

量子誤り訂正に向けた回転表面符号デコーダーの 高位合成による設計と評価

Design and Evaluation of a Rotated Surface Code Decoder for Quantum Error Correction
Using High-Level Synthesis

城戸浩史¹
Hiroto Kido

門本淳一郎²
Junichiro Kadomoto

若林一敏²
Kazutoshi Wakabayashi

小林和淑¹
Kazutoshi Kobayashi

京都工芸繊維大学¹
Kyoto Institute of Technology

東京大学²
The University of Tokyo

1 はじめに

量子コンピューターは卓越した計算能力をもつ一方、高いエラー率が課題である。誤り耐性量子計算には、量子誤り訂正が不可欠であり、中でも表面符号は高い訂正能力をもつ誤り訂正符号として注目されている。量子誤り訂正では、シンδροーム測定によりエラーを間接的に検出するが、エラー箇所の特定には測定結果からエラーを正しく推定するデコーダーが必要となる。

本稿では、表面符号用デコーダーを設計し、高位合成およびシミュレーションを通じて既存研究との比較評価を行った。

2 表面符号の復号

表面符号は、データ量子ビットと補助量子ビットから構成される。符号距離 d は、格子一辺のデータ量子ビット数を表し、 d の増加に伴い論理エラー率は低下する。補助量子ビットを測定することで、近接するデータ量子ビットに発生したエラーを間接的に検知する。補助量子ビットは一定間隔ごとに測定され、それらの測定値（シンδροーム）が3次元復号グラフを構成する。復号グラフにおいて、補助量子ビットは頂点、データ量子ビットは辺に対応し、エラーは頂点間を結ぶエラー鎖として表現される。表面符号の復号は、復号グラフ上のエラー鎖の端点となる頂点のペアを求める最小重み完全マッチング (MWPM) に帰着される。

MWPM の厳密解法では実機に求められる $1\ \mu\text{s}$ 以内の復号は困難とされており、高速に近似解を求めるアプローチが一般的である。本研究では、Iterative Greedy アルゴリズム [1] を用いたデコーダーを設計した。本手法は、マンハッタン距離に基づく許容コストを段階的に緩和しながらマッチングを行うことで、高速に近似解を求める。また、符号化に必要な量子ビット数が従来の表面符号の約 75% となる回転表面符号 (図 1) を採用することで MWPM のエントリ数および処理サイクルを削減している。 [2]

3 高位合成およびシミュレーション結果

NEC 社の CyberWorkBench [3] を用いて C 言語による動作記述から ASIC 向けの回路を高位合成した。復号対象は符号距離 $d = 15$ までの回転表面符号、動作周波数 1 GHz、プロセスルール 22 nm とした。生成された RTL 記述を Synopsys 社の Design Compiler を用いて論

理合成した結果、回路面積は $0.390\ \text{mm}^2$ 、消費電力（メモリを除く）は $1.70\ \text{mW}$ となった。次に、量子ビットの物理エラー率 $p = 0.5\%$ 、符号距離 $d = 5$ とし、 10^4 回の動作シミュレーションを行った。本研究のデコーダーの復号レイテンシおよび類似手法の先行研究 [1] との比較結果を表 1 に示す。回転表面符号によるエントリ数の削減に加え、マッチング完了時の早期終了判定の実装により、先行研究に比べてサイクル数を大幅に削減した。同じエラー率下で符号距離を変化させた場合、時間計算量は $O(d^2) \sim O(d^3)$ で推移し、 $d = 15$ においても平均 $503\ \text{ns}$ のレイテンシを達成した。

表 1 デコーダーのレイテンシの比較 ($d = 5$)

| | クロック周期 | Avg | Min | Max |
|-----|--------|--------------------|--------------------|--------------------|
| 本研究 | 1 ns | 48.8 ns | 26.0 ns | 306 ns |
| [1] | 2 ns | 10.9 μs | 9.14 μs | 12.4 μs |

4 まとめ

本稿では、量子誤り訂正に用いられる表面符号用デコーダーを設計した。設計したデコーダーは、先行研究と比較してレイテンシを大幅に削減し、実機に求められる平均 $1\ \mu\text{s}$ 以内の高速な復号を達成した。今後は、デコーダーの復号精度の評価を行う予定である。

謝辞

本研究は、JST ムーンショット型研究開発事業 Grant 番号 JPMJMS226A の支援を受けたものである。

参考文献

- [1] 中村徹舟ほか, IPSJ ACS, 17 (1), 13-25, 2024
- [2] AR O'Rourke, et al., Phys. Rev. Research 7, 2025
- [3] NEC, 高位合成ツール CyberWorkBench, <https://jpn.nec.com/cyberworkbench/index.html>

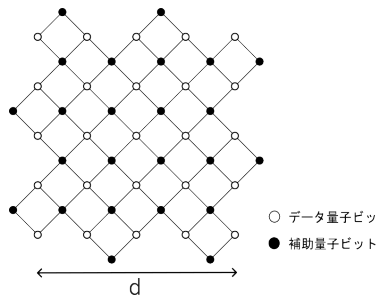


図 1 回転表面符号 ($d = 5$)