

ノイズがある量子振幅推定法の解析と実験

2021 年度

田 中 智 樹

報告番号	① 乙 第	号	氏 名	田中 智樹
主 論 文 題 名： ノイズがある量子振幅推定法の解析と実験				
(内容の要旨) 本論文は、全7章により構成される。 第1章では、本論文の研究背景と構成について説明する。特に、本研究で用いる量子振幅推定法の応用面での重要性、そして現在の量子コンピュータで実行しようとした場合の課題について大まかに述べる。 第2章では、本研究で用いる量子情報理論における基本事項について説明を行う。 第3章では、まず Brassard らによって提案された振幅推定法を説明する。これは、現在の古典的なコンピュータを用いる場合より計算量において二乗の優位性があることが知られており、量子コンピュータを用いることの優位性が保証されている手法の一つである。そして、この手法は振幅増幅法と位相推定法という二つの方法から構成されており、幾つもの量子ビットや多数のゲート操作の数が必要となることが知られている。他方、現在の量子コンピュータは、NISQ と呼ばれるような限られたハードウェアしかなく、振幅推定法の実行が困難である。そこで、振幅増幅法を並列的に実行し、量子コンピュータから得た結果を最尤推定で処理することで、位相推定法を用いない振幅推定法を提案する。結果、この最尤推定法を用いた振幅推定法では、量子ビットやゲート操作の数等の必要なリソースを大幅に減らすことができ、現在の量子コンピュータにおける振幅推定法の活用の第一歩を進めたものである。そして、この手法の有効性をシミュレーションにより検証する。 第4章では、第3章で述べた最尤推定法を用いた振幅推定法を実際の量子コンピュータで実行する場合を述べる。現在の NISQ と呼ばれる実機では、ノイズがあるため、そのノイズによる影響を考える必要があるが、実際の量子コンピュータで起きているノイズを特定することは困難である。そこで、本章では、脱分極ノイズを仮定したモデルを構築し、たとえノイズがあったとしても量子コンピュータの優位性を実現できる可能性について述べる。そして、実際の量子コンピュータを用いた結果からこのモデルが相応に妥当であることを述べる。また、推定するパラメータだけでなく、ノイズの大きさも未知のパラメータとすることで、複数のパラメータ推定問題となり、これにより生じる問題も取り扱う。 第5章では、第4章で述べた脱分極ノイズがある際の振幅推定法の推定精度を改善する手法を説明する。具体的には、これまでの第3章および第4章で用いた演算子とは別の基底で作用する振幅増幅演算子を導入する。すると、従来の演算子では達成できない推定精度の下限を理論的に達成できる可能性があることを示す。 第6章では、第4章で述べた脱分極ノイズモデルを拡張したモデルを扱うことで、より一般的なモデルを扱うことができるようにする。モデルの拡張に際し、パラメータを増やすことを行うが、単に増やすだけでは興味のあるパラメータを推定することができなくなる。そこで、元の量子回路と同程度のノイズを受けると想定される補助回路を用意することでパラメータの推定を可能にする。しかしながら、一般に複数パラメータの最尤推定、つまりは、多次元の最適化問題を解くことは困難である。そこで、パラメータ直行化法という手法を用いることで、複数パラメータの最尤推定問題を直接解かず、一次元の最尤推定の問題に帰着させることができる。特に、パラメータ直交化法を用いる際には条件式となる微分方程式をとく必要があるが、本問題ではこの方程式が解析的に解けることを示す。最後に、量子コンピュータの実機を用いて検証を行う。 第7章では、本論文のまとめと展望を行う。				

Thesis Abstract

No. _____

Registration Number	■ “KOU” □ “OTSU” No. <small>*Office use only</small>	Name	Tomoki Tanaka
Thesis Title Analysis and experiments of quantum amplitude estimation under noisy environment			
Thesis Summary This paper is composed of seven chapters. In chapter 1, I explain the research background and structure of this paper, and in chapter 2, the basics of quantum information theory used in this study are explained. In chapter 3, I first describe the conventional quantum amplitude estimation proposed by Brassard et al. Note that, this method consists of amplitude amplification and phase estimation, and thus requires a large number of qubits and number of gate operations. Therefore, I explain the new amplitude estimation proposed by the authors, which does not use the phase estimation, by executing the amplitude amplification in parallel and processing the results obtained from the quantum computer by maximum likelihood estimation. As a result, this amplitude estimation method using maximum likelihood estimation (MLAE) succeeds in significantly reducing the required resources. In chapter 4, I explain the MLAE using a real quantum computer. Because of the noise in current real devices, it is necessary to consider the effect of the noise, but it is difficult to identify the noise in the actual quantum computers. Therefore, I assume the depolarizing noise model, which show that this model is reasonable based on the results of the actual devices. The value of the noise is also treated as an unknown parameter, that is, the problem is treated as a multi-parameter estimation problem. In chapter 5, I describe a new MLAE to improve the estimation error in the presence of depolarization noise, using another operator in a different space from the operators using in previous chapters. In chapter 6, I deal with an extended model of the depolarizing noise model described in Chapter 4. In extending the model, that is, increasing the number of parameters, the estimation of the interest parameter becomes impossible. Therefore, by introducing ancillary quantum circuit and use parameter orthogonalization method, I can estimate the parameter of interest only using one-dimensional maximum likelihood estimation instead of multi-parameter maximum likelihood estimation. Finally, I verify this method using a real quantum computer. In chapter 7, we summarize and discuss the prospects of this paper.			