

量子コンピュータの計算結果の信頼度を上げます

どんな研究

量子コンピュータに計算させるにはプログラムをゲート列に変換(=コンパイル)する必要がありますが、計算の信頼度を上げるためにゲート列が長くなる(=計算時間が増加)という問題があります。この展示では**短いゲート列でも信頼度を向上させられる**コンパイル方法を紹介します。

どこが凄い

確率的に異なるゲート列を実装することで、ゲート列を長くせずに信頼度を**理論限界**まで向上させられることを発見しました。また、無数にあるゲート列の中で、**信頼度を最大化**するためにどのゲート列をどのような確率で実装すれば良いかを**効率的**に求めることもできます。

めざす未来

世界を一変する量子コンピュータの実現にはコンパイラ開発が必要不可欠です。**信頼性の高い計算**を保証する**効率的**なコンパイル方法を、実現性の高い具体的な理論として解き明かすことにより、量子コンピュータの実現をめざします。

量子プログラムのコンパイル

- 量子コンピュータは、複数の量子ビットに物理的な操作を適用し、量子ビットを測定して計算結果を得ます。
- 物理的な操作はユニタリ行列で表現され、これを基本ブロックとして量子プログラムを設計します。
- しかし、実際は様々なユニタリ行列のごく一部に対応する物理的な操作(=基本ゲート)しか実現できないため、ユニタリ行列を基本ゲートの列(=ゲート列)に変換(=コンパイル)して実装する必要があります。
- コンパイルを行うと近似誤差が生じ、計算の信頼度低下(=正答率の低下)を招きます。ゲート列を長くすることで近似誤差を小さくできますが、量子コンピュータの実行時間が増えてしまいます。

量子プログラムの一行

circuit.u(θ, ϕ, λ)

対応

ユニタリ行列

$$\begin{pmatrix} \cos \frac{\theta}{2} & -e^{i\lambda} \sin \frac{\theta}{2} \\ e^{i\phi} \sin \frac{\theta}{2} & e^{i(\phi+\lambda)} \cos \frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$$

コンパイル1

コンパイル2

基本ゲートの一例

T H S

量子コンピュータの方式によってまちまち

近似誤差は小さい(1%)が実行時間は長い

T H T S H T H T

近似誤差が大きい(10%)が実行時間は短い

T H T S

本研究の目的：なるべく短いゲート列で近似誤差を小さくする(=計算結果の信頼度を上げる)

従来のコンパイルと本研究の確率的コンパイル

従来のコンパイル：一定の長さ以下のゲート列の中から近似誤差が最小となるものを探索し、毎回同じゲート列に変換。

本研究：ゲート列への確率的な変換(=確率的コンパイル)により、近似誤差を大幅に減らせることを発見。

近似誤差10%のゲート列

T H T S

近似誤差1%のゲート列

? ? ? ?

同じユニタリ行列を量子プログラムで呼び出すことに、このゲート列に変換しよう

近似誤差11%のゲート列

T S H T

近似誤差9%のゲート列

H T H S

同じユニタリ行列を量子プログラムで呼び出すことに、

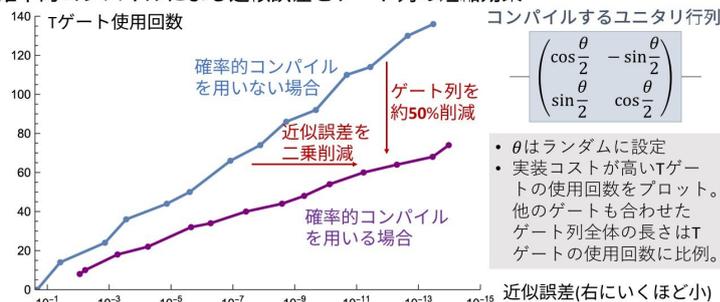
- $p(1) = 50\%$ の確率で T H T S
 - $p(2) = 30\%$ の確率で H T H S
 - $p(3) = 20\%$ の確率で T S H T
- のゲート列に変換。

- 近似誤差はゲート列を選ぶ**確率** p によって変化。本研究では、確率 p を上手く選ぶことで、異なるゲート列の近似誤差を相殺し、大幅に削減できることを発見。
- 確率的コンパイルの概念と適用の報告は数例ありましたが、本研究ではどのようなユニタリ行列についても、**近似誤差を最小化する確率** p をノートPCでも計算できる**アルゴリズム**として開発することに世界で初めて成功しました。
- 確率的コンパイルによる近似誤差の(確率的コンパイルを用いない場合と比べて)削減率の理論限界についても世界で初めて完全に解明しました。

確率的コンパイルによる近似誤差の削減効果

- 2×2 のユニタリ行列をコンパイルする際、近似誤差の削減率が**理論限界**($\epsilon \rightarrow \epsilon^2$)を達成することを数値実験で確認しました。
- これは、確率的コンパイルによって、一定の近似誤差を実現するために必要なゲート列の長さを**約50%削減**できること(=量子計算の高速化)も意味します。

確率的コンパイルによる近似誤差とゲート列の短縮効果



関連文献

- [1] S. Akibue, G. Kato, S. Tani, "Probabilistic state synthesis based on optimal convex approximation," *npj Quantum Information* 10, 3, 2024.
 [2] S. Akibue, G. Kato, S. Tani, "Probabilistic unitary synthesis with optimal accuracy," under review.

連絡先

秋苗 清石 (Seiseki Akibue) メディア情報研究部 情報基礎理論研究グループ