

戦略的創造研究推進事業 CREST
研究領域「Society 5.0 を支える革新的コンピューテ
ィング技術」
研究課題「光ニューラルネットワークの時空間ダイ
ナミクスに基づく計算基盤技術」

研究終了報告書

研究期間 2018年10月～2024年03月

研究代表者:鈴木 秀幸
(大阪大学 大学院情報科学研究科
教授)

§ 1 研究実施の概要

(1)実施概要

本研究では、鈴木グループによる「光ニューラルネットワークの数理モデル研究」、谷田グループによる「光ニューラルネットワークの実装研究」、橋本グループによる「光ニューラルネットワークのシステム化研究」を相互に密に協力しながら並行して進めてきた。研究期間の中間時点においては、研究期間前半の研究成果を総括するとともに、研究期間後半の重点研究テーマを、FRET ネットワークと情報処理、リザバー計算のモデルと実装、空間光変調イジングマシンの拡張の3つに定めた。

研究期間後半には、これら3テーマに重点をおいて3グループが一体となって研究を進めた。その結果として得られた研究成果の概要は以下の通りである。

FRET ネットワークと情報処理

量子ドット間の FRET 現象に基づくナノスケール情報処理に関しては、鈴木・谷田グループが実験結果と整合する FRET ネットワークの数理モデルの構築・解析を行ってきたほか、橋本・鈴木グループが FRET ネットワークシミュレータを構築し、谷田・橋本グループが情報処理を実証する実験および集積デバイス化を実施するなど、チーム全体の融合研究により、世界初の FRET ネットワークを用いたリザバー情報処理システム構築を行った。将来的には計測限界を超える超高速・超高周波の現象観測・信号処理の実現につながる可能性のある成果であると考えられる。

リザバー計算のモデルと実装

リザバー計算に関しては、谷田グループが IFS (反復関数系)リザバー実装を提案して時系列予測における有用性を示した。これは特にハイパーパラメータの制御性に優れた物理リザバーである。橋本グループは深層学習とリザバー計算の融合により高パラメータ効率の HFN (Hidden-Fold Network)を提案した。また、鈴木グループは各種のリザバーモデルや性能評価手法、転換点予測手法等を提案してきた。チーム全体として、リザバー計算のモデルと光学実装に関する基礎的研究分野に大きく貢献した。

空間光イジングマシンの拡張

空間光イジングマシンに関しては、鈴木・谷田グループの共同で、適用できる問題のクラスを拡大する新しい計算モデルを提案した。さらに鈴木グループでは計算モデルを発展させてきたほか、谷田グループでは各種の多重化実装を発展させてきた。空間光イジングマシンは低ランクのイジング問題に対して高効率であり、将来的にはイジング問題の低ランク学習による探索的課題にも優れた性能を発揮すると考えられる。

成果書籍

本研究は異分野融合により行われてきたため、その成果発表は複数の分野の雑誌・国際会議に分散してしまっている。そのため、本研究の成果をまとめて説明した書籍を作成することが有意義であると判断して“Photonic Neural Networks with Spatiotemporal Dynamics: Paradigms of Computing and Implementation”の執筆を進めた。2023年10月17日に Springer 社からオンラインおよび冊子体で出版されている。この書籍は本研究の成果の学术界および産業界への浸透を狙うものであることから、オープンアクセスとしている。内容は重点3テーマに対応しており、FRET 計算、空間光スピン系、光リザバー計算からなる。

(2)顕著な成果

< 優れた基礎研究としての成果 >

1. Hiroshi Yamashita, Ken-ichi Okubo, Suguru Shimomura, Yusuke Ogura, Jun Tanida, and Hideyuki Suzuki: Low-rank combinatorial optimization and statistical learning by spatial photonic Ising machine. Physical Review Letters 131 (2023), 063801.

概要:これまで空間光イジングマシンが適用できる問題のクラスは非常に限られていたが、任意のイジング問題に適用可能とする新しい計算モデルを提案した。この計算モデルを用いると、空間光イジングマシンは特に低ランクのイジング問題に対して高効率となる。ナップサック問題をランク 2 のイジング問題として定式化して数値的に実証した。さらに、低ランクの統計的学習が実現可能であることを MNIST 手書き数字データを用いて実証した。

2. Yasuyuki Okoshi, Ángel López García-Arias, Kazutoshi Hirose, Kota Ando, Kazushi Kawamura, Thiem Van Chu, Masato Motomura, Jaehoon Yu: Proceedings of the 39th International Conference on Machine Learning, PMLR 162:17045-17055, 2022.

概要:階層的な複数のスーパーマスクの導入による Hidden Networks 拡張手法を提案した。追加のトレーニングコストなく高精度化を達成できる。7 層の階層化スーパーマスクを使用した ResNet-101 では、元の Hidden Networks モデルの精度を 4%上回り、また密な ResNet-50 の精度と同等で 1 桁以上のメモリ量削減を達成した。

3. Hideyuki Suzuki, Jun Tanida, Masanori Hashimoto (eds): Photonic Neural Networks with Spatiotemporal Dynamics: Paradigms of Computing and Implementation. Springer Singapore, 2023.

概要:本研究の成果をまとめた書籍である。光ニューラルネットワークの時空間ダイナミクスに基づく計算について、非線形数理、情報フォトンクス、集積システム工学の 3 分野の融合研究の成果を紹介しており、導入、FRET 計算、空間光スピンの系、光リザバー計算の 4 部構成となっている。

< 科学技術イノベーションに大きく寄与する成果 >

該当なし

< 代表的な論文 >

1. Masaki Nakagawa, Yuki Miyata, Naoya Tate, Takahiro Nishimura, Suguru Shimomura, Sho Shirasaka, Jun Tanida, Hideyuki Suzuki: “Spatiotemporal model for FRET networks with multiple donors and acceptors: Multicomponent exponential decay derived from the master equation”, Journal of the Optical Society of America B 38 (2021), 294-299.

概要:量子ドットなどの蛍光素子から構成される FRET ネットワークの時空間ダイナミクスを記述する数理モデルを構築した。このモデルでは蛍光強度の減衰が多成分の指数減衰となることが理論的に導出されるが、この結果は実験結果と定性的に合致しており、提案モデルの妥当性を示している。この成果は、FRET ネットワークを用いた光ニューラルネットワーク情報処理を実現するための研究において重要な基盤となっている。

2. Naoya Tate, Yuki Miyata, Shun-ichi Sakai, Akihiro Nakamura, Suguru Shimomura, Takahiro Nishimura, Jun Kozuka, Y. Ogura, and Jun Tanida: Quantitative analysis of nonlinear optical input/output of a quantum-dot network based on the echo state property. Optics Express 30 (2022), 14669-14676.

概要:量子ドット分散試料が物理リザバーとして機能する上で必要となる出力応答の非線形性について検証を行った。蛍光特性が異なる 2 種の量子ドットをポリマー溶媒に適量混合しシリコン基板上にて熱硬化させることで試料を作成した。伝搬遅延系を導入した 2 連光パルス生成系により、2 パルス間の時間差に応じて 2 つ目の光パルス入力に対する試料の蛍光出力が変動する様相を実験的に確認した。その結果、同試料の応答が確かに非線形性を示すこと、2 パルス間の時間差が大きくなるにつれて蛍光応答の非線形性が減退すること、およびその非線形性が試料の組成に応じて異なる傾向を示すことを実証した。

3. Masafumi Tanaka, Jaehoon Yu, Masaki Nakagawa, Naoya Tate, Masanori Hashimoto: Investigating small device implementation of FRET-based optical reservoir computing. Proceedings of International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS), August 2022.

概要:小体積実装が可能な光リザバーアーキテクチャを開発した。量子ドットを高次元非線形変換するリザバーとして利用し、実問題と物理現象の時定数の違いを外部記憶で補強する。光入出力及び量子ドットが密着しているレンズレス構造であり、光源も含めて1つのパッケージに内に実現できる。ロジスティック写像や NARMA10 タスクのシミュレーション実験により、リザバーとして求められる非線形性、短期記憶を持ち、タスク実行可能であることを確認した。

§2 研究実施体制

(1)研究チームの体制について

① 鈴木グループ

研究代表者:鈴木 秀幸(大阪大学大学院情報科学研究科 教授)

研究項目

- ・ニューラルネットワークの光実装数理モデル研究
- ・ニューラルネットワークの計算原理の数理モデル研究

② 谷田グループ

主たる共同研究者:谷田 純(大阪大学大学院情報科学研究科 教授)

研究項目

- ・ニューラルネットワークの光実装基礎技術研究
- ・ニューラルネットワークの光実装研究

③ 橋本グループ

主たる共同研究者:橋本 昌宜(京都大学大学院情報科学研究科 教授)

研究項目

- ・光ニューラルネットワークのシステム機能の研究
- ・光ニューラルネットワークのシステム実装の研究

(2)国内外の研究者や産業界等との連携によるネットワーク形成の状況について

国際会議のスペシャルセッション・シンポジウム開催や、メンバーが他の大型研究プロジェクト(ALCA-Next、CREST、ムーンショット、学術変革領域等)へ参画すること等によりネットワーク形成が進んでいる。