

## フィードバック駆動型量子リザーバーコンピューティングによる時系列解析

## Time-series analysis via feedback-driven quantum reservoir computing

東大工<sup>1</sup>, 阪大基礎工<sup>2</sup>, 慶大理工<sup>3</sup> °小林 海翔<sup>1</sup>, 藤井 啓祐<sup>2</sup>, 山本 直樹<sup>3</sup>Univ. of Tokyo<sup>1</sup>, Osaka Univ.<sup>2</sup>, Keio Univ.<sup>3</sup>, °Kaito Kobayashi<sup>1</sup>, Keisuke Fujii<sup>2</sup>, Naoki Yamamoto<sup>3</sup>

E-mail: kaito-kobayashi92@g.ecc.u-tokyo.ac.jp

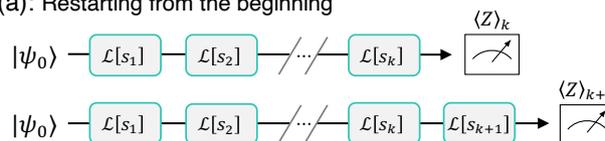
量子リザーバーコンピューティングとは、量子系を計算リソースとして用いる情報処理手法の一種であり、ヒルベルト空間の高次元性や非線形性に起因した高い情報処理性能が期待されている[1]。しかし時系列解析への応用では、量子系から情報を取り出す量子測定の影響により、量子状態が破壊され、時系列記憶が保持できないという大きな課題がある。測定の度に初期化を繰り返し、反作用を実質的に無視する手法や(図1 a) [2]、弱測定の影響により測定の影響を弱める手法(図1 b)[3]が提案されているが、前者では計算のリアルタイム性が失われ、後者では量子系から取り出せる情報が制限されてしまう。

本研究では、これらの課題を解決するフィードバック駆動型量子リザーバーコンピューティングを提案する[4]。そこでは、毎ステップごとに全量子ビットへの射影測定を通じて量子状態に制限なくアクセスしつつ、得られた測定結果のフィードバックを通じて時系列情報を再起的に入力する(図1 c)。本手法の短期記憶容量を評価した結果、フィードバックにより量子測定の影響が補償され、確かに入力情報の時系列記憶が保持されていることを確認した。特に、フィードバック強度に応じて内部ダイナミクスは3つの相を示し、短期記憶容量は安定相・不安定相の相境界(edge of chaos)で最大値を示す。また、時系列予測タスクでは、量子系由来の信号に対し古典リザーバーコンピューティングの予測性能を上回り、量子的なタスクに対する優位性が示唆された。なお、毎ステップごとに測定がなされることから、量子系には1ステップ分のコヒーレンス時間しか要求されず、また、統計誤差による影響もフィードバック強度の調整により軽減可能である。従って本手法は、測定の反作用・デコヒーレンス・統計誤差といった量子リザーバーコンピューティングの主要なボトルネックを同時に解決するものであり、今後の幅広い応用が期待される。

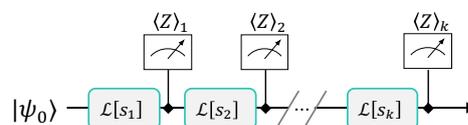
[1] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Appl. **8**, 024030 (2017). [2] Y. Suzuki *et al.*, Sci. Rep. **12**, 1353 (2022). [3] P. Mujal *et al.*, npj Quantum Inf. **9**, 16 (2023).

[4] K. Kobayashi, K. Fujii, and N. Yamamoto, PRX Quantum **5**, 040325 (2024).

(a): Restarting from the beginning



(b): Continuous monitoring with weak measurements



(c): Feedback of measurement outcomes

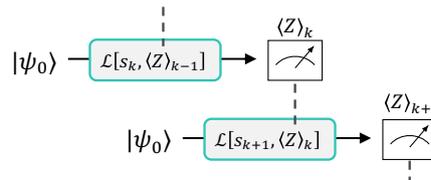


Fig. 1: Architectures of quantum reservoir computing