

刻々と変化する量子状態を最も精度よく推定する新規手法を実現

概要

光子や電子などの「量子」を自在に制御する「量子技術」が大変注目されています。「量子」は、古典力学的な「粒」とは異なり、異なる状態の「重ね合わせ」状態をとります。それらの量子を1回測定すると、それら異なる状態の何れかとして検出されるため、1回の測定では、どのような「重ね合わせ状態」にあるかを知ることとはできません。そのため、できるだけ少ない個数のサンプルにより、正確にその量子状態を推定することは、非常に重要ですが、従来手法では最適な推定は実現できていませんでした。以前に京都大学大学院工学研究科 竹内繁樹 教授らの研究グループは、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な推定方法（適応量子状態推定）を、光子を用いた実験で実証しましたが、対象は時間的に変化しない特殊な量子状態に限られており、通常推定の対象となる、時々刻々と変化する量子状態には用いることができませんでした。

今回、京都大学大学院工学研究科 野原紗季 博士課程学生、岡本亮 同准教授、竹内繁樹 同教授は、大阪大学藤原彰夫 教授とともに、時間的に変化する量子状態を推定できる「連続適応量子状態推定」を提案、シミュレーションおよび実験で、物理学の限界の精度で推定できることを実証しました。この連続適応量子状態推定は、光子に限らず、電子や核スピンなど多様な量子系に用いることができます。本研究成果を用いると、より少ない個数のサンプルで、正確に量子状態を推定することができるため、微弱な信号や、高速な現象を捉えることが可能になります。今後、量子技術はもちろん、天体観測や生体光計測まで広い領域にわたって役立つことが期待されます。

本成果は、2020年9月9日に米国の国際学術誌「Physical Review A」に、特に重要な新しい結果が選ばれた Rapid Communications として、オンライン掲載されました。

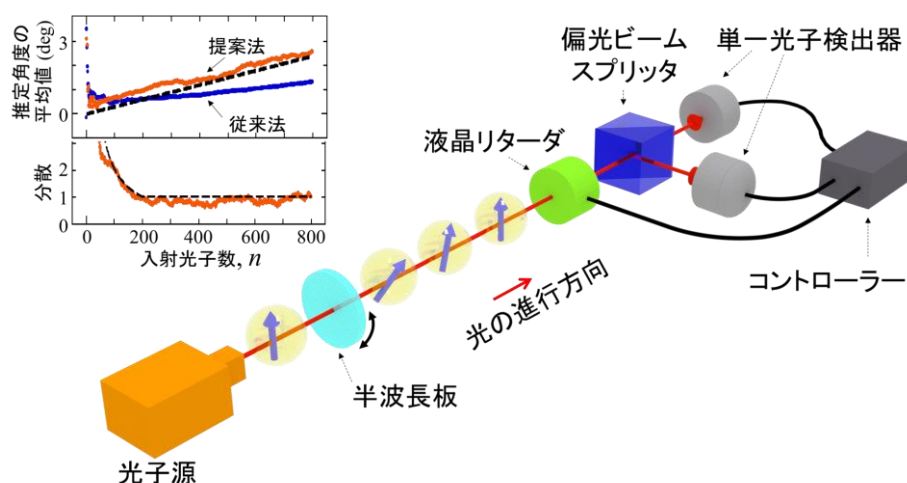


図1 連続適応量子状態推定のイメージ図

1. 背景

電子や光子などの量子は、通常の物体には見られない振るまいをします。その量子の振るまいを制御することで、飛躍的な計算能力を実現する量子コンピューターや、盗聴不可能な暗号を実現する量子暗号、さらに、従来の計測技術の限界を超える量子センシングなど、「量子技術」の研究が精力的に進められています。その中でも、光子は、長距離伝送が可能で、また室温でも量子状態が保存されるため、有力な担体です。

光子は、古典力学的な“粒”とは異なり、異なる状態の「重ね合わせ」状態をとります。光子を1回測定すると、それら異なる状態の何れかとして検出されるため、1回の測定では、どのような「重ね合わせ状態」にあるかを知ることができません。そのため、できるだけ少ない回数の測定によって、正確にその状態を推定することは、量子技術はもちろん、生体光計測などにおいても非常に重要です。

以前私たちは、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な推定方法（適応量子状態推定）を、光子を用いた実験で実証しました。しかし、その用途は、時間的に変化しない量子状態に限られていたため、生体分子のように時々刻々と変化する対象には用いることができませんでした。

2. 研究手法・成果

本研究ではまず、従来の適応量子状態推定を拡張し、時間的に変化する量子状態を計測可能なアルゴリズム（図2）を考案しました。適応量子状態推定では、過去の光子の測定結果を全て記録しその全ての情報から次の光子の最適な測定手法を決定します。しかしこれでは、古い記録にひきずられてしまい、時間的に変化する量子状態を正しく推定することができません。そこで今回は、より直近に測定された光子の情報のみを用いるようにアルゴリズムを改良することで、この問題の解決を試みました。

提案手法の有効性を確認するために、シミュレーションと実験を行いました。直線偏光をもった入力光子の偏光角度を時間的に変化させ、その偏光角度を推定しました。従来の適応量子状態推定では、変化に追従することができず、徐々に推定した偏光角度と真の偏光角度の間の違いが大きくなっていくのに対し、連続適応量子状態推定では、変化に追従できることが確認できました。さらに、推定に用いた光子の数に対する理論的な測定精度限界に到達することを実証しました。

3. 波及効果、今後の予定

本研究成果を活用することで、より少ない個数のサンプルで、正確に量子状態を推定することができるため、微弱な信号や、高速な現象を捉えることが可能になります。そのため、量子コンピューター内の量子ビットの時間的な変化や、量子暗号の通信路が量子ビットに与える影響の時間的な変化を高速/高精度に追跡できるようになると期待されます。さらに、量子技術だけでなく、生体計測の分野でも、生体分子等から発せられる限られた光子から、その状態を読み解くことができるようになると期待されます。

今後は、生体計測をはじめとする、さまざまな研究分野への本技術の応用を目指します。

4. 研究プロジェクトについて

本研究は、科学研究費補助金、科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業(CREST)、文部科学省光・量子飛躍フラッグシッププログラム（Q-LEAP）等の支援を受け、大阪大学と共同で実施しました。

<用語解説>

量子技術：重ね合わせやもつれ合いといった量子力学の不思議な性質を利用して古典的にはできない情報処理を行うことです。古典よりも本質的に高速な計算が可能な量子計算や、物理法則により盗聴を防ぐ量子暗号通信等が含まれます。

重ね合わせ状態：量子力学では、二つの異なる状態を同時にとることが可能で、それを量子重ねあわせ状態と呼びます。例えば、1つの電子が別々の場所に同時に存在することができます。

<研究者のコメント>

本研究成果は、量子技術の一つと言えますが、量子情報分野に限らず広く応用できる可能性を秘めています。今後は、この本研究成果の応用への展開を積極的に進めていきます。

<論文タイトルと著者>

タイトル：Adaptive quantum state estimation for dynamic quantum states

(動的な量子状態に対する適応量子状態推定)

著 者：野原紗季（京大）、岡本亮（京大）、藤原彰夫（阪大）、竹内繁樹（京大）

掲 載 誌：Physical Review A Rapid communications

D O I：https://doi.org/10.1103/PhysRevA.102.030401

< 参考図表 >

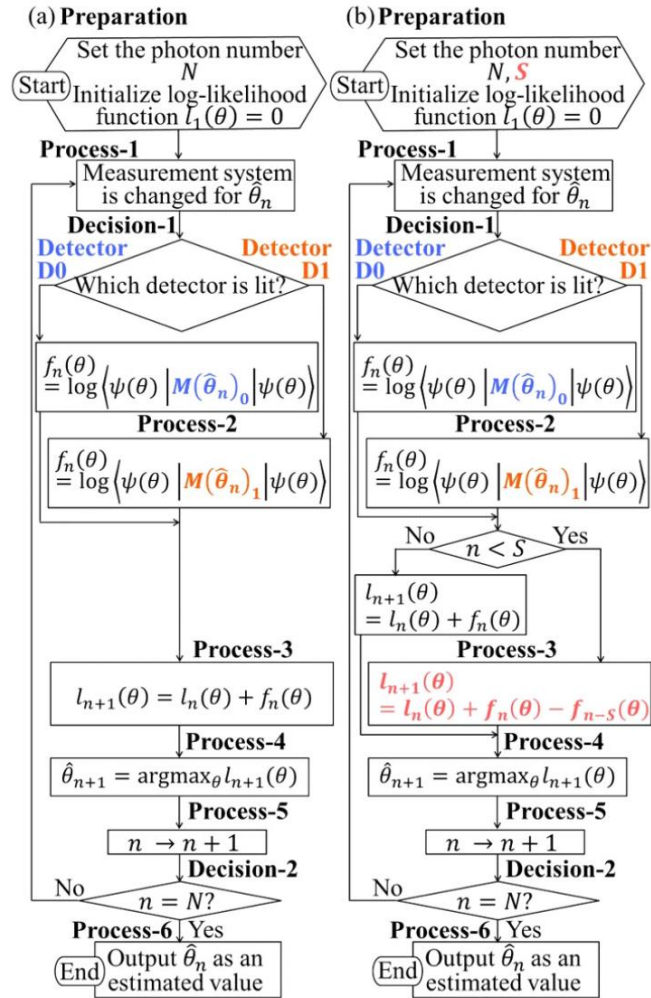


図 2 (a)従来の AQSE のアルゴリズム。(b)今回提案・実証した SAQSE のアルゴリズム。SAQSE では、古い記憶を消すこと ((b)赤字部分の $-f_{n-s}(\theta)$ がそれに対応) で、変化に追従できるアルゴリズムになっています。

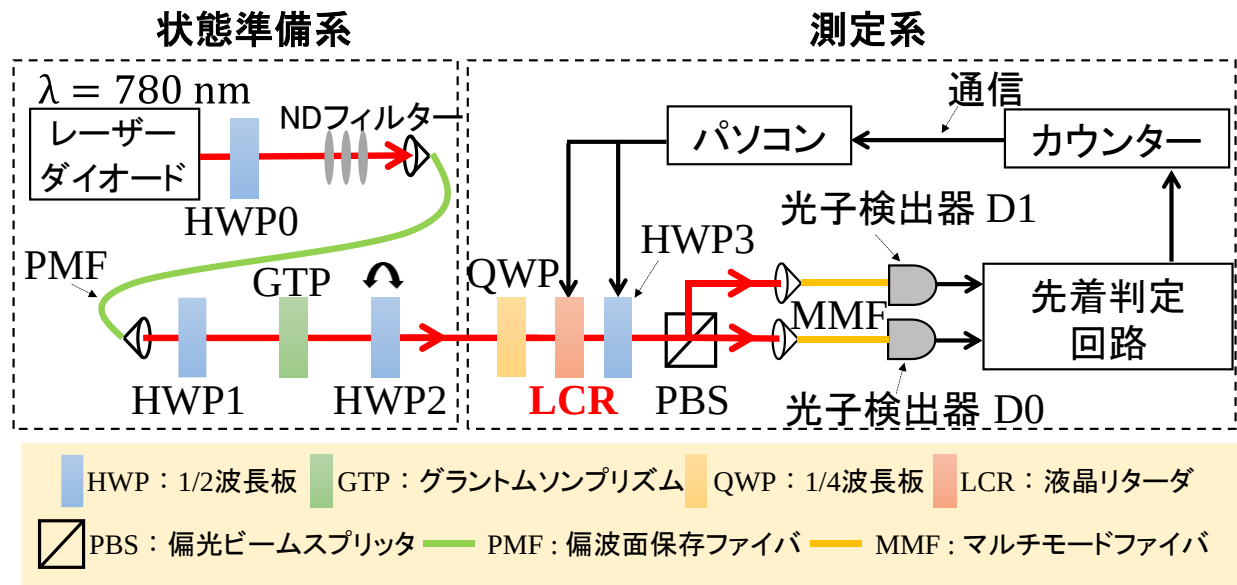


図3 実験装置の模式図。波長 780nm の半導体レーザー(Laser diode)を減光したものを光源として用いました。光子の偏光は、半波長板 (HWP2) で時間的に変化させながら、液晶リターダ(LCR)と偏光ビームスプリッタ(PBS)の組み合わせで偏光角度の測定を行いました。測定器の最適化は、LCR に印加する電圧を計算結果に基づき設定することで行いました。

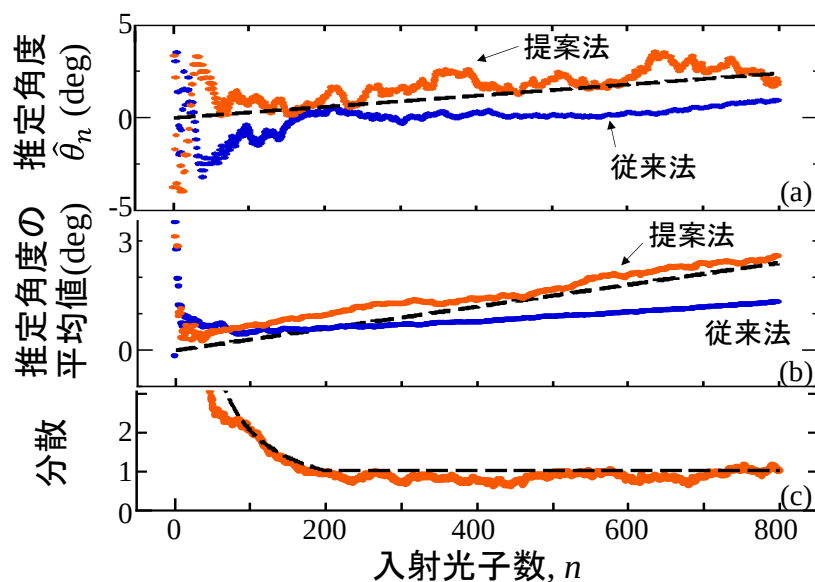


図4 適応量子状態推定の実験結果。ダッシュ線が、真の偏光角度、橙点が連続適応量子状態推定(SAQSE)の測定結果、青点が適応量子状態推定(AQSE)の推定結果です。(a)は、一つの測定結果、(b)は、100 個の測定結果の平均です。時間的に変化する偏光角度に SAQSE はよく追従できていることが分かります。また、推定値の分散((c)の橙点)を評価した結果から、理論的な最適値 ((c)のダッシュ線) とよく一致していることが確認できます。

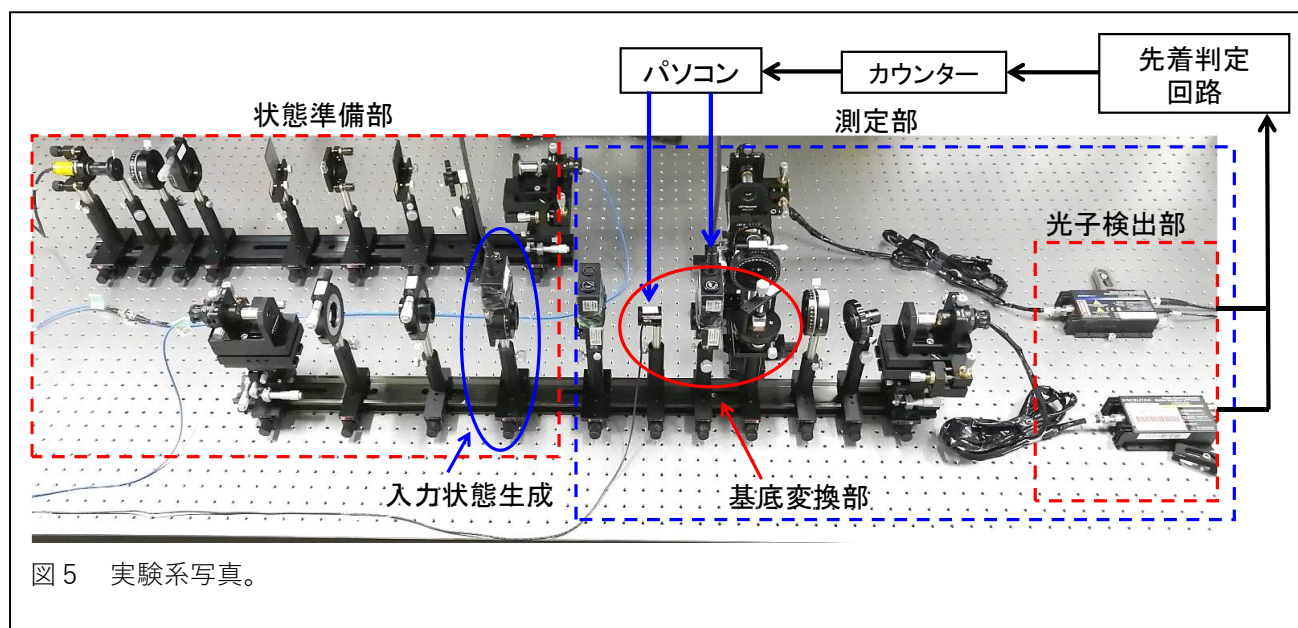


図5 実験系写真。