

博士論文（要約）

3 次位相ゲート実現法の探求と
非線形フィードフォワードおよび
波束エンジニアリングの実現

宮田 一徳

量子情報処理は、量子力学特有の現象を情報技術に取り入れた、新しいタイプの情報処理である。特に、いわゆる量子コンピューターは、現在の（古典）コンピューターでは計算量的に困難なある種の問題を、効率的に解くことができると期待されている。その基本要素が、ユニバーサルゲートと呼ばれる有限個のユニタリー変換の集合である。ユニバーサルゲートは、その組み合わせによって任意の量子計算を構成できる。したがって、ユニバーサルゲートをいかに実現するかが重要となる。これまでも、光学系や原子・イオン系、超伝導系といった様々な物理系で、ユニバーサルゲートの実装に関する研究が進められてきた。

特に、光電磁場の直交位相振幅を連続変量と見る、光の連続量量子情報処理では、ユニバーサルゲートの実現は「非 Gaussian ゲート」ただ1つを残すのみとなっている。そもそも、光の量子状態に対するユニタリー変換は、Gaussian ゲートと非 Gaussian ゲートに分けられる。Gaussian ゲートは直交位相振幅について2次までの Hamiltonian に対応する。そして、ユニバーサルゲートに含まれる Gaussian ゲートは、これまでにすべて実現されてきた。一方、非 Gaussian ゲートは直交位相振幅について3次以上の Hamiltonian で表される。そして、非 Gaussian ゲートが何か1つでも実現されれば、これと既存の Gaussian ゲートを組み合わせることで、原理的には任意の Hamiltonian を構成できることが知られている。しかし、高次の Hamiltonian の実現には、高次の非線形光学過程が要求される。光の量子性が顕著となるような微弱光を用いて高次の非線形光学過程を得るのは一般に困難である。したがって、非 Gaussian ゲートの実現が、光の連続量量子情報処理のボトルネックとなっている。

本研究では、非 Gaussian ゲートの1つである「3次位相ゲート」について、その実現法の検討から、要素技術の実験的実証までを総合的に行った。実現法の検討においては、測定誘起型量子操作の考え方を元に、先行研究が提案している手法よりも補助入力状態の少ない、より実現的な手法を提案した。また、その入出力に関する考察から、要求される最適な補助状態を明らかにした。要素技術の実験的実証においては、3次位相ゲートの非線形性の起源である「非線形フィードフォワード」と、非古典性の起源となる「光子数重ね合わせ状態の生成」、さらにはその「波束エンジニアリング」をそれぞれ実現した。以下にその成果をまとめる。

3 次位相ゲート実現法の提案

3次位相ゲートは、3次の Hamiltonian に対応するユニタリー変換である。このゲートについては、Gottesman らによってその実現手法が提案されていた。彼らの手法は、3次位相ゲート実現の困難を、Gaussian ゲートの構築と補助状態の準備に分解するものである。まず、入力状態と補助状態を Gaussian ゲートでエンタングルする。次に、エンタングルした2状態の片方の直交位相振幅を測定する。そして、測定値に応じた Gaussian ゲートによって、測定されなかった状態を操作する（フィードフォワード）。こうして出力に現れる状態は、補助状態が適切であれば、入力に3次位相ゲートを施した状態になる。

ユニバーサルな Gaussian ゲートは既に実現されている。また、直交位相振幅の測定はホモダイン測定によって容易に実現できる。さらに、量子状態の準備はユニタリー変換の実現よりも一般に容易である。したがって、それらを組み合わせることで、3次位相ゲートは実現されるように思われる。しかし、次に述べる問題点から、Gottesman らの提案した手法の実現は困難であった。まず、3次位相ゲートに用いられる Gaussian ゲートがさらに多くの補助状態を必要とするために、補助状態

の不完全性が累積してしまうと考えられた。また、それらの補助状態の生成系や Gaussian ゲートのフィードフォワード系をすべて実装しようとする、1つの光学定盤上に収まりきらなくなってしまうほど巨大であると予想された。さらに、理想的な補助状態が無限大のエネルギーを必要とするために、実験ではその近似的な状態を扱わねばならないが、近似の評価指標が定まっていなかった。

本研究では、測定基底の選び方によって量子操作を変更するという測定誘起型量子操作の考え方を元に、より簡略な3次位相ゲートの実現手法を提案した [Physical Review A **93**, 022301 (2016)]. 3次位相ゲートを実現するために必要となる測定基底は、非線形な直交位相振幅によって与えられる。そのような測定が、2つのホモダイン測定と補助状態の準備によって実現されることを示した。

また、3次位相ゲートの入出力関係の考察から、ゲートの非線形性はフィードフォワード前の古典的な非線形演算で与えられ、一方の非古典性は補助状態による出力ノイズの除去として現れることを明らかにした。そして、出力ノイズを評価指標とすることで、近似的な補助状態の準備の検討方法を与えた。実際に、現実的に用意できる光子数重ね合わせ状態であって、ノイズを最小化する最適な係数をもつものを検討した。

非線形フィードフォワードの実現

3次位相ゲートにおいて、測定値に非線形演算を施してフィードフォワードを行う部分を、非線形フィードフォワードと呼んでいる。非線形フィードフォワードにおいては、ホモダイン測定の測定値に応じて、古典的な非線形回路のゲインを動的に切り替える必要がある。この回路を含む形で非線形フィードフォワードを抜き出すと、これは、動的にゲインを切り替えることのできる Gaussian ゲートになる。このゲートは2次の Hamiltonian で書かれる、スクイーミングと呼ばれる非線形光学操作である。

本実験では、実際に非線形演算回路を作製し、この動的スクイーミングゲートを実現した [Physical Review A **90**, 060302(R) (2014)]. そして、1 MHz の外部信号に追従してスクイーミングレベルを変更できることを示した。また、入力に 5 MHz で連続的に変位するコヒーレント状態を用いることで、この系が広い帯域の入力に対して適切に動作することを確認した。以上により、3次位相ゲートの実現可能性を示した。

従来、フィードフォワードに用いられる動的制御可能な操作は、線形光学における変位操作のみであった。そして、これまでに実現されていたスクイーミングゲートはすべて、スクイーミングレベルの変更にビームスプリッター透過率変更などの手作業を必要としたため、測定値に応じた動的制御は困難であった。したがって本実験は、動的制御可能な非線形光学操作として最初の例である。

光子数重ね合わせ状態の生成と波束エンジニアリングの実現

3次位相ゲート実現法の提案では、近似補助状態として非古典的な光子数重ね合わせ状態を検討した。これは過去の実験において、3光子までの任意の重ね合わせ状態生成を実証していたためである [Optics Express **21**, 5529–5535 (2013); Physical Review A **88**, 053816 (2013)]. 原理的には、同じ実験手法で任意の光子数までの任意の重ね合わせ状態が生成可能である。

こうして得られた状態を3次位相ゲートに用いようとしたとき、ホモダイン測定における振幅値の取り出し遅延が問題になった。量子状態は時間的に局在化した波束で定義されるから、状態の振幅を

取り出したければ、ホモダイン測定の信号に対して適切な波束形状で重み付けした積分をする必要がある。例えばこれを数値的に行おうとすると、アナログ・デジタル変換でおおよそ 100 ナノ秒程度の遅延が発生すると予想された。3 次位相ゲートにおいては、測定からフィードフォワードまでの古典回路と、測定されなかったビームの伝播時間を合わせる必要があるから、波束取り出しのために数十メートルの光学遅延が必要となる。長大な光学系は不安定になるから、実験が困難になってしまう。

本実験では、時間領域で指数増大型となるような波束に光子数重ね合わせ状態を生成することで、波束取り出し時間の低減を実現した。指数増大型波束であれば、ホモダイン測定後にアナログローパスフィルターを置くだけで、リアルタイムに振幅の取り出しが可能となる。実際に、単一光子状態および 0 と 1 光子数状態の重ね合わせを指数増大型波束に生成し、その振幅を直接オシロスコープ上で観察することに成功した。測定された量子状態の純度は最大で 74% に達した。ローパスフィルターによる振幅取り出しの精度は、数値的な振幅取り出しと 1, 2% 程度しか変わらず、正しく振幅値の取り出しができていることを確認した。

以上の成果は、3 次位相ゲートの実現に必要な要素を、理論と実験の両面から実証したものである。本研究を元にして、今後、3 次位相ゲートの実現が達成されるものと考えられる。その過程で、補助状態の改善や、光学遅延の短縮化・安定化を図る必要があるだろう。また、実際に 3 次位相ゲートが使用される局面において、出力の余剰ノイズがどの程度許されるかを、理論的にはつきりさせなければならない。そのためには、量子計算におけるエラーコレクションの枠組みを非 Gaussian ゲートに対してどのように構築するかが問題になると思われる。これらの研究を経ることで、量子計算のユニバーサルゲートが揃い、実用的な量子コンピューターが実現されると期待される。