

複雑系フォトンクスに基づく光 AI: 光リザーバーコンピューティングの進展 Photonic intelligence based on complex photonics: Progress in optical reservoir computing

埼玉大 [○]内田 淳史 菅野 円隆

[○]Atsushi Uchida and Kazutaka Kanno, Saitama Univ.

E-mail: auchida@mail.saitama-u.ac.jp

はじめに: 近年、リザーバーコンピューティングと呼ばれる物理現象を用いた機械学習方式が注目を浴びている[1,2]。リザーバーコンピューティングは、従来のリカレントニューラルネットワーク内の結合の重みをランダムに固定し、ネットワークの出力の重みのみを学習することで実装を容易とする方式である。本方式は、ネットワークの構造を固定しても、出力の重みのみを学習だけで人工知能が実現できるため、内部構造が固定された物理システムにおいても適用可能である。そのため光のみならず電子回路や磁気スピン、ソフトマテリアルを用いたリザーバーコンピューティングが提案されている[2]。

さらに、時間遅延フィードバックを有する非線形素子を用いてリザーバーの仮想ネットワークを構成する手法が提案されている[3]。本手法により、従来のように複数の素子を多数結合してネットワークを構成する必要がなくなり、単体の非線形素子と時間遅延フィードバックのみを用いてリザーバーコンピューティングが実現できる[3,4]。さらには非線形素子として半導体レーザを用いることで、GHz 以上の高速な情報処理が実現可能となる[4]。

そこで本稿では、半導体レーザを用いたリザーバーコンピューティングの研究について述べる。特にリザーバーコンピューティングの小型化を目的として、半導体レーザや光増幅器、反射鏡等を一体化した光集積回路を用いたリザーバーコンピューティングの実験結果について示す。

方法と結果: 本実験で用いた光集積回路について述べる。半導体レーザ、光増幅器、位相変調器、光導波路、および反射鏡を一体化した光集積回路を用いる[5]。光集積回路は半導体レーザと反射鏡までの距離が 10.6 mm と短いことが大きな特徴である。また、光増幅器への注入電流値を増幅させることで戻り光の強度を調節することが可能であり、現在の入力に対して過去の出力の影響（記憶効果）を持たせることができる。

光入力用の半導体レーザと外部の位相変調器により変調信号を作成し、光信号に変換して光集積回路に注入する。光集積回路の出力は、注入された半導体レーザ光と内部の反射鏡による戻り光を受けた過渡応答を示し、オシロスコープを用いて出力の時間波形を取得する。出力部では、リザーバー部で得られた光集積回路の出力の時間波形に対して、一定間隔 θ ごとの値から N 個の仮想ノード状態として定義する。ノード状態の重み付き線形和を計算することで最終的なリザーバーの出力を得る。ここで、重みは学習により理想の出力を一致するように最小二乗法で予め決定しておく。

本研究で用いる光集積回路の遅延時間は $\tau = 0.254$ ns と非常に短いため、仮想ノードを数個程度しか定義できず、十分な学習が行えない。そこ

で本研究では、以下の 2 つの提案手法を用いて、ノード数の増加を実現する。1 つ目は、マスク間隔 $\theta_M (= 0.04$ ns) よりもノード間隔 θ を短い時間に設定し、1 つのマスク値から細かくノードを生成する。2 つ目は、遅延時間 τ を複数回ループさせた出力から仮想ノードを定義する。この場合、 k 回の遅延ループに対応する時間波形から仮想ノードを生成することで、ノード数は kN となる。つまり、遅延ループ回数の増加に対して、ノード数を線形に増加させることができる。

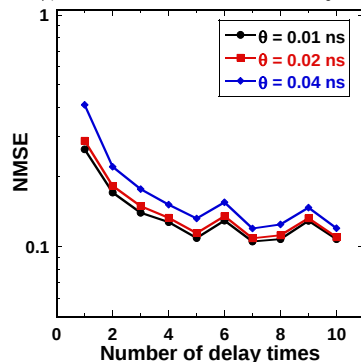


Fig. 1 Prediction error (NMSE) as a function of the number of multiple delay times.

本研究では時系列予測タスクを用いてリザーバーコンピューティングの性能評価を行った。遅延ループ数に対する予測誤差(Normalized Mean Square Error, NMSE)の実験結果を Fig. 1 に示す。遅延ループ数が増加するにつれて予測誤差が低減し、遅延ループ数が $k = 5$ 程度で誤差の低下が飽和した。また、ノード間隔 θ をマスク間隔 $\theta_M = 0.04$ ns よりも短くすることで予測誤差が低下していることが分かる。このように、外部共振器長の短い光集積回路において、予測誤差を低減させることができた。さらに記憶容量を増加させるために、半導体レーザを並列化したリザーバーコンピューティングも提案されている[6]。

おわりに: 本研究では、リザーバーコンピューティングの小型化のために、光集積回路を用いたリザーバーコンピューティングの実験結果について示した。遅延ループ回数を増加させて、時系列予測タスクの性能向上を実現した。

参考文献

- [1] H. Jaeger and H. Hass, Science **304**, 78 (2004).
- [2] G. Tanaka, et al., Neural Networks **115**, 100 (2019).
- [3] L. Appeltant, et al., Nat. Commun. **2**, 468 (2011).
- [4] D. Brunner, et al., Nat. Commun. **4**, 1364 (2013).
- [5] K. Takano, et al., Opt. Express **26**, 29424 (2018).
- [6] C. Sugano, et al., IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron. **26**, 1500409 (2020).