

研究終了報告書

「量子演算の高精度化基盤技術開発」

研究期間：2019年10月～2023年3月

研究者：杉山 太香典

1. 研究のねらい

社会実装可能な量子コンピューティングを実現するためには、大規模化(=量子ビット数の増大)と高精度化(=基本量子演算の高精度化)の両立が必要不可欠である。実験技術の進展によって、90年代から現在までに大幅な高精度化が実現された。しかしながら、産業的に価値ある計算問題を十分な精度で解くためには、さらに2桁程度の高精度化が必要と見積もられている。精度を改善するには量子演算中に生じているエラーを低減する必要がある、それにはエラーの詳細な情報を正確に評価することが求められる。これまで様々な評価手法が提案され実機開発においても利用されているが、既存の評価手法はどれも実用上重大な欠点を抱えており、それらの性能は2桁の精度改善には十分ではない。そこで本研究のねらいは、2桁の精度改善に十分な性能を持つ「演算の精度評価手法」、及びその評価手法を利用した「制御系の較正手法」と「ノイズ源の特定手法」という3種類の基盤技術を開発し、量子演算の高精度化に貢献することである。

開発手法の性能、特に効率性は適用される系のサイズに大きく依存するため、系を①1、2個の量子ビット系、②1、2個の3準位系(漏れエラーを想定)、③2～5個の量子ビット系(混線エラーを想定)の3つの領域に分け、それぞれの領域で基盤技術を開発する。ただし、開発手法は系のサイズに応じて切り替えることはあっても、サイズ毎に特定の物理系には依存しない汎用性の高い手法開発を目的としている。

2. 研究成果

(1) 概要

量子演算の高精度化の試みは多くの場合、実装精度の評価とその結果を利用する較正を繰り返すことで実現される。較正の元になる情報が評価によって取得されることから、まず評価手法の性能が重要となる。評価手法は評価のための実験方法と得られた実験データに対するデータ処理方法の2つから構成される。既存の評価手法は、量子演算に含まれるエラーの詳細な情報を取得できる量子トモグラフィ型と、エラーの一部の情報の取得に特化した **Randomized Benchmarking (RB)** 型の2種類に大別される。報告者は、高精度化のためにはエラーの詳細な情報が必要であると考え、量子トモグラフィ型の評価手法開発を選択した。高精度化を目的とした量子トモグラフィ型の評価手法として、**Gate-Set Tomography (GST)**、**Idle Tomography (IT)**、**Hamiltonian Error-Amplifying Tomography (HEAT)**などのエラー増幅機構を伴う評価手法が近年提案され実機開発の現場でも利用されているが、エラー増幅機構の複雑さ(演算の非可換性、増幅列の非線形性、Hamiltonian エラーと散逸エラーの共存、などに起因する)に十分に対処できていないために、効率性の低さ、データ処理の不安定さ、信頼性の低さなどの欠点を抱えており、2桁の精度改善には性能が不十分となっている。そこで本研究では、エラ

一増幅機構を伴う新しい量子トモグラフィ手法の開発、及び開発した評価手法を利用した制御系の較正手法とノイズ源の特定手法開発に取り組んだ。研究のアプローチとしては、手法開発の基礎部分を担う理論研究、開発手法の性能を幅広い設定の下で調べるための数値計算、実機での有用性を確認するための実験研究、開発手法を非専門家でも容易に利用できるようにするためのソフトウェア開発、の4つのアプローチをとった。

(2) 詳細

(i) 評価手法: 退化データに対応した推定量の導出と実装

退化データと呼ばれる高精度化において発生頻度が高まる特異なデータに対し、既存手法である量子トモグラフィ標準手法のデータ処理の安定性の向上と計算コスト削減を実現する新しい推定量を導出し、既存手法よりも推定精度が向上することを①②③のサイズ領域において数値実験により示した(②③に関しては計算時間の都合により一部の設定でのみ実行した)。また、超伝導量子回路系で1量子ビット系と2量子ビット系の実験を行い、開発手法を利用した実装精度の評価を行った。

(ii) 評価手法: ソフトウェアの開発と公開

ソフトウェアエンジニア2名を研究補助員として雇用し、量子トモグラフィの標準手法を利用するためのソフトウェア開発を行い、2021年5月に Quara という名称で GitHub 上にオープンソースソフトウェアとして公開した。Quara には量子トモグラフィの標準手法のデータ処理の実行機能の他、量子演算の各種表現の格納と変換、QuTiP, Qiskit, Forest Benchmarking などの量子計算分野で使用頻度の高いライブラリとデータをやり取りするためのインターフェース、開発した評価手法の性能を確認するための数値実験環境の実装を支援する機能なども含まれている。

(iii) 評価手法: 自己整合量子トモグラフィのデータ処理手法の改良

自己整合量子トモグラフィと呼ばれる量子トモグラフィの発展的な手法に関して、新しいデータ処理アルゴリズムを開発し、そのアルゴリズムの収束性を理論的に証明した。また、そのアルゴリズムを数値的に実装し、①②のサイズ領域において理論的に期待される性能を示すことを数値実験により確認した(②に関しては計算時間の都合により一部の設定でのみ実行した)。この成果によって、自己整合量子トモグラフィの既存手法の欠点であるデータ処理の不安定性の低減に成功した。本成果は大阪大学の田中冬彦教授との共同研究で得られた。

(iv) 評価手法: エラー増幅機構を解析する数理手法の開発

エラー増幅を利用する量子トモグラフィの発展的な手法では、エラー増幅によって各エラーのどの成分がどのように増幅されるのか(またはされないのか)が、特殊な設定を除いては明らかになっておらず、実験コストの削減やデータ処理の効率化・数値安定性の向上に対する障害となっていた。報告者は、行列の摂動論、行列関数論、Lie 群・Lie 代数の手法を一部利用し、エラー増幅機構を解析する近似公式の導出に成功した。①②の設定において、導出した近似公式の性能を既知の数理手法である Baker-Campbell-Hausdorff 公式・Zassenhaus 公式と数値的に比較し、量子情報処理に典型的な設定とパラメタ領域において、導出した公式は既

知の結果よりも大きく(1~4桁程度)近似精度を改善することを示した。ただし、導出した近似公式の一部は π パルスと呼ばれる量子ゲートの重要なクラスには適用できないという制限があり、この制限を取り払うような改良が必要となっている。

(v) 評価手法: エラー増幅機構を伴う量子トモグラフィ手法の開発

エラー増幅機構を伴う量子トモグラフィに関して、上記(iv)で導出した近似公式を利用するデータ処理方法を提案し、そのデータ処理の数値的な安定性の高さを理論的に証明した。また、そのデータ処理方法を数値実装し、1量子ビット系において、2桁の精度改善に必要な性能を持ちうることを数値的に示した。

(vi) 較正手法: 開発した評価手法を利用した較正手法開発

エラー増幅を利用する量子トモグラフィの既存手法において、評価の結果を利用した較正手法が提案されている。それら既存の評価手法や機械学習分野で近年盛んに利用されているブラックボックス最適化アルゴリズムを検討し、それらの較正手法を(v)で説明した本研究の開発手法と組み合わせることが①②の領域では可能であることを確認している。現在は、この組み合わせた手法の性能の数値評価、超伝導量子回路系における実験への適用、その改良手法の開発、に取り組んでいる。

(vii) ノイズ源の特定手法:

散逸項からハミルトンダイナミクスの影響を取り除き純粋な散逸(デコヒーレンス)の影響を詳細に見積もるデータ処理方法を開発した。また、この手法の数値実装を行い、①②のサイズ領域では理論的に期待される動作をすることを確認している。これによって、個々の量子ゲートに対し純粋な散逸の影響を調べることが可能になり、エネルギー緩和、位相緩和、混線エラーに起因する散逸などを区別することができるようになった。この機能の一部は(ii)で説明したQuaraに実装済である。

・研究目的の達成状況

3つの手法開発(評価手法、較正手法、特定手法)の、3つの系のサイズ領域(①②③)における開発状況を表1に示す。これら9(=3×3)の手法開発項目とソフトウェア開発の計10項目の比率をそれぞれ10%とみなした場合、4つの手法開発項目とソフトウェア開発は概ね達成されたと考えられるため、達成状況は50%と考える。

未達成となっている③に関しては、2量子ビットより大きい系を対象とした評価手法のアイデアはあるものの、その妥当性の証明・解析と数値実装が途中段階に留まっている。

表1. 手法開発の達成状況

	サイズ①	サイズ②	サイズ③
評価手法開発	達成	達成	未達成 (2量子ビット系のみ達成)

較正手法開発	未達成 (検討は済んでいる が未実装)	未達成 (検討は済んでいる が未実装)	未達成 (2量子ビット系のみ 達成)
特定手法開発	達成	達成	未達成 (2量子ビット系のみ 達成)

3. 今後の展開

本研究は、前節(2)で説明したようにサイズ①②に関しては較正手法開発が途中のため、開発手法が実際に量子コンピュータの実機開発において、2桁の量子演算の実装精度の改善に十分な性能を持つのか、結論を出せていない。そのため、今後の展開としては、較正手法の実装と実機開発への適用をなるべく早い段階で行い、その有用性を実証する必要がある。

仮に上記の有用性の実証に成功した場合、他の実機開発チームにも本開発手法を使ってもらうための理解促進活動が必要となる。具体的には、実験での使用例を含む論文投稿、学会や研究会での発表の他、実機開発チームでの直接またはオンラインでのセミナー発表などが考えられる。既存の評価較正手法が手法開発チーム以外で使われるようになる時期が手法提案から概ね2~3年程度であるため、量子コンピュータ開発コミュニティにおいて本開発手法の有用性が広く認知され標準的に使用されるようになるには少なくとも2~3年程度はかかるものと予想される。

開発コミュニティにおいて本開発手法の有用性が広く認知され標準的に使用されるようになった場合、事実上の標準手法として量子演算精度の標準化手法に選択される可能性がある。また、実機開発に限らず、量子コンピュータ実機提供サービスにおいても評価較正手法はメンテナンス時に使用されることから、本開発手法は量子コンピュータ使用環境の性能保持にも貢献できる。これは量子コンピュータに限らず、量子回路モデルに立脚する量子情報処理の実装やサービスについても共通する展望である。

本開発手法は少数多体量子系のダイナミクスの詳細を物理系に依らず精度よくかつ効率的に調べることを可能にするものであるため、量子情報処理技術の社会実装の他、少数多体量子系の学術的な研究にも利用されることが予想される。また、学術分野でも特に数理方面への展開としては、2.(2)(iv)で説明した π パルスを抑える形での拡張が大きな課題として残っている。報告者の理論及び数値解析の結果、 π パルスは量子ゲート演算の空間における特異点となっていることが分かっており、エラーを含む π パルスを抑えるように理論を拡張するためには、そのような特異点近傍の構造を解明し、その上で適切なデータ処理方法を考案する必要があり、特異点の解析に詳しい数学者または数理物理学者との協働が望まれる。

4. 自己評価

本研究の達成状況は、2節末で説明したように50%である。これは主に、エラー増幅機構の数理解の解明に予想よりも時間がかかり評価手法の開発が予定よりも遅れてしまったことに起因している。最終的には、 π パルスなどの特異点となっている量子ゲートを除き、量子状態・測定・量子ゲートの実装精度を高精度で評価する手法の基本となる部分については明らかにすることができたが、本報告書執筆時点では、それらの成果は論文としては未発表となっている。今後は、

まずは得られている成果の論文投稿を完了させ、次いで懸案事項となっている較正手法の有用性の検証を進める予定である。

5. 主な研究成果リスト

(1) 代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数:0件

(2) 特許出願

研究期間全出願件数:2件(特許公開前のものも含む)

(3) その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

学会発表

- T. Sugiyama, “Long-Sequence Quantum Process Tomography”, APS March Meeting 2020, Colorado, USA, March 2020. (現地での学会開催はコロナウイルス感染拡大を受けて中止)
<https://meetings.aps.org/Meeting/MAR20/Session/M16.8>
- 杉山太香典, 「エラー増幅を伴う量子プロセストモグラフィ」、日本物理学会第75回年次大会、名古屋、2020年3月。(現地での学会開催はコロナウイルス感染拡大を受けて中止)
- 杉山太香典, 「退化データに対応した量子トモグラフィのデータ処理」、日本物理学会 2021年秋季大会、オンライン、2021年9月。
- Takanori Sugiyama, “Tomographic characterization of quantum gates with error amplification”, APS March Meeting 2023, Las Vegas, USA, March 2023.
- 杉山太香典, 「エラー増幅を利用した量子ゲートのトモグラフィ評価」、日本物理学会 2023年春季大会、オンライン、2023年3月。

ソフトウェア

- T. Sugiyama, Quara: An Open-source Software for Quantum Characterization [Computer software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4771447> (2021).