

審査の結果の要旨

氏名 上野 洋典

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、古典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おり、量子計算機の開発が盛んに進められている。特に、量子計算における基本要素である量子ビットを超伝導素子により実現している超伝導量子計算機が現在最も主流である。

量子ビットはノイズに弱く、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誤り訂正の仕組みが不可欠である。量子誤り訂正は、シンドローーム値と呼ばれる物理量の観測値から量子計算機に生じているエラーを推定し、それに対する適切な訂正操作を選択することで実行される。この訂正操作を選択するプロセスは復号と呼ばれ、復号器と呼ばれる古典計算機によって実行される。以下に挙げる理由から、この復号処理が量子計算機の規模の拡大を妨げていることが懸念されている。

第一に、復号処理の低速化によるノイズの蓄積の問題である。従来の復号プロセスでは、シンドローーム値の観測を十分な回数行った後に、蓄積されたシンドローーム値に対して復号処理を行うバッチ処理方式が一般的である。量子計算機の規模が大きくなるとシンドローーム値の観測回数が増大し、それに伴い復号処理も複雑となるため、復号処理を行う間に新たなノイズが蓄積してしまうという懸念がある。量子計算機の規模によらず、高速に復号を行う手法が求められている。

第二に、異なる温度環境間の配線の問題である。現在主流である超伝導量子計算機の場合、量子ビットは極低温環境を作り出す希釈冷凍機の中で動作するのが一般的である。一方、復号器は一般に室温環境で動作するため、量子ビットと復号器の間をつなぐ配線が必要となる。量子計算機の規模が大きくなるにつれて、これらの膨大な配線がボトルネックとなることが懸念される。復号処理に起因する異なる温度環境間の配線をなくするためには、極低温環境で動作する復号器の設計が必須である。

本論文では上記の第一の問題を解決するために、量子ビットにエラーが生じると即座に復号を行うことでエラーの蓄積を防ぐ「オンライン復号」に基づく復号アルゴリズムを提案している。また、第二の問題を解決するために、極低温環境で動作する超伝導古典回路の一種であるSingle Flux Quantum (SFQ) 回路を用いて復号器を設計する方法を提案している。これらの要素を組み合わせ、エラーの蓄積を防ぎつつ極低温環境で高速に復号を行う復号器を設計し、その復号器が極低温環境でのオンライン復号を行うのに十分な高速・低消費電力性を備えていることを評価している。また、設計した復号器の復号性能についても、数値計算により評価している。

本論文ではさらに、提案した復号器をニューラルネットと組み合わせることでより高精度に復号を行うように、あるいは論理演算、すなわち誤り訂正された量子情報同士の

演算をサポートするようにそれぞれ拡張している。後者について、これまでに提案されてきた復号手法の多くは単一の量子情報の誤り訂正のみを対象としており、本論文は論理演算をサポートするオンライン復号手法を初めて与えている。また、上記の拡張それぞれについてSFQ回路による復号器の設計を与えており、復号器の消費電力および数値計算による復号性能の評価を行っている。

本論文は「Online Quantum Error Correction Using a Superconducting Circuit」と題し、6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、導入として本論文の背景及び対象とする物理デバイスの特性について述べ、その上で本論文の貢献と概要を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、量子計算、表面符号を用いた量子誤り訂正、SFQ回路についての概略的な説明を与えている。また、近年の関連分野の主要な研究を挙げて研究の潮流を概観し、本論文の貢献を明確化している。

第3章では、オンライン復号の概念を導入し、それに基づく表面符号の復号アルゴリズムQECoolを提案している。また、そのアルゴリズムを実行する復号器をSFQ回路により設計し、回路面積や消費電力を見積もっている。さらに、提案アルゴリズムの復号性能および実行時間を数値計算により評価している。

第4章では、第3章で提案した復号アルゴリズムをニューラルネットワークによる復号手法と組み合わせることで、高精度なオンライン復号アルゴリズムNEO-QECを提案している。また、ニューラルネットを実行するプロセッシングユニットをSFQ回路により設計し、第3章で設計した復号器とあわせてNEO-QECを実行する復号器の消費電力を見積もっている。さらに、数値計算によってNEO-QECの復号性能を評価している。

第5章では、第3章で提案したQECoolを拡張し、論理演算をサポートする復号アルゴリズムであるQULATISを提案している。そのアルゴリズムを実行する復号器をSFQ回路により設計し、それに基づく誤り耐性量子計算アーキテクチャを考案している。また、提案手法が、万量子計算に必要な論理CNOT演算及び魔法状態蒸留回路の誤り訂正をサポートできることを数値計算により確認している。

第6章では本論文の主張を整理し、今後の課題と展望をまとめている。

以上、本論文はオンライン復号という概念を導入し、それに基づく復号アルゴリズムを提案している。また、提案するアルゴリズムをニューラルネットと組み合わせることで高精度にあるいは論理演算をサポートするようにそれぞれ拡張するとともに、復号器のSFQ回路による具体的な設計を与えている。このように本論文の成果は、オンライン復号アルゴリズム、論理演算をサポートする復号手法、超伝導回路を用いた極低温環境で動作する復号器という、現実的な誤り耐性量子計算に必須な要素技術を複数提案している。これらは超伝導量子計算機の開発に有用であることに加え、今後の研究分野の進展にも資するところが大きい。

よって本論文は博士（情報理工学）の学位請求論文として合格と認められる。