

量子ニューラルネットワークにおける量子特徴マップの解析

Analysis of quantum feature maps in quantum neural networks

総研大¹, OIST², NII³, NTT 物性研⁴林 碧惟^{1,2,3,†}, 櫻井 彰忠^{2,3}, 西尾 真^{1,2,3}, William J. Munro^{4,3}, 根本 香絵^{2,3,1}SOKENDAI¹, OIST², NII³, NTT Basic Res. Labs.⁴Aoi Hayashi^{1,2,3,†}, Akitada Sakurai^{2,3}, Shin Nishio^{1,2,3}, William J. Munro^{4,3}, and Kae Nemoto^{2,3,1}

† aoi.hayashi@oist.jp

近年、数十から数百の量子ビットが量子プロセッサ上で制御できるようになった [1, 2, 3, 4]。それらは、NISQ(noisy intermediate-scale quantum) プロセッサと呼ばれている。「NISQ」という名前は、論理計算を行えるほどの量子ビット数には到達していないという事実由来する。しかしながら現在の NISQ プロセッサが持つ量子ビット数で実現される現象 [5, 6] は、古典計算機でシミュレーションするには難しい規模になってきている。そのため、NISQ プロセッサが持つ複雑性を活用することが期待されている。

そのように期待される計算モデルの例として、量子ニューラルネットワーク (quantum neural network, QNN) が挙げられる。QNN は量子ダイナミクスによって与えられるネットワークで、主に機械学習の手法と合わせて計算に用いられる。良い計算性能を達成するために重要な QNN の成分は、その量子ダイナミクスのユニタリマップによって与えられる量子特徴マップである [7, 8]。なぜならば量子特徴マップは、古典ニューラルネットワークにおける特徴マップと同様に、例えば画像分類問題においてデータの識別性に寄与するからである。そのため量子特徴マップと QNN モデルの性能に関する議論 [9, 10, 11, 12] は重要であるが、まだ十分に理解されていない。

本発表では、近年提案された QNN モデル (quantum extreme reservoir computing, QERC)[12] を用いて量子特徴マップの数値計算による解析を行う [13]。QERC は、MNIST 画像 [14] 分類問題について QNN の中で最も高い性能を最も少ない量子ビット数で達成したモデルであり、効果的な量子特徴マップの解析に適していると考えられる。量子特徴マップとして [12] では Floquet 系が用いられた。そこで我々の解析では、まず量子特徴マップを特徴づけるユニタリマップの重み分布を導入し、その Floquet 系が持つ分布の周期数における収束と計算性能の関係性について議論する。また、ランダムに生成された量子特徴マップと比較することで収束した分布を特徴づけ、分布のテールが MNIST 画像分類を解く QERC において汎化性能に寄与することを特定する。最後に、本発表で用いる量子特徴マップの中ではほぼ最適なテスト性能と最も良い汎化性能を持つ、NISQ プロセッサで実現可能である物理系を示す。

参考文献

- [1] F. Arute, *et al.*, Nature **574**, 505 (2019).
- [2] N. Friis, *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 021012 (2018).
- [3] H.-S. Zhong, *et al.*, Science **370**, 1460 (2020).
- [4] L. S. Madsen, *et al.*, Nature **606**, 75 (2022).
- [5] M. Gong, *et al.*, Science **372**, 948 (2021).
- [6] P. Frey and S. Rachel, Sci. Adv. **8**, eabm7652 (2022).
- [7] M. Schuld and N. Killoran, Phys. Rev. Lett. **122**, 040504 (2019).
- [8] M. Noori, *et al.*, Phys. Rev. Applied **14**, 034034 (2020).
- [9] K. Fujii, *et al.*, Phys. Rev. Applied **8**, 024030 (2017).
- [10] S. Ghosh, *et al.*, npj Quantum Inf. **5**, 35 (2019).
- [11] R. Martinez-Peña, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **127**, 100502 (2021).
- [12] A. Sakurai, *et al.*, Phys. Rev. Applied **17**, 064044 (2022).
- [13] A. Hayashi, *et al.*, arXiv preprint arXiv:2211.07841 (2022).
- [14] L. LeCun, *et al.*, <http://yann.lecun.com/exdb/mnist/index.html>.