

プロジェクト名(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. 本プロジェクトの研究の背景、目的、関係するプロジェクトとの関係

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

符号化率が約20%の新しい高レート量子誤り訂正符号に着目し、その独自の復号方法を考案し、その復号性能を従来から知られている2種類の復号方法を適用した場合と比較した。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。

また、回路ノイズモデル(ゲート操作や量子ビットの初期化・読出しがあるエラー率でエラーを起こすモデル)を用いて、誤り耐性量子計算の最も基本的な性能評価である量子メモリの誤り訂正のシミュレーションも実施した。ここでも量子状態の準備や測定シミュレーションには上記の Stim を利用し、復号を含むその他の部分のコードは自作した。これも上記同様モンテカルロシミュレーションであるため、mpi4py でMPI化し、HOKUSAI で並列計算した。

## 3. 結果

復号性能の評価では、2種類の従来方法に比べて、今回考案した独自の復号方法のほうが高性能であることが確認された。また、誤り耐性量子計算の基本性能評価では、回路ノイズモデルのエラーの影響を確かに低減でき、所望の特性を確認することができた。

## 4. まとめ

表面符号よりもはるかに符号化率の高い新しい量子誤り訂正符号に対し、それ専用の独自の復号方法を考案し、HOKUSAI を利用した並列計算によってその性能を評価した。また、本符号を用いた誤り耐性量子計算の基本性能評価も、同様に HOKUSAI を利用して実施した。その結果、ともに所望の結果を確認することができた。

## 5. 今後の計画・展望

今回の結果に関して学会発表、論文投稿を予定している。今後も HOKUSAI の高い並列計算力を有効利用し、誤り耐性量子コンピュータに必要な数値シミュレーションを実施して、その実現に貢献する。