

量子相ハイブリッドリザバーコンピューティングの開発 —量子相の組合せによる情報処理の性能設計—

1. 背景

量子リザバーコンピューティング [1]とは、リザバーコンピューティングにおける非線形変換を担うリザバー部として、量子系のダイナミクスを用いるフレームワークである。指数関数的に増大するヒルベルト空間に由来した高次元性や、エンタングルメントや量子相関に由来した強い非線形性を背景として、多くの先行研究により高い学習能力が実証されている。さらに、実験的実証も複数報告されており[2]、次世代量子社会の中核となりうる重要な情報処理技術の一つとして注目を集めている。

量子系はハミルトニアンと呼ばれる演算子によって記述され、その性質に応じて量子力学的な「相」が定まる。近年では、量子相と量子リザバーコンピューティングとの関係に関心が高まっており、例えば[3]では、多体局在相と非局在相との相境界付近で量子リザバーコンピューティングが最高性能を達成することが報告されている。また、量子版のカオスの縁に相当する概念も提案されており、量子カオス相と非量子カオス的な相との相境界において量子リザバーコンピューティングの性能が最大化される例も示されている[4]。

これらはいずれも、量子系のハミルトニアンを調節することで量子リザバーコンピューティングの性能を最大化するアプローチである。しかし、このような量子パラメータの最適化は物理実装においては難しく、実装時の再現性や安定性の観点からも負担が大きい。そのため、量子リザバーコンピューティングにおける性能チューニングは、実用化に向けた主要な障壁の一つとなっていた。

2. 目的

本プロジェクトでは、単一の量子相での動作を前提としてきた従来の量子リザバーコンピューティングを大幅に拡張し、異なる量子相に属する量子系を古典的に結合した量子相ハイブリッドリザバーコンピューティングを開発する。これにより、それぞれの量子相の特性が混合された動的相を、量子リザバーコンピューティング全体として実現することを目指す。

量子パラメータを用いた従来の性能最適化では、二つの相の影響が同時に現れる相境界付近で高性能が得られることが報告されている。これは、量子相の特性の混合が高性能化の鍵であることを強く示唆している。したがって、古典結合を通じて量子相の特性を混ぜ合わせる本構成では、擬似的に相境界にあるような状態が実現され、各相の特性の「いいとこ取り」による性能向上が期待される。

また、その実装にあたっては、各量子系を単一相の安定状態として準備すればよく、量子パラメータの精密なチューニングは要求されない。さらに、量子相の組み合わせパターンという新たな設計自由度を導入することで、タスク要件に応じた性能チューニングも可能となる。以上より、本構成は量子リザバーコンピューティングの

実装可能性と汎用性を同時に高め、社会実装を加速する高いインパクトを有すると考えられる。

3. ソフトウェア開発内容

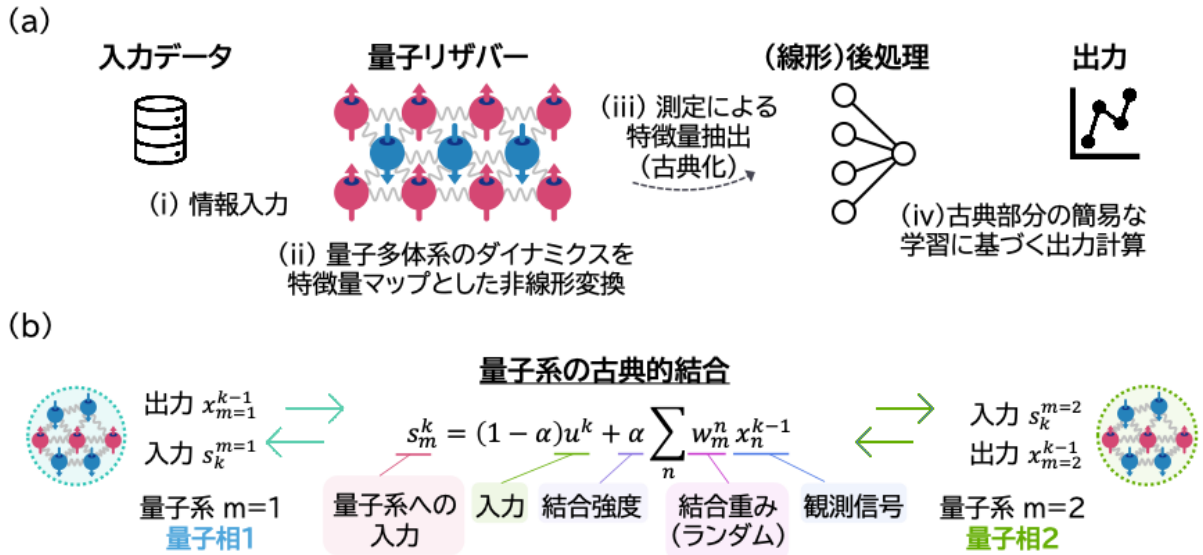


図1：量子相ハイブリッドリザーバーコンピューティングの概要。(a) 1ステップ目から4ステップ目、(b) 5ステップ目。

本提案手法の全体構成を図1に示す。複数の量子系を結合して情報処理を行う本プロトコルは全部で5ステップから成る[5]。なお、それぞれの量子系は物理実装が容易なハミルトニアンにより構成されているものとする。

1ステップ目は各量子系への情報入力である。量子自由度の書き換えにより情報が与えられる。2ステップ目は量子系の時間発展ダイナミクスである。量子リザーバーコンピューティングでは、この過程を一種の特徴量マップとみなすことで、与えられた情報を非線形変換する。なお、この過程はハミルトニアンによって特徴付けられ、量子相の特性を強く反映する。3ステップ目は測定である。量子系から情報を抽出し、古典的な特徴量ベクトルを構成する。4ステップ目は出力計算である。ここでは、特徴量ベクトルに対し簡易な線形処理を行い、最終出力を計算する。その際の重みは最小二乗法に基づく簡易な処理により最適化される。5ステップ目は古典結合である。各量子系からの測定結果と、処理したい入力情報とを混ぜ合わせることで、新たな入力信号を定義し、これを各量子系への入力として与える。この構成により、ある量子系への入力信号には別の量子系からの出力情報が含まれるため、複数の量子系が古典的に結合された動的な相が実現される。

4. 新規性・優位性

本手法の優位性を示す例として、遅延付き三角関数積模倣タスクに対する性能を示す。ここでは、ターゲットを $\bar{y}_d^{(k)} = \sin(\omega u^{(k)})\cos(\omega u^{(k-d)})$ とし、その模倣性能を評

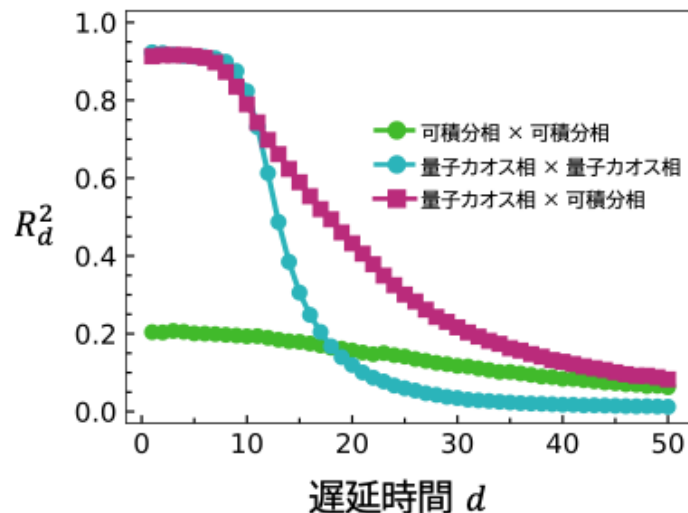


図 2：遅延付き三角関数積模倣タスクに対する量子相ハイブリッドリザーバーコンピューティングの性能。 $\omega = 2.3$ における性能の遅延時間依存性を示した。緑が可積分相×可積分相、青が量子カオス相×量子カオス相、赤が量子カオス相×可積分相に対応する。

価する。なお、 d は記憶を司る遅延時間、 ω は非線形性を司る周波数であり、性能指標には決定係数 R_d^2 を用いる。このタスクに対して、非線形性に強みを持つ量子カオス相と、記憶性に強みがある可積分相との組み合わせを検討した。具体的には、可積分相×可積分相、量子カオス相×量子カオス相、量子カオス相×可積分相の各構成について、量子相ハイブリッドリザーバーコンピューティングの性能を比較した。図2より、要求非線形性が大きくなる高周波数領域、および要求記憶性が大きくなる高遅延領域において、量子カオス相×可積分相の構成が最も高い性能を達成することがわかる。すなわち、このハイブリッド構成においては、量子カオス相の非線形性と可積分相の記憶性を併せ持つ新たな動的相が構築されており、両者の「いいとこ取り」をした性能向上が実現されていることがわかる。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本プロジェクトで開発した量子相ハイブリッドリザーバーコンピューティングのユーザー価値は、単に性能の向上可能性を示した点にとどまらず、「どのように性能を調整するか」という運用上の課題に対して、実装現場で扱いやすい新しい設計自由度を与えた点にある。従来の量子リザーバーコンピューティングでは、量子パラメータの精密な調整が性能最適化の中心であり、実装上は再現性、安定性、調整コストの観点で大きな負担となり得た。これに対し本成果は、異なる量子相をもつ量子系を古典的に結合し、その組み合わせの調整により多彩な性能を実現できることを示した。これは、ユーザーが量子デバイスの微細な制御に過度に依存せず、要求タスクに応じて比較的扱いやすい古典側の設計で性能をチューニングできることを示している。今後の実装現場では、「最高性能を一点で達成すること」以上に、「所望性能を安定して再

現できること」「調整工数が読めること」「利用環境の変動に対して再設定しやすいこと」が重視されるだろう。本プロジェクトのアプローチは、まさにこうした実用上の価値に応えるものであり、量子リザーコンピュティングを研究段階から応用段階へ移行する際の大きな障壁を下げることで期待される。

社会的インパクトとしては、量子技術の社会実装を支えるソフトウェア設計論の発展への貢献が重要である。量子コンピュティング分野では、ハードウェア性能の向上と並行して、限られたデバイス特性をどう活かすかというソフトウェア側の工夫が重要となる。本成果は、量子相の組み合わせという概念を導入することで、量子ハードウェアの個性を前提としたアプリケーション開発の方向性を提示している。これは、単一の理想デバイスを前提とするのではなく、実現しやすい複数の量子系を組み合わせることで価値を引き出すという、実装志向の量子ソフトウェア開発を後押しするものであり、今後の量子社会の発展に向けた新たな方向性を提示する。

6. 氏名 (所属)

小林海翔 (東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻)

(参考) 関連 URL

- [1] K. Fujii and K. Nakajima, Phys. Rev. Appl. 8, 024030 (2017).
- [2] Y. Hou et al., arXiv:2508.12383 (2025).
- [3] R. Martínez-Peña et al., Phys. Rev. Lett. 127, 100502 (2021).
- [4] K. Kobayashi and Y. Motome, Phys. Rev. Lett. 136, 040602 (2026).
- [5] Q. H. Tran et al., arXiv:2006.08999 (2020).