3DCG とコントローラーを活用し直感的に操作可能な量子プログラム作成ツールの開発
—FTQC 時代に向けた直感的な統合型開発環境—

1. 背景

量子コンピュータは従来のコンピュータと比較して、一部の問題において効率良く計算できることが期待されている。2019 年に Google 社が古典コンピュータでシミュレーションできない規模の計算を量子コンピュータで実行するなど、近年は量子コンピュータの研究・開発が盛んに行われている。

2025 年現在に実現されている量子コンピュータは NISQ(ノイズのある中規模の量子デバイス)であり、NISQ のままで実用的なタスクへの応用が可能かまだ定かではない一方、FTQC(誤り耐性のある量子コンピュータ)であれば、計算の精度が理論的に保証されているため、その実現に向けて世界規模で研究・開発が行われている。

しかし、FTQC の実現はまだ研究段階にあり、理論的課題と実験的課題が多く残されている。実現は 2040 年ごろに期待されているが、FTQC のデバイスが実現した後にそれを使いこなす人材が必要だけでなく、実現するその過程、あわよくば実現時期をより早める過程に関わる人材もこれから多く必要になっていく。しかし、多くの開発レイヤーに細分化している量子コンピュータの仕組みが非常に複雑であり、今のソフトウェア技術のままでは新規参入のハードルが非常に高いと言える。

2. 目的

本プロジェクトの目的は、量子コンピュータを利用するまたは開発等に関わる人材の新規参入のハードルを下げつつ、その工程をより効率化することである。

量子コンピュータに関わる技術は多岐に渡り、デバイスの設計、物理パルスの制御、コンパイル、誤り訂正、アルゴリズム実装などがあり、各々多くの専門知識を必要とする上、全ての技術が連携して初めて量子コンピュータが正常に動作する。

本プロジェクトでは、長期的な目線でそれらすべての技術を統一的なフレームワークで扱える基盤を作ることを目指し、未踏ターゲット事業期間においては量子誤り訂正符号と量子アルゴリズムの 2 つに着目して、それらの開発工程を統合的に実施できる“直感的で使いやすい”プラットフォームを開発する。

3. ソフトウェア開発内容

目的を達成するために CoQtail(カクテル)というソフトウェアを開発した。CoQtail とは、Controller-Optimized Quantum computer Tool with Adaptive, Intuitive and Ludic approach の略で、日訳は「コントローラーに最適化された、適応的かつ直感的かつ遊び心のある手法による量子コンピュータのツール」という意味である。

CoQtail のコアとなる開発思想は、その名にあるように、ゲームで遊ぶような楽しい感覚で直感的に量子コンピュータに関わる本格的な開発ができるプラットフォームを構築することである。開発した機能を以下で説明する。

3.1. 量子アルゴリズムを作成する機能

図 1. CoQtail を使って 2 量子ビットのベル状態を作成する画面

量子アルゴリズムを実装するにあたり、量子回路を作成する。基本的な操作画面を図 1 に示す。画面の下半分ではユーザーが編集している量子回路を表示している。また、その 上半分ではその量子回路の量子状態を可視化している。様々な場面に応じていくつかの可視化方法を使い分けられるようになっているが、図では本プロジェクト独自の表現を用いて可視化している。その詳細を 4.2 節に述べる。ただし、量子状態を可視化するにはシミュレーションする必要があり、量子ビットの数に対して指数的に時間がかかるため、可視化機能の使用に 8 量子ビットの上限を設けた。

また、量子回路の作成作業を効率化するために本プロジェクト独自のもう一つの機能としてブロック機能を開発した。ブロックでは UI のみで量子ゲートに対してプログラミング的な機能を実装できる。詳細は 4.3 節に述べる。

3.2. 量子誤り訂正符号を作成する機能

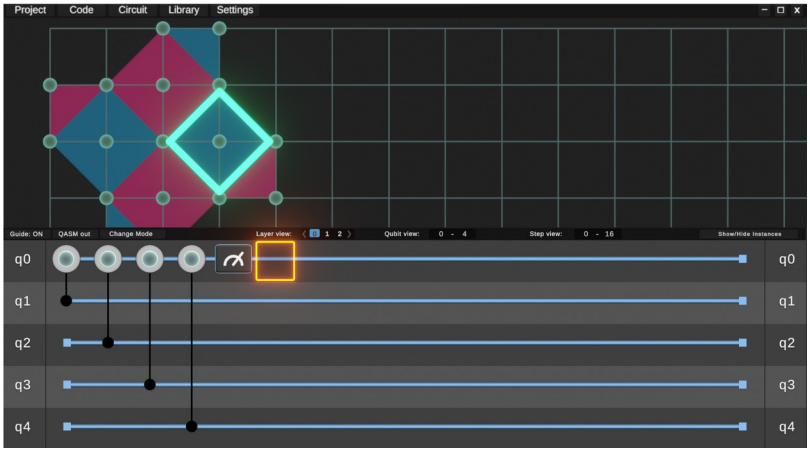

図 2 . CoQtail を使って量子誤り訂正符号である回転面表面符号を作成する画面

量子誤り訂正符号を作成するにあたり、量子ビットの配置関係を決めた上で、スタビライザに対応する量子回路を作成する。図 2 にその操作画面を示す。画面の上半分では符号全体を表示し、各スタビライザが色別で表現されている。また、その

うちに選択されたスタビライザに該当する量子回路が画面の下半分で表示されており、そこで量子回路の操作が可能である。CoQtail を使用することで様々な符号を作成できるが、CSS というクラスの符号に限定して UI でその評価も可能である。

4. 新規性・優位性

4.1. コントローラーの使用

従来の量子コンピュータを扱うにはプログラミング言語で記述するツールおよび GUI を使ってマウスの Drag＆Drop で量子回路を作成するようなツールがある。それに対して、CoQtail では「ゲーム用のコントローラー」を使用することができるだけでなく、それに最適化されたフレームワークとして、コントローラーのみですべての機能が使えるという特徴を持っている。

コントローラーを使用することによるメリットはキーボードと比較してキーが少ない分、ヒューマンエラーを回避できる事、操作が覚えやすい事、そしてマウスと比較して 3D カメラの操作がしやすい事が挙げられる。

4.2. 量子もつれを表現できるブロッホ球の拡張

通常のブロッホ球の表現は量子ビットがもつれていないときにしか使えないが、CoQtail ではブロッホ球の表現をより拡張して、複数量子ビットがもつれているときにそのもつれの強度を表示するようにした。図 3 では拡張した機能を用いて GHZ 状態および W 状態を実装したときの表現を示している。

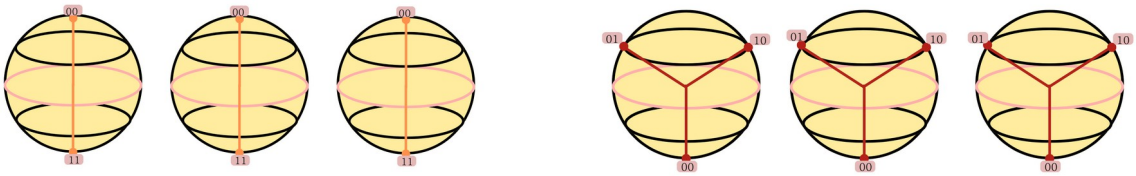

図 3. 3 量子ビットを使った GHZ 状態（左）および W 状態（右）の可視化の例

4.3. ブロック機能

CoQtail では独自のブロック機能を活用することで、コーディングをすることなく GUI のみで量子回路上でプログラミングを実装できる。ブロックは基本的に量子ゲートあるいは他のブロックを格納できるオブジェクトであり、そのブロックにパラメータを付与することによりプログラムした機能をもたせることができる。

全部で 5 種類のブロックを開発した：基本ブロック、共有パラメータブロック、繰り返しブロック、条件ブロック、拡張ブロック。図 4 で任意の量子ビット数の量子フーリエ変換を繰り返しブロックと拡張ブロックの利用で作成している画面を示す。

図 4. 量子フーリエ変換に対応するブロックの例

4.4. 3DCG を使った誤り訂正符号の表示および作成

従来の GUI を活用したグラフィカルな誤り訂正符号を作成できるツールとしては Google 社が開発している Crumble があるが、Crumble では 3D の表現ができない一方、CoQtail では 3D で表示された空間のナビゲーションならびに 3D 符号を作成する機能を持っているため、より多様な種類の量子誤り訂正符号に対応している。

5. 期待されるユーザー価値と社会へのインパクト

CoQtail は社会へ大きなインパクトをもたらせると考えられる。まず、対象としているユーザー層は量子コンピュータを深くまで理解して使いこなすことを目的としているユーザーである。そのユーザーは、量子コンピュータを利用したことがない初学者から実際に研究・開発を行っている専門家まで幅広い層を含めている。

標準的な使い方として、初学者が教科書と併用して CoQtail を使い、量子コンピュータをより深く理解できるようになり、てそれ以降の研究・開発でも引き続き CoQtail を利用するというユースケースが考えられる。また、研究・開発に関わっている専門家にとっても CoQtail の導入によるメリットがある。CoQtail の活用により、複数のレイヤーを跨いだ開発業務の効率が向上可能であるため、普段の研究・開発の業務の時間を短縮し、労力を減らせる。

また、よりマクロな視点で言えば、新規参入者の増加と標準的な開発フローの効率化により FTQC の実現時期を早め、量子コンピュータが実社会において実用的に応用てきる未来に大きく貢献できる可能性があると考えられる。具体的には、FTQC に必要な量子誤り訂正符号を作成し、評価した上でそのまま実験で用いるというフローにおいて CoQtail は非常に役立つ。他にも、FTQC を前提として量子アルゴリズムを組み、その実装および実験を行うときにも CoQtail は使える。

2024 年度未踏ターゲット事業において CoQtail の一部の機能を開発したが、2025 年度以降もチームとして CoQtail の開発を続け、より多くのユーザーが“実際に使える”そして“使いやすい”と思えるような量子コンピュータ用の統合開発環境であることを目指す。

6. 氏名（所属）

FERREIRA GUIMARAES FILHO NILTON （大阪大学基礎工学研究科）
小路　真矢　（Tavern 株式会社）
AZEVEDO BUCEK RODRIGO （Unseen 株式会社）

（参考）関連 URL

CoQtail の X アカウント: https://x.com/coqtail_/
CoQtail のホームページ: https://coqtail.io