

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 武田 俊太郎

これまで目覚ましい発展を遂げてきた現代の情報処理技術も、近年その性能が原理的限界に近づきつつあると言われている。一方で、量子力学の原理を応用した新しいタイプの情報処理（量子情報処理）によって、従来の物理的限界を超える大容量通信や、特定の問題を超高速で解く量子コンピューターが実現できると予測されている。そのような量子情報処理の中で、情報のやり取りや論理演算回路の実装を担う最重要技術の一つが量子テレポーテーションである。量子テレポーテーションは、量子の情報を遠隔地へ転送する一種の通信技術として考案され、1990年代後半に光を用いて実現された。光を用いた量子テレポーテーションには、「光子で表現された離散量の量子状態を転送する手法」と「光波の振幅と位相（直交位相振幅）で表現された連続量の量子状態を転送する手法」という、独立な2つのアプローチがある。しかし、前者は転送効率が原理的に低く制限され、更に事後選択処理が必要であること、後者は決定論的に動作するが転送忠実度が低く制限されることが主な問題点であった。今日に至るまで多数の関連実験が行われてきたが、本質的な問題点は未解決のまま、実用化へ向けた障壁となっていた。

本論文は、これらの問題点を克服するため、従来の延長にない新しいアプローチに着目している。それが、離散量の量子状態（光量子ビット及び光子エンタングルド状態）を、連続量量子テレポーテーションの手法により転送する、「ハイブリッド方式」の量子テレポーテーションである。本論文では、従来相容れない部分が多かった離散量と連続量の手法を技術開発の末に融合し、ハイブリッド方式の量子テレポーテーションを初めて実験的に実現している。更に、連続量量子テレポーテーション装置の古典チャネルゲインという調整機構を活用して情報を高精度で送るという新しいアイデアを導入している。この結果、従来の離散量・連続量の量子テレポーテーションの欠点が克服され、高効率・無条件で、高い品質を維持したまま量子状態を転送できることが、2種類の実験により実証されている。

本論文は10章から構成される。以下に各章の内容を要約する。

第1章では、離散量と連続量の量子テレポーテーションの研究に関するこれまでの研究背景が述べられ、それを元に本論文のアプローチと研究成果がまとめられている。また、本論文の構成について述べられている。

第2章では、本論文で用いる量子化した電磁場の理論が離散量・連続量を比較しながら記述され、光の量子状態の測定・推定手法や評価方法が述べられている。

第3章では、離散量と連続量の各アプローチにおける量子情報処理の歴史と課題が述べられている。続いて、2つのアプローチを融合するハイブリッド技術によりその限界を打破しようとする近年の研究について言及され、本論文の位置付けと重要性が示されている。

第 4 章では、本論文で用いられる離散量の量子状態の生成プロセスが理論的にモデル化され、生成される光子のパルス波形が導出されている。

第 5 章では、2 種類の実験の評価指標や成功判定に関わる理論が述べられ、本論文の実験的なゴールが具体的に示されている。

第 6 章では、連続量量子テレポーテーションの一般的な基礎理論が述べられた上で、ハイブリッド方式の量子テレポーテーションを正確にモデル化する手法が提案されている。また、2 種類の実験が各種実験パラメーターにどのように依存するかが考察されている。

第 7 章では、2 種類の実験で用いられた実験セットアップが述べられている。冒頭で実験系の全体像と設計思想が述べられ、続いてそれを構成する各パーツの詳細な設計及びデータ解析手法が説明されている。

第 8 章では、量子ビットの連続量量子テレポーテーション実験の結果が示されている。特に、転送忠実度の実験値が古典限界を上回り、世界初の光量子ビットの決定論的・無条件量子テレポーテーションを実証したことが報告されている。また、ゲイン調整によって高精度で量子ビットの情報が転送できたことも示されている。実験結果は理論モデルと良く一致することも確認されている。最後に、考察及び課題について言及されている。

第 9 章では、光子エンタングルメント状態の連続量量子テレポーテーション実験の結果が示されている。特に、高効率なエンタングルメントの転送が事後選択なく実証されており、この結果ハイブリッド方式の量子テレポーテーション装置の量子的動作が裏付けられている。更に、事後選択処理によって転送後のエンタングルメントが原理上純粋化できることも示されている。理論モデルとの比較、考察及び課題についても言及されている。

第 10 章では、以上の理論および実験結果を元に、本論文の結論がまとめられている。また、今後の課題と展望についても述べられている。

以上のように、本論文で著者は、従来独立に発展を遂げてきた離散量と連続量の手法を融合したハイブリッド方式の量子テレポーテーションにより、双方の欠点が克服されることを理論・実験の両面から実証している。ハイブリッド方式に関わる具体的な研究成果は、

- (1) 世界初の光量子ビットの決定論的・無条件量子テレポーテーションの実証
- (2) 高効率な光子エンタングルメント状態の量子テレポーテーションの事後選択のない実証
- (3) 正確なモデル化による、ゲイン調整の効果の理論的な解明

の 3 点に集約される。これらの成果は、量子テレポーテーションそのものの飛躍的な高性能化を意味するだけでなく、離散量と連続量を融合した「ハイブリッド量子情報処理」という新しい学術領域の基盤技術を世に提示するものであり、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。