

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 鵜飼 竜志

一方向量子情報処理は量子状態に情報をエンコードして計算を行うという量子情報処理を実現するための手段として新たに提案されたものである。これは、クラスター状態と呼ばれる多量子系のエンタングルした状態に対して測定を繰り返すことによって量子情報処理が達成されるというものである。行う量子情報処理は測定の際の測定基底の選択によって決定され、十分に大きいクラスター状態を利用すれば、同一のクラスター状態に対して適切な測定基底の組み合わせを選択することによって任意の量子情報処理を実現することができる。ここで、従来利用されている古典計算機では NAND ゲートの組み合わせによって任意の情報処理ができるのと同様に、連続量の量子情報処理においても 1 量子系に対するガウス型操作・1 量子系に対する 1 種類の非ガウス型操作・2 量子系に対する 1 種類のガウス型操作の 3 種類の量子状態操作を実現することができれば、これらの組み合わせによって任意の処理が可能であるということが分かっている。従って、一方向量子情報処理の実現に向けて、その枠組みでのこれらの実証実験が重要な鍵となる。また、任意の情報処理はこれらの組み合わせによって達成されることから、多段階の量子情報処理が必要となる。

本研究は、過去に論文提出者が一方向量子情報処理の枠組みでの 1 量子系に対するガウス型操作の実証実験に成功していることを踏まえ、一方向量子情報処理の実現に向けた新たな広がりとして、2 量子系に対するガウス型操作の実証をそれぞれ特徴の異なる 3 種類行ったものである。また、多段階一方向量子情報処理の実現に向けて提案された時系列の手法に対して、生成されたクラスター状態を効率よく利用して演算を実装するための方法についても研究を行っている。

本論文は以下の 12 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大まかに述べ、その上で本研究の概略を述べている。

第 2 章では、本論文を串刺しにして全体を見通す形で、一方向量子情報処理についてその概略と歴史をより詳しく述べている。その中で論文提出者が過去に行った研究や本論文に至った経緯についても言及している。

第 3 章では、後続の章で必要となる量子光学の理論について述べている。

第 4 章では、まず量子状態と量子状態操作の表記方法について述べている。続けて、量子状態操作の分類や、具体的な量子状態操作を表す演算子について述べている。最後に、与えられた量子状態がエンタングルした状態であることを示すための十分条件について言及している。

第 5 章では、まず量子テレポーテーションについて述べており、その量子情報処理への応用として一方向量子情報処理を導入している。

第 6 章では、一方向量子情報処理の手続きに従って、各構成要素の理論について述べている。まずクラスター状態の定義を述べた後、量子状態操作の対象となる入力状態とクラスター状態を結合する手法について述べている。さらにクラスター状態を変形する手法について述べた後、一方向量子情報処理のユニバーサリティーについて述べている。最後に一方向量子情報処理の入出力関係を表記する上で有用なデルタ表記について述べている。

第 7 章では、後続の章における実証実験でリソースとして利用されるクラスター状態の生成実験について述べている。2 モードから 4 モードまでの線形クラスター状態の生成を行っており、いずれの場合でも十分な相関を持つ状態が得られていることが示されている。

第 8 章では、一方向量子情報処理の枠組みにおける制御 Z ゲートの実証実験について述べている。そのゲートの検証としては、まず共役な物理量の伝搬の正当性が示されている。また、分離した状態を入力した際に出力で量子エンタングルメントを観測しており、このゲートが非古典的な領域で動作していることが示されている。

第 9 章では、遠方に位置している 2 者それぞれが所有している量子状態を、最小のリソースでエンタングルさせるという最適非局所ゲートの実証実験について述べている。

第 10 章では、相互作用ゲインが可変なエンタングリングゲートの実証実験について述べている。第 8 章及び第 9 章における実証実験では、実装されているゲートが固定であったのに対し、本章で述べられている実証実験では、クラスター状態に対する測定の基底を変更することにより、2 つの入力となる量子状態をエンタングルさせるかさせないか、あるいはどの程度エンタングルさせるかといった制御が可能な可変のゲートとなっている。出力状態の検証では、実際に測定基底に合わせてエンタングルメントの度合いの変化が観測されている。

第 11 章では、多段階一方向量子情報処理の実現に向けた、時系列の手法によるクラスター状態生成方法の提案を受け、その利用方法について述べられている。当初の方法では、生成されたクラスター状態の 2 分の 1 を廃棄したうえで演算を実装することが提案されていたが、時系列の手法と量子テレポーテーションの繰り返しの等価性を示すことで、クラスター状態の 2 分の 1 を廃棄することなく演算を実装できることが示されている。

第 12 章では、本研究をまとめ、今後の展望を述べている。

以上のように、本研究では 2 入力に対する一方向量子情報処理の例として 3 種類の実証実験を行った。いずれのゲートにおいても、将来における大規模一方向量子情報処理回路の一部として組み込むことができる構成となっている。また、論文提出者が過去に行った実証実験と合わせて、多量子系に対する任意のガウス型操作を構成するための要素が実現されたことになる。さらに、将来における時系列の手法の実証実験に向けて、生成されたクラスター状態の効率の良い利用方法が発見された。本研究の成果は、多段階・多入力の一方向量子情報処理を実現する上で重要な意義があるものと認められる。

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。