位相変調された戻り光を有する半導体レーザに基づく リザーバコンピューティング

Reservoir computing based on an external cavity semiconductor laser with feedback-phase modulation

¹福岡大,²埼玉大 ⁰菅野 円隆¹, 内田 淳史², 文仙 正俊¹

¹Fukuoka Univ., ²Saitama Univ. [°]Kazutaka Kanno, Atsushi Uchida, and Masatoshi Bunsen E-mail: kkanno@fukuoka-u.ac.jp

はじめに: 人工知能の研究開発に注目が集まる中, ハードウェア依存型の情報処理手法の研究もさかん に行われている[1]. その1つとして戻り光を有する 半導体レーザを用いた光リザーバコンピューティン グ(Reservoir Computing,以下RC)が知られている[2]. RCは機械学習に基づく情報処理手法の一種であり, たくさんのノードから構成されたネットワーク(リザ ーバと呼ぶ)に信号を入力した時に得られる応答から 信号の予測や分類を行う. レーザを用いた光RCでは ネットワークの代わりに戻り光を有する半導体レー ザを用いる.このシステムにおいてノードは戻り光の 遅延時間を微小間隔で区切ることにより仮定される. この手法はリザーバがレーザと時間遅延ループのみ から構成されるため,実験実装が比較的容易である.

半導体レーザを用いた光RCにおいてレーザへの信 号入力は外部からの入力光を介していた[2].本研究 では戻り光位相変調を介してレーザに信号を入力す る.この方法は光入力用のレーザを必要としないため システムを簡素化できる.さらに位相変調と強度変調 を比較し位相変調の方が高い情報処理精度を得られ ることを数値シミュレーションにより示す.

<u>RCの手法と数値モデル</u>: RCは前処理部, リザーバ, 後処理部からなる(Fig.1参照).前処理部では入力信 号(離散信号)にマスクを付加する.マスクは長さT =20 nsの信号であり,入力信号の各点に乗算する.リ ザーバは戻り光を有する半導体レーザである.戻り光 の遅延時間 τ はTと一致させる.レーザの出力光強度を 時間的に区切ることでノード状態値を取得する.この 時間間隔をノード間隔 θ (= 0.1 ns)と呼ぶ.この時ノ ード数Nは $N = \tau/\theta = 200$ となる.後処理部ではノー ド状態値の重み付き線形和をRCの出力として計算す る.重みは学習過程でRCの出力と理想信号の差が小 さくなるように最小二乗法を用いて決定する.

戻り光を有する半導体レーザの時間ダイナミクス は以下に示すLang-Kobayashi方程式[3]と呼ばれる数 値モデルを用いて調査することができる.

$$\frac{dE}{dt} = \frac{1+i\alpha}{2} \left[\frac{G_N(N(t) - N_0)}{1+\varepsilon |E(t)|^2} - \frac{1}{\tau_p} \right] E(t) +\kappa E(t-\tau) \exp[i(-\omega\tau + s(t))] + \xi(t)$$
(1)

$$\frac{dN}{dt} = J - \frac{N(t)}{\tau_{\rm s}} - \frac{G_N(N(t) - N_0)}{1 + \varepsilon |E(t)|^2} |E(t)|^2$$
(2)





ここでEおよびNは複素電界振幅とキャリア密度を表す. 式(1)の第2項は戻り光を表し、 κ は戻り光強度である. s(t)は前処理後の変調信号であり、戻り光の位相を変調 する.強度変調の場合、戻り光強度 $\kappa \delta \kappa \sqrt{1 + s(t)}$ とす る. $\xi(t)$ は自然放出に由来するノイズである.

数値シミュレーション結果: RCの性能評価のため に時系列予測タスクを用いた[4]. このタスクでは赤 外線レーザカオス時系列データの1点先を予測する. 予測誤差を規格化平均二乗誤差(Normalized Mean-Square Error, NMSE)を用いて評価する. NMSEが小さ いほど性能が高いことを表す.

Figure 2(a)は戻り光強度 κ を変化させた時のNMSEの 変化を示している.位相変調(黒の実線)および強度変 調(青の破線)において最小のNMSEはそれぞれ0.031と 0.24であり,位相変調は強度変調よりも予測誤差が小さ い.Figures 2(b)および2(c)はそれぞれ強度変調と位相変調 の場合でNMSEが最も小さくなった時の予測時系列(赤 線)と理想信号(黒線)である.位相変調の場合,黒線と 赤線が良く一致しており,高い予測精度が達成されてい る.以上の結果から,位相変調が強度変調よりも高い情 報処理精度を達成可能であることが明らかとなった.RC は信号を高次元空間に非線形写像する性質が必要であり, 位相変調では光位相から光強度への非線形な変換が生じ ているため高い予測精度が達成されると考えられる.



Fig. 2 (a) NMSE for time-series prediction task as a function of the feedback strength. The target (black) and predicted waveforms (red) are shown in (b) and (c). The feedback strength is $\kappa = 3.9$ in (b) and $\kappa = 2.6$ in (c).

まとめ: 戻り光を有する半導体レーザを用いた RC において戻り光位相変調を介して信号入力を行い, RC の性能を数値シミュレーションにより評価した. 位相変調と強度変調の場合に情報処理精度を比較し た結果,位相変調が高い性能を示すことが分かった. 参考文献

[1] Y. Shen et al., Nat. Photon., **11**, 441 (2017).

[2] D. Brunner et al., Nat. Commun., 4, 1364 (2013).

[3] R. Lang and K. Kobayashi, IEEE J. Quantum Electron., **16**, 347 (1980).

[4] A. S. Weigend and N. A. Gershenfeld, IEEE International Conference on Neural Networks, **3**, 1786 (1993).