

誤り訂正操作を組み込んだ測定型量子計算コンパイラの開発 —誤り耐性光量子コンピュータの実用化に向けて—

1. 背景

光量子コンピュータは、多くのコンポーネントを室温で動作させられ、半導体製造基盤を活用したスケール拡大が見込める。一方、誤り耐性量子計算 (FTQC) の実現には、光方式に適したアーキテクチャ設計と技術選定を継続的に進める必要がある。特に光子損失や確率的操作といったデバイス固有の制約を前提に、誤り訂正方式の設計とソフトウェアスタックを一体で最適化することが不可欠である。

光方式で主流となる測定型量子計算(MBQC)は、測定結果に依存したフィードフォワードと厳密な時間同期が本質であり、回路型 (ゲートモデル) 向けのコンパイラをそのまま適用しにくい。論理回路 (設計) を MBQC 実行命令列 (測定命令、適応分岐、同期層) へ変換し、さらに方式別ノイズを取り込んだ論理エラーレート評価まで到達するエンドツーエンドのツールチェーンが不足していた。

2. 目的

本プロジェクトでは上記課題に対応し、与えられた論理回路から MBQC の実行可能命令列を生成し、光学実装に基づくシミュレーションまでを一貫して行えるエンドツーエンドソフトウェアを開発することを目的とした。具体的には、以下の 3 機能 (ツール) を実装した。

- 論理量子回路を、誤り訂正を前提とした MBQC 実行命令列 (測定命令、適応分岐、同期層) へ自動変換する。
- 変換結果を Stim 等のバックエンドへ接続し、論理エラーレートを定量評価できるようにする。
- 光学パラメータ (損失、融合忠実度、スクイーミング量等) を有効パウリノイズ / 消失 (erasure) エラーへ写像し、方式比較と要求性能推定に接続する。

3. ソフトウェア開発内容

開発内容は、(1) 量子回路から MBQC 命令列へ変換するコンパイラ、(2) 論理エラーレート評価基盤、(3) 光学ノイズ変換の 3 機能からなる。主に Python で実装し、評価バックエンドとして高速スタビライザシミュレータ Stim を用いた。

1. 量子回路からMBQC命令列への変換ソフトウェア
2. Stimバックエンドを用いた論理エラーレートの評価機能
3. 光学モデルに準拠したエラー推定ツール

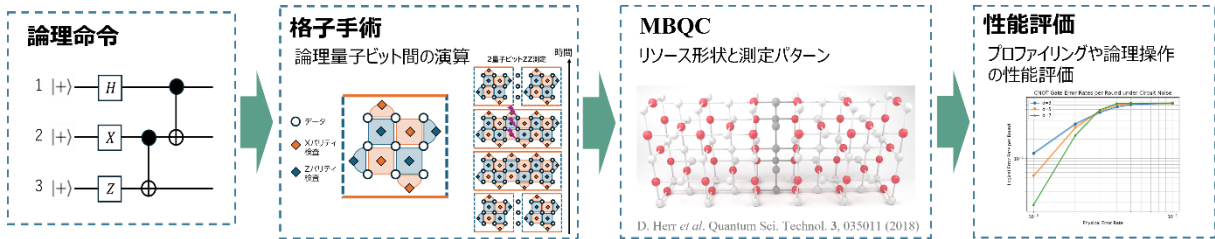


図1 プロジェクト概要とワークフロー

(1) MBQC コンパイラ

量子回路 → 格子手術命令 → MBQC 命令列の段階的変換を実装した。格子手術を中間表現として採用することで、論理操作（マージ/スプリット等）と MBQC 実行の対応を取りやすくした。さらに、DETECTOR と論理可観測量を含む Stim 回路として出力し、評価まで直結できるようにした。

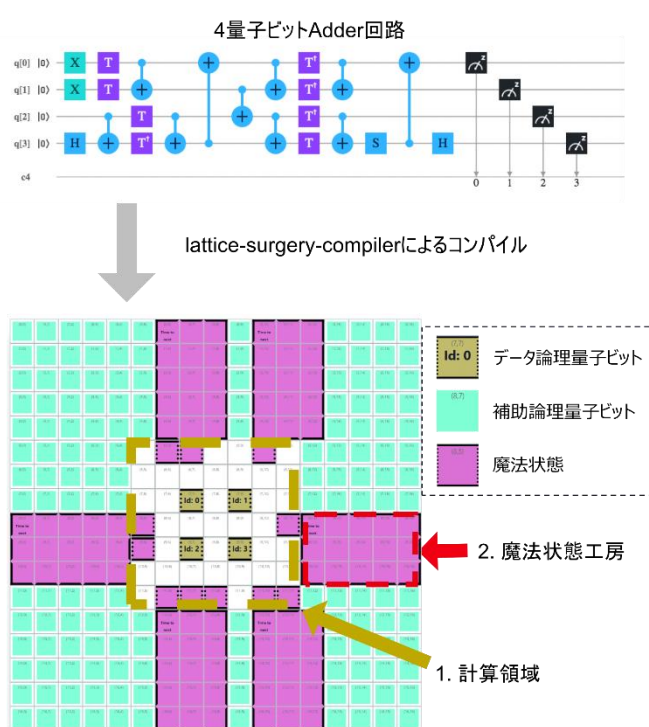


図2 4量子ビット Adder 回路コンパイルのデモンストレーション

1. 計算領域のMBQC命令

d=5のRHG格子埋め込み

Commands	Max space	Depth (M)	Active volume
1,042,605	1,252	1,438	1,768,027

2. 魔法状態工場のMBQC命令

Litinskiの実装をコンパイル

Commands	Max space	Depth (M)	Active volume
162,421	811	241	275,917

(2) 性能評価基盤

MBQC 命令列を入力として Stim 上で論理エラーレートの評価する機構を実装した。論理 CNOT の MBQC 表現を題材に、論理可観測量の 4 パターンすべてにつ

いて、符号距離の増加に伴い論理エラーレートが低下することを確認し、評価フローの妥当性を検証した。加えて、消失 (erasure) エラーを有効に扱うためのデコーダも実装した。

(3) 光学ノイズ変換

光学パラメータを、評価系で扱える離散化ノイズ (パウリノイズ/消失エラー) へ写像する機能を実装した。代表例として、(a) GKP 系 (Xanadu 社方式) と (b) 単一光子+FBQC 系 (PsiQuantum 社方式) を取り上げ、パラメータ掃引によりしきい値条件を探索するフローを整備した。

4. 新規性・優位性

- 論理量子回路 → MBQC 命令列 → DETECTOR/OBSERVABLE 付き Stim 回路 → 論理エラーレート評価までを一気通貫で接続するワークフローを確立した。
- 光学実装由来の誤差を「有効パウリノイズ/消失エラー」として共通評価基盤へ写像し、方式間の定量比較を可能にした。
- 外部ツール (lattice-surgery-compiler、LaSynth 等) と接続可能な格子手術入力仕様を整備し、将来的な拡張性を確保した。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

本成果により、論理回路設計段階で「所望の論理操作に必要なハードウェア性能 (損失許容、融合忠実度、連続量品質等)」を、方式別に同一フロー上で比較・見積もりしやすくなる。設計ループ (回路構造 ⇄ 誤り訂正 ⇄ デバイス仕様) を短縮し、ボトルネックとなるパラメータを早期に特定できる。想定される主な利用価値は以下のとおりである。

- ハードウェア/アーキテクチャ開発：物理パラメータが論理性能に与える影響を定量化し、開発優先度の根拠を得る。
- コンパイラ/QEC 設計：変換規則、スケジューリング、detector 構成を反復改善し、方式差の要因を切り分ける。
- アルゴリズム開発：代表サブルーチン (Adder、蒸留等) の資源量・失敗確率を見積もり、設計選択に反映する。

定量例として、4 量子ビット Adder 回路 (符号距離 $d=5$) に対してコンパイルとリソース推定を実施し、総コマンド数 約 1,042,605、最大同時 qubit 数 1,252、並列実行時のシーケンス深さ 1,438 を得た。

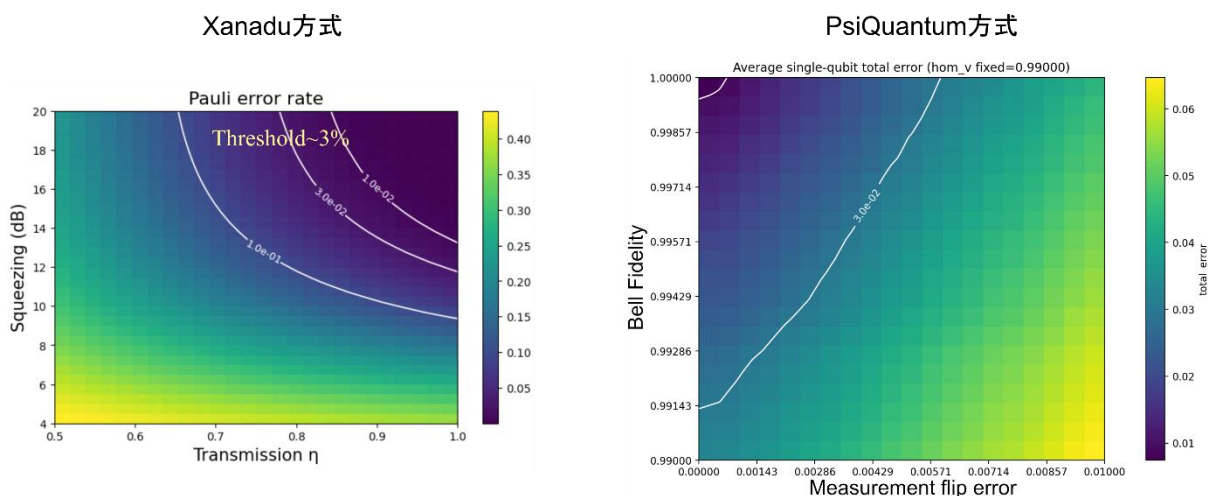


図3 Xanadu系 (GKP) /PsiQuantum系 (FBQC) の要求性能可視化

利用ケースとしては、(i) 符号距離 d を掃引して論理エラーレート曲線を得る、(ii) 光学パラメータを掃引して「しきい値を下回る領域」を可視化する、(iii) 方式間で要求性能を共通指標として並列比較する、といった設計・評価ワークフローが想定される。

社会的には、光量子計算機の実用化に向けて、ハードウェア開発とソフトウェア開発を共通指標で接続し、誤り耐性量子計算の実現可能性検証を加速する効果が期待される。方式比較・評価の「共通言語」が整備されることで、産学連携での検証速度が向上し、ロードマップ策定や投資判断の合理化にも寄与し得る。

6. 氏名 (所属)

福島 誠人 (所属: 東大) / 渡邊 悠稀 (所属: 東大) / 佐々木 大地 (所属: 東大)
井ノ上 慎一 (所属: 東大) / 岡崎 晃一 (所属: 東大) / 伍井 直輝 (所属: 東大)

(参考) 関連 URL

ls-pattern-compile: <https://github.com/UTokyo-FT-MBQC/ls-pattern-compile>

GraphQOMB: <https://github.com/TeamGraphix/graphqomb>

graphqomb-studio: <https://github.com/UTokyo-FT-MBQC/graphqomb-studio>

Stim: <https://github.com/quantumlib/Stim>