

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 李 憲之

連続量量子情報処理の分野において、シュレーディンガーの猫状態と呼ばれる、マクロスコピックな2つのコヒーレント状態の重ね合わせによって成り立つ状態が近年注目を集めている。このシュレーディンガーの猫状態の最大の特徴は、Wigner 関数が負の値をとるということである。この特徴は、状態が非ガウス型であることの十分条件であり、また量子テレポーテーションにおいてフィデリティ  $2/3$  以上でないと負の Wigner 関数を転送することが出来ないことから、状態の非古典性を示す証拠となり得る。一方、量子テレポーテーションは最も基本的な量子情報処理プロトコルとして知られている。量子テレポーテーションの構成要素に全てのガウス型操作が含まれていることから、量子テレポーテーションを高いフィデリティかつ様々な入力状態に対して行うことが、種々の量子状態操作を実現することに直結する。しかし、これまでに報告されている量子テレポーテーションでは、入力状態としてガウス型の状態のみが用いられている。非ガウス型の状態に対する量子状態操作は、量子テレポーテーションも含めて報告されていない。この理由は2つ考えられる。1つは、シュレーディンガーの猫状態を含めた、これまでに実験的に生成が実現されている非ガウス型の状態は、その生成過程から時間領域において測定を行う必要があり、従来のように周波数領域におけるサイドバンド成分を用いて実験を行うことができないことである。もう1つは、状態の非古典性を示す負の Wigner 関数がデコヒーレンスに対して脆弱なため、これを量子テレポーテーションするためには高いフィデリティが要求されることである。本研究は、非ガウス型の状態であるシュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションを実現するため、これらの実験的な問題を解決し、負の Wigner 関数を量子テレポーテーションの出力において観測することを目指したものである。

本論文は以下の5章からなる。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、シュレーディンガーの猫の思考実験や量子エンタングルメントなど、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、本研究で扱うシュレーディンガーの猫状態の特徴と、この状態の量子テレポーテーションを実現することの意義を述べている。

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、シュレーディンガーの猫状態の最大の特徴として非古典性が負の Wigner 関数によって表されること、またその負の Wigner 関数を量子テレポーテーションするために必要なフィデリティについて述べている。さらに、シュレーディンガーの猫状態がその生成過程により時間領域で定義されること、時間領域で高フィデリティな量子テレポーテーションを実現する上で量子エンタングルメントの広帯域化が必要であることを述べている。

第3章では、本研究の実験において行ったことを述べている。特に、時間領域の量子テレポーテーションを高フィデリティ化するために、量子エンタングルメントを生成する光

共振器の広帯域化、古典チャンネルの広帯域化、長距離光路の安定化、補助光由来のレーザノイズの対策のために行った位相制御のサンプルホールドやノイズイーターについて、それらに必要な機器の作製や、具体的な運用の方法について解説している。

第4章では、得られた実験結果をまとめて示している。まず、量子エンタングルメントが広帯域で生成されていることと、それが時間領域の量子テレポーテーションにおいて有効であることを示している。続いて、真空状態を入力として量子テレポーテーションを行い、時間領域においてフィデリティ 0.83 が得られたことを示している。最後にシュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションを行った結果を示している。入力状態としてシュレーディンガーの猫状態を生成し、その状態が負の Wigner 関数(最小値 $-0.171 \pm 0.003$ )で表される非古典性を持っていることを示している。さらにそのシュレーディンガーの猫状態の量子テレポーテーションを行い、出力において負の Wigner 関数(最小値 $-0.022 \pm 0.003$ )を観測し、非古典性の量子テレポーテーションに成功したことを示している。

第5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、本研究では時間領域において高フィデリティな量子テレポーテーションを実現した。得られたフィデリティは、従来のサイドバンド成分の量子テレポーテーションにおいて得られたフィデリティのうち、すでに論文として報告されているものの中で最高の値に匹敵するものである。また、負の Wigner 関数を持つシュレーディンガーの猫状態を生成し、この状態を入力として時間領域で量子テレポーテーションを行い、出力においても負の Wigner 関数を観測した。負の Wigner 関数で示される非古典性をもつ量子状態に対し、量子テレポーテーションのような量子状態操作が可能であることを始めて示したものである。本研究の成果を用いれば、シュレーディンガーの猫状態の他にも、単一光子状態のような時間領域で生成される量子状態も同様に扱うことができ、また量子テレポーテーションを応用することで可能になる様々な量子状態操作(ユニバーサルスクイーズ、クラスター計算、量子非破壊測定など)を、それらの量子状態に対して行うことが可能となる。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。