

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 吉川 純一

量子状態を自在に操作することは、量子情報科学における究極的な目標である。一般的に、量子操作と呼ばれるものは以下の3種類に分けられる。まず、既知の量子状態に対する操作または特定の量子状態の準備という、ユニタリ性が要求されないもの。次に、未知の量子状態を、情報のやり取り無く扱う、ユニタリな操作。最後に、量子状態に対する測定である。以上3つは、量子状態に対する異なる操作であるが、互いを結び付けることによって、新しい可能性が開ける場合がある。例えば、近年盛んに研究されている測定誘起法では、光子検出を特定の非ガウス状態の生成に利用して、一定の成功を収めている。その一方で、ユニタリな操作に関しては、ガウス型ですら、一部が実現されているに過ぎない。量子情報処理の特徴的な面は、3種類の量子操作の中でも、特にユニタリ操作において現れるので、残り2つの量子操作を上手く利用して、ユニタリ操作の可能性を広げることができれば、それは意義深いことである。そのような背景の下、本研究では、フィードフォワードと呼ばれる手法に着目して、ユニタリ操作の新しい可能性を探っている。フィードフォワードとは、量子情報処理の途中に測定を挟み、それ以降の操作を、確率的に得られた測定結果に従って変えていくことである。

本研究では、量子光学的な手法を用いて、過去に論文提出者が実験的に成功を収めている、ホモダイン測定とフィードフォワードを用いた1モードスクイーズ操作を出発点とし、そこから3つの方向性で発展させている。具体的には、量子操作の多モード化、測定に基づいた量子情報処理への移行、そして、時間領域でのダイナミカルな量子情報処理への移行である。多モード化としては、量子非破壊相互作用および量子力学的な増幅器という、2つの代表的な2モードの相互作用を実現した。特に量子非破壊相互作用は、連続量の量子情報処理において加減算に対応する、基本的なゲートとしての意味を持つ。測定に基づいた量子情報処理は、近年、一方向量子計算と呼ばれて注目を集めている。その構成要素となる、二乗位相操作などを実現した。最後に、時間的にダイナミカルに変動する量子状態を扱って、スクイーズ操作に成功した。

本論文は以下の8章からなる。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略を示し、さらに本論文の構成について述べている。

第2章では、後続の章で必要となる基本的な理論に関して述べている。量子光学と、基本的な量子状態を紹介している。また、ガウス型の量子操作の基本的な性質、そして、量子力学における測定の記述などに関して述べている。

第3章では、後続の各章で述べる実験において共通となる、基本的な要素に関して、理論的な説明と共に、実験的な実現方法を示している。まず、非古典性を担う補助入力とし

て利用する、スクイーズされた真空状態の生成方法を述べている。更に、ホモダイン測定、そして、光学系の制御の方法などに関して述べている。

第4章では、量子非破壊相互作用の実験に関して述べている。先行研究としていくつか存在する、量子非破壊測定の実験とは異なり、本研究で実現した量子非破壊相互作用は、量子情報処理における加算ゲートとして利用可能なものである。その証明として、共役な物理量の両方が正しく変換されていることを示している。また、このゲートが非古典的な領域で動作しており、量子エンタングルメントを生む力が備わっていることを示している。

第5章では、量子非破壊相互作用の応用実験として行われた、手法の良く似た2つの実験に関して述べている。一つは二乗位相操作であり、もう一つは連続量における量子消去である。どちらも、量子情報処理の新しいモデルである、一方向量子計算と関連している。一方向量子計算とは、測定に基づいた量子情報処理であり、クラスター状態と呼ばれる巨大なエンタングルド状態を、行う処理に依らない共通のリソースとして利用する。実効的なユニタリ変換が、クラスター状態に対する測定基底の選択を通して決定される。これは、行う処理に応じて異なるゲートを用意しなければならない、従来の量子回路モデルとは異なる。二乗位相操作は、一方向量子計算において、1モードガウス型操作の構成要素になるものである。一方、量子消去は、或る形のクラスター状態から別の形のクラスター状態を作る、クラスター状態の整形と同一視される。

第6章では、2モードの相互作用の形を持つ、量子力学的な増幅器の実験に関して述べている。また、その応用として、近似的な量子複製の実験に関して述べている。

第7章では、時間領域でのスクイーズ操作に関して述べている。前章までの実験は全て、レーザー光のサイドバンド成分のうち、数十 kHz の狭い帯域において実現されたものに対して、本章の実験では、搬送波付近から数 MHz までの広い帯域を量子情報処理の対象として扱っている。そして、時間的にダイナミカルに変動する量子状態を入力として扱い、スクイーズ操作を行っている。このように時間的に局在して定義される量子状態の取り扱い、実験系を光子検出器と組み合わせる際に必要となることである。従ってこれは、将来的に非ガウス型の量子状態を取り扱うための橋渡しとなる実験である。

第8章では、本研究の結果をまとめ、最後に今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では、ホモダイン測定のフィードフォワードという共通の実験技術を用いて、理想的なユニタリ変換に近い、いくつかのガウス型量子操作を実現した。更には、将来的に非ガウス型の量子情報処理へ踏み出すための橋渡しとして、時間領域において動作するスクイーズを実現した。以上の成果は、光を用いた連続量の量子情報処理においてフィードフォワードという手法の有用性を示した点で重要であり、次なる実験研究の基礎を築いたことから、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。