

論文審査の要旨および学識確認結果

報告番号	㊦／乙第 号	氏 名	Yikai Mao
論文審査担当者：			
主査	慶應義塾大学教授	博士（工学）	近藤 正章
副査	慶應義塾大学名誉教授	工学博士	天野 英晴
	順天堂大学教授	理学博士	佐藤 三久
	慶應義塾大学准教授	博士（情報理工学）	佐藤 貴彦
(論文審査の要旨)			
学士（工学）、修士（工学）Yikai Mao 君の学位請求論文は、「Advancing Quantum-Classical Hybrid Workflows: Algorithm Selection, Circuit Generation, and Optimization for NISQ Processors（量子・古典融合ワークフローの高度化：NISQ プロセッサのためのアルゴリズム選択、回路生成、および最適化）」と題し、全6章で構成されている。 量子コンピューティングは、科学技術分野や機械学習を含む様々な応用において、問題解決の手法を変革する可能性を秘めた新たな計算パラダイムとして期待されている。一方で、現状の量子コンピュータは、ノイズが多くまたスケーラビリティにも制限があるため実用化に向けては未だ発展途上の段階にある。また、量子コンピュータにより有用な計算を行うためには、古典計算機と融合して活用することも重要な課題となっている。本論文では、量子コンピューティングと古典的計算の融合的な利用を目指し、それに必要な要素技術の中でも、アルゴリズム選定、量子回路自動生成、回路最適化を扱うことのできる包括的なワークフローの提案を目的としている。実際に、適切なアルゴリズム選定支援のために、15種類の実用的な量子アルゴリズムを調査し、その結果を体系的に分類・整理しつつ、各量子アルゴリズムで考え得るパラメータを明確化することで、様々な量子回路を開発する上でのベースとして、さらにはベンチマークとして用いることのできる量子回路を、与えられたパラメータのもとで自動生成できるツールである「Q-gen」を提案している。さらに、現行の Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ) 量子コンピュータ上での応用展開に向けては、物理的な量子ビットの特性を考慮した上での量子回路の忠実度を高精度に予測して、量子ビットのマッピングを最適化する必要がある。そこで、量子回路の忠実度を機械学習により予測する「Q-fid」システムを提案している。これらの一連の取り組みにより、本論文の内容は、量子・古典ハイブリッド計算ワークフローの確立と発展に大きく貢献するものと考えられる。 具体的には、第1章では、まず本論文の背景として量子コンピューティングの課題を解決するために、アルゴリズム選定・回路生成・最適化を含む量子・古典ハイブリッドワークフローの必要性を提示している。また、論文の構成についても記述されている。第2章では、本論文の前提となる量子計算の基礎や量子コンピュータのハードウェアと現状の制約、既存ソフトウェア環境やシミュレーション技術、古典的最適化と AI の活用状況などが述べられている。第3章では、15の現実的な量子アルゴリズムをその理論、構造、用途で分類し、後の量子回路自動生成のためのアルゴリズム選定と回路生成時のパラメータ抽出の指針を提供している。第4章では、多様な量子回路を様々な与えられたパラメータのもとで自動生成するツール Q-gen を提案している。Q-gen により大規模データセットが生成できること、また生成された回路で様々な評価が提示できることを実証している。なお、本ツールはオープンソースとして一般に公開されている。第5章では、自然言語処理に用いられる機械学習手法の一つである Long Short Term Memory により量子回路の忠実度を履歴から予測する Q-fid が提案されている。量子回路をテキストベース表現としてモデル化し、新規の忠実度評価指標を用いることで既存の最適化ツールと比べて高精度な予測が行えることを示している。第6章では、本論文の提案手法の貢献を総括し、量子古典ハイブリッドワークフローの今後の方向性がまとめられている。 以上、本論文は現状の NISQ 量子コンピュータと量子・古典融合に向けたワークフローの高度化に関する重要な成果であり、その貢献は工学上寄与するところが少なくない。よって、本論文の著者は博士（工学）の学位を受ける資格があるものと認める。			
学識確認結果	学位請求論文を中心にして関連学術について上記審査委員会で試問を行い、当該学術に関し広く深い学識を有することを確認した。 また、語学（英語）についても十分な学力を有することを確認した。		