

2023年度 TIA 連携プログラム探索推進事業「かけはし」 調査研究報告書(公開版)

【研究題目】原子スイッチ搭載 FPGA による高性能機械学習処理の調査研究

【整理番号】TK23-011

【代表機関】NIMS

【調査研究代表者（氏名）】

鶴岡 徹

【TIA 内連携機関：連携機関代表者】

筑波大学：山口 佳樹

産業技術総合研究所：堀 洋平

高エネルギー加速器研究機構：五十嵐 洋一

【TIA 外連携機関】

ナノブリッジ・セミコンダクター株式会社

大阪大学

【報告書作成者】

鶴岡 徹

【報告書作成年月日】

2024 年 3 月 25 日

【連携推進（具体的な連携推進活動内容とその活動の効果等）】

本事業は、我が国の独自技術である原子スイッチ技術を利用した人工ニューラルネットワーク（ANN）回路を半導体集積回路（FPGA）に積層した「原子スイッチ搭載 FPGA」を開発し、人工知能（AI）技術に応用するための基盤技術創成と実用化に向けた調査研究が目的である。人工シナプス素子や ANN 回路の設計・構築（物質・材料研究機構）、ANN 回路の FPGA への実装・動作検証（筑波大学）、FPGA 開発設計ツールのサポートと関連技術（産業技術総合研究所）、原子スイッチ搭載 FPGA を用いたセンシングおよびデータ処理システム（高エネルギー加速器研究機構）に関する広い分野を横断的に調査し、知見の共有を進める。今年度は、まずシナプス素子に必要とされる性能と ANN 回路に実装する際の技術的課題に関する議論を進め、イオンゲート型シナプストランジスタの開発に至った。一方、システム化の連携として、FPGA 開発設計ツールと FPGA センシングシステムの調査研究を進め、加速器実験を用いたシステム試験を実施した。また、大型プロジェクト申請を念頭にナノブリッジ・セミコンダクター社との連携を強化し、原子スイッチ搭載 FPGA のアプリケーション化に向けた議論も開始した。

【調査研究内容（研究背景・課題解決の内容と結果）】

現在の主流であるプログラム指向の AI 技術は、膨大な情報を処理するために高度に複雑化したプログラムと高速演算処理を行う大規模コンピューティング技術によって支えられている。しかし、取り扱う情報量の増大に伴い、コンピュータの大型化と高消費電力の問題に直面している。この課題を解決するために本調査研究では、ハードウェア

指向 AI 技術として原子スイッチ技術に基づき人工シナプスや ANN などの脳機能を模倣する素子や回路を構築し、それらを FPGA に搭載することにより超小型・超低消費電力の高性能機械学習処理システム開発の可能性を探る。

今年度は、ANN 回路に実装する人工シナプス素子に要求される性能を調査した。得られた設計指針を基に、固体電解質ゲートからイオンの挿入・抽出により混合伝導体チャネルの抵抗を双方向にアナログ変化させるイオンゲート型トランジスタを設計・作製し、そのシナプス動作を実証した。また、これらのシナプス素子を ANN 回路のように並列接続した場合、素子単体の特性だけでなく、ネットワーク内の情報保持方法、同期/非同期処理、デジタル/アナログ処理など考慮すべき問題があり、デバイスアーキテクチャの観点から調査および検討を行った。これらの結果を元に、2024 年度科研費基盤研究(B)に申請し採択された。また、FPGA セキュリティの研究開発と設計ツール整備の調査結果に基づき、2024 年度科研費基盤研究(B)に申請し採択された。

本プログラムで上げた成果に関する今年度の論文リスト

- 1) H. N. Mohanty, T. Tsuruoka et al., “Proton-gated synaptic transistors, based on an electron-beam patterned Nafion electrolyte”, ACS Appl. Mater. Interfaces 15, 19279-19289, 2023.
- 2) S. Mallik, T. Tsuruoka et al., “Effects of Mg doping to a LiCoO₂ channel on the synaptic plasticity of a Li ion-gated transistor”, ACS Appl. Mater. Interfaces 15, 47184-47195, 2023.
- 3) R. Nakagawa, Y. Yamaguchi et al., “Stereo Vision System for Crop Height Measurement Using a Monocular Camera-Equipped Drone”, In proceedings of 2024 IEEE International Conference on Consumer Electronics, pp.207-208, 2024.
- 4) Y. Jongkwan, Y. Yamaguchi et al., “FPGA-based detector with SiC sensing for real-time monitoring of muon beams: A preliminary report of the SCIBER-1 system in COMET Phase- α ”, In proceedings of the 13th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies, pp.35-40, 2023.

主な学会活動等

- 1) 鶴岡 徹 イオン伝導体薄膜の開発とイオニクス神経情報処理素子の創製、第 85 回 固体イオニクス研究会（招待講演）
- 2) Kazuya Terabe, Ionic Nanoarchitectonics to enhance memristive and neuromorphic technology, MEMRISYS 2023（招待講演）
- 3) 堀 洋平 物理複製困難関数 PUF の基礎・応用と国際標準化、エレクトロニクス実装学会 Artificial Intelligence and IoT (AI2oT) 講座（依頼講演）
- 4) 上野 一樹 原子スイッチ FPGA の加速器実験応用の検討、日本物理学会第 78 回年次大会 2023
- 5) 山田 千尋 熱中性子による FPGA の Single Event Upset、第 30 回 ICEPP シンポジウム 2024

【今後の活動予定】

上記の通り、本調査研究により AI 応用を目的とした原子スイッチ搭載 FPGA の開発に向けた基盤構築は進んでいる。実装化に向けて解決すべき課題等も明らかになりつつあり、今後も引き続き調査研究を進める予定である。また、この調査研究に関連して、新たな機関との連携構築や、更なる連携強化も図りつつ、大型予算の獲得に努める。さらには、過酷な環境下においても高精度に安定して動作する原子スイッチ搭載 FPGA ベースのセンシングシステムの可能性と、そのために必要な新しい素材、新しいアーキテクチャ、新しいシステムの開発に関する調査研究も進めていく予定である。

【SDGs17 目標について、調査研究成果について、貢献ができると思われる項目があれば、最大3つまで☑をご記載下さい。】

研究成果に関連する SDGs 目標がある。

関連する SDGs 目標は無い

1 <input type="checkbox"/> 貧困をなくそう	2 <input type="checkbox"/> 飢餓をゼロに
3 <input type="checkbox"/> すべての人に健康と福祉	4 <input type="checkbox"/> 質の高い教育をみんなに
5 <input type="checkbox"/> ジェンダー平等を実現しよう	6 <input type="checkbox"/> 安全な水とトイレを世界中に
7 <input checked="" type="checkbox"/> エネルギーをみんなに、そしてクリーンに	8 <input type="checkbox"/> 働きがいも経済成長も
9 <input checked="" type="checkbox"/> 産業と技術革新の基盤を作ろう	10 <input type="checkbox"/> 人や国の不平等をなくそう
11 <input type="checkbox"/> 住み続けられるまちづくりを	12 <input type="checkbox"/> つくる責任、つかう責任
13 <input type="checkbox"/> 気候変動に具体的な対策を	14 <input type="checkbox"/> 海の豊かさを守ろう
15 <input type="checkbox"/> 陸の豊かさを守ろう	16 <input type="checkbox"/> 平和と公正をすべての人に
17 <input type="checkbox"/> パートナリシップで目標を達成しよう	

以上