

量子レザバーコンピューティング 量子実時間ダイナミクスの機械学習への応用

藤井啓祐

東京大学大学院工学系研究科附属光量子科学研究センター/JST さきがけ

量子力学は物理学における最も基本的な枠組みであり、我々の身の回りのミクロな世界の複雑な振る舞いを記述している。R. ファインマンが指摘したように [1]、このような量子力学系の複雑性は粒子数に対して指数的に増加するため、従来の計算機では効率よくシミュレートすることができない。このため、量子力学のルールに則って計算を行う量子コンピュータの研究が盛んに行われている [2, 3]。素因数分解 [4] に代表されるような数学的問題であったり、量子化学計算、物質系のシミュレーション等、量子コンピュータを用いることによって効率よく解決することができる問題が探索されている。計算精度が保証されたデジタル万能量子コンピュータの実現にむけた実験も、各国の大学・研究機関、そして Google や IBM といった巨大 IT 企業の支援のもと精力的に進められている [5, 6]。量子多体系がもつ複雑性をそのまま利用するアナログ量子シミュレーションも様々な物理系を用いて実験が進められており [7, 8, 9]、アナログ量子ダイナミクスを組み合わせた最適化問題を解くヒューリスティックとして利用する量子アニーリングも研究・商用化が進められている [10, 11, 12, 13]。しかしながら、計算機科学的な仮定のもと古典コンピュータ対する優位性 (quantum computing supremacy) [14, 15, 16] が示されているような複雑な量子ダイナミクスを、汎用的な情報処理に応用する方法はまだ確立されていない。本稿では、量子多体系の複雑な実時間ダイナミクスを機械学習、特に時系列データ処理に応用するための新たな枠組みである、量子レザバー計算について紹介する [17]。

時系列データ処理とは、時間に依存するようなデータ処理であり、言語認識、自然言語処理、ロボットのモーター制御、株価予測など我々の身の回りにありふれた問題である。このような問題に対して、脳型情報処理の一つであるレザバー計算が研究されている [18, 19, 20]。レザバー計算では、フィードフォワード型のニューラルネットワークと異なり、メモリー効果を持つようなネットワーク [21, 22] が用いられる。従来の脳型情報処理のアプローチである、リカレントニューラルネットワークでは、目的の時系列処理を実行するために、教師データからネットワークの遷移行列を誤差伝搬法などを使って学習することになる。一方、レザバー計算のアプローチでは、遷移行列はランダムに決めてしまい、出力だけを線型回帰によって学習する [18, 19, 20]。学習が安定的に行えるため、ネットワークの規模を大きくすることができ、その結果、線型回帰だけでもリカレントニューラルネットワークに匹敵する性能が特定のタスクで報告されている [18]。もはやネットワークの内部構造を調整する必要がないので、非線形性を持った大自由度力学系であればどのような物理系であってもレザバー計算として時系列データ処理に利用することができる。このため、様々な物理系が固有にもつ複雑性を計算に利用するフィジカルレザバー計算が、レーザー系、脳型チップ、ソフトロボット等様々な物理系を用いて実装されている、[23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36]。

量子レザバー計算では、量子多体系の実時間ダイナミクスが持つ複雑性をレザバー計算として時系列

データ処理に利用する。量子系を機械学習に利用する提案はこれまでもあるが [37, 38, 39, 40, 41, 42] これらの方法はどれもゲート型の量子コンピュータを前提としており、誤り訂正を伴ったデジタル量子コンピュータを必要とする。このような、ソフトウェアとしてデジタル量子コンピュータ上で動く量子アルゴリズムとは異なり、量子レザバー計算では、ハミルトニアンのパラメータなどを調整する必要がなく、量子多体系の複雑なアナログダイナミクスをそのまま計算リソースとして利用することができる。数値計算の結果、5-7量子ビットからなる量子系（ランダム結合の横磁場イジング模型）であっても、100-500ノードの古典レザバー計算（エコーステートネットワーク）と同等の計算能力があることがわかった。少数の量子ビットであっても、実時間ダイナミクスを高い精度で得ることができれば計算のリソースとして利用できるため、近未来的に実現される量子デバイスを用いた実装が期待される。

謝辞

本研究成果は、東京大学大学院情報理工学系研究科 中嶋浩平氏との共同研究によるものである。また、研究の着想及び構想は京都大学白眉センター所属時に得られたものである [17]。また、本研究は、JST さきがけ JPMJPR15E7 及び JPMJPR1668, JST CREST JPMJCR1673, JST ERATO JPMJER1601, 科研費 15K16076, 26880010, 16H02211 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] R.P. Feynman, *Simulating physics with computers*, Int. J. Theor. Phys. **21**, 467 (1982).
- [2] M.A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum computation and quantum information*, (Cambridge university press 2010).
- [3] K. Fujii, *Quantum Computation with Topological Codes -From Qubit to Topological Fault-Tolerance-*, SpringerBriefs in Mathematical Physics (Springer-Verlag 2015).
- [4] P. W. Shor, *Algorithms for quantum computation: Discrete logarithms and factoring*, In Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 124 (1994).
- [5] R. Barends *et al.*, *Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance*, Nature **508**, 500 (2014).
- [6] J. Kelly *et al.*, *State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit*, Nature **519**, 66 (2015).
- [7] J.I. Cirac and P. Zoller, *Goals and opportunities in quantum simulation*, Nat. Phys. **8**, 264 (2012).
- [8] I. Bloch, J. Dalibard, and S. Nascimbène, *Quantum simulations with ultracold quantum gases*, Nat. Phys. **8**, 267 (2012).
- [9] I. M. Georgescu, S. Ashhab, and F. Nori, *Quantum simulation*, Rev. of Mod. Phys. **86**, 153 (2014).
- [10] T. Kadowaki and H. Nishimori, *Quantum annealing in the transverse Ising model*, Phys. Rev. E **58**, 5355 (1998).
- [11] E. Farhi *et al.*, *A quantum adiabatic evolution algorithm applied to random instances of an NP-complete problem*, Science **292**, 472 (2001).
- [12] T. F. Rønnow *et al.*, *Defining and detecting quantum speedup*, Science **345**, 420 (2014).
- [13] S. Boixo *et al.*, *Evidence for quantum annealing with more than one hundred qubits*, Nat. Phys. **10**, 218 (2014).
- [14] T. Morimae, K. Fujii, and J. F. Fitzsimons, *Hardness of classically simulating the one-clean-qubit model*, Phys. Rev. Lett. **112**, 130502 (2014).
- [15] K. Fujii *et al.*, *Power of Quantum Computation with Few Clean Qubits*, Proceedings of 43rd International Colloquium on Automata, Languages, and Programming (ICALP 2016), pp.13:1-13:14.

- [16] K. Fujii and S. Tamate, *Computational quantum-classical boundary of complex and noisy quantum systems*, Sci. Rep. **6**, 25598 (2016).
- [17] K. Fujii and K. Nakajima, *Harnessing disordered ensemble quantum dynamics for machine learning*, to be published in Physical Review Applied.
- [18] H. Jaeger and H. Haas, *Harnessing nonlinearity: predicting chaotic systems and saving energy in wireless communication*, Science **304**, 78 (2004).
- [19] W. Maass, T. Natschläger, and H. Markram, *Real-time computing without stable states: a new framework for neural computation based on perturbations*, Neural Comput. **14**, 2531 (2002).
- [20] D. Verstraeten *et al.*, *An experimental unification of reservoir computing methods*, Neural Netw. **20**, 391 (2007).
- [21] M. Rabinovich, R. Huerta, and G. Laurent, *Transient dynamics for neural processing* Science **321**, 48 (2008).
- [22] J. Dambre *et al.*, *Information processing capacity of dynamical systems*, Sci. Rep. **2**, 514 (2012).
- [23] C. Fernando and S. Sojakka, *Pattern recognition in a bucket* In Lecture Notes in Computer Science **2801**, p. 588 (Springer, 2003).
- [24] L. Appeltant *et al.*, *Information processing using a single dynamical node as complex system*. Nat. Commun. **2**, 468 (2011).
- [25] D. Woods and T. J. Naughton, *Photonic neural networks.*, Nat. Phys. **8**, 257 (2012).
- [26] L. Larger *et al.*, *Photonic information processing beyond Turing: an optoelectronic implementation of reservoir computing*, Optics Express **20**, 3241 (2012).
- [27] Y. Paquot *et al.*, *Optoelectronic Reservoir Computing*, Sci. Rep. **2**, 287 (2012).
- [28] D. Brunner *et al.*, *Parallel photonic information processing at gigabyte per second data rates using transient states*, Nat. Commun. **4**, 1364 (2013).
- [29] K. Vandoorne *et al.*, *Experimental demonstration of reservoir computing on a silicon photonics chip* Nat. Commun. **5**, 3541 (2014).
- [30] A. Z. Stieg *et al.*, *Emergent criticality in complex turing B-type atomic switch networks*, Adv. Mater. **24**, 286 (2012).
- [31] H. Hauser *et al.*, *Towards a theoretical foundation for morphological computation with compliant bodies* Biol. Cybern. **105**, 355 (2011).
- [32] K. Nakajima *et al.*, *Computing with a Muscular-Hydrostat System*, Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 1496 (2013).
- [33] K. Nakajima *et al.*, *A soft body as a reservoir: case studies in a dynamic model of octopus-inspired soft robotic arm* Front. Comput. Neurosci. **7**, 1 (2013).
- [34] K. Nakajima *et al.*, *Exploiting short-term memory in soft body dynamics as a computational resource*, J. R. Soc. Interface **11**, 20140437 (2014).
- [35] K. Nakajima *et al.*, *Information processing via physical soft body*, Sci. Rep. **5**, 10487 (2015).
- [36] K. Caluwaerts *et al.*, *Design and control of compliant tensegrity robots through simulations and hardware validation*, J. R. Soc. Interface **11**, 20140520 (2014).
- [37] H. J. Briegel *et al.*, *Projective simulation for artificial intelligence*, Sci. Rep. **2**, 400 (2012).
- [38] G. D. Paparo *et al.*, *Quantum speedup for active learning agents*, Phys. Rev. X **4**, 031002 (2014).

- [39] P. Rebentrost, M. Mohseni, and S. Lloyd, *Quantum support vector machine for big data classification*, Phys. Rev. Lett. **113**, 130503 (2014).
- [40] S. Lloyd, M. Mohseni, and P. Rebentrost, *Quantum principal component analysis*, Nat. Phys. **10**, 631 (2014).
- [41] N. Wiebe, A. Kapoor, and K. M. Svore, *Quantum Deep Learning*, arXiv:1412.3489.
- [42] J. C. Adcock *et al.*, *Advances in quantum machine learning*, arXiv:1512.02900.