

※サイズ4:3にするの忘れてました，すみません

Understanding the Impact of Quantum Noise on Quantum Programs

Zhonghao Pan, Yang Feng, Zhiyuan Li, Yunxin Liu and Yuanchun Li.

発表：山村慎太郎

背景

◆量子コンピュータ

量子力学の原理を利用した，高速計算が可能なコンピュータ
通常のビットではなく，量子ビットが用いられる

◆量子プログラム

量子コンピュータ上で実行されるプログラム
通常のコンピュータでは実現が難しい量子アルゴリズムの実装を行える

高速で効率的な計算が可能のため，ソフトウェア工学の分野で注目を集めつつある

背景

問題：ソフトウェア工学界では、量子コンピュータに関する知識が不足している

◆量子ビット

0と1に加え、0と1両方の状態を同時に表現できる（重ね合わせ状態）

様々な要因の影響を受ける、非常に繊細な性質

— 温度変化、量子ゲート、電荷効果など

◆量子ノイズ

内外の様々な要因で、量子ビットに影響がおよび、正しい計算結果が出ないこと
通常のコンピュータにはない、量子ビット特有の性質

→ 量子コンピュータ特有の性質・影響への理解が必要

目的

- ◆ **量子ノイズ**が量子プログラムや開発者に与える**影響の理解**
- ◆ 実計算環境と模擬計算環境を用いて、**量子ノイズ**の存在やノイズが与える**影響を明らかにする**
- ◆ ノイズの影響を**機械学習モデルで推定**できる可能性を示す

RQ

量子ノイズへの理解を深めるため、以下のRQを設定

RQ1. 実際の量子コンピュータに現れる量子ノイズの存在
—量子コンピュータの実行により、ノイズのレベルを**定量化**

RQ2. 量子ノイズは、量子プログラムの**正しさ**にどう影響するか
—**ノイズの種類やレベル**によって、正確性への影響はどのように変化するか

RQ3. 量子ノイズの影響はどのようにモデル化できるか
—**GNNの機械学習**を用いて、ノイズ環境下で**どの程度正常に動作するか**を推定

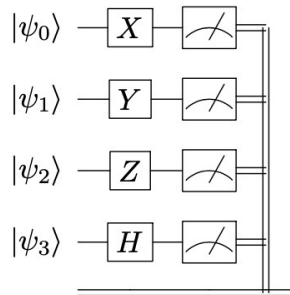
RQ1(量子ノイズの存在)

QuanCloud上で、右図の回路を実行して量子ノイズの存在を確認

Quanccloud

量子コンピュータ実行環境を提供するクラウドサービス

量子ビット 量子ゲート



手順

- ①回路を複数回、複数サイクル実行し、出力状態を観測
- ②出力状態と目標状態※を比較、**忠実度(Fidelity)**を算出

※目標状態

期待される出力(理論値)
のこと
事前に算出が可能

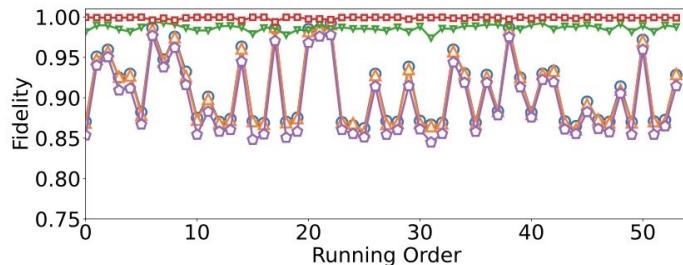
◆忠実度(Fidelity)

量子回路の出力精度を測る指標

出力と目標状態(理論値)の間の距離を計算し、類似度を0~1の間で算出

RQ1(量子ノイズの特性)

結果：量子ノイズが確認された



1 サイクル目の結果

- ・ q2, 3は概ね忠実で、ノイズの影響はない
- ・ q0, 1は大きなばらつきがあり、ノイズの影響を受ける

原因：量子ゲートの耐ノイズ性や動作精度のばらつき
量子コンピュータの予測不可能性

※qubit0~3

それぞれ量子ゲートX~Hへ
入力される量子ビット

→量子ソフトウェアは、量子ノイズと共存する必要性

RQ2(正確性への影響)

◆量子ノイズの**種類**や**レベル(ノイズ確率)**を変化させ、プログラムを実行

量子ノイズの種類

- ①ビット反転ノイズ
- ②脱分極ノイズ
- ③位相反転ノイズ



ノイズ確率

[0],[0.1],[0.2], $\dots$,[1.0]
の11種類のノイズレベル

→各条件下で各プログラムを1000回実行，**精度(正しい出力を出す割合)**を計算

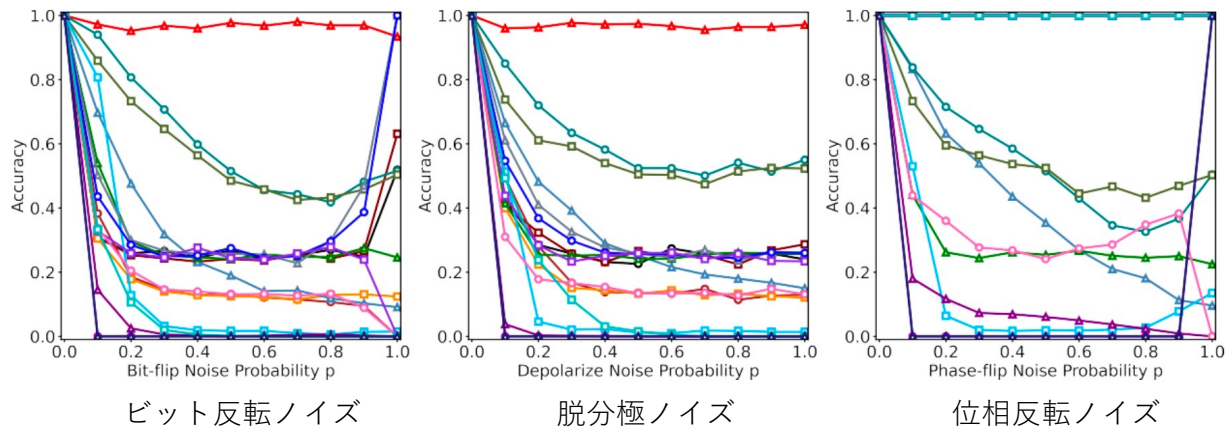
◆シミュレーション環境は，**Cirq**により構築

—**Cirq**：Googleが開発した**量子シミュレータ**

ノイズの**種類**や**確率**などを柔軟にシミュレートできる

RQ2

結果



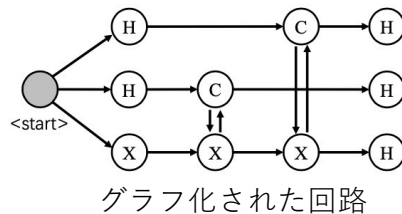
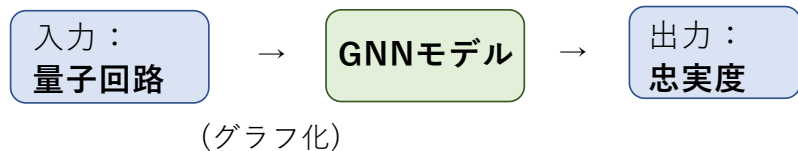
(線はそれぞれ、実行したプログラムを表している)

- ◆ノイズ強度が**大きく**なるにつれ、プログラムの精度は**低下する**
- ◆ノイズの**種類**によって、プログラムへの影響が異なる

RQ3(ノイズ影響の推定モデル)

ノイズの影響は複雑かつ、実テストは高コストにより実現不可

→機械学習により、ノイズ環境下でプログラムがどの程度正常に動作するかを推定



◆元データの忠実度と、GNNモデルによる予測忠実度との誤差を算出

→誤差が小さければ小さいほど、プログラムを適切に評価できているモデル

◆性能評価のため、線形回帰で算出した忠実度誤差と比較

→単純な回帰モデルより、GNNモデルの方が優れているか？

RQ3

結果

Noise Distrib.	# Gate Types	Average Error	
		Linear	Ours
e_1	5	0.1037	0.0511
e_2	5	0.1045	0.0496
e_3	5	0.1074	0.0536
e_1	13	0.1259	0.1006
e_2	13	0.1324	0.1037
e_3	13	0.1332	0.1026

Noise Distrib : ノイズの種類

GateTypes : 使用した量子ゲートの種類数

AverageError : 予測忠実度と真忠実度との誤差の平均

Linear : 線形回帰モデル

Ours : GNNモデル

- ◆ **GNNモデル**は線形回帰モデルに比べ、予測誤差が**全体的に小さかった**
→より正確に忠実度を予測できている
- ◆ GateTypesを増やすと、**GNNモデル**も予測の**正確性が落ちた**
→回路が複雑になり、学習難易度が高くなったため

まとめ

- ◆量子コンピュータには、計算結果に影響を及ぼす量子ノイズが存在する
- ◆ノイズの種類や強度によって、プログラムに与える影響が変化する
- ◆機械学習を用いて、ノイズの影響を推定できる可能性
- ◆ソフトウェア工学界での、量子コンピュータ・量子ノイズへの理解の必要性