

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 5 月 17 日現在

機関番号：12501

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14167

研究課題名（和文）高濃度散乱媒質中における物体検出手法の確立

研究課題名（英文）Establishment of Target Detection Methodology in Highly Scattering Media

研究代表者

XIAFUKAITI ALIFU (Xiafukaiti, Alifu)

千葉大学・大学院工学研究院・特任研究員

研究者番号：30899092

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,700,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高濃度散乱媒質中での環状光伝搬により生成された非回折光の自己修復特性を利用し、散乱媒質内の物体検知を実現することを目的とする。先行研究では、環状光の自己干渉効果によって生成された非回折光は、ガウス光の伝搬に比べて回折や媒質の揺らぎを抑えるという顕著な特性が現れた。生体組織の光学濃度に近い散乱媒質においても非回折光を生成でき、非回折光の生成特性を解明した。任意な環境下で非回折光の生成条件を推定することが実現できた。本研究では、非回折光の自己修復特性を、生体組織に近い濃度域である散乱媒質中で実現させ、媒質中の物体検出を理論的アプローチと実験による実証にて実現することを目的とする。

研究成果の学術的意義や社会的意義

環境計測、医療計測や軍事産業などの光センシング分野において、測定対象の情報を非侵襲かつ非接触で高効率・高分解能に計測する技術が期待されている。しかしながら、エックス線と異なる可視光や近赤外線は、散乱媒質中の伝搬において複数回強く散乱されるため偏光とコヒーレンスが崩れる。また、入射光は伝搬に伴い回折や干渉の影響で元のエネルギーが分散され、伝搬可能な距離が制限されてしまい、長深度伝搬することが困難になる。散乱媒質中における高効率の伝搬手法が確立できれば光センシング範囲の拡大、精度の向上が実現できる。

研究成果の概要（英文）：This study aims to utilize the self-reconstruction properties of non-diffracting beam generated from annular beam propagation in highly scattering media to achieve target detection within such media. Our previous work have shown that non-diffracting beam generated from annular beam interference exhibits a significant characteristic of suppressing diffraction and medium fluctuations compared to Gaussian beam propagation. We successfully generated non-diffracting beam even in scattering media with optical densities similar to biological tissues, elucidating the generation characteristics of non-diffracting beam. It was possible to estimate the conditions for generating non-diffracting beam in arbitrary environments. In this study, we aim to realize the self-reconstruction properties of non-diffracting beam within scattering media in concentration ranges similar to biological tissues and achieve target detection within the medium through theoretical approaches and experimental validation.

研究分野：光計測

キーワード：環状光 非回折光 散乱媒質 物体検出

1. 研究開始当初の背景

環境計測、医療計測や軍事産業などの光センシング分野において、測定対象の情報を非侵襲かつ非接触で高効率・高分解能に計測する技術が期待されている。しかしながら、エックス線と異なる可視光や近赤外線は、散乱媒質中の伝搬において複数回強く散乱されるため偏光とコヒーレンスが崩れる。また、入射光は伝搬に伴い回折や干渉の影響で元のエネルギーが分散され、伝搬可能な距離が制限されてしまい、長深度伝搬することが困難になる。散乱媒質中における高効率の伝搬手法が確立できれば光センシング範囲の拡大、精度の向上が実現できる。

先行研究では、散乱媒質中で非回折光の生成を実現し、生体の光学濃度に近い散乱媒質中で環状光伝搬による非回折光の生成に成功した。それと並行して、任意な濃度と伝搬距離の散乱媒質中における非回折光の生成条件を制御することで、非回折光強度と高散乱媒質による輸送平均自由行程の線形な相関を見出した。非回折光の空气中伝搬では、障害物の後方で再形成される自己修復性を持つことが報告されている。本研究では、非回折光の自己修復性を高散乱体中でも適用できると考え、物体検出理論の構築と実験で検証ができれば、高散乱体での光計測範囲の拡大につながり、光コンピュータ断層撮影 (CT) の実現や衛星観測における雲の透過計測に応用することが期待できる。この効果を散乱媒質内での物体検出に適用するためには、散乱媒質中に生成された非回折光の自己修復を適用した理論と実験上の基礎研究が必要である。

2. 研究の目的

空气中における非回折光の伝搬では、非回折光の自己修復性が既に発見され、非回折光を障害物で遮った場合、強度分布が崩れてしまうが、一定距離伝搬すると元の強度分布 (ベッセルビーム) に回復する。申請者のアリフは、これまでの基礎研究の進展として、任意な濃度と伝搬距離をもつ散乱媒質中での非回折光の生成条件を導出した。しかし、散乱媒質中では非回折光の自己修復についてはまだ不明である。本研究では、高濃度散乱媒質中で生成された非回折光の自己修復性を利用した基礎研究に基づいて、散乱媒質内の物体検出を実現することを目的とする。

3. 研究の方法

本申請では、異なる散乱体と受光視野角において、環状光伝搬による生成された非回折光の強度変化を実験・解析し、検知物体を設置した散乱媒質中における環状光の伝搬実験と理論解析を行った。最初段階として、部分遮蔽した環状光が非回折光に自己変換できる特性を空气中での光伝搬シミュレーションと散乱媒質中での伝搬実験を通して評価した。実験では、は、天頂角 150° のアキシコンプリズム対にガウス光を透過させることで、直径51 mmの環状光を生成した。環状光を部分的に遮蔽するため、 10° から 60° の角度をもつ扇形の障害物で環状光の断面を遮断した。本研究では、波長が532nm、尖頭出力が4.6kW、繰り返し周波数が10kHzのDPSS固体パルスレーザーを光源として使用した。散乱媒質は、加工乳を純水で希釈した溶液を用い、平均粒径 $1.1\mu\text{m}$ と $0.1\mu\text{m}$ の乳脂肪球とカゼインミゼルが主な散乱体である。カゼインミゼルは乳脂肪に比べて非常に小さいため、加工乳の散乱特性は乳脂肪球によって決まる。40%の濃度をもつ散乱媒質の吸収係数は 0.0066cm^{-1} であることから、本研究で用いた散乱媒質の吸収を無視できる。伝搬実験では、10cmの長さをもつ光学セルに散乱媒質入れ、部分遮蔽した環状光を伝搬させた。光学セルは、入射レーザー光の偏光特性を崩さないTempaxガラス材料で作成されている。受光部は、開

口径6mmのコリメートレンズとコア径50 μ mマルチモード光ファイバーの組み合わせから構成されるファイバーカップリング光学系によって受光部の視野角を片側5.5mrad (最大値の e^{-2})とし、準直進光を選択的に受光している。このファイバーカップリング光学系は駆動ステージ上に載せてあり、光線伝搬方向に垂直な方向に走査する。受光した準直進光は光電子増倍管(PMT)とサンプリング・オシロスコープで記録した。並行で、テレセントリックレンズとICCDカメラを組み合わせた受光系を使用することで、短時間で散乱光の2次元強度分布の計測を試みた。PMTとICCDカメラを用いた計測結果を比較し、異なる視野角で生じる強度分布の違いを評価した。最後に、散乱媒質の中に遮蔽物を設置し、計測した環状光の強度分布から遮蔽物横幅の大きさを推定することを試みた。実験では、散乱媒質中の遮蔽物を横軸と縦軸に移動させながら、散乱光の強度分布を計測した。

4．研究成果

本研究では、高濃度散乱媒質中で生成された非回折光の自己修復性を利用した基礎研究に基づいて、修復された非回折光の強度分布変化による検出物体との相関を成立させ、散乱媒質中における未知物体の検知を実現することを目的とした。3年間の研究期間において、部分遮蔽した環状光が非回折光に自己変換できる特性を空気中での光伝搬シミュレーションと散乱媒質中での伝搬実験、PMTと新しい受光光学系の比較、と散乱媒質中における物体検出の実験を行った。では、散乱媒質中において、環状光を非回折光に自己変換する前に、障害物に当たった場合の非回折効果を課題にした。そのため、まず空気中における部分遮蔽した環状光の伝搬シミュレーションを行い、遮蔽障害物の大きさによる非回折光への自己変換特性を調べた。さらに理論計算をもとに、散乱媒質中における部分遮蔽した環状光の伝搬実験を行い、散乱光の強度分布の変化を考察した。散乱媒質中での伝搬実験によって生成された中心ピークが非回折光に由来することを確認するため、散乱光の空気中伝搬実験を行った。結果として、直径40mmの環状光を 0° ~ 30° の遮蔽角度において非回折光に自己変換できるという結論を得た。では、PMTの受光系はICCDカメラより大きい視野角を持つため、強度分布に現れる中心ピークの幅が広く計測される。そのため、PMTを用いた受光系の開口に一致するように、ICCDカメラの73ピクセル分の視野での強度分布を求め、PMTの受光系で等価な強度分布になることを確認した。また、ICCDカメラの計測した強度分布には干渉縞が表れ、これはイメージングインテンシファイアシステムの入射ガラスでの干渉現象であることが分かった。この干渉縞を取り除くため、画像処理を行うことで、強度分布に非回折光の中心ピークが確認できた。この中心ピークが非回折光であることを、干渉縞の強度分布との比較、ならびに媒質濃度や計測距離の変化で検討を行った。

では、散乱媒質中における物体検知を実現するための最初段階として、散乱媒質の中に遮蔽物を設置し、計測した環状光の強度分布から遮蔽物横幅の大きさを推定することを試みた。実験では、散乱媒質中の遮蔽物を横軸と縦軸に移動させながら、散乱光の強度分布を計測した。横軸の移動において、散乱光に非回折効果が生じてから消滅するまでの両端が2点現れた。この2点間の移動量と遮蔽率の関係から遮蔽物横幅の大きさを推定した。縦軸の移動において、遮蔽物を光源側に設置した場合は実寸より18%に増幅が推定され、受光部側に設置した場合は実寸と等しい幅が推定された。遮蔽物の位置による違いは、環状光の伝搬特性によるものだと考えられる。環状光は、伝搬に伴って中心にピークを持つ強度分布に変化するため、遮蔽物の位置が受光部側のとき、中心ピークはすでに生成されており、片側のエッジ位置の推定において、狭い中心ピークの幅で分解能をもつ。媒質中での遮蔽では、中心強度比の増減が傾きの緩やかな線形的な変化を示し、光源側での遮蔽では、透過光が十数cm伝搬するため、中心強度比が小さくなる。この

ように、環状光を遮っていったときの中心強度比の増減の仕方は、伝搬方向における遮蔽物の位置を推測する指標になる。これは、散乱媒質中環状光の伝搬特性に由来し、環状光の伝搬と中心強度比の変化を結びつけることができれば、位置と大きさが未知な散乱媒質中の物体検出が可能になる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 2件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Xiafukaiti Alifu, Lagrosas Nofel, Shiina Tatsuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Exploration for adequate non-diffractive beam generation in dense scattering media	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Scientific Reports	6. 最初と最後の頁 8824-8832
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1038/s41598-022-12810-4	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Lagrosas Nofel, Xiafukaiti Alifu, Kuze Hiroaki, Shiina Tatsuo	4. 巻 14
2. 論文標題 Assessment of Nighttime Cloud Cover Products from MODIS and Himawari-8 Data with Ground-Based Camera Observations	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Remote Sensing	6. 最初と最後の頁 960 ~ 960
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/rs14040960	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 シャフケティ アリフ、ラゴロサス ノフェル、椎名 達雄	4. 巻 49
2. 論文標題 散乱媒質中における部分遮蔽した環状光の伝搬による非回折効果	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 レーザー研究	6. 最初と最後の頁 625-629
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 シャフケティ アリフ、ノフェル ラゴロサス、椎名達雄
2. 発表標題 多波長LEDライダーの特性評価
3. 学会等名 第40回レーザーセンシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 椎名達雄、Nofel Lagrosas、大久保洗祐、Alifu Xiafukaiti
2. 発表標題 LEDライダーによる狭隅角波浪観測 -解析と可視化-
3. 学会等名 第40回レーザセンシングシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Alifu Xiafukaiti, Nofel Lagrosas, Tatsuo Shiina
2. 発表標題 Multi-wavelength LED lidar for near ground atmospheric monitoring
3. 学会等名 30th International Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Nofel Lagrosas, Kosuke Okubo, Xiafukaiti Alifu, Tatsuo Shiina
2. 発表標題 Continuous Observations of Aerosol-Weather Relationship from a Horizontal Lidar to Simulate Monitoring of Radioactive Dust in Fukushima, Japan
3. 学会等名 30th International Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Tatsuo Shiina, Kosuke Okubo, Nofel Lagrosas, Xiafukaiti Alifu
2. 発表標題 Interaction between sea wave and surface atmosphere by shallow angle LED lidar
3. 学会等名 30th International Laser Radar Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Alifu Xiafukaiti, Nofel Lagrosas, Tatsuo Shiina
2. 発表標題 Non-diffractive beam generation with partially blocked annular beam in scattering media
3. 学会等名 SPIE Future Sensing Technologies (国際学会)
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------