

光子を用いた、3量子ビットのゲート操作実現に成功 光量子回路の飛躍的な高効率化に寄与

概要

京都大学大学院工学研究科の竹内繁樹教授らのグループは、光量子回路により、3つの量子ビットに対する「制御スワップ操作」を、外部入力の可能な物として初めて実現しました。本研究成果は、光量子コンピュータの集積化、高効率化や、量子状態を用いたさらに高度なセキュリティー技術の実現につながる成果です。なお本研究は、北海道大学、大阪大学および広島大学との共同研究です。論文は3月31日、*Scientific Reports* に掲載されました。

1. 背景

近年、量子力学の基本的な性質を応用し、従来不可能であった計算や通信、計測、センシングなどを実現する「量子技術」が注目されており、たとえば盗聴不可能な通信を実現する量子暗号¹通信や、既存のコンピュータでは解けない問題を解く量子コンピュータ²の実現に向けた研究が進められています。光の素粒子である「光子」³は、量子状態の保存性が良く、また長距離伝送が可能であることなどから、量子情報の有力な担体として研究が進められています。これまでに、2つの光子間のゲート操作（2入力2出力ゲート素子）は実現されています。しかし、現在その効率が限られており、その集積化の上で問題となっていました。それを解決すると期待されるのが、3入力3出力ゲート素子の実現です。特に、制御スワップゲートと呼ばれる素子は、量子誤り訂正や、量子指紋認証など、様々な量子プロトコルに用いることが可能です。制御スワップゲート素子は、2入力2出力素子を組み合わせることで理論上可能ですが、その場合、成功確率は10万分の1以下となり、実現は事実上不可能でした。

この問題に対し、Fiurášek (フューラセック)らは、2008年に、光の干渉計を組み合わせた独自の提案で、従来の500倍以上の効率(162分の1)で、制御スワップを実現する方法を理論的に提案しました。しかし、この方法を実現するには、非常に複雑な光干渉の長時間安定化など、技術的な困難が多数存在し、これまで実現していませんでした。また、最近、オーストラリアのグループにより、制御スワップ操作の実現が報告されましたが、これは外部からの光量子ビットの入力が不可能であり、光量子回路をはじめとする様々な応用にそのまま用いる事は出来ませんでした。

¹ 不確定性原理を利用して、通信路上の盗聴者の存在を検知しながら、遠隔地間で秘密の乱数鍵を共有する方法。共有した秘密鍵を用いて、暗号通信を行う。

² 量子力学的な重ね合わせの原理を利用して、莫大な数の並列演算を実施する、まったく新しい原理に基づく計算機。因数分解など、既存のスーパーコンピュータでは時間がかかりすぎて全く解けない問題を解くことができるとして、注目されている。

³ 光のエネルギーの最小単位で、素粒子の1つ。1ワットの光(可視光)は、毎秒約 10^{19} 個の光子から出来ている。

2. 研究手法・成果

我々は、Fiurášek が理論的に提案した方法に基づき、外部からの光量子ビットが入力可能な制御スワップゲート操作の実現に初めて成功しました。実験にあたっては、複数の特殊な半透鏡が、一つの光学部品に集積されたハイブリッド光学素子を巧みに組み合わせることで、非常に複雑な光回路を、長時間安定な光干渉計として実現するなど、技術的な課題を克服しました。制御スワップゲートは、制御ビットが1の場合のみ、2つの標的ビットの状態を入れ替えます。図1に実験結果を示します。入力の数字は、左端が制御ビットの値を、その右隣2つが、標的ビットの値を示します。また、高さは、そのような入

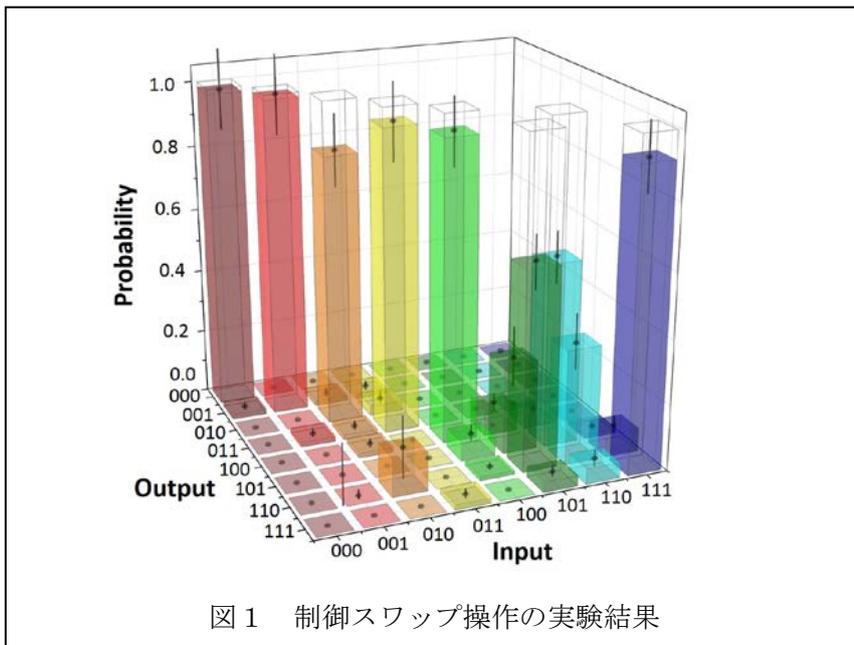


図1 制御スワップ操作の実験結果

出力値が得られた確率を表します。制御ビットが0の場合には、入力された標的ビットの状態は高い確率でそのまま出力されているのに対して、制御ビットが1の場合には、01は10に、10は01に高い確率で入れ替わっています。さらに、制御ビットに重ね合わせ状態を入力した場合に、3光子がもつれ合い状態が、生成されていることも確認しました。

3. 波及効果、今後の予定

今回の成果により、従来の2入力ゲートを組み合わせた光量子回路に比べて、光量子回路の効率を大きく高めることが可能です。また、量子指紋認証など、量子状態を用いたさらに高度なセキュリティー技術の実現などが期待されます。

4. 研究プロジェクトについて

日本学術振興会科学研究費、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 CREST、日本学術振興会 量子サイバネティクス、日本学術振興会 FIRST、科学技術振興調整費、光科学技術研究振興財団、GCOEプログラムなど。

<論文タイトルと著者>

タイトル : Implementation of a quantum controlled-SWAP gate with photonic circuits

(量子制御スワップゲートの光量子回路による実現)

著者 : Takafumi Ono, Ryo Okamoto, Masato Tanida, Holger F. Hofmann, and Shigeki Takeuchi

(小野 貴史、岡本 亮、谷田 真人、ホフマン E. ホルガ、竹内 繁樹)

掲載誌 : *Scientific Reports*

公表日 : 日本時間 (現地時間) 2017 年 3 月 31 日 18 時 (英国時間 3 月 31 日 10 時)

<イメージ図>

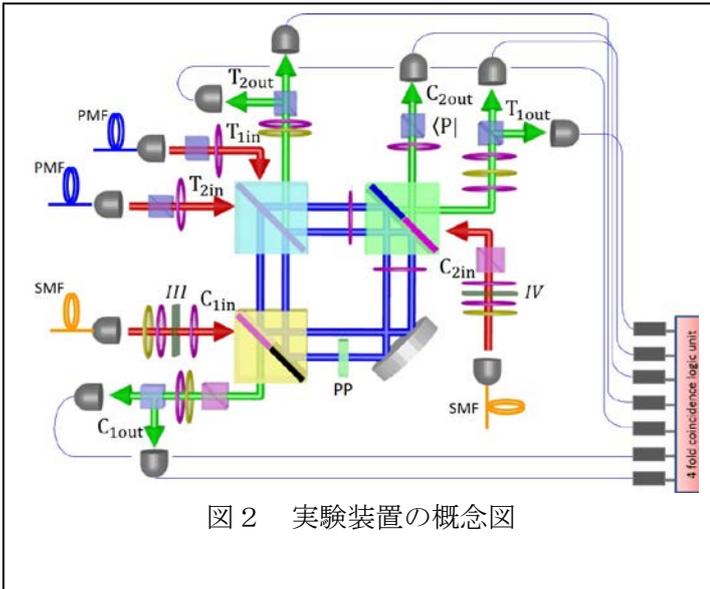


図 2 実験装置の概念図

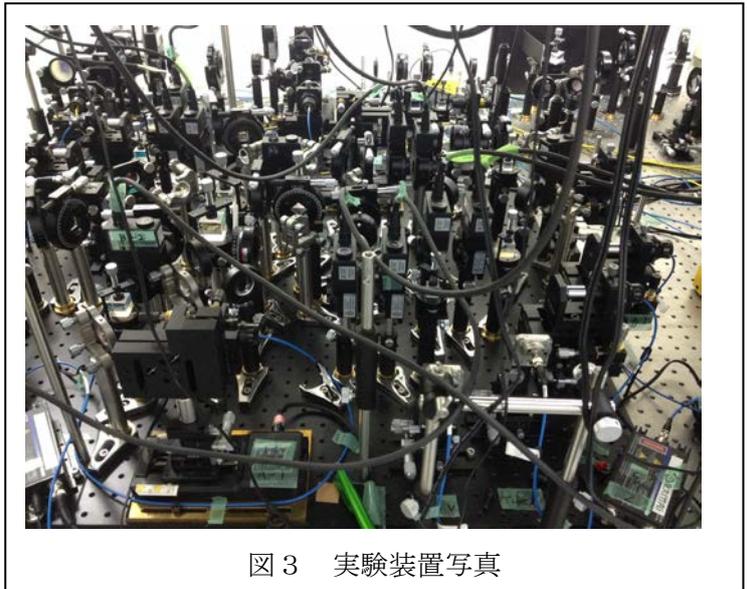


図 3 実験装置写真