

一般セッション(口頭講演) | 3 光・フォトンクス：3.7 光計測技術・機器

2024年9月20日(金) 13:00 ~ 14:30 会場 C31 (ホテル日航新潟 3F)

[20p-C31-1~6] 3.7 光計測技術・機器

染川 智弘(レーザー総研)

13:00 ~ 13:15

[20p-C31-1]

可変FSRブリルアン散乱分光計におけるスペクトル測定安定化のための
フィードバックシステムの開発○(M2)石田 花菜^{1,2}、玉城 凜野¹、石飛 秀和^{1,2,3}、井上 康志^{1,2,3} (1.阪大院工、2.産総研・阪大 先端
フォトバイオ、3.阪大生命)

13:15 ~ 13:30

[20p-C31-2]

近赤外偏光走査型偏光撮像装置による水分吸収下での高感度可視化

○(M2)清水 智哉¹、鈴木 雅人^{1,3}、坂本 盛嗣^{1,3}、野田 浩平^{1,3}、佐々木 友之^{1,3}、川月 喜弘^{2,3}、小野 浩司^{1,3} (1.長岡技科大、2.兵庫県立大、3.CREST, JST)

13:30 ~ 13:45

[20p-C31-3]

有害物質の遠隔検知に向けたLIDARシステムの設計

○江藤 修三¹、比護 貴之¹、大石 祐嗣¹ (1.電中研)

13:45 ~ 14:00

[20p-C31-4]

ラマンライダーによるプラスチックの遠隔計測技術の開発

○染川 智弘^{1,2}、松田 晶平¹、倉橋 慎理¹、余語 覚文²、久世 宏明³ (1.レーザー総研、2.阪大レーザー
研、3.千葉大CEReS)

◆ 奨励賞エントリー

14:00 ~ 14:15

[20p-C31-5]

高層大気に分布するCa原子・イオンの同時観測用二波長発振ライダーシステム

○(M2)小林 蒼汰¹、橋本 彩香¹、三好 咲也子¹、大饗 千彰^{1,2}、桂川 眞幸^{1,2}、江尻 省^{3,4}、中村 卓司^{3,4}
(1.電通大基盤理工、2.電通大量子センター、3.極地研、4.総研大)

14:15 ~ 14:30

[20p-C31-6]

高次の相関ピークを用いた相関領域LiDARの高感度化

○(B)吉田 総司¹、清住 空樹^{1,2}、水野 洋輔¹ (1.横浜国大、2.東大)

可変 FSR ブリルアン散乱分光計におけるスペクトル測定安定化のための フィードバックシステムの開発

Development of a feedback system for stabilizing spectral measurements with a tunable FSR Brillouin scattering spectrometer

阪大院工¹, 産総研・阪大 先端フォトバイオ², 阪大生命³

○(M2) 石田 花菜^{1,2}, 玉城 凜野¹, 石飛 秀和^{1,2,3}, 井上 康志^{1,2,3}

Dept. of Applied Physics, Osaka Univ.¹, Photo BIO-OIL, AIST-Osaka Univ.²,

Graduate School of Frontier Biosciences, Osaka Univ.³

✉Kana Ishida^{1,2}, Rinya Tamaki¹, Hidekazu Ishitobi^{1,2,3}, and Yasushi Inouye^{1,2,3}

*E-mail: ishida@ap.eng.osaka-u.ac.jp

多くの生物学的機能や疾患の病態生理は、細胞・組織内外の力学的特性と密接に関連しており、その詳細な機序の解明には力学計測が不可欠である。計測法として、原子間力顕微鏡、マイクロピペット吸引法などが利用されているが、表層の計測に限定される、計測時に細胞が破壊されてしまうなどの問題があり、in vivoでの測定は困難である。

入射光が試料中の弾性波と相互作用すると、ブリルアン散乱が誘起される。散乱光のスペクトルピークのシフト量と半値幅は、試料の弾性率と粘性率にそれぞれ関係している。よってブリルアン散乱光のスペクトルを解析することで、生体試料内部の力学特性を非接触かつラベルフリーで測定可能である。

ブリルアン散乱によるスペクトルシフト量はわずかに数 GHz のため、高い周波数分解能を有する分光計が必要である。近年、高スループットな回折光学系として Solid Virtual Imaged Phased Array (Solid VIPA) が使用されている[1]。Solid VIPA は、両面に反射膜を有する単一のエタロンから構成されている。測定可能な周波数領域 (Free Spectra range, FSR) は 2 つの反射膜間距離で決まる。Solid VIPA では反射膜間距離が固定されているため、測定したいサンプルの固有振動数に合わせて FSR を調整し、周波数分解能を最大化することが困難であった。またタンパク質などの巨大分子の固有振動数は 100 GHz 以上であるので、エタロンの厚さを 1.5 mm 以下にする必要があるが、両面での異なる光学コーティングの張力差によりエタロンが物理的に反ってしまうため分光計測することができなかった。私たちはこれらの問題の解決するために、入射側と透過側のエタロンをそれぞれ独立に配置することで反射膜間距離を調節可能とした可変 FSR ブリルアン散乱分光計の開発を行ってきた[1]。しかし、反射膜がそれぞれ独立したエタロンにコーディングされているため、熱や自重、振動によって反射面同士

の平行度が悪くなることで長時間にわたって十分な SNR を維持できなかった。

本研究では、分光スペクトルをリアルタイムでモニターしながら、エタロンの Yaw 角、Pitch 角をピエゾアクチュエーターで制御することで、スペクトル測定を安定化させるフィードバックシステムを構築した。具体的には、エタロンの Yaw 角度を変化させて平行度を悪くすると、スペクトルピークの対称性が変化することを利用して、ピーク強度を最大化するように Yaw 角度を制御した。また、エタロンの Pitch 角がずれるとスペクトルラインが傾くので、それを是正するように Pitch 角を制御した。その結果、Fig1 に示すようにブリルアン散乱スペクトルの SNR を少なくとも 9 時間以維持することに成功した。

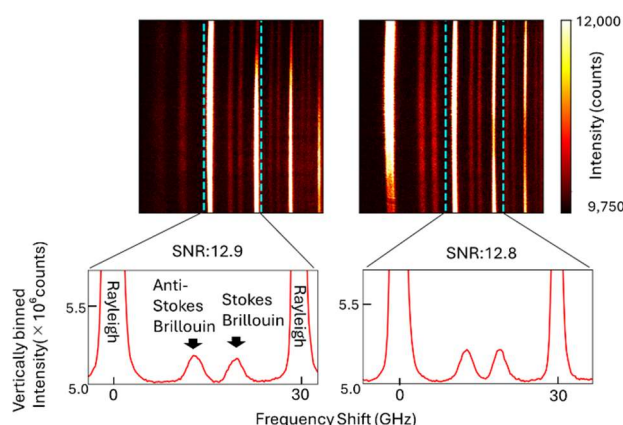


Fig. 1. Brillouin spectra at the beginning of the measurement (left) and 570 min after the first measurement (right).

- [1] G. Scarcelli et al., Nat. Photonics **2**,39-43 (2008).
- [2] 石飛 秀和 他、第 82 回応用物理学会秋季学術講演会 (2021 年 9 月) [11a-N106-7]

近赤外偏光走査型偏光撮像装置による水分光吸収下での高感度可視化

High sensitivity visualization under moisture light absorption
by near-infrared polarization probe polarization imaging

長岡技科大¹, 兵庫県立大², CREST, JST³ ◯(M2) 清水 智哉¹, 鈴木 雅人^{1,3}, 坂本 盛嗣^{1,3},
野田 浩平^{1,3}, 佐々木 友之^{1,3}, 川月 喜弘^{2,3}, 小野 浩司^{1,3}
Nagaoka Univ. of Tech¹, Univ. of Hyogo², CREST, JST³, ◯Tomoya Shimizu¹, Masato Suzuki^{1,3},
Moritsugu Sakamoto^{1,3}, Kohei Noda^{1,3}, Tomoyuki Sasaki^{1,3},
Nobuhiro Kawatsuki^{2,3}, and Hiroshi Ono^{1,3}
E-mail: onoh@vos.nagaokaut.ac.jp

近赤外領域での撮像は、アイセーフな波長域であるため眼底検査や LiDAR といった生体計測や産業分野への応用が期待されているが、水の吸収帯が存在することから、輝度画像では識別が困難な場合がある。本研究グループでは、入射光の左右円偏光成分を分離する機能を有する偏光回折格子を用いた偏光走査型偏光撮像法に関する研究を行っており[1]、現在までに可視光領域から近赤外領域での撮像系を構築している。本手法では偏光回折格子を用い、左右円偏光成分の差分処理を行うことで1回の撮影で S₃ 画像の取得を可能としており、輝度値の低い画像の場合でも差分処理した偏光画像であれば明瞭な画像が得られる。そのため、本手法では水の光吸収による影響を抑えられ、輝度画像に比べ偏光画像での識別が可能となる場合があると期待できる。そこで本研究では、近赤外偏光走査型偏光撮像装置による水の光吸収下での高感度可視化を目的とする。

Figure 1 に近赤外偏光走査型偏光装置の実験系を示す。LED 光源($\lambda=1550\text{nm}$)からの光を偏光子(P)と 1/4 波長板(QWP)により右円偏光状態にし、サンプルへ照射した。サンプルの前には、厚さ 0.5 mm の石英セル内を純水で満たした層を配置し、反射光を結像するカメラ前には偏光回折格子(PG)、中心波長 1550nm のバンドパスフィルタ(BPF)を配置した。サンプルは、白紙に文字が黒印字されたものであり、文字部と白紙部の S₃ 画像に数値差があることを確認している。Fig.2 は取得した輝度画像と S₃ 画像であり、黄枠で囲まれた領域に純水の層を配置している。また、Fig.3 は Fig.2 の赤線上の数値プロファイルである。Fig.2 より、偏光画像にすることで文字部と白紙部の識別性が向上した結果が得られている。また、Fig.3 より、水がある場合での文字部と白紙部の数値差は、輝度画像では水がない場合よりも低下しているが、偏光画像では水がある場合でも数値差は悪化しない結果が得られた。

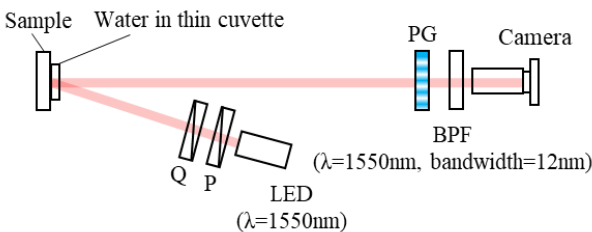


Fig.1 Experimental setup. P: Polarizer, QWP: Quarter Wave Plate, PG: Polarization-grating, BPF: Band-Pass Filter.

ドパスフィルタ(BPF)を配置した。サンプルは、白紙に文字が黒印字されたものであり、文字部と白紙部の S₃ 画像に数値差があることを確認している。Fig.2 は取得した輝度画像と S₃ 画像であり、黄枠で囲まれた領域に純水の層を配置している。また、Fig.3 は Fig.2 の赤線上の数値プロファイルである。Fig.2 より、偏光画像にすることで文字部と白紙部の識別性が向上した結果が得られている。また、Fig.3 より、水がある場合での文字部と白紙部の数値差は、輝度画像では水がない場合よりも低下しているが、偏光画像では水がある場合でも数値差は悪化しない結果が得られた。

参考文献 [1] M.Sakamoto et al.,Sci. Rep. 12, 15268(2022).

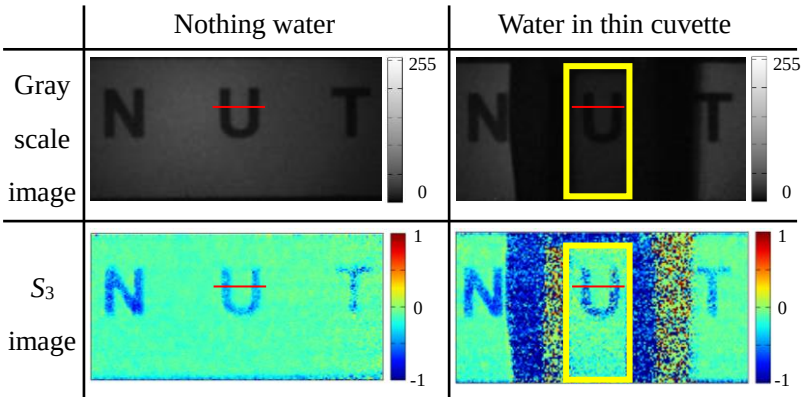


Fig.2 Results for gray scale image and polarization image.

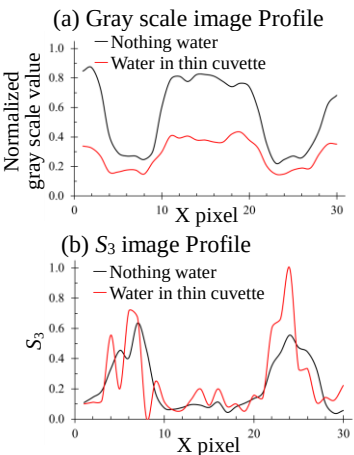


Fig.3 Results for each image profile.

有害物質の遠隔検知に向けた LIDAR システムの設計

Design of LIDAR system for remote detection of hazardous substances

電中研, °江藤 修三, 比護 貴之, 大石 祐嗣

Central Research Institute of Electric Power Industry, Shuzo Eto, Takayuki Higo, Yuji Oishi

E-mail: eto@criepi.denken.or.jp

人間が近づくことが難しい可燃性物質や有毒物質等を遠隔計測する手法の一つに、LIDAR とラマン分光法を組み合わせた手法が挙げられる。ラマン分光法は、多種多様な物質を識別することが可能であるが、一般的にラマン散乱光は非常に強度が低い。一方、深紫外（DUV）波長領域では、共鳴効果によってその強度が著しく増大する場合がある。これまでに、共鳴ラマン効果に着目し、DUV 波長領域で高いスループットを持つラマン分光用光学システムを開発した^[1]。このシステムでは、レーザ光を収束する光学系とラマン散乱光を集める光学系を別々に用意した。一方、これら 2 つの機能を 1 つの光学系に組み込むことができれば、レーザ光の視野と散乱光を集める光学系の視野の重なりを大きくすることができ、より高感度にラマンスペクトルを測定することが期待できる。本報告では、このような光学系の設計結果について述べる。

本光学系は、反射型望遠鏡とエッジフィルタ、ミラー、分光器、インテンシファイア付き CCD 検出器から構成される。レーザ光の収束は、反射式望遠鏡で行う設計とした。使用する光学フィルタは、深紫外波長域の光を反射し、可視波長域の光を透過する特性を持つ。可視波長域のパルスレーザを用いて、レーザ光を望遠鏡の後方から入射し、その後にレーザ光が大気中を伝搬して、計測対象物に照射される。

ラマン散乱光の一部は、レーザ光が通過する経路を逆に伝搬して、望遠鏡で集められる。深紫外波長域では光の色収差が大きいため、レンズを用いると光軸方向の焦点位置が波長ごとに变化し、分光器に入射する光の波長成分が限定されてしまう。そのため、本光学系ではミラーのみを使用した。望遠鏡で集めた光を分光器のスリット端面に結像させるために、穴付きミラーと凹面ミラーを用いてラマン散乱光を結像する構成とした。この設計により、レーザ光とラマン散乱光の光軸を同一にさせることが可能となった。

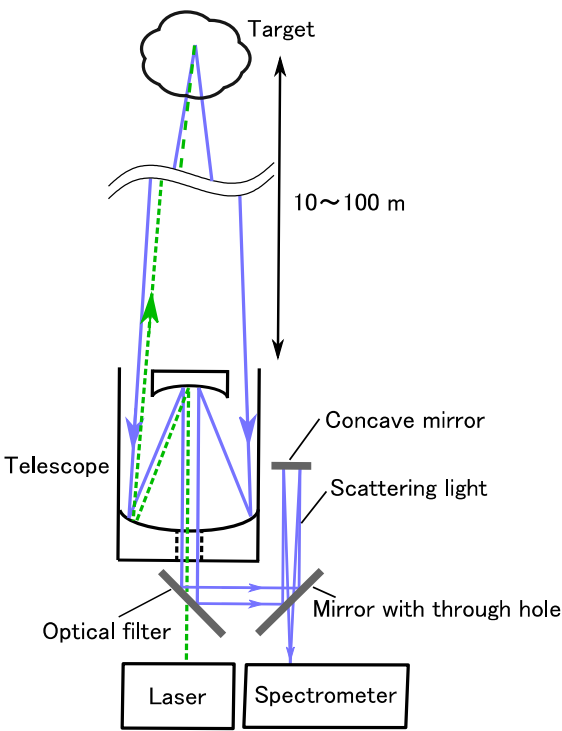


Figure 1. Schematic of LIDAR system. Solid and dashed lines show the paths of the laser beam and scattered light, respectively.

[1] S. Eto, Y. Ichikawa, M. Ogita, S. Sugimoto and I. Asahi, Appl. Spectrosc., Vol.76 (2022) 1246-1253.

ラマンライダーによるプラスチックの遠隔計測技術の開発

Remote Detection of Plastics Using Raman Lidar Technique

レーザー総研¹, 阪大レーザー研², 千葉大 CEReS³

○染川智弘^{1,2}, 松田晶平¹, 倉橋慎理¹, 余語覚文², 久世宏明³,

Inst. for Laser Tech.¹, Inst. Laser Eng., Osaka Univ.², CEReS, Chiba Univ.³

○T. Somekawa^{1,2}, S. Matsuda¹, S. Kurahashi¹, A. Yogo², and H. Kuze³

E-mail: somekawat@ilt.or.jp

私たちの生活の身近にあるビニール袋、ペットボトルなどのプラスチック製品ごみが海洋に流出した「海洋プラスチックごみ」による海洋汚染は地球規模で深刻化しており、プラスチックの使用削減に関する取り組みや、発生メカニズムの解明、生態系への影響評価だけでなく、海洋プラスチックごみの被害や発生経路を正確に評価するために、効率的・効果的なモニタリング手法の確立が必要とされている。

海洋プラスチックごみのモニタリング手法は、採取・採水測定が一般的で、実体顕微鏡などによる目視識別が困難な 5 mm 以下のマイクロプラスチックでは FTIR や顕微ラマン分光によってプラスチックの同定が実施されている。しかしながら、現状の採取・採水測定では評価の頻度や評価可能なエリアに限度があり、広範囲にわたる領域を短時間でモニタリングできる手法の開発が望まれる。そこで、レーザーを利用したリモートセンシング手法であるライダー技術を利用した効率的な海洋プラスチックごみのモニタリング手法の開発を開始した。

Fig. 1(a)に 6 m 先に設置した発泡ポリウレタンのラマンライダー実験の配置図を示す。レーザーは水中にある海洋プラスチックごみへの適用拡大も見据え、水の透過が比較的高い波長 532 nm のナノ秒パルスレーザーとした。有効口径 127 mm の望遠鏡（焦点距離：1500 mm）で集めたラマン散乱光は、波長 532 nm のエッジ・ノッチフィルターでレイリー光を除去したのち、EM-ICCD カメラ付き分光器でスペクトルを計測した。Fig. 1(b)に 6 m 先の発泡ポリエチレンのラマンスペクトルを示す。遠隔計測においてもポリエチレンのラマン信号が明瞭に観測できており、ラマンライダー技術の海洋プラスチックごみへの適用が可能であることがわかった。

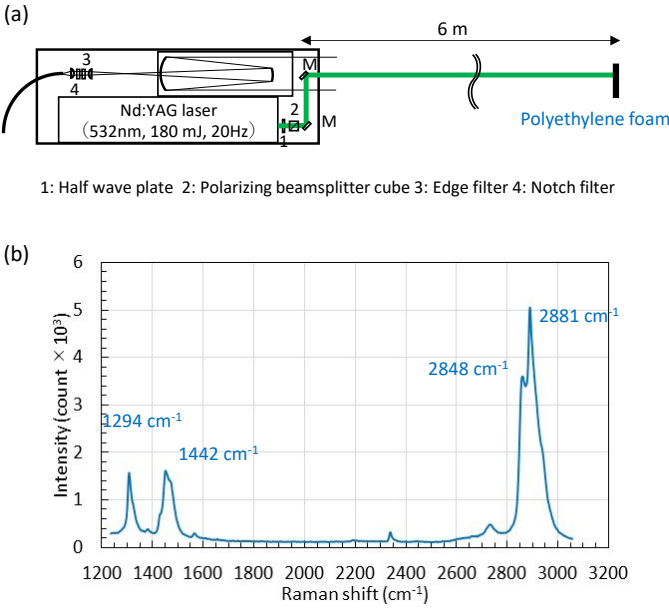


Fig. 1 (a) Schematics of experimental setup and (b) remote Raman spectrum of polyethylene foam located 6 m away in the air.

高層大気に分布する Ca 原子・イオンの同時観測用
二波長発振ライダーシステム

Dual-wavelength lidar system for simultaneously observing Ca atoms and ions
distributed in the upper atmosphere

電通大・基盤理工¹, 電通大・量子センター²
○(M2)小林蒼汰¹, (D1)橋本彩香¹, (M1)三好咲也子¹, 大饗千彰^{1,2}, 桂川眞幸^{1,2,3}
極地研³, 総研大⁴
江尻省^{3,4}, 中村卓司^{3,4}

Dep. of Engineering Science¹, Inst. for Advanced Science²; Univ. of Electro-Communications.
Sota Kobayashi¹, Ayaka Hashimoto¹, Sayako Miyoshi¹, Chiaki Ohae^{1,2}, Masayuki Katsuragawa^{1,2,3}
National Institute of Polar Research³, The Graduate University for Advanced Studies⁴
Mitsumu K. Ejiri^{3,4}, Takuji Nakamura^{3,4}
Email: kobayashi@mklab.es.uec.ac.jp

地上から高度 80 - 150 km に位置する超高層大気は中間圏・下部熱圏（Mesosphere and lower Thermosphere: MLT 領域）と呼ばれ、地球大気が中性分子・原子を中心とする構成から電離プラズマへと移り変わっていく遷移領域に当たる。我々の生活に直接かかわる地上付近の大気（対流圏: <~ 10 km）の振舞いもこれら高層域の大気と無縁では無く、互いに密接な連関があり、熱圏の超高層域までを含めた全体を一つながりの大気として捉えることでより深い理解を得ることができる。MLT 領域は、そのような観点から、中性大気と電離大気を結ぶ重要な位置づけにある。

ここでは、流星を起源として、この MLT 領域に分布する金属原子・イオンをターゲットとした共鳴散乱ライダーについて報告する。共鳴散乱ライダーは通常の実験室サイズの装置で、この高層域を高い時間空間分解能をもって連続観測することができるほぼ唯一の手法である。いくつかの候補原子のなかで、我々はカルシウム(Ca) に焦点を当てライダーシステムの開発を進めてきた。なぜならば、イオンと中性原子の双方が、レーザー技術の観点からも対

応が可能な波長域に共鳴遷移をもつ唯一の金属だからである。

Fig. 1 に開発したライダー送信系の概要を示す。最大の特徴は、中性 Ca と一価の Ca⁺イオン観測用の共鳴遷移波長（Ca: 422.7918 nm, Ca⁺: 393.4770 nm）に正確に同調した二波長のレーザー光を一つのレーザーシステムから同時に発生できることにある。実際の長期連続観測に向けて、二波長レーザー発振の安定な動作、波長同調精度、高出力化、外乱によりシステムが予期せずダウンした際の自動復帰機構など、様々な観点から開発を進めてきた。当日の発表では、送信系の詳細とライダーシステム全体を稼働させたベンチマークテストの状況について報告したい。

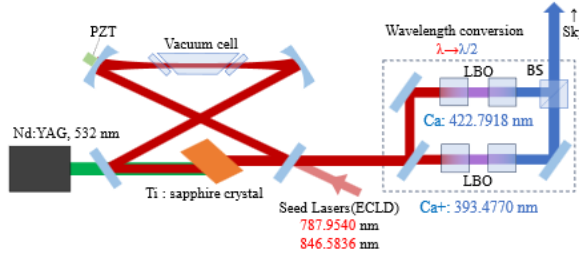


Fig. 1. Dual-wavelength Injection-locked nanosecond pulsed Ti:sapphire laser system for a resonance scattering Ca/Ca⁺ Lidar.

高次の相関ピークを用いた相関領域 LiDAR の高感度化

Sensitivity enhancement in CD-LiDAR by use of higher-order correlation peaks

○ 吉田 総司¹, 清住 空樹^{1,2}, 水野 洋輔¹

¹横浜国立大学 大学院工学研究院 ²東京大学 大学院工学系研究科

○ Soshi Yoshida¹, Takaki Kiyozumi^{1,2}, and Yosuke Mizuno¹

¹Yokohama National University, ²The University of Tokyo,

Emails: yoshida-soshi-yc@ynu.jp, kiyozumi-takaki@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, mizuno-yosuke-rg@ynu.ac.jp

1 はじめに

LiDAR とは、光を空間に照射し、その反射光（散乱光）を分析することで、対象物までの距離や速度、特性を測定する技術である。2000 年代初頭から電波レーダの代替として自動運転における有用性が大きく注目されるようになった[1]。

現在の LiDAR の手法として、Time-of-flight (ToF) 法が主流である。これはパルス光を照射し、反射光が戻るまでの時間から対象物までの距離を測る技術である。また、周波数チャープ光を照射する周波数変調連続波 (FMCW) 法も導入されており、物体の距離だけでなく、速度をより容易に測定することが可能である[2]。

さらに、光干渉を制御することで位置分解を行う相関領域法も提案されている。これは、光ファイバに沿った反射率分布を計測するための光相関領域反射計測法 (OCDR) を空間に適用した手法であり、これまで困難であった対象の振動と距離の同時かつ高速な測定が可能となっている[3]。この方式は、光源の駆動電流を変調するだけで実現できるため、光源のコストを低く抑えられる上に、任意の位置での高速測定が可能 (=ランダムアクセス性) という利点もある。しかし、従来の相関領域 LiDAR は感度が比較的低く、その動作確認は再帰反射材やミラーなどの高い反射率をもつ対象物を用いた場合に限定されていた[3]。実应用のため、感度の向上が望まれている。

そこで本研究では、高次の相関ピークを利用することで相関領域 LiDAR の感度を向上させ、拡散反射面である石膏や紙 (C5) を対象物として測距動作を実証した。

2 原理と実験系

相関領域 LiDAR では、OCDR と同様に[4]、レーザ出力に正弦波による周波数変調を印加し、測定経路中に「相関ピーク」を形成し、その位置からの反射光のみを選択的に抽出する。この際、変調周波数を制御することにより相関ピークを測定経路中で掃引することで、反射率の分布測定を実現する。

OCDR の空間分解能 (Δz) の値は、レーザの変調周波数 (f_m) に反比例する。すなわち、 f_m の増大に伴い、 Δz は小さくなる (空間分解能が向上する)。また、最近示されたビートスペクトルの理論[5]から、空間分解能と測定感度には相関があることが予想される。ここでは、他の条件を一定にして f_m を増加 (空間分解能を向上) させた際、同一の反射ピークのパワーがどのように変化するかを検証した。

用いた実験系を Fig. 1 に示す。まず、レーザの駆動電流の直接変調によって周波数変調を施された出力光を、カプラによって入射光と参照光に分岐した。入射光は、光増幅器 (EDFA) で 10 dBm まで増幅させた後、対象に向けコリメータから射出した。参照光は、300 m の遅延ファイバを通過させ、偏波状態を偏波スクランブラにより平均化した。反射光は、別の EDFA で 1.4 dBm まで増幅した後、音響光学変調器により 100 MHz の周波数シフトを印加した。反射光と参照光をヘテロダイン検波のため合波し、バランスフォトディテクタにより電気信号に変換した。その後、電気スペクトラムアナライザ (ESA) の分解能帯域幅 100 kHz のゼロスパン機能を用い、100 MHz 成分のパワーのみを取り出し、オシロスコープで観測した。(掃引 32 回ごとに平均処理を行った)。変調振幅は 4.25 GHz、変調周波数は中心周波数を 498.35 kHz、スパンを 0.7 kHz から 2 倍、3 倍とし、掃引する相関ピークを 1 次から 2 次、3 次と増大させ、反射パワーの分布測定を行った。測距の対象物として、拡散反射面である石膏と、より反射率の低い紙 (C5) を用い、それぞれコリメータから 19 cm 離れた位置に設置した。

3 実験結果と考察

石膏を用いて、1 次、2 次、3 次の相関ピークで反射パワー分布を測定した結果を Fig. 2(a)–(c) にそれぞれ示す。横軸はコリメータの位置を基準 (0 cm) とし、縦軸はコリメータでの反射パワー

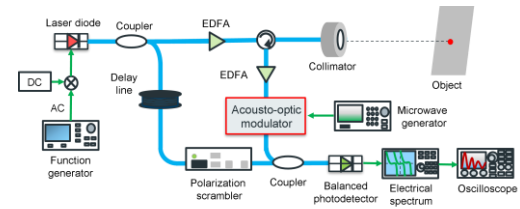


Fig. 1. Experimental setup of correlation-domain LiDAR. EDFA: erbium-doped fiber amplifier.

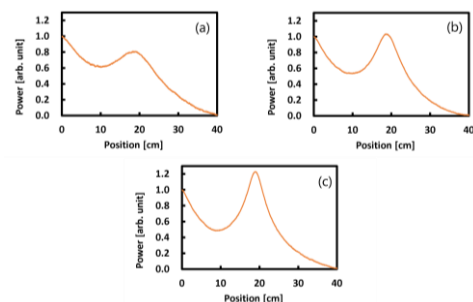


Fig. 2. Reflected power distributions (when plaster was used) measured by correlation-domain LiDAR using correlation peaks of the (a) first, (b) second, and (c) third orders.

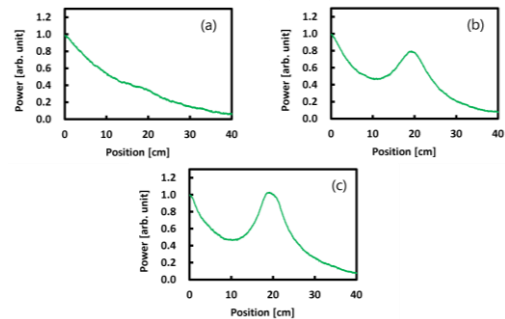


Fig. 3. Reflected power distributions (when paper was used) measured by correlation-domain LiDAR using correlation peaks of the (a) first, (b) second, and (c) third orders.

で正規化した。用いた相関ピークの次数が 1、2、3 と増加するにつれ、石膏表面での反射ピークが明瞭に現れ、感度が向上した。

同様に、紙 (C5) を用いて、1 次、2 次、3 次の相関ピークで反射パワー分布を測定した結果をそれぞれ Fig. 3(a)–(c) に示す。1 次の相関ピークを用いた場合は紙表面での反射ピークは極めて小さかったが、相関ピークの次数を増加させるに伴い、反射ピークが明瞭に現れ、感度が向上した。

OCDR の基礎理論では、変調周波数の増大は空間分解能の向上に寄与する一方、それが反射ピークのパワーに与える影響は未解明であった。しかし、本実験結果より、変調周波数の増大に伴い、反射ピークのパワーが上昇することが明らかになった。今後は、反射ピークのパワーを数学的に記述する理論を構築し、今回の実験結果を定量的に説明可能とすることを目指す。また、相関領域 LiDAR の更なる性能向上も並行して推進する予定である。

4 参考文献

- [1] 伊藤、LiDAR 技術の原理と活用法-自動運転の技術、科学情報出版、2020
- [2] P. Feneyrou, et al., Appl. Opt. **2**, 308 (2017).
- [3] T. Kiyozumi, et al., APL Photon. **6**, 101302 (2021).
- [4] K. Hotate, et al., J. Lightw. Technol. **11**, 1701 (1993).
- [5] T. Kiyozumi, et al., IEEE Trans. Instrum. Meas. **73**, 7001711 (2024).