

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 阪口 淳史

提出された学位論文「古典非線形フィードフォワードと非ガウス型補助状態を用いた非ガウス型量子測定の実現」は、光を用いた連続量量子情報処理の実現に不可欠な、非ガウス型量子測定の実験的な実装を行った論文である。

光を用いた連続量量子計算、特に時間領域多重一方向量子計算の手法では、多くの物理系で問題となるスケーラビリティを解決できることが先行研究で明らかになっている。一方で、任意の操作を行うために必要な非ガウス型の操作が実現されていないという課題があった。

一方向量子計算において、非ガウス型の操作は非ガウス型の測定と単純な操作によって実装される。非ガウス型の測定の実装方法は先行研究において理論提案されており、非ガウス型の補助状態と非線形なフィードフォワードが必要であることが分かっている。しかし、特に非線形なフィードフォワードの実現には、難しい非線形計算を高速に行う方法が必要なため、実現された例はなかった。

本論文では、先行研究にて開発された低レイテンシな FPGA (Field Programmable Gate Array) ボードを用いて、非線形なフィードフォワードの高速な実装を行い、波束幅を短くした適切な非ガウス型の補助状態と組み合わせることで、光に対する決定論的な方式の非ガウス型量子測定である 3 次位相状態への射影に相当する測定を世界で初めて実現させた。

本論文は以下の 6 章から構成される。

第 1 章では、本研究の背景となる光を用いた連続量量子計算について述べられ、特に非ガウス型操作が実現されていない課題を挙げ、本論文でその解決策として非ガウス型補助状態と非線形フィードフォワードを用いた非ガウス型測定を実現することを述べている。

第 2 章では、研究の前提となる知識が述べられている。特に、ガウス性と非ガウス性の区別について述べ、量子的な非ガウス性の重要性を述べている。

第 3 章では、研究で着目する非ガウス型量子測定について、一方向量子計算の観点から具体的な理論が述べられており、第 4 章、第 5 章における前提知識となる。特に、非線形なフィードフォワードと非ガウス型補助状態により非ガウス型量子測定である 3 次位相状態への射影に相当する測定を構成する手法の詳細が述べられ、またその手法における評価指標として非線形なノイズ項の圧搾が採用できることを述べている。

第4章では、非ガウス型補助状態を生成した実験について述べられている。まず、非ガウス型測定を見据えた非ガウス型補助状態への要請として、波束の時間幅と非線形なノイズ項の圧搾を述べ、それを満たす状態を生成する実験手法として、非対称光パラメトリック発振器を用いた伝令付き状態生成について説明している。次に、実験の詳細が述べられる。実験の結果では、時間幅 18.2 ナノ秒のリアルタイム測定が可能な波束に生成された量子状態が、ノイズ項の分散をガウス型の限界（古典限界に相当）を超えて圧搾できることが実証され、非ガウス型量子測定である3次位相状態への射影に相当する測定として使用できることが示された。

第5章では、非ガウス型量子測定である3次位相状態への射影に相当する測定を実装した実験について述べられている。第4章で生成した状態を用いて、更に非線形なフィードフォワードを行うことで非ガウス型の量子測定を実装しており、測定の特性を評価する方法についても示された。次に、実験の詳細を述べている。特に、高速な非線形フィードフォワードを可能にするデジタル回路の設計について詳しく述べられている。実験結果では、実装した測定自体の特性が量子的な非ガウス性を表す指標を満たし、非ガウス型量子測定である3次位相状態への射影に相当する測定となっていることを実証した。同時に、非ガウス型操作に用いる場合の考察を行い、実装した非ガウス型測定と決定論的な操作で非ガウス型操作を実装できることを示している。

第6章では、まとめと今後の展望について述べられている。まず、本論文の成果をまとめ、非ガウス型量子測定によってユニバーサルな量子計算への道が開けたことを述べている。今後の課題については、量子状態の精度についての将来的な方向性を示している。更に、本論文で使用された非線形フィードフォワードが誤り訂正可能な他の量子操作にも応用できることを述べ、誤り耐性のある量子計算への道筋も示している。

以上の通り、本論文はユニバーサルな量子操作に不可欠な非ガウス型量子測定を非ガウス型の補助状態と非線形なフィードフォワードによって実現したものである。これまでに光において決定論的な手法で行われた非ガウス型量子測定の例はなく、新規性がある。また、光による汎用量子情報処理の実現に直接的につながる、重要な貢献である。

以上を勘案し、本論文を博士（工学）の学位論文として合格と認める。