

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 横山 翔竜

量子情報科学において、量子状態を自在に操作することは究極的な目標である。測定誘起型量子状態操作とは、補助状態と測定により間接的に量子状態操作を行う手段として近年提案されたものである。測定誘起型量子状態操作では、補助状態である多体系の量子エンタングルド状態に対し操作対象の量子状態をエンタングルさせた後、測定と適切な補正を繰り返すことによって量子状態操作が達成される。特に、測定基底を適切に制御することで、任意の量子状態に対し任意の操作が実現可能である。補助状態には任意の多体系の量子エンタングルド状態が利用できるわけではなく、クラスター状態のような特定の量子状態に限られている。また、操作の自由度は補助状態に利用する多体系の量子エンタングルド状態のサイズに依存する。したがって、大規模な量子状態操作を実現するためには、まず測定誘起型量子状態に利用可能な大規模な量子エンタングルド状態を生成する必要がある。また、操作を高速に行うためには、繰り返し行われる測定と適切な補正のプロセスを高速化する必要もある。

本研究では、過去に論文提出者が測定誘起型量子状態操作の枠組みでの小規模な量子状態操作の実証実験に成功していることを踏まえ、時間領域多重と高速化の新たな技術を導入し、大規模な量子状態操作の実現に向けた新たな広がりとして、2つの方向性で発展させている。具体的には、量子エンタングルド状態生成の大規模化と、高速な測定誘起型量子ゲートの構築である。大規模化としては、時間領域多重による大規模量子エンタングルド状態の生成に成功した。高速化としては、波束モードに対し動作する量子非破壊相互作用ゲートの構築に成功した。

本論文は以下の9章からなる。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略を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、後続の章で必要となる基本的な理論について述べている。量子光学、基本的な量子状態、量子状態操作を表す演算子を紹介している。また、量子状態に関する指標として、与えられた量子状態がエンタングルドした状態であることの種々の十分条件について詳細に述べている。

第3章では、測定誘起型量子状態操作として、クラスター状態とそれを用いた一方向量子計算について述べている。まず、クラスター状態を紹介し、量子光学的な手法を用いた生成方法についての一般論を述べている。また、量子テレポーテーションについて述べた後、その応用としてのクラスター状態を利用した一方向量子計算、およびそのユニバーサリティーについて述べている。

第4章では、時間領域における量子状態の取扱い方としてモード関数について述べてい

る。ホモダイン測定について述べ、それにより得られる電圧値をスペクトラムアナライザーで取得する従来のサイドバンドモードと、オシロスコープで取得しモード関数でフィルタリングする波束モードとの違いについて述べている。また、ホモダイン測定した信号が電氣的フィルターを経由した場合についての取り扱いについて、種々のパラメータを紹介すると共に述べている。さらに、後続の章で使用したモード関数の形状について比較している。

第 5 章では、時間領域多重による大規模量子情報処理の理論について述べている。時間領域多重の手法を用いることで、装置を肥大化させることなく大規模な量子エンタングルド状態を生成することが可能となることを示し、拡張 EPR 状態と呼ばれる大規模エンタングルド状態の生成方法について述べている。また、拡張 EPR 状態を実際に生成した場合、生成された状態がエンタングルド状態であることの十分条件を示している。さらに、拡張 EPR 状態を用いることで、任意の 1 モード量子状態に対する任意の量子状態操作が可能であることを示している。

第 6 章では、時間的に変調信号を遮断する方法により拡張 EPR 状態を生成する実験について述べている。第 5 章で述べた十分条件を用いて、生成された状態では約 16,000 モードがエンタングルしていることが示されている。

第 7 章では、周波数的に変調信号を遮断する方法により拡張 EPR 状態を生成する実験について述べている。用いた電気フィルターによる影響を考慮し、最適なモード関数の形状や独立性について述べている。第 5 章で述べた十分条件を用いて、生成された状態では 120 万モード以上がエンタングルしており、第 6 章の実験とは異なり制限のない大規模なエンタングルド状態の生成に成功したことが示されている。

第 8 章では、波束モードに対して動作する量子非破壊相互作用ゲートの実証実験について述べている。100MHz までフラットなゲイン、線形な位相特性を持つ広帯域ホモダイナミクディテクター、および半値半幅 80MHz の広帯域な光パラメトリック発振器を用いることで、高速な量子ゲートの構築を行っている。出力状態の検証では、二つの独立な真空状態がエンタングルしていることが観測されており、100MHz 帯までゲートが動作していることが示されている。また、構築したゲートにコヒーレント状態や、非ガウス型状態を入力する方法が示されている。

第 9 章では、本研究をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では、時間領域多重と高速化により、大規模量子エンタングルド状態の生成および高速な測定誘起型量子ゲートの実証実験を行った。時間領域多重と高速化の技術開発を行うことで、安定的な大規模エンタングルド状態の生成に初めて成功し、さらにそれを利用するための高速な量子ゲートが実現されたことになる。本研究の成果は、大規模量子情報処理を実現する上で、重要な意義があるものと認められる。

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。