

物理現象を用いたコンピューティング技術への取り組み



研究ノート

白坂 将*

Exploring Computing Technologies Based on Physical Phenomena

Key Words : Machine Learning, Physical Computing, Reservoir Computing,
Time Series Analysis, Nonlinear Dynamical Systems

はじめに

機械学習技術の急速な発展と応用が広がる中、計算能力の向上はますます重要な課題となっています。従来の汎用 CPU や GPU は、機械学習技術の基盤として広く活躍しています。他方で、これらのハードウェアの性能向上については、物理的限界や技術的成熟を迎えつつあるという見方があります。そこで、光や機能的材料を利用した新奇的なハードウェア上でニューラルネットワークといった強力な機械学習器を実装し、高速性・省エネルギー性を備えた情報処理を実現する試みが注目されています。本稿では、幅広い物理現象をニューラルネットワークに置き換える枠組みであるリザーバコンピューティングと、それに関する筆者の取り組みについて紹介します。

新奇的コンピューティングアーキテクチャへの期待

ニューラルネットワークに代表される機械学習技術は多くの技術革新をもたらしており、経済や社会に深く浸透するようになってきました。今後も自動運転技術、スマートシティ、医療・創薬支援等を通じて人類に貢献することが期待されています。

機械学習に用いられるハードウェアは主に汎用 CPU 及び GPU であり、これらの性能は半導体技術の発展に支えられています。また、機械学習の強

力なアプリケーションの多くは、膨大なデータをデータセンタに集約し、クラウドの大規模計算資源をもちいて巨大なニューラルネットワークを訓練し、推論させるクラウド処理に支えられています。

このような情報処理技術を今後さらに発展させていく上で、以下のようなさまざまな問題点があり、それに対する解決策が検討されています [1]。

- 従来ハードウェアの飛躍的発展に関する困難：半導体回路の微細化に関する物理的・経済的限界や、GPU の技術的成熟などが指摘されています。そこで、量子・光・スピントロニクス素子・機能的材料といった新奇的なハードウェア基盤の発展が望まれています。
- コンピュータアーキテクチャに起因するボトルネック：汎用コンピュータの採用するノイマン型アーキテクチャでは、演算を行う CPU とデータを記憶するメモリが分かれています。現在、それらの間のデータ転送速度に起因するボトルネックが顕在化するようになってきました。メモリ上で演算を行うことでこのボトルネックを解消するインメモリ計算技術といった、非ノイマン型のアーキテクチャの発展が期待されています。
- データの爆発によるネットワーク通信の問題：自動運転技術などの普及により今後も人類の扱うデータ量が増大していくと考えられています。これをすべてクラウドで処理しようとすると、爆発的に増大するトラフィックがネットワークを圧迫してしまいます。そこで、データを取得するセンサやモバイル端末といったエンドユーザ（エッジ）側で情報処理を行い、クラウド処理やネットワークの負担を減らすエッジ計算技術の発展が期待されています。



* Sho SHIRASAKA

1988年7月生まれ
東京工業大学大学院 情報理工学研究科
情報環境学専攻博士後期課程 (2017年)
現在、大阪大学大学院 情報科学研究科
情報数理学専攻 准教授 工学博士
専門/非線形力学系
TEL : 06-6879-7866
FAX : 06-6879-7834
E-mail : shirasaka@ist.osaka-u.ac.jp

- 消費電力の問題：半導体回路を構成するトランジスタを駆動させるための消費電力には下限が存在します。また、ノイマン型CPUの消費電力のうち、純粋な計算に消費されるものは1割以下であり、データの移動やCPUが処理すべき命令の記憶といった部分が7割程度を占めています。さらに、ネットワークのトラフィックが増大すると消費電力も増大します。これらのことから、光などを活用してトランジスタよりも低消費電力で駆動する素子を探索すること、インメモリ計算等によるデータ伝送に起因した消費電力の低減、エッジ計算の発展によるネットワーク関連消費電力の削減などが望まれています。

このような問題点を解決するためには、低消費電力で動作する物理現象を活用したインメモリ・エッジ計算ハードウェアを開発するだけでなく、そのようなハードウェア上で実装可能な機械学習アルゴリズムの開発も重要な課題となります。

リザーブコンピューティング

リザーブコンピューティング (以下RC) は、人工ニューラルネットワークをさまざまな物理現象を利用して実装することを可能にする機械学習の枠組みです [2]。

ニューラルネットワークは、入力層・中間層・出力層からなりますが、通常のニューラルネットワークではこれらの層をつなぐ重みのすべてを訓練課程において調節し、学習を行います。一方、RCでは出力層のみが訓練において調節されます。したがって、RCでは、学習において中間層の詳細な挙動を調節する必要がありません。一般の物理現象は、その挙動を詳細に調節することが困難なため、通常のニューラルネットワークの中間層の役割を果たすことは困難です。しかし、RCの枠組みにおいては、中間層の人工ニューロンからなるネットワークの役割を、多彩な物理現象を用いて実現することができます。

RCは光・機能性材料・スピントロニクスなどによるさまざまなハードウェア実装が可能です。したがって、光を用いた高速・省エネルギー処理や、スピントロニクスによる省サイズ実装などが期待できます。また、メモリを物理的状态、演算を物理法則

に従う時間発展が担うため、インメモリ計算に属します。また、学習を出力層における線形回帰のみで行うことができるため、実装が容易かつ訓練を高速に行うことができます。RCは時系列の扱いを得意としており、とくにカオスといった非常に複雑な動的挙動の予測において非常に高い性能を示します。これらの特性から、RCは前章に述べた問題点を解決するための機械学習の枠組みとして注目されています。

非線形数理講座では、鈴木秀幸教授を代表者とするJST CREST「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」研究課題に取り組んでいます。蛍光を発するナノ粒子間のエネルギー移動を背景とするFRETネットワークや、光学系をもちいた反復写像系といった光学的現象・ハードウェアを利用したRCの開発を行っています。

また、JST Moonshot 研究開発プロジェクト「複雑臓器制御系の数理的包括理解と超早期精密医療への挑戦」(PM:合原一幸 東京大学特別教授)に参画し、病気の発現や病態ステージ間遷移といった複雑な動的過程のRCによる予測手法の開発に取り組んでいます。

さらに、JSPS Core-to-Core 研究課題「マテリアル知能による革新的知覚演算システム」(研究代表:松本卓也 大阪大学教授)にも参画し、機能性材料で実装するRCの入力チャネル設計に関する研究などに取り組んでいます。

おわりに

現代の非常に大きな技術革新の背景にある機械学習技術は、今後も飛躍的に発展・普及していくと考えられます。本稿に述べたように、機械学習技術の更なる発展のために、従来のCPU・GPUを想定したアルゴリズム・ソフトウェアの発展だけでなく、新奇的ハードウェアやそれに親和的な実装手法の開発が望まれています。リザーブコンピューティングは新奇的ハードウェア上でニューラルネットワークを容易に実装することを可能にする枠組みであり、光・機能性材料・スピントロニクス等を研究する応用物理学・応用化学と、機械学習アルゴリズムや物理現象の数値モデルを研究する数理工学のよい交差点として、魅力的な研究の舞台となっています。

本項執筆の機会を与えてくださった森田浩教授、

ならびに「生産と技術」関係者のみなさまに感謝申し上げます。また、JST、JSPS などによる支援に感謝いたします。

参考文献

[1] 低炭素社会の実現に向けた政策立案のための提

案書、“情報化社会の進展がエネルギー消費に与える影響 (Vol.4) ”、科学技術振興機構低炭素社会戦略センター、2022年2月

[2] 田中 剛平他、“リザーバーコンピューティング”、森北出版、2021

