

令和元年6月17日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00326

研究課題名（和文）レザバーコンピューティングシステムの数理解析と最適設計

研究課題名（英文）Mathematical analysis and optimal design of reservoir computing systems

研究代表者

田中 剛平（Tanaka, Gouhei）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・特任准教授

研究者番号：90444075

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：レザバーコンピューティングは、高速学習を可能とする機械学習の枠組みの一つである。本研究では、レザバーコンピューティングの数理解析とレザバーの最適設計を行い、従来の問題点を解決するとともに、新たなモデルを提案して学習の高速化や計算性能向上を実現した。また、物理的レザバーの可能性を広く探究して数理モデリングを行い、その基本特性や基礎的タスクにおける計算性能を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、レザバーコンピューティング技術の向上を目指して、数理的研究に取り組んだ。レザバーコンピューティングと他の機械学習との融合や、時系列データ予測のための新しい学習モデルは、本手法の発展に寄与するという学術的意義をもつ。物理的レザバーコンピューティングの研究成果は、低消費電力で動作するオンライン機械学習デバイスの開発につながるものであり、人工知能の発展をさらに促すという社会的意義をもつと考えられる。

研究成果の概要（英文）：Reservoir computing is one of the machine learning frameworks capable of high-speed learning. In this study, we performed mathematical analysis and optimal design of reservoirs. Then, we proposed new models of reservoir computing and achieved enhancement of computational ability as well as further learning cost reduction. We also explored potential physical reservoirs and made their mathematical models, and clarified their fundamental properties and computational ability in basic tasks.

研究分野：複雑系動力学

キーワード：レザバーコンピューティング 数理解析 非線形システム 省エネルギー 力学系 機械学習 時系列データ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在のノイマン型コンピュータに代わる、新しい非ノイマン型コンピュータによる情報処理技術が産業界でも期待されている。近年では機械学習の高い学習能力が注目を集めているが、学習に膨大な時間を要する場合も少なくない。レザバーコンピューティングは、学習コストの極めて小さい機械学習のフレームワークの一つで、時系列パターン処理に適しているが、その設計方法については分かっていないことが多い。

2. 研究の目的

本研究では、レザバーコンピューティングの数理的解析を行うことで、その非線形システムとしての特徴を理解し、高性能な時系列パターン処理を行うためのシステム設計手法に関する有用な知見を得ることである。また、時系列予測などのベンチマークタスクによって、提案手法の性能評価を行う。

3. 研究の方法

レザバーコンピューティングのモデルを定式化して数理的解析を行うことにより、非線形素子ネットワークの構造やパラメータが計算性能にどのような影響を与えるかを明らかにする。また、ベンチマーク問題に適用して性能評価と計算量評価を行い、より良いシステム設計方法を探究する。さらに、画像認識やカオス時系列解析などの発展的応用も検討する。

4. 研究成果

(1)レザバーコンピューティングの代表的なモデルであるエコーステートネットワークを用いて、ユニットの不均一性が計算性能にどのように影響するかをシミュレーションによって調べた。4種類の時系列データの予測性能を評価したところ、ユニットの不均一性が計算性能向上に有利に働く場合があることが分かった。また、不均一性の大きさに応じて、レザバーの結合行列のスペクトル半径を調整することが有効であることを明らかにした。

(2)シナプス強度が時間変化する動的シナプスを導入したエコーステートネットワークを提案し、レザバーの記憶容量や時系列予測性能を評価した。動的シナプスによってレザバーの非線形性が高まるので、記憶容量は下がるが、時系列予測誤差は小さくなることが分かった。

(3)エコーステートネットワークによる画像認識では、従来の手法は原画像を分割してそのままレザバーに入力するので非常に大きなレザバーが必要であることが問題であった。そこで、訓練しない畳込みニューラルネットワークを用いて原画像を特徴ベクトルに変換し、それをレザバーに入力した。この畳込みニューラルネットワークとエコーステートネットワークを融合したモデルの性能をベンチマーク画像認識タスクにおいて評価した。その結果、従来モデルよりも小さなレザバーで同等に高い画像認識率を達成することを示した。この提案により、訓練すべきパラメータ数を大幅に削減できることが分かった。

(4)エコーステートネットワークでは、レザバーのサイズを大きくしていくと、性能向上の伸び率が飽和する。そこで、レザバーを2つに分割し、2段階で学習を行う2段階学習エコーステートネットワークを提案した。カオス時系列予測問題に適用したところ、1つのレザバーを用いる場合よりも、性能が良くなることが分かった。

(5)次世代計算デバイスを開発する上で、低消費エネルギーで動作することは望ましく、微細素子によってそれを実現することが期待されているが、微細素子の製造ばらつきが不可避であり計算性能を保証することが困難であるという問題がある。そこで、抵抗変化素子のネットワークを用いたレザバーコンピューティングにおいて、素子の製造ばらつきの影響を考察した。波形分類タスクに適用したところ、入力データのスケールパラメータに応じて、素子の特性ばらつきが有利に働く場合があることが分かった。

(6)ネットワークタイプのレザバーは、素子間の配線が必要であり、レザバーの規模が大きくなると配線を効率的に行う必要が生じる。それに対して、連続体媒質を用いたレザバーは配線が不要なので、実装が簡便になるという利点がある。そこで、そうした例の一つとして、スピン波を利用したレザバーコンピューティングを提案した。基礎的なタスクにおいて、スピン波のダイナミクスが入力情報を埋め込めるということが明らかとなった。またスピン波の基礎特性を調べた。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計3件)

(1) G. Tanaka, T. Yamane, J. B. Heroux, R. Nakane, N. Kanazawa, S. Takeda, H. Numata, D. Nakano, and A. Hirose, "Recent Advances in Physical Reservoir Computing: A Review,"

Neural Networks, vol. 115, pp. 100-123 (2019). DOI: 10.1016/j.neunet.2019.03.005

(2) G. Tanaka, R. Nakane, T. Takeuchi, T. Yamane, D. Nakano, Y. Katayama, and A. Hirose, "Spatially Arranged Sparse Recurrent Neural Networks for Energy Efficient Associative Memory," IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, published online. DOI: DOI: 10.1109/TNNLS.2019.2899344

(3) R. Nakane, G. Tanaka, and A. Hirose, "Reservoir Computing With Spin Waves Excited in a Garnet Film," IEEE ACCESS, vol. 6, pp. 4462-4469 (2018). DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2794584

[学会発表](計 15 件)

(1) T. Akiyama and G. Tanaka, "Analysis on Characteristics of Multi-Step Learning Echo State Networks for Nonlinear Time Series Prediction," Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN, Budapest, July 14-19), accepted.

(2) R. Nakane, G. Tanaka, and A. Hirose "Numerical Analysis on Wave Dynamics in a Spin-Wave Reservoir for Machine Learning," Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks (IJCNN, Budapest, July 14-19), accepted.

(3) A. Hirose, G. Tanaka, S. Takeda, T. Yamane, H. Numata, N. Kanazawa, J. B. Heroux, D. Nakano, R. Nakane, "Proposal of carrier-wave reservoir computing," Proc. Int. Conf. Neural Information Processing (ICONIP, Siem Reap, Dec. 14-16, Oral, Dec. 14) LNCS 11301, pp. 616-624 (2018).

(4) 秋山 貴則, 田中 剛平, "多段階学習 Echo state network による非線形時系列予測," 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML, 札幌, 11月4-7日), ポスター発表, 11月5日, 電子情報通信学会 信学技報, IBISML2018-83 (2018).

(5) Ziqiang Tong, Gouhei Tanaka, "3D-skeleton-Based Human Action Recognition with a Combination of Random Convolutional Networks and Echo State Networks," 情報論的学習理論と機械学習研究会 (IBISML, 札幌, 11月4-7日), ポスター発表, 11月5日, 電子情報通信学会 信学技報, IBISML2018-99 (2018).

(6) Gouhei Tanaka, "Recent advances in physical reservoir computing," The 3rd Neuromorphic Research Retreat in AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Oct. 31), Invited talk (2018).

(7) Z. Tong and G. Tanaka, "Reservoir Computing with Untrained Convolutional Neural Networks for Image Recognition," Proc. International Conference on Pattern Recognition (ICPR, Beijing, Aug. 20-24, Poster, Aug. 22), pp. 1289-1294 (2018).

(8) Gouhei Tanaka, "Mathematical approach to energy efficient neural information processing," The 2nd Neuromorphic Research Retreat in AIST (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Feb. 17), Invited talk (2018).

(9) 田中 剛平, "省エネルギー脳型情報処理への数理的アプローチ," 平成29年度第4回ブレインウェア研究会(東北大学電気通信研究所, 2月7日), 招待講演 (2018).

(10) G. Tanaka, R. Nakane, T. Yamane, S. Takeda, D. Nakano, S. Nakagawa, A. Hirose, "Nonlinear Dynamics of Memristive Networks and its Application to Reservoir Computing," Proc. Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA, Cancun, Mexico, Dec. 4-7, Oral, Dec. 5), pp. 182-185 (2017).

(11) A. Hirose, S. Takeda, T. Yamane, D. Nakano, S. Nakagawa, R. Nakane, and G. Tanaka, "Complex-Valued Neural Networks to Realize Energy-Efficient Neural Networks Including Reservoir Computing," Proc. Int. Symp. Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA, Cancun, Mexico, Dec. 4-7, Oral, Dec. 5), pp. 186-188 (2017).

(12) G. Tanaka, R. Nakane, T. Yamane, S. Takeda, D. Nakano, S. Nakagawa, A. Hirose, "Waveform Classification by Memristive Reservoir Computing," Proc. Int. Conf. Neural Information Processing (ICONIP, Guangzhou, Nov. 14-18, Oral, Nov. 15), pp. 457-465

(2017).

(13) A. Hirose, S. Takeda, T. Yamane, D. Nakano, S. Nakagawa, R. Nakane, and G. Tanaka, “Complex-valued neural networks for wave-based realization of reservoir computing,” Proc. Int. Conf. Neural Information Processing (ICONIP, Guangzhou, Nov. 14-18, Oral, Nov. 15), pp. 449-456 (2017).

(14) G. Tanaka, R. Nakane, T. Yamane, D. Nakano, S. Takeda, S. Nakagawa, and A. Hirose, “Exploiting Heterogeneous Units for Reservoir Computing with Simple Architecture,” Proc. Int. Conf. Neural Information Processing (ICONIP, Kyoto, Oct. 16-21, Oral, Oct. 17), Springer International Publishing, pp. 187-194 (2016).

(15) R. Mori, G. Tanaka, R. Nakane, A. Hirose, and K. Aihara, “Computational Performance of Echo State Networks with Dynamic Synapses,” Proc. Int. Conf. Neural Information Processing (ICONIP, Kyoto, Oct. 16-21, Oral, Oct. 17), Springer International Publishing, pp. 264-271 (2016).

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

解説記事

(1) 田中 剛平, “リザーバーコンピューティングの概念と最近の動向 (Open Access 話題の記事)”, 電子情報通信学会誌 (小特集:リザーバーコンピューティング), vol. 102, no. 2 (Feb. 2019), pp. 108-113 (2019).

ホームページ等

<http://eeip.t.u-tokyo.ac.jp/gtanaka/publication.html>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者
研究協力者氏名：
ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。