



WHITE PAPER

イオントラップ型量子コンピュータによる 量子フーリエ変換の実機検証

三井物産株式会社
総合力推進部 量子イノベーション室

三菱電機株式会社
情報技術総合研究所 量子プロジェクトグループ

イオントラップ型量子コンピュータによる 量子フーリエ変換の実機検証

エグゼクティブサマリ

Abstract — 要旨

量子コンピュータは、0と1の重ね合わせ状態をとり得る量子ビットを用い、量子力学の原理に基づいて演算を行う計算機であり、特定の問題においては、古典コンピュータよりも効率的に計算できる可能性がある。量子フーリエ変換（QFT^{注A1}）は、暗号解析・量子化学・金融シミュレーションなど、幅広い分野の量子アプリケーションの基盤となる重要な量子演算である。QFTは多数の2量子ビット操作を要するため、量子ゲートのエラー率や量子ビット間の接続性など、複数の要件において高い水準が求められる。三井物産株式会社および三菱電機株式会社は、Quantinuum社のイオントラップ型量子コンピュータ Helios® を用い、QFTの実機検証を実施した。本稿ではその結果を報告する。

量子コンピュータにおいて、量子ビットはそのままではノイズによる誤りが蓄積され、有意な結果が得られなくなる。複数の量子ビットを用いて、それよりも少ない量子ビットの情報を冗長に表現し、誤りを検出・訂正する技術が量子誤り訂正である。量子誤り訂正によって保護された量子ビットは論理量子ビットと呼ばれ、それを構成する実際の量子ビットは物理量子ビットと呼ばれる。

本検証では、過去最大級^{注A2}となる98物理量子ビットでの近似QFTを実機で実行し、期待される目標出力が観測される割合のスケール特性を評価した。さらに、量子誤り訂正技術を用いて最大12論理量子ビットでのQFTを評価し、誤り検出による事後選択と誤り訂正の各手法の効果を比較した。本検証の条件では、事後選択による手法が、誤り訂正の手法と同等以上の目標出力の観測割合を示すことを確認した。あわせて、複数の手法による論理Tゲート^{注A3}の実装を実機上で比較検証した。

98物理量子ビットでの近似QFTにおいて、理想回路が予測する目標出力に対する誤り率は0.857となり、物理量子ビット数や回路規模の増大に伴うエラー蓄積の影響が確認された。一方、論理量子ビットを用いた検証では、誤り検出・事後選択により目標出力の観測割合が改善する反面、計算結果が有効と判断される割合である受理率は低下するというトレードオフが示された。今後、誤り耐性量子計算を段階的に実現するためには、計算目的に応じて誤り率と受理率のバランスを最適化することが重要である。具体的には、アルゴリズム層での近似、誤り訂正・誤り検出層での符号選択、量子ビット間の結合性などを総合的に考慮した設計が求められる。

ABSTRACT 注釈

^{注A1} QFT／近似QFT：QFT（量子フーリエ変換）は、古典的な離散フーリエ変換の量子版で、Shor アルゴリズムをはじめ多くの量子アルゴリズムを構成する基盤的な演算。近似QFTは、QFT回路に含まれる小さな角度の制御付き位相回転を一部省略した、近似的な実装。^{注A2} 過去最大級:2026年3月時点の公開情報に基づく。「過去最大級」とは、物理量子ビット数の観点で過去最大級の規模の近似QFTを実機で実行し、理想回路が予測する目標出力を有意な観測割合で確認した検証例を指す。^{注A3} 論理 T ゲート：普遍的な量子計算を実現するために、基本となる操作（Cliffordゲート群）に加えて必要となる論理量子ビット上のゲート。誤り耐性量子計算においては実装コストが大きいという課題がある。

Background — 背景

近年、楕円曲線暗号をはじめとする暗号解析に必要な量子リソース見積もりの更新が進んでおり、量子コンピュータが現行の公開鍵暗号を解析可能になる日——「Q-Day」——をめぐる議論はより具体化している^[1]。

量子フーリエ変換 (QFT) は、さまざまな分野の量子アルゴリズムで使用される基盤的な演算である。現在の量子コンピュータでどこまでの規模で実装し、目標出力を観測できるかを把握することは、FTQC実現に向けた重要なステップとなる。

Progression — NISQからFTQCへ



図S1 NISQ、Partial-FTQC、FTQC

本検証は、誤り訂正を部分的に導入した Partial-FTQC における実機評価として位置づけられる。

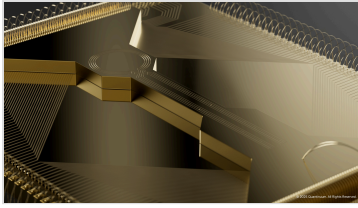
Highlights — 検証ハイライト

<p>HIGHLIGHT 01 — 物理量子ビット</p> <p>98物理量子ビットにおける近似QFTの目標出力の観測割合の評価</p> <p>多数の2量子ビット操作（小さな角度の制御付き位相回転や非隣接量子ビット間の操作を含む）が用いられる近似QFTを98物理量子ビットで実行し、目標出力の観測割合 (P_{target}) のスケーリング特性を評価した。</p>	<p>HIGHLIGHT 02 — 論理量子ビット</p> <p>論理量子ビット上のQFTにおける誤り検出・誤り訂正と論理 T ゲートの実機検証</p> <p>Steane 符号上で最大12論理量子ビットまでのQFTを実機実行し、誤り検出による事後選択と誤り訂正の効果を比較した。本検証の条件では、誤り検出による事後選択が、受理ショットにおいて誤り訂正と同等以上の論理量子ビット上における目標出力の観測割合 (P_{target}^L) を示した。さらに、2論理量子ビットのQFTにおいて論理 T ゲートのアナログ回転法と符号切替注入法の比較を実施した。</p>
<p>HIGHLIGHT 03 — FTQCに向けて</p> <p>「目標出力の観測割合」 vs. 「受理率」のトレードオフ</p> <p>より誤り耐性の高い実装が常に最適とは限らず、求められる P_{target}^L、計算資源、受理率のバランスを踏まえて、場面に応じた手法選択を行うことが重要であることが示唆された。</p>	

QEC (Quantum Error Correction) — 量子誤り訂正

量子誤り訂正に関する実装として、Quantinuum の既存の pytket® 実装に加え、将来的な量子誤り訂正基盤化を見据えて、三菱電機が Guppy® を用いて開発した実装を採用し、実機上での動作を検証した。なお、pytket® は量子回路の構築・最適化・コンパイル用のPythonライブラリであり、Guppy® は量子・古典ハイブリッド制御を記述する量子プログラミング言語である。

Hardware — イオントラップ型量子コンピュータ



図S2 Quantinuum® Helios®
Trapped-ion quantum computer

Helios® は Quantinuum社が 2025年11月に商用リリースしたイオントラップ型量子コンピュータ。バリウムイオンを量子ビットとして採用し、QCCD型アーキテクチャによる量子ビット間の全結合(all-to-all connectivity)を実現している。物理量子ビット数98、2量子ビットゲートエラー率は約0.08%（典型値）^[2]。

Architecture — 量子コンピュータのレイヤ構成と主な担当領域

本検証における主な担当領域： 三井物産 三菱電機

量子アプリケーション	量子アプリケーション/アルゴリズム 三菱電機 三井物産 検証対象となる量子計算手法 QFT / 近似QFT などのアルゴリズム設計、回路記述、評価指標設計。
量子アルゴリズム	量子誤り訂正 (Guppy® ベース) 三菱電機 FTQCを見据えた量子誤り訂正基盤 Guppy® 言語による誤り検出・誤り訂正回路の記述・検証。
量子誤り訂正	実機制御・物理ハードウェア 三井物産 Helios® 実機の実験環境 パルス制御、読み出し、キャリブレーション、実験シーケンス実装、測定データ取得。
量子制御装置	
量子プロセッサ	

図S3 量子コンピュータレイヤ構成・開発主体・担当領域

Qubits — 物理/論理量子ビット

物理量子ビット

イオン（原子）1個が1量子ビット。Helios® では $^{137}\text{Ba}^+$ イオンを使用。物理的なノイズの影響を直接受ける。

図S4
1イオン（原子）= 1量子ビット

論理量子ビット

Steane 符号では7個の物理量子ビット（①～⑦）で1論理量子ビットを表現。3色のブラケット（面）がそれぞれ誤り検出に対応し、2個のエラーを検出、1個のエラーを訂正できる。

図S5 Steane 符号
(7物理量子 = 1論理量子)

1. イントロダクション

1.1 はじめに

実用的な量子アルゴリズムを量子コンピュータの実機で動かすには、複雑な量子回路をどの程度の量子ビット数・回路深さまで安定に実行し、目標出力を観測できるかが重要である。さらに、論理量子ビットへの符号化を経た後に、目標出力の観測割合と受理率をどの程度達成できるかも問われる。これらの問いに答えるには、ゲートエラー率や量子ビット数といった個々の指標を出発点としつつ、それらを組み合わせた多面的な評価が求められている。

評価指標

本稿では、理想回路から期待される目標出力が実機測定で観測された割合を、目標出力の観測割合 P_{target} と表記する。論理量子ビット上の評価では、理想的な論理回路から期待される目標出力が復号・抽出後の測定結果として観測された割合を、論理量子ビット上の目標出力の観測割合 P_{target}^L と表記する。また、検出結果に基づく事後選択を行った場合に、全ショットのうち有効な結果として残る割合を「受理率」と呼ぶ。

1.2 量子フーリエ変換 (QFT)

量子フーリエ変換(QFT)は、位相や周期を量子状態から取り出す代表的な量子演算であり、それ自体は最終アプリケーションではないものの、量子位相推定(QPE)やShorのアルゴリズムをはじめ多くの応用アルゴリズムの基盤的演算として用いられる(図1参照)。

図1 QFT/近似QFTの位置づけ



したがって、QFTを実機上でどの程度の規模まで実行し、目標出力を観測できるかを調べることは、単なる原理実証にとどまらず、将来の量子アプリケーションを支えるアルゴリズム基盤の実用性を検証する意味を持つ。

1.3 QFTの特徴

QFTは多数の制御付き位相回転ゲートと2量子ビットゲート操作を含む。量子ビット数が増えるにつれて回路の複雑さが増し、小さな角度の制御付き位相回転ゲート、非隣接量子

ビット間の操作、コンパイル効率、ゲートエラー率、エラーの蓄積の影響が実行結果に表れやすくなる。

1.4 標準QFTと近似QFT

標準QFTは量子状態を保持したままフーリエ変換を実行する厳密な実装であり、後続の量子演算へ状態を渡す内部サブルーチンとして利用できる。一方で、量子ビット数の増加に伴って回路の複雑さが増し、実機上ではエラーの蓄積の影響を受けやすくなる。

近似QFTは、小さな角度の制御付き位相回転ゲートを省略することで、回路の複雑さを抑制する手法である。近似による理論誤差は生じるものの、エラーの蓄積が支配的な実機環境では、ゲート数削減の効果が上回り、標準QFTよりも高い P_{target} を示す場合がある^[3]。

1.5 実機検証

本稿では、Quantinuum社のイオントラップ型量子コンピュータ Helios® を用いて、標準QFTおよび近似QFTを物理量子ビットと論理量子ビットそれぞれで実機検証を実施した。

2. 物理量子ビット上における量子フーリエ変換の実機検証

2.1

物理量子ビットn=3,4,8における標準QFT

物理量子ビットにおけるQFT評価の出発点として、Quantinuum社のイオントラップ型量子コンピュータ Helios®を用い、まず少ない量子ビット数 ($n=3,4,8$) の回路で得られる目標出力の観測割合 P_{target} を確認する。ここで P_{target} は、理想回路から期待される目標出力が実機測定で観測された割合を表す。3種類の目標とする出力状態 (図2参照) に対する P_{target} は、 $n=3$ で0.996~1.000、 $n=4$ で0.994~0.996、 $n=8$ で0.976~0.986であり、量子ビット数が少ない領域では高い P_{target} が得られた。

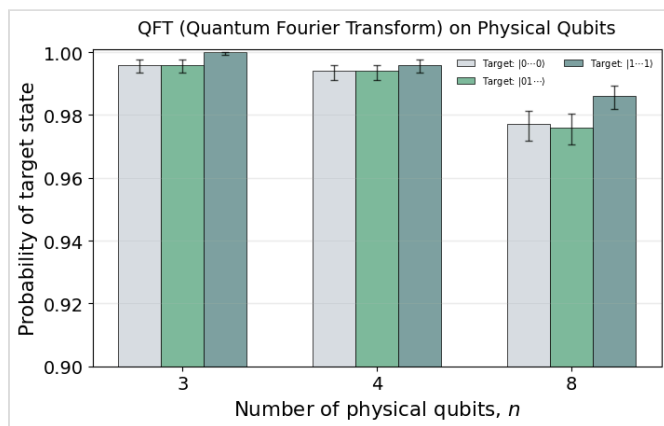


図2 標準QFTにおける状態別の P_{target} ($n=3,4,8$ 物理量子ビット、ショット数:1000)

2.2

近似QFT:小さな角度の位相回転ゲートの省略

量子ビット数の増加に伴って回路の複雑さが増すと、実機上でエラーの蓄積が生じ、 P_{target} が低下しやすくなる。このため、本検証では、小さな角度の制御付き位相回転ゲートを省略して回路の複雑さを抑える近似QFTを使用した (図3参照)。

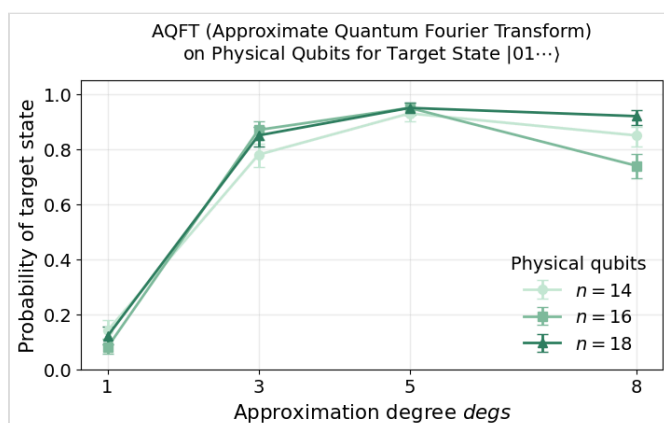


図3 近似QFTにおける近似度(degs)と P_{target} の関係($n=14,16,18$ 物理量子ビット、ショット数:100)

小さな角度の制御付き位相回転ゲートをどこまで省略するかを表す近似度合いのパラメータ (degs) を段階的に変えて比較した結果、本検証では、このパラメータを5に設定した場合に、近似による理論誤差と実機上のエラーによる P_{target} 低下のバランスに優れることが確認された。

2.3

近似QFTのスケール評価(最大98物理量子ビット)

近似度合いを示すパラメータ(degs)を5に設定したうえで物理量子ビット数を最大98まで拡大し、近似QFTのスケール特性を評価した。本評価では、Helios上で提供されるイオン原子の遷移エラー測定機能を活用したLD (Leakage Detection) 機能を適用し、事後選択(Post-selection)後の受理ショットにおける P_{target} を測定した。 P_{target} は18、28、56、78、98物理量子ビットでそれぞれ0.976、0.904、0.548、0.400、0.143であり、56物理量子ビット以降ではエラーの蓄積に伴う低下が顕著に現れた(図4参照)。

LD機能による事後選択はベースラインに対して受理ショットにおける P_{target} を改善する一方、量子ビット数の増加につれて受理率の低下が顕著となる。物理量子ビットのみで量子ビット数を増やしていく場合、 P_{target} の低下と受理率低下が同時に進行することが確認された。特に78物理量子ビット以降ではLD機能による改善幅自体も縮小しており、物理量子ビットのみのアプローチにはスケールビリティ上の課題があることが示唆される。

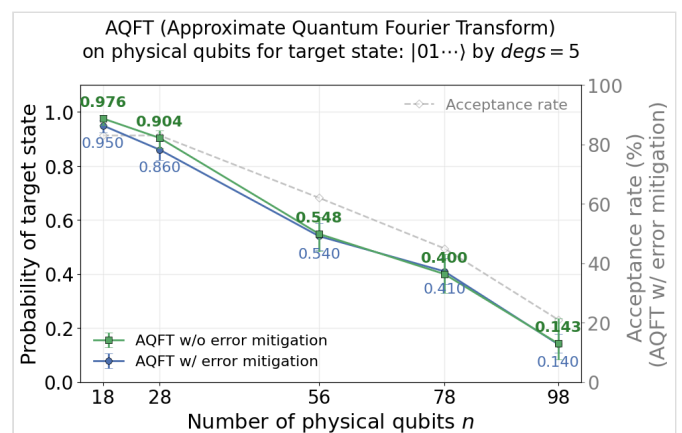


図4 近似QFTのスケール評価における P_{target} と受理率(最大98物理量子ビット、LD機能を含む、ショット数:100)

3. 論理量子ビット上における量子フーリエ変換

量子コンピュータにおいて物理エラーの影響を抑えるには、論理量子ビットへの符号化が有力な手段の一つである。一方で、QFTが必要となる非クリフォード論理操作を誤り耐性のもとで実装するには、追加の符号化、検証、測定、古典フィードフォワードを伴うオーバーヘッドが生じる。本節では、論理量子ビット上のQFTを対象に、(i) 論理量子ビットへの符号化により論理量子ビット上の目標出力の観測割合 P_{target}^L と受率率がどの水準に達するか、(ii) 非クリフォード論理操作の実装方式の選択が P_{target}^L と受率率にどのように影響するか、を実機評価する。

3.1

Steane符号による論理量子ビットの構成

Steane符号は、1論理量子ビットを7物理量子ビットに符号化する距離3の量子誤り訂正符号であり、単一物理量子ビット誤りの検出・訂正が可能である。また、クリフォード操作を、各物理量子ビットに同じ形の操作を並列に適用する横断的操作（transversal operation）として実装できるため、論理回路評価に適した符号の一つである。

3.2

非クリフォード論理操作の実装方式

非クリフォード論理操作の実装方式は、追加する保護機構と回路オーバーヘッドの大きさに応じて、アナログ回転法（Direct Analog Rotation (Non-FT)）と符号切替注入法（Code-Switching + Injection (FT)）を比較する（図5参照）。前者は量子論理ビットに直接適用できる実装であり^[4]、後者は量子Reed-Muller (qRM) 符号リソース、Steane補助ブロック（ancilla）、Steaneデータブロック、測定、条件付き Z/Sゲート補正を含む、より保護機構の多い実装である^{[5], [6]}。

表1 非クリフォード論理操作の実装方式比較

手法	構成・オーバーヘッド
(1) アナログ回転法	Steaneデータ (data) ×1。物理量子ビット数は8。中間測定やフィードフォワード補正を伴わない構成。
(2) 符号切替注入法	qRMリソース ×1、Steane補助 (ancilla) ×1、Steaneデータ (data) ×1。物理量子ビット数は30。qRM上の横断的 T ゲート (transversal T)、符号切替 (Code-Switching)、条件付き Z/Sゲート補正を含む。

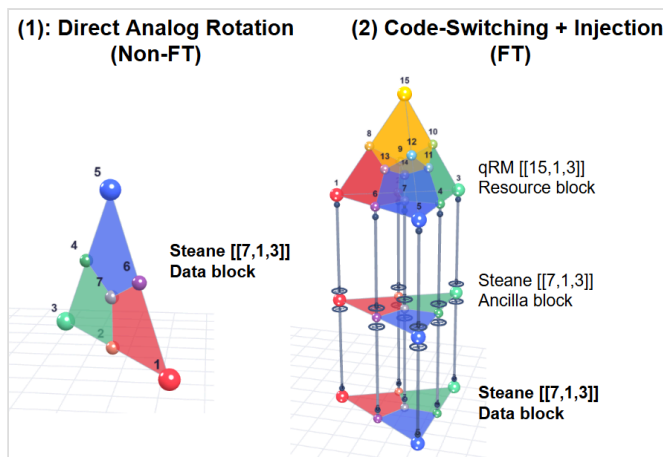


図5 非クリフォード論理操作の実装法の模式図。左はアナログ回転法、右は符号切替注入法を示す。右図では qRMリソースブロック、Steane補助ブロック、Steaneデータブロックを用いる。

符号切替注入法は、この比較内ではアナログ回転法よりも多くの保護機構と補助ブロックを含む。

3.3

論理量子ビット上のQFT

論理量子ビット上のQFTは、イオントラップ型量子計算機上での実機検証対象として報告されている^[7]。アナログ回転法に基づくQFTの結果を、 P_{target}^L と受率率の観点から評価する。

本節では、論理量子ビット上の目標出力の観測割合 P_{target}^L を評価指標として用いる。これは状態間の重なりとして定義される量そのものではなく、理想的な論理回路から期待される目標出力が、復号・抽出後の測定結果として観測された割合を表す。また、受率率は、誤り検出による事後選択などの条件を通過し、最終的な解析に残ったショットの割合を指す。

本検証では、測定結果に対して三つの抽出法を使用する。(i) 直接読み出し法（誤り検出・誤り訂正なし）は、物理ビット列から論理値を誤り検出・誤り訂正なしで評価する方式である。(ii) 誤り検出による事後選択法は、誤りの可能性があるショットを除外する方式であり、(iii) 誤り訂正法は、検出された誤り情報に基づいて物理ビット誤りを訂正する方式である。

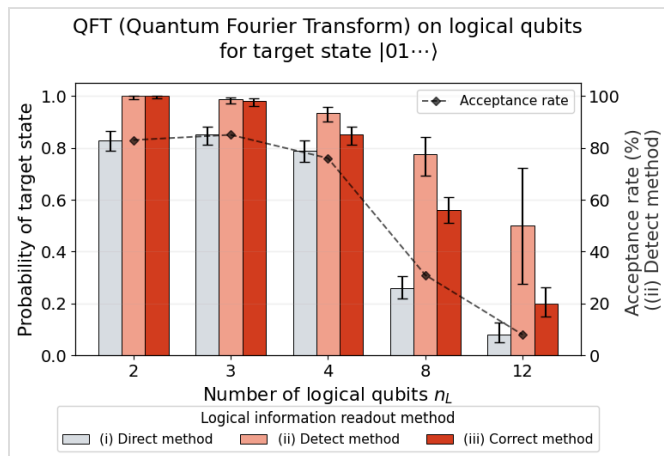


図6 アナログ回転法に基づく論理QFTの P_{target}^L と受率率(Steane符号、ショット数:100。ただし $n_L = 12$ は50)

論理量子ビット上のQFTでは、誤り検出による事後選択により P_{target}^L が改善した。特に誤り検出による事後選択法では、 $n_L = 2, 3, 4$ に対して 1.000、0.988、0.934 の P_{target}^L が得られ、直接読み出し法を上回った。また誤り訂正法も、ショットを破棄せずに一定の改善を示した。

一方で、論理量子ビット数が増えると、事後選択に伴う受率率の低下が顕著になる。 $n_L = 8$ では(ii) 誤り検出による事後選択法後の P_{target}^L は 0.774 まで改善したが、受率率は31%に低下した。さらに $n_L = 12$ では受率率が8%となり、 P_{target}^L の推定には受率率ショット数の制約を考慮する必要がある。

Steane符号は1物理誤りまで訂正可能であり、2物理誤りまで検出可能である。このため、単一誤りが支配的であれば誤り訂正は有効だが、2個以上の誤りや相関誤りが含まれる場合、デコーダはそれらを単一誤りとして誤った訂正を行う可能性がある。誤り検出による事後選択法はこうした誤りが示唆されるショットを破棄するため、受率率を犠牲にする一方で、 P_{target}^L は誤り訂正法より良くなり得る。

3.4

2論理量子ビットのQFTにおけるアナログ回転法と符号切替注入法の比較

2論理量子ビットの実装方式比較では、論理量子ビット上における非クリフォード操作について、アナログ回転法と符号切替注入法を比較する。比較対象は、期待出力 $|01\rangle$ が受率率ショットにおいて観測された割合、すなわち受率率ショットにおける P_{target}^L である。

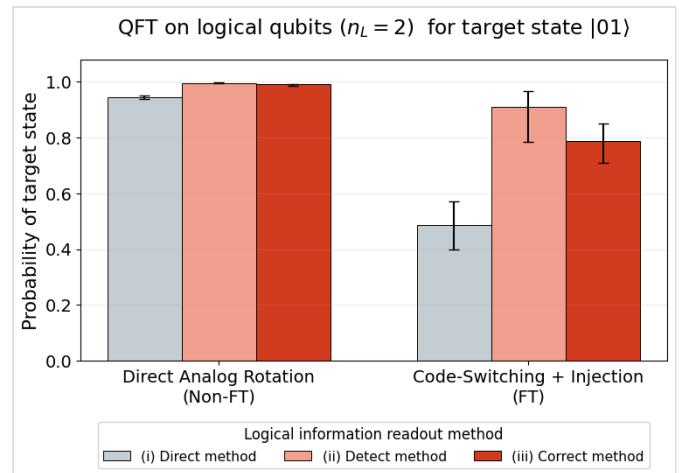


図7 2論理量子ビットの論理QFTにおけるアナログ回転法と符号切替注入法の P_{target}^L と受率率(ショット数 アナログ回転法:1000、符号切替注入法:100)

アナログ回転法では、各抽出法における P_{target}^L として、(i) 直接読み出し法で0.945、(ii) 誤り検出による事後選択法で0.996、(iii) 誤り訂正法で0.990が得られており、2論理量子ビットのQFTにおいてアナログ回転法が安定に動作することを確認した(図7参照)。一方、符号切替注入法では、(i) 0.485、(ii) 0.909、(iii) 0.788となり、いずれの抽出法でもアナログ回転法を下回った。本検証の条件下では、符号切替注入法に組み込まれた追加の保護機構(qRMリソース、補助ブロック、条件付き補正など)が、 P_{target}^L の優位性をもたらすには至っていないことが示唆される。ただし、近年は符号切替法を用いたFT論理ゲートの低オーバーヘッド化に関する理論研究も進展しており、FTQC実現に向けては、FT性を備えた符号切替注入法など実装方式の発展も重要である^[8]。

4. 結論・今後の展望

三井物産および三菱電機は、様々な分野の量子アプリケーションの基盤となる量子アルゴリズムであるQFTを、Quantinuum社のイオントラップ型量子コンピュータHelios®で検証した。

物理量子ビットでは、近似QFTにより最大98物理量子ビットでの実行を達成した。量子ビット数が少ない領域 ($n=3, 4, 8$) では高い P_{target} が維持される一方、56量子ビット以降で低下し、98量子ビットでは0.143となった。これらの結果は、本検証の条件下では、物理量子ビットによるQFTアルゴリズムの規模拡大に累積エラーによる限界があることを示唆しており、規模の拡大とともに誤り訂正の必要性が顕在化すると考えられる。

論理量子ビットでは、Steane符号上で最大12論理量子ビットのQFTを実行した。本検証の条件下では、誤り検出による事後選択が誤り訂正と同等以上の P_{target} をもたらしうることが示唆された。ただし、本検証で確認した範囲では、受理率は論理量子ビット数の増加に伴って83%から8%へと低下しており、 P_{target} と受理率の間にトレードオフが存在することがうかがえる。

また、2論理量子ビットのQFTにおける非クリフォード論理操作の比較では、アナログ回転法と符号切替注入法のいずれも実機で動作したが、本検証の規模ではアナログ回転法 (Non-FT) の方がより高い P_{target} を示した。ただし、FTQC実現に向けては、FT性を備えた符号切替注入法など、実装方式の発展も重要である。

これらの知見は、FTQCへの移行には、アルゴリズム層 (近似度合いの設計など)、誤り訂正層 (量子誤り訂正符号など)、ハードウェア層 (量子ビット間の全結合の活用など) をまたがる設計が求められることを示している。

今後の展望と課題

暗号解析・量子化学・金融シミュレーションといった量子アプリケーションへの展開にあたっては、本検証で得られた知見をもとに、実機実装に要するリソース (回路の複雑さ、オーバーヘッド、ショット数等) を見積もり、実装方針を具体化していくことが求められる。また評価軸についても、 P_{target} 、 P_{target} や受理率といった品質面の指標に加え、こう

したリソース面の指標を併せて取り込めるよう、評価方法を整理・拡張していくことが望まれる。

量子関連の取り組み

[三菱電機株式会社]

量子コンピューティング、量子通信・セキュリティ、量子センシング、量子デバイスの各領域で研究開発を推進している。特に、複数量子デバイスを接続する制御技術、耐量子計算機暗号 (PQC)、量子AI応用など、実用化を見据えた取り組みを進めている。

[三井物産株式会社]

Quantinuumへの出資・販売提携を通じて、日本・アジア大洋州を中心に量子技術の事業展開を進めている。あわせて、量子サイバーセキュリティ、創薬・材料開発向けの量子活用など、具体的なユースケースの開発・検証にも取り組んでいる。

用語

QFT / 標準QFT / 近似QFT

QFTはQuantum Fourier Transform（量子フーリエ変換）の略。標準QFTは、理論的なQFT回路を構成する制御付き位相回転を省略せずに実装する場合を指す。近似QFTは、小さな角度の制御付き位相回転ゲートを一部省略し、回路の複雑さを抑制する実装である。

物理量子ビット上のQFT / 論理量子ビット上のQFT

本稿では、物理量子ビット上で実行するQFTまたは近似QFTと、量子誤り訂正符号により符号化された論理量子ビット上で実行するQFTを区別して扱う。評価指標として、前者では主に目標出力の観測割合 P_{target} 、後者では論理量子ビット上の目標出力の観測割合 $P^{\wedge}L_{\text{target}}$ と受率率を用いる。

Partial-FTQC / FTQC

Partial-FTQCは、限定的な誤り検出・誤り訂正や論理符号化を活用しながら、完全なフォールトトレラント量子計算へ移行する中間段階を指す。FTQCはFault-Tolerant Quantum Computingの略。

QCCD

Quantum Charge-Coupled Deviceの略。イオンを移動・再配置しながら演算領域に供給するイオントラップ型量子コンピュータのアーキテクチャである。

量子ビット間の全結合 (all-to-all connectivity)

任意の量子ビット対に対して2量子ビットゲートを実行できる接続性を指す。

受率率 / 受率ショット数

誤り検出による事後選択などの条件を通過し、最終的な解析対象として残るショットの割合を受率率と呼ぶ。受率ショット数は、解析に残ったショット数を総ショット数と併記した値である。

LD (Leakage Detection)

計算基底空間の外へ漏れ出した量子状態を検出し、検出結果に基づいて該当ショットを除外するための手法。本稿では、Helios上で提供されるイオン原子の遷移エラー測定機能を活用した、物理量子ビット上のQFT / 近似QFTの評価における事後選択手段として扱う。

Steane 符号

7個の物理量子ビットで1個の論理量子ビットを符号化する距離3の量子誤り訂正符号。本稿では論理量子ビット上のQFTの評価に用いる。

横断的操作 (transversal operation)

論理量子ビットを構成する複数の物理量子ビットに対して、同じ形の物理ゲートを並列に適用することで論理ゲートを実装する方式。誤りが符号ブロック内で広がりにくいという利点がある。

量子Reed-Muller (qRM) 符号

量子Reed-Muller系の符号。非クリフォード論理操作や状態注入の文脈で、符号切替注入法と関連して扱う。

非クリフォード操作

クリフォード操作だけでは普遍量子計算は構成できないため、Tゲートなどの非クリフォード操作が必要となる。

アナログ回転法 (Direct Analog Rotation (Non-FT))

誤り訂正されたクリフォード操作と、アナログ回転を組み合わせる部分的FTQC向けの非クリフォード操作実装。本稿では、符号切替注入法と比較する低オーバーヘッド側の実装方式として扱う。

符号切替法 (Code-Switching)

異なる量子誤り訂正符号の間で論理状態を変換し、各符号が得意とする論理操作を利用する手法。本稿では、符号切替注入法を構成する要素として扱い、Steane符号では横断的Tゲートを直接使えない一方、qRM符号では利用できるという性質を活かして、Tゲートなどの非クリフォード操作を実現する。

条件付き Z/Sゲート補正

測定結果や符号切替の結果に応じて、ZゲートまたはSゲートに相当する補正操作を適用することを指す。符号切替注入法では、リソース状態の注入後に論理状態を所望のフレームへ合わせるためのフィードフォワード操作として扱う。

参考文献

- [1] Babbush et al., “Securing Elliptic Curve Cryptocurrencies against Quantum Vulnerabilities: Resource Estimates and Mitigations,” arXiv:2603.28846v2, 2026. <https://arxiv.org/abs/2603.28846>
- [2] Quantinuum, “Quantinuum Helios Product Data Sheet,” Version 1.01, January 21, 2026. https://docs.quantinuum.com/systems/data_sheets/Quantinuum%20Helios%20Product%20Data%20Sheet.pdf
- [3] D. Coppersmith, “An Approximate Fourier Transform Useful in Quantum Factoring,” IBM Research Report RC 19642, 1994; arXiv:quant-ph/0201067.
- [4] Akahoshi et al., “Partially Fault-Tolerant Quantum Computing Architecture with Error-Corrected Clifford Gates and Space-Time Efficient Analog Rotations,” *PRX Quantum* **5**, 010337, 2024. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.5.010337>
- [5] Daguerre et al., “Experimental demonstration of high-fidelity logical magic states from code switching,” *Physical Review X* **15**, 041008, 2025. <https://doi.org/10.1103/dck4-x9c2>
- [6] Anderson et al., “Fault-tolerant conversion between the Steane and Reed-Muller quantum codes,” *Physical Review Letters* **113**, 080501, 2014. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.113.080501>
- [7] Mayer et al., “Benchmarking logical three-qubit quantum Fourier transform encoded in the Steane code on a trapped-ion quantum computer,” arXiv:2404.08616, 2024. <https://arxiv.org/abs/2404.08616>
- [8] L. Golowich, K. Chang, and G. Zhu, “Constant-Overhead Addressable Gates via Single-Shot Code Switching,” arXiv:2510.06760, 2025. <https://arxiv.org/abs/2510.06760>

著作権・転載等に関する表示

本資料の著作権は、特段の記載がない限り、本資料の発行者または正当な権利者に帰属します。本資料の無断転載、複製、改変、配布、公衆送信を禁じます。ただし、出典を明記した報道、紹介、論評、研究・教育目的など、著作権法上認められる正当な引用についてはこの限りではありません。

本資料に記載された会社名、製品名、サービス名、ロゴ、商標等は、各社または各権利者の商標または登録商標です（本文中では™、®マークを省略している場合があります）。本資料における第三者の名称、商標または資料への言及は、説明目的のためのものであり、当該第三者による本資料または発行者の承認、提携、推奨を意味するものではありません。

免責事項

本資料は、量子コンピューティング技術および本検証結果に関する情報提供を目的として作成されたものであり、特定の性能、商業目的への適合性、特定目的への適合性、将来の成果または結果を保証するものではありません。本資料に含まれる情報は作成時点のものであり、予告なく変更される場合があります。

発行者に故意または重過失がある場合を除き、本資料の利用、参照、または本資料に基づく判断により生じた損害について、発行者は一切の責任を負いません。