

令和 5 年 5 月 8 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K11882

研究課題名（和文）異種計算モデルの融合に基づく高速機械学習手法の発展

研究課題名（英文）Development of fast machine learning methods based on combinations of different computational models

研究代表者

田中 剛平（TANAKA, GOUHEI）

東京大学・ニューロインテリジェンス国際研究機構・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） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：時系列データのパターン認識に適した高速機械学習モデルの開発を目的として、リザーバー計算を軸とした発展的機械学習モデルの構築およびその性能評価を行った。時系列データのリサンプリングやフィルタリングによる特徴抽出の導入、マルチリザーバー計算モデルの拡張、転移学習に動機を得たオンライン学習手法、異種演算素子から成るリザーバーの活用、などを通じて発展的な機械学習モデルを提案し、それらが時系列パターン認識タスクにおける計算性能の向上や計算効率の改善に有効であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、主にリザーバー計算と他の計算手法の融合による高速機械学習モデルの開発を行った。異種計算モデルの融合に基づく高速機械学習手法は計算性能や計算効率の向上に有用であることが分かった。開発したモデルは、頻繁に学習計算をし直す必要のある環境や計算資源に制約がある環境における計算技術として有望であり、IoT社会においてエッジコンピューティング用の人工知能の基礎になると期待される。

研究成果の概要（英文）：To develop machine learning models capable of fast learning for temporal information processing, we constructed advanced machine learning models by employing the reservoir computing framework and evaluated the computational performance of the proposed models. We proposed advanced reservoir computing models through an introduction of feature extractions with resampling and filtering, an expansion of multi-reservoir computing models, a utilization of online learning methods inspired by transfer learning, and an exploitation of a reservoir consisting of heterogeneous computational units, and then demonstrated that the proposed methods are effective for enhancement of the computational performance and/or improvement in computational efficiency.

研究分野：複雑系動力学

キーワード：機械学習 時系列データ リザーバー計算 非線形システム 人工知能 IoT社会

1. 研究開始当初の背景

近い将来、様々なモノがインターネットにつながる IoT 社会が実現され、現在よりも大量かつ多種多様なデータの処理が必要になると見込まれている。インターネットを介するデータ通信の負荷を軽減し、またデータの機密保護を強化するために、末端機器でデータの圧縮、加工、分析等を行うエッジコンピューティングの必要性が高まっている。データの爆発的増加に対応するには、高速機械学習を可能とする人工知能技術を開発することが不可欠であり、リザバー計算はその有望な基盤の一つである。しかし、リザバー計算の標準的モデルは計算性能・効率の面で限界があるため、それを拡張した発展的なモデルや学習手法の開発が必要である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、高速機械学習モデルを提案し、高性能かつ高効率な時系列情報処理技術を開発させることである。具体的には、リザバー計算を中心として、異種の計算技術を組み合わせることにより、計算性能・効率を向上させるための研究を行う。従来研究ではデータに応じた発見的な前処理や後処理を組み合わせた例が見られるが、本研究では低計算コストでなるべく汎用的な計算手法を導入して計算性能の向上を図る。そして、開発する発展的リザバー計算モデルやその学習手法の有効性を評価する。

3. 研究の方法

時系列データのリアルタイム情報処理に応用可能な高速機械学習モデルの開発を目指し、発展的リザバー計算モデルおよびその学習手法の研究を行う。複数のリザバーを用いたマルチリザバー計算の枠組みの拡張やリザバー計算と異種の計算手法との融合により、新しいモデル構築を行う。それを時系列情報処理のベンチマークタスクに適用して計算性能や学習コストの観点から性能評価を行い、他の手法との性能比較を行って開発手法の特徴を分析する。

4. 研究成果

主に以下の 5 つの発展的リザバー計算モデルを開発し、時系列データを用いる機械学習タスクにおいて従来手法より高い計算性能または高い計算効率を実現できることを示した。

(1)時系列データのリサンプリングを導入したマルチリザバー計算モデルを提案した。一つの時系列から多様な特徴を抽出するため、異なる間隔で複数のリサンプリングを行う方法を考案した。それを入力データやリザバー状態の系列に適用することにより、非線形時系列予測タスクにおいて、このリサンプリング手法の導入が予測性能向上に有用であることを示した。また、提案モデルの一つはマルチリザバー計算モデルと比較して高い予測性能をもつことを明らかにした。

(2)Hodrick-Prescott フィルタとリザバー計算モデルを組み合わせたモデルを提案した。不規則で複雑な変動をもつ時系列データに対し、Hodrick-Prescott フィルタを繰り返し用いて周期性の異なる複数の成分に分離する前処理手法を考案した。電力消費量や交通量などの時系列データを用いた時系列予測において、提案手法は従来手法より高い予測精度を達成することを示した。このフィルタ処理計算は、他のモデルとも組合せられる汎用的な特徴抽出法である。

(3)多段階学習を用いるマルチリザバー計算モデルを提案した。単一のリザバーを用いる標準的モデルでは、リザバーのサイズを大きくすると、学習計算時間が増加し、性能も頭打ちになる傾向がある。この問題を克服するため、連結した複数のリザバー計算モデルを段階的に学習する方法を考案した。提案モデルを用いていくつかの非線形時系列予測タスクを行ったところ、学習ステップが進むにつれ、出力誤差が減少する傾向にあることが分かった。同一サイズの単一リザバー計算モデルと比較したところ、提案手法の方が高い計算性能を示し、また学習に要する実効計算時間も短いことが分かった。学習計算量の軽減については、理論解析によっても示すことができる。

(4)リザバー計算モデルの発展的オンライン学習法を提案した。リザバー計算モデルのオンライン学習に用いられる逐次最小二乗法は収束が速いアルゴリズムであるが、計算量が大きいことが実用に向けての課題である。そこで、事前に多様な変動パターンを含む時系列データで予備的な学習を行っておき、メインの学習フェーズでの計算量を大幅に短縮する方法を考案した。これは転移学習から着想を得たものである。この方法は、物理リザバーを用いたハードウェア計算においても学習効率化に有用である。

(5)不均一演算素子を用いるリザバー計算モデルを提案した。実世界の多変量時系列データを扱うには、広い時間スケールに対応可能な計算モデルが望ましい。しかし、従来のモデルのように演算素子が均一の場合、扱える時間スケールは限られる。そこで、時定数の異なる演算素子を用

いてリザーブを構成したところ、モデル出力の時間スケールの範囲を拡大できることが分かった。提案モデルを用いて、マルチ時間スケール力学系に関する時系列予測タスクを行ったところ、従来モデルと比べて予測精度を向上し得ることが分かった。訓練済みのモデルの解析により、速い(遅い)変動の予測には時定数の比較的大きい(小さい)演算素子群が主に使用されていることが判明した。これは、十分広い時間スケールをもつリザーブを用意すれば、学習計算によって、リザーブ内部の演算素子群に適切な役割分担が自発的に生じることを意味する。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 Takanori Akiyama and Gouhei Tanaka	4. 巻 10
2. 論文標題 Computational efficiency of multi-step learning echo state networks for nonlinear time series prediction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 28535-28544
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/ACCESS.2022.3158755	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Ziqiang Li and Gouhei Tanaka	4. 巻 467
2. 論文標題 Multi-Reservoir Echo State Networks with Sequence Resampling for Nonlinear Time-Series Prediction	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neurocomputing	6. 最初と最後の頁 115-129
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neucom.2021.08.122	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Hiroto Tamura and Gouhei Tanaka	4. 巻 143
2. 論文標題 Transfer-RLS method and transfer-FORCE learning for simple and fast training of reservoir computing models	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Neural Networks	6. 最初と最後の頁 550-563
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.neunet.2021.06.031	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Li Ziqiang, Liu Yun, Tanaka Gouhei	4. 巻 135
2. 論文標題 Multi-Reservoir Echo State Networks with Hodrick- Prescott Filter for nonlinear time-series prediction	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Soft Computing	6. 最初と最後の頁 110021-110021
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.asoc.2023.110021	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Gouhei, Matsumori Tadayoshi, Yoshida Hiroaki, Aihara Kazuyuki	4. 巻 4
2. 論文標題 Reservoir computing with diverse timescales for prediction of multiscale dynamics	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Research	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevResearch.4.L032014	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tong Zhiqiang, Nakane Ryosho, Hirose Akira, Tanaka Gouhei	4. 巻 32
2. 論文標題 A Simple Memristive Circuit for Pattern Classification Based on Reservoir Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 International Journal of Bifurcation and Chaos	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1142/S0218127422501413	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Tanaka Gouhei, Nakane Ryosho	4. 巻 12
2. 論文標題 Simulation platform for pattern recognition based on reservoir computing with memristor networks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41598-022-13687-z	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Christensen Dennis V et al.	4. 巻 2
2. 論文標題 2022 roadmap on neuromorphic computing and engineering	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Neuromorphic Computing and Engineering	6. 最初と最後の頁 022501-022501
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/2634-4386/ac4a83	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Tanaka Gouhei, Gallicchio Claudio, Micheli Alessio, Ortega Juan-Pablo, Hirose Akira	4. 巻 33
2. 論文標題 Guest Editorial Special Issue on New Frontiers in Extremely Efficient Reservoir Computing	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems	6. 最初と最後の頁 2571-2574
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TNNLS.2022.3172586	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

[学会発表] 計26件 (うち招待講演 13件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 Z. Li and G. Tanaka
2. 発表標題 A Multi-Reservoir Echo State Network with Multiple-Size Input Time Slices for Nonlinear Time-Series Prediction
3. 学会等名 International Conference on Neural Information Processing (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 H. Tamura and G. Tanaka
2. 発表標題 partial-FORCE: a fast and robust online training method for recurrent neural networks
3. 学会等名 International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Tanaka and R. Nakane
2. 発表標題 Role of nonlinearity in memristive networks for reservoir computing
3. 学会等名 Memrisys 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 G. Tanaka
2. 発表標題 Physical reservoir computing with nanotechnology
3. 学会等名 IEEE International Nanodevices and Computing Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 品川 大樹, 藤原 寛太郎, 田中 剛平
2. 発表標題 教師なしパターン認識のためのスパイクニューラルネットワークにおけるスパース結合の影響
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡邊 隆二, 田中 剛平
2. 発表標題 リワードマシンを用いる強化学習手法の計算性能とタスク難易度の関係
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーブコンピューティングの基礎と実装
3. 学会等名 第45回光機能磁性材料・デバイス専門研究会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーコンピューティングの基礎と応用
3. 学会等名 ネットワーク科学研究会2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーコンピューティングの多面的な魅力
3. 学会等名 コンピューテーショナル・インテリジェンス・フォーラム2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーコンピューティングの概念と最近の動向
3. 学会等名 電子情報通信学会 Webinarテクノロジートレンドシリーズ (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroto Tamura and Gouhei Tanaka
2. 発表標題 Two-Step FORCE Learning Algorithm for Fast Convergence in Reservoir Computing
3. 学会等名 International Conference on Artificial Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ziqiang Li and Gouhei Tanaka
2. 発表標題 Deep Echo State Networks with Multi-Span Features for Nonlinear Time Series Prediction
3. 学会等名 International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Ziqiang Li and Gouhei Tanaka
2. 発表標題 HP-ESN: Echo State Networks Combined with Hodrick-Prescott Filter for Nonlinear Time-Series Prediction
3. 学会等名 International Joint Conference on Neural Networks (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Gouhei Tanaka
2. 発表標題 Introduction to Physical RC
3. 学会等名 International Conference on Neuromorphic Systems (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田村 浩人, 田中 剛平
2. 発表標題 少数のニューロンから成るリカレントニューラルネットワークの訓練のための拡張full-FORCE法
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 鈴木雄大, 田中 剛平
2. 発表標題 ワーキングメモリと選択の脳内メカニズムを考慮したリザバーコンピューティングモデル
3. 学会等名 第30回日本神経回路学会全国大会 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザバーコンピューティングの現状と未来
3. 学会等名 応用物理学会 システムデバイスロードマップ委員会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 物理リザバーコンピューティングによる時系列パターン認識
3. 学会等名 第41回IBISML研究会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザバーコンピューティングの高性能化・高効率化に関して
3. 学会等名 第15回 AI Optics研究グループ研究会 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 AIによる複雑ダイナミクスのパターン認識
3. 学会等名 日本生理学会第100回記念大会, 100周年記念事業委員会企画シンポジウム「AIが切り開く医学・生理学・生命科学の新展開」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーコンピューティングとマルチスケールモデリング
3. 学会等名 電子情報通信学会総合大会, チュートリアルセッション「NBT-1. 次世代ネットワークを支える数理モデルの展開」(招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Wenrui Qiu and Gouhei Tanaka
2. 発表標題 Indoor air quality prediction using multi-reservoir echo state network with attention mechanism
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーコンピューティングの概要と最近の研究
3. 学会等名 東京大学「未来協創工学」社会連携講座 第6回研究会(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中 剛平
2. 発表標題 リザーバーコンピューティングに基づく省エネ情報処理
3. 学会等名 生理研研究会「第2回 人工知能技術と科学の強調と展開」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroto Tamura, Gouhei Tanaka, Kantaro Fujiwara
2. 発表標題 Memory Saving Time Series Anomaly Detection Using Mahalanobis Distance of Reservoir States
3. 学会等名 Neuro2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鶴海 杭之, 田中 剛平
2. 発表標題 スパイクングニューラルネットワークとreward-modulated STDPによるリザーバーコンピューティング
3. 学会等名 電子情報通信学会 非線形問題研究会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 田中 剛平、中根 了昌、廣瀬 明	4. 発行年 2021年
2. 出版社 森北出版	5. 総ページ数 224
3. 書名 リザーバーコンピューティング	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------