

2024年1月16日

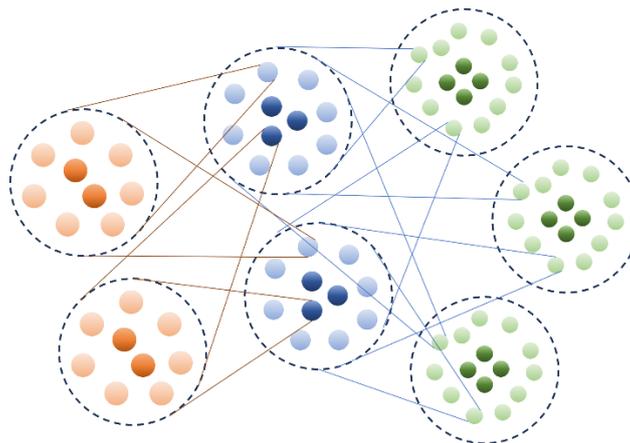
東京大学

科学技術振興機構（JST）

入れ子構造による量子コンピュータの新しい仕組みを提案 ——高効率性と高速性を両立する誤り耐性手法——

発表のポイント

- ◆大規模な量子コンピュータでは、エラーを訂正しながら計算を進める誤り耐性の手法が不可欠ですが、そのためには多数の量子ビットを追加して複雑な計算手順を踏む必要があり、量子ビット数の高効率性と計算速度の高速性の両立が課題でした。
- ◆本研究では、特殊な入れ子の構造を用いてエラー訂正する誤り耐性の新しい手法を提案しました。
- ◆この提案は、高効率性と高速性を初めて同時に達成するもので、全世界的に進んでいる量子コンピュータ開発における基盤技術として今後の幅広い活用が期待されます。



誤り耐性を生み出す量子ビットの入れ子構造

概要

東京大学大学院理学系研究科の山崎隼汰助教と同大学大学院工学系研究科の小芦雅斗教授は、量子コンピュータの高効率性と高速性を両立するために、誤り耐性のある計算手順の新しい仕組みを提案しました。

大規模な量子コンピュータでは、ノイズの影響で量子ビット（注1）に生じるエラーを訂正しながら誤り耐性のある計算手順を踏むことが不可欠です。この手順は一般に複雑で、さらに多数の量子ビットを追加する必要があるため、そうした中で量子ビット数の高効率性と計算速度の高速性を両立した計算手順を設計しなければならないという難しい課題がありました。初期に提案された手法は、1個の量子ビットをノイズから守る単純な符号（注2）を入れ子構造にして使うことでエラー訂正能力を高めていましたが、大量の量子ビットが必要で効率が悪いという問題がありました。最近では、多数の量子ビットを守る複雑な符号を入れ子にせずそのまま使うことで効率性を高める提案もありますが、複雑な符号を使うために計算速度が大き

く低下してしまうという問題がありました。今回の研究では、複数の量子ビットを守る符号を特殊な入れ子構造にして使う手法を新たに開発することで、高効率性を達成しつつ高速性も損なわない計算手順を初めて見出しました。誤り耐性のある量子計算の高効率化・高速化を同時に達成した本研究の成果は、全世界的に進んでいる量子コンピュータ開発における基盤技術として今後の幅広い活用が期待されます。

発表内容

量子コンピュータは、多数の量子ビットから構成されますが、量子ビットが担う量子の情報は壊れやすく、計算の途中で小さなノイズの影響を受けてどうしてもエラーが生じてしまいます。そのため、大規模な量子コンピュータを実現するには、量子ビットに生じるエラーを訂正しながら計算を進める「誤り耐性量子計算」の仕組みが不可欠です。全世界的に開発が進んでいる量子コンピュータの実機は現状、エラー訂正を十分に行えないため、ノイズの影響が積み重なってしまい、大規模な計算を行うことができません。今後の技術開発により、誤り耐性量子計算が可能になれば、大規模な計算を実行する有用な量子コンピュータの実現につながることを期待されます。ただ、誤り耐性量子計算ではたくさんの量子ビットを追加して複雑な計算手順を踏む必要があるため、量子ビット数の高効率性と計算速度の高速性をバランスよく両立した計算手順を設計しなければならないという難しい課題があります。

誤り耐性量子計算に関する既存の理論研究の手法では、高効率性と高速性のいずれかが大きく犠牲になってしまう状況でした（次頁図1）。誤り耐性量子計算の初期の研究で提案された手法では、1個の量子ビットをノイズから守る単純な符号を入れ子のように重ねていき、接続符号（注3）と呼ばれる符号にして使うことでエラー訂正能力を高めていました。入れ子構造は単純な符号の組み合わせなので、この手法では比較的高速に計算を実行できますが、大量の量子ビットを必要として効率が悪いという問題がありました。一方、最近になって提案された手法では、多数の量子ビットをまとめて守る複雑な低密度パリティ検査符号（注4）を、入れ子構造にせずそのまま使うことで高効率を達成しています。しかし複雑な符号を使うため計算速度が大きく低下してしまうという問題がありました。

これに対し今回の研究では、1個ではなく複数の量子ビットを守る単純な符号を重ねて、特殊な入れ子構造を持つ接続符号として使う誤り耐性手法を新たに開発しました。単純な符号を組み合わせる入れ子構造によって、計算速度の低下を抑えると同時に、複数の量子ビットを守る符号を使うことで、量子ビットの数を抑えて効率性も高めるのが狙いです。この場合の課題は、守るべき量子ビットの数が1個から複数になることで、入れ子の構造が複雑化することです。ノイズの影響は様々なパターンがあつて予想しづらいのですが、どんなパターンのエラーが起きても訂正できる特殊な入れ子構造を見出したことが今回のポイントで、高効率性・高速性を初めて両立することが可能になりました。

今回の提案手法は、計算速度の低下を防ぎつつも、従来に入れ子構造の欠点を克服するものです。従来に入れ子構造の符号では、エラー訂正能力を高めるために、量子ビット1個を守るために追加する量子ビットの数を10個、100個、1000個と増やしていくことが必要でしたが、提案手法では量子ビット1個あたり40個程度の量子ビットの追加で、原理的にはエラー訂正能力をいくらかでも高めた符号を構成できます。大規模な量子コンピュータの実現に向けて、ハードウェアの開発にかかる負担を軽減する可能性を開拓することとなり、量子コンピュータ開発における基盤技術として今後の幅広い活用が期待されます。

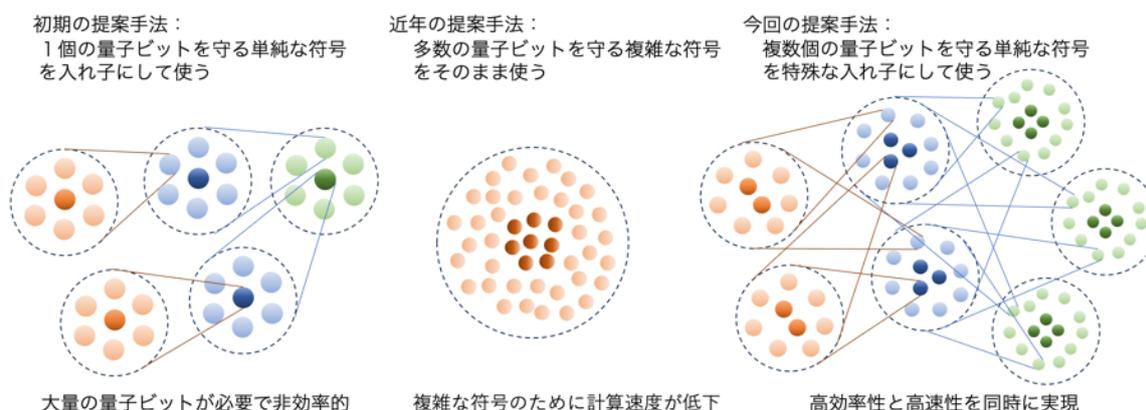


図1：量子のデータをエラーから守る手法の変遷

(図左) 初期に提案された手法は、1個の量子ビットを守る単純な符号を、入れ子構造にして繰り返し重ねていくことで、エラーの訂正能力を高めていく仕組みでした。図では、守られている量子ビットを濃い色で表しています。単純な符号の繰り返しなので計算のための処理は簡単ですが、大量の量子ビットを入れ子にして守れるのは量子ビット1個だけなので、非効率です。

(図中) 最近の理論研究では、多数の量子ビットをまとめて一度に守れて、しかもエラーの訂正能力が高い複雑な符号を設計するというのが主流となっています。守る量子ビット1個あたりに追加する量子ビットの数は少なく済みますが、この複雑な符号に守られたデータで計算を進めるには複雑な処理が必要となり、計算速度が大きく低下してしまいます。

(図右) 今回提案の手法では、単純な符号の入れ子構造、という考え方を採用しつつ、1個ではなく複数個の量子ビットを守る符号を重ねることで、必要な量子ビットの数を抑えつつ、計算処理の速度低下を防ぐことができます。初期の入れ子とは異なり、複数量子ビットの符号の入れ子の組み方は図のように複雑で、いろいろな組み方が考えられます。その中で、高効率性と高速性を同時に実現できる入れ子の組み方を見つけ出したことが今回の成果のポイントです。

発表者・研究者等情報

東京大学

大学院理学系研究科

山崎 隼汰 助教

大学院工学系研究科

小芦 雅斗 教授

論文情報

雑誌名 : Nature Physics

題名 : Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation

著者名 : Hayata Yamasaki* (*corresponding author), Masato Koashi

DOI : 10.1038/s41567-023-02325-8

URL : <https://www.nature.com/articles/s41567-023-02325-8>

研究助成

本研究は、科学技術振興機構（JST）ムーンショット型研究開発事業 ムーンショット目標 6「2050年までに、経済・産業・安全保障を飛躍的に発展させる誤り耐性型汎用量子コンピュータを実現」（プログラムディレクター：北川 勝浩 大阪大学 大学院基礎工学研究科 教授） 研究開発プロジェクト「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（PM）：小芦 雅斗 東京大学 大学院工学系研究科 教授）（JPMJMS2061）、および、JST 戦略的創造研究推進事業 個人型研究（さきがけ）「革新的な量子情報処理技術基盤の創出」研究領域（研究総括：富田 章久）における研究課題「高速な量子機械学習の基盤構築」（JPMJPR201A）、および日本学術振興会（JSPS）海外特別研究員制度による支援を受けて行われました。

〈ムーンショット型研究開発事業 小芦 PM コメント〉

大規模な量子コンピュータを実現するためには、発生するエラーを訂正しながら計算する仕組みが不可欠で、実際の装置開発を進めるハードウェアの研究と、その方向性を指し示すための理論研究が両輪で進められています。できるだけハードウェアを簡素化してしかも計算速度を落とさずにエラーを訂正したい、という観点では、量子のデータの入れ子構造が現状最も優れた方式である、ということを実証したのが本成果です。量子コンピュータのどんな方式が一番優れているのか、という最終的な答えはまだ出ていませんが、黎明期に提案された入れ子構造に再びスポットライトを当てる今回の成果は、量子コンピュータ開発の今後の流れに大きなインパクトを与えていると考えています。

用語解説

（注1）量子ビット

量子コンピュータを構成する基本要素です。通常の計算機ではビットは0か1のどちらかを表しますが、量子コンピュータの基本単位となる量子ビットは、0と1の「重ね合わせ状態」を取ることができます。この重ね合わせ状態は量子力学特有の状態であり、量子コンピュータは物質の重ね合わせ状態を活用して高速な計算を実現しています。一方、この重ね合わせ状態はノイズの影響を受けやすく、計算の途中で量子ビットにはどうしてもエラーが発生してしまいます。

（注2）符号

量子ビットの情報を、より多数の量子ビットに載せることで、エラーの影響から情報を守る方法で、量子エラー訂正符号と呼ばれています。

もともとは、量子ではない普通のビットについて考案された手法で、例えば1ビットの値「0」を3ビットの「000」に符号化し、値「1」を「111」に符号化すると、冗長性のおかげで、3ビット中の1個のビットにエラーが起きても訂正が可能になります。この量子版が量子エラー訂正符号です。量子ビットの場合、普通のビットよりもエラーの起こり方が多様になるので、訂正にはより多くの追加ビットが必要になります。例えば量子ビット1個の情報を、7個の量子ビットがスクラムを組んだような状態に載せ替えることで、7個のうち1個の量子ビットにエラーが起きても訂正が可能になります。

(注3) 接続符号

複数の符号を入れ子構造で組み合わせることで、単独の符号よりもエラーの訂正能力を高める手法を指します。

例えば図1の左では、赤色の7個の量子ビットがスクラムを組んで、量子ビット1個分の情報を担います。この符号は、7個のうち1個の量子ビットに起きるエラーは訂正できますが、7個のうち2個の量子ビットにエラーが起きると、訂正不能になり、守っている「量子ビット1個分の情報」自体にエラーが起きてしまいます。そこで、この符号を組んでいる7量子ビットをまとめて青色の1個の量子ビットと見なし、それを7個集めてきて同じように符号を組んで、「量子ビット1個分の情報」を載せる、というのが接続符号です。量子ビット1個分の情報を守るのに $7 \times 7 = 49$ 個の赤色の量子ビットを使いますが、赤色の量子ビット2個にエラーが起きても訂正が可能になります。接続を繰り返せば、エラーの訂正能力をさらに高めていくことができます。

(注4) 低密度パリティ検査符号

入れ子構造を使わずにエラーの訂正能力を高める手法で、LDPC符号とも呼ばれます。その量子版が量子LDPC符号です。最近になって、エラー訂正のために追加する量子ビット数を抑えた高効率の量子LDPC符号が発見されました。

問合せ先

(研究内容については発表者にお問合せください)

東京大学大学院理学系研究科

助教 山崎 隼汰 (やまさき はやた)

E-mail : hayata.yamasaki[at]phys.s.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院理学系研究科・理学部 広報室

Tel : 03-5841-0654 E-mail : media.s[at]gs.mail.u-tokyo.ac.jp

東京大学大学院工学系研究科 広報室

Tel : 03-5841-0235 E-mail : kouhou[at]pr.t.u-tokyo.ac.jp

科学技術振興機構 広報課

Tel : 03-5214-8404 E-mail : jstkoho[at]jst.go.jp

<JST事業に関する問合せ>

科学技術振興機構 ムーンショット型研究開発事業部

櫻間 宣行 (さくらま のりゆき)

Tel : 03-5214-8419 E-mail : moonshot-info[at]jst.go.jp