

審査の結果の要旨

氏名 部谷 謙太郎

本論文は「超伝導量子演算回路の設計・制御・評価技術」と題し、拡張性の高い方式に則って量子ビットを集積化した超伝導量子演算回路を対象とする研究成果をまとめたものである。量子ビット集積回路の設計・制御・評価技術として、周波数衝突の理論的解析、多重モード制御を用いた高速もつれ生成、異方的ゲートエラー増幅による精度と堅牢性を両立した制御較正、固定長変分量子回路を用いた量子系ダイナミクスシミュレーションの4つの研究成果が報告されている。

大規模な誤り耐性量子計算の実現に向けて、制御の品質を損なわずに量子演算回路を拡張するための技術開発が急務とされている。量子演算回路内の量子ビットは互いに相互作用しており、その部分系は周囲の量子ビットからなる非マルコフ的外場にさらされた開放量子系とみなすことができる。本論文は、超伝導量子コンピュータ実装における困難に対し、量子演算回路の設計・制御・評価の観点から複数の技術提案を行い、それぞれの課題を克服する方策を理論的あるいは実験的に示している。

一つ目の技術提案では、フロッケ理論を用いた量子演算回路上の量子ビット周波数構成の設計法を示している。マイクロ波で駆動されている状況下の量子演算回路をフロッケ理論により解析することで、マイクロ波駆動で誘起される不要な状態間遷移による制御エラーを生じうる、不適切な量子ビット周波数の配置を高速かつ効率的に検知することができる。本手法を用いることで、従来解析されてこなかった同時多重モード制御という複雑な状況下で発生する制御エラーを見出すことが可能となり、量子演算回路設計に際してエラー要因の洗い出しに貢献できる。

二つ目の技術提案では、多重モード制御を用いた高速な量子もつれゲート実装法を示している。周波数固定型の超伝導量子ビット間で従来標準的に使用されてきた単一モード制御による量子もつれゲートでは、量子ビットの高励起準位への状態リークが存在により、実行速度と忠実度の上にトレードオフが生じていた。多重モード制御を導入することで、ゲート実行速度の高速化と状態リーク量低減による高忠実度化を両立させることが可能であることを示し、実験においても従来手法と比較して高速かつ高忠実度な量子もつれゲートの生成に成功している。

三つ目の技術提案では、異方的ゲートエラー増幅法を提示した。本手法は、任意のパウリゲートに含まれる特定のパウリ軸回転エラーのみを選択的に増幅し、他のパウリ軸回転エラーを全て抑制するパルスシーケンスの設計法である。本手法を用いた実験では、従来手法よりも高いエラー増倍率が達成されることを確認している。

本論文ではさらに、これらの技術提案を踏まえたうえで、量子演算回路用制御パルス列生成器と自動・並列制御較正フレームワークを開発し、16量子ビット量子演算回路上で量子制御を実装することに成功している。さらにその上で、新たに提案した量子ダイナミクスシミュレーション法を実装することに成功している。

本論文は全11章からなる。以下に各章の内容を要約する。

まず第1章では、導入として、量子計算機工学の成り立ちから昨今の潮流について説明し、近年の先行研究を取り上げながら今後の課題を明確にすることで、本研究の意義を位置付けている。

次に第2章では、超伝導回路を量的に取り扱うための理論的手法が説明されている。本研究の実験結果を説明するために必要なモデルが説明されている。

第3章では、量子制御の駆動原理や実装精度を解析するための理論的手法が説明されている。

第4章では、超伝導量子ビットを拡張可能な形式で集積化するアーキテクチャについて、関連技術と併せて説明している。

第5章では、本論文で用いられた実験系について、以降の制御・測定に要求される性能を議論しつつ説明している。

第6章では、本論文で用いられた各種量子制御の較正方法とその結果が説明されている。

第7章では、フロッケ理論を用いた量子演算回路の周波数構成設計法について理論提案を行い、その適用範囲を明らかにしつつ、説明している。

第8章から第10章では、それぞれ、多重モード制御を用いた高速もつれゲート実装法、異方的ゲートエラー増幅法、固定回路長変分量子回路を用いた量子系時間発展シミュレーション法についての理論を提案し、従来手法に対する優位性を明らかにしつつ、実験結果と併せて説明している。

第11章では、本論文の結論と今後の展望についてまとめている。

これらの成果は、大規模誤り耐性量子計算に向け、量子演算回路の制御品質を損うことなく規模を拡張するという工学的課題に大きく寄与するものであり、同時に量子多体系の精密制御という複雑系の物理の問題に挑み理学的なフロンティアを拓くものである。

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る。