

## 審査の結果の要旨

氏 名 佐藤 貴彦

量子コンピュータを実現する有望なモデルとして測定型量子計算方式が提案されている。2次元や3次元のクラスタ状態を計算資源に用いた測定型量子計算は、Surface codeなどのエラー訂正符号が運用可能であり、従来の回路型量子計算と比較して高いエラー耐性を持ち得ることから注目を集めている。近年、実用的な測定型量子計算が必要とする高精度かつ大規模なクラスタ状態の生成を目指した様々な研究が進められている。

本論文は、格子点上に配置された超伝導磁束量子ビットとイジング型相互作用を用いたクラスタ状態の生成手法を複数提案している。第3章では、隣接する超伝導量子ビット間に常時イジング型相互作用が働いている系を想定し、測定および量子Feedforward操作という1量子ビット操作の組合せによる相互作用のスイッチング手法を提案している。また、同手法を用いることで系の量子ビット数に依らない定数ステップでの2次元および3次元クラスタ状態の生成手順を示している。第4章では、従来手法である磁場結合を用いた相互作用ではなく、電荷結合を用いることで超伝導磁束量子ビット間に印加電圧による強度調整が可能なイジング型相互作用の生成手法を与え、さらに同手法を用いた定数ステップでの2次元クラスタ状態の生成手順を提案している。

本論文は、上述の主要研究貢献部分を軸に、5章から構成されている。第1章および第2章において、研究概要と論文構成と共に関連研究について記述されている。本論文の目標としているクラスタ状態とは、格子点上に設置された複数の量子ビットを $|+\rangle$ 状態と呼ばれる $|0\rangle$ と $|1\rangle$ の重ね合わせ状態に用意し、隣接する量子ビット間に制御位相ゲートと呼ばれる2量子ビット操作を施すことで生成される。制御位相ゲートの実装手法の1つとして、イジング型相互作用を適切な時間働かせる方法が存在する。また、本論文では超伝導磁束量子ビットを系として想定している。同量子ビットは、強い非調和性を持つことで比較的高速かつ高精度な1量子ビット操作が可能であり、測定後も量子ビットとしての機能が失われない非破壊測定が可能であるという利点がある。

第3章において、隣接する格子点上の量子ビット間に常時作用しているイジング型相互作用の実効的な制御手法が提案されている。超伝導磁束量子ビット間の相互作用は印加磁場により生成する手法が知られているが、磁場の局所的な印加は難しいため、任意の量子ビット間に相互作用を働かせるには、他の量子ビットへのクロストークを抑制するために新たな磁場を印加するなどの操作が必要となる。系の量子ビット数が増えるに従ってこの操作は複雑になり、磁場の操作を用いて任意の量子ビット間に制御位相ゲートを作用させることは難しくなる。本論文では磁場の調整により各隣接量子ビット間にある程度近い強度のイジング型相互作用が働いている系が想定されており、一部の量子ビットを相互作用のon/offスイッチングのために用いる手法が提案されている。スイッチングのための量子ビットの測定および測定結果に基づく量子Feedforward操作により、系の磁場を操作することなく相互作用を実効的に制御し、適切な量子ビット間へ制御位相ゲートを作用させることができる。また、それぞれの相互作用強度が不均衡であ

ってもEcho pulseと呼ばれる手法により均衡させることが可能なこと、制御位相ゲートに最適な各パラメータなどが示されている。さらに、これらの手法を組合せることによる定数ステップでの2次元・3次元クラスタ状態の生成手法が示されている。

第4章において、印加磁場を用いる従来手法とは異なる印加電圧による相互作用の生成手法が提案されている。キャパシタにより接続された超伝導磁束量子ビットの双方に電圧を印加することで量子ビット間にイジング型の相互作用が発生する。この時、相互作用強度は電圧により調整可能であり、各々の量子ビットは磁場ゆらぎに対する最適点に維持されている。多数の量子ビットが同一回路上で接続されている場合、電圧が印加されている全ての量子ビット間に相互作用が働くが、複数のキャパシタを介した量子ビット間の相互作用は指数関数的に弱まることが示されている。これにより、有害な非隣接間相互作用を十分に抑制した上で制御位相ゲートに適した隣接間の相互作用強度を得られるようなパラメータが示されている。これらの結果はHamiltonianをシミュレーションにより解析により得られており、その導出と必要となる関数・擬似コードなどが記されている。また、これらの手法とEcho pulseとを組合せることにより、定数ステップでの2次元クラスタ状態の生成手法が提案されている。

第5章において、これらの結果を総括するとともに、今後の展望に関する議論が行われている。

全体として、本論文では超伝導量子ビット系において測定型量子計算を実現するために必要な初期クラスタ状態の生成について、複数の独自方式を提案し、その有効性をシミュレーションにより示すことで、より多数の量子ビットの量子計算を実現することを可能とする成果をあげている。

なお、本論文の一部は共同研究によって得られたものであるが、申請者が主体的に研究して得られた成果であることを確認している。

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。