

一般セッション(口頭講演) | KS 研究会セッション: KS.2 量子情報工学研究会

2025年3月15日(土) 13:30 ~ 16:00 会 K406 (講義棟)

[15p-K406-1~9] KS.2 量子情報工学研究会

廣川 真男(九大)、大岩 顕(阪大)

13:30 ~ 13:45

[15p-K406-1]

【講演欠席】[第46回論文奨励賞受賞記念講演] 量子古典ハイブリッドアルゴリズムを用いた虚時間発展法による分配関数の計算

○松本 佳大^{1,2} (1.東理大理、2.産総研)

◆ 英語発表

13:45 ~ 14:00

[15p-K406-2]

Modular Quantum Extreme Reservoir Computing

○(PC)Hon Wai Lau¹, Aoi Hayashi^{2,1,3}, Akitada Sakurai¹, William John Munro¹, Kae Nemoto^{1,3}
(1.OIST, 2.SOKENDAI, 3.NII)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[15p-K406-3]

量子コンピュータを用いる量子モンテカルロ法の改良

○吉田 悠一郎¹、Luca Erhart¹、室越 拓真¹、中川 理夢²、森 千紘²、水上 渉¹ (1.阪大QIQB、2.TOPPANデジタル)

14:15 ~ 14:30

[15p-K406-4]

時系列情報処理のための時間遅延入力を用いた量子リザーバー

○川名部 美桜¹、津嘉山 大輔¹、金刺 拓海¹、白樺 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

◆ 英語発表

14:45 ~ 15:00

[15p-K406-5]

Avoiding Invalid Quantum State in HOBO for Advancing Traveling Salesman Problem

○Juncheng Wang¹, Daisuke Tsukayama¹, Takumi Kanezashi¹, Jun-ichi Shirakashi¹, Tetsuo Shibuya², Hiroshi Imai² (1.Tokyo Univ. Agr. & Tech., 2.Univ. Tokyo)

15:00 ~ 15:15

[15p-K406-6]

One-Hot Encoding Ansatzを用いた変分量子固有値法によるAu原子接合作製実験での実験パラメータ最適化

○金刺 拓海¹、津嘉山 大輔¹、汪 俊誠¹、白樺 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

◆ 奨励賞エントリー ◆ 英語発表

15:15 ~ 15:30

[15p-K406-7]

Quantum Architecture Search with Neural Predictor Based on ZX-Diagram

○Shanchuan Li¹, Daisuke Tsukayama¹, Jun-ichi Shirakashi¹, Tetsuo Shibuya², Hiroshi Imai²
(1.Tokyo Univ. Agr. & Tech., 2.Univ. Tokyo)

15:30 ~ 15:45

[15p-K406-8]

変分量子固有値法における測定状態に対するフィルタリングの適用

○齋藤 礼音¹、津嘉山 大輔¹、金刺 拓海¹、白樫 淳一¹、渋谷 哲朗²、今井 浩² (1.東京農工大、2.東京大)

◆ 奨励賞エントリー

15:45 ~ 16:00

[15p-K406-9]

フィードバック制御下における量子フィッシャー情報量

○(M1) 柚木 隼人¹、長谷川 禎彦¹ (1.東大情報理工)

Calculation of Gibbs partition function with imaginary time evolution on near-term quantum computers

量子古典ハイブリッドアルゴリズムを用いた虚時間発展法による分配関数の計算

松本 佳大^{1,2}

東理大理¹, 産総研²,

E-mail: matsumo162570@gmail.com

近年のデバイス製造・実装・制御の発達により、誤り耐性のない中規模の量子コンピュータが近い将来実現可能であると言われており、その活用法が現在活発に模索されている。このような計算機は、ノイズあり中規模量子 (NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum) デバイスと呼ばれており、数十~数百量子ビットの量子ビットが含まれ、ゲートエラー率は 10^{-3} 程度である [1]。

NISQ コンピュータを活かしたさまざまな変分量子アルゴリズムが提案されており [2, 3], 量子系の時間発展を計算することで、虚時間発展方程式の解をシミュレートすることが可能である [4]。この手法により、量子系の基底状態を、通常の VQE (Variational Quantum Eigensolver) [2, 3] に比べて効率的に得ることができる。さらに、注目する量子ビット系に補助量子ビット系を結合させた全系に対し虚時間発展を行うことで、Gibbs 状態 $\hat{\rho}_{\text{th}}$ を純粋化した TFD (thermofield double states) という熱平衡状態を生成する手法も提案されている [5]。

平衡統計力学においては、分配関数を計算することは、系の熱力学量である自由エネルギーを得るために極めて重要である。ノイズあり中規模量子 (NISQ) デバイスを用いて分配関数を計算する方法が知られているが、Gibbs 状態のコピーを大量に用意して、外挿法による計算を実行する必要があるため、使用する量子ビットの数が増大してしまうという難点があった [6, 7]。

そこで本研究では、NISQ デバイスを用いた分配関数計算のより効率的な方法を提案する [8]。本手法では、変分量子虚時間発展により Gibbs 状態を準備して、温度の異なる Gibbs 状態間のオーバーラップを NISQ デバイスで求めることで、分配関数および、自由エネルギーを求める。この手法では N 量子ビットの系の分配関数を求めるのに $2N$ 量子ビットを利用すれば良い。これは従来手法よりも必要な量子ビット数が少なくすむ。性能評価のために Heisenberg 模型に関して数値計算を行い、実際に高い精度で自由エネルギーを再現した。

参考文献

- [1] S. Endo, Z. Cai, S. C. Benjamin, and X. Yuan, *Journal of the Physical Society of Japan* **90**, 032001 (2021).
- [2] A. Peruzzo *et al.*, *Nature communications* **5**, 1 (2014).
- [3] A. Kandala *et al.*, *Nature* **549**, 242 (2017).
- [4] S. McArdle *et al.*, *npj Quantum Information* **5**, 1 (2019).
- [5] X. Yuan, S. Endo, Q. Zhao, Y. Li, and S. C. Benjamin, *Quantum* **3**, 191 (2019).
- [6] J. Wu and T. H. Hsieh, *Physical review letters* **123**, 220502 (2019).
- [7] S. Johri, D. S. Steiger, and M. Troyer, *Physical Review B* **96**, 195136 (2017).
- [8] K. Matsumoto *et al.*, *Japanese Journal of Applied Physics* **61**, 042002 (2022).



Modular Quantum Extreme Reservoir Computing

Hon Wai Lau¹, Aoi Hayashi^{2,1,3}, Akitada Sakurai¹, William John Munro¹, and Kae Nemoto^{1,3}

E-mail: hon.lau@oist.jp

¹ Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University, Onna-son, Okinawa 904-0495, Japan

² School of Multidisciplinary Science, Department of Informatics,

SOKENDAI (the Graduate University for Advanced Studies),

2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8430, Japan

³ National Institute of Informatics, 2-1-2 Hitotsubashi, Chiyoda-ku, Tokyo, 101-8430, Japan

The connectivity between qubits plays a crucial role in the performance of quantum extreme reservoir computing (QERC), particularly regarding long-range and inter-modular connections. We demonstrate that sufficiently long-range connections within a single module can achieve performance comparable to fully connected networks in supervised learning tasks. Further analysis of inter-modular connection schemes -- such as boundary, parallel, and arbitrary links -- shows that even a small number of well-placed connections can significantly enhance QERC performance. These findings suggest that modular QERC architectures, which could be more easily implemented on two-dimensional quantum chips or through the integration of small quantum systems, provide an effective approach for machine learning tasks.

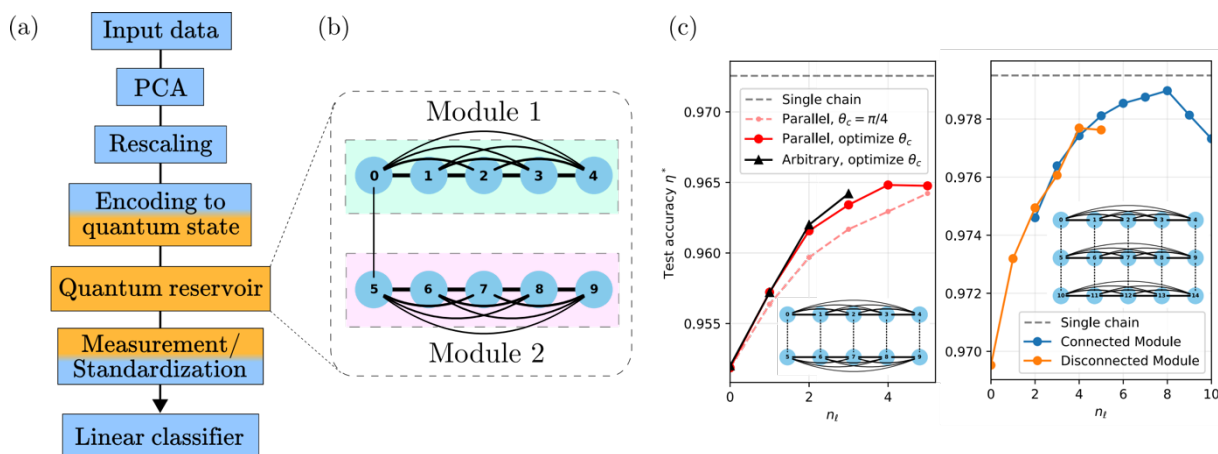


FIG. 1 (a) Architecture of the Modular QERC scheme. The quantum reservoir consists of modular-level reservoir action, interconnections, and single-qubit rotation in sequence. (b) Illustration of parallel modular reservoirs. (c) Improvement in test accuracy on MNIST data vs number of links with different configurations.

量子コンピュータを用いる量子モンテカルロ法の改良

Improving Quantum Monte Carlo Method Using Quantum Computer

阪大 QIQB¹, TOPPAN デジタル² °吉田 悠一郎¹, Luca Erhart¹, 室越 拓真¹, 中川 理夢²,
森 千紘², 水上 渉¹

Osaka Univ.¹, TOPPAN Digital Inc.², °Yuichiro Yoshida¹, Luca Erhart¹, Takuma Murokoshi¹,
Rika Nakagawa², Chihiro Mori², Wataru Mizukami¹

E-mail: yoshida.yuichiro.qiqb@osaka-u.ac.jp

量子コンピュータの開発が近年急速に進められており、量子多体系の物理現象のシミュレーションは、量子コンピュータの応用先として有望視されている。その中で、多電子系の基底状態計算のための量子アルゴリズム開発が盛んに行われてきている。近年 Huggins らによって、量子コンピュータを援用して計算を行う量子・古典ハイブリッド量子モンテカルロ (QC-QMC) 法が開発された[1]。彼らは、最大 16 量子ビットまでを使用した量子計算と、それに続く量子モンテカルロ計算により、窒素分子やダイヤモンドの基底状態のエネルギーの計算を、従来型コンピュータによる高精度計算に匹敵する精度で実行している。こうした状況の中で我々は、QC-QMC 法を改良し、よりスケラブルな形で QC-QMC 法を行う方法を開発した。

提案手法を使って計算した水素分子のエネルギー曲線を図 1 に示す。cc-pVDZ 基底関数を使用し、活性空間は(2e, 2o)とした。図 1 には、量子コンピュータ実機ではなく、シミュレータを使用した計算結果を示している。我々の QMC 計算の結果は、Full CI (FCI) 法の結果を非常によく再現している。一方で、活性空間 VQE の結果は電子相関の取り込みが十分でないことがわかる。本手法を他の分子に適用した結果及び、量子コンピュータ実機を使用した結果については当日報告する。

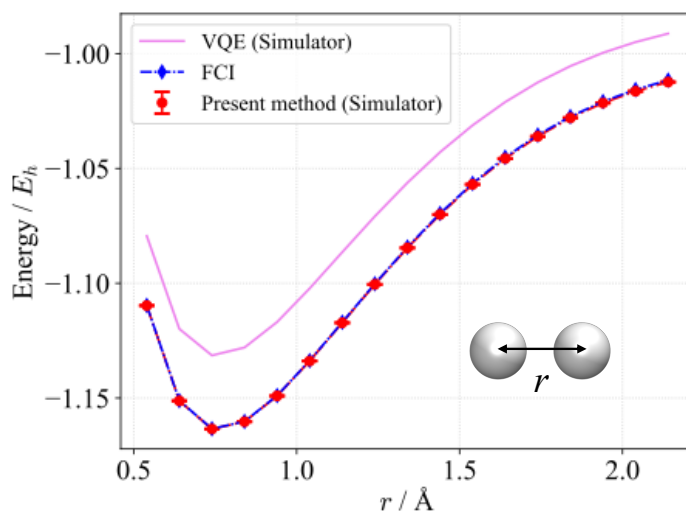


FIG. 1 Energy curve for H₂ molecule.

Reference:

- [1] W. J. Huggins, B. A. O’Gorman, N. C. Rubin, D. R. Reichman, R. Babbush, J. Lee, Nature **603**, 416–420 (2022).

時系列情報処理のための時間遅延入力を用いた量子リザーバー Quantum Reservoir with Time-Delayed Inputs for Time-Series Data Processing

東京農工大学¹、東京大学²

○川名部美桜¹、津嘉山大輔¹、金刺拓海¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

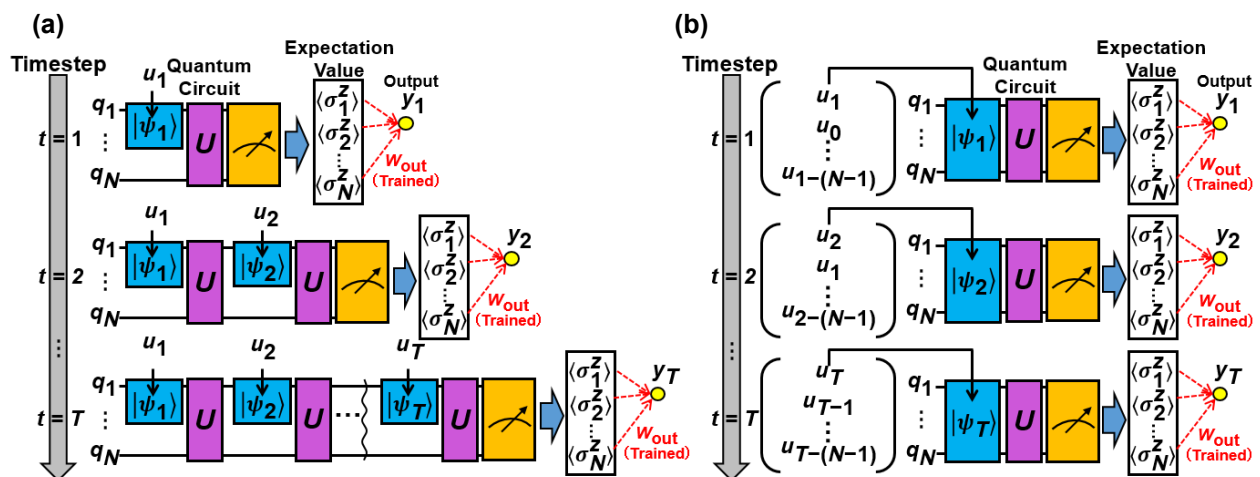
Tokyo University of Agriculture & Technology¹, The University of Tokyo²

○M. Kawanabe¹, D. Tsukayama¹, T. Kanezashi¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s21266034w@st.go.tuat.ac.jp

近年、量子計算機の進歩により、機械学習分野への応用が期待されている。その1つが、量子計算機を用いて時系列情報処理を行う、量子リザーバーコンピューティング (Quantum Reservoir Computing: QRC) [1]である。QRCは量子系特有の重ね合わせや量子もつれといった複雑性を活用することで、従来の古典計算機と比較して高速かつ高精度な機械学習の実行が期待されている[2]。図1(a)にQRCの概念図を示す。QRCではTimestep t におけるデータ u_t を1つずつ入力するため、時系列データ長に比例して量子回路の層数が増大する。また、現在利用可能な量子計算機である Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) [3] デバイスは誤り訂正機能を持たない。そのため、ノイズの蓄積やコヒーレンス時間の制約によって、大規模な量子回路の実行が困難になる[4]。今回は時系列データ長によらず一定の層数で実行可能な量子機械学習手法として、時間遅延入力を採用した Time-Delayed Quantum Extreme Learning Machine (TD-QELM) を提案する。

図1(b)にTD-QELMの概念図を示す。TD-QELMでは u_t とそれ以前の Timestep におけるデータを同時に入力する。そのため、TD-QELMは時系列データ長によらず量子回路の層数が一定であり、NISQ デバイス上での実装が容易となる。本実験では Qiskit [5] で利用可能なシミュレータである AerSimulator 上に6量子ビットのQRCとTD-QELMを実装し、10th-Nonlinear Auto-Regressive Moving Average (NARMA10)の波形予測を行った。その際、正規化平均二乗誤差 (Normalized Mean Squared Error: NMSE) を算出し、両手法の予測性能を比較した。予測した結果、NMSEの値はQRCが 6.17×10^{-3} 、TD-QELMが 3.93×10^{-4} となり、TD-QELMが従来手法のQRCを上回った。以上より、TD-QELMは少ない層数で実装可能かつ高精度な時系列予測が可能であることが示唆された。



Figs. 1 Schematic diagram of QRC (a) and TD-QELM (b).

References

- [1] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Appl. 8 (2017) 024030.
- [2] J. Biamonte, P. Wittek, N. Pancotti, P. Rebentrost, N. Wiebe, and S. Lloyd, Nature 549 (2017) 195.
- [3] J. Preskill, Quantum 2 (2018) 79.
- [4] Y. Suzuki, Q. Gao, K. C. Pradel, K. Yasuoka, and N. Yamamoto, Sci. Rep. 12 (2022) 1.
- [5] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111> (2019).

Avoiding Invalid Quantum State in HOBO for Advancing Traveling Salesman Problem

Tokyo University of Agriculture & Technology¹, The University of Tokyo²

[○]J. Wang¹, D. Tsukayama¹, T. Kanezashi¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya² and H. Imai²

E-mail: s241098s@st.go.tuat.ac.jp

In the study of the Traveling Salesman Problem (TSP) using quantum computers, the well-known Quadratic Unconstrained Binary Optimization (QUBO) formulation [1] is often a primary choice. However, due to its high demand for quantum bits, researchers have proposed a more efficient Higher Order Binary Optimization (HOBO) formulation, which reduces the required number of qubits from $O(N^2)$ to $O(N \log N)$ [2]. Despite this improvement, both methods rely on penalty functions that involve two constraint terms [3]. Building on this foundation, we propose a novel encoding approach that reduces the number of constraints. By leveraging this approach, we can effectively eliminate invalid terms.

Here, we focus on detailing how to implement our proposed optimization method. First, in the HOBO formulation, a binary encoding approach is employed to convert decimal numbers into binary representations. For example, a 3-bit binary number can represent 8 states, with each state corresponding to a city node, as illustrated in Figure 1. Taking the TSP with 5 nodes as an example, the original HOBO formulation in Fig.1 (a) requires considering two constraints: one to ensure the validity of the current city node and the other to avoid visiting the same city twice. In our proposed new HOBO formulation in Fig.1 (b), we reformulate the invalid nodes in the first constraint to ensure compliance with the required conditions. By following a sequential order, these invalid nodes are systematically identified and replaced with valid ones.

In this experiment, we continued to utilize the Variational Quantum Eigensolver (VQE) algorithm in quantum computing [4]. For simulation purposes, we used the "aer_simulator_matrix_product_state" available in the Qiskit library [5]. Regarding the preparation of TSP, the coordinates of each city were randomly generated as integer values within a 100×100 matrix, these coordinates were then used to compute a distance matrix [6]. For a 5 nodes TSP, using the NFT optimizer [7], known for its fast convergence with a two-local quantum circuit [6], which incorporate quantum entanglement, our proposed HOBO formulation achieved an accuracy of 0.96. Additionally, it successfully identified the optimal path in 4 out of 10 instances, whereas the original HOBO formulation failed to satisfy the constraint conditions. Under the SU2 quantum circuit [5], the proposed HOBO formulation also demonstrated superior accuracy of 0.87, compared to the original 0.83. These results indicate that our new HOBO formulation better adheres to the constraint conditions and effectively reduces the challenges associated with balancing constraint strength.

(a) Conventional Constraint

Quantum State	$ 0\ 0\ 0\rangle$	$ 0\ 0\ 1\rangle$	$ 0\ 1\ 0\rangle$	$ 0\ 1\ 1\rangle$	$ 1\ 0\ 0\rangle$	Invalid Nodes		
Encoding Node	City 0	City 1	City 2	City 3	City 4	City 5	City 6	City 7

(b) Proposal No Constraint

Quantum State	$ 0\ 0\ 0\rangle$	$ 0\ 0\ 1\rangle$	$ 0\ 1\ 0\rangle$	$ 0\ 1\ 1\rangle$	$ 1\ 0\ 0\rangle$	Reformulated Nodes		
Encoding Node	City 0	City 1	City 2	City 3	City 4	City 0	City 1	City 2

Fig. 1 Comparison of HOBO encoding methods for a 5-node TSP. (a) The original HOBO encoding formulation with invalid constraint. (b) Our proposed new HOBO encoding formulation without invalid constraint.

References

- [1] A. Lucas, Front. Phys. 2 (2014) 5.
- [2] A. Glos, A. Krawiec, and Z. Zimborás, Npj Quantum Inf. 8 (2022) 39.
- [3] J. Wang, et al., The 85th JSAP Autumn Meeting 17a-A22-9 (2024)
- [4] A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [5] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111> (2019).
- [6] M. Schnaus, et al., arXiv:2404.05448 (2024).
- [7] K. M. Nakanishi, K. Fujii, and S. Todo, Phys. Rev. Res. 2 (2020) 043158.

One-Hot Encoding Ansatz を用いた変分量子固有値法による Au 原子接合作製実験での実験パラメータ最適化

Optimizing Experimental Parameters for Fabrication of Au Atomic Junctions Using Variational Quantum Eigensolver with One-Hot Encoding Ansatz

東京農工大学¹、東京大学²

○金刺拓海¹、津嘉山大輔¹、汪俊誠¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

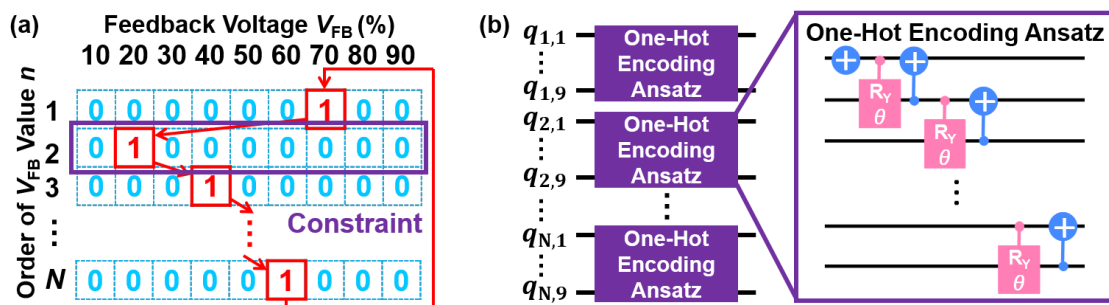
Tokyo University of Agriculture & Technology¹, The University of Tokyo²

○T. Kanazashi¹, D. Tsukayama¹, J. Wang¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s249961t@st.go.tuat.ac.jp

近年、ゲート型量子計算機は量子ビット数の増加やエラー率の改善に伴い、古典計算機に対する優位性が実証されつつある[1]。ゲート型量子計算機の実用的な手法として、変分量子固有値法 (Variational Quantum Eigensolver: VQE)[2]が研究されている。これまで我々は、単一原子の接合構造を有する原子接合の作製手法である Feedback-Controlled Electromigration (FCE)での実験パラメータ探索を組合せ最適化問題として定式化し、イジングマシン[3]および量子アニーラ[4]、ゲート型量子計算機[5]を用いて印加電圧のフィードバック量 V_{FB} (%)に関する実験スケジュールの最適化を行ってきた。図 1(a)に V_{FB} スケジュールを示す。 V_{FB} スケジュールは One-Hot Encoding で表現し、各順序においてバイナリ変数 $\{0, 1\}$ のうち 1 となる V_{FB} を選択する。例えば、図 1(a)は、 V_{FB} が $70\% \rightarrow 20\% \rightarrow 40\% \rightarrow \dots \rightarrow 60\%$ を繰り返すスケジュールを表している。前回の報告では、求解精度向上を目的とし、Conditional Value at Risk を使用した VQE[6]を導入した[5]。この際、Hardware Efficient Ansatz (HEA)を使用し、コスト関数に各順序で 1 つの V_{FB} のみを選択する制約項を用いた。今回は、FCE 法の実験パラメータ探索を効率的に行うために、制約を満たした有効的な解のみを生成する One-Hot Encoding Ansatz (OEA)[7]を導入した。

図 1(b)は、OEA を使用した量子回路である。この量子回路は各順序に対して OEA を配置した構造を有する。OEA は制御回転ゲートと CNOT ゲートを順次接続することで、1 つの量子ビットが $|1\rangle$ 、他の量子ビットは $|0\rangle$ となる量子状態を生成する[7]。これにより、FCE 法の実験パラメータ選択において、各順序につき V_{FB} を 1 つだけ選択する制約が満たされる。本実験では、Qiskit[8]から利用可能な aer_simulator_matrix_product_state 上に VQE を実装した。実験条件として、 V_{FB} は 9 段階、 V_{FB} のスケジュール周期は $N=4$ とした。その結果、HEA を使用した場合の Accuracy は 0.53、OEA を使用した場合の Accuracy は 0.88 となり、HEA を上回った。以上より、OEA を用いることで、実験パラメータ最適化における演算精度の向上が可能であることが示唆された。



Figs. 1 Graphical examples of the V_{FB} scheduling (a) and variational ansatz using one-hot encoding (b).

References

- [1] Y. Kim, et al., Nature 618 (2023) 500.
- [2] A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [3] S. Sakai, Y. Hirata, M. Ito and J. Shirakashi, Sci. Rep. 9 (2019) 16211.
- [4] Y. Yoneda, M. Shimada, A. Yoshida, and J. Shirakashi, Appl. Phys. Express 16 (2023) 057001.
- [5] 金刺, 津嘉山, 汪, 白樫, 渋谷, 今井: 第 85 回応用物理学学会秋季学術講演会 17a-A22-11 (2024).
- [6] P. K. Barkoutsos, G. Nannicini, A. Robert, I. Tavernelli, and S. Woerner, Quantum 4 (2020) 256.
- [7] O. Shehab, K. Landsman, Y. Nam, D. Zhu, N. M. Linke, M. Keesan, R. C. Pooser, and C. Monroe, Phys. Rev. A 100 (2019) 062319.
- [8] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing. <https://doi.org/10.5281/zenodo.2562111> (2019).

Quantum Architecture Search with Neural Predictor Based on ZX-Diagram

Tokyo University of Agriculture & Technology¹, The University of Tokyo²

[○]S. Li¹, D. Tsukayama¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s235597v@st.go.tuat.ac.jp

Quantum architecture search (QAS) [1] has attracted significant attention as a strategy to automate the design of parameterized quantum circuits in variational quantum algorithms (VQAs). Yet, it often requires evaluating a large number of candidate circuits, leading to high computational costs. Performance predictors help mitigate this issue by quickly estimating circuit “quality,” thereby reducing the number of circuits that must undergo resource-intensive, high-fidelity optimizations. In the noisy intermediate-scale quantum (NISQ) era, VQAs are widely adopted thanks to their error resilience and flexible demands on quantum hardware, though their performance depends strongly on the structure of the underlying quantum circuits. QAS, which systematically explores circuit configurations, naturally complements VQAs by automating the search for high-performance circuit designs.

As illustrated in Fig. 1, First, we convert our quantum circuit search space into a ZX-Calculus-based representation, which serves as the key step in our overall process. We adopt a ZX-Diagram-based approach [2] to effectively capture circuit connectivity and simplify circuit structures. In this representation, Z spiders correspond to linear operators in the Pauli-Z basis, commonly used for phase operations or superpositions and measurements in the Z basis; X spiders correspond to linear operators in the Pauli-X basis, typically used for flip operations or superpositions and measurements in the X basis. Next, within this ZX-Calculus-based search space, we select a smaller subset $\{Z_1, \dots, Z_m\}$ for full optimization and record their energy labels $\{y_1, \dots, y_m\}$. These labeled circuits serve as training data for the performance predictor. The trained predictor is then applied to a large pool of new candidate circuits $\{Z_1, \dots, Z_n\}$, flagging only the most promising ones for deeper evaluation. Ultimately, the best-performing circuit F^* emerges as the final solution.

To demonstrate the effectiveness of our ZX-Diagram-based predictive QAS, we evaluate it on the 6-qubit Transverse Field Ising Model (TFIM). Our method locates the target circuit in just 8 queries on average—surpassing PQAS-GM [3] (58 queries) and TF-QAS [4] (33 queries). This corresponds to an 86% reduction in query overhead compared to PQAS-GM and a 76% reduction compared to TF-QAS. By achieving high predictive accuracy with fewer training samples, our approach significantly accelerates circuit discovery in the NISQ era and lays a strong foundation for scaling up quantum algorithm design in the future.

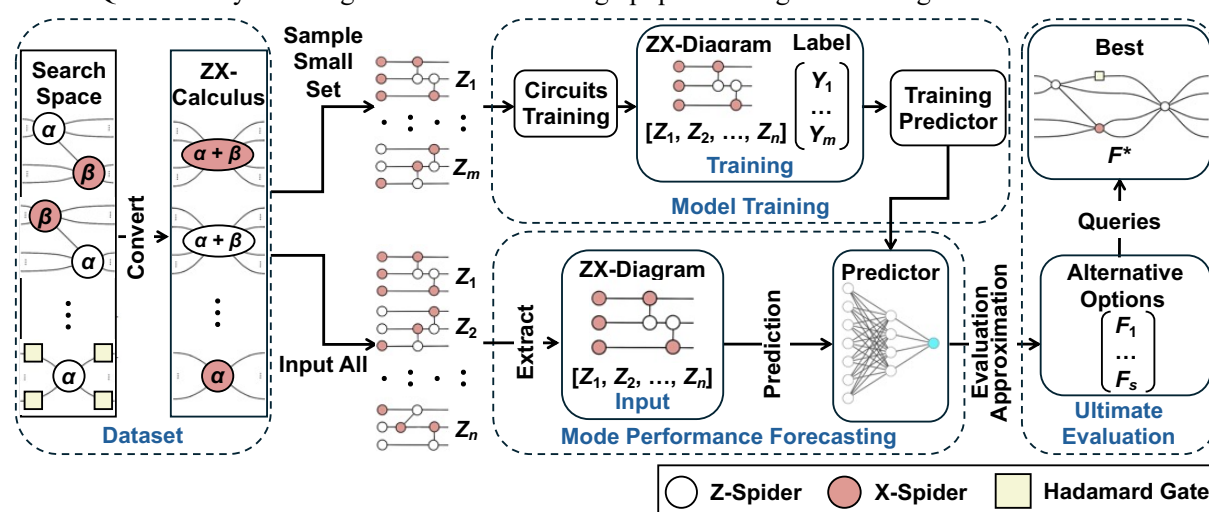


Fig. 1 The workflow of the predictor-based QAS.

References

- [1] S. X. Zhang, C. Y. Hsieh, S. Zhang, and H. Yao, Mach. Learn.: Sci. Technol. 2 (2021) 045027.
- [2] B. Coecke, R. Duncan, New J. Phys. 13 (2011) 043016.
- [3] Z. He, Z. Li, M. Deng, S. Zheng, H. Situ, and L. Li, Adv. Quantum Technol. 7 (2024) 2400223.
- [4] Z. He, M. Deng, S. Zheng, L. Li, and H. Situ, Proc. AAAI Conf. 38 (2024) 12430.

変分量子固有値法における測定状態に対するフィルタリングの適用

Variational Quantum Eigensolver with Computational Basis Filter

東京農工大学¹、東京大学²

○齋藤礼音¹、津嘉山大輔¹、金刺拓海¹、白樫淳一¹、渋谷哲朗²、今井浩²

Tokyo University of Agriculture & Technology¹, The University of Tokyo²

○R. Saito¹, D. Tsukayama¹, T. Kanezashi¹, J. Shirakashi¹, T. Shibuya², and H. Imai²

E-mail: s200461x@st.go.tuat.ac.jp

現在のゲート型量子計算機は、Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) デバイスと呼ばれ、誤り訂正機能を持たず、量子ビット数や量子ゲートの深さに制約がある。NISQ を活用したアルゴリズムの一つは、変分量子固有値法 (Variational Quantum Eigensolver: VQE) である[1]。VQE の演算精度を向上させる手法として、低エネルギー状態の観測確率を高める Filtering Operator を量子回路に適用させる Quantum Variational Filtering (QVF) が提案されている[2]。QVF の特殊な場合において、量子回路の測定結果を利用して Filtering Operator の適用を近似する Filtering VQE が知られている[2]。また、我々は計算量削減を目的として、 N 量子ビット回路の測定結果から観測頻度が高い $\log_2 2^N$ 個の量子状態を抽出するフィルタリング手法を提案した[3]。今回は、本手法を用いた VQE において、フィルタリングにより抽出する状態数が演算精度に与える影響について検討した。

図 1 は、測定状態に対するフィルタリングを適用した VQE の概略図である。量子計算機では、量子回路 $U(\theta)$ を複数回実行し、得られた測定結果から量子状態の確率分布を推定する。古典計算機では、測定結果を観測確率順に並べ替え、フィルタリングによって上位 k 個の測定状態を抽出する。この測定状態を用いてハミルトニアン H の期待値 $\langle H(\theta) \rangle$ を算出し、変分パラメータ θ を最適化する。本手法を、Qiskit[4]から利用可能な aer_simulator_matrix_product_state 上に実装し、VQE による組合せ最適化問題の求解を行った。 $U(\theta)$ は RealAmplitudes (reps = 1) [4] を採用し、変分パラメータは ADAM 法[5]により最適化を行った。4 都市 (16 量子ビット) における巡回セールスマン問題を 5 インスタンス求解した結果、基底エネルギーに対する期待値の比である Accuracy (AC) は、 $k=1$ とした場合に $AC=0.68$ となり、 $k=\log_2 2^{16}=16$ とした場合 ($AC=0.63$) およびフィルタリングを適用しない場合 ($AC=0.65$) を上回った。また、変分パラメータの最適化に要した時間は、32.6 min ($k=1$)、32.7 min ($k=\log_2 2^{16}=16$) となり、フィルタリングを行わない場合 (42.7 min) と比較して短縮された。以上より、測定状態に対するフィルタリングは、適切な状態数を設定することで VQE における演算精度の向上および高速化に寄与することが示唆された。

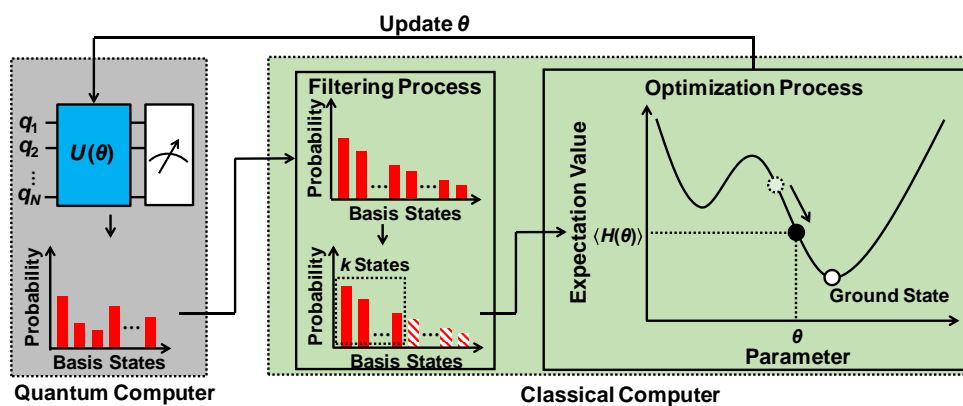


Fig. 1 Schematic diagram of VQE with computational basis filter.

References

- [1] A. Peruzzo, et al., Nat. Commun. 5 (2014) 4213.
- [2] D. Amaro, et al., Quantum Sci. Technol. 7 (2022) 015021.
- [3] 岸, 津嘉山, 李, 汪, 白樫, 今井: 第 84 回応用物理学学会秋季学術講演会 23p-A302-3 (2023).
- [4] G. Aleksandrowicz, et al., Qiskit: Open-source Framework for Quantum Computing (2019).
- [5] D. P. Kingma and J. L. Ba, arXiv:1412.6980v9.

フィードバック制御下における量子フィッシャー情報量

Quantum Fisher Information under Feedback Control

東大情報理工, °(M1) 柚木 隼人, 長谷川 禎彦

Univ. Tokyo, °Hayato Yunoki, Yoshihiko Hasegawa

E-mail: yunoki@biom.t.u-tokyo.ac.jp

量子フィッシャー情報量 (quantum Fisher information, QFI) とは量子状態のパラメータ推定における精度限界を特徴づける量であり, 量子系の高精度な測定系を設計するための理論的指標として広く用いられている。先行研究[1]によると, 時間をスケールリングするパラメータに対する QFI を用いることで量子速度限界 (quantum speed limit, QSL) と量子熱力学不確定性関係 (quantum thermodynamic uncertainty relation, QTUR) を定式化することができる。QSL とは量子系の状態の変化に必要な時間に対して下限を与える不等式であり, QTUR とは量子系における熱力学的なコストと推定精度のトレードオフ関係を与える不等式である。先行研究[2, 3]では開放量子系のダイナミクスを記述する Lindblad 方程式に対する QFI が解析的に導出された。

量子系のフィードバック制御とは, Fig. 1 に示すように主系に対して測定を行った結果に応じて主系に制御入力を与えることでダイナミクスを制御することである。フィードバック制御は機械工学や電気工学などにおいて応用上重要であり, 量子系においても量子精密計測や量子誤り訂正など様々な量子技術の実用化に対して重要な役割を果たすことが期待されている。

本研究ではポアソン過程のジャンプ測定の結果をフィードバックする場合と, ガウス過程のホモダイン測定の結果をフィードバックする場合に対して, QFI を解析的に導出した。これによりフィードバック制御下における QFI において, フィードバックによる寄与を明らかにすることが可能になる。また同時にフィードバック制御下における QSL と QTUR の定式化が可能になり, 量子系のフィードバック制御へのさらなる理解が期待される。

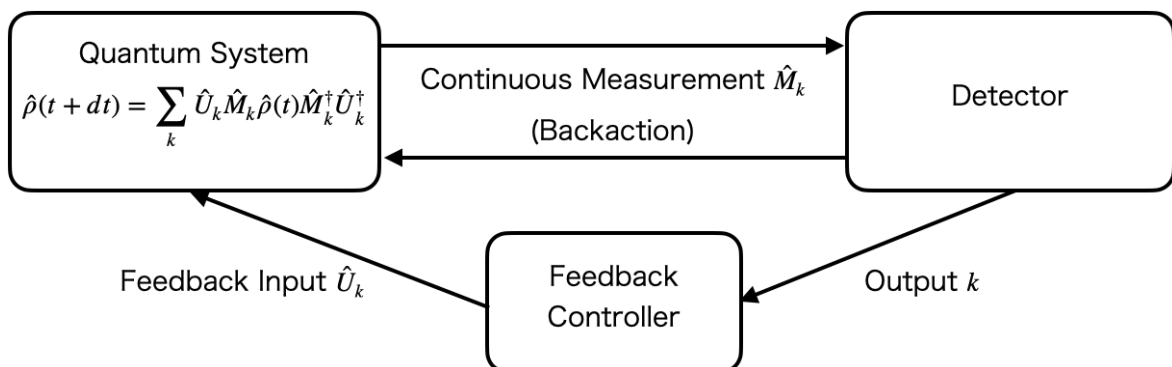


Fig. 1 Setup for quantum feedback control.

参考文献: [1] Y. Hasegawa, Nat. Commun. 14, 2828 (2023). [2] T. Nishiyama and Y. Hasegawa, Phys. Rev. E 109, 044114 (2024). [3] S. Nakajima and Y. Utsumi, Phys. Rev. E 108, 054136 (2023).