多面光波変換法によるロバストな集積光ニューラルネットワークの検討

Study on Robust Integrated Optical Neural Network using Multi-Plane Light Conversion

東大院・工，°(D2)田之村亮汰，水上慧吾，唐睿，相馬豪，種村拓夫，中野義昭

The Univ. Tokyo, °Ryota Tanomura, Keigo Mizukami, Rui Tang, Go Soma, Takuo Tanemura, Yoshiaki Nakano

E-mail: ryota_tanomura@hotaka.t.u-tokyo.ac.jp

1. 背景

深層学習は広範な分野に応用されているが，各層で大規模行列演算を膨大なデータの数だけ行う必要があるため，消費電力と演算遅延が問題となっている[1]．そのため，低消費電力かつ低遅延な計算基盤として光ニューラルネットワーク(ONN: optical neural network)が注目を集めている．特に集積光ユニタリ変換器(OUC: optical unitary converter)による ONN は，再構成可能な任意の線形演算を小型な集積回路上で実現できる[1]．OUC の多くは，多段にしたマッハツエンダー干渉計(MZI: Mach-Zehnder interferometer)により構成され，複数の実証例がある[2]が，各 MZI が作製誤差に敏感であるため大規模化が困難である[3]．

本報告では，多面光波変換(MPLC: multi-plane light conversion)に基づくロバストな集積 OUC を用いた ONN の性能を検証する． 既存手法で正答率が 95%から 23%へと劣化するような誤差を導入した場合でも，多ポート方向性結合器による MPLC-OUC を用いることで，ONN 性能が劣化しないことが確認された．

2. 構成方法

任意の線形演算は，特異値分解の原理により 2 つのユニタリ行列と対角行列に分解できる．各ユニタリ行列を光集積回路上の OUC で実装し，対角行列を可変減衰器や増幅器アレイで実現すれば，全体として任意の線形演算が実現できる．図 1(a), (b)に MZI-OUC[4]と MPLC-OUC[5]の構成法をそれぞれ示す．N×N MZI-OUC は，MZI を $N(N\text{-}1)/2$ 個並べることで実現され，各 MZI は方向性結合器(DC: directional coupler)などによる 50:50 カプラと位相シフタで構成される．一方，MPLC-OUC は，多ポート DC と位相シフタアレイを多段にすることで実現される．MZI-OUC では，カプラの分岐比が正確に 50:50 であることが要求されるが，MPLC-OUC は，特定の変換を必要としないというロバストな特徴を有している[5]．

3. ONN の構成と結果

各 OUC を用いて構成した ONN のロバスト性を手書き文字(MNIST)の分類問題により検証する．図 2 に分類手順を示す．入力された画像を離散コサイン変換により周波数領域に変換した後，低周波成分のみを切り出し，ONN への入力ベクトルを成形する．ONN は 2 層から構成され，OUC 部を MZI-OUC または MPLC-OUC で構成する．このとき，誤差として各 DC の κL を変化させる．ここで，κ は隣接導波路間の結合係数，L は DC の長さであり，κL により DC の伝達行列が一意に定まる．

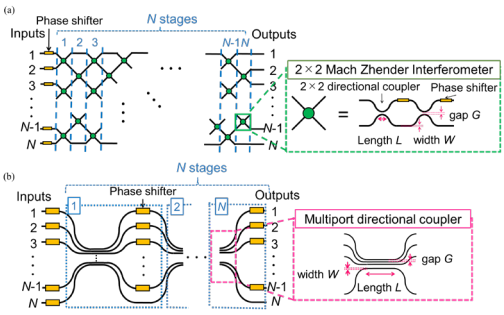

図 1. (a)MZI-OUC と(b)MPLC-OUC の構成図.

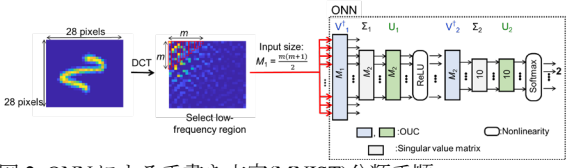

図 2. ONN による手書き文字(MNIST)分類手順.

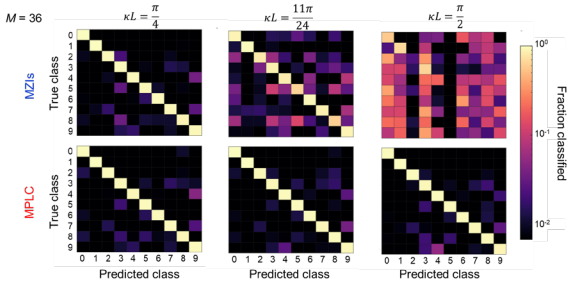

図 3. MZI-OUC(上段)と MPLC-OUC(下段)それぞれを使用した ONN による手書き文字(MNIST)の分類結果.

図 3 に学習結果の混合行列を示す．κL を{π/4, 11π/12, π/2}と変化させた際に，正答率が MZI-OUC(上段)では{95%, 78%, 23%}と変化するのに対して，MPLC-OUC(下段)では{95 %, 96 %, 95 %}と略一定である．κL の変化に伴い，MZI-OUC による ONN では性能が劣化するが，MPLC-OUC による ONN では性能の劣化がないことが確認できる．以上より，MPLC-OUC により，ロバストな ONN を実現可能であることが示された．

謝辞 本研究は，文部科学省科学研究費補助金（20J221861, 21K18168）の助成を受けて実施された．

参考文献

[1] G. Wetzstein, et al., Nature **588**, 2020. [2] W. Boagerts, et al., Nature **586**, 2020. Y. Shen, et al., *Nat. Photonics*, **441**, 2017. [3] M. F. S. Fang, et al., Opt. Express **27**, 2019. W. Bogaerts, et al., *Nature,* **586**, 2020. [4] W. R. Clements, et al., Optica **3**, 2016. [5] R. Tanomura, et al., Phys. Rev. Appl., to be published.

© 2022年 応用物理学会