

令和 6 年 6 月 19 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K12174

研究課題名（和文）HCI技術と情報視覚化技術を利用した量子プログラミング学習システムの構築

研究課題名（英文）A Quantum Programming Learning System Using HCI and Information Visualization Technologies

研究代表者

笹倉 万里子（Sasakura, Mariko）

鳥取大学・国際乾燥地研究教育機構・准教授

研究者番号：30284087

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,400,000円

研究成果の概要（和文）：量子コンピュータは従来と全く異なる原理で動くコンピュータであり、従来のアルゴリズムではその量子コンピュータの性能を十分に引き出すことができない。量子コンピュータの性能を十分に引き出すためには、量子アルゴリズムを用いた量子プログラミングを行う必要がある。本研究は量子プログラミングの教育支援を行う上で、インタラクションや視覚化などの技術を用いることが効果的であるかどうかを明らかにすることを目的とした研究である。結果として、VR等の視覚化システムは有効であること、インタラクションは有効ではあるが、支援内容や目的を明確にしないインタラクションはかえってユーザーの理解を妨げる可能性があることが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の意義は二つある。一つ目は、量子プログラミングの教育支援をテーマとしていることである。本研究を通じて、あらためて量子プログラミングの習得の難しさが明確となった。さらに研究を続けることで量子プログラミングの教育支援についてより知見が得られることと思われる。二つ目はヒューマンコンピュータインタラクションの分野における意義である。新しい概念を習得する際の困難を緩和するためにインタラクションが一定程度効果があることを示すと同時に、効果を十分に考えないで導入したインタラクションは理解の妨げになる可能性があることを示せたことは意義があると考えられる。

研究成果の概要（英文）：Quantum computers have attracted considerable attention because of their potential to run faster than conventional computers. However, quantum computers operate on a completely different principle from conventional computers, and conventional algorithms cannot fully exploit their performance. In order to fully exploit quantum computers' performance, quantum programming using quantum algorithms is necessary. This research aims to clarify whether human-computer interaction and visualization techniques effectively provide educational support for quantum programming and what educational support is appropriate. In this study, experimental systems were constructed, and subject experiments were conducted. The results suggest that visualization techniques such as VR may be effective. Although interaction such as users can select scenarios is effective, interaction that does not clarify the content and purpose of support may hinder the user's understanding.

研究分野：ヒューマンコンピュータインタラクション

キーワード：量子プログラミング ヒューマンコンピュータインタラクション 視覚化 VR

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

量子コンピュータは、従来と全く異なる原理で動くコンピュータである。1994年に発表された Shor のアルゴリズム [3] で、量子コンピュータを用いて素因数分解を多項式時間で解くことができることが示されたことにより、次世代のコンピュータアーキテクチャとして大きく注目されるようになった。それ以来、実用に耐える量子コンピュータを開発しようという研究が盛んに行われている。

コンピュータは、ハードウェアとソフトウェアの両方が揃わなければ適切に利用できない。仮に実用的な量子コンピュータが開発できたとしても、従来のアルゴリズムではその量子コンピュータの性能を十分に引き出すことができない。量子コンピュータの性能を十分に引き出すためには、Shor のアルゴリズムのように、量子の特性を活かしたアルゴリズムが必要である。そのようなアルゴリズムを量子アルゴリズムと呼び、それを用いて量子コンピュータ用のプログラムである量子プログラムを作成する。

量子コンピュータは、そもそもビットの考え方が従来のコンピュータとは異なる。従来のコンピュータは 0 か 1 かどちらかしか取らないビットを単位としている。量子コンピュータの基礎となる量子の世界では、一つの値を取るのではなく、状態の重ね合わせが起こる。この量子の重ね合わせを利用するのが量子アルゴリズムである。

研究開始の時点で、400 近い量子アルゴリズムが提案されていた [4]。ただ、それらのアルゴリズムを理解するためには、従来のコンピュータとは異なる原理を理解しなければならない。そのための手段は、量子コンピュータの原理や量子アルゴリズムの考え方についての教科書や論文を読んだり、講義を聞いたりする以外に、従来のコンピュータプログラミングの教育を受けている学生・技術者が独学で勉強するのは極めて難しい状況であると言って過言ではない。本研究では、量子アルゴリズム、ひいては量子プログラムを独学することを支援するための教育支援システムの開発を目的とする。

2. 研究の目的

本研究は、特に従来のコンピュータの考え方に慣れ親しんだ情報系の学生や技術者を念頭において、量子コンピュータのためのプログラム、すなわち量子プログラムの学習を支援するためのシステム構築を目的とする。通常のプログラミングの学習と異なり、量子プログラムを作成するためには、量子コンピュータの特性、例えば量子の特性や、それを活かした量子アルゴリズムの原理を学ばなければならない。すなわち、従来のコンピュータとは異なる概念を理解し習得する必要がある。

新しい概念の習得を助ける方法として、本研究では、

1. HCI 技術、具体的には、適切なインタラクション
2. 情報視覚化技術

を用いたシステムを構築し、その効果を検証する。情報視覚化技術の中にはバーチャルリアリティ (以下 VR) 技術を含む。

3. 研究の方法

HCI 技術あるいは情報視覚化技術を応用した量子プログラミング教育支援システムを構築し、それを実際にユーザに使ってもらって評価を行う。ただ、短い研究期間で量子プログラミング全般の教育支援システムを構築することはできない。そこで、代表的な量子アルゴリズムを取り上げ、それを学習するという

シナリオのもとで教育支援を行うテストシステムを構築する。

評価は被験者実験で行う。理解支援に役立つかどうかを知りたい機能を備えたシステムとその機能のないシステムを作成し、それぞれをユーザに使ってもらって比較する。システムの使用後に、理解度を測るテストを行い、その結果でその機能が役立ったかどうかを評価する。

4. 研究成果

本研究の成果として以下の対外発表を行った。

1. Shingo Taniuchi, Kiyotaka Kawahara, Mariko Sasakura, "A Piloting Study of Measuring Effectiveness of Virtual Reality in Understanding a New Concept in Educational Support Systems", 25th International Conference Information Visualisation (IV), 2021.
2. Mariko Sasakura, Kenichi Iwata, "Potential of Visualization to Explain Quantum Algorithms", 27th International Conference Information Visualisation (IV), 2023. (発表は 26th International Conference Information Visualisation (IV), 2022 にて.)
3. 安永翔斗, 門田暁人, 笹倉万里子, "グローバーのアルゴリズムを題材とした学習支援システムの開発", 情報処理学会第 85 回全国大会, 2023.
4. Yasunaga Hayato, Sasakura Mariko, Monden Akito, "Subject Experiments with a Learning Support System for Grover's Algorithm", 27th International Conference Information Visualisation (IV), 2023.

発表論文 1 発表論文 1 は, Deutsch-Jozsa のアルゴリズム [1] を題材にした学習支援システムを構築し, それを用いて行った被験者実験の報告である。この論文では VR の有効性を検証するために VR を用いない学習支援システム (以下非 VR システム) と VR を用いた学習システム (以下 VR システム) を用いて比較を行った。

まず, 非 VR システムの設計について述べる。従来のコンピュータに慣れた人が量子プログラミングを学習するときに躓くであろう点を考慮して解説, 例題, 練習問題を用意し, 解説とは別に語句の説明をつけ, 学習者が語句の意味を確認したいときに自らインタラクションを起こすことでいつでもそれを確認できるようにした。また, 例題および練習問題の中には, 量子ゲートを用いて量子回路を作成するものが含まれているが, 作成した量子回路を実行した時の結果を確認できるように, 量子プログラムの簡単なシミュレータを作成した。同時に, シミュレータの途中での量子の状態をブロッホ球で表示する機能もつけた。

VR システムの方は, 非 VR システムの内容と基本的に同じであるが, インタフェースが VR となったものである。学習者は, VR ゴーグルを装着し, VR 空間内ですべての操作を行う。解説や問題等テキストでの説明は VR 空間内にあるホワイトボードのようなパネルに表示する。量子回路は解説パネルとは別に, 机のようなものを用意し, 量子ゲートを表す 3 次元物体を配置するという形で作成できるようにする。また, 量子の状態を表すブロッホ球を 3 次元空間内に表示できるようにする。

ブロッホ球は, 量子の重ね合わせ状態を単位球面上に図示する視覚化手法で, 従来から量子力学の分野で使用されているものである。位相は表現されていないが, この図を用いることで量子の状態が直観的にわかりやすくなる。VR システムではブロッホ球についても 3 次元空間内に表示し, それを回転させたり, 任意の方向から眺めたりすることが VR の機能によって容易に行えるようになっている。

VR システムと非 VR システムを比較する被験者実験を行った。被験者は工学系の大学生・大学院生 7 名である。そのうち 2 名には VR を用いたシステムを使った後に非 VR システムを使用してもらい, 4 名には非 VR システムを使った後に VR システムを使用してもらった。1 名には時間の関係で VR システムのみを使ってもらった。一つ目のシステムを使用した後に理解度を判定するテストを行い, 両方のシステムを使

用した後に、どちらのシステムがよいと思ったか等の主観を問うアンケートを行った。

理解度を判定するテストの結果は VR システムを使った方がよかった。ただし、被験者の数が少ないので、VR が有効であるかについて確定的なことは言えない。アンケート等から、VR システムの方が理解度を判定するテストの結果がよかった理由として次の三つを推測できる。

1. ブロッチ球が、VR だと見やすかった。
2. 説明部分のインタフェース設計が VR システムの方がよかった。非 VR システムではテキスト量が多い場合にテキストボックスのスクロールを使用したのが、VR システムではそれを分割して紙のメタファで表示した。
3. 単純に、VR システムを先に使った被験者の方が学習能力が高かった。被験者の人数が少なかったので、この可能性は否定できない。

主観を問うアンケートの結果を見ても VR システムの方が高評価であった。ただ、VR に慣れていない被験者の中にはいわゆる VR 酔いを起こす人もいた。これは VR システムを構築する時の課題である。

発表論文 2

発表論文 2 は、量子アルゴリズムの説明に視覚化手法を用いることについて議論したものである。これは 2022 年に開催された 26th International Conference Information Visualisation (IV) のポスターセッションで発表したものであるが、手違いで、2023 年の 27th International Conference Information Visualisation (IV) の proceedings に掲載されている。

この論文では、以下のことを明らかにしている。

従来のプログラムに関する視覚化手法は、結局のところプログラムの実行につれて変化するメモリ状況の視覚化であった。これは、従来のプログラムが、結局のところメモリ内のデータの操作をしているだけであることから、当然のことであると考えられる。

一方、量子プログラムの本質は、観測前の量子の状態である。量子は観測前は重ね合わせ状態であるが、それを観測することによって 0 か 1 のどちらかに決まる。決まってしまった状態の量子というのは、従来のビットと変わらない。量子コンピュータが従来のコンピュータより速いと言われるのは、観測前の量子の状態をうまく利用するからである。つまり、量子プログラムの本質は、観測前の量子の状態であり、これは従来のメモリの状況とは全く異なる。

発表論文 2 はこのことを指摘し、従来のプログラムに関する視覚化手法は量子プログラムでは使えないことを明らかにしたものである。量子プログラムの視覚化は、従来とは全く異なる手法が必要となる。

発表論文 3, 4

発表論文 3, 4 はともに Grover のアルゴリズム [2] を題材とした学習支援システムに関する報告である。発表論文 3 が中間報告で、発表論文 4 がより詳細な最終報告となる。

ここでは、発表論文 1 で題材として扱っていた Deutsch-Jozsa のアルゴリズムではなく、Grover のアルゴリズムを題材として扱っている。

結果として、Grover のアルゴリズムを説明するための新たな視覚化手法を開発することはできなかったが、従来から用いられている Grover のアルゴリズムの説明のための図を取り入れた学習支援システムを構築した。このシステムは非 VR システムをベースとして、説明を Grover のアルゴリズムのものに変え、さらに、Grover のアルゴリズムに必要な量子ゲートをシミュレータに追加し、Grover のアルゴリズムの説明の図を表示する機能を追加した。

被験者実験では、工学系の大学生・大学院生 13 名を、構築したシステムを用いて学習するグループと紙

の資料を用いて学習するグループの二つに分けて学習を行った後、理解度を判定するテストを行い、その結果を比較した。紙の資料は、システムで表示される説明文をプリントアウトしたものである。

理解度判定テストの結果は、二つの質問について、グループごとに違いが出た。一つはオラクル回路の役割を自由記述で説明する質問 (Q1) である。これについては構築したシステムを使ったグループの方が正答率がよかった。その理由はシミュレータの役割が大きかったのではないかと推測される。もう一つは量子ゲートの一つである MCX ゲートの制御ビットについての質問 (Q4(1)) である。これについては紙の資料で学習したグループの方が正答率がよかった。これは該当する項目についてシミュレータの機能が十分ではなかったことが原因ではないかと考えられる。

この被験者実験の結果から、インタラクションのあるシステムを用いて学習することで理解支援ができることが示唆された。同時にインタラクションを導入するだけでは不十分であり、何を学ぶべきかを明確にし、それを支援することが必要であることが確認できた。しかし、何が適切な教材であるのかについては本研究では十分明らかにできなかった。

研究成果まとめ

本研究での研究成果をまとめると以下となる。

- 量子プログラムの学習支援に、適切なインタラクションを備えたシステムは有効である。
- 適切でないインタラクションは学習の妨げとなる場合もある。
- インタラクションについてなにが適切でなにが適切でないかは明らかにできなかった。
- 量子アルゴリズムを説明する効果的な新たな視覚化手法を開発することはできなかった。

参考文献

- [1] David Deutsch and Richard Jozsa, "Rapid solution of problems by quantum computation", Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, A439, pp.553–558, 1992. DOI: <http://doi.org/10.1098/rspa.1992.0167>
- [2] Lov Kumar Grover, "A fast quantum mechanical algorithm for database search", Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on the Theory of Computing, 1996. DOI:10.1145/237814.237866, arXiv:quant-ph/9605043
- [3] Peter W. Shor, "Algorithms for Quantum Computation: Discrete Logarithms and Factoring", In Proceeding of 35th IEEE FOCS, pp.124-134, Santa Fe, NM, Nov 20-22, 1994. DOI: 10.1109/SFCS.1994.365700
- [4] Quantum Algorithm Zoo, <https://math.nist.gov/quantum/zoo/> (最終閲覧日：2024年6月18日)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 Yasunaga Hayato, Sasakura Mariko, Monden Akito
2. 発表標題 Subject Experiments with a Learning Support System for Grover's Algorithm
3. 学会等名 International Conference on Information Visualisation (IV) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 安永翔斗, 門田暁人, 笹倉万里子
2. 発表標題 グローバーのアルゴリズムを題材とした学習支援システムの開発
3. 学会等名 情報処理学会第85回全国大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Shingo Taniuchi, Kiyotaka Kawahara, Mariko Sasakura
2. 発表標題 A Piloting Study of Measuring Effectiveness of Virtual Reality in Understanding a New Concept in Educational Support Systems, 25th International Conference Information Visualisation
3. 学会等名 2021 25th International Conference Information Visualisation (IV) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Mariko Sasakura, Kenichi Iwata
2. 発表標題 Potential of Visualization to Explain Quantum Algorithms
3. 学会等名 26th International Conference Information Visualisation (IV) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------