

2024 年度年次報告書

情報担体を活用した集積デバイス・システム

2020 年度採択研究代表者

齊藤 英治

東京大学 大学院工学系研究科
教授

非古典スピン集積システム

主たる共同研究者:

石田 真彦 (日本電気(株) グローバルイノベーションビジネスユニット 主幹研究員)

齊藤 英治 (東北大学 材料科学高等研究所 客員/委嘱教授)

鈴木 義茂 (大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授)

ペパー フェルディナンド (情報通信研究機構 未来 ICT 研究所脳情報通信融合研究センター
嘱託)

研究成果の概要

集積デバイスに実装するアルゴリズムとして、自由エネルギー原理に基づき物理系からのサンプリングのみで学習する熱平衡機械学習を具体化し、勾配消失が生じるような深層ニューラルネットワークでも正則化可能な「スピンオートエンコーダ」を提案した。これを数値計算により実証するとともに、物理実装を実現する集積デバイスの原理検証実験を行った。

ハードウェア面では、自由エネルギー原理に基づく熱平衡機械学習を実現する集積デバイスを構成する単一素子の実証を行った。このデバイスは磁性体薄膜円盤からなり、ニューラルネットワークの損失関数から計算される勾配を反映したマイクロ波を加えることで、発振状態の位相が変化する。この位相の平均値を電氣的に読み出すことによって、ニューラルネットワークの重みパラメータを取得する方法で学習を行った。これは物理系からのサンプリングのみによって深層学習を実現する新たな集積デバイスとなる。本年度は単一の素子で繰り返し同様の測定を行うことで、実際に物理デバイスの応答から学習が進むことを確認した。この実験の中で、電氣的な位相情報の読み出しにはスピン流測定やスピン起電力による電圧が検討された。さらに、光読み出し式の複数パラメロンからなる集積デバイスの原理実証実験も行い、集積化へのめどを立てた。

ソフトウェア面では、自由エネルギー原理に基づく熱平衡機械学習をさらに進化させ、「スピンオートエンコーダ」という新概念を打ち出した。これは、生成モデルを実装するアーキテクチャの一つである自己符号化器(オートエンコーダ)と同様の構造を持ったニューラルネットワークであるが、このうち、潜在空間を担う重みの部分のみをニューラルネットワークと双対なスピン系からサンプリングする機構を有するものである。このサンプリングで得られる重みは、自由エネルギーの定義に基づいて損失平坦性が保証されているため、局所最適値に落ちることなく正則化されることが期待できる。実際、通常の最適化手法では正則化しないような深層のニューラルネットワークでも、本手法では正則化し、このアルゴリズムの実用性が示された。

【代表的な原著論文情報】

1) G. Emdi, T. Hioki, T. Makicuhi, and E. Saitoh, “Tunable sigmoid behavior of a magnon-based parametron using a $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}/\text{Pt}$ bilayer disk”, *Physical Review Applied* 22, L031002 (2024).

2) K. Hoshi, T. Hioki, and E. Saitoh, “Electric voltage generation by standing spin waves in a ferromagnetic metal”, *Physical Review Applied* 21, 064057 (2024).