

## 審査の結果の要旨

氏名 藤原 真吾

本論文は、イオントラップを利用した量子計算手法の提案およびその数値解析と量子アルゴリズム実行時に問題となるデコヒーレンスの定量的評価を行っており、9章より構成されている。

第1章は序論で研究の背景と目的を述べている。量子状態を bit に見立てて qubit として扱うことにより量子力学の基礎原理（重ね合わせ状態の実現・シュレディンガー方程式による時間発展・波束の収縮）を利用して実現される量子計算の原理およびこれまでの発展について説明を行っている。また量子計算機として提案されている物理系について概観した上でイオントラップの優位性から研究対象として選択したことを示している。その上で、イオントラップを用いた量子計算実装のためのスキームの提案および実行上最も問題となると考えられるデコヒーレンスの影響を数値的に評価することを本研究の目的としている。

第2章では量子計算と量子アルゴリズムについて概観している。量子計算で必要となる量子力学原理とそれを利用した量子レジスタおよび量子ゲートについて詳述している。さらにそれらを利用した代表的なアルゴリズムである Grover により提案された探索アルゴリズムと Shor により提案された量子フーリエ変換アルゴリズムについて、古典計算と比較した場合の優位性について説明し、量子アルゴリズムの意義を明らかにしている。

第3章ではイオントラップ量子計算機について解説している。イオントラップ量子計算機は、イオントラップに捕獲されたイオンをレーザー冷却することで、イオンの振動状態を量子化することにより、イオンの内部状態とイオンの重心の振動状態を利用したものである。これは Cirac と Zoller により提案された物理系でイオンの数が qubit 数と対応している。さらに CNOT ゲートが実験により実現されていることに言及し、実現に向けて問題となっているパラメータを明らかにしている。さらに複数の振動状態を利用できる Molmer と Sorensen により提案された手法について解説している。

第4章では量子計算の精度を下げる主要因である照射レーザーの揺らぎによるデコヒーレンスについて概説している。レーザー揺らぎをウィーナー過程によりモデル化し、それをマスター方程式である密度行列式に取り入れるための手法について解説している。さらにその手法で用いられるパラメータを実験結果と比較することにより推定している。

第5章ではイオントラップを利用した制御 Z ゲートの提案とその実現性について数値計算により評価している。特にレーザー強度揺らぎあるいはレーザー位相揺らぎ、さらに

両者が存在する場合のデコヒーレンスの影響について Grover のアルゴリズムおよび量子フーリエ変換に対して定量的に評価している。与えるデコヒーレンスの影響はアルゴリズムにより異なることを明らかにしている。また両者の効果は単なる和ではないことも示されている。さらにレーザ照射による加熱および時間あたりの加熱率についても qubit ごとに数値的に評価を行い、その振る舞いを明らかにしている。

第 6 章ではイオントラップを用いた多 qubit ゲートを効率的に構成する手法について提案を行い、それを数値計算により評価している。エンタングル状態として代表的な GHZ 状態を Cirac-Zoller スキームを用いて多 qubit ゲートで生成する手法を、量子回路を使って示し、既往の手法との比較を数値計算により行っている。この結果から特に qubit 数が少ない領域で効率的な手法であることが示されている。さらにレーザ揺らぎに起因するデコヒーレンスの効果を導入することでフィデリティの評価も行っている。

第 7 章では、新たな量子アルゴリズム開発や量子的な物理現象の解明に役立つと期待されている量子ランダムウォークをイオントラップ量子計算機で実現するための手法を提案している。まず量子ランダムウォークの意義について述べた後、基本ゲートである NOT ゲートと (controlled)<sup>2</sup>-NOT ゲートを利用して実現している。そのためこの手法は任意の qubit 数に拡張可能であることが特徴として挙げられている。

第 8 章では、Molmer と Sorensen のスキームにより、拡張可能な制御 Z ゲートと制御 NOT ゲートの実現方法を提案し、その数値解析を行っている。提案手法はパウリのスピン行列から得られる  $J_x^2$ ,  $J_y^2$  演算子を用いて実現している。多 qubit での挙動を明らかにするとともに、数値計算により各準位で構成される密度行列成分の時間変化を示して、その実現を確認している。さらにラビ振動数と調和振動数の比がフィデリティに与える影響を評価し、ラビ振動の割合が多くなるに従ってフィデリティが劣化していくことを明らかにしている。

第 9 章は結論であり、本研究のまとめが述べられている。

以上を要するに、本論文はイオントラップ量子計算機をもとにした拡張可能な量子ゲート実装手法の提案を行うとともに、密度行列を用いたマスター方程式によりその定量的な評価を行っている。さらに量子計算実現のために最も重要であるレーザ揺らぎによるデコヒーレンスの効果も定量的に評価している。こうした成果はシステム量子工学の進歩に貢献することが少なくない。よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。