

量子誤り訂正

准教授 笠井健太

研究分野：量子誤り訂正、符号理論

ホームページ：<https://kasaikenta.github.io/>

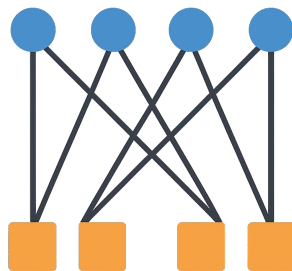
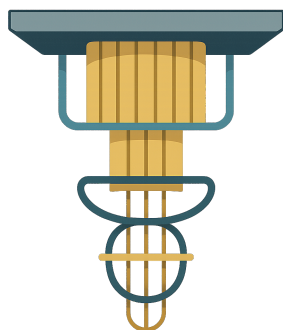


● 研究内容・目的

量子コンピュータや量子通信は、従来の情報処理では困難だった問題に新たな解決策をもたらすと期待されています。しかし、量子ビット(qubit)は極めて壊れやすく、エラーが頻繁に発生します。この問題に対処するには、「量子誤り訂正(Quantum Error Correction, QEC)」が不可欠です。

量子誤り訂正では、量子情報を複数の物理ビットに冗長に符号化し、エラーを検出・訂正することで信頼性を確保します。測定による情報の破壊や、ビット反転と位相反転の両方に対応しなければならない点で、古典誤り訂正とは異なる工夫が必要です。

近年では、スケーラブル(大規模化可能)な誤り訂正方式として、LDPC符号やトポロジカル符号(表面符号など)が注目を集めています。これらは構造がシンプルで、物理ビット数を増やしながら論理ビットを効率的に保護できるため、将来の大規模量子コンピュータの基盤として有望です。現在の量子ハードウェアでも、誤り訂正の導入が進みつつあり、安定した論理ビットを実現する試みが各所で行われています。量子誤り訂正は、量子技術を実用化するための鍵を握る基盤技術なのです。



● 最近の研究トピック

私たちは近年、量子LDPC符号の構成と復号に関する複数の新しいアプローチを提案し、理論的および数値的な性能改善を示してきました。特に注力しているのは、置換行列 (Permutation Matrix) を用いた構成法であり、量子通信路容量のハッシング限界に迫る性能を持つ CSS 型量子符号を設計しています。

具体的には、置換行列をベースにしたLDPC符号に着目し、短いサイクルのない構成法を与えることで、エラーフロア問題を低減することに成功しました。これにより、従来法に比べて高い復号成功率が得られ、スケーラブルな量子誤り訂正符号としての実用性が高まりました。

また、復号アルゴリズムの面では、縮退誤り (degenerate errors) への対処を含む新たなデコーダ設計を行い、非二元体上での実装を通じて、従来よりも高いフェールレート性能を確認しています。TSUBAME4 のスーパーコンピュータを用いた大規模シミュレーションにより、提案手法の有効性を実証しました。

現在は、これらの構成法をさらに拡張し、接続構成やハイブリッド復号法などの統合的アプローチを探っています。これにより、量子誤り訂正のスケーラビリティと堅牢性を両立させる基盤技術の確立を目指しています。

● 教員からのメッセージ

ゆっくり勉強したい人や、バリバリ研究して活躍したい人などいろいろな人がいるので、学生の性格に応じて指導方針を考えています。



● 関連する業績、プロジェクトなど

・論文 Google Scholar へのリンク

<https://scholar.google.com/citations?user=CHJLpOkAAAAJ&hl=ja>

・招待講演

- K. Kasai, “The Many Applications of Spatially-Coupled Codes,” IEEE Information Theory Workshop, Paraty, Brazil, Oct. 16–20, 2011.

・受賞

- エリクソン・ヤングサイエンティストアワード 2010
- 電子情報通信学会論文賞 2023