

京都大学	博士 (工学)	氏名	藤井 啓祐
論文題目	Fault-Tolerant Quantum Computation on Logical Cluster States (符号化されたクラスター状態を用いたフォールトトレラント量子計算)		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、符号化されたクラスター状態を用いたフォールトトレラント量子計算について研究した結果をまとめたものであって、6章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、量子力学に固有の性質であるコヒーレンスやエンタングルメントを利用した量子情報処理について概観し、環境系との相互作用によって生じる雑音 (デコヒーレンス) の問題の重要性について述べている。そして、本論文の主題となる、雑音が不可避である現実の物理系を用いて量子計算を行うためのフォールトトレラント理論の必要性を述べている。</p> <p>第2章では、量子コンピュータの基本的な概念である、量子ビット (量子情報単位)、ユニバーサル量子計算、スタビライザー形式、一方向量子計算 (クラスターモデル) について概説している。また、量子情報を雑音から保護する方法である量子誤り訂正符号、それを用いたフォールトトレラント量子計算について説明している。そして、特に本論文に関連する事柄であるトポロジカル量子計算と事後選択による量子計算について紹介している。</p> <p>第3章では、符号化された量子ビットを用いた一方向量子計算による接続量子計算の構築とその性能評価を行っている。これは、従来の階層的符号化による接続量子計算がサーキットモデルに基づいており、それとはまったく異なる方式である一方向量子計算には用いることができないためである。この方法では、量子誤り訂正符号で符号化された量子ビットのクラスター状態を、適切な検査と事後選択を行いながら一方向量子計算により生成する。このようにして非常に高い精度の符号化されたクラスター状態が得られ、それらをつなぎ合わせることでより階層的にフォールトトレラント量子計算が実行できるようになっている。また、この方法では符号化されたクラスター状態に対する誤り確率がよい近似で容易に評価できることから、フォールトトレラント量子計算のしきい値 (許容できる誤り確率の上限) を導出している。さらに、この評価の妥当性をモンテカルロ数値計算でも確認している。この結果、これまで最も高いしきい値を与えていた Knill の方法と同程度のしきい値 3% が達成されることを示している。ここでは Steane 7 量子ビット符号を用いているが、従来のサーキットモデルで同じくこの符号を用いている代表的な Steane の方法と比べ、しきい値が一桁も改善されることがわかった。また、計算のためのリソース (物理的量子ビットと量子演算) も Steane の方法と比べてずっと少なく済むことも明らかにしている。</p> <p>第4章では、前章で導入した二重選別という状態検査と事後選択を有効に行う方法をエンタングルメント純粋化に応用している。量子通信においては高い純度のエンタングル状態 (量子相関をもった状態) を多者間で共有することが重要となる。通信路における雑音によって純度が下がってしまったエンタングル状態の純度を高くする方法がエンタングルメント純粋化である。ここでは、二重選別による純粋化法を提案し、その性能評価を行っている。これまでの多くの研究では、純粋化を行う局所演算には</p>			

氏名	藤井 啓祐
----	-------

雑音がないものとされていた。しかしながら、実在するデバイスを用いることを念頭に、局所演算における雑音の影響も考慮した評価を行っている。また、雑音のある演算を用いた場合に抽出可能なエンタングル状態の純度の上限も一般的考察から求めている。この結果、提案した二重選別の方法を用いると、従来の一重選別の方法に比べてずっと高い純度が得られ、低雑音領域では純度の上限値が達成されることを明らかにしている。さらに、雑音に対する許容条件もかなり緩和される。

第5章では、第3章の接続量子計算とは異なったアプローチによるフォールトトレラント量子計算の構築を行っている。まず、符号化された量子ビットを検証しながら連結し、高い精度のクラスター状態を有効に生成する方法を提示している。そして、このように生成されたクラスター状態を用いてトポロジカル量子計算を行っている。ここでは、符号化に加えてトポロジー的性質で量子情報がさらに堅牢に保護されている。この結果、かなり高いしきい値を少ないリソースで達成できることが明らかになっている。量子ビットの符号化に Steane 7 量子ビット符号を用いた場合のしきい値は 2% で、従来最も性能の高かった Knill の方法と同程度となり、リソースは二桁以上も改善されている。また、23 量子ビット符号を用いると、4% という高い誤り確率においても妥当な量のリソースを用いて量子計算が実行できることを示している。そして、しきい値はさらに高く、5 から 10% と推定できて、現在のところ最も雑音に強い量子計算法となっている。さらに、これ以上しきい値の改善が一般に望めないことも示唆している。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、クラスター状態を用いた一方向量子計算に関する研究成果をまとめたものである。量子計算を実際に行うには、誤り確率が一定値（しきい値）以下のときに十分な精度の計算が実行できること（フォールトトレランス）が不可欠であり、このため量子誤り訂正符号を用いて量子情報（量子ビット）を保護している。本論文では、量子ビットのクラスター状態の生成とその測定により計算を実行する一方向量子計算の特徴に基づき、符号化されたクラスター状態の生成を適切な事後選択によって行うことで、妥当なリソースを用いた高いしきい値のフォールトトレラント量子計算を行う方法を構築している。得られた主な成果は次のとおりである。

1. クラスター状態を階層的に符号化し、それによる一方向量子計算の性能を評価している。従来の階層的符号化による接続量子計算はサーキットモデルに基づいているので一方向量子計算には適用できない。そこで、新たに考案した方法では、符号化されたクラスター状態の生成および適切な検査と事後選択を一方向量子計算で実行し、得られた高い精度のクラスター状態をさらにつなぎ合わせて階層的符号化を行っている。これによりフォールトトレラントに一方向量子計算が実行される。そして、この方法では生成されたクラスター状態の誤り確率をよい近似で容易に評価することができ、3%というきわめて高いしきい値が達成されることを示している。

2. つぎに、一方向量子計算で導入した二重選別という状態検査と事後選択を有効に行う方法をエンタングルメント純粋化に応用している。クラスター状態などのエンタングル状態の純度を高めることは、量子計算や量子通信において重要である。二重選別を用いたエンタングルメント純粋化法の性能評価を行い、従来の一重選別と比べ、この方法が量子状態、量子通信路や演算における雑音を除くのに最適なものとなっていることを明らかにしている。

3. さらに、接続量子計算とは異なるアプローチによるフォールトトレラント量子計算も考えている。すなわち、符号化されたクラスター状態を用いてトポロジカル量子計算を実行する方法を提案している。この結果、4%という高い誤り確率においても妥当な量のリソースを用いて量子計算が実行できることを示している。また、しきい値はさらに高く5から10%と推定でき、現在のところ最も雑音に強い量子計算法となっている。そして、これ以上しきい値の改善が一般に望めないことも示唆している。

以上、本論文は、クラスター状態を用いた一方向量子計算について、符号化された量子ビットによる任意のサイズのクラスター状態を、妥当な計算リソースかつ高い精度で生成する方法を提示し、それによって高い誤りしきい値でフォールトトレラント量子計算が実行できることを明らかにしており、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、平成23年1月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。