

革新的な量子情報処理技術基盤の創出
2021 年度採択研究代表者

2022 年度
年次報告書

遠藤 傑

日本電信電話(株) NTT コンピュータ&データサイエンス研究所
研究員

量子エラー抑制の基礎理論の構築および実用的手法の提案

研究成果の概要

2022年度は、以下のような成果を得ることができた:

1. 回転対称性がある連続量符号計算に対する量子エラー抑制

量子状態に冗長性を持たせ、符号上で計算することによって量子エラー訂正や量子エラー検出を行うことで計算エラーを減らすことができることが知られている。符号化の方法としては主に2種類が知られており ① 量子ビットを複数用いて(主に)1つの論理量子ビットを得る離散量符号と ② 調和振動子の無限次元の準位から符号として用いることができる量子状態を抜き出してくる連続量符号がある。ここで、回転対称性を用いた連続量符号は光子の損失に対して高いエラー訂正能力を持つものの、状態準備の忠実度を高めることが、特に状態の非線形性が高い場合に難しいことが課題であった。そこで、系の対称性を用いた量子エラー抑制法である対称性展開法を、状態準備にも適応可能にし、さらに回転対称性連続量符号に対してどのように実験的に適用できるかを明らかにした。その結果、回転対称性連続量符号の状態準備において高精度なエラー抑制を行うことが可能であることを示した。

2. 仮想エラー検出法

従来の量子エラー検出法は、補助量子ビットを用いた間接測定を、符号のスタビライザ生成演算子全てに対して行うことで、量子状態の対称性が保存されているかどうかを確認し、計算精度を高める手法である。しかし、この高い間接測定のコストは、近未来の量子デバイスでは重荷となる。そこで我々は、対称性展開法を発展させ、補助量子ビットを1個だけ必要とする、測定結果の事後処理を行うことで実行的に量子エラー検出を適用した量子状態に対応する計算結果を得ることを可能にする仮想的量子エラー検出法を提案した。

他には量子エラー抑制を量子センシングに適用した論文が PRL 誌で出版、量子エラー抑制の原理的限界について情報理論的に解析した論文が npj QI 誌に出版された。また、一般化部分空間展開法の実機実証を行なった。

【代表的な原著論文情報】

- 1) Suguru Endo, Yasunari Suzuki, Kento Tsubouchi, Rui Asaoka, Kaoru Yamamoto, Yuichiro Matsuzaki, and Yuuki Tokunaga. "Quantum error mitigation for rotation symmetric bosonic codes with symmetry expansion." *arXiv preprint arXiv:2211.06164* (2022).
- 2) Kento Tsubouchi, Yasunari Suzuki, Yuuki Tokunaga, Nobuyuki Yoshioka, and Suguru Endo. "Virtual quantum error detection." *arXiv preprint arXiv:2302.02626* (2023).
- 3) Kaoru Yamamoto, Suguru Endo, Hideaki Hakoshima, Yuichiro Matsuzaki, and Yuuki Tokunaga. "Error-Mitigated Quantum Metrology via Virtual Purification." *Physical Review Letters* 129, no. 25 (2022): 250503.
- 4) Ryuji Takagi, Suguru Endo, Shintaro Minagawa, and Mile Gu. "Fundamental limits of quantum error mitigation." *npj Quantum Information* 8, no. 1 (2022): 114.

5) Yasuhiro Ohkura, Suguru Endo, Takahiko Satoh, Rodney Van Meter, and Nobuyuki Yoshioka.
"Leveraging hardware-control imperfections for error mitigation via generalized quantum
subspace." *arXiv preprint arXiv:2303.07660* (2023).