

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：82626

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2012

課題番号：23656054

研究課題名（和文） 古典光を利用した量子イメージングの諸特性の解明と
その応用分野の探索研究課題名（英文） Properties of quantum imaging with classical light and
its applications

研究代表者

白井 智宏 (SHIRAI TOMOHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長

研究者番号：20357239

研究成果の概要（和文）：

古典光を利用したゴーストイメージングの結像特性を理論的に明らかにし、さらに位相物体を可視化する位相コントラスト・ゴーストイメージング法を新たに考案した。また、ゴースト回折の原理に基づき、擾乱媒質の影響を受けないイメージングが可能であることを明らかにした。古典光を利用した量子 OCT については、 $\sqrt{2}$ 倍改善された分解能で機械的な走査をせずに断層イメージングが可能となる新しい方法を考案した。これらの成果により、古典光を利用した量子イメージング技術の生体医用光計測分野への応用可能性が明らかとなった。

研究成果の概要（英文）：

We examined theoretically the performance of ghost imaging systems that employ classical light and devised a novel phase-contrast ghost imaging system to visualize pure phase objects. Moreover, we demonstrated theoretically and experimentally that a modified configuration for classical ghost diffraction enables aberration-corrected image transmission. As regards quantum OCT with classical light, we devised a configuration for spectral-domain OCT based on classical intensity correlations, enabling scanless cross-sectional imaging with a factor-of- $\sqrt{2}$ improvement in axial resolution. These findings suggest that the principle of quantum imaging with classical light is applicable to practical optical setups for biomedical imaging.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎、応用光学・量子光工学

キーワード：コヒーレンス理論、強度相関、ゴーストイメージング、量子 OCT、生体光計測

1. 研究開始当初の背景

近年、量子通信・量子暗号・量子計算など、光の量子性を利用した量子情報技術が国内外で注目を集めている。その中で、物体が存在しない場所にその情報が転送されるゴーストイメージングや、被測定物体の分散の影響を全く受けずに高分解能の断層像を取得できる量子 OCT (光コヒーレンストモグラフィ) などの量子イメージング技術について

は、幅広い応用が期待される分野として、主に、欧米諸国で活発に研究が進められてきた。一方、日本が直面している少子高齢化社会において人々の QOL の向上を図るためには、生活習慣病などの死亡率の高い疾患を手軽に診断できる機器の導入が必要となっている。その要求を満たすべく光を使った生体医用計測機器、特に生体光イメージング機器の重要性が広く認識されている。

しかし、生体を対象とする光学機器では、空気のゆらぎや振動などの外的な要因ばかりではなく、被測定対象の近傍の組織や細胞自身も一種の外乱となり、測定の実現性や画像品質の低下などを招いてしまう。これらの問題を解決するための研究は多く実施されているが、そのいずれについても技術的な工夫により理論限界までの性能獲得を目指すものであり、その理論限界自体を見直す根本的な取り組みは殆ど行われてこなかった。

2. 研究の目的

一般に、量子イメージングには、量子もつれ光子対などの量子光が必要不可欠となる。しかし、量子光は極めて微弱でありかつその発生と制御が容易ではないため、それに代わり通常の古典光を利用できれば、実用上のメリットは計り知れない。

そこで本研究では、古典光を利用した量子イメージングの諸特性を理論と実験により明らかにすることで、量子イメージングの特徴を最大限に活かしたイメージングを古典光により実現する方法の確立を目指す。また、この技術の応用分野の探索を併せて行う。特に、生体医用光計測分野における諸問題を解決するブレイクスルーとなることを期待して、同分野への応用可能性を追求する。

3. 研究の方法

本研究では、古典光を利用したゴーストイメージングの結像特性を系統的に明らかにした上で、これまでは難しかった位相物体のゴーストイメージング法を新たに考案した。さらに、量子OCTの優れた性能を、古典光を利用して実現する最適な方法を考案した。また、これらの研究によって得られた知見に基づき、当該技術の新しい展開を検討すると共に、その応用として、特に生体医用光計測分野への適用可能性を明らかにした。本研究の中心となる理論研究は、具体的には以下のように進められた。

(1) 古典光を利用したゴーストイメージングの理論

量子光を利用したゴーストイメージングは、二光子の検出確率に基づき解析される。この二光子の検出確率と古典的な波動振幅の相関は、それぞれの物理的意味は異なるものの数学的には等しい方程式に従って伝搬することが知られている。そのため古典光を利用したゴーストイメージングは、コヒーレンス関数の伝搬を扱う光のコヒーレンス理論に基づき解析することができる。この理論的枠組みに基づき、古典光を利用したゴーストイメージングの結像特性として、像品質に及ぼす入射光の偏光状態の影響、入射光の部分的コヒーレンスの効果、高次相関の効果を

系統的に解析した。像品質としては、像の歪み、背景光の影響による像のコントラストの低下、像の信号対雑音比などの指標を総合的に利用した。

(2) 古典光を利用した量子OCTの理論

量子OCTは、光源として量子もつれ光子対を利用すること、および強度相関に基づき断層像を取得することを特徴としている。このような量子OCTでは、通常のOCTよりも分解能が2倍向上し、さらに被測定媒質の分散の影響を受けない特徴を持つことがわかっている。古典光を利用した量子OCTの先行研究には、通常の広帯域光のほかチャープしたパルス光を利用する方法などがあり、さらにその性能も分解能の向上が $\sqrt{2}$ 倍に制限される場合や分散補償が再現できない場合など、幾つかのバリエーションが存在する。そこで本研究では、これらの先行研究を整理して古典光を利用した量子OCT技術の方向性を見極めた上で、強度相関に基づくOCT技術の最適な実現法について検討した。

4. 研究成果

(1) 古典光を利用したゴーストイメージングの結像特性

古典光を利用したゴーストイメージングの結像特性として、像のコントラストおよび信号対雑音比に及ぼす入射光の偏光状態および高次相関の効果を理論的に解析した。入射光の偏光状態や部分的コヒーレンス特性は、古典光を特徴付ける重要なパラメータとなるため、像品質に及ぼすそれらの影響を理解することはこの技術の応用を考える上で重要な役割を果たす。また、一般には、物体光と参照光の2次の強度相関に基づきゴーストイメージングは実現されるが、参照光の追加により高次の相関に基づく像形成も可能であるため、実用上、その効果を理解することは重要である。

古典光を利用してゴーストイメージングを実現する場合、本質的に避けられない背景光の影響により像の品質が低下してしまう。この背景光に対する像の強度比をコントラストと定義し、入射光の偏光度との関係を解析した結果を図1に示す。図には2本のカーブが描かれているが、これは物理的には等価であるが数学的に若干異なる定義式を使った結果である。図より、入射光として完全に偏光している光を利用すると、無偏光の入射光を利用する場合よりも像のコントラストが向上する、すなわち像の品質が向上することが明らかとなった。

一方、参照光を増やし物体光と複数の参照光に基づく高次の強度相関を利用すると、物体光と単一の参照光に基づく2次の強度相関に基づく場合に比べて像のコントラスト

が向上することが明らかとなった。しかし、像の信号対雑音比については、逆に入射光の偏光度が向上するにしたいが低下することが明らかになった。

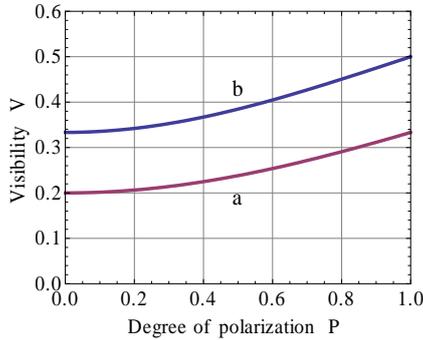


図1：像のコントラストと入射光の偏光度との関係

以上の結果は、光のコヒーレンス理論に基づき全て解析的な表現式として得られていることから、実際にゴーストイメージング光学系を設計し評価する際に重要な役割を果たす。

(2) 位相物体のゴーストイメージング法

古典光を利用したゴーストイメージングの基本光学系を図2に示す。空間的にインコヒーレントな古典光源からの出射光をビームスプリッターで分岐し、一方の光波で物体を照明する。物体を照明した光波は固定された点検出器で、他方の光波（参照光）はそのまま走査型の点検出器で検出する。これら2つの検出器に基づき強度ゆらぎの相関を評価すると、 $z_a = z_c$ の場合には物体の像が、 $z_a = z_c + z_d$ の場合には物体の回折像が取得される。

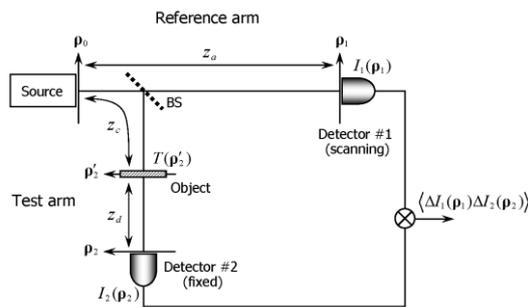


図2：古典光を利用したゴーストイメージングの基本光学系

これまでのゴーストイメージングでは、位相物体の像を直接取得することはできなかったため、ゴースト回折現象と位相回復計算を利用して間接的に位相物体の情報を取得していた。そこで本研究では、ゴーストイメージングの原理に基づき位相物体を直接可視化する新しい方法を検討した。その結果、

この問題は図3に示すような基本光学系の改良により解決できることが明らかとなった。

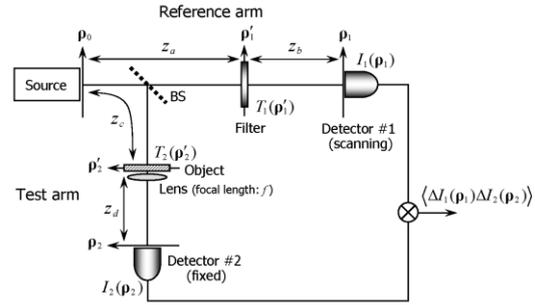


図3：位相を可視化するゴーストイメージング光学系

具体的には、基本光学系の参照光側に空間フィルターを設置し、さらに物体直後に焦点距離 f のレンズを導入する。各素子は、 $z_a + z_b = z_c$ および $1/f = 1/z_b + 1/z_d$ を満たすように配置する。このとき、空間フィルターの設置位置が、コヒーレント結像系におけるフーリエ面に相当することが明らかとなった。そのため、例えば、中心部分の狭い領域で位相が $\pi/2$ シフトするゼルニケ位相板を導入すると、物体の位相分布が濃淡分布として強度相関に現れる位相コントラスト・ゴーストイメージングが実現される。

(3) 擾乱媒質の影響を受けない新しいイメージング法

ゴーストイメージングおよびゴースト回折光学系の特性を系統的に解析したところ、参照光側に設置する空間フィルターがゴースト回折光学系においては物体に対する複素共役フィルターとして作用することを新たに見出した。その光学系を図4に示す。図において、 $z_a = z_c$ および $z_b = z_d$ の条件を満たすとき、空間フィルターの振幅分布の複素共役と物体の振幅分布の積のフーリエ変換像（回折像）が強度相関として取得される。

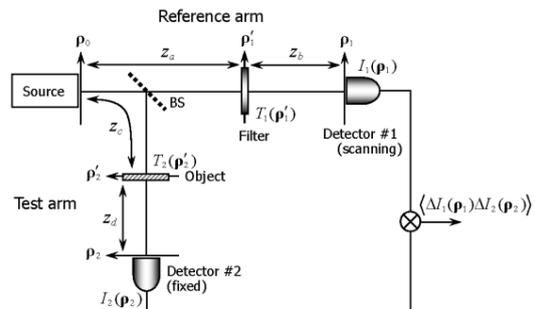


図4：ゴースト回折光学系における空間フィルターの効果

さらに、この原理に基づき、 $z_a = z_c$ および $z_b = z_d$ の条件を満たすように図5に示す光

光学系を構築すると、擾乱媒質の影響を受けないイメージングを実現できることが明らかとなった。その基本動作は以下の通りである。

直線偏光の空間的インコヒーレント光源からの出射光が、偏光ビームスプリッター PBS によって垂直偏光成分と水平偏光成分に分離される。垂直偏光成分は、全ての PBS において反射されるため、物体、リレー光学系、擾乱媒質を透過して検出器 2 で検出される。一方、水平偏光成分は、全ての PBS と擾乱媒質を透過して検出器 1 で検出される。リレー光学系は、物体を擾乱媒質上に結像する働きをする。このとき、図 4 と図 5 の光学系は基本的に等価であり、さらに図 4 の空間フィルタは図 5 の擾乱媒質に、図 4 の物体は図 5 の物体と擾乱媒質の積に対応することがわかった。その結果、上述の複素共役フィルタ効果により擾乱媒質の影響がうまく相殺され、図 5 の出力となる強度相関には擾乱媒質の影響を受けない物体の回折像が現れる。なお、物体の情報は、既存の位相回復計算を利用することにより、物体の回折像強度から忠実に再現することができる。

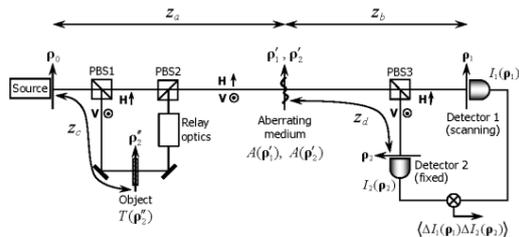


図 5：擾乱媒質の影響を受けないイメージング光学系

この方法では、物体を照明した光波がランダムな擾乱媒質を透過した場合であっても、物体の位相情報が失われずその情報が忠実に再現される。理論的には、既に述べた条件を満たすように物体と擾乱媒質を配置する必要があるが、原理の検証実験を行った結果、理論上必要とされる条件を厳密に満たさなくても高品質なイメージングが可能となるロバスト性を有することが明らかとなった。

(4) 古典光を利用した量子 OCT の実現法

従来型の OCT は、その動作原理の違いから、最初に考案された時間領域の OCT (TD-OCT) と、その後には考案され現在では主流となっているスペクトル領域の OCT (SD-OCT) に大別される。量子 OCT およびそれを古典光で実現する試みに関する先行研究を調査したところ、それらの全てが TD-OCT をベースとしていることがわかった。そのため本研究では、機械的な走査が不要であり、かつ TD-OCT に比べて感度の面でも優れた性能をもつ SD-OCT をベースとして、まずは量子 OCT の特

徴のひとつである奥行き分解能の向上を古典的強度相関に基づき実現する方法を検討した。

OCT 光学系の単純な拡張により物体光と参照光を分離し、それぞれの強度を検出して両者の相関を評価する方法は、TD-OCT をベースとする先行研究では成功しているが、SD-OCT をベースとする場合には全く機能しないことが明らかとなった。そのため、量子 OCT の光学系を参考に、図 6 に示す新しい光学系を考案した。

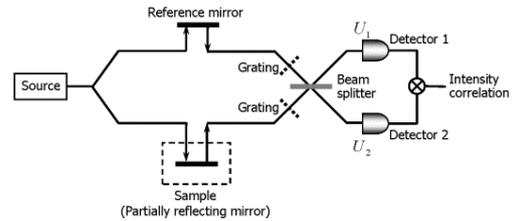


図 6：古典光を利用した強度相関 SD-OCT

この光学系では、最初に OCT 光学系から物体光と参照光を分離し、それぞれを回折格子などの分散素子を通してスペクトルに分解する。それらのスペクトルをビームスプリッターのみで構成される Hong-Ou-Mandel 型の干渉計に入射し、出力スペクトルの強度相関を評価する。解析の結果、この強度相関は、それぞれの検出器で検出される平均スペクトル強度の単純な積として与えられることがわかった。計算機を利用してこのデータの周波数解析を行うと、古典的な白色光源を利用した場合であっても、その分解能が従来型の OCT と比較して $\sqrt{2}$ 倍改善された断層像が、機械的な走査なしで取得できることが明らかとなった。また、従来型の OCT と同様に、定常な白色光の他、非定常なパルス光を使っても同様の断層イメージングが可能となることが明らかにされた。

以上の成果により、ゴーストイメージングや量子 OCT など量子イメージングの優れた特徴を、ある程度の制限はあるものの古典光を利用しても十分に再現できることが明らかとなった。また、ゴーストイメージングの原理に基づく位相物体の可視化法や擾乱媒質の影響を受けないイメージング法の考案により、生体組織中の無色透明の生体細胞をゴーストイメージングの原理に基づき直接可視化することができるようになった。これにより、古典光を利用したゴーストイメージングの生体医用計測分野への応用可能性が格段に高まったと言える。古典光を利用した量子 OCT 技術については、機械的走査を不要とするなどの優れた特徴をもつ SD-OCT をベースとした理論を構築できたが、その性能は現状では分解能の向上のみとどまっている。この理論を拡張して、分散補償の性能を併せて

獲得することができれば、この新しいOCT技術についても生体医用光計測分野への応用が十分に期待される。

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6件)

- ① T. Shirai and A. T. Friberg, "Resolution improvement in spectral-domain optical coherence tomography based on classical intensity correlations," *Optics Letters*, Vol. 38, 115-117 (2013), 査読有. DOI: 10.1364/OL.38.000115
- ② H. Kellock, T. Setälä, T. Shirai, and A. T. Friberg, "Image quality in double- and triple-intensity ghost imaging with classical partially polarized light," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 29, 2459-2468 (2012), 査読有. DOI: 10.1364/JOSAA.29.002459
- ③ T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Imaging through an aberrating medium with classical ghost diffraction," *Journal of the Optical Society of America A*, Vol. 29, 1288-1292 (2012), 査読有. DOI: 10.1364/JOSAA.29.001288
- ④ H. Kellock, T. Setälä, T. Shirai, and A. T. Friberg, "Higher-order ghost imaging with partially polarized classical light," *Physical Optics, Proceedings of the SPIE*, Vol. 8171, 81710Q (2011), 査読有. DOI: 10.1117/12.896826
- ⑤ T. Shirai, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Ghost imaging of phase objects with classical incoherent light," *Physical Review A*, Vol. 84, 041801(R) (2011), 査読有. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.041801
- ⑥ T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Visibility in ghost imaging with classical partially polarized electromagnetic beams," *Optics Letters*, Vol. 36, 2880-2882 (2011), 査読有. DOI: 10.1364/OL.36.002880

[学会発表] (計9件)

- ① T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Classical ghost diffraction enabling aberration-corrected imaging," *Frontiers in Optics 2012*, 2012年10月16日, ロチェスターリバーサイドコンベンションセンター(アメリカ合衆国).
- ② T. Shirai, T. Setälä, and A. T. Friberg,

"Classical ghost imaging of phase objects and through phase aberrations," OWLS 12: Optics Within Life Sciences, 2012年7月6日, ジェノバ綿倉庫コンファレンスセンター(イタリア).

- ③ T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Phase object and phase aberration in classical ghost imaging," *Technolaser 2012*, 2012年4月10日, ハバナ国立美術館(キューバ).
- ④ T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Fourier-space filtering in classical ghost imaging and diffraction," *Diffraction Optics 2012*, 2012年2月27日, デルフト工科大(オランダ).
- ⑤ 白井智宏, "古典光を利用したゴーストイメージングの可能性," 第1回電子光技術シンポジウム, 2012年2月22日, 産総研臨海副都心センター(東京).
- ⑥ T. Shirai, "Realizing ghost imaging with classical light," *Optics and Photonics Seminar*, 2011年11月24日, アールト大(フィンランド).
- ⑦ T. Setälä, T. Shirai, H. Kellock, and A. T. Friberg, "Classical ghost imaging in time domain," *The 10th International Conference on Correlation Optics*, 2011年9月13日, ホテルブコピナ(ウクライナ).
- ⑧ H. Kellock, T. Setälä, T. Shirai, and A. T. Friberg, "Higher-order ghost imaging with partially polarized classical light," *SPIE Optical Systems Design/ Physical Optics 2011*, 2011年9月7日, 世界貿易センター(フランス).
- ⑨ T. Shirai, H. Kellock, T. Setälä, and A. T. Friberg, "Fourier synthesis in classical ghost imaging," *Imaging and Applied Optics: OSA Optics and Photonics*, 2011年7月13日, ウェスティンハーバーキャッスルホテル(カナダ).

6. 研究組織

(1) 研究代表者

白井 智宏 (SHIRAI TOMOHIRO)

独立行政法人産業技術総合研究所・電子光技術研究部門・研究グループ長

研究者番号: 20357239