

博士論文（要約）

論文題目

連続量の手法を用いた
離散量の量子テレポーテーション

氏名 武田 俊太郎

本論文の要旨

これまで目覚ましい進歩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）により、従来技術の限界を超える究極的な大容量通信（量子通信）や、超高速演算が可能な量子コンピューターが実現できることが予測されている。そのような量子情報処理の実現へ向けた最重要課題の一つが「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、1993年に Bennett らが「ある物理系の量子ビット（0・1の重ね合わせ）の情報を、離れた場所の別の物理系へ転写する手段」として考案した。翌年 Vaidman は、0・1の離散的な基底をとる量子ビット系から、任意の実数を基底とする連続量の系へと量子テレポーテーション理論を拡張した。量子テレポーテーションが初めて実現されたのは1997年の Bouwmeester らの偏光量子ビットの転送実験であり、翌年には光の直交位相振幅を用いた連続量の量子テレポーテーション実験が Furusawa らによって実現された。以後、離散量・連続量の両分野において、これらの量子テレポーテーションの応用実験が数多く行われた。更に、長距離量子通信（量子中継）や光量子コンピューター回路への応用が理論的に提案されるようになり、今や量子テレポーテーションは量子情報処理において中心的役割を担うようになった。

しかし、従来の離散量・連続量のテレポーテーションの実験手法にはいずれにも原理的な問題点があり、応用へ向けた障壁となっている。離散量の手法では、パラメトリック下方変換を用いた光子対生成や、エンタングルド状態への射影測定（Bell 測定）が原理的に低い確率でしか動作せず、テレポーテーションの転送効率が極めて低い（1%未満と見積もられる）。このため、テレポーテーション装置を多段階へ拡張した場合に転送効率が限りなく0に近づき、大規模化が困難である。更に、離散量では転送後の量子ビットを光子検出測定し、都合の良い事象のみを選び出す事後選択処理の必要性も問題として指摘されており、応用範囲が制限される場合がある。一方で連続量の手法では、常時生成されるスクイーズド光や高効率のホモダイン測定を用いてテレポーテーションが決定論的かつ事後選択なく行われるという強みがある。ただし、テレポーテーション時に量子状態がノイズで乱されるため、転送忠実度（精度）が離散量よりも劣るという欠点がある。転送忠実度を100%とするには無限のレベルのスクイーズド光が必要であるが、これは無限のエネルギーを意味するため、非物理的で実現し得ない。従って、この連続量テレポーテーションの応用実験では常に忠実度が制限される。以上述べた量子テレポーテーションの問題点は、離散量・連続量の両アプローチにおいて量子情報処理の発展を阻む大きな障壁となっていた。

本研究では、離散量・連続量の手法の利点と欠点が相補的な関係にあることに着目し、従来の延長にない新しいアプローチで量子テレポーテーションを実現する。それは、光子ベースの離散量の量子状態を、連続量の量子テレポーテーション装置と組み合わせる「ハイブリッド方式」である。これらの融合により、連続量の手法の利点が生かされ、離散量の状態を決定論的かつ無条件にテレポートすることが可能となる（離散量の欠点の補完）。更に今回、この組み合わせの下で連続量テレポーテーション装置の古典チャネルゲインを適切に調整すると、スクイージングレベルが有限でも離散量の情報やリソースを高い品質を維持したまま転送できることを発見した（連続量の欠点の補完）。

このハイブリッド方式のテレポーテーションのアイデアそのものは10年以上も前に提案されていた。しかし、離散量と連続量の実験手法には相容れない部分が多く、今日まで実験的に実現されることはなかった。離散量の実験は従来パルスレーザーを光源として行われ、広い帯域を持つ超短パルスの単一光子を扱う。一方、従来の連続量のテレポーテーションは連続波レーザーを光源とし、非常に狭帯域な周波数成分のみを転送する装置であった。今回、私の修士課程で開発した2つの技術、「広帯域なテレポーテーション装置」と「連続波光源での狭帯域な量子ビット生成・トモグラフィー技術」を組み合わせ、この技術的ハードルを克服した。完成したハイブリッドな実験系を用い、2つの実験に成功すると共に、その実験を説明する理論モデルを構築した。以下にその成果をまとめる。

- (1) 光子の量子ビットを連続量量子テレポーテーション装置で転送し、世界で初めて決定論的・無条件の光量子ビット・テレポーテーションに成功した [Nature **500**, 315 (2013)]。4種類の量子ビットに対して、転送忠実度 79~82% が得られ、いずれも古典限界を上回った。更に、ゲイン調整によって、有限のスケーリングレベルでも、量子ビットの情報を忠実に転送できることを明らかにした。
- (2) 単一光子エンタングルメント状態の片方を連続量量子テレポーテーションで転送する、エンタングルメントスワッピング実験に成功した。エンタングルメントは従来よりも高効率で転送され、転送後のエンタングルメントの存在を事後選択なく実証した。ゲイン調整をした場合、転送後に劣化したエンタングルメントは、原理上、事後選択的に最大エンタングルメント状態に純粋化して利用できることも示した。
- (3) 上記の2つの実験を理論的にモデル化し、ゲイン調整の効果を理論的に明らかにした。実験結果は理論モデルによって良く説明できることを示した [Physical Review A **88**, 042327 (2013)]。

以上の成果は、ハイブリッド技術により、従来の離散量・連続量の量子テレポーテーションの双方の欠点が補完されることを理論・実験の両面から実証している。今後は、本ハイブリッド量子テレポーテーションシステムの量子情報処理への応用が期待される。応用例としては、まず量子ビットに対して連続量テレポーテーションの手法を応用して決定論的に量子論理ゲートを実装できる可能性が挙げられる。また、連続量テレポーテーションの手法の中で補助的なリソースとして離散量の量子状態を用いることで、高次の非線形量子演算（例えば3次位相ゲート）が実現できることが理論的に予測されている。このような非線形演算が実現できれば、離散量・連続量のユニバーサルな（任意の）量子計算が実現可能になる。ハイブリッド分野は理論・実験ともにまだまだ未開拓領域であるが、今後は本研究成果をベースに、離散量・連続量の相互のメリットを活かした新たな量子情報処理の発展が期待される。