

外部光で動作する DNN 向けニューロン素子の初期検討

A Light-Driven Artificial Neural Network Architecture for Deep Neural Network

大塚卓哉^{*1}
Takuya Otsuka

小仁所志栞^{*1}
Shiori Konisho

^{*1} 日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所
NTT Device Technology Labs, NTT Corporation

With the aim of making an IoT device more environmentally friendly, we attempted to redesign the physical layer of an IoT device architecture for a deep neural network. A method for making a deep neural network device for inference execution with a plastic optical fiber is proposed. The device comprises sum-of-product arithmetic units driven by light from an external light source and non-linear activation function units. These units are concatenated in line and form a layered network without optical amplifiers.

1. はじめに

深層学習を利用した AI 機能があらゆる端末機器に搭載され、端末機器がネットワーク化されていく IoT の未来が予想されている。この種の予測の多くでは、末端に位置する IoT デバイスはデータ収集に専念し、クラウド上で実行される AI 処理の指示に従い動作することになっている。しかし、IoT デバイス自体が十分な AI 機能を持つと、自ら判断し動作する IoT デバイスが增加すると考えられる。そして、やがて、撒いて放置、捨てられる IoT デバイスの需要が高まると我々は予測している。例えば、適当に撒かれた IoT デバイスが環境中の化学物質の状態をセンシングし、適切な判断の下に必要な物質を放出し環境を制御する、というシナリオが典型例である。そして、それらは役目を終えた後に分解して無くなってもらえれば回収コストも不要になり都合がよい。

上記のようなシナリオでは、土壌に撒かれる IoT デバイスであれば分解され土に戻る、または、生体に貼られたり埋め込まれたりするものであればアレルギーを起こさない生体親和性の高い素材で作られ、消化、分解される等、デバイスの素材が適用環境に対し親和性が高いことが重要となる。微細化と高速化は IoT デバイスの重要な要素であるため、多くの研究は、適用環境への親和性が必ずしも高くはないシリコン半導体技術の活用を前提としており、デバイスがどのような素材で構成されるべきかについて多く検討されていない。そこで我々は、IoT デバイスの AI 機能の実装として現在最も高い認識精度が達成される深層ニューラルネットを様々な素材で作成する試みを進めている。

2. 提案手法の概要

自律的に動作する IoT デバイスに必要な機能は、センシング、認識、アクチュエーションの3つに分類できる。我々の提案対象は“認識”機能であり、具体的には深層学習の推論処理を実行する演算素子の構成法である。

2.1 高分子ポリマー光導波路による光演算機

提案手法は、光導波路で演算ネットワークを構成し深層ニューラルネットの演算を光信号で実行する方式であり、その素材として高分子ポリマーを選択した。高分子ポリマー導波路による

光演算機を選択した理由を2点記す。

(1) 適切な素材選択による適用環境への高い親和性

高分子ポリマーは、その分子組成により様々な物理特性を付与することが可能な素材であり、演算機を適用する環境で必要される特性に合わせて素材を選択できる。例えば、土壌や海洋に播いて捨てられる使い捨て演算機を実現する為に、特定の条件下で分解する高分子材料を用いることが出来る。あるいは、軟体構造ロボットの柔軟に変形する躯体に適用する為に伸縮性の高い高分子材料を用いることができる。

(2) 機能のダイレクトな光接続によるシステム簡素化

化学物質のセンシング手法として、特定の分子種の存在を判断するために分子が持つ固有の光吸収特性を利用したり、分子構造の変化に起因する光の屈折率変化を利用するものが少なくない。センシング部からの出力を光のまま認識処理部に入力し光で演算処理できれば、従来必要とされてきた光信号から電圧信号への変換処理が不要となる。その結果、光電変換に伴うエネルギー損失が無くなる上、変換処理ブロックそのものが不要となり、システム簡素化による経済性向上が期待できる。

また、アクチュエーション手法として、光で直接分子構造を変化させて標的分子を放出、あるいは、吸着する機構が、環境浄化システムやドラッグデリバリーシステムの分野で検討されてきた。光で直接アクチュエーション機能を駆動させることが可能になると、従来 μ TAS 等で利用されてきた電磁弁、あるいは、モータ等の駆動部とその制御機構が不要となり、システムが簡素化され経済性向上が期待される。

このように、センシング、認識、アクチュエーションの3機能が一貫して光で動作すると、システム全体が簡単化され低コスト化と省エネルギー化に繋がると期待される。

2.2 外部から光を取り込み動作する DNN (Deep Neural Network) 演算機

提案手法では、外部から光を演算機に取り込んでそのまま光演算を実行する構造をとり、光が利用可能な限り動作を継続することができる。本稿では DNN の一形態として推論を実行する全結合型 DNN を取り上げる。全結合型 DNN は、積和演算と非線形関数演算を多段に接続することで構築される。提案する演算機アーキテクチャは、取り込んだ光で直接駆動されるように設計された積和演算素子とその出力を非線形変換する非線形関数演算素子、そして、それら演算素子を増幅機構無しに多段に接続する機構から構成される。

連絡先: 大塚卓哉, 日本電信電話株式会社 NTT 先端集積デバイス研究所, 〒243-0198 神奈川県厚木市森の里若宮 3-1, takuya.otsuka.yt@hco.ntt.co.jp

2.3 関連研究

光演算機をつかった DNN の実装手法として、演算機を多段に接続するために受光機と発光機を組み合わせ配置した光増幅法を用いる研究[谷本 17]が報告されている。受光機で受けた光強度に応じて LED を発光させる方式であるため、光増幅処理に外部からの電力供給を必要とする。また、光集積デバイス化を進めた研究として、演算と増幅処理の両方を光で実行する事例[Yichen 17]も報告されている。この方式は、光で演算を実行する為にコヒーレントなレーザ光を光源として必要とし、光集積デバイスの駆動には十分大きな電力の投入が必要である。これらの手法は、既存の半導体プロセッサと比較して消費電力あたりの演算速度を向上させる事を目的としており、本稿で提案するアーキテクチャが目指す用途への適用は難しい。

本稿で提案する光演算素子の多段接続法は、次章で詳述するように、光制御ー光スイッチを重要な構成要素として持つ。光で制御する光スイッチとしては非線形光学結晶を利用したもののが良く知られているが、非線形光学効果を起こすために強力なレーザ光が必要となる。本稿が目指す用途に適用可能な光制御光スイッチとして、光熱変換による温度上昇で相転移する液晶分子を利用した光熱スイッチ[西山 07]がある。この光熱スイッチは、メチルレッド色素の光吸収特性を利用し、吸収帯に含まれる波長である第一の光を制御光とし、吸収帯から外れる波長である第二の光の進行方向を制御する。しかし、この光熱スイッチは制御光と制御される光の波長が異なり、単純に光演算素子を多段接続することができず、DNN を構成することはできない。

外部から取り込んだ自然光等で直接駆動される光演算 DNN アーキテクチャは我々の知る限り本提案が最初である。

3. DNN 演算機アーキテクチャ

図1に一般的な DNN モデルとその構成要素であるニューロン素子(ノード)の機能ブロックを示す。各ノードには、前段層の各ノードからの入力(重み w)と乗算された値を合計する積和機能と、それに続く非線形演算機能がある。さらに、後段層の各ノードに出力するために、増幅機能と分岐機能がある。このノードが多段に接続されることで DNN を構成する。以下に光増幅機を用いずに DNN を構築可能なノードの積和演算機構とその多段接続機構、及び、非線形演算機構を順に記す。

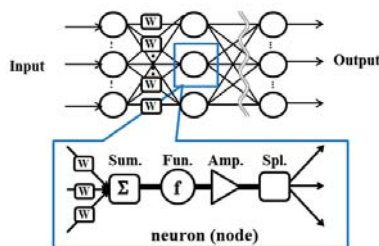


図1 ニューロン素子の機能

3.1 積和演算素子

提案する演算方式では、DNN を構成するノードへの入力値、出力値、そして、ノード間で渡される値が光の信号強度によって表現される。また、ノード間の重み(w)は光強度を減衰させるフィルタの減衰率によって表現される。従って、図1に示したノードにおける積和演算は、2入力の場合、図2(a)に示すような光導波路上のフィルタとカプラにより実現される。前段層の各ニューロンからの光入力の強度(X_0, X_1)が重み(W_0, W_1)を表現するフ

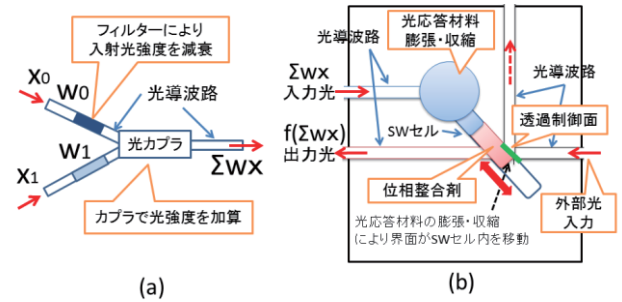


図2 積和演算素子の構造

ィルタで減衰され、それらを加算することで積和演算($X_0 \cdot W_0 + X_1 \cdot W_1$)が実行される。

3.2 光増幅機不要な演算機の多段接続(多層化)

光強度を指定された減衰率で減衰させる事で乗算を表現する方式では、入力光と比べて出力光が必然的に減衰する。故に、複数の積和演算機を多段に接続して多層化するためには、演算器と演算器の間に光を増幅させる仕組みが必要となる。提案手法では、外部から取り込んだ光をスイッチングすることで光導波路に導き、光増幅機を使わずに多段接続を実現する。

図2(b)に示すスイッチ機構は、ポリマー基板上に入力光、出力光、及び、外部光が導波する光導波路が形成され、液体が収まるスイッチ(SW)セルが切削加工されている。光に反応し膨張する光応答材料と、光導波路の材質と同じ屈折率を持つ位相整合剤が SW セルに封入されている。光応答材料は、光や熱によって分子構造が変化することで特異な特性を発揮する材料[Ueki 14] [Kusano 14]である。このスイッチ機構では、入力光の強度に依存して光応答材料が膨張し、それに伴って位相整合剤が SW セル内を移動する。位相整合剤が透過制御面の位置にある場合、導波路と位相整合剤の屈折率が合っているため、外部光は透過制御面を直進して出力光側の導波路へ進み出力光となる。位相整合剤が透過制御面から外れている場合、導波路とセル空間の屈折率差により外部光は透過制御面で反射され出力光とはならない。この動作原理は熱毛管現象を利用した光スイッチ[下川 00]の構造から着想を得たものである。この光スイッチ機構により、入力光よりも大きな強度の外部光を出力光として取り込むことで光増幅させた事と同じ効果を持つ事に注意する。

図2(b)の光スイッチをノードが持つことにより、次層のノードに十分な強度の光を出力することができ、多段接続が可能になる。光スイッチを図3(a)に示すように接続すると図3(b)に示す多層ネットワークと等価な演算が実現できることがわかる。図3(a)及び(b)において、入力(x_0, x_1)は重み(w_{01}^1, w_{11}^1)と積和演算された後、 N_1^1 (第1層のノード1)に相当するスイッチ SW_1^1 の入力光となる。入力光の強度により位相整合剤の界面が移動し、外部

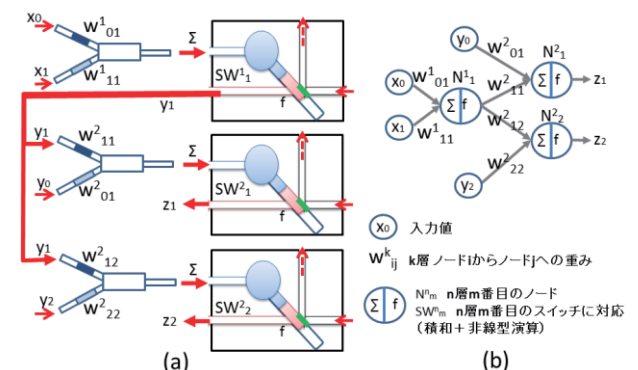


図3 積和演算素子の多層化

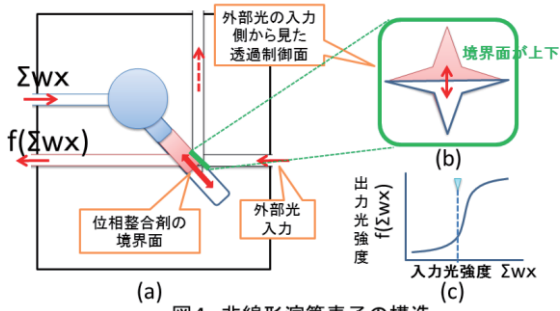


図4 非線形演算素子の構造

光から後述する非線型演算 f に従った光量だけが出力光側の導波路に取り込まれ、 N_1 の出力 y_1 となる。 y_1 は第 2 層のノードである N_1^2 と N_2^2 の入力となる。 N_1^2 への入力 (y_0, y_1) は、重み (w_{01}^2, w_{11}^2) と積和演算された後スイッチ SW_1^2 の入力光となり、同様の動作によりスイッチ SW_1^2 すなわち、 N_1^2 の出力 z_1 となる。同様に N_2^2 の出力は z_2 となり、この手続きを繰り返すことで光増幅機を使わずに任意段数の多層化が実現できることがわかる。

3.3 非線型演算素子

非線型演算は DNN の重要な要素であるが、提案手法では極めて簡単な方式で実現する。図 4(a) に示すように外部光が入力される導波路側から見た透過制御面に適当な形状の開口窓を加工することで任意の非線型関数 f を実現できる。例えば、図 4(b) のように十字星型の開口部とすると、入力光強度に対する光応答材料の膨張量が比例する条件下で、図 4(c) のような入力光強度に対して出力光強度が非線型となる関数を実現できる。

4. 評価実験

入手性と加工容易性を優先した簡易実験系を作成し、提案する光スイッチの実現可能性を評価した。ポリメチルメタクリレート樹脂 (PMMA) の基板を切削しプラスチック光学ファイバ (POF) を埋め込み、POF に対して 45 度の角度でスイッチセル (SW セル) となる空間を切削形成 (図 5(a)) した。POF の径と SW セルの幅を共に $250 \mu\text{m}$ とし、両者が交差する箇所が透過

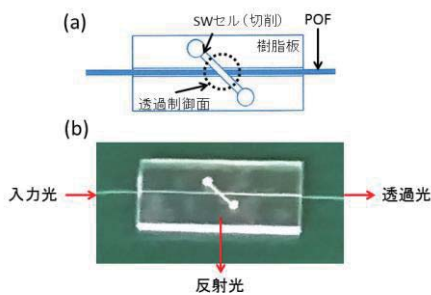


図5 光スイッチ評価実験系

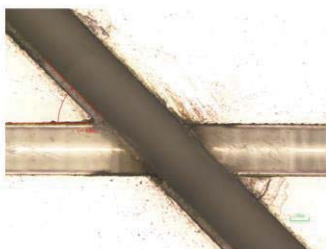


図6 光スイッチの透過制御面

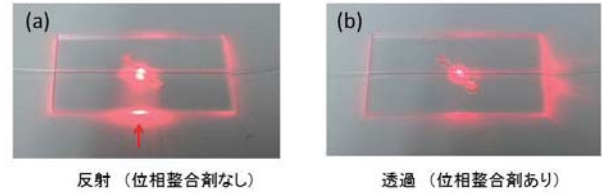


図7 透過/反射 制御実験

制御面である。加工部位の顕微鏡写真を図 6 に示す。POF のコア材料と同じ屈折率を持つシリコンオイルを位相整合剤として選択し SW セルに充填、あるいは、抜き出すことで光スイッチ動作を模擬した。

図 5(b) に示すように図面左側から波長 633nm の赤色光を入射し、透過制御面で透過、および、反射される光の強度を測定した。位相整合剤が透過制御面にないと図 7(a) から見て取れるように図面下側へ赤色光が反射される。また、位相整合剤が透過制御面にある時は図 7(b) のように反射光はわずかで、ほぼ透過することがわかる。このスイッチの挿入損失は、透過側における光強度計測で、 2.4dB (透過条件)、および、 16.5dB (反射条件) であり、スイッチとしての消光比は 14.1dB であった。

5. まとめ

本稿では、外部光を取り込んで直接駆動する積和演算素子と非線型演算素子の構造を提案し、光増幅機を使わずにニューロン素子を多層化して DNN を構成する方法を示した。また、ニューロンの多層化に重要な要素となる光スイッチ構造の初期評価を実施した。簡易な構成の実験系でも比較的大きな消光比 (約 14dB) を得ることが確認された。

参考文献

- [Kusano 14] Daichi Kusano, Ryota Ohshima, Nobuhiko Hosono, Kenro Totani, Toshiyuki Watanabe. :Photochemical reaction in azobenzene-containing rigid poly(amide acid) networks, *Polymer* 55, pp. 5648-5655, 2014.
- [西山 07] 西山達, 保坂佳正, 大谷幸利, 梅田倫弘.: 液晶位相格子を用いた光制御—光熱スイッチの開発, *IEEJ Trans. EIS*, Vol.127, No.6, pp. 966-967, 2007.
- [下川 00] 下川房男, 佐藤誠, 牧原光宏, 稲垣秀一郎, 西田安秀.: 熱毛管型光導波路スイッチの開発, *精密工学会誌*, Vol. 66, No. 8, pp. 1173-1176, 2000.
- [谷本 17] 谷本桂理, 雨宮嘉照, 田部井哲夫, 横山新.: フォトリソミック材料を用いた光ニューラルネットワークの研究, *応用物理学会講演会第 64 回*, 2017.
- [Ueki 14] Takeshi Ueki, Stimuli-responsive polymers in ionic liquids, *Polymer Journal* 46, 646–655, 2014.
- [Yichen 17] Yichen Shen, Nicholas C. Harris, Scott Skirlo, Mihika Prabhu, Tom Baehr-Jones, Michael Hochberg, Xin Sun, Shijie Zhao, Hugo Larochelle, Dirk Englund, and Marin Soljacic.: Deep learning with coherent nanophotonic circuits, *Nature Photonics*, 11,441-446, 2017.