

論文の内容の要旨

論文題目 高速デジタル非線形フィードフォワードを用いた
n次位相ゲート実現法の研究

氏名 小川 尚史

光は高いエネルギースケールで量子性が見えるという強みを活かして、量子力学の原理の実証において常に先駆的な役割を果たしてきた。近年では原理実証だけでなく、現在のコンピュータでは計算が困難な問題を超高速に解くことが出来る「量子コンピュータ」など、量子力学特有の現象を取り入れた高性能な情報処理へ応用する研究も活発に行われている。

量子コンピュータは「量子ゲート」と呼ばれるユニタリ変換を組み合わせて計算を行う。光に対する量子ゲートは、対応するハミルトニアンが直交位相振幅の演算子について2次以下の項からなる「ガウス型量子ゲート」と3次以上の項を含む「非ガウス型量子ゲート」に分類することが出来る。現在の量子光学の目標は、非ガウス型量子ゲートを含む任意の次数の量子ゲートを実現し、自由に量子計算が行えるようにすることであると言える。ガウス型量子ゲートについては、先行研究において多数の実装例がある。しかし、量子情報処理に用いる単一光子レベルの微弱光の場合は非線形な相互作用が得にくいといった難点があり、現在に至るまで非ガウス型量子ゲートの実装例は報告されていない。この問題の回避策として、近年、量子テレポーテーションを応用した量子計算の手法が提唱されている。これは、入力状態と補助状態をエンタングルさせ、射影測定やフィードフォワードによって計算を行うというものである。量子テレポーテーションを応用した量子計算を用いると、非線形光学効果を直接作用させることなく非ガウス型量子ゲートを構築することが可能であるが、補助状態の生成方法や複雑なフィードフォワードを高速に行う方法など、解決すべき課題が多く、やはり実現には至っていなかった。

本研究では理論・実験の両面から、上記の量子テレポーテーションを応用した量子計算の課題の解決に取り組んだ。特に、ハミルトニアンが直交位相振幅の1つの演算子についてのn次の項のみからなる「n次位相ゲート」と呼ばれるタイプの非ガウス型量子ゲートに注目し、理論面では、従来手法より必要な補助状態の数を大幅に削減したn次位相ゲートを構

築する方法を任意の回数の場合について提案した。また、実験面では「広帯域な指数増大波束を持つ非ガウス型補助状態の生成技術」と「高速AD/DA搭載FPGAによるデジタルフィード技術」を開発し、 n 次位相ゲートに要求される複雑なフィードフォワードを遅延 ~ 100 nsという超高速で実現可能であることを示した。以下にその成果をまとめる。

1. n 次位相ゲート実現法の提案

量子テレポーテーションを応用した量子計算による非ガウス型量子ゲートの構築方法の提案として、有名なものにGottesman, Kitaev, Preskil (GKP)の提案がある[Physical Review A **64**, 012310 (2001)]。GKPの手法は以下のような手順で、3次の非ガウス型量子ゲートである「3次位相ゲート」を実現するものである。(1)入力状態と、3次位相状態と呼ばれる補助状態を量子非破壊相互作用(QND相互作用)によってエンタングルさせる。(2)エンタングルした光の片方に対してホモダイン測定を行う。(3)得られた測定値に応じたガウス型量子ゲートを用いて、測定されなかった方の光にフィードフォワードを行う。GKPの手法は、直接作用させることが困難な非ガウス型量子ゲートを「特定の補助状態の準備」と「ガウス型量子ゲート」というより簡単な要素に分解できることを示したという点で大きな意味を持つ。しかしながらGKPの提案は、QND相互作用やフィードフォワードのために、3次位相状態に加えてスクイーズド状態と呼ばれる光が補助状態として3個も必要であるという実装上の問題を抱えていた。多数の補助状態を生成するために系が複雑化するので不安定になりやすく、また、補助状態を多く用いると補助状態の不完全性(ロス等)が積み重なって最終的な操作の精度が悪化する可能性がある。

これらの課題に対して、本研究では新たな3次位相ゲートの構築方法を提案した。本研究の手法では、入力状態と補助状態のエンタングル生成のためにQND相互作用で無くビームスプリッターを用いており、必要な補助状態の数は3次位相状態が1つとスクイーズド状態が1つであるので、大幅に簡略化されていると言える。

さらに本研究ではこの手法を拡張し、3次だけではなく任意の回数 n 次位相ゲートを効率的に構築する方法も考案した。本研究で提案する n 次位相ゲートは、3次位相ゲートの時と同様に、補助状態の準備とフィードフォワードのガウス型操作から成る。必要な補助状態は n 次位相状態から3次位相状態まで各1つずつに加え、スクイーズド状態が1つとなっており、3次位相ゲートを組み合わせて高次のゲートを作るより少ないリソースで構築可能である。

2. 広帯域な指数増大波束を持つ非ガウス型補助状態の生成

量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子ゲートの実装においては、測定からフィードフォワードの時間遅延をなるべく小さく抑えることが重要である。遅延が大きくなると、フィードフォワードのタイミングを合わせるために光のパスにも長い遅延路を追加する必要があり、実験装置が不安定になるからである。

フィードフォワードにおける遅延の大きな原因の1つが、ホモダイン測定の結果から直交位相振幅の値を計算する部分である。量子状態は有限時間幅のパルス(波束)で定義されるので、フィードフォワードに使う値を得るためには、波束形状に合わせた重み付けで測定信号をフィルタする(たたみ込み積分計算をする)必要がある。よって、この部分で「波束の時間幅+積分計算のレイテンシ」の長さの時間遅延が発生する。本研究では波束の形状が測定の遅延に与える影響に注目し、高速な測定とフィードフォワードに適した波束「指数増大波束」に状態を生成する技術を開発した。指数増大波束とは、ローパスフィルタのインパルス応答に対応する時間相関を持った波束形状であり、測定信号を簡単なアナログローパスフィルタに通すだけで、必要なたたみ込み積分が完了する。この時「積分計算のレイテンシ」はローパスフィルタの伝搬遅延のみであるので、リアルタイム測定と呼んでいる。本研究では「非対称光パラメトリック発振器(AOPO)」と名付けた新しいタイプの共振器を用いて、高純度な単一光子状態や光子数重ね合わせ状態を指数増大波束に生成し、実際に生成された状態に対する直交位相振幅のリアルタイム測定を実証した。

さらなる高速化のために、より波束の時間幅の短い指数増大波束に非古典状態を生成する手法も開発した。AOPOの共振器形状を根本的に見直し、上記の実験よりも広帯域化することで、時間幅を約 60 ns から約 30 ns と、半分近くまでに短くすることに成功した

3. 高速AD/DA搭載FPGAによるデジタルフィード

GKPの手法や本研究で提案する理論のような、量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子ゲートにおけるフィードフォワードには、スキューリングゲートと呼ばれるガウス型量子ゲートが必要である。スキューリングゲートは、入力状態の直交位相振幅のゆらぎを不確定性関係を保ったまま一つの位相については圧搾し、直交する方向には増幅する操作である。量子テレポーテーションを応用した非ガウス型量子ゲートにおいては、入力の信号に対して \arctan など非線形な演算を高速に(nsオーダーの遅延時間で)行い、スキューズ操作の強さを動的に変更するフィードフォワードが必要がある。

修士課程では、クランプ機能付きのオペアンプを組み合わせることで、アナログ非線形演算回路を実装し、動的に制御可能なスキューリングゲートの実験を行った。しかし、この時の実験装置は、応答速度が非ガウス型量子ゲートに使うには不十分、専用のアナログ回路であるので他の用途への応用が利かないといった課題がのこっていた。

本研究では更に、FPGAによるデジタルフィードフォワードシステムの構築を行った。FPGAは内部回路の構成をプログラム可能なICである。よって、修士課程における実験で用いたようなアナログ回路より広い用途に使うことが出来、かつ、CPUよりも低遅延のシステムを構築できる。ただし、市販のFPGAボードではアナログ・デジタル変換等を含めた遅延が大きく、フィードフォワードへの使用に不相当であったため、本研究では高速なADコンバータ・DAコンバータを選定し、それを用いた高速FPGAボードを特注した。また、本研究では広帯域なホモダインディテクタなどの技術も開発し、それらを用いて高速デジタ

ル非線形フィードフォワードを構築した。結果、広帯域な指数増大波束を持つ非ガウス型補助状態の生成と組み合わせた際に、全体での遅延が約100 nsの高速なフィードフォワードが実現可能であることを示した。

本研究では以上の成果によって、 n 次位相ゲートの実験の技術的障壁を一通り解決したと言える。次のステップとしては、2. 3.の装置を結合し、実際に3次位相ゲートの実験を行うことになると考えられる。また、 n 次位相ゲートが実現すれば、原理的には任意の量子計算が可能となるので、非ガウス型量子ゲートも含む計算エラーについての理論研究等、量子コンピュータの実用化に向けた研究が加速することが期待される。