

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月10日現在

機関番号：10101

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17524

研究課題名(和文)量子もつれ光子対を利用した光計測技術の古典光学的実現

研究課題名(英文)Classical optical realization of optical measurement technology using quantum entangled photon pairs

研究代表者

小川 和久(Ogawa, Kazuhisa)

北海道大学・情報科学研究院・助教

研究者番号：80772574

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：近年、光の量子性を積極的に利用した計測手法である「光量子計測」の研究が盛んに行われているが、量子もつれ光子対は一般に微弱であるため実験的困難が多い。本研究では、それら量子光学系の時間反転系を用いることで古典光学的に再現し、光計測に応用することを目指した。まず量子もつれ光子対を用いて実現できることが知られている、回折限界を超えるYoung干渉縞および集光ビームスポットに関して、時間反転系を用いて古典光学的に再現した。また古典光学的に実現した自動分散消去技術を応用して、光干渉断層撮影における分散による分解能低下の抑制を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光量子計測は様々な手法が提案・実験されているが、量子光の取り扱いの難しさにより多くは実験検証段階であり実用に至っている技術は少ない。本研究は、これらの技術を古典光学系に焼き直すことで、実際に光計測に実装できる方法を提供するという意義がある。本研究での分散消去された光干渉断層撮影の時間反転系を用いた古典光学的実現は、この性質を実現するために量子もつれ光子対は必要条件ではないことを示す例となっている。しかしながら、時間反転系で再現した回折限界を超える集光ビームスポットがイメージングには適用できず、これは時間反転法は万能ということではないことを示す結果となった。

研究成果の概要(英文)：In recent years, research on "quantum optical measurement", which is a measurement method that uses the quantum properties of photons, has been actively conducted. However, since quantum entangled photon pairs are generally weak, there are many experimental difficulties. In this study, we aimed to reproduce the quantum optical measurement in classical optics by using time reversal system, and apply it to optical measurement techniques. First, We reproduce Young's interference fringes and focused beam spot exceeding the diffraction limit, which is can be realized by using entangled photon pairs, in classical optics. Second, we applied the automatic dispersion cancellation technique, which can be realized by classical time-reversed systems, to reduce the resolution degradation due to dispersion in optical coherence tomography.

研究分野：光量子計測

キーワード：量子計測 時間反転 回折限界 標準量子限界

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

光を用いた距離や時間などの計測技術は、干渉を利用した精密測定や物質の内部構造の非接触測定などの利点を持つため、現在幅広い分野で応用されている。近年では、さらに光の量子性を積極的に利用した計測手法である「光量子計測」に注目が集まっており、従来の光計測手法にはない優れた特徴を持つ計測手法が提案・実験されている[1-8]。これらの技術は実験的に実現され、さらに光計測への応用に向けた研究が進められている。光量子計測では、光源として主に自発的パラメトリック下方変換(SPDC)により生成される量子もつれ光子対が用いられる。SPDCにより生成される量子もつれ光子対は一般に微弱であるため、十分な計測データを取得するために測定が長時間化し、その間に外乱により量子もつれ状態が容易に乱されるなど、古典光学系のみを用いる光計測系と比較して実験的困難が多い。そのため光量子計測は未だ実験検証段階にあり実用には至っていない。そこで新たなアプローチとして「そもそも光の量子性を利用して実現できるとされる各々の技術は、必ずしも光の量子性が必要なのか?」という点に着目する。もしそれらの技術が古典光学的に実現できるならば、量子光を用いた場合に比べ外乱に対し安定で高速測定可能な実用に耐えうる計測系が構築できる。

### 2. 研究の目的

本研究では、量子光により実現できることが知られているいくつかの技術は古典光学的に実現でき、光計測に応用することができる」ことを実験的に実証することを目的とし、具体的に以下の研究を行う。

#### (1)各技術の古典光学的実現の検証実験

量子光により実現できることが知られているいくつかの要素技術について、時間反転光学系を考える事で古典光学的に実現できることをそれぞれ理論的に検討し、可能であればその後実験的に実証する。

#### (2)光計測技術への応用実験

(1)で古典光学的に実現可能であることが実証された技術を各種レーザ顕微鏡(共焦点顕微鏡、微分干渉顕微鏡等)に組み込むことで、組み込まれた技術の利点がこの計測系のイメージング性能に反映され、性能向上に寄与することを実験的に明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1)各技術の古典光学的実現の検証実験

量子光により実現できることが知られている要素技術として、自動収差消去[4]、自動分散消去[5,6]、検出しな光によるイメージング[7]、回折限界を超えるビーム集光[8]に着目する。これらは量子もつれ光子対の性質を利用して実現された性質であるが、これらと同じ光子検出統計は時間反転光学系を用いて古典光学的に再現することができる。時間反転光学系とは、始状態と終状態を入れ替えて時間発展を逆転させた光学系であり、量子力学の時間反転対称性より、順方向系と同じ光子検出確率を示す。さらに順方向系における光子対生成(SPDC)は時間反転系では和周波生成(SFG)という(古典)非線形光学効果となるため、時間反転系は古典光学によって説明できる系となる。順方向系と同じ光子検出確率が古典時間反転光学系で再現できても、それが光計測技術に利用できるかどうかは各系ごとに異なるため、それぞれの系でこの時間反転法の実現性・有効性を検討する必要がある。

上記4つの例のうち、自動分散消去は時間反転系を用いて古典光学的に実現できることがすでに知られており[9-11]、申請者もそれらとは異なる時間反転系を用いて原理検証実験を行った[12]。したがって自動分散消去に関しては次の(2)の研究から行う。

#### (2)光計測技術への応用実験

(1)の実験で得られた知見を実際に光計測システムへ応用し、イメージングにおける性能向上に利用できることを実験的に実証する。応用先の光計測システムとして、各種レーザ顕微鏡(共焦点顕微鏡、微分干渉顕微鏡、光干渉断層撮影等)を想定する。これは各種レーザ顕微鏡がいずれも、空間分解能が光源の回折限界で制限される、球面レンズ等の使用により収差で空間分解能がさらに悪化する、被測定対象に照射する光の波長やエネルギー密度が被測定対象の透過率や損傷閾値で制限される、という性質を持つため、それぞれ(1)の実験の結果が有用となることが期待できるためである。まず、(1)の実験の結果から得られる実験的実現性や応用上の問題点、光計測システムに実装された際のインパクトを考慮し、(1)の実験の成果のうち1つ以上を組み込んだ光計測システムを提案する。その後光学実験による検証を行い、提案した計測系がイメージングにおける性能向上に利用できることを確認する。

### 4. 研究成果

(1-1) 時間反転法を用いた、位置-波数において量子的にもつれた光子対が示す量子光学干渉の古典光学的実現

光ビームを集光すると、ビームスポットにおける強度分布は波長に比例する有限の幅を持つ。この制限を回折限界という。位置-波数もつれ光子対を用いると、回折限界を超える小さい領域光子検出分布を集中させることができる[13]。また Young の干渉縞の空間周期も回折限界により制限されているが、位置-波数もつれ光子対を用いるとより小さい空間周期の干渉縞を観測す

ることができる[14]. これらの現象は位置-波数において量子的にもつれた光子対が示す量子光学干渉であり, それらの順方向光学系[図1(a)]の時間反転した光学系[図1(b)]を用いることで, それらの干渉パターンを古典光学的に再現する実験を行った.

その結果, 量子光学系では到達できない出力パワーで Young 干渉縞[図2], 集光ビームスポット[図3]のそれぞれの干渉パターンを観測することに成功した. 時間反転法はこれまでに時間-周波数もつれ光子対を用いた光学系には適用されてきたが, それ以外の自由度の量子もつれ光子対に対して適用した例はなかった. 本研究は時間-周波数以外の自由度である位置-波数の自由度の量子もつれ光子対に対して時間反転法を適用した初めての実験である. この成果は, 論文誌 Physical Review A にて出版された[雑誌論文]. また, 国内会議として日本物理学会第72回年次大会, QIT36, 第20回光科学若手研究会で口頭発表, 第6回 QUATUO 研究会, QMNH2018 でポスター発表, 国際会議として IC024 にて口頭発表を行った[学会発表②~⑦].

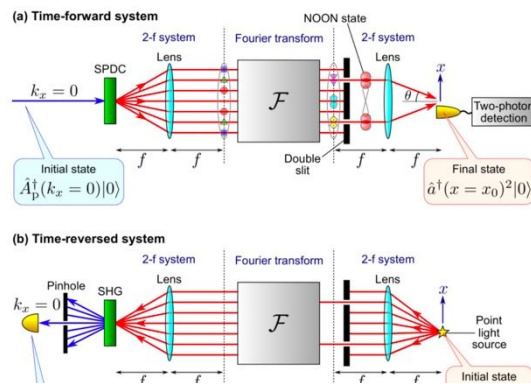


図 1: (a)順方向 2 光子光学系. (b)時間反転 2 光子光学系.

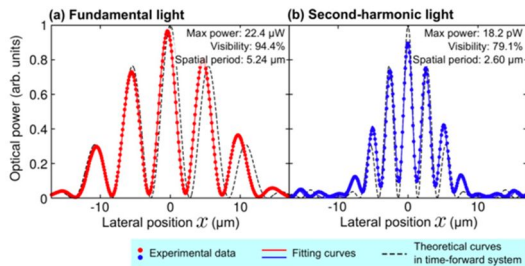


図 2: (a)基本光の Young 干渉縞. (b)時間反転 2 光子光学系における Young 干渉縞.

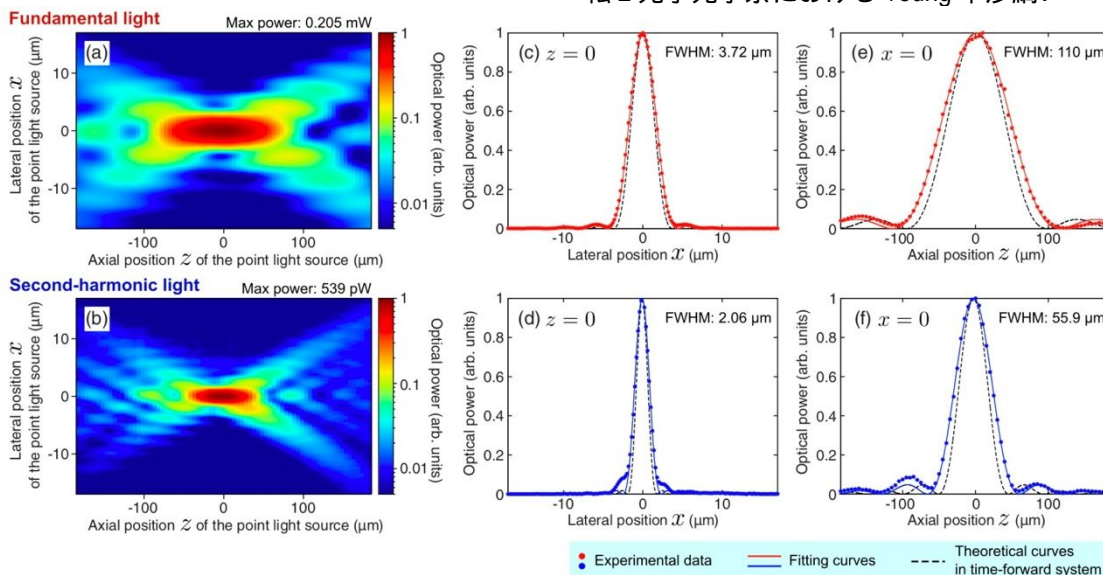


図 3: (a), (c), (e)基本光の集光ビームスポット. (b), (d), (f)時間反転 2 光子光学系における集光ビームスポット. (a), (b)z-x 平面におけるビームスポットのパワー分布. (c), (d)z=0 におけるパワー分布. (e)(f)x=0 におけるパワー分布.

### (1-2) その他の各技術の古典光学的実現に向けた検討

その他の量子もつれ光子対を用いて実現される各技術について, 時間反転系を用いて古典光学的に再現することを検討した. 自動収差消去については, 理論的には実現可能であることがわかったが, 実験系の新規立ち上げに際し細かい消耗品等を購入する必要があったため, 実験に必要な空間光変調器の調達ができなかったため実験を断念した. 検出しない光によるイメージングについては, 研究実施期間中にその古典光学的実現が他研究グループにより発表された[15].

当初想定していた量子もつれ光子対を用いて実現される技術に加えて, 以下の 2 つの研究の検討を行った. まず, 標準量子限界を超える感度の位相計測が古典光学的に実現できるかどうかを検討した. 量子もつれ光子を用いることで位相感度の古典限界である標準量子限界を超えることが知られている[1-3]が, 使用する総光子数の条件を緩めることで, 「典型的に認識されている古典限界」を超えることが時間反転系では古典光学的にも可能ではないかという点に関して検討を行った. しかし計算が煩雑であったため研究実施期間内に実現可能性を理論的に判定することはできなかった. さらに, 分散媒質における分散量の計測の高精度化が量子もつれ光

子対を用いる事で実現できることが実験的に示された[16]が、この技術について時間反転法を適用したところ、時間反転光学系を用いて古典光学的に実現できることが判明した。こちらについては実験準備を行っているところで研究実施期間終了に至っている。

#### (2-1)分散消去光干渉断層撮影への応用実験

研究実施期間以前に申請者は、量子もつれ光子対を用いて実現できる自動分散消去を、その時間反転系を用いた古典光学的実現の原理検証実験を行った[12]。この要素技術を用いて、光干渉断層撮影における分散による分解能の低下を抑制する応用実験を行った。図4上図のように時間反転分散消去光学系の光路中に被測定サンプル(カバーガラス)と分散媒質を配置すると、図4下図のように分散の影響をほとんど受けない断層撮影像が得られた。さらにデモンストレーションとして図5に示すように100円硬貨の表面の断層撮影も行い、分散の影響を受けない断層像が得られることを示した[図5(f)]。この成果は、論文誌Optical Expressにて出版された[雑誌論文]。また国際会議としてQCMC2016にてポスター発表を行った[学会発表]。

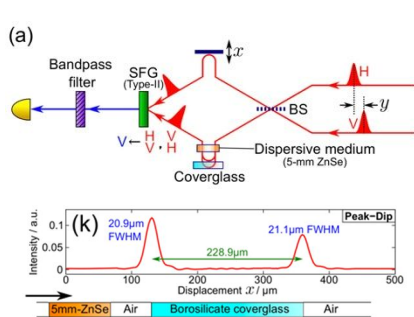


図4: (上図)カバーガラスの分散消去光干渉断層撮影のための光学系。(下図)光路中に分散媒質がある場合のカバーガラスの断層撮影像。

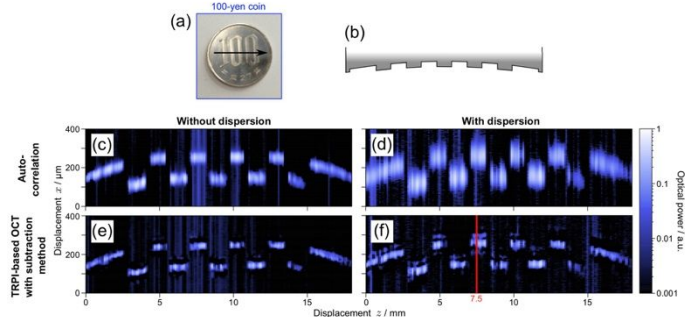


図5: (a)被測定サンプルの100円硬貨。(b)100円硬貨の表面の模式図。(c)-(f)断層撮影像。(c)(d)従来法。(e)(f)提案手法。(c)(e)分散媒質なし。(d)(f)分散媒質あり。

#### (2-2) 回折限界を超える量子光学イメージングの古典光学的実現の検討

(1-1)で実現した時間反転法による回折限界を超える集光ビームスポット技術を応用して、回折限界を超える量子光学イメージングを古典光学的に実現する応用実験を目指した。この実験のための事前理論計算として、開口で挟まれたサンプルの線形イメージングという一般的な状況設定において分解能向上が実現できるかどうかを検討した。しかしその結果、集光ビームスポット径は小さくなるものの、古典光を用いても量子光を用いても実質的な分解能向上が見込まれないということが判明した。そのため量子光学系でも時間反転古典光学系でも実験を断念した。

#### <引用文献>

- [1] V. Giovannetti *et al.*, Science **306**, 1330 (2004).
- [2] T. Nagata *et al.*, Science **316**, 726 (2007).
- [3] T. Ono *et al.*, Nat. Commun. **4**, 2426 (2013).
- [4] C. Bonato *et al.*, Phys. Rev. Lett. **101**, 233603 (2008).
- [5] A. M. Steinberg *et al.*, Phys. Rev. Lett. **68**, 2421 (1992).
- [6] M. B. Nasr *et al.*, Phys. Rev. Lett. **91**, 083601 (2003).
- [7] G. B. Lemos *et al.*, Nature **512**, 409 (2014).
- [8] A. N. Boto *et al.*, Phys. Rev. Lett. **85**, 2733 (2000).
- [9] R. Kaltenbaek *et al.*, Nat. Phys. **4**, 864 (2008).
- [10] J. Lavoie *et al.*, Opt. Express **17**, 3818 (2009).
- [11] M. D. Mazurek *et al.*, Sci. Rep. **3**, 1582 (2013).
- [12] K. Ogawa *et al.*, Phys. Rev. A **91**, 013846 (2015).
- [13] D.-Q. Xu *et al.*, Appl. Phys. Lett. **106**, 171104 (2015).
- [14] E. J. S. Fonseca *et al.*, Phys. Rev. Lett. **82**, 2868 (1999).
- [15] A. C. Cardoso *et al.*, Phys. Rev. A **97**, 033827 (2018).
- [16] F. Kaiser *et al.*, Light: Science & Applications **7**, 17163 (2018).

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Kazuhisa Ogawa, Hirokazu Kobayashi, and Akihisa Tomita, Classical reconstruction of interference patterns of position-wave-vector-entangled photon pairs by the time-reversal method, Physical Review A **97**, 023823 (2018年2月, 査読あり).

Kazuhisa Ogawa and Masao Kitano, Classical realization of dispersion-canceled, artifact-free, and background-free optical coherence tomography, *Optical Express* **24**, 8280 (2016年4月, 査読あり).

〔学会発表〕(計8件)

今田 諒太, 小川 和久, 富田 章久, 損失媒質の高感度位相計測, 物性研短期研究会 量子情報・物性の新潮流 (2018年8月2日).

小川 和久, 光量子イメージングとその時間反転系を用いた古典光学的実現, 第20回光科学若手研究会 (2018年5月12日).

小川 和久, 小林 弘和, 富田 章久, 時間反転法を用いた位置-波数もつれ光子対が示す量子干渉の古典光学的観測およびその光イメージングへの応用可能性, 弱値・弱測定、エンタングルメント、量子コヒーレンスの新地平(QMNH2018) (2018年2月21日).

Kazuhisa Ogawa and Akihisa Tomita, Experimental Reconstruction of a Sub-diffraction-limited Focused Beam Spot by a Time-reversed Two-photon System, *ICO-24* (2017年8月24日).

小川 和久, 小林 弘和, 富田 章久, 量子力学の時間反転対称性を用いた回折限界を超える集光ビームスポットの古典光学的観測, *QIT36* (2017年5月30日).

小川 和久, 富田 章久, 回折限界を超える集光ビーム径の事後選択的観測, 日本物理学会第72回年次大会 (2017年3月21日).

小川 和久, Photonic de Broglie 波長によるビームスポット径の古典的観測, *QUATUO2017* (2017年1月8日).

Kazuhisa Ogawa and Masao Kitano, Classical realization of “quantum-optical coherence tomography” by time-resolved pulse interferometry, *QCMC2016* (2016年7月4日).

〔図書〕(計0件)

該当なし。

〔産業財産権〕

該当なし。

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1)研究分担者

該当なし。

(2)研究協力者

該当なし。

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。