

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 10 日現在

機関番号：10101

研究種目：新学術領域研究(研究領域提案型)

研究期間：2009～2013

課題番号：21102007

研究課題名(和文)光子量子回路による量子サイバネティクスの実現

研究課題名(英文) Toward the realization of Quantum Cybernetics using photonic quantum circuits

研究代表者

竹内 繁樹 (Takeuchi, Shigeki)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号：80321959

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 90,500,000円、(間接経費) 27,150,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、光子を用いた量子サイバネティクスの実現に向け研究を行った。領域内外との積極的な共同研究を推進した結果、フィードバック制御を利用した「適応量子状態推定」の実現、光量子情報の鍵となる光量子回路の実現、ナノ光ファイバによる、量子ドットやダイヤモンド結晶欠陥などの異種量子と光子の高効率インターフェースの実現、量子もつれ光を用い標準量子限界を超えた感度の顕微鏡の実現などの成果を得た。

研究成果の概要(英文)：The aim of this project was to explore the new concept Quantum Cybernetics using photonic quantum information technologies through collaborations with other researchers inside/outside the Quantum Cybernetics project groups. The main achievements include the realization of adaptive quantum state estimation, the realization of the optical quantum circuit for the heralded controlled not gate operation, the highly efficient coupling of photons from nanoemitters to a single-mode optical fiber using a nano-tapered optical fiber, and an entanglement-enhanced microscope.

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：ナノ・マイクロ科学、マイクロ・ナノデバイス

キーワード：量子サイバネティクス 量子情報 光子 制御 量子回路 フィードバック

1. 研究開始当初の背景

量子力学的な性質を直接情報処理や情報通信に応用することで、現在のコンピュータには時間がかかりすぎ解くことのできない問題を解く量子コンピュータや、高度なセキュリティを提供する、量子暗号・量子多者間プロトコルなどの、量子情報通信処理の研究が活発に進められている。

一方で、情報処理における重要な概念として、1947年にウィナーによって提唱された「サイバネティクス」がある。フィードバックなどの制御を中心に、通信、計算などを機械系から生物系にまで統合的にとらえる試みであり、現在の情報科学、生命科学の広い基盤的概念となっている。

「量子サイバネティクス」とは、量子情報に立脚しこのサイバネティクスの概念を探求、発展させるものである。そのために、様々な量子系における制御や情報処理の新概念の探求、ならびに、それら様々な異種量子系間をつなぎ、また複合した新しい学術領域の形成を試みる物である。

量子サイバネティクスの探求において、様々な量子の中でも、光子はいくつの特長を持つ。第一に、光子はその量子状態を保持したまま、長距離(数百キロメートル)伝搬可能である。また、可視光域の光子は、室温の背景放射のノイズから完全に隔離されている為に、光子検出器を用いて高精度で個々の光子を検出可能である。実際、量子力学の非局所性の検証実験も、1980年代に光子を用いて最初の実証されるなど、光子の研究は量子情報研究全体を先導してきた。量子暗号通信においても、光子が担体として用いられている。このように、さまざまな技術の集積がある光子は、量子サイバネティクスの理論的なアイデアを検証するためのテストベッドとして最適である。

また、異種量子間をつなぐ担体として光子は非常に重要である。トラップ中のイオンや、冷却原子、量子ドット、ダイヤモンド結晶欠陥などは、すべて可視・近赤外域の光子と相互作用を行う。その相互作用制御の研究は、まさに異種量子複合情報処理系の実現への重要な鍵となる。

研究代表者は、1996年に世界で初めて、単一光子と線形光学素子による量子アルゴリズムの実現を提案、1998年に検証実験に成功、以来光子を用いた量子情報処理・量子回路研究を推進してきた。2007年には、4光子もつれ合い状態と超高安定光量子回路を用いた、標準量子限界をこえる位相感度の実現に成功している[Science(2007)]。また、4つの光子と4つの量子ゲートを内包する、実現されている量子回路の中で最大規模の線形光学素子光量子回路「もつれ合いフィルター」を実現[Science(2009)]するなど、本研究を推敲する基盤と成る研究成果をあげてきていた。

2. 研究の目的

本研究では、この光子の特長を活かし、量子サイバネティクスの概念に基づき、光子を用いた量子制御テストベッドを構築を目標とした。具体的には、(1)現在幅広く用いられている「フィードバック制御」を利用した量子状態の推定や制御、さらに、(2)フィードバック制御における「入力状態」や「検出信号」のみならず、それらの「比較」デバイスまでも量子情報化した完全量子フィードバック制御にむけた光子量子回路の実現を目指した。

また、学際融合を目ざし、(3)異種量子間状態制御の実現を目標に、ナノフォトニクス技術を利用した光子と異種量子ビットを結合と制御について研究を推進する。さらに、量子メトロロジーなどへの展開も目標とした。

3. 研究の方法

(1) フィードバック制御を利用した量子状態の推定と制御

できるだけ少ない回数(測定)によって、正確に量子状態を推定することは、量子情報技術はもちろん、微弱光計測などにおいても非常に重要である。この問題に対して、量子1つ1つの計測結果に応じて毎回「測定方法」を最適化する、適応的(アダプティブ)な推定の理論が長岡らによって提案され、大阪大学の藤原らによって、その最適性(強一致性、漸近有効性)が証明されていた。我々は公募研究グループとして採択された大阪大学藤原彰夫教授らとの共同研究として、フィードバックの一種であるアダプティブな制御により、光子の量子状態を効率的に測定する新しい方法の実証実験に取り組んだ。

(2) 完全量子フィードバックの実現に向けた光量子回路

古典的な物理量では、与えられた2つの量が異なるか否かを判定する事は容易である。しかし、一度だけ与えられた2つの量子状態が異なるか否かを判定する事は容易でも自明でもない。この問題は、「量子指紋認証問題」と呼ばれ、その方法の一つとして、制御スワップゲート操作(フレッドキングゲート操作とも呼ばれる。)を用いる方法が提案されている。しかし、従来実現されてきた量子ゲートは、入出力の光子数が2個のものが殆どで、3入力3出力をもつこのフレッドキングゲート操作はまだ実現されていなかった。そこで、我々はこのゲート操作の実現を目標に、2009年に理論提案された光量子回路について実装に取り組むと共に、そのステップとして、伝令付き制御ノットゲート操作の実現や、2光子量子干渉の明瞭度の向上について、計画班の小芦グループと連携し研究した。

(3) ナノフォトニクス技術を利用した光子と異種量子ビットの結合に関する研究 イオン、量子ドットや結晶欠陥などの異種

量子ビットは、一般に光の波長以下のナノサイズであり、光子とそれら異種量子ビットとを効率的に相互作用させるための、プラットフォームの研究は非常に重要である。我々はそのプラットフォームとして、光ファイバを引き延ばして作成するテーパ光ファイバに着目した。直径を波長以下になるまで引き延ばしたテーパ部では、光子は強くファイバの外部に染みだしながら伝搬するため、異種量子ビットと光子を効率良く相互作用させることが可能になる。また、微小球共振器などの固体共振器に対する、超低損失の入出力インターフェースとしても活用が可能である。

異種量子ビットとしては、計画班の占部グループ、蔡グループとイオンおよび超伝導素子に関し、またダイヤモンド中の窒素欠陥中心については公募研究の水落グループならびにドイツ・フンボルト大学ベルリンと共同研究を進めた。

(4) 量子メトロロジーへの展開

光子を用いた量子サイバネティクスの興味深い応用分野として、計測技術がある。本研究では、量子フィードバックを用いた量子計測技術の研究も推進した。

4. 研究成果

本研究において、下記のような成果を得た。

(1) フィードバック制御を利用した量子状態推定の実現

限られた光量を用いて、最も精度良く光の状態を推定する新しい方法である、適応量子状態推定の実証実験に成功した[PRL(2014)]。光子は、古典力学的な粒子とは異なり、異なる状態の「重ね合わせ」状態をとる。そのため、1回の測定では、それら異なる状態の1つが確率的に検出されるため、どのような状態にあるかを知ることはできない。できるだけ少ない個数の光子の測定で、その状態を正確に推定することは、量子情報技術の他、生体光計測などにおいても非常に重要である。この問題に対して、光子などの量子1つ1つの計測結果に応じて毎回「測定方法」を適応的に最適化する「適応量子状態推定」が長岡浩司によって提案され、本新学術研究の公募研究班の藤原彰夫らにより最適性(強一貫性、漸近有効性)が数学的に証明されていた。今回、藤原グループと共同で、この「適応量子状態推定」の初めての実証実験に、光子を用いて成功した。実験では、パラメトリック下方変換を用いた伝令付き単一光子源から射出された光子を、ある特定の直線偏光状態に準備し、その偏光角度の推定を行った。光子300個に対する測定を500回繰り返し行い、その実験データを解析した結果、適応量子状態推定の最適性(強一貫性、漸近有効性)を厳密に確認した[PRL(2014)]。また、その後、パラメータを3つに拡張、任意の光子の状態

に対する適応量子状態推定にも成功、従来法の量子状態トモグラフィーよりも効率的な状態推定が可能なることの実証にも成功した[物理学会(2014)、論文準備中]。この適応量子状態推定は、光子に限らず他の量子に対して用いることができ、今後、量子情報処理・通信や量子メトロロジーといった広い領域に適応が可能である。

(2) 完全量子フィードバックの実現に向けた光量子回路の実現

光子1個レベルで動作する「非線形光スイッチ」を組み合わせ、光量子情報処理の基本となる、成功信号付き量子ゲート操作を実現した[PNAS(2011)]。

光子は、量子情報処理の媒体として非常に有力であるが、2つの光子を相互作用させる方法の実現が困難であった。この問題に対し、米国およびオーストラリアのグループ(Knill, Laflamme, Milburn)は、半透鏡で生じる量子干渉を利用して、光子1個レベルで動作する「非線形スイッチ」が実現できること、またそのようなスイッチを組み合わせることで、光量子コンピュータが実現できることを2001年に示した。この提案は大変注目されたが、半透鏡上での光子間の良質な2光子量子干渉が必要となること、また異なる光の経路を、百万分の1ミリメートル以下の精度で一致させる必要があるなどの技術的な困難さから、提案後10年間実現されていなかった。

我々は、英国・ブリストル大学のオプライン・ジェレミ教授、広島大学のホフマン・ホルガ准教授らとの共同研究の元、光子源の改良や、独自に開発した特殊な半透鏡、さらに光の干渉装置を工夫することで、コンパクトで非常に安定した実装を実現した。その結果、Knillらの提案した、光量子コンピュータの基本となる光量子回路を実現することに、初めて成功した。得られた平均ゲート忠実度は0.82と、十分高い量子性を示した[PNAS(2011)]。

また、計画研究の小芦グループの支援を受け、世界最高の2光子干渉性(96%)をもつ伝令付き単一光子源を実現[Opt. Exp. (2012)]、それらの成果を元に、量子状態の比較に用いられる制御スワップゲートの光量子回路の実装方法を発案した。

(3) ナノフォトニクス技術を利用した光子と異種量子ビットの結合に関する研究

単一分子・単一量子ドット・単一蛍光ナノ粒子などの固体単一発光体からの発光は、量子情報処理における単一光子源として利用される。その様な単一光子源からの光子を、シングルモード光ファイバに高効率で結合させる事は極めて重要である。従来、単一発光体からの発光は、高倍率対物レンズによって集められた後、シングルモード光ファイバへ結合されてきたが、発光体からの全発光量

の1~2%程度しか結合できていなかった。

我々は、光ファイバの一部を加熱溶融しながら延伸、延伸部の両端がテーパ形状通常の光ファイバとなるテーパ光ファイバの研究を進めた。その結果、テーパ部直径300nmと、光の波長よりも細い「ナノ光ファイバ」の作製に事に成功した[Opt. Exp. (2011)]。その上に単一の量子ドットを配置したところ、量子ドットの全発光量の7.4%を、直接シングルモード光ファイバに結合する事を見出した[Nano Lett. (2011)]。また、フンボルト大ベルリンと共同で、ダイヤモンド結晶欠陥からの光子の結合にも成功した[Opt. Exp. (2012)]。

(4) 量子もつれ顕微鏡の実現

我々は、もつれあった光子対を用い、世界で初めて、古典理論の限界を超えた感度をもつ「量子もつれ顕微鏡」を実現した[Nature Communications(2013)]。

光学顕微鏡のなかでも、微分干渉顕微鏡は、対象物を染色等することなく、そのまま非侵襲で観察・計測する手段として、生物学や医学などで広く用いられている。その顕微鏡の深さ方向分解能や計測精度は、標準量子限界と呼ばれる、光の古典理論によって決まる信号雑音比で決まっている。その限界の下では、より高い深さの分解能や計測精度を得るためには、より強い光を当てるしか方法がない。しかし、強い光を照射すると、対象サンプルの損傷などの影響を与えるため、重大な問題となっている。

我々は、本新学術領域研究開始前に、量子力学的な相関を持った光子を用い、標準量子限界を超えた位相測定が可能であるという原理検証実験に成功していた[Science(2007)]。そこで、このもつれ光子を微分干渉顕微鏡の照明光として利用することで、標準量子限界を突破することを発案した。本新学術研究で開発した良質な量子もつれ光子対源などの技術を用い、「量子もつれ顕微鏡」を世界で初めて実現した。その顕微鏡を用い、ガラス基盤の表面に、原子100個程度の厚みで浮き彫りされた「Q」という文字の観察を行った結果、通常の光を用いた観察(標準量子限界)に比べ、1.35倍の信号雑音比を達成した。今後、より多数の光子のもつれ状態を実現することで、微分干渉顕微鏡の「感度」を、標準量子限界を大きく超えていくことが可能であり、生物学、医学などをはじめ幅広い分野への応用が期待される。

(5) 領域内外との共同研究成果

新しい新学術領域の創出を目指し、領域内外との共同研究も積極的に実施した。上に述べた、公募研究の藤原グループと共同で実施した適応量子状態推定の実現、計画研究の小芦グループと実施した高量子干渉性伝令付き単一光子源の実現の他、ナノ光ファイバを用い、イオンから出力される光子の高効率捕

集を目ざした共同研究を占部グループと共同で実施、ナノ光ファイバ表面の電荷分布情報を荷電粒子トラップを用いて得ることに成功した。また、公募研究の水落グループと、ダイヤモンド中の窒素欠陥とナノ光ファイバの結合に関する研究を実施、単一の窒素欠陥の光検出磁気共鳴のナノ光ファイバを用いた検出に成功するなどの成果を得た。

また、領域外についても、上に述べたブリュッセル大、フンボルト大ベルリン、広島大との共同研究の他、大阪大の鷲尾グループと共同で、データマイニングの手法を量子状態のエラー検知に応用するなど、これまでに類例のない学際研究も実施することができた。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計27件)

(1) T. Ono, R. Okamoto and S. Takeuchi, “An Entanglement-enhanced Microscope”, Nature Communications, Vol.4, 3426(2013) 査読有 DOI:10.1038/ncomms3426

(2) R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai, A. Fujiwara and S. Takeuchi, “Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation”, Phys. Rev. Lett. Vol.109, 130404 (2012) 査読有 DOI:10.1103/PhysRevLett.109.130404

(3) M. Fujiwara, K. Toubaru, T. Noda, H. Q. Zhao and S. Takeuchi, “Highly Efficient Coupling of Photons from Nanoemitters into Single-Mode Optical Fibers”, Nano Letters, Vol. 11, 4362-4365(2011) 査読有 DOI: 10.1021/nl2024867

(4) R. Okamoto, J.L. O'Brien, H.F. Hofmann, and S. Takeuchi, “Realization of a photonic quantum circuit combining effective optical nonlinearities into a Knill-Laflamme-Milburn C-NOT gate”, Proceedings of the National Academy of Science, Vol. 108, 10067-10071 (2011), 査読有 DOI:10.1073/pnas.1018839108

[学会発表](計54件)

(1) S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Iefuji, S. Oyama, K. Yamagata, H. Imai and A. Fujiwara, “Experimental demonstration of adaptive quantum state estimation”, 20th Central European Workshop on Quantum Optics, The Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, (2013.6.1) 招待講演

(2) S. Takeuchi, R. Okamoto, M. Fujiwara, H. Q. Zhao, H. Takashima, A. Tanaka, H. F. Hofmann, J.L. O'Brien, “Optical quantum circuit combining tailored optical nonlinearities”, SPIE Photonics West 2011, The Moscone Center, (2011.1.26), 招待講演

(3)竹内繁樹、「光子を操る - 光量子回路の実現とその未来」、第71回応用物理学会学術講演会特別シンポジウム「レーザー50周年」、長崎大学文教キャンパス、(2010.9.15)招待講演

〔図書〕(計6件)

(1) 竹内繁樹、エヌ・ティー・エス、「第2編応用編 第1節 量子情報通信・処理の実現に向けた高効率固体量子位相ゲート」、2010,440

(2) 竹内繁樹、強光子場科学研究懇談会 発行、「I-1-6 光量子回路の現状と展望」、2010, 272, p.14

〔産業財産権〕

取得状況(計1件)

名称：テーパー光ファイバ

発明者：竹内 繁樹

権利者：北海道大学

種類：特許

番号：第5354605

取得年月日：2013年9月6日

国内外の別：国内

〔その他〕

ホームページ等

北海道大学電子科学研究所光量子情報研究分野

<http://www.sanken.osaka-u.ac.jp/labs/qip/index.html>

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹内 繁樹 (TAKEUCHI SHIGEKI)

北海道大学・電子科学研究所・教授

研究者番号： 80321959

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

岡本 亮 (OKAMOTO RYO)

北海道大学・電子科学研究所・助教

研究者番号： 10435951