

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 不破 麻里亜

光を用いた量子情報処理では従来、光の粒子・波動相補性のどちらか一方の性質を利用した 2 つのアプローチが、それぞれ独立に発展を遂げてきた。それに対し、当研究室の先行研究では、光子で表現された（離散量の）量子状態に対して、その波としての振幅と位相（連続量）を用いて世界で初めて量子操作を実現することにより、2 つの方針を融合することに成功した。この技術融合により、双方のアプローチの弱点であった成功確率の低さおよび量子操作の精度の低さを軽減させた。そこで行った量子操作は「量子テレポーテーション」と呼ばれ、そのプロトコルを少し改変することで、各種量子通信プロトコルや光量子コンピュータを実現することができる。ゆえに、この実験はハイブリッド技術（連続量離散量融合技術）の先駆的な実証実験であり、その実用化へ向けた基盤技術となる。

しかし同時に、上記の先行研究では、ハイブリッド技術の最大の弱点が光子ロスエラーであることが浮き彫りになった。この光子ロスエラーがあるがために、当時のハイブリッド技術をそのまま量子コンピュータで用いることは困難とされていた。そこで本研究では、光子ロスエラーを克服する基盤技術を 2 通り開発することで、離散量量子状態に対する量子操作を飛躍的に高精度化・高効率化することに成功した。開発したいずれの基盤技術も、大規模量子計算へそのまま拡張可能である。この際、光子が飛来する時間モードに情報をエンコードすることで、従来の離散量の手法を用いた場合と比較して格段にコンパクトな実験系で大規模量子計算を実現する道筋も示した。ゆえに、本研究によって、コンパクトな系による高効率・高精度な大規模量子計算の実現に大きく近づいたと言える。さらに、今後、開発した技術を拡張し、大規模量子計算機を実現するにあたっては、その量子計算結果を検証することが必要となるが、そのために時間モードにエンコードされた量子状態を推定するのに適した新たな量子トモグラフィー手法の構築も行った。

以上に加え、開発したハイブリッド技術を用いて、100 年前にアインシュタインが提唱して以来、多くの物理学者たちがその検証にしのぎを削ってきた現象「単一光子の非局所性」を厳密に検証することに成功し、量子力学の基礎論の探究にも貢献した。

本論文は 11 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、導入として本研究の背景について述べ、その上で本研究の概要を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第 2 章では、光の量子力学的な性質の記述方法と、量子情報処理で用いられている基盤技術について、連続量、離散量の手法を比較しながら述べる。

第 3 章では、第 1 章の背景理論を踏まえた上で、本研究の意義、位置づけと応用とその実現可能性について述べる。

第 4 章では、連続量離散量融合型量子情報処理で光子ロスが最大の課題である理由と、光子ロス量子誤り訂正の進展、および本研究との関連について述べる。

第 5 章では、8 ポートホモダイン測定を用いて Q 関数を測定することで、密度行列を推定する方法について述べる。この方法は、多モード多光子の量子状態でも適応可能であり、特に時間モード量子状態を推定するのに適している。

第 6 章では、すべての実験に共通する、離散量の量子状態生成方法および、連続量の測定、量子エンタングルメントを用いて量子テレポーテーションについて述べる。

第 7 章では、アインシュタインが約 100 年前に提唱した単一光子の非局所性を検証した実験と結果について述べる。

第 8 章では、単一光子のゲインチューンド連続量量子テレポーテーションにおいて、ベル測定値を半径 L の円で条件付けたとき、半径 L を狭めるにつれて出力状態に混入する光子ロスを量子操作の前段階で防ぎ、Wigner 関数の原点の値の負値性が向上することを検証した実験と結果について述べる。

第 9 章では、2 光子時間 2 モード量子トリットの生成し、 Q 関数 2 モードホモダイントモグラフィ（第 5 章）を用いて全ヒルベルト空間上で検証する。開発した生成手法は、任意の量子トリットを生成できるのみならず、任意の多光子多モード量子状態生成系へそのまま拡張可能である。

第 10 章では、第 9 章の手法を用いて 2 光子時間 2 モード量子トリットを生成し、連続量の手法を用いて高効率に量子テレポーテーションした入出力状態を Q 関数 2 モードホモダイントモグラフィ（第 5 章）した。その結果、量子トリットの入出力フィデリティが古典限界を超えることを確認した。さらに、1 光子ロスの量子誤り訂正のシミュレーションにおいては、1 光子量子ビットを上回るフィデリティを得ることができた点で、量子テレポーテーションを高精度化した。

第 11 章、以上の理論および実験結果を元に本研究の主張を整理し、今後の課題と展望をまとめる。

以上のように、本研究では、離散量の量子状態に対して連続量の量子操作を施す連続量離散量融合型量子情報処理において、その最大の弱点となっていた光子ロスを克服する道筋を 2 通り示し、コンパクトな系で高効率・高精度な量子操作を行う基盤技術を開発することに成功した。そのためには、その量子計算結果を検証することが必要となるが、そのために時間モード量子状態の密度行列を高精度に推定する Q 関数量子トモグラフィを見出した。開発した技術は、いずれも高次の光子数、モード数の量子状態を用いた大規模量子計算へそのまま拡張可能である。さらに、開発したハイブリッド技術を量子力学の基礎論探究にも適応させた。ゆえに、本研究によって、コンパクトな系による高効率・高精度な大規模量子計算の実現に大きく近づいたと言える。

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。