

| | | | |
|--|-------------------------|----|-------|
| 都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 野原 紗季 |
| 論文題目 | 連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用 | | |
| <p>本論文は、光子を用いた量子技術において重要な、連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用について述べた物で、9章からなっている。</p> <p>第1章は序論である。量子論の発展ならびに量子論の中心的な課題としての量子状態の推定についての概説、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、本論文に関連する基本的な知識として、光の偏光状態とストークスパラメータなどの表記法、ならびに偏光光学素子、波長板等について述べている。</p> <p>第3章では、本論文で取り扱う量子状態推定に関し、量子系における測定、フィッシャー情報量とクラメルラオ限界、また量子状態の推定に関し、従来の適応量子状態推定とそのアルゴリズム、ならびに強一緻性や漸近有効性などの概念について説明している。</p> <p>第4章では、適応量子状態推定実験の高速化の鍵となる、液晶偏光素子について、その精密制御と位相精度の評価について述べている。高い消光比をもつ偏光素子を組み合わせ、極めて精密な電圧一位相特性評価を実施、液晶偏光素子による高い精度での位相制御を可能としている。</p> <p>第5章では、液晶偏光素子を組み込むことによる、適応量子状態推定装置の高速化について報告している。微弱コヒーレント光を光源とし、液晶偏光素子を用いて新たに構築した実験系により、適応量子状態推定の先行研究と比較して、測定基底の変更に要する時間を30分の1と著しく短縮、また結果として適応量子状態推定の実行速度を5分の1に短縮することに成功している。</p> <p>第6章では、時間的に変化する測定対象に適用可能な、「連続適応量子状態推定」の提案と、数値シミュレーションによる検証について述べている。従来の方法では、漸近論での議論を前提に、全ての過去の測定結果を情報として含む尤度関数を利用していたのに対し、直近の S 個の光子の測定結果に限定した尤度関数を利用した推定方法を提案、数値シミュレーションにより、S 個の光子を利用した場合の量子論的な限界（クラメルラオ限界）での状態推定が可能なる事、また一定に変化する状態に加え、サイン関数状やステップ状など様々な入力状態変化にも対応して推定が可能であることを示している。さらに、連続適応量子状態推定中に推定値が突如大きく変化する現象について考察し、その対応策を提案、検証している。</p> <p>第7章では、連続適応量子状態推定の実験による実証について述べている。第6章の数値シミュレーションの内容を、実際の実験装置を用いて検証、連続適応量子状態推定においても、従来の適応量子状態推定で示されていた最適性が満たされていることを確認している。</p> <p>第8章では、これまでのレーザー光等を減衰させた微弱光源に替わり、単一発光体からの蛍光を用いた適応量子状態推定を実施するための実験系の構築について報告している。単一発光体として、六方晶窒化ホウ素中の欠陥を利用、対象とする波長 590 nm に対応した連続適応量子状態推定装置を新たに構築、その動作検証に成功している。</p> <p>第9章では、本論文の成果をまとめ、今後の課題と展望について論じている。</p> | | | |

| | |
|----|-------|
| 氏名 | 野原 紗季 |
|----|-------|

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、光子を用いた量子技術において重要な、連続適応量子状態推定の実現と単一発光体への応用についてまとめたものであり、得られた主な成果は次の通りである。

1. 液晶偏光素子を用いた、光の位相の高精度・高速制御を実現した。液晶偏光素子は、広い開口径を有し、また従来の半波長板と機械ステージを用いた制御に比べ大幅な高速化が期待されるが、その位相制御の精度については十分な検討がなかった。本論文では、高い消光比を有する偏光素子を組み合わせた評価装置を作成、液晶偏光素子の位相精度を評価した。その結果、その精度誤差が平均 0.15 度で制御可能であり、従来法による位相精度 0.08 度に匹敵し、適応量子状態推定実験を十分実施可能であることを明らかにした。

2. 上述の結果に基づき、液晶偏光素子を利用して、従来に比べて非常に高速な適応量子状態推定を実現した。光子の適応量子状態推定は、与えられた光子列に対して、最も高い精度で状態推定を行う事を可能にする。しかし従来は、機械ステージで行う偏光測定基底の制御に時間を要し、高速化のネックとなっていた。液晶偏光素子を組み込んだ新たな実験装置により光子の直線偏光角度を推定、その推定結果を統計的に評価した結果、適応量子状態推定の持つ最適性(強一緻性, 漸近有効性)を満たすことを確認した。また、偏光測定基底の変換に要する時間は、従来法の約 30 分の 1、適応量子状態推定実験全体の合計時間も従来法の約 5 分の 1 に短縮している。

3. また、時間的に変化する入力状態にも適用可能な、「連続適応量子状態推定法」を提案した。尤度関数の計算に使用する光子数を直近 S 個と限定することで、過去に入力された光子の測定結果が推定に影響を与えない様工夫されている。論文では、提案法をシミュレーション並びに実験により、線形変化、 \sin 関数的変化、ステップ関数的変化など様々に変化する入力状態に対して検証を実施、量子論的な限界(クラメールラオ限界)の精度で推定可能であることを実証している。

4. さらに、連続適応量子状態推定を、単一発光体からの出力光子列に適用することを目標に、単一発光体からの蛍光を観察、適応量子状態推定実験装置の設計と構築を実施し、新たに構築した適応量子状態推定装置の動作検証に成功している。

以上、本論文は、光子を用いた量子技術において本質的に重要である、光子の適応量子状態推定に関し、液晶偏光素子の精密かつ高速制御の実現、それを利用した適応量子状態推定の高速化、入力状態が変化する場合についての「連続適応量子状態推定法」の提案と実証、さらに単一発光体からの光子への応用など、量子光学・量子情報の両分野や量子計測などへの応用にも大きく寄与する成果であり、学術上、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 3 年 1 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。