

ムーンショット目標6 公開シンポジウム2024

2024年3月27日

^{プロジェクト成果紹介} 誤り耐性型量子コンピュータにおける 理論・ソフトウェアの研究開発

プロジェクトマネージャー: 小芦 雅斗

東京大学大学院工学系研究科・教授





ムーンショットプログラム目標6

旭仏守単」凹昭以未復161以14以用元

大規模集積シリコン量子コンピュータの研究開発

拡張性のあるシリコン量子コンピュータ技術の開発

イオントラップによる光接続型誤り耐性量子コンピュータ

ナノファイバー共振器QEDによる大規模量子ハードウェア

大規模・高コヒーレンスな動的原子アレー型・誤り耐性量子コンピュータ

誤り耐性型大規模汎用光量子コンピュータの研究開発

量子計算網構築のための量子インターフェース開発

ネットワーク型量子コンピュータによる量子サイバースペース

スケーラブルで強靭な統合的量子通信システム

スケーラブルな高集積量子誤り訂正システムの開発

本プロジェクトのミッション



「誤り耐性型量子コンピュータにおける理論・ソフトウェアの研究開発」











量子ビットK個の情報を、量子ビットN(>K)個に 載せることで、一部の量子ビットにエラーが起き ても訂正できるようにする。



1量子ビットを7量子ビットに載せる (Steane符号) "符号距離"=3

"符号距離"=3	"符号距離"=2t+1
1個のエラーを	<i>t</i> 個のエラーを
訂正できる。	訂正できる。

エラーの訂正



量子データの中身を覗いてしまうと情報が 壊れてしまうので、 どの量子ビットにエラーが起きたかという 情報に関する"ヒント"(シンドローム)だけ を量子測定によって取り出す。

ヒントからエラーの場所を推定する計 算が必要で、これは古典計算機を使っ て行う。(復号、デコード)



1量子ビットを7量子ビットに載せる (Steane符号)

エラーの訂正



7

量子データの中身を覗いてしまうと情報が壊れてしまうので、

どの量子ビットにエラーが起きたかと いう情報に関する"ヒント"(シンドロー ム)だけを量子測定によって取り出す。



<u>表面符号</u> サイズを大きくすれば符号距離が大きくなる



シンドローム: 連続したエラー の端だけが検知 される。

エラーの訂正



8

量子データの中身を覗いてしまうと情 報が壊れてしまうので、

どの量子ビットにエラーが起きたかと いう情報に関する"ヒント"(シンドロー ム)だけを量子測定によって取り出す。 ヒントからエラーの場所を推定する計 算が必要で、これは古典計算機を使っ て行う。(復号、デコード)

<u>表面符号</u> サイズを大きくすれば符号距離が大きくなる



誤り耐性量子計算 (FTQC)









量子テレポーテーション

一緒にゲート操作も行う



特別な状態(マジック状態)が符 号化されたものを<u>高い精度で用意</u> できれば、*T*ゲートが実装できる。

> 「状態」は静的なリソースなの で、検査、保存、選別が可能で あることを利用



テレポーテーションやマジック状態の準備に多数の補助量子ビットが必要 誤り耐性を持つ実装が可能 限定されたゲート操作しかこの手法が使えない

誤り耐性型量子コンピュータのレイヤー









誤り耐性型量子コンピュータを大規模化するためのハードウェア要求性能を大幅に低減する



クロスレイヤー協調設計モデル

- クロスレイヤー協調設計モデルの主要な用途:
 - 量子計算の技術レイヤをまたぐトレードオフ関係を把握する。
 - 個別のレイヤーでの性能改善が全体に与える影響を評価する。
 - 各レイヤーの成果を集約し現在のState-of-the-artとなる量子計算 機を設計する。
- クロスレイヤー協調設計モデルの構成:
 - 各レイヤーでパラメータ依存関係を細かく評価するソフトウェア
 - 用途に合わせて評価ソフトウェアを呼び出し最適化計算を行うモジュール
 - 全レイヤーをまたぐ依存関係を扱うため、各レイヤーで代替となる 標準的モックアップ





すべてのレイヤーを包含したモデルの雛形を構築





Ueno, Kondo, Tanaka, Suzuki, Tabuchi, 2021 IEEE International Symposium on HPCA, pp. 274-287 (2022); Ueno, Kondo, Tanaka, Suzuki, Tabuchi, 2021 58th ACM/IEEE DAC, pp. 451-456 (2021); Yoshioka, Okubo, Suzuki, Koizumi, Mizukami, arXiv:2210.14109 (2022).

17







<u>量子ビットのばらつきに由来する不均質なエラー</u>

量子ビットの誤り率は製造のばらつきにより 一定の確率で低品質なものや欠陥が混在



課題	チップをブロック状に区切って論理ビットを
	構築する表面符号を構成すると、
	一定の確率で極めて低品質な論理ビットが発生



回路設計:不均質なエラーに耐性のある復号 Longer And Constant Program

今回の実施内容 量子ビットのエラーの不均質さを考慮しつつ、商用のFPGAで実装可能な要求性能の 復号回路の設計手法を提案 実際に回路実装を行い、性能を実証

実装による性能改善

Liao, Suzuki, Tanimoto, Ueno, Tokunaga, the 28th Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), Online (2023).

20



速度改善のカギ エラーの不均質さを計算する部分に関し、一部をLook-up tableに持つことで、計算量を大幅削減

<u>設計した回路の構成図の一部</u>







Pre/Post-process

 $U = C_1 T C_2 T \dots$

Applications



実用的な極低温制御に向けた電力効率の見積もり

従来手法	希釈冷凍機内部での 制御による効率化	希釈冷凍	夏機内制御の利点と制約
		利点	 ▶ 冷凍機内部の配線や転送機構の簡略化が可能 ▶ 室温の熱ノイズを回避し低消費電力化が可能
		制約	 ▲釈冷凍機内で利用可能な演算能力に制約 ▲釈冷凍機の冷却能力から消費電力に制約
量子ビット	量子ビット	演算能力	→ 極低温回路技術を用いた設計で解決策を提示
超伝導系, 量子ド	ット系などで利用可能	消費電力	→ これまで体系的な設計や見積もりが無かった





今回の実施内容量子優位性の実現のために集積回路に求められるデジタル回路の消費電力効率を計算

Suzuki, Ueno, Liao, Tanaka, Tanimoto, 2023 IEEE Symposium on VLSI Technology and Circuits (invited), Online (2023).

<u>所定のアプリケーション実行に必要なハードウェア要求性能を見積もり</u>

Step1. 量子優位性のある問題サイズ → 誤り訂正符号の性能 Step3. 制御回路の演算量 → 要求される電力効率 Code cycle: 1 µ sec

	Size	Error rate	#qubit	time [h]	code distance
-	10	1e-4	1184	1.85	11
	15	1e-4	1490	11.2	13
	20	1e-4	1910	35.4	13
	10	1e-3	1184	3.88	23
	15	1e-3	1490	21.5	25
	20	1e-3	1910	73.5	27

Step2. 誤り訂正符号の性能 → 制御回路の演算量





▶ 集積回路分野において期待される電力効率をトップダウンに推定し、将来的なシステム設計の指針を示した
 ▶ ソフトウェアスタックとモックを集約することで、計算速度だけでなく電力効率の設計と推定も可能に







実行時のリソース状況に合わせたFTQCの論理命令の最適化

Lattice surgeryなど多くの補助量子ビットを 要求する命令は命令レベル並列化が困難 通常の計算機ではコンパイル時や実行時に命令を書き換え、 結果が変わらないように最適化を行っている



同様の機構をFTQCにも取り入れることで、より高いスループットでの計算を実現できないか? 23

最適化:動的な命令の分割とスケジュール



今回の実施内容 実行時のハードウェア状況に合わせ、動的に命令を分割する枠組みを構築 実際に高速かつ高効率に命令を分割しスケジュールするアルゴリズムを提案

Hamada, Suzuki, Tokunaga, arXiv:2401.15829

<u>ベル状態の生成やベル測定を用いて、目的の操作を実行しやすい小規模な命令に分割する方法を提案</u>



<u>上記手法を活用て高速にスケジューリングを行う方法を提案し、実アプリでの性能の改善を確認</u>

演算スループット [op/s]最適化に要する時間 [s]既存手法20.746.38提案手法60.5824.80

NISQとFTQCのギャップ



FTQC: Fault-Tolerant Quantum Computer NISQ: Noisy Intermediate-Scale Quantum (computer)



Akahoshi, Maruyama, Oshima, Sato, Fujii, PRX Quantum 5, 010337 (2024).

Suzuki, Endo, Fujii, Tokunaga, PRX Quantum 3, 010345 (2022).

NISQのQuantum Volume



量子ボリューム(QV):量子ビット数だけではなくゲートの精度まで取り込み、 どこまでの規模の計算ができるかという計算性能の尺度



任意の量子ビットペアに対して、 量子ビット数と同程度の深さの 演算を要求

正方格子上の *m* 量子ビット、エラー確率 *p* の QVの算出公式:

$$m^2(1.29\sqrt{m} - 0.78)p < 1$$

A. W. Cross, L. S. Bishop, S. Sheldon, P. D. Nation, and J. M. Gambetta, Phys. Rev. A **100**, 032328 (2019).

2量子ビットゲートがエラー確率10-4を持つと、

$$QV = 2^{37}$$

(HPCでシミュレーション可能なレベルの計算性能)

量子ビット数が増えても、エラー確率が下がり続けないとQV(計算性能)が向上しない

EarlyFTQCの新規アーキテクチャの提案



27



NISQ(10²Q)とFTQC(10⁶Q)を埋める新たなアーキテクチャ: earlyFTQC (10⁴Q)

EarlyFTQCの新規アーキテクチャの提案



Akahoshi, Maruyama, Oshima, Sato, Fujii, PRX Quantum 5, 010337 (2024).



最小のエラー検出符号を用いて原理的に 検出不可能なエラー以外を全て排除

ゲージ固定により、[[4,1,1,2]] 符号を表面符号へ変換

符号距離を大きくし、 状態生成時の不可避な エラー以外から守る

ゲートテレポーテーションによって連続回転ゲートを実行





連続回転ゲートに必要 な物理オーバーヘッド が大幅に削減

EarlyFTQCの新規アーキテクチャの提案





EarlyFTQCの新規アーキテクチャの提案



30



NISQ(10²Q)とFTQC(10⁶Q)を埋める新たなアーキテクチャ: earlyFTQC (10⁴Q)

空間・時間オーバーヘッドの削減





空間・時間オーバーヘッドの削減



・連接符号に再び焦点をあてる

・連接符号の階層を、同じ符号を繰り返すのではなく、 だんだん大きくなる量子ハミング符号を使って符号化 符号距離は3のまま 論理量子ビット数は大きく Yamasaki and Koashi, Nature Physics 20, 247 (2024).

各階層のデコードは簡単 任意のエラーで閾値の存在を証明可



32

空間・時間オーバーヘッドの削減



複数の論理量子ビット(量子レジスタ)を持つ符号の連接

論理エラー率が延々と下がり続けるか (物理エラー率の閾値があるか)



入れ子構造の工夫(バーストエラーに強い構造)

Yamasaki and Koashi, Nature Physics 20, 247 (2024).

ゲート操作に使う補助量子ビットも含めて 空間オーバーヘッドを0(1)にできるか?



・量子レジスタに対する諸操作を、限られた数の 補助量子ビットを用いてFault-tolerantに実行する ガジェットを構築

・連接符号により、古典計算時間も考慮して、任意のエラーに対し閾値が存在して、 空間オーバーヘッド O(1)時間オーバーヘッド $\exp(O(\operatorname{polylog}(\log M))) \ll \exp(O(\log M)) = \operatorname{poly}(M)$

連続量子測定における熱流



Yamamoto and Tokura, Phys. Rev. Research 6, 013300 (2024).

誤り耐性量子計算では、随時発生するエラーを 訂正するために量子測定を随時行う。

フィードバック的操作を伴わない純粋な測定行為も熱の発生や流れを引き起こすことがある。



測定行為と環境系との相互作用は、実際には 同時進行する。

熱の発生は量子コンピュータを 設計する上で重要な問題

Q. 任意の測定基底による連続量子測定で測定器と 量子ビットの間の熱は<u>どう</u>流れる?

方向は?大きさは?

A. 定常熱流に関する不等式



Δ: 量子ビットのエネルギー γ: 測定強度 Γ₊: 環境の放出率と吸収率の和(差)

① どんな基底で測定をしても, 測定器へ流れない.

② 測定による熱流には上限がある.

量子ダイナミクスのシミュレーションツール



Theoretical Quantum Physics Laboratory, RIKEN. Chief Scientist: Franco Nori

•QuTiP: Quantum Toolbox in Python

Web: <u>https://qutip.org/</u> GitHub: <u>https://github.com/qutip/qutip</u> RIKEN: <u>https://dml.riken.jp/</u>

What is QuTiP?

- Python library for modelling open quantum systems
- Extensive documentation (https://qutip.org/docs/latest/index.html)
- Extensive tutorials & lectures (from beginner to cutting-edge research; https://qutip.org/tutorials.html)
- Built using Cython, NumPy and SciPy
- **Truly open source** (active development team, open governance)

Important progress in 2023

• A new optimal control library

- Design quantum gates using limited control and in the presence of noise
- Improved support for modelling non-Markovian noise
 - Allows the study of quantum thermodynamics with realistic models
- JAX support: you can use your GPU and take advantage of automatic differentiation
 - □ Speed up simulations by a factor of 100x

Huge growth in user base

Downloaded more than 1.7 million times in total! An increase of 500,000 in 2023! More than 40,000 downloads per month.

Project Pls







(筑波大)



越野和樹 (医科歯科大)



小芦雅斗 (東大)



Franco Nori (理研)



根本香絵 (OIST)



東浩司 (NTT)



Rodney Van Meter (慶應大)



武岡正裕 (慶應大)



森前智行 (京大)



田島裕康 (電通大)



増田俊平 (産総研)



山崎雅人 (東大)

Thank you.