

光演算回路に基づく広帯域かつ超省エネルギー情報処理基盤の創出

	研究代表者	名古屋大学・情報学研究所・教授 石原 亨（いしはら とおる）	研究者番号：30323471
	研究課題情報	課題番号：24H00072 キーワード：光ニューラルネットワーク、省エネルギー、AI推論、光トランシーバ、高次多値変調技術	研究期間：2024年度～2028年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

●研究の全体像

機械学習やAI推論の社会応用が急速に進む中で、その処理にかかるエネルギー消費は大きな問題となっている。機械学習やAI推論などの処理では、計算を行う演算装置が目ざされがちであるが演算装置と同等の複雑な処理が通信装置の中でも行われており、どちらの装置も膨大なエネルギーを消費している。例えば、データセンタ内の計算機サーバでは、多数のコンピュータチップやメモリチップを搭載したボードが光ファイバケーブルによって相互接続されている。計算機サーバ間の通信データの量は年率20%以上のペースで増大しており、消費エネルギー増大の要因となっている。スーパーコンピュータや量子コンピュータにおいても多数のコンピュータチップが協調して計算を行うため、光ファイバによる広帯域相互通信は必要不可欠な技術である。光ファイバケーブルを通じたデータ通信の送信処理と受信処理を担う装置が光トランシーバと呼ばれる装置である。AI推論や量子計算に対するニーズの高まりとともに光トランシーバの省エネルギー化は喫緊の課題となっている。

本研究では上述した情報通信における消費エネルギー増大の問題を緩和することを目的として、光トランシーバにおける消費エネルギーをAI推論によって低減する情報処理技術の創出を目指す。具体的には、光ニューラルネットワークと呼ぶ新しいAI推論処理技術を活用する。光ニューラルネットワークは光を活用する信号処理回路であり、AI推論を超高速かつ低電力で実行できる。通常は電子回路で行う波形生成や歪み補正などの処理を光ニューラルネットワークに実行させることにより光トランシーバの消費エネルギーを削減する。

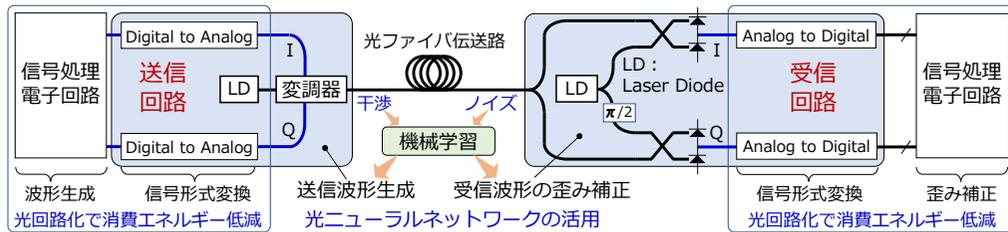


図1 光ニューラルネットワークによるAI推論を導入する光トランシーバの全体像

●光の高速性と低消費電力性を活用する光ニューラルネットワーク

研究代表者は過去の研究の中で光ニューラルネットワーク回路の省エネルギー化に関する研究に取り組んできた。従来の電子計算機が大量の電子の移動（電流）を利用して論理演算や記憶を行うのに対して、光ニューラルネットワークは光の波動を活用してAI推論処理を実現する。光の伝播の速度は信号電力に依存しないため、微弱な光でも高速性を維持できる。この性質を使用すれば超高速かつ低消費電力なAI推論を実現できる。また、異なる波長の光は相互干渉しないため、光ニューラルネットワークでは、多数の光を重ね合わせることで高い並列度でAI推論処理を実行できる。

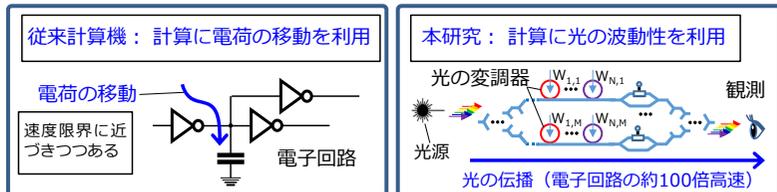


図2 従来型電子計算機と光ニューラルネットワーク計算の比較

●異分野研究の融合に基づく着想

研究代表者が光回路の研究に取り組んできた一方で、分担者グループは高次多値変調技術と呼ばれる広帯域かつエネルギー効率の高い通信技術の開拓的研究に取り組んできた。高次多値変調技術は一つの信号パルスに多ビットの情報を乗せて情報を伝達する広帯域通信技術である。光通信の帯域幅を向上させる方法として、複数の波長を重ね合わせる方法や単位時間当たりの送受信パルス数を増やす方法などが知られているがいずれの方法もデータ伝送自体の消費電力および消費エネルギーの増大をとまぬ。高次多値変調は信号パルス当たりのビット数を向上させる方法であるため信号伝送自体の消費エネルギーは原理的には増加しない。一方、高次多値変調は送信した多ビットの情報を受信回路で正確に復号する必要があり、今日の光トランシーバではこの復号が大きな負荷となっている。特に光ファイバ伝送路が長距離になるとノイズや偏波間干渉の影響を受けて信号パルスが歪むため等化と呼ばれる処理によって正しい情報を復元する技術が必須となる。この処理がエネルギー消費増大の要因となっている。現在は電子回路で行っている等化の処理を本研究では光ニューラルネットワークを用いたAI推論により実現する。これにより光トランシーバの大幅な省エネルギー化を目指す。集積回路の専門家と光通信の専門家が分野横断で協力することにより異分野融合の研究を推進する。

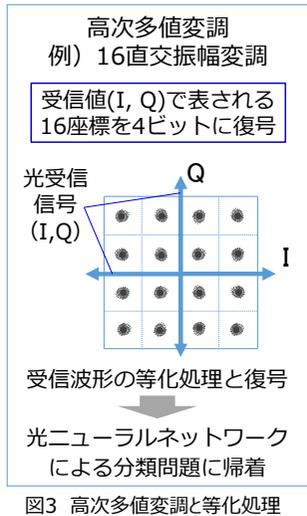


図3 高次多値変調と等化処理

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

●光コンピューティングの低エネルギー限界の解明（学術的意義）

計算機工学の一部の研究分野は、図4左の従来型計算機モデル上で実世界の問題をいかにして効率よく解くかを追求してきた。本研究では、図4右に示す光伝播に基づく光計算を用いていかにしてエネルギー効率よく広帯域情報処理を行うかという問いを追求する。これにより、エネルギー効率の観点で光演算回路の最適な構成を明確にし、応用システムとしての光トランシーバの低エネルギー限界を解明する。最終的には、従来型電子計算機の低エネルギー限界を突破する光情報処理基盤の創出を目指す。

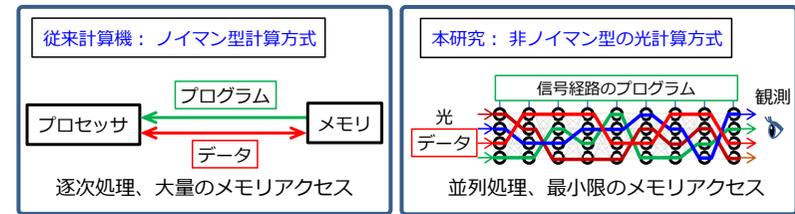


図4 光の伝播に基づく計算方式の低エネルギー限界の解明

●シリコンフォトニクスチップ試作エコシステムの開拓（社会貢献）

集積回路設計の分野では設計技術の研究教育と全国の大学や高専への普及を目的として1996年に東京大学大規模集積システム設計教育センターが設立された。シリコンフォトニクスに基づく光電融合回路は世界的ニーズの高まりに反して、試作環境や設計教育環境が十分に整備されていない。シリコンフォトニクスはシリコン基板上に光回路と電子回路を混載して光電融合回路を実現する技術である。本研究では産業技術総合研究所が主催するシリコンフォトニクスコンソーシアムと協働し光電融合回路設計のためのエコシステムの構築を目指す。光電融合回路の設計や試作へのハードルを下げ、光回路の設計や試作に参入する研究者や大学・高専の学生を増やす民主化活動が重要である。本研究では、光電融合回路試作を民主化する活動の第一ステップとして、図5に示すAI推論器モデル設計からシリコンフォトニクスチップ試作までの設計実証フローの開拓を目指す。

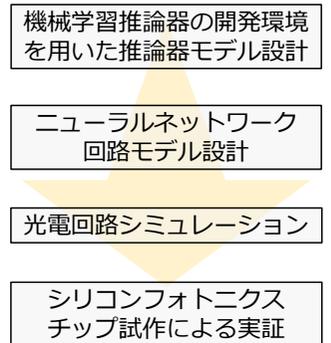


図5 フォトニクスチップ試作エコシステム