

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 三輪 佳史

連続量量子情報処理の分野において、量子テレポーテーションは量子情報処理の基本となる構成単位であることが知られている。量子テレポーテーションは任意の量子状態を無条件に伝送する手法であり恒等操作と見なすことができる。これを基本として、リソースとなる量子もつれ合い・射影測定の部分を置き換えることで様々な量子状態操作を無条件に行うことができる。近年、こうした無条件な量子状態操作が報告され始めた中で、強い非古典性を持った状態を操作すること、多モードの状態操作に拡張することの2点はこれまで実現されていなかった。それらの実現が難しい理由としては以下の点がある。前者については、非古典性の強い状態が光子検出を用いることでしか生成できず、時間領域かつ広帯域に状態操作を行う必要があり、従来の周波数領域におけるサイドバンド成分の手法を用いることができなかつた点である。また前者・後者ともに、非古典性の強さあるいは量子相関の強さはデコヒーレンスに対する弱さと対応し、デコヒーレンスを十分に小さく抑えることが難しかった点である。本研究は、これらの実験的な問題を解決し、強い非古典性をもった状態である『奇数光子状態の重ね合わせ』をテレポーテーションベースで無条件に操作することと、2モードの状態操作を実現することを目指したものである。

本論文は以下の7章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、本研究の背景となる量子力学の発展の経緯に触れながら、本研究の主眼である量子テレポーテーションを応用した量子状態操作の意義について述べている。また、本研究で扱った種々の量子状態操作それぞれについて、過去の研究や今後の研究の中での位置付けを述べている。

第2章では、本研究に関する量子光学の理論を述べている。その中で、扱う二つの非古典状態である『単一光子状態』と『コヒーレント状態の重ね合わせ』の特徴を、波動的描像である直交位相振幅の分布、粒子的描像である光子数分布、非古典性の指標となる負のWigner関数の3つで示し、比較している。また二つの非古典状態の相互変換が『スクイーミング』に対応することを示している。また、スクイーミング操作を多モード操作あるいは非ガウス操作に応用する手法を述べている。

第3章では、二つの非古典状態（単一光子状態、コヒーレント状態の重ね合わせ）の生成実験について述べている。非古典状態生成の原理とそれを実験で実現するまでを示し、また、非古典状態が存在する波束の波形を推定する手法の探求をまとめ、そして実験結果で得られた高純度な非古典状態を示し考察している。

第4章では、より粒子的な単一光子状態と、より波動的なコヒーレント状態の重ね合わせとを、相互変換する実験について述べている。変換に用いるスクイザーは量子テレポーテーションの応用であり、任意の状態を無条件に操作することが可能である。また、非

古典状態の波束を扱うために、このスクイザーを時間領域かつ十分に広帯域に実現する必要があることと、そのために行ったスクイーズド光の広帯域化、12 m の光学遅延光路の安定化、ノイズの低減、干渉計の相対位相安定化を具体的に述べている。実験結果では、直交位相振幅の分布の変化から周期性・非周期性の獲得を、光子数分布から光子対生成・消滅を、Wigner 関数から非古典性の維持をそれぞれ確認している。これらから単一光子状態とコヒーレント状態の重ね合わせの無条件な相互変換に成功したことを示している。

第5章では、スクイージング操作を応用した多モード操作について行った研究を解説している。2入力2出力のエンタングリング操作である『量子非破壊相互作用（加算ゲート）』と『光増幅器（2モードスクイージング）』を実現したことを示し、また、それらをさらに応用し、相互作用によるデコヒーレンスを打ち消す操作である『量子消去』、量子状態の『クローニング』を実現したことを示している。

第6章では、量子テレポーテーションを構成要素としてシステム化した一方向量子情報処理について行った研究を解説している。この手法を1モード・1ステップだけ行った『二次位相操作』について述べ、また、多モードかつ多ステップの操作のリソースとして必要となるクラスター状態（多数モードの量子もつれ合い）についてその生成に向けて行った『4モードクラスター状態の多数同時生成』と『クラスター状態のシェイピング』について述べている。

第7章では、本研究をまとめ、今後の展望を示している。

以上のように、本研究では量子テレポーテーションを応用した多数の無条件な量子状態操作を実現した。過去の研究と比較すると、時間的に局在した状態を操作したこと、多モードの操作を行ったことが新しい。またそれにより、粒子性の強い状態と波動性の強い状態間の相互変換という極端な変換を無条件に行った初めての研究でもある。今後の研究においても、非古典状態は光子検出あるいは光子数測定によって時間的に局在して得られることが予想され、本研究で実現した時間領域の状態操作の対象あるいはリソースとして組み合わされることが期待される。本研究の成果は新たな量子状態操作の実現への可能性を示しており、ユニバーサルな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。