## 研究終了報告書

「相互干渉回避機能を持つ超高精細 LiDAR に関する研究」

研究期間: 2021 年 10 月~2024 年 3 月 研究者:張超

1. 研究のねらい

近年の ICT の発展の中で、AI・IoT の利活用が急速に進み、サイバー空間とリアル空間が融合した「超スマート社会」の実現に向けた動きが活発になってきている。この「超スマート社会」の実現を推進する取り組みは政府の第 5 期科学技術基本計画において「Society 5.0」と呼ばれ、リアル 空間の情報がディジタルデータとしてサイバー空間上でシステム化されることでリアル空間とサイ バー空間の融合が実現される。また、このような融合により、持続的かつ強靱な人間中心の社会 を創り上げると共に、科学技術とそれがもたらすイノベーションによって社会的課題を乗り越える ことを目指している。リアル空間とサイバー空間を繋ぐ情報として重要な役割を果たすのが計測に より得られたデータであり、計測技術は超スマート社会の実現に資する重要な技術である。

特に、物体形状測定は様々な分野に需要があり、工業製品の外観検査、プラント計測、インフ ラ・建築検査、文化財保管、自動運転等に幅広く応用されている。従来の三次元計測の手段とし ては、ノギス、マイクロメータ、プローブ方式などによる接触測定が多く用いられていたが、超音波 や光を使った非接触方式に移行しつつある。超音波や光を物体に当てて戻るまでの時間から距 離を測定する飛行時間(ToF)法は、自動運転用 LiDAR の代表的な技術であり、世界中で研究開 発が進められている。しかしながら、本手法は一般的に 100 m 以上の範囲を 10 cm 前後の奥行 分解能で測定し(パルス幅 1ns)、衝突回避等には有用であるが、工業製品の外観検査等のよう な mm 以下の空間分解能が求められる分野では利用されてこなかった。ここで言う工業製品とは、 手のひらに載るようなギヤ部品から車のボディや航空機の機体部品のような大型部品までをカバ ーする。また、多数の LiDAR が動作する環境において、LiDAR 間の相互干渉が指摘されるように なった。そこで、研究代表者は上記課題を克服するために、相互干渉回避機能を持つ超高精細な 形状測定が可能な ToF 型 LiDAR を提案し、多数の超高精細 LiDAR が協調してリアル空間を掌 握する技術を初めて実現する。まず、パルス幅 1ps の短パルス光及び非同期光サンプリング法を ToF型 LiDAR に導入し、奥行分解能の 1000 倍向上を図る。続いて、他の LiDAR の光を分離する ための手法を考案し、システム実装する。研究代表者は本研究を通して、リアル空間及びサイバ 一空間のより一層正確な融合を実現することを目指す。

2. 研究成果

(1)概要

本研究では、2台の自走パルス光源を用いた2コム 干渉 LiDAR の実現、相互干渉の抑圧、非機械式ビ ーム走査の3項目を達成した。2コム干渉法の課題 は、2台のパルス光源の繰返し周波数の変動であ る。本研究では、2台のパルス光源を自走させ、補 正用の光電回路を導入することで、繰返し周波数変 動の影響をソフトウェアにより排除した。本アプロー



図1LiDAR による外観検査の適用例

チにより、2 台のパルス光源を干渉計 に接続するだけで高精細測距が可能 な Plug&Play 式 2 コム干渉 LiDAR を 実現させた。具体的には、2 コム干渉 計に加えて一対の CW 光源を用意し、 各 CW とプローブパルス列及び参照 パルス列を干渉させ、計4種の干渉信 号を取得する。次に、この 4 信号に対

Direct time of flight (ToF)	Object under test
Frequency-modulated continuous-wave (F AD+FFT Wavelength swept light source	Object under test

図 2 ToF 及び FMCW 方式の測距概念

して適切な計算を施すことにより、繰返し周波数に揺らぎが発生する度に時間軸を校正でき、短 パルスをディジタル領域で再構築できる。ところが、このままでは CW 光源の波長揺らぎによる測 距精度低下という課題が残る。本研究では、さらにインライン参照経路を LiDAR 射出口の手前に 挿入し、これを長さ基準とすることで本課題を解決した。最終的に、一対の自走パルス光源で奥 行分解能 95.4µm、奥行精度±1.17µm の ToF LiDAR を実現した。続いて、光源位相雑音の違いを 利用して相互干渉の抑圧を行った。光源位相雑音は、時間領域における固有のランダムパターン である。2コム干渉により光パルスの複素振幅を取得した後、提案 LiDAR により位相雑音を除去 でき、さらに振幅平均により SNR を有効に高められる。実際に 2 台の LiDAR を相互干渉させ、 SNR 改善過程の中で異なる位相雑音を持つパルスは約20dB 抑圧された。最後に、本 LiDAR に 集光光学系を搭載し、2 軸ガルバノミラーによりビームをラスター走査し、金属サンプル表面の凹 凸形状を測定した。一方、非機械式ビーム走査に関しては、短光パルスを回折格子で分光し、帯 域ごとに射出角度が異なることを利用する方針を遂行した。そして、戻り光を同軸構成で受光し、 光電変換の後にディジタル領域で FFT して帯域分割を行うことで、各射出角度に応じた距離を検 出する。現段階では、1 軸非機械式ビーム走査と2 コム干渉信号の帯域分割の 2 つの要素技術 を開発することに成功した。1 軸非機械式ビーム走査の検証実験では、40nm 帯域で 3.5°範囲を ビーム走査し、約 50um の奥行精度を実現した。続いて、2 コム干渉信号の帯域分割であるが、 20nm 帯域の短光パルスを2コム干渉により測定し、光電変換後に FFTを施し、100/50/25GHzの 帯域幅で分割を試み、各サブバンドを逆 FFT してパルスを取得できた。

(2)詳細

**研究項目1「2波長補正法に基づく2コム干渉 LiDAR の構築」** ToF LiDAR の奥行分解能は 光パルス幅により決まり、奥行精度は光パルス幅と相関がある。ここで、奥行分解能とは測距の 細かさの限界(微小な 2 点を見分けられる最小距離)を表し、奥行精度は 1 点をどれだけ緻密に 測定できるかを示す評価指標である。一般的な ToF LiDAR のパルス幅は 1ns であり、奥行分解 能は 15cm である。例えば、1ps 幅パルスを用いれば、奥行分解能は 150 $\mu$ m と 1000 倍向上する。 しかしながら、1ps のような短パルスは 1THz の帯域を有するため、直接的に光検出できない。そ こで、2 コム干渉法を用いることで、等価的に短光パルスを検出することができる。2 コム干渉法で は、2 台のパルス光源のパルス繰返し周波数 fを若干離調( $\Delta f$ )させて干渉させる。ここで、片方の パルス列をプローブ光、もう片方を参照光と呼ぶ。繰返し周波数の僅かな離調により、干渉点は プローブパルスに対して時間軸上で実効サンプリング間隔 $\Delta T$ 分シフトする。

$$\Delta T = \frac{1}{f - \Delta f} - \frac{1}{f} \cong \frac{\Delta f}{f^2} \tag{1}$$

このようにして得られた干渉点を繋げると、緩やかに変化するパルスが得られるが、これはプロ

ープパルスを時間軸上で伸長させたものである。したが って、直接観測できない短光パルスを既存の光検出器 で測定が可能となる。また後述するが、2 コム干渉では パルスの複素振幅を取得できるので、さまざまなデータ 処理をディジタル領域で行うことができる。例えば、以下 で述べる繰返し周波数揺らぎの除去、波長分散の補 償、位相雑音の除去と振幅平均(SNR を効率的に上げ られる)が挙げられる。さらに、位相雑音の除去処理を 利用して、LiDARにおける相互干渉を抑圧することもで きる。2 コム干渉法の課題は、2 台のパルス光源の繰返 し周波数の変動である。これまで位相同期ループを用



いて光電的に 2 台のパルス光源を同期させる方法、共振器を共通化させて同期させる方法等が 研究されてきたが、いずれも高度な技術とシステム管理を必要とする。本研究の特徴は、2 台の パルス光源を同期させずに自走駆動する点にある。補正用の光電回路を導入することで、繰返し 周波数の変動の影響をソフトウェアにより排除できる。このようなアプローチにより、2 台のパルス 光源を接続するだけで、高精細測距が可能になる Plug & Play 式 2 コム干渉 LiDAR を実現した。

具体的には、一対の CW 光源(CW1, CW2)を用意する。そして、CW1 とプローブパルス列、 CW1 と参照パルス列、CW2 とプローブパルス列、CW2 と参照パルス列の 4 つの干渉信号を取 得する光電回路を2コム干渉計に追加する。次に、この4種の信号に対して以下の計算を行って、 繰返し周波数に揺らぎが発生する度に時間軸を校正し、光パルスをディジタル領域で再構築する。

$$S_{probe,CW1} = e^{j\{2\pi(f_{probe} - f_{CW1})t + \varphi_{probe}(t) - \varphi_{CW1}(t)\}}$$
(2)  

$$S_{ref,CW1} = e^{j\{2\pi(f_{ref} - f_{CW1})t + \varphi_{ref}(t) - \varphi_{CW1}(t)\}}$$
(3)

$$S_{probe.CW2} = e^{j\{2\pi (f_{probe} + Nf - f_{CW2})t + \varphi_{probe}(t) - \varphi_{CW2}(t)\}}$$
(4)

$$S_{ref,CW2} = e^{j\{2\pi (f_{ref} + N(f + \Delta f) - f_{CW2})t + \varphi_{ref}(t) - \varphi_{CW2}(t)\}}$$
(5)

ここで、*f*、*φ*、*N*、Δ*f* はそれぞれ光周波数、光位相、2 つの CW 間にアルコムの本数、参照パルス 列の繰返し周波数の離調を表す。これらの計算はディジタル領域で行われる。続いて、上記の式 (2)-(5)の 4 つの計算結果を用いて、以下の計算を行うことができる。

$$S_1 = s_{probe,CW1} s^*_{ref,CW1} = e^{j\{2\pi (f_{probe} - f_{ref})t + \varphi_{probe}(t) - \varphi_{ref}(t)\}}$$
(6)

$$S_2 = S_{probe,CW2} S^*_{ref,CW2} = e^{j\{2\pi (f_{probe} - f_{ref} - N\Delta f)t + \varphi_{probe}(t) - \varphi_{ref}(t)\}}$$
(7)

ここで、\*は位相共役を表す。これらには CW 光に関連する項は含まれておらず、プローブ光と参 照光に関連する項のみが含まれている。最後に、式(6)(7)の複素共役の乗算を行うことにより、離 調 Δf に関連する位相のみを含む以下の結果が得られる。

 $S = S_1 S_2^* = (S_{probe,CW1} S_{ref,CW1}^*)(S_{probe,CW2} S_{ref,CW2}^*) = e^{j2\pi N\Delta ft}$  (8) 式(8)から、 $\Delta f$  に揺らぎがある場合でも測定されたパルス列に対してリサンプリングを行うことで時 間軸を校正でき、2 コム干渉パターンから短光パルスをディジタル領域で再構築できる。

本研究では、上述のシステム構築とデータ処理により、サブ ps 幅の光パルスを2コム干渉方式 により検出し、測距に成功した。本システムの実効サンプリング間隔は 609fs で、見かけ上 1.64THz の受光帯域を有する。そして、1 点当たりの測距時間は 8.21ms であった。波長分散の補 償後のパルス幅は 636fs であった。このパルス幅と対応する奥行分解能の理論値は 95.4µm であ る(参:人間の毛髪の太さは平均 100µm)。また 2 コム干渉計に、2 波長補正法及びインライン参 照経路のような要素技術の導入により、奥行精度±1.17μmの測定結果が得られた(参:装飾用の 下地ニッケルメッキの厚みは 3~5μm)。

研究項目2「LiDAR 相互干渉の抑圧」 上述したように2コム干渉では、光パルスの複素振幅 を取得できるため、位相情報の違いを利用して、他者の LiDAR パルスと区別することができる。 時間領域で位相コーディングする手法として、レーザの位相雑音に着目した。光源が持つ位相雑 音は、時間領域におけるランダムな位相変調と解釈でき、光源固有のパターンである。2コム干渉 により光パルスの複素振幅を取得した後、本 LiDAR 構成により自身の位相雑音を除去すること ができる。そして、位相雑音除去後に振幅平均によりパルスの SNR を効率的に高めることができ る。一般的なパワー平均では、N 回平均により SNR は√N倍向上するが、N 回の振幅平均では SNR は N 倍向上する。相互干渉が発生した場合、この SNR 向上の過程の中で、異なる位相雑 音を持つ他者 LiDAR のパルスを平均化により抑圧することが可能である。相互干渉のシステム 実験では、CW 光源を外部変調して光パルス列を生成し、短光パルス光源の出力と混合すること で相互干渉を引き起こした。その後、上述の位相雑音補償と振幅平均処理を施すことで、相互干 渉の抑圧に成功した。ここでは、110 回の振幅平均により自身の LiDAR パルスの SNR は約 20dB 向上した。相互干渉成分は雑音と共に約 20dB 低下したことになる。

研究項目3「LiDAR ビーム走査」 開発した2コム干渉 LiDAR の同軸構成に、集光光学系と2軸ガルバノ走査シ ステムをビーム走査機構として追加し、三次元計測を実施 した。非同軸構成の場合、システムのデバイス点数が増え ることと、水滴や油等が投光窓と受光窓それぞれに付着し た場合、投光側も受光側もビーム方向が変わるという欠点 がある。同軸構成は、投光窓と受光窓を共通化させるた め、コンパクトでシンプルである。また、ポリゴンミラーやチ ルトミラーに関しては軸ぶれの問題が存在するため用いな

かった。ガルバノ走査システムは距離校正が煩雑であるものの、前述の面倒れ問題はないため、 システムへの導入を決定した。システム実験では、コリメータを用いて 7.0mm 径(1/e<sup>2</sup> 径)の平行ビ ームを形成し、焦点距離 30.00cm の両凸レンズにより集光光学系を構成した。そして、大径ビー ム用 2 軸走査ガルバノミラーにより、ビームを水平±2 度と垂直±2 度でラスター走査し、金属物体 サンプル表面の凹凸形状を測定した。

一方、非機械式ビーム走査に関して は、回折格子で分光し、帯域毎に射出角 度が異なることを用いる。そして、戻り光を 同軸受光し、光電変換の後に FFT して帯 域分割を行うことで、各射出角度の測距を 行う。現段階では、分光による1軸非機械 式ビーム走査と2 コム干渉信号の帯域分 割の2つの要素技術を開発した。1 軸非機械式ビーム走査の検証実験では、40nm 帯域で3.5°範 囲を10kHz でビーム走査し、約50µm の奥行精度を実現した。続いて、2コム干渉信号の帯域分 割であるが、20nm 帯域を有する短光パルスを2コム干渉測定し、光電変換後に FFT を施し、 100/50/25GHz の帯域幅で分割を試み、各サブバンドを逆 FFT してパルスを取得した。



図5分光による1軸非機械式ビーム走査

## 3. 今後の展開

<u>非機械式ビーム走査機構の実装</u> 本研究では、ビーム走査法として、2 軸ガルバノ走査、回折 格子を利用した1軸非機械式走査と2コム干渉信号の帯域分割などの要素技術を開発した。2 軸 ガルバノ走査を実装して三次元計測を行ったが、1 軸非機械式走査と2コム干渉信号の帯域分割 は要素技術の開発に留まった。したがって、今後の展開の一つとして、1 軸非機械式走査+2 コム 干渉信号の帯域分割を2コム干渉 LiDAR に実装することを考えている。

**自己干渉の除去** LiDAR 計測では、複数 LiDAR に限らず、単一 LiDAR でも1 回の測距でマ ルチパルスを検出する場合が少なくない。例えば、測定光路上の塵や埃によって光が散乱・反射 するケースが該当する。したがって、このような自己干渉問題の解決が求められる。相互干渉信 号は、LiDAR の個体差や符号化などを利用することで回避できるが、自己干渉抑圧には異なる 技術が求められる。

2 波長補正について 前述の通り、本研究では相当な補正を行うことで、2 台のパルス光源を干 渉計に接続するだけで高精細測距が可能になる Plug&Play 式 2 コム干渉 LiDAR を実現した。と ころが、ある 1 点を繰り返し計測していると、測距に失敗するケースが多少発生することを確認し た。この原因は恐らく 2 波長補正の失敗である。本 LiDAR の光電補正回路では、CW1 とプロー ブパルス列、CW1 と参照パルス列、CW2 とプローブパルス列、CW2 と参照パルス列の 4 つの干 渉信号を取得しているが(式(2)-(5)参照)、ここでの干渉には簡易的に 3dB カプラを使用しており、 干渉信号の同相(I)成分もしくは直交位相(Q)成分のどちらかしか取得できない。CW の波長揺ら ぎによっては、この干渉信号の位相回転方向が逆転する場合があり得るが、3dB カプラによる干 渉では位相回転の向きを区別できない。そこで、代わりに光 90 度ハイブリッド回路を実装して IQ 成分を同時に取得することで、上述した 2 波長補正の失敗を回避することができる。

4. 自己評価

研究目的の達成状況としては概ね達成できた。非機械式ビーム走査は要素技術の開発に留まり、 三次元計測は機械式ビーム走査を通して実施したので、非機械式の要素技術の実装が望まれる。 研究の進め方であるが、コロナ禍の影響と教務などの増加により、研究実施体制の通りに進まず、 非機械式の一部要素技術開発以外はすべて当研究室単独で遂行した。しかし、上長で本学学部 長・研究科長の伊藤先生の助言と知見は大いに役に立ち、当研究室の学生の努力にも支えられ、 最終的に有用な LiDAR が完成した。また、研究総括の田中秀治先生をはじめ、アドバイザの平 等拓範先生、高西淳夫先生、平尾明子先生などから多くのアドバイスを頂戴し、研究期間中の試 行錯誤を支えていただいた。

研究成果の社会・経済への波及効果については、ToF LiDAR の長距離性を活かしたインフラ 監視のような長距離に渡る三次元計測が期待できる。日本の社会資本ストックは高度経済成長 期に集中的に整備され、今後急速に老朽化することが懸念されている。今後 20 年間で、建設後 50 年以上経過する施設の割合は加速度的に高くなる見込みであり、このように一斉に老朽化す るインフラを戦略的に維持管理・更新することが求められる。しかし、インフラ維持管理コストの増 大や少子高齢化の進展によるインフラ点検人材の不足が原因で、インフラの点検頻度が低くなっ ている。そこで本研究で開発した2コム干渉LiDARを用いた自律型インフラ点検はこの喫緊課題 の解決の一つになるのではないかと期待している。例えば、建造物の傾斜やひび割れ検知、トン ネルの劣化検知、水門・樋門・ダムの漏水の原因特定、橋梁の崩落の防止、情報伝送インフラで あるパラボラアンテナの変形検出、空港滑走路や舗装道路の亀裂検出等が考えられる。 公開

- 5. 主な研究成果リスト
  - (1)代表的な論文(原著論文)発表

研究期間累積件数: 6 件

 Z. Zhang, <u>C. Zhang</u>, T. Shirahata, S. Yamashita, and S. Y. Set, "Overall Non-Mechanical Spectrally Scanned LiDAR Using Chirped Amplitude-Modulated Phase-Shift Method", Journal of Lightwave Technology, vol. 40, no. 7, pp. 1902-1913, Apr. 2022.

CAMPS LiDAR の内容である。本方式は間接 ToF LiDAR に分類され、分散同調型波長 掃引レーザ(DTSL)と回折格子を用いた非機械式走査法を提案し、その原理実証と性能 評価を行った。DTSL には機械的な可動部がないため、慣性のない高速波長掃引を実現 できる。また、適切なデータ処理法としてチャープ振幅変調位相シフト(CAMPS)法を提案 した。本提案の検証実験を実施し、40nm の波長掃引帯域で 3.5°範囲を 10kHz の速度で ビーム走査し、約 50µm の奥行精度が得られた。

 M. Uyama, S. Okamura, <u>C. Zhang</u>, F. Ito, A. Nakamura, T. Okamoto, and Y. Koshikiya, "Bandwidth-Decomposed Measurement of Spatial-Mode Dispersion of Coupled 2-Core Fiber Employing Linear Optical Sampling", Journal of Lightwave Technology, vol. 41, no. 10, pp. 3153-3163, May 2023.

2 コム干渉信号の帯域分割についての論文である。20nm(~2.5THz)帯域を有する短光パ ルスを2コム干渉測定し、光電変換後に FFT を施し、100GHz、50GHz、25GHz の帯域幅 で分割を試み、各サブバンドを逆 FFT してパルスを取得できた。本論文では、この手法を マルチコアファイバ伝搬におけるインパルス応答の測定及び統計解析に応用した。

 C. Zhang, T. Nagata, M. S. B. A. Sharifuddin, F. Ito, A. Nakamura, and Y. Koshikiya "Longrange frequency-modulated continuous-wave LiDAR employing wavelength-swept optical frequency comb." Optics Communications, vol. 545, no. 15, 129702, Oct. 2023.

LiDAR の性能指標には、奥行分解能/精度、測定距離、リフレッシュレートがある。単一 光源を用いて LiDAR を構成する FMCW 方式は波長掃引帯域を拡大することで高分解 能/高精度を実現できるが、測定距離は受光器帯域により制限される。本稿では独自の 光周波数コム方式によりこの制限要因を打破する技術を提案した。すなわち、単一光源 を用いて、低帯域の受光器により、長距離において高精度測距を行い、かつリフレッシュ レートを落とさない高速性を実現させる。

(2)特許出願

研究期間全出願件数: 4 件(特許公開前のものも含む)

20101		H MALL	~ ·	
	発	明	者	中村篤志、岡本達也、古敷谷優介、伊藤文彦、 <u>張超</u>
1	発日	明の名	3 称	非接触型測距装置及び方法
	出	顅	人	国立大学法人島根大学、日本電信電話株式会社
	出	顅	B	2022/02/16
	出	願 番	号	特願 2022-22391
	概		要	FMCWLiDARの測定距離は受光器帯域により制限される。本発明 では独自光周波数コム方式によりこの制限要因を打破する技術を 提案した。単一光源を用いて、低帯域受光器により、長距離におい て高精度測距を行い、かつリフレッシュレートを落とさない高速性を 実現できる。

(3)その他の成果(主要な学会発表、受賞、著作物、プレスリリース等)

- 張超、宇山康太、張哲元、セットジイヨン、山下真司、"コヒーレント自由空間光通信の近年の研究動向"電子情報通信学会光ファイバ応用技術研究会、2021.11 招待講演
- <u>C. Zhang</u> and F. Ito. Recent progress of fiber diagnostic technologies for optical fiber networks: distributed fiber sensing and fiber characterization, SPIE Metro and Data Center Optical Networks and Short-Reach Links V, 12027, 89-104 (2022).招待講演
- 宇山将史、岡村柊希、張超、伊藤文彦、中村篤志、岡本達也、古敷谷優介、"線形光サン プリング法による結合型2コアファイバの空間モード分散の測定"、電子情報通信学会光フ ァイバ応用技術研究会、2022.5 学生奨励賞

プレスリリース: https://www.shimane-u.ac.jp/docs/2023032900030/

- 小具亮太、谷村大輝、<u>張超</u>、伊藤文彦、吉村雄一、青鹿弘行、今井道男、"高速波長掃引 レーザを用いた OFDR による動的ひずみ計測"、電子情報通信学会光ファイバ応用技術 研究会、かながわ県民センター、2022.10 <u>学生奨励賞</u> プレスリリース: https://www.shimane-u.ac.jp/docs/2022112400033/
- 5. 岡村柊希、宇山将史、張超、伊藤文彦、中村篤志、岡本達也、古敷谷優介、"線形光サン プリング法を用いた結合型2コア・4コアファイバの空間モード分散の帯域ごと測定"、電子 情報通信学会光ファイバ応用技術研究会、かながわ県民センター、2022.10 学生奨励賞 プレスリリース: https://shimane-u.ac.jp/docs/2022112500016/
- 永田崇弘、M. S. B. A. Sharifuddin、<u>張超</u>、伊藤文彦、中村篤志、古敷谷優介、"波長掃引 型光周波数コムを用いた周波数変調連続波型光距離計"、第73回電気・情報関連学会中 国支部連合大会、R22-11-04、2022.10 <u>学生奨励賞</u> プレスリリース: https://www.shimane-u.ac.jp/docs/2023041300050/
- <u>張超</u>、"インダストリー4.0 における LiDAR の可能性を探る"、IEEE 広島支部および電子 情報通信学会中国支部主催講演会、RCC 文化センター、2022.11 招待講演
- M. S. B. A. Sharifuddin、永田崇弘、<u>張超</u>、伊藤文彦、中村篤志、古敷谷優介、"スペクトル パターンを有する光周波数コムを用いた長距離周波数変調連続波型 LiDAR"、電子情報 通信学会 PN 研究会学生 WS、pn2023-stws-8、沖縄県立博物館、2023.3 <u>優秀発表賞</u> プレスリリース 1: https://www.shimane-u.ac.jp/docs/2023041300043/
- <u>C. Zhang</u>, Z. Zhang, N. Yamaguchi, T. Shirahata, S. Y. Set, S. Yamashita, and F. Ito. Exploring the Potential of Light Detection and Ranging in Industry 4.0, International Conference on Information Optics and Photonics (CIOP), Xi'an, China, 7-10 August, 2023. 招待講演
- S. Y. Set, Z. Zhang, N. Yamaguchi, T. Shirahata, <u>C. Zhang</u>, S. Yamashita. Advanced fiber laser sources for 3D LiDAR imaging, Asia Communications and Photonics Conference (ACP), 4-7, Wuhan, China, Nov., 2023. 招待講演
- D. Tanimura, R. Ogu, <u>C. Zhang</u>, F. Ito, Y. Yoshimura, H. Aoshika, and M. Imai. Over 1 km large strain measurement with 70+ times range expansion by using phase-noise compensated OFDR, International Conference on Optical Fiber Sensors (OFS), Postdeadline Paper F2.5 (2023). (Hamamatsu, Shizuoka) 最優秀ホットトピック論文
- 12. <u>C. Zhang</u> and A. Nakamura. Exploring the Potential of Light Detection and Ranging for Society 5.0, Information Photonics, OPIC, IP6-01, Yokohama, Kanagawa, 2024.招待講演

## 公開