

変分量子アルゴリズムにおける量子回路の分割実装と量子状態の再構成

Multi-Device-Partitioning Quantum State Reconstruction on Variational Quantum Eigensolver

東京農工大 ○三木司、沖田涼、米田優里、島田萌絵、白樫淳一

Tokyo University of Agriculture & Technology

○T. Miki, R. Okita, Y. Yoneda, M. Shimada, and J. Shirakashi

E-mail: s212646r@st.go.tuat.ac.jp

現在利用可能なゲート型量子計算機は誤り訂正機能を有しておらず、限られた量子リソースを効率的に運用することが要求される。量子・古典ハイブリッドアルゴリズムは、量子計算機のハードウェア的制約を古典計算機で補うよう設計された手法である。この1つとして知られるVariational Quantum Eigensolver (VQE)では、 θ でパラメータ化された量子回路 $U(\theta)$ を変分原理に従い古典計算機で最適化することで、生成された量子状態 $|\psi(\theta)\rangle$ がハミルトニアン H の基底状態を近似する[1]。これまで我々は、VQE を用いた組合せ最適化問題の求解において、1量子ゲートのみで構成した簡易な変分量子回路がより高い演算精度を有することを示してきた[2]。しかし、求解可能な問題サイズは量子ビット数に制限されるという課題があった。そこで今回は、変分量子回路を複数の量子計算機に分割実装して得られた部分的な量子状態から元の完全な量子状態を推定するアルゴリズム、Multi-Device-Partitioning Quantum State Reconstruction (MDP-QSR)を提案する。

量子状態の再構成に関する先行研究[3]とは異なり、MDP-QSR は使用する変分量子回路 $U(\theta)$ の特徴から、分割にかかる計算コストを $O(1)$ に削減できる利点がある。図1にMDP-QSRの概要を示す。組合せ最適化問題で用いる $U(\theta)$ は1量子ゲートのみで構成可能なため[2]、任意の数 D に分割されたユニタリ演算子 $U_i(\theta)$ ($i = \{1, \dots, D\}$)のテンソル積として表現可能である。 $U_i(\theta)$ はそれぞれ異なる量子回路として実行され、基底測定により部分的な量子状態 $|\psi_i(\theta)\rangle$ を得る。これらのテンソル積を計算することで元の完全な量子状態 $|\psi_{\text{full}}(\theta)\rangle$ を推定する。今回は、IBM Quantum Experience [4]で利用可能な15量子ビット計算機 ibmq_16_melbourne を用いて実装したMDP-QSRをVQEに適用し、10ノード完全グラフ($N=10$)のMax-Cut問題を解く。Yゲート1層からなる $U(\theta)$ を2分割したとき($D=2$)と、分割を行わずに直接実装した場合($D=1$)でそれぞれ100回試行することで、最適解を得られた試行回数の比(正答率)を算出した。この結果、 $D=2$ 、 $D=1$ の正答率はそれぞれ0.63、0.62となり、ほぼ同等の演算精度であった。これより、MDP-QSRは量子計算機に実装された量子ビット数以上の問題サイズを有する組合せ最適化問題を求解できる可能性が示唆された。

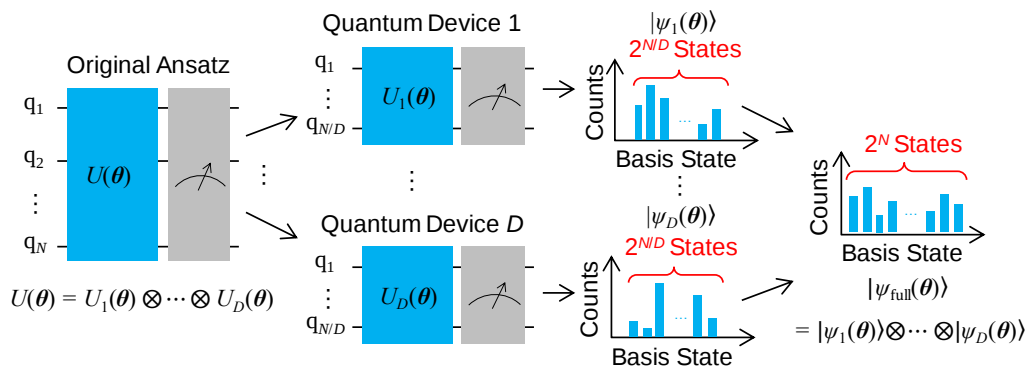


Fig. 1 Schematic of multi-device-partitioning quantum state reconstruction (MDP-QSR). The fully quantum state $|\psi_{\text{full}}(\theta)\rangle$ can be described by tensor-product of partial quantum states $|\psi_i(\theta)\rangle$ ($i = \{1, \dots, D\}$). The reason is that N -qubit ansatz $U(\theta)$ only consists of single-qubit gates and can be partitioned into D quantum devices.

References

- [1] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.H. Yung, X.Q. Zhou, P. J. Love, A. Aspuru-Guzik, and J. L. O'Brien, Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [2] 三木司、島田萌絵、沖田涼、白樫淳一、電子情報通信学会技術研究報告, vol. 121, no. 44 (2021) pp. 31-34.
- [3] J. Li, M. Alam, and S. Ghosh, arXiv :2102.13288 (2021).
- [4] IBM Quantum Experience, "https://quantum-computing.ibm.com/" (2021).