

課題名(タイトル):

## 量子誤り訂正および誤り耐性量子計算のシミュレーション

利用者氏名:

○後藤 隼人

理研における所属研究室名:

量子コンピュータ研究センター 量子コンピュータアーキテクチャ研究チーム

1. 本課題の研究の背景、目的、関係する課題との関係  
量子コンピュータは現在のコンピュータ(古典コンピュータ)に比べてエラーが起りやすいことで知られている。理由は主に2つある。まず、量子計算の特徴である量子重ね合わせ状態がデコヒーレンスと呼ばれる現象によって壊れやすい。また、量子状態の操作(量子ゲート操作)は確率振幅という連続量の操作であり、本質的にアナログ処理で、現在のデジタル処理よりもエラーに弱い。この量子計算におけるエラーの問題を解決するための標準的なアプローチが、量子誤り訂正を利用した誤り耐性量子計算である。

誤り耐性量子計算に利用される量子誤り訂正符号として現在標準的となっているのが表面符号である。隣接した量子ビット間のゲート操作だけでなく、量子計算を実行するために必要なすべての処理が比較的実験で実現しやすいというのがその理由である。しかし、1つの論理量子ビット(符号化されて守られた計算用量子ビット)に必要な物理量子ビット(原子や超伝導回路で実装された実際の量子ビット)の数が、符号距離(符号のサイズを表し、その約半分の数の物理量子ビットエラーを訂正できる)の2乗に比例して増加してしまうため、表面符号の符号化率(論理量子ビット数/物理量子ビット数)は大変低く、符号距離の増加とともにゼロに近づいてしまう。これが、誤り耐性量子コンピュータに必要な量子ビット数が膨大になってしまう主な理由である。

そこで、本プロジェクトでは、表面符号よりも少ない量子ビット数で誤り耐性量子計算を効率的に実現できる新しい量子誤り訂正符号を探索し、その復号性能やゲート性能を数値シミュレーションで評価することを目的とする。

## 2. 具体的な利用内容、計算方法

符号化率が数10%と高い独自の量子符号「多超立方体符号(many-hypercube code)」とその高速な復号方法や論理量子ゲートの実行方法を考案し、その性能を数値シミュレーションで評価した。計算方法はpythonベースであり、量子状態の生成と測定シミュレーションには Stim と呼ばれるオープンソースライブラリ(C. Gidney, Quantum 5, 497

(2021))を利用し、その測定結果を復号する部分のpythonコードは自作した。本シミュレーションはモンテカルロシミュレーションであり、多数のサンプル平均を取る必要がある。そこで、まず手元のPCで動作を確認し、その後mpi4pyによってMPI化して、HOKUSAIで並列計算した。論理量子ゲートの性能評価には回路ノイズモデル(ゲート操作や量子ビットの初期化・読出しにエラーが生じるモデル)を用いた。

## 3. 結果

復号性能の評価では、ビット反転エラーに対して高いしきい値(誤り訂正が有効に働くためのエラー率の上限値)を達成した。論理量子ゲートの評価では、論理制御 NOT ゲートに対して高いしきい値を達成した。

## 4. まとめ

表面符号に比べてはるかに符号化率が高い新しい量子誤り訂正符号「多超立方体符号(many-hypercube code)」を提案し、専用の復号方法や論理量子ゲートの実行方法を開発して、HOKUSAIを利用した並列計算によって復号および論理量子ゲートの性能を評価した。その結果、ともに高い性能を達成できることを示した。

## 5. 今後の計画・展望

符号構造や論理量子ゲートの実行方法の改良などにより、さらなる高性能化を目指す。その評価のために、今後も高い並列計算力を有するHOKUSAIを活用する。

2024 年度 利用研究成果リスト

【雑誌に受理された論文】

- Hayato Goto, High-performance fault-tolerant quantum computing with many-hypercube codes, Science Advances 10, eadp6388, 2024 年 9 月

【口頭発表】

- Hayato Goto, Fault-tolerant quantum computation with simple non-LDPC high-rate codes, APS March Meeting 2024, 2024 年 3 月
- 後藤隼人、接続高レート量子誤り検出符号の復号、情報理論研究会 IT 3 (12)、2024 年 5 月
- 後藤隼人、最小多超立方体符号の性能評価、日本物理学会第 79 回年次大会、2024 年 9 月
- Hayato Goto, Fault-Tolerant Quantum Computing with Many-Hypercube Codes, Quantunuum Fall 2024 Training Session, 2024 年/10 月
- 後藤隼人、誤り耐性量子コンピュータの基礎と最新動向、第 47 回情報理論とその応用シンポジウム(SITA2024)ワークショップ2、2024 年 12 月

【ポスター発表】

- Hayato Goto, Recipe for FTQC with many-hypercube codes, Quantunuum Spring 2024 Training Session, 2024 年 5 月

【その他(著書、プレスリリースなど)】

- プレスリリース: 量子コンピュータ用誤り訂正技術の高効率化に成功ー高性能な誤り耐性量子コンピュータの実現に道一, 2024 年 9 月