

量子ウォークを用いた量子ランダムアクセスメモリ

浅香 諒^{†1,a)} 堺 和光^{†1,b)} 矢萩 量子^{†1,c)}

概要: 我々は、記憶媒体中に書き込まれた大量の情報を同時並列的にエンコードする機構、いわゆる量子ランダムアクセスメモリ (QRAM: Quantum Random Access Memory) の量子ウォークによる実装方法を考案したので、本講演ではこれを報告する。

RYO ASAKA^{†1,a)} KAZUMITSU SAKAI^{†1,b)} RYOKO YAHAGI^{†1,c)}

1. はじめに

量子情報処理はその高速性ゆえに注目を集めている。例えば有名なグローバーのアルゴリズムを使用すれば、膨大な数のデータの中から短時間で目的のデータを取得できるようになる [1, 2]。

ところが、この情報探索や近年研究が加速している量子機械学習等 [3–10]、大量のデータを扱う量子アルゴリズムの高速性を担保するには、それらのデータを効率よく量子的に重ね合わせる操作が必要となる (データエンコーディング) [11]。そこで提案されているのが量子ランダムアクセスメモリ (QRAM: Quantum Random Access Memory) である [12]。

QRAM はデータを格納するメモリ (メモリセルの個数を N とする) と完全二分木によって構成される (図 1)。その名の通り、QRAM は従来のコンピュータにおけるランダムアクセスメモリ (RAM) に類似した機能を持つ。複数のアドレス $\mathcal{A} = \{a | a \in [0, N - 1]\}$ の重ね合わせ状態を入力し、その出力として次のようにデータセット $\{x^{(a)} | a \in \mathcal{A}\}$

の重ね合わせ状態を得る

$$\sum_{a \in \mathcal{A}} |a\rangle_A |0\rangle_D \xrightarrow{QRAM} \sum_{a \in \mathcal{A}} |a\rangle_A |x^{(a)}\rangle_D. \quad (1)$$

QRAM の概念は 2009 年に Giovannetti, Lloyd, そして Macone の三名によって提案された [12]。彼らが考案した QRAM の二分木の各ノードには $|wait\rangle$, $|left\rangle$ 及び $|right\rangle$ に対応する 3 つのエネルギー準位を持つ量子スイッチが設置される [13]。これを使って信号を操作し、任意の複数のメモリセルへの同時並列的なアクセスを行うことで、情報のエンコーディングを遂行する。この方式は各ノードに配置された人が隣接するノードにいる人にバケツを渡していく描像に例えられることから、バケツリレー方式と呼ばれる。量子スイッチの誤作動による計算エラーの分析や [14–16]、量子スイッチの実装方法の代替案の提案等 [17–19]、QRAM の理論研究はバケツリレー方式を中心として進展していった。

一方本論文では、各ノードに量子スイッチを設置しない新しい方式の QRAM を提案する。各時間毎に作用するユニタリ演算子によってその動きを記述する離散時間量子ウォーカー [20, 21] を導入し、この量子ウォーカーに情報を運搬するバケツとしての役割を担わせる。二分木上に導入された量子ウォーカーは、(i)Routing: 1 つの量子ウォーカーが複数のメモリセルへと同時に到達し、(ii)Querying: メモリ

^{†1} 現在、東京理科大学
Presently with Tokyo University of Science
a) 1219502@ed.tus.ac.jp
b) k.sakai@rs.tus.ac.jp
c) yahagi@rs.tus.ac.jp

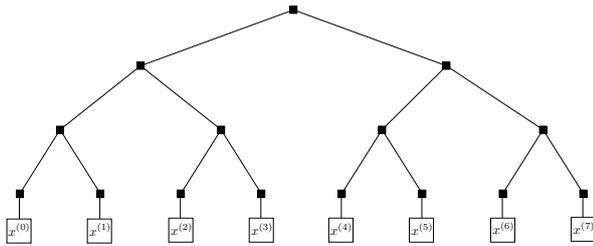


図 1 QRAM

セルに書き込まれた情報を汲み出し、そして (iii)Output : 位置的な重ね合わせ状態を解消しながら情報を集約していく、という一連の手続きによって N 個のセルを持つメモリから複数個、あるいは全ての情報を $O(\log N)$ の時間でエンコードする。提案する QRAM は従来のバケツリレー方式とは異なり、エンコードに際して必要となる Quantum Resource (量子資源) の個数がメモリの規模・データ数に一切依存せず、さらに単一の NOT ゲートのみを用いて非常に単純な方法で情報の汲み出しを行える。つまり、外的な擾乱に対してより堅牢な QRAM の設計を望める。

詳細については [22] を参照されたい。

参考文献

- [1] L. K. Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search," in *Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of computing*, pp. 212–219, 1996.
- [2] M. A. Nielsen and I. Chuang, "Quantum computation and quantum information," 2002.
- [3] A. W. Harrow, A. Hassidim, and S. Lloyd, "Quantum algorithm for linear systems of equations," *Physical review letters*, vol. 103, no. 15, p. 150502, 2009.
- [4] N. Wiebe, D. Braun, and S. Lloyd, "Quantum algorithm for data fitting," *Physical review letters*, vol. 109, no. 5, p. 050505, 2012.
- [5] S. Lloyd, M. Mohseni, and P. Rebentrost, "Quantum principal component analysis," *Nature Physics*, vol. 10, no. 9, pp. 631–633, 2014.
- [6] S. Lloyd, M. Mohseni, and P. Rebentrost, "Quantum algorithms for supervised and unsupervised machine learning," *arXiv preprint arXiv:1307.0411*, 2013.
- [7] P. Rebentrost, M. Mohseni, and S. Lloyd, "Quantum support vector machine for big data classification," *Physical review letters*, vol. 113, no. 13, p. 130503, 2014.
- [8] J. Biamonte, P. Wittek, N. Pancotti, P. Rebentrost, N. Wiebe, and S. Lloyd, "Quantum machine learning," *Nature*, vol. 549, no. 7671, pp. 195–202, 2017.
- [9] M. Schuld, M. Fingerhuth, and F. Petruccione, "Implementing a distance-based classifier with a quantum interference circuit," *EPL (Europhysics Letters)*, vol. 119, no. 6, p. 60002, 2017.
- [10] J. Bang, A. Dutta, S.-W. Lee, and J. Kim, "Optimal usage of quantum random access memory in quantum machine learning," *Physical Review A*, vol. 99, no. 1, p. 012326, 2019.
- [11] C. Ciliberto, M. Herbster, A. D. Ialongo, M. Pontil, A. Rocchetto, S. Severini, and L. Wossnig, "Quantum machine learning: a classical perspective," *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 474, no. 2209, p. 20170551, 2018.
- [12] V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, "Quantum random access memory," *Physical review letters*, vol. 100, no. 16, p. 160501, 2008.
- [13] V. Giovannetti, S. Lloyd, and L. Maccone, "Architectures for a quantum random access memory," *Physical Review A*, vol. 78, no. 5, p. 052310, 2008.
- [14] S. Arunachalam, V. Gheorghiu, T. Jochym-O'Connor, M. Mosca, and P. V. Srinivasan, "On the robustness of bucket brigade quantum ram," *New Journal of Physics*, vol. 17, no. 12, p. 123010, 2015.
- [15] O. Di Matteo, V. Gheorghiu, and M. Mosca, "Fault-tolerant resource estimation of quantum random-access memories," *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, vol. 1, pp. 1–13, 2020.
- [16] C. T. Hann, G. Lee, S. Girvin, and L. Jiang, "The resilience of quantum random access memory to generic noise," *arXiv preprint arXiv:2012.05340*, 2020.
- [17] F.-Y. Hong, Y. Xiang, Z.-Y. Zhu, L.-z. Jiang, and L.-n. Wu, "Robust quantum random access memory," *Physical Review A*, vol. 86, no. 1, p. 010306, 2012.
- [18] C. T. Hann, C.-L. Zou, Y. Zhang, Y. Chu, R. J. Schoelkopf, S. M. Girvin, and L. Jiang, "Hardware-efficient quantum random access memory with hybrid quantum acoustic systems," *Physical review letters*, vol. 123, no. 25, p. 250501, 2019.
- [19] A. Paler, O. Oumarou, and R. Basmadjian, "Parallelizing the queries in a bucket-brigade quantum random access memory," *Physical Review A*, vol. 102, no. 3, p. 032608, 2020.
- [20] Y. Aharonov, L. Davidovich, and N. Zagury, "Quantum random walks," *Physical Review A*, vol. 48, no. 2, p. 1687, 1993.
- [21] J. Kempe, "Quantum random walks: an introductory overview," *Contemporary Physics*, vol. 44, no. 4, pp. 307–327, 2003.
- [22] R. Asaka, K. Sakai, and R. Yahagi, "Quantum random access memory via quantum walk," *arXiv preprint arXiv:2008.13365*, 2020.