

革新的な量子情報処理技術基盤の創出
2021 年度採択研究者

2021 年度
年次報告書

秋笛 清石

日本電信電話(株) コミュニケーション科学基礎研究所
研究主任

高機能量子通信プロトコルにおける量子操作の分散効率化と評価

§ 1. 研究成果の概要

本課題は(1)多くの高機能量子通信プロトコルで用いられるランダム符号化を分散型ランダム符号化(図 1)で置き換えると同時に、(2)量子もつれの数理構造を上手く活かした量子もつれ最小化アルゴリズムを開発することで、分散型量子情報処理における量子もつれリソースの飛躍的な削減を目指すものである。

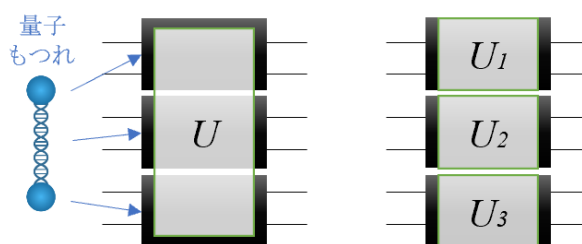


図1. ランダム符号化と分散型ランダム符号化の模式図
ランダム符号化のランダムユニタリ変換 U を複数チップ上で実行するにはチップ間に大量の量子もつれが必要だが、分散型ランダム符号化は各チップで独立にランダムユニタリ変換を実行するのでチップ間量子もつれが不要。

今年度は二つの研究項目に関連して以下の成果を得た。

- (1) State merging と呼ばれる量子通信プロトコルにて、ランダム符号化を分散型ランダム符号化に置き換えても元の性能がある程度保持されることを示す予備的計算を行った。また、ランダム符号化の応用例として、量子情報秘匿と呼ばれる高機能量子暗号に関する先行研究を調査した結果、似た機能を持つ秘密分散と比較して機密性は質的に向上するが堅牢性が低減してしまうプロトコルが主であることが分かった。これは、量子情報秘匿の社会実装に向け、プロトコルの分散化と堅牢性の改善という課題が残っていることを意味する。

- (2) 量子もつれ最小化アルゴリズムの探索空間となる量子状態の状態被覆(図 2)のサイズを厳密に見積もった¹⁾。その結果、分散型量子情報処理における(識別可能性の低減による)量子状態間の距離の圧縮効果を加味しても、量子系の次元を d として、状態被覆のサイズ I が $\log I = \Omega(d)$ と巨大になってしまうことが分かった。従って、高次元純粋状態の量子もつれ最小化問題で状態被覆を全探索する方法は現実的でない。一方、量子もつれ最小化問題がリブシッツ連続な凹関数 f を用いて $\min_{\rho} f(\rho)$ で表せる場合は凸包近似の頂点のみ探索すれば近似解が得られるので、凸包近似の最小頂点数 V の見積もりも行った¹⁾。その結果、二者間プロトコルの場合 $\log V = \Omega(d)$ となってしまうので、今後多者間プロトコルの場合に注力すべきことが分かった。

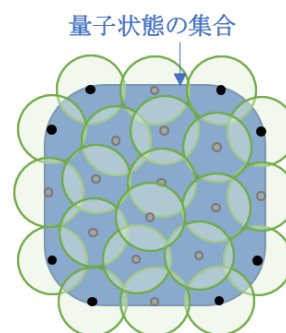


図2. 状態被覆の模式図
状態被覆は任意の量子状態を一定精度で近似できる量子状態の部分集合であり、図の黒点と灰点で表される。一方、量子状態の集合は黒点の凸包だけでも同精度で近似可能。

【代表的な原著論文情報】

- 1) “Quadratic improvement on accuracy of approximating pure quantum states and unitary gates by probabilistic implementation”, Seiseki Akibue, Go Kato and Seiichiro Tani, arXiv, quant-ph: 2111.05531 (2021).