

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 鈴木 泰成

量子計算は、量子力学の性質を活用して計算を行う手法で、現在の通常の計算機では計算時間が膨大になるある種の問題を効率的に解くことができると期待されている。典型的な量子計算機は、量子ビットと呼ばれる実効的な2準位物理系を基本要素とした構成を持つ。ごく近い将来、量子ビット数が50を超える中規模の量子計算機の実現が見込まれるが、その規模になると、通常の計算機の計算能力に由来する問題点がいくつか浮上する。本研究は、そのような問題に対する解決策や改善策の提示を行っている。

現実の量子ビットの挙動は理想的な挙動からわずかにずれているため、多数の量子ビットを組み合わせた量子計算機を正しく動作させるには、量子エラー訂正の仕組みが不可欠である。量子エラー訂正は、シンドローム値と呼ばれる物理量の観測により挙動のずれを推測し、できるだけ適切な訂正操作を選択することで実行される。ここで、シンドローム値から訂正操作を決定するプロセスには通常の計算機が用いられる。また、開発段階においては、量子エラー訂正機構の設計に応じて、訂正がどの程度有効に機能するかを、実機を作製する前に定量的に見積もることが重要となるが、そのためには訂正機構の動作を通常の計算機で予測、追跡することが必要となる。量子計算機が中規模以上になると、このような通常の計算機の計算時間が問題となり、適切な訂正操作を見つけられずに量子計算機を正しく動作させられない、あるいは、実機を作って動かす以外にその性能を予測できない、などの弊害が生じる。

本研究では、第一に、量子エラー訂正機構の動作時における状態変化を、マッチゲート回路との等価性を介して、通常の計算機で効率的にシミュレートする手法を提案した。効率的にシミュレートできる量子回路としては、マッチゲート回路のほかに、クリフォードゲート回路が知られている。量子エラー訂正の回路はクリフォードゲートで書けるため、発生するエラーモデルがクリフォードゲートで書ける場合には、自明に効率的シミュレート可能である。しかし、クリフォードゲートは離散個の種類しかないので、ビット反転や位相反転などの離散的なエラーしか扱えない。例えば、量子ビットを90度回転する操作がずれて91度回転してしまう、といった、実際に起こり得るエラーは、離散的なエラーのコヒーレントな重ね合わせであり、連続的なパラメータを持つ。本研究では、このようなコヒーレントなエラーがマッチゲートで記述可能なことに着目し、量子エラー訂正の回路を等価なマッチゲート回路に置き換えることで、コヒーレントエラーのもとでの量子エラー訂正機構の動作を効率的かつ正確にシミュレートする手法を導いた。とくに、現在最も主流の量子エラー訂正符号である表面符号にこの手法が適用可能であることを証明した。

第二に、シンドローム値から訂正操作を決定するための計算（復号）に機械学習モデルを利用する枠組みの一般論を構築した。教師あり学習では、モデルの学習に時間がかかるが、一度モデルを決めてしまえば、量子計算機の実行時には何度でも高速にモデルの計算

が行える利点がある。機械学習モデルを用いた先行研究では、復号のためにモデルに予想させるラベルを、とくに根拠なく発見的に設定していた。本研究では、エラーベクトルからラベルが線形に定義されるという仮定を置いて診断行列を導入し、その仮定のみに基づき、エラーモデルを限定しない一般的な枠組みを構築した。続いて、学習時間が長い極限で最適な復号モデルに収束するために診断行列が満足すべき条件を導いた。さらに、符号と診断行列によって定まる規格化感度と呼ぶパラメータを導入し、この値が、学習時間が短いことの影響が復号性能にもたらす程度を特徴づけることを示した。さらに、表面符号について、規格化感度に基づいて最適な診断行列を選択することで、先行研究よりも効率的に学習が行え、より大きな符号に適用可能であることを数値的に示した。また、数理的な復号手法が適用しにくい他の符号にも適用可能であることを数値的に示した。

本論文は5章から構成される。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、導入として本研究の背景について述べ、その上で本研究の概要を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、本論文で用いる記法の導入と、量子エラー訂正、クリフォードゲート、マッチゲート、教師あり学習の概略的な説明を与えている。

第3章では、1次元繰り返し符号による訂正過程をマッチゲート回路で置き換えることで、コヒーレントなエラーモデルのもとでも効率的かつ正確なシミュレートが可能であることを示し、さらに、閾値などの性能にエラーのコヒーレンスが与える影響を数値計算と近似モデルを用いて議論している。さらに、同じ手法が表面符号に適用可能であることを証明している。

第4章では、教師あり学習モデルを用いた復号手法について、診断行列を導入して一般理論を構築している。学習により高性能の復号モデルが得られるための診断行列の条件を導いている。その条件に基づき、表面符号とカラー符号の診断行列を最適化し、数値計算によって、学習モデルを用いた既存の方法よりも性能が向上したことを確認している。

第5章では、以上の結果をもとに本研究の主張を整理し、今後の課題と展望をまとめる。

以上のように、本研究では、コヒーレントなエラーのもとでの量子エラー訂正機構の性能を正確に予言する手法を初めて与えるとともに、訂正時に必要な復号の計算についても、汎用性の高い機械学習を用いた方法を既存のものから大きく改善した。前者は、量子計算機が通常の計算機より高速となる境界はどこにあるか、という根源的な問いに対しても新たな知見を与えるものである。後者は、単に機械学習を当てはめるのではなく、量子エラー訂正と機械学習の特性を反映した一般性の高い理論構築に基づくものである。このように、本研究の成果は、中規模の量子計算機の開発に直接有用であることに加えて、今後の研究分野の進展にも資するところが大きいと判断できる。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。