に多くの研究がなされている。通常、1次元的な光配線(導波路)構造により光ニューラルネット回路が作製されているが、スケーラビリティに致命的な課題を有している。一方、本研究では、高次元の波動現象に注目し、光ニューラルフィールドという新しい概念を導入し、スケーラビリティが高く、最先端光回路を超える高速性と省電力性を兼ね

備えた光リザバー計算回路を実現した。これが本研究の主要成果の1つであり、今後の光ニューラルコンピューティングの基盤技術の一つとなり得るものと考えている。また、本研究では、光ランダムプロジェクションという独自性の高い技術も開発し、光リザバー計算回路と組み合わせ、視覚情報を圧縮して光のスピードで認識処理可能なシステムの実現に向けた重要な結果も得ることができた。これは、これまで測定困難だった超高速現象を分析可能なものとして新しい知見を与えることができ、今後の科学技術の発展に寄与できる重要な成果と考えている。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 12件

1. J. Hanawa, T. Niiyama, Y. Endo, and S. Sunada*, "Gigahertz-rate random speckle projection for high-speed single-pixel image classification," *Optics Express* 30, 22911 (2022).

(※Corresponding author: 研究提案・実験系構築・論文執筆を担当し、本研究を主導) GHzレートでの光ランダム(スペckル)パターン生成に関する成果である。ランダムパターン生成は、ゴーストイメージング(単一画素イメージング)のように、視覚情報を時間信号に変換するために利用されるが、通常はkHzオーダーのパターン生成しか成し遂げられていなかった。本研究ではその生成レートを10万倍以上向上させる手法を開発し、簡単なファイバ実験系にて、その高速生成を世界で初めて実証した。本研究成果は、外界のイメージを直接光で取り込み、光回路で処理するために有効である。

2. S. Sunada and A. Uchida, "Photonic neural field on a silicon chip: large-scale, high-speed neuro-inspired computing and sensing," *Optica* 8(11), 1388-1396 (2021).

光の波動的振る舞いを空間連続的に分布する人工ニューロン場としてみなす光ニューラルフィールドと概念を導入した。光ニューラルフィールドをシリコンフォトニクス上で生成し、それをリザバー計算に用いることで、その大自由度性を活かして時系列データの高速処理が可能であることを示した。また、その光リザバー計算プロセスにはエネルギー消費をほとんど伴わないため、超高効率な演算が可能となる特徴も示した。本提案の光ニューラルフィールドにより、コンピューティングや光物理量(例:位相)の高速センシングが可能となることも議論した。

3. G. Furuhashi, T. Niiyama, and S. Sunada*, "Physical Deep Learning Based on Optimal Control of Dynamical Systems," *Physical Review Applied* 15, 034092 (2021).

(※Corresponding author: 研究提案・理論構築・論文執筆を担当し、本研究を主導) 多層ニューラルネットにおける層から層への情報伝搬と力学系の時間発展との数理的な類似性に基づき、最適制御された動的な物理システムに深層学習的処理を担わせるフレームワークを提案・開発した。特に遅延を伴うシステムでは、少数個の制御パラメータを用いて高い性能の学習が可能であることを示した。本成果で開発された最適制御手法は、光電融合システムでの学習の高度化などに有効である。

(2) 特許出願

研究期間全出願件数: 1件(特許公開前のものも含む)

1	発 明 者	砂田哲、新山友暁、花輪仁成
	発 明 の 名 称	分析方法、及び分析システム

出 願 人	国立大学法人 金沢大学
出 願 日	2022/10/11
出 願 番 号	特願 2022-163205
概 要	光ランダムパターンの高速生成に関する発明である。高速に生成された光ランダムパターンを用いることで、視覚情報を時系列信号に高速に変換可能となる。取得した時系列信号から画像再構成や光回路との結合により高速認識が可能となる。これにより、イメージセンサのフレームレートに制限されないサブナノ秒に迫る超高速のイメージ処理を可能となる。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- プレスリリース(2件)

2020/9/29 「光の波動で AI 計算！超高速・並列 AI 処理の実現に向けた大きな一歩」

2021/11/2 「小脳を模した光ニューラルネット回路:超高速・省電力の光リザバー計算チップを実現」

- 招待講演

S. Sunada, G. Furuhashi, and T. Niiyama, “Physical deep learning based on dynamical systems,” IEEE Nanotechnology council, TC-16 Quantum Neuromorphic and Unconventional Computing (2021).

S. Sunada, “Neuro-inspired photonic computing based on multimode waveguides,” The 12th International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP2021) (2021).

S. Sunada, “Photonic neural field dynamics and deep learning,” International Symposium on Physics and Applications of Laser Dynamics 2021 (IS-PALD2021).

-書籍(分担執筆): 砂田哲, “光ニューラルネットワークとリザバー計算回路による光アクセラレーション,” 次世代高速通信に対応する光回路実装、デバイス開発(技術情報協会) 2022