

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 武井 宣幸

近年、次世代の情報処理技術として量子情報処理が盛んに研究されており、量子力学的効果を情報処理に取り入れることによって従来の情報処理の性能を大きく上回ることが期待されている。その量子情報処理の研究において、量子エンタングルメントという非局所的相関を生成・制御することが最も重要な課題の一つである。その量子エンタングルメントを積極的に活用した技術の一例として、量子テレポーテーションという新たな通信技術が挙げられる。本研究は量子光学の手法を駆使し、特に連続変数を扱う系において、その量子テレポーテーションの研究に取り組んだものである。

量子テレポーテーションとは、未知かつ任意の量子状態を、量子エンタングルメントと古典通信路を用いて転送する技術である。本研究では共役物理量である光の直交位相振幅を連続変数として扱い、既に報告されているコヒーレント状態の転送実験を発展させ、さらに非古典的状态であるスクイーズド状態の転送、および量子エンタングルメントの転送、つまり量子エンタングルメントスワッピングの実験を行うことを目的とした。これらの非古典状態の転送を検証した実験から、量子テレポーテーション実験の検証方法について新しい知見を得たものである。

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、量子情報処理および量子テレポーテーションに関する研究など、本研究の背景について紹介し、これらを踏まえた上で本研究の目的を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、量子テレポーテーション実験を行うために用いた量子光学の基礎とその実験手法について述べている。まず電磁場を量子化し、それから得られる光の量子状態を整理している。次にそのような量子状態の一般的な操作方法および測定方法を解説している。次に本研究で用いるスクイーズド状態の生成理論について解説し、さらにその生成実験の詳細を説明している。

第3章では、本研究で行った量子テレポーテーションについてその基礎事項を述べている。まず、量子エンタングルメントの性質について述べ、その実験における生成方法および検証方法を説明している。次に、量子テレポーテーションの理論的枠組み、および4章から6章で述べる各々の実験に共通する事柄についての詳細を解説している。さらに、量子テレポーテーション実験の検証に用いるフィデリティという指標と、量子エンタングルメントを使用しない場合の古典限界の概要を説明している。

第4章では、光のコヒーレント状態を入力とした量子テレポーテーション実験について述べている。まず系が不完全な場合の実験についての詳細な解説をし、それから後の章にも共通する古典通信路の製作について述べている。本研究では、実験系を安定化し量子エンタ

ングルメントの相関の度合いを改善することにより、これまでに報告されたフィデリティの最高値0.70を実現している。純粋状態であるコヒーレント状態に対してフィデリティ $2/3$ を越えることは量子情報処理の分野において安全面などから重要な意義があり、その値を越えている実験系を構築している。

第5章では、非古典的な状態であるスクイズド状態を入力とした量子テレポーテーション実験について述べている。本研究では量子テレポーテーション装置がスクイズド状態という非古典的な入力に対して適切に動作し、その非対称な量子ゆらぎが転送されることを検証している。また、実験で得られるスクイズド状態はその生成過程の損失から一般に混合状態となるため、既存のフィデリティではなく混合状態に対するフィデリティを導入して古典限界を議論している。その際に純粋状態から少しでも混合状態へ移行した場合に、古典限界の値が急激に増加することからフィデリティを成功基準とすることへの問題点を挙げている。

第6章では、量子エンタングルメントを入力状態とした量子テレポーテーション実験、つまり量子エンタングルメントスワッピング実験について述べている。本研究では、この実験を通じて量子エンタングルメントという非局所的相関が量子テレポーテーション過程において維持されることを検証している。特に量子テレポーテーションの意義を任意の状態の転送であると考え、それを達成できる条件において実験を検証している。さらにここではフィデリティを用いずに量子テレポーテーションを評価しており、既存の検証とは異なる方法で実験を評価できることを見出している。

第7章では、本研究の結果をまとめ、最後に課題と今後の展望を述べている。

以上のように、本研究は量子光学の手法を駆使して連続変数での量子テレポーテーション実験を行った。コヒーレント状態の転送においては実験系を改善しフィデリティ 0.70 とこれまでの最高値を得た。次に非古典状態であるスクイズド状態の転送を検証した実験から、混合状態に対するフィデリティの問題点を見出した。さらに量子エンタングルメントスワッピング実験において、量子エンタングルメントがテレポーテーション過程において維持されることを検証した。また、フィデリティを用いずにその実験を評価し既存の方法とは異なる角度から実験を検証した。これらの研究は、量子テレポーテーション実験を改善し、また非古典的な量子状態を転送・検証すると共に、その実験において異なる評価方法を与える新たな知見を与えた点で重要な意義があり、物理工学の発展への寄与は大きい。

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。