

光ニューラルネットコンピューティング基盤の創成

Development of photonic neuro-inspired computing

金沢大学	砂田 哲
研究期間	2023年4月1日～2024年2月1日
滞在研究機関	Optique department/OPTO team, Institut FEMTO-ST 15B Av. des Montboucons, Besançon, France.
共同研究者等	Dr. Daniel Brunner
区分	個人 B

Recent advancements in artificial intelligence (AI) technology are progressing rapidly, profoundly impacting society. The neural network, a model inspired by the brain's neural circuits, lies at the heart of AI, facilitating inference through information propagation. This process, however, demands extensive computation and power. With the apparent limits of recent semiconductor fabrication technologies, the exploration of new computing technologies to usher in the post-Moore era has become crucial. Computing technologies utilizing light as the information carrier are emerging as promising solutions for accelerating AI computations and reducing power consumption, despite the presence of significant challenges. This research, in collaboration with Dr. Daniel Brunner, aims to advance a scalable optical neural network computing technology for high-speed and energy-efficient information processing. We have developed an innovative optical neural network system that supports nonlinear information processing in a spatiotemporal domain. As a proof-of-concept, it has successfully demonstrated high-speed image recognition and reconstruction at a nanosecond timescale.

研究目的

最近の人工知能(AI)技術は凄まじい勢いで進展しており、社会全体に大きなインパクトを与えている。AIの根幹は脳の神経回路網の働きを単純化したニューラルネットワークであり、ネットワーク内の情報伝播に関する計算に基づき推論を可能にする。しかし、それには膨大な計算と電力が必要とされる。一方、最近では半導体微細化の限界が指摘され始めており、ポストムーア時代を支える新しいコンピューティング技術の開拓が望まれている。その中で光を情報キャリアとするコンピューティング技術がある。これはAI計算を高速化・省電力化する技術として大きな注目を集めているが、その実現には多くの課題が山積している。本長期滞在の目的は、申請者の光ニューラルネットコンピューティング技術[1]を発展させること、及び本分野をリードする Daniel Brunner 博士との共同研究を進めるためである。具体

的には、Brunner 博士の 3次元光造形技術[2]を融合したスケラブル・ニューラルネット型のコンピューティング技術の開発を当初の目的とした。

研究経過

当初の予定に従い、4月初旬から D. Brunner 氏の 3次元光造形手法を用いた光デバイス構成を想定してデバイスのデザインやそのためのシステムの構築に関する研究に従事していた。しかし、現在、ニューラルコンピューティングの分野は世界的に大きな盛り上がりを見せており、凄まじいスピードで新規デバイス開発が進んでいることを鑑みて、Brunner 氏が精力的に開発を進める Large area vertical-cavity surface-emitting laser (Large area VCSEL)[3]と呼ばれる2次元面で発光可能なデバイスを用いて光ニューラルネット型コンピューティング技術の開発を進める方向にシフトした。(※ 当初の予定から研究方法は

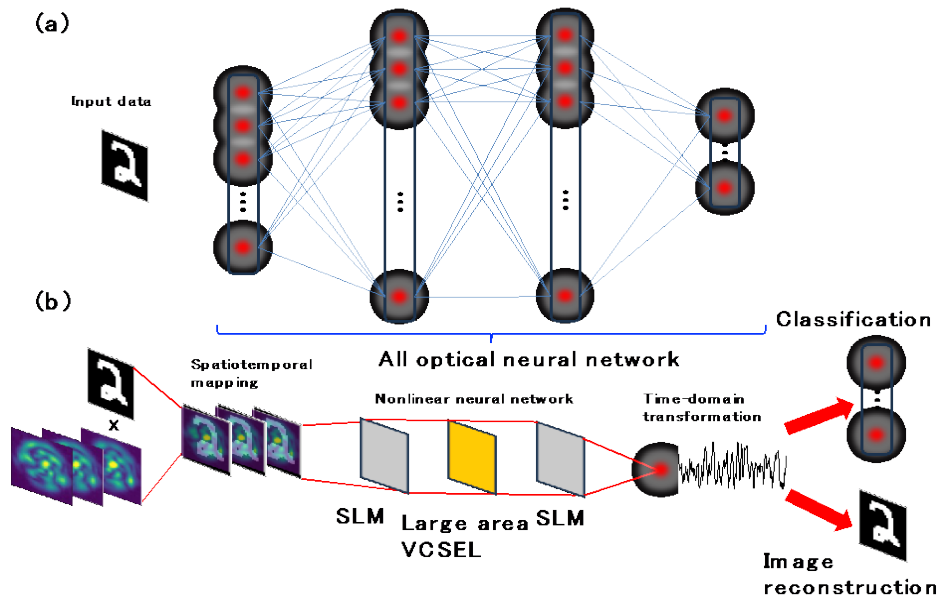


Fig.1 (a) Optical neural network. (b) The proposed optical neural network system. (Nonlinear spatiotemporal neural network based on large area VCSEL.

異なるが、研究目的が異なるわけではない。)

図 1 にニューラルネットワークの概略図とその実装について示す。図 1(a)で示すように、各ニューロンとその相互作用が全て光で処理されるシステムの構築を目指している。本研究で提案する実装方法を図 1(b)で示す。Large area VCSEL をニューラルネットワークの非線形性として利用し、空間位相変調器により各ニューロン間の相互作用を制御する。このようなシステムでは、Large area VCSEL の非線形性、高次元性をフルに利用できる。しかし、光は空間的な自由度だけでなく時間的な自由度も情報のエンコーディングに利用可能である。その発想のもと、砂田が提案する時間領域における入力情報のエンコーディング方法[4]を合わせて、時空間・非線形光ニューラルネットワークの構築およびそのイメージ処理機能の実証実験に取り組んだ。なお、本研究は Brunner グループの Anas Skalli 氏の協力を得て実験系の構築などを行ってきた。

本研究の目的達成に向けて、以下の課題に取り組んだ。1) Large-area VCSEL の基礎特性の評価、2) 時空間光ニューラルネットワークシステムの構築、3) 光ニューラルネットワークのオンライン学習アルゴリズムの実装、4) イメージ認識・イメージ再構成機能の実証。それぞれの課題に取り組んだ時期および研究成果は次のようにまとめられる。

1) 5 月頃～7 月頃：Large area VCSEL の基礎特性の評価：本研究で用いた Large area VCSEL は直径数十 μm 領域において波動カオス的な状態を生成する。これは光ニューロン間に仮想的に複雑なネットワークが形成しており、入力光の波長に対して極めて敏感にその発光パターンを変化できる。波長可変レーザーからの入射光を本レーザーデバイスに入射させ、その鋭敏性を調べた結果、これまで開発してきたマルチモード導波路型の複雑ネットワークデバイスの 3 倍以上になることを明らかにした。また、ニューラルネットワークのような非線形演算がレーザーの非線形性により自然に導入できる。これらの結果は、入力光情報に極めて鋭敏に応答する非線形の複雑ネットワークがコンパクトなシステムとして構築できることを示唆している。

2) 9 月頃～12 月頃：Large area VCSEL を用いた時空間光ニューラルネットワークシステムの構築：Large area VCSEL では空間上に仮想的にニューロンを分布させるのに有効である。その空間自由度に加えて、砂田がこれまで開発してきた時間領域に仮想ニューロンを展開させる手法[4]を融合することで、時空間自由度を利用した極めて大規模な光ニューラルネットワーク型コンピューティングができる。このアイデアのもと、Large area VCSEL 評価システムに、高速位相変調器を用いた高速ランダムパターン投影システムを融合させ、実イメージを光のまま処理でき

る超高速・スケーラブル時空間光ニューラルネットワークのシステムを構築した。

3) 7月頃～12月頃：光ニューラルネットワークのオンライン学習アルゴリズムの実装：2)で開発したシステムは大規模な情報処理を得意とするが、通常の学習アルゴリズム（例：誤差逆伝搬法）などを用いて学習させる場合にはVCSELの詳細情報を必要とするが、そのためには精密な測定が必要となる。またネットワーク規模に伴い更にその測定コストは大きくなるという問題点があった。そこでシステム情報の詳細を必要としない学習アルゴリズムとして、進化戦略的アルゴリズムとSPSAと呼ばれるランダム摂動を用いる学習アルゴリズムを採用し、それらの効果について調べた。その結果、SPSAではランダム摂動を用いて、たった2回の測定で勾配を近似的に表現できるため、進化戦略に比べて学習時間も短く、さらに認識性能に対する有意な劣化も確認できないことがわかった。よって、下記の検証実験で用いるべき学習アルゴリズムを決定した。

4) 12月頃～1月頃：イメージ認識・イメージ再構成機能の実証：上記で述べた時空間システム的应用では、外界の視覚情報を光の時系列情報として圧縮的に変換できる。よって、その時系列情報から対象のイメージを認識したり、そのイメージを復元したりできる。3)で開発したオンライン学習手法と合わせて、あるディスプレイに写したMNIST手書き数字が約90%の精度で認識できることを示した。この手法では、イメージを数ナノ秒の時系列データに変換し、高速なイメージ認識が可能となる。なお、本手法の圧縮変換効率は、以前に開発した時間領域イメージ処理手法よりも高くできる。VCSELを用いた場合、それを利用しない場合と比較して、比較的に高い圧縮率に対しても高い分類性能を維持できていた。また、本手法はイメージ認識だけでなく、その時系列データからイメージが復元できることも示した。これは通常のカメラでは捉えきれない超高速現象の視覚情報も高速に圧縮でき、さらにそれを復元できることを示唆している結果である。

考察

約10ヶ月の期間を通じて、時空間光ニューラルネットワークシステムとそのイメージ処理機能の実証に関する研究に取り組んだ。本研究で開発した時空間光ニューラルネットワークは、従来の光ニューラルネットワークとは異なり、空間と時間領域の情報を同時に利用するため、大規模な演算が可能である。また、Large area VCSELの非線形性をそのまま情報処理に利用できるため、従来の行列演算のみに特化した光ニューラルネットワークと異なり、光電変換を必要することなくニューラルネットワーク的な処理が可能となる。さらに外界の視覚情報を光のまま処理することができるため、高速なイメージ認識やイメージ再構成が可能となる。このような機能を有する光ニューラルネットワークは、ほかにないため、新規性の高い成果といえる。今後、論文にまとめて公表する予定である。

また、Brunner博士やSkalli博士らとの議論を通じて、本研究で開発した光ニューラルネットワークは高速なプロジェクタとしても利用可能であることを見出した。高速プロジェクタは、イメージングやセンシングなど非常に多様な応用に展開できるため、本アイデアを形にできれば、非常に大きなインパクトを与える成果になると期待される。そこで、Large area VCSELをベースとする再帰型の光ニューラルネットワークでイメージをデータから高速に生成・切り替えできるシステムをデザインして、数値計算によりプロジェクション利用の可能性を示唆する結果を得た。これは基盤技術からの開発が別途必要となるため、本研究プロジェクトとは独立して、今後の展開をD. Brunner氏と検討中である。

参考文献

- [1] 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 (2021).
- [2] J. Moughames, X. Porte, M. Thiel, G. Ulliac, L. Larger, M. Jacquot, M. Kadic, and D. Brunner, "Three-dimensional waveguide interconnects for scalable integration of photonic neural networks," *Optica* 7, 640 (2020).
- [3] X. Porte, A. Skalli, N. Haghghi, S. Reitzenstein, J. A. Lott, D. Brunner, "A complete, parallel and autonomous photonic neural network in a semiconductor multimode

laser,” J. Phys.: Photon. 3(2), 024017 (2021).

[4] T. Yamaguchi, K. Arai, T. Niiyama, A. Uchida, and S. Sunada, “Time-domain photonic image processor based on speckle projection and reservoir computing,” Commun. Phys. 6 250 (2023).

研究の発表

口頭発表

1. S. Sunada and T. Yamaguchi, “Time-domain image processing using photonic reservoir computing,” EOS Annual Meeting (EOSAM) 2023, FS4 SO2, Dijon, France (2023),

2. S. Sunada, A. Roehm, and T. Niiyama, “Neural time-delay dynamics trained without backpropagation,” International Conference on neuromorphic, natural, and physical computing (NNPC 2023), Hannover, Germany (2023).
3. S. Sunada, “Wave chaos meets physical computing: Optical reservoir and its applications,” Seminar at Chemnitz University of Technology, Chemnitz, Germany (2023).

誌上発表

なし