

## 論文の内容の要旨

論文題目 空間または時間モードを用いた多段階・多入力一方向量子情報処理の研究

氏名 鵜飼 竜志

近年、量子力学を計算に応用した量子計算機に関する研究が急速に進められている。量子計算機が注目を集めるようになったのは、従来の古典計算機では処理に時間がかかりすぎるため解けないと考えられている問題に対して、量子計算機を利用した効率の良いアルゴリズムが発見されたことによるものが大きい。

量子計算あるいは量子情報処理では、始めに情報が量子状態にエンコードされる。その量子状態に対する量子状態操作が計算に対応し、計算の解を保有する量子状態へと変換される。最終的な量子計算の解は、変換後の量子状態に対する観測を行うことで得られる。従って、量子情報処理の要をなすのは、量子状態に対する量子状態操作であるといえよう。

この量子計算を実現する手法として、「一方向量子計算」が提案された。これは「エンタングルした状態の一部を測定すると、測定されなかった部分系の状態が変化する」というエンタングルした状態の特徴を積極的に量子計算に利用しようというものである。つまり、量子計算の資源(リソース)として「クラスター状態」と呼ばれる多者間のエンタングルした量子状態を利用し、そのクラスター状態の一部に対して順番に測定を行っていくことで、測定されなかった残りの部分系に計算結果を表す量子状態を出現させる。ここで、測定としてどのような測定を行うかを変更すれば、同じクラスター状態を利用しながら別の計算結果を表す量子状態を出現させることができ、これは別の量子計算を行うことに対応している。

一方向量子計算に限らず、一般に任意の量子計算を実現するためには、任意の量子状態操作を実現できる必要がある。量子状態操作の中で、最も単純かつ基礎的なものは、1つの量子状態をそのまま出力する「恒等操作」である。量子状態を遠方に伝送する量子テレポーテーションも恒等操作であるとみなすことができる。この恒等操作を軸として、最終的に任意の量子計算を実現するためには、次のような拡大が要求される。

- ・1つの量子状態だけではなく、多くの量子状態を扱えるようにすること(1入力から多入力へ)。
- ・恒等操作以外の演算を実現すること(恒等操作から演算へ)。
- ・1回の演算だけではなく、複数回演算が行えるようにすること(1段階から多段階へ)。

これまでに、当研究室において光を用いた連続量一方向量子計算の実証実験を行ってきた。そこでは、1つの量子状態に対する「位相回転操作」および「スクイーズ操作」と呼ばれる量子状態操作が実現された。また、一方向量子計算では、リソースとして利用されるクラスター状態のサイズが演算の回数であるとみることができ、これらの実証実験では4者間のエンタングルした状態が利用されていたことから4段階の演算であると言える。

上記を踏まえ、本研究での実証実験では、多入力に対する連続量量子状態操作の例として、2入力に対する3種類のゲートの実証を行った。いずれも、クラスター状態の各モードを空間的に異なるモードに配置するという空間モードを用いた2入力量子状態操作の実証実験であり、2つのエンタングルしていない量子状態をエンタングルさせる働きのあるゲートである。また、クラスター状態の各モードを時間的に異なるモードに配置するという時間モードを用いた手法の理論についても研究を行った。これは多段階量子状態操作の実現に寄与するものである。

以下ではこれらについて項目ごとに述べる。

#### <制御Zゲートの実証実験>

これは、4者間のエンタングルした状態である線形4モードクラスター状態をリソースとして利用した量子状態操作の実証実験であり、2つの入力に対する全体の演算が、1つの量子系に対する余分なスクイーズ操作を含まない、ゲイン1の制御Zゲートとなっているものである。また、2つの量子状態それぞれに対して量子テレポーテーションを行った後、制御Zゲートを施す回路を考え、その制御Zゲートを量子テレポーテーションの前に移動させたものが本実証実験の量子回路となっていることから、2入力に対するゲートのテレポーテーションの実証実験であるとみることができる。

#### <最適非局所ゲートの実証実験>

これは、2者間のエンタングルした状態である2モードクラスター状態をリソースとして利用した量子状態操作の実証実験であり、作用する2量子系が遠方に位置している非局所ゲートを、あらかじめ両方で共有された1組のエンタングルした状態と、双方向へのチャンネル数1ずつの古典通信という、最小の構成で実現したものである。

#### <相互作用ゲイン可変エンタングリングゲートの実証実験>

これは、3者間のエンタングルした状態である線形3モードクラスター状態をリソースと

して利用した量子状態操作の実証実験である。上記の 2 つの実証実験においては行われた演算が固定であったのに対し、この実証実験ではクラスター状態に対する測定を変更することで、入力した 2 つの量子状態に対するエンタングリング操作を行うかあるいは行わないかという操作の ON/OFF の切り替えや、エンタングルさせる相互作用のゲインの制御ができることを実証した。これは測定基底に応じて演算を制御するという一方向量子計算の特徴を強く表している。

#### <時間モードを用いた手法の理論>

古典計算機では NAND ゲートの組み合わせで任意の計算が実装できるように、量子計算機でも限られた種類のゲートの組み合わせで任意の計算を実装することができる。そのためには、多段階の量子状態操作を実現できるようにならなければならない。しかし、これまでの実験手法は拡張性に乏しい面があった。つまり、一方向量子計算のリソースとして利用されるクラスター状態の各モードは、空間的に異なるモードに配置されており、ある時刻に同時に存在していた。そのため、多段階の量子状態操作を実現するためには、その段数と等しい数の異なる空間モードを利用する必要があり、実験系が肥大化してしまうのである。

この問題点を解決する手段として、時間モードを用いた手法が提案された [N. C. Menicucci, Phys.Rev. A **83**, 062314 (2011)]。つまり、クラスター状態の各モードを空間的に異なるモードに配置する代わりに、時間的に異なるモードに配置するというものである。このようなクラスター状態を時系列クラスター状態と呼ぶ。この手法を利用すれば、光学系を肥大化させることなく複数回の量子状態操作を実現できるようになる。

オリジナルの論文により、複数回の量子状態操作に利用可能なクラスター状態の生成方法の提案がなされた。この手法では有限かつ静的な光学系を利用することで、無限に大きいクラスター状態を生成することができ、多段階の量子状態操作の実現に向けて大きな一歩となるものである。

ところが、この手法によって生成されるクラスター状態が複雑なものであったため、オリジナルの論文ではより特性の分かっている簡単なクラスター状態に変換するために、生成したクラスター状態のうち 1/2 あるいは 3/4 を廃棄し、残りのモードで演算をすることが提案されていた。しかし、これは生成したリソースを無駄にしていることになり、可能であれば全てのリソースを利用して量子計算を行うことが望まれる。

本研究では、上記の問題に対する解を見出した。つまり、時間モードを用いた手法は、量子テレポーテーションの繰り返しと等価であることを示し、その量子テレポーテーションにおける測定の変更により演算を行うことができることから、クラスター状態のすべてのモー

ドを演算に利用することができるということになる。また、本実証実験で行った制御 Z ゲートを基本回路とし、その繰り返しと等価な時系列クラスター状態を利用すれば、全てのリソースを利用しながら多入力に対する量子状態操作も実現可能であるということを発見した。これらの発見により、時間モードを用いた手法の理論的发展及び実証実験の发展が進むことが期待される。

これまでの研究により、1 入力に対する位相回転操作とスクイーズ操作の実証実験に成功している。これらと今回の 2 入力に対するエンタングリングゲートを組み合わせることにより、任意の多入力に対する線形変換であるガウス型操作を実装することができるようになる。これは連続量一方向量子計算の実現に向け重要な構成要素が揃いつつあることを意味する。

任意の量子計算を実現する上で唯一達成できていない構成要素は、線形変換ではない 1 入力に対する非ガウス型操作である。その実証には、光子数測定やあるいは光子数状態の重ね合わせの生成など、本研究では扱っていない技術が必要になるが、これまでに当研究室において 3 光子状態までの重ね合わせの生成に成功するなど、非ガウス型操作の実証に向けて研究が進められている。

また、量子計算の段数の観点からいえば、今回の実証実験では最大 4 モードのクラスター状態を利用しており、4 段階の量子状態操作の実証に成功したと言える。将来さらなる多段階の量子状態操作の実証実験を行うための技法として提案された時系列の手法に対して、それが量子テレポーテーションの繰り返しに基づくものであることを発見し、さらにその全てのモードの自由度を演算に利用することができると分かった。これは将来的に多段階の量子状態操作の実証実験を行う上で効率よく量子計算を実装することができるようになることを意味している。

今後の研究により、1 入力に対する非ガウス型操作の実証や、より多段階の量子状態操作の実証が行われ、量子計算機の実現につながることを期待される。