

Approaches for Utilizing Quantum Computing with Limited Resources

February, 2025

Kentaro Tamura

報告番号	甲 乙 第	号	氏 名	田村 賢太郎
主 論 文 題 名 : Approaches for Utilizing Quantum Computing with Limited Resources (リソースの限られた量子計算の活用手法)				
(内容の要旨) 量子コンピュータは、従来のコンピュータでは計算困難な問題に対して効率的に解を提供する次世代の計算機として注目されている。現在、量子コンピュータの実機開発は急速に進展しており、クラウドを通じて広く利用可能な状況にある。しかし、現行の実機は量子リソースが限られており、ノイズの影響下にある制限された数の量子ビットしか使用できないため、実行可能なアルゴリズムの範囲が制約されている。現行の実機を活用するには、限られた数のノイズのある量子ビットという制約の中でできるタスクを模索する必要がある。本論文では、量子コンピュータの量子ビットを簡易にベンチマークするための手法の不足と、量子ランダムアクセスコード (QRAC) を用いた最適化アルゴリズムのノイズ耐性に関する知見の不足という2つの問題の解決を目的とする。これらの問題の解決により、限られたリソースを持つデバイスを活用するための知見の提供を目指す。 第1章では、研究背景と本論文の構成を説明する。特に、量子リソースが限られた実機の現状と課題について議論する。さらに、これらの課題を解決する上での本論文のアプローチについて述べる。 第2章では、本論文の前提となる量子情報と量子ノイズの理論的な基礎事項をまとめる。 第3章では、本論文の第一の成果として、量子コンピュータにおける量子ビットの評価手法を提案する。ノイズの影響を受ける現行の実機において、量子ビットの評価は重要な課題である。しかし、量子コンピュータ特有のタスクで量子ビットを評価する方法は確立されていなかった。本章では、量子コンピュータ特有のタスクである量子乱数生成に着目し、量子乱数生成を利用して量子ビットの安定性を評価する手法を提案する。先行研究として既存の量子ビットの評価手法や乱数生成器と検定手法を紹介し、既存の乱数検定を量子ビットの評価に用いることの問題点を明らかにする。続いて、Ramer-Douglas-Peucker (RDP) アルゴリズムを応用した安定性評価手法を提案する。さらに、提案手法の実機への適用結果を示すことで、実機の量子ビットの出力にバイアスが存在するばかりでなく、そのバイアスが時間とともに変化することを明らかにする。 第4章では、本論文の第二の成果として、QRACを用いた最適化アルゴリズム (QRAO) のノイズ耐性の解析結果を示す。QRAOは問題の変数の数に対して用いる量子ビット数を減らす点で量子リソースの消費を抑えるが、そのノイズ耐性については解明されていなかった。本章では、背景としてQRACや量子組合せ最適化アルゴリズムの先行研究を紹介する。続いて、ノイズシミュレーションにより、QRAOで(3, 1)-QRACを用いた場合の近似解の精度がイジングハミルトニアンを用いた場合と比較してノイズ耐性が高いことを示す。さらに、ノイズ耐性のメカニズムを理論的に明らかにし、正しい古典変数の読み出しに必要な測定回数を導出する。 第5章では、本論文のまとめと展望を述べる。 本研究の成果は、量子コンピュータの実機の安定性を簡潔に評価し適切な量子ビットやデバイスの選定を行うための手法を提供するとともに、組合せ最適化問題を解く量子アルゴリズムの設計法に関する知見を提供するものである。これらは、量子コンピュータの実用化に貢献することが期待される。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	☒ "KOU" ☐ "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	Kentaro Tamura
Thesis Title			
Approaches for Utilizing Quantum Computing with Limited Resources			
Thesis Summary Quantum computers are expected to solve certain problems more efficiently than conventional computers by leveraging the laws of quantum mechanics. With rapid advancements, these devices are now widely accessible via cloud platforms. However, current devices are limited to a restricted number of noisy quantum bits (qubits), constraining the range of executable algorithms. Working with current devices poses the challenge of utilizing a restricted number of noisy qubits with limited access to hardware parameters. This thesis addresses the following problems: the lack of a simple method for benchmarking qubits of quantum computing devices, and the limited understanding of the noise robustness of optimization algorithms using Quantum Random Access Code (QRAC). Solving these problems provides tools and insights into utilizing devices with limited resources. Chapter 1 introduces the background and provides an outline of the thesis, with particular focus on the limitations of current quantum computers and approaches to addressing them. Chapter 2 outlines the foundations of quantum computing, covering topics such as qubits, quantum states, quantum gates, quantum circuits, and descriptions of noise in quantum computing. Chapter 3 presents the first key result of the thesis, which is the proposal of a method for evaluating qubits. Current devices are prone to noise, which makes evaluating their qubits a crucial task. The proposed method leverages quantum random number generation as an inherently quantum mechanical task to evaluate qubits. It highlights the limitations of applying conventional methods for evaluating random number generation to the task of evaluating qubits and presents a suitable method for the task. Furthermore, the method is applied to real devices, demonstrating the instability of their qubits. Chapter 4 outlines the second key result of the thesis, which is the analysis of the noise robustness of the quantum random access optimization (QRAO) algorithm. Originally proposed as a qubit-efficient way of solving combinatorial optimization, QRAO's behavior under noise was unknown. Given the noisy state of current quantum computers, understanding algorithm behavior under noise is essential. Through simulation, we demonstrate that the quality of QRAO's solution is robust to noise. Additionally, we theoretically derive the number of measurements required to achieve a certain error threshold in obtaining the correct classical variables. Chapter 5 provides the conclusion and outlook of the thesis. The findings of this research provide a method for easily evaluating the stability of noisy qubits and offer insight into the design of quantum algorithms for combinatorial optimization. These contributions are expected to help address key challenges for utilizing quantum computers with limited resources.			