

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 実世界における量子計算に向けた数値的解析

2. 個人研究者名

Darmawan Andrew Sudiro (京都大学基礎物理学研究所 特定助教)

3. 事後評価結果

本研究は量子誤り訂正符号におけるノイズのシミュレーションと誤り訂正符号を解析する数値手法の開発を目標としている。特に、実際の量子ビットでは特定のエラーが起りやすいこと (Biased noise) を考慮した解析を行っている。評価手法としてテンソルネットワークを応用することで計算の効率化を目指した。符号の復号の検討も行っている。本研究によって、Biased noise に対しては従来知られている表面符号を変形することで復号が容易で誤り耐性の高い符号が実現できることが示された。表面符号の最適復号法はテンソルネットワークで定式化できることが知られていたが、今回、Biased noise ではテンソルネットワークのエンタングルメント構造が簡単になり、同時に許容される誤り率の上限も向上することが示されている。具体的にカーキヤット量子ビットを用いた XZZX 表面符号を取り上げ、カーキヤット量子ビットのダイナミクスをマスター方程式によって解析し、位相エラーが高いノイズモデルを構築して表面符号のシミュレーションに用いた。これまで考えられていた等方的なノイズモデルよりもノイズ耐性が高いことが示された。この成果は例えば Amazon の量子コンピュータ研究グループにも取り入れられている。これに関連して、Biased noise モデルでは誤り耐性量子コンピュータの実現に必要な魔法状態の生成も従来法より 2 桁低い誤り率で行えることが示された。当初、ニューラルネットワークの導入も構想されていたが本研究期間では検討されていない。一方、新しい展開として、ランダム符号の復号の効率化が検討された。従来から、表面符号は、誤り耐性は高いが符号化の効率が低いことが知られていた。そのため、浅い量子回路で実装できるランダム符号を検討した。ランダム符号の正確な復号アルゴリズムは知られていなかった。今回、1 次元の符号に対してテンソルネットワークを用いた復号アルゴリズムを提案し、少ない計算量で復号が行えることを示した。

本研究者は採択以前から国際的な共同研究を行っており、海外での共同研究も計画されていた。しかし、パンデミックの影響でこれらはキャンセルされた。このような状況下でも国際的な共同研究を進め、また、本さきがけ領域の研究者との共同研究などによって適切に研究が進められている。また、2023 年 3 月に量子誤り訂正に関する滞在型国際会議を主催者として開くなど、研究成果のアピールや今後の発展として評価できる。

量子誤り訂正は実証実験が報告されるなど、今後ますます重要な分野である。実現性が高い手法や、実際に物理系におけるノイズバイアスに対処するようにデザインされた量子誤り訂正、そしてテンソルネットワークを用いた量子誤り訂正研究を開拓している。種々の現実的状況下での量子誤り訂正符号やエラー解析の手法としてテンソルネットワークが有効であることを示したことは大きな波及効果があるものと考えられる。