

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 18 日現在

機関番号：37111

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K16129

研究課題名(和文) 時間遅延フィードバックを有するシステムを用いた情報処理の性能向上

研究課題名(英文) Performance improvement of information processing based on a delayed dynamical system

研究代表者

菅野 円隆 (Kanno, Kazutaka)

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：10734890

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、物理過程を用いた人工知能の1つである時間遅延光Reservoir Computing (RC)において、情報処理性能の向上手法を提案し、実験・シミュレーションによる実証を行った。この手法では時間遅延された自身のフィードバック信号を有するシステムを2つ用意し、それらを相互結合したシステムを用いる。RCではシステムが入力信号を複雑な信号に変換し、信号の区別を容易にすることに基づいて情報処理を行う。相互結合システムは入力信号をより複雑な信号に変換可能であるため、性能向上が期待できる。RCの性能を時系列予測テストにより評価した結果、既存の手法よりも高い予測精度を達成可能であることを示した。

研究成果の概要(英文)：A novel information processing method based on delayed dynamical systems (DDSs) has been proposed, which is called reservoir computing (RC). In delay-based RC, a DDS is regarded as a recurrent neural network composed of many coupled nodes and virtual nodes are considered in the feedback delay loop by time-multiplexing. In this study, we numerically and experimentally demonstrate RC based on mutually-delay coupled optoelectronic system. We consider N virtual nodes in each two systems, which results in $2N$ virtual nodes. To produce different node states in each systems, we use feedback delay loops with different delay times. We applied a chaotic time-series prediction task to evaluate the processing performance of our system. It is found that our RC system can produce higher prediction accuracy than RC based on a single optoelectronic system.

研究分野：工学

キーワード：リザーバコンピューティング レーザ 時間遅延フィードバック 時系列予測 相互結合システム 機械学習

1. 研究開始当初の背景

近年、情報化社会が進む中で情報処理に関する需要が高まっている。しかしながら時系列の予測や音声信号の分類など、一般的な計算機を用いて処理するには適していない課題が存在する。このような課題に対して、リザーバコンピューティングと呼ばれる脳の機能を模したハードウェアによる情報処理手法が提案されている。これは人工ニューラルネットワークと呼ばれるたくさんのノードを結合することにより構成されたネットワークを用いる機械学習の手法の1つである。ネットワークに入力信号を与えた時に得られる各ノード状態値の重み付き線形和を出力都市、情報処理を行う手法である。この時、出力の重みのみを学習する点がリザーバコンピューティングの特徴である。

近年、非線形システムと時間遅延フィードバックを用いたリザーバコンピューティングの実装手法が提案されている。この方法はフィードバックの遅延時間 τ において微小間隔 θ ごとに仮想的なノードを仮定することでネットワークを形成する。従来のニューラルネットワークのように多数の素子を必要としないため物理的実装が容易である。

リザーバコンピューティングにおける情報処理は、入力信号をニューラルネットワーク(リザーバと呼ばれる)に入力することでより高次元な空間に非線形写像し、異なるクラスに属する入力信号を高次元空間において線形分離可能とすることで情報処理を行う²⁾。既存の時間遅延 RC では、1つの非線形ノードとフィードバックループがリザーバに用いられている。これに対してより複雑なシステムを用いることで、入力信号がより高次元な空間に写像されることが期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、相互に結合された2つの時間遅延ダイナミカルシステムを用いてリザーバコンピューティングを行い、その情報処理性能を向上させることを目的とする。時間遅延ダイナミカルシステムとして、半導体レーザと電気光変調器および光ファイバを用いた光電気システムを構築する。2つの光電気システムを相互に結合したシステムを用いることにより、1つの光電気システムを用いた時よりリザーバコンピューティングの情報処理性能が向上することを示す。さらに相互結合システムを用いることにより異なるタスクを並列に処理することで、処理速度の向上を行う。

3. 研究の方法

- (1) システムの非対称性と情報処理性能の関連性の調査

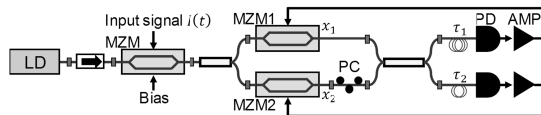


図1 相互結合された光電気システムのモデル図。

本研究では、図1に示す相互結合システムをリザーバに用いる。この利点は2つのシステムの出力からノード状態値を取得できるため、1つのシステムを用いるよりもノード数を増やすことが可能であるという点である。しかしながらこのシステムでは、相互結合された2つのシステムに同じ変調信号を入力するため、2つのシステムが対称である場合に同じ出力を示す。2つのシステムの出力が同じである場合、異なるノード状態値を取得できないため、ノード数を増加させることができない。それゆえにシステムを非対称にすることにより2つのシステムの出力が異なるようにする必要がある。ここでシステムを非対称にするために重要なシステムパラメータとして遅延フィードバックの遅延時間と電気光変調器(MZM)の動作点(Bias)である。したがってこれらのパラメータをどのように設定すべきかを調査する必要がある。しかしながら実験的には遅延時間は容易に変化させることができないため、数値シミュレーションにおいて片方の遅延時間を変化させたときのリザーバコンピューティングの情報処理性能を調査し、遅延時間をどのように設定すべきかを明らかにする。同様に、電気光変調器の動作点への情報処理性能の依存性を調査する。

- (2) 相互結合システムを用いたリザーバコンピューティングの性能の実験的な評価

(1)において、相互結合システムを用いたリザーバコンピューティングの性能が向上する遅延時間を数値シミュレーションにより明らかにした。この遅延時間を用いて実験的にリザーバコンピューティングを行い、その性能を評価する。実験に用いた装置図を図2に示す。本装置を用いてカオス時系列予測テストによりリザーバコンピューティングの

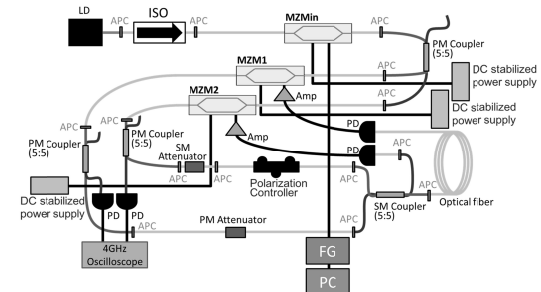


図2 相互結合された光電気システムの実験装置図。

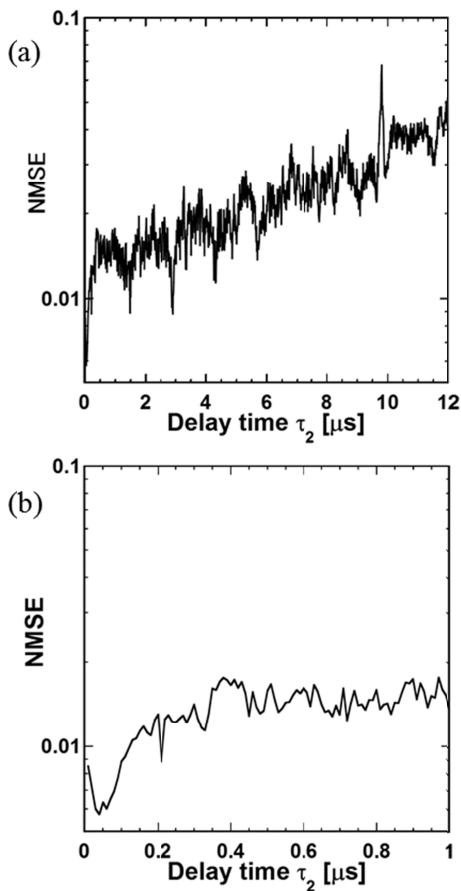


図 3 相互結合システムの片方の遅延時間 τ_2 を変化させた時の予測誤差 NMSE の依存性を示している．もう片方の遅延時間 τ_1 は $9.8 \mu\text{s}$ に固定されている．(b)は(a)の拡大図を示している．

性能を評価する．この時、相互結合システム、並列システム（システム間の相互結合を切断したシステム）、単一システム（結合していない1つのシステム）を比較する．

4．研究成果

(1) システムの非対称性と情報処理性能の関連性の調査

数値シミュレーションにおいて相互結合システムを用いた RC によりカオス時系列予測を行い、遅延時間 τ_2 への予測誤差 NMSE (Normalized mean square error) の依存性を調査した．ここでノード間隔 $\theta = 0.2 \mu\text{s}$ 、ノード数は x_1 と x_2 のそれぞれの出力から50個ずつ、計100とし、遅延時間 τ_1 は $9.8 \mu\text{s}$ としている．図3は遅延時間 τ_2 を変化させた時の予測誤差の変化を示している．図3(a)において遅延時間 τ_2 を減少させた時、予測誤差は増減を繰り返しながら小さくなっている．最も小さいNMSEが得られる遅延時間 τ_2 の範囲を拡大した図が図3(b)である．図3(b)において $\tau_2 = 0.04 \mu\text{s}$ 付近で最も小さい予測誤差が得られることが分かった．図4は $\tau_2 = 0.04 \mu\text{s}$ の時の予測結果を表している．図4(a), 4(b),

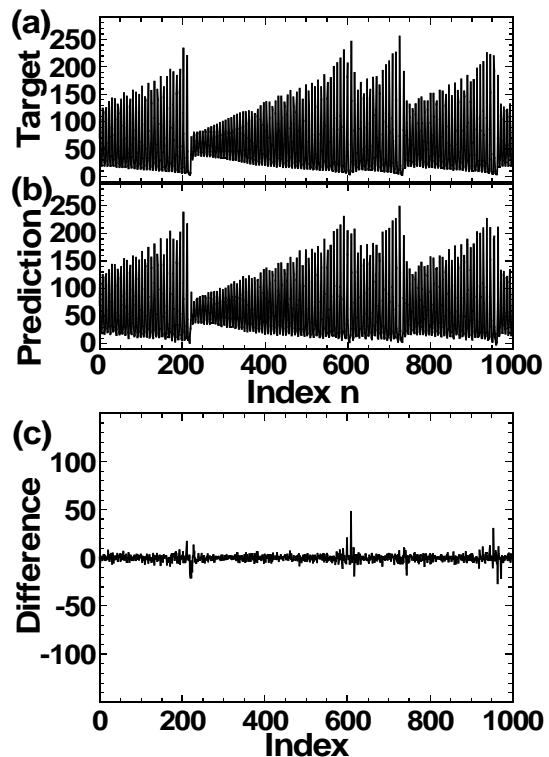


図 4 相互結合システムを用いた RC によるカオス時系列予測の予測結果．(a)は理想的な時系列を表し、(b)は RC による予測結果である．(c)は理想的な時系列と予測した時系列の差を表す．

4(c)はそれぞれ理想的な信号、RC による予測信号、理想信号と予測信号の差である．予測信号が理想信号によく似ており、予測誤差が小さいことから、よく予測できていることが分かる．この遅延時間 $\tau_2 = 0.04 \mu\text{s}$ はノード間隔 $\theta = 0.2 \mu\text{s}$ よりも小さいため、入力信号の変化よりも速い間隔でフィードバック信号および結合信号が MZM2 に入力されることになる．このノード間隔よりも短い間隔のフィードバック信号が時間ダイナミクスに過渡的な変化を生じ、より複雑な応答となったため RC による予測精度が向上したと考えられる．

次に電気光変調器 (MZM1 および MZM2) の動作点への予測誤差の依存性を調査した．電気光変調器は印加される電圧に応じて入力光の強度を変化させて出力する．印加電圧に対する光出力強度の応答特性は \cos^2 の関係を持ち、本システムの非線形性はこの応答特性に由来する．電気光変調器の動作点は、電圧を印加していないときに応答特性のどの点を用いるかを決定するパラメータである．ここでは2つの電気光変調器 (MZM1 および MZM2) の動作点を変化させたときの予測誤差の依存性を調査した．

図5は2つの電気光変調器 (MZM1 および MZM2) の動作点 (ϕ_1 および ϕ_2) の2次元パラメータ空間における予測誤差 (NMSE) の変化を表している．予測誤差の値はグレース

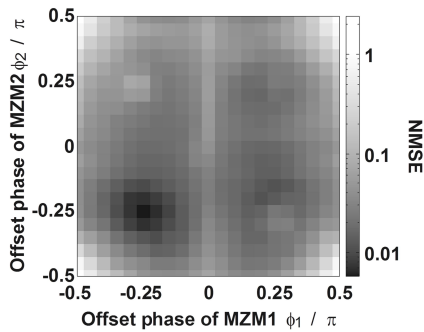


図5 2つの電気光変調器(MZM1およびMZM2)の動作点(ϕ_1 および ϕ_2)を変化させたときの予測誤差(NMSE)の依存性. 予測誤差の値はグレースケールにより表されており, 黒色が低い予測誤差を表す.

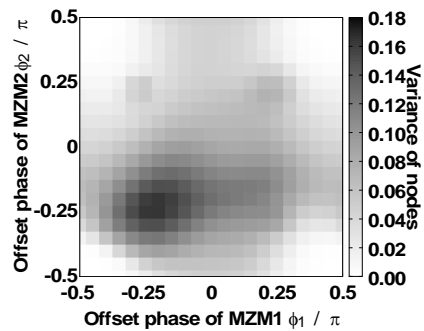


図6 2つの電気光変調器(MZM1およびMZM2)の動作点(ϕ_1 および ϕ_2)を変化させたときのノード状態値の分散の依存性. 分散の値はグレースケールにより表されており, 黒色は分散が大きいことを表す.

ケールにより表されており, 黒色が低い予測誤差を表す. またこの時の遅延時間は $\tau_1 = 9.8 \mu\text{s}$, $\tau_2 = 0.04 \mu\text{s}$ である. 図において最も低い予測誤差は $\phi_1 = \phi_2 = -0.25\pi$ の時に得られた (NMSE は 0.00574). つまり MZM1 と MZM2 のパラメータが一致しているときに情報処理精度が最も高くなったということである. この要因を示すために, リザーバから得られるノード状態値の分散を調査した. リザーバコンピューティングでは入力信号を高次元な空間に非線形写像し, 高次元空間内で線形分離することに基づいて情報処理を行う. 出力であるノード状態値がより広い範囲に分布することは, より広い空間に写像していることを意味する. 図6は ϕ_1 および ϕ_2 からなるパラメータ空間上におけるノード状態値の分散の変化を示している. 黒色は分散が大きな値であることを表す. $\phi_1 = \phi_2 = -0.25\pi$ で分散が最も大きくなっており, 予測誤差の変化(図5)と変化の傾向が一致している. 以上の結果から, ノード状態値の分散が増加することが情報処理性能の向上の要因の1つとして挙げられることが分かった.

(2) 相互結合システムを用いたリザーバコン

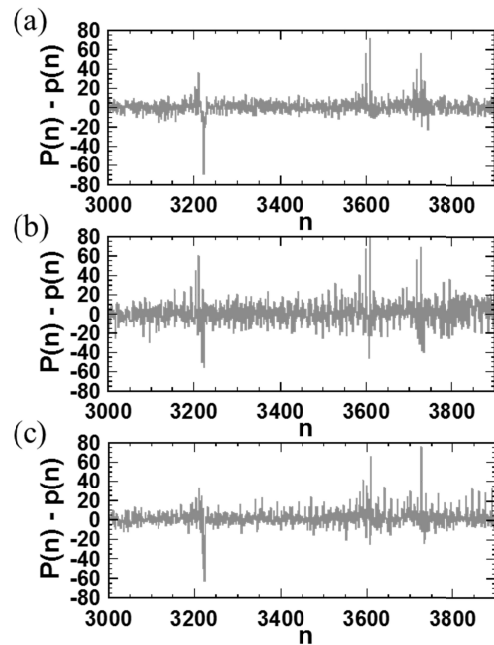


図7 RCによるカオス時系列予測実験により得られた予測信号と理想信号の差. (a), (b), (c)はそれぞれ相互結合システム, 単一システム, 並列システムを用いた場合の結果である.

ピューティングの性能の実験的な評価

RCによるカオス時系列予測を実験的にを行い, その予測精度を NMSE により評価した. 図2に示す相互結合システムの実験装置図を用いた. 本研究において提案している相互結合システムだけでなく, 並列システムおよび単一の光電気遅延システムを用いてカオス時系列予測を行い, その予測精度と比較を行った. ここで並列システムは図2の実験装置において2 kmの光ファイバの直前のカプラを取り除き, 2つの電気光変調器 MZM1 と MZM2 の出力がそれぞれ自身の変調信号としてフィードバックされるシステムである. 単一の光電気システムでは, 並列システムの MZM1 の出力のみを用いて RC を行っている. したがってノード数は相互結合システムおよび並列システムの半分の数(50個)である. 3つのシステムを用いてカオス時系列予測を行い, 予測した時系列と理想的な時系列の差を示す. 図7(a), (b), (c)はそれぞれ相互結合システム, 単一システム, 並列システムを用いて RC を行った結果である. またそれぞれの結果の予測誤差 NMSE を表1に示す. まず相互結合システムと単一システムの結果を比較する. 図7(a)と7(b)を比較すると, 相互結合システムによる結果は全体的に誤差が小さくなっているように見える. 相互結合システムと単一システムにおける NMSE はそれぞれ 0.0251 と 0.0631 であり, 相互結合システムによる予測誤差の方が小さい. この結果から, 相互結合システムを用いることにより予測精度が向上したことが分かる. また相互結合システムと並列システムによる

表1 相互結合システム, 単一システム, 並列システムを用いた RC によるカオス時系列予測における予測誤差 (NMSE)。

	NMSE
相互結合システム	0.0251
単一システム	0.0631
並列システム	0.0338

予測結果を比較すると, 相互結合システムの方が小さいNMSEである。2つのシステムの差異は相互結合の有無のみであるため, 相互結合により予測誤差を低減させることが可能であることが分かる。さらに並列システムと単一システムを比較すると, 並列システムの予測誤差の方が小さいことが分かる。並列システムはノード数が100であるのに対して単一システムは50であり, ノード数の増加が予測精度を向上させていることが分かる。ここで注目すべき点として, 並列化された2つのシステムはどちらも同じ信号が入力されている点が挙げられる。2つのシステムは同じ信号を入力されているが, 遅延時間が異なるため異なる応答出力を示す。それゆえにことなるノードとして用いることができるので, ノード数を増加させることができる。

以上の研究成果をまとめると, まず本研究では相互結合システムを用いたRCを数値シミュレーションにより行った。RCの情報処理性能はカオス時系列予測タスクにより評価した。相互結合された2つのシステムを用いることで1つのシステムを用いた場合の2倍のノード数をRCに用いることができる。また相互結合システムの2つのフィードバック遅延時間を非対称にすることで高い予測精度を達成することができた。さらに実験的に相互結合システムを用いたRCによるカオス時系列予測を行った。特に相互結合システム, 並列システム, 単一システムの3つのシステムによる予測精度を比較することにより, 相互結合システムを用いることで予測精度が向上するかどうかを調査した。その結果, 相互結合システムを用いたRCによる予測精度は他の2つのシステムよりも高くなることが分かった。これらの比較からノード数の増加と相互結合が予測精度を向上させるために有用であることが明らかとなった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計2件)

- 菅野 円隆, 手塚 美和, 中山 丞真, 内田 淳史, 文仙 正俊, “レーザーの複雑過渡ダイナミクスを用いた光リザーバコンピューティングの情報処理性能の向上,” レーザー研究, Vol. 45, pp. 148-152 (2017).
- Miwa Tezuka, Kazutaka Kanno, and Masatoshi Bunsen, “Reservoir computing

with a slowly modulated mask signal for preprocessing using a mutually coupled optoelectronic system,” Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 55, pp. 08RE06-1-8 (2016).

〔学会発表〕(計8件)

- (1) Kazutaka Kanno, Keisuke Nagatoshi, Masatoshi Bunsen, and Atsushi Uchida, “Mutually coupled optoelectronic systems with different delays for reservoir computing,” Proceedings of 2018 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, Tarragona, Spain, September 2-6, 2018. (発表予定)
- (2) 永利 圭佑, 菅野 円隆, 文仙 正俊, “相互結合光電気システムの利用による光リザーバコンピューティングの情報処理精度向上,” 光エレクトロニクス研究会, 宮古島, 沖縄, 2017年12月7日.
- (3) Nagatoshi Bunsen, Kazutaka Kanno, Masatoshi Bunsen, “Information processing based on mutually delay-coupled optoelectronic oscillators,” SIAM Conference on Applications of Dynamical Systems, Snowbird, Utah, USA, May 21-25.
- (4) Kazutaka Kanno, “Performance improvement of reservoir computing by using two temporal outputs in mutually coupled optoelectronic system,” Information Photonics 2017, Yokohama, Japan, April 19-21, 2017. (招待講演)
- (5) 永利 圭佑, 菅野 円隆, 文仙 正俊, “時間遅延相互結合システムにおける情報処理性能の遅延時間依存性,” 第64回応用物理学会春期学術講演会, パシフィコ横浜, 神奈川, 2017年3月17日.
- (6) 菅野 円隆, 文仙 正俊, “時間遅延相互結合された光電気フィードバックシステムを用いたリザーバコンピューティング,” レーザー学会 学術講演会 第37回年次大会, 徳島大学, 徳島, 2017年1月7-9日. (招待講演)
- (7) Kazutaka Kanno and Masatoshi Bunsen, “Fast information processing by using fast transient response in a semiconductor laser with strong optical injection,” Proceedings of 2016 International Symposium on Nonlinear Theory and Its Applications, Vol. 1, pp. 650-653 (2016), Yugawara, Japan, November 27-30, 2016.
- (8) 菅野 円隆, “レーザーの時間遅延ダイナミクスを用いたリザーバコンピューティング,” ディープラーニングの次を目指した人工知能の最前線 = リザーバ計算の基礎と応用 =, 東京大学, 東京, 2016年10月12日. (招待講演)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況（計 0 件）

取得状況（計 0 件）

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

菅野 円隆（Kazutaka Kanno）

福岡大学・工学部・助教

研究者番号：10734890