

令和 5 年 6 月 7 日現在

機関番号：13301
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04501
研究課題名（和文）FMCW法を用いた長距離・高分解能・クロストークフリーのLiDARの開発

研究課題名（英文）Development of long-range, high ranging resolution and crosstalk-free LiDAR by FMCW method

研究代表者
飯山 宏一（Iiyama, Koichi）
金沢大学・フロンティア工学系・教授

研究者番号：90202837
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）：光周波数が掃引されたレーザ光源を用いるFMCW LiDARに関して、高コヒーレンスの半導体レーザを光源に用い、光周波数掃引の非線形性の影響を打ち消すk-サンプリング法を用いて、200 m遠方の建物の計測に成功した。高速化のために、光周波数掃引の繰り返し周波数を30 kHzとすることで、3秒程度での計測を実現した。一方、高速測定時にはk-サンプリング法では光周波数掃引の非線形性の影響を完全に打ち消せないことも明らかにし、その解決のために、光周波数掃引のための変調波形をひずませて光周波数掃引の線形性を向上することにより、高速測定時においても正確な計測が可能であることを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

FMCW LiDARは光の干渉を利用することから、外部光が非常に強い環境においても、安定した計測が可能である。また、干渉を利用することで高感度であり、レーザ光パワーが現行のToF法の100分の1以下の低パワーでも距離測定が可能である。これらのことから、屋外における測量、自動運転自動車などにおけるレーザレーダへの安全な適用が可能である。また、遠方の構造物までの距離を持続的に測定することで、構造物の揺れの検知も可能であり、構造物の健康診断や破壊予測など、防災分野への適用も可能である。

研究成果の概要（英文）：We have developed FMCW LiDAR using a high-coherence laser diode as an optical frequency-swept laser source. The nonlinearity in the optical frequency sweep is cancelled by utilizing the k-sampling method. We have successfully profiled structures inside a building in our campus up to 200 m distant. The repetition frequency of the optical frequency sweep was increased up to 30 kHz for fast measurement, and the measurement time of about 3 sec was realized. However, the nonlinearity in the optical frequency sweep cannot be perfectly cancelled by the k-sampling method for fast measurement situation. To overcome the problem, we slightly distorted the modulation signal for optical frequency sweep to improve the linearity of the optical frequency sweep. As a result, accurate profiling can be realized even when fast repetition frequency of the optical frequency sweep.

研究分野：光電子計測工学

キーワード：光干渉計測 FMCW法 LiDAR 距離計測 物体形状計測

1. 研究開始当初の背景

自動運転に関する研究開発においては、他車との距離や周囲の障害物を自動計測し、その情報を基にアクセル、ブレーキ、ハンドルを制御する技術が不可欠である。そのため、自動運転の実現のためには、他車や周囲の障害物の距離を、遠くから精度よく「測る」ことが不可欠であり、距離センサが重要な役割を担っている。

距離センサには、カメラ、ミリ波、超音波、光などを利用することができるが、自動運転には測定距離 200 m、距離分解能 2.5 cm が必要とされる。また、障害物の詳細な認識のためには照射ビーム径が小さなレーザ光の利用が検討されている。レーザ光を用いた距離計測技術は LiDAR (Light Detection And Ranging) と言われている。現在は、光パルスの往復の伝搬時間遅れを直接測定する ToF (Time of Flight) 法が利用されているが、より長距離の LiDAR を実現するためには、以下の点を考慮する必要がある。

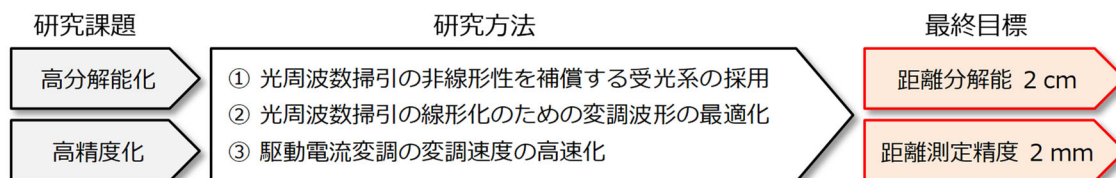
- 安全性を満足するために、レーザ光パワーを大きくせずに、如何にして高感度化を図って長距離化するか。
- 200 m 遠方においても、如何にして距離分解能・距離測定精度を高めるか。
- 太陽光や他車のレーザ光などの外部光の影響を、如何にして除去するか。

2. 研究の目的

上記の点を実現するためには、本研究では光の干渉を利用することとした。そこで、光周波数が時間的に線形に掃引されたレーザを光源に用いる FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 法による LiDAR (FMCW LiDAR) を開発することを目的とする。FMCW 法では下表に示すような特徴と利点があり、高感度化とクロストークフリーの実現には大変有効である。

特徴	利点
FMCW 法を用いる	<ul style="list-style-type: none"> • 干渉信号は交流信号であり、直流信号である太陽光と区別できる。 • 10 GHz 程度の光周波数掃引幅が容易に得られるので、高い距離分解能が実現でき、その結果、距離測定精度も向上する。
光の干渉を用いる	<ul style="list-style-type: none"> • 参照光とのミキシングにより、高感度化が実現できる。 • 異なるレーザ光源からの光や太陽光とは干渉は生じないので、他車の LiDAR 光によるクロストークは生じない。

また、本研究の課題と研究方法および最終目標は、下図のとおりである。



3. 研究の方法

FMCW 光距離センサでは、レーザ光源の光周波数を時間的に線形に掃引し、参照光と測定物体からの反射光の干渉信号を測定する。光周波数が掃引されているので、干渉信号は参照光と反射光の距離差 (時間差) に比例するビート周波数を持つ。そのため、干渉信号をフーリエ解析してビート周波数を測定することにより、測定対象までの距離を測定することができる。

FMCW 光距離センサでは、レーザ光の光周波数の掃引は線形でなければならないが、一般には光周波数掃引は非線形となり、距離測定精度が大きく劣化する。そこで、以下の方法により距離測定精度を大きく向上させる。

- ・光周波数掃引の非線形性をキャンセルする「k-サンプリング法」の確立
- ・光周波数掃引の線形性を高めるためのレーザ変調波形の補正

4. 研究成果

(1) 光周波数掃引の非線形性の影響をキャンセルする「k-サンプリング法」の確立

図1に、構成したシステムを示す。光源には波長 1550 nm の狭線幅 DFB レーザ（スペクトル線幅：公称 40 kHz 程度）を用い、その注入電流を三角波で変調することにより、光周波数を掃引した。変調周波数は最大で 30 kHz である。DFB レーザからの出射光は、光ファイバカップラ FC1 により 2 分割される。FC1 を直進した光は FC2 により 2 分割され、一方は参照光として直接バランス光検出器に入射し、他方は測定対象に照射され、その反射光（信号光）がバランス光検出器に入射する。バランス光検出器で生じた参照光と信号光との干渉信号を FFT 解析することにより距離を測定する。なお、測定対象に照射するレーザ光パワーは 20 mW 程度である。

さて、DFB レーザの注入電流を三角波で変調しても光周波数掃引は非線形となってしまう、距離分解能と距離測定精度は大きく劣化する。そこで、「k-サンプリング法」を用いて、光周波数掃引の非線形性をキャンセルするシステムを構築した。図1に示すように補助干渉計を設け、その干渉信号を AD 変換器（ADC）のサンプリングクロックに用いて距離測定信号を AD 変換し、FFT 解析する。このとき、補助干渉計の干渉信号も光周波数掃引の非線形性の影響を受けるため、サンプリング間隔は不等間隔となる。その結果、サンプリング間隔が自動的に最適化され、非線形性の影響を取り除くことが可能である。

また、レーザ光をガルバノスキャナにより 2 次元的にスキャンして測定対象までの距離の空間分布を測定し、測定対象の形状を計測する。

DFB レーザでは、変調周波数が高くなるほど光周波数の変化量は小さい。本研究では、変調周波数にかかわらず変調振幅は一定として実験を行った。光周波数掃引幅は変調周波数 1 kHz では 2.3 GHz 程度、変調周波数 30 kHz では 1 GHz 程度である。距離分解能と距離測定精度は光周波数掃引幅に反比例するため、変調周波数を高くすると測定の高速化は可能であるが、距離分解能と距離測定精度は劣化する。変調振幅を大きくして光周波数掃引幅を拡大すれば距離分解能と距離測定精度は向上するが、同時に干渉信号の周波数も高くなる。本研究で使用した AD 変換器の動作速度（400 MSPS）の制限により、上記の光周波数掃引幅とした。

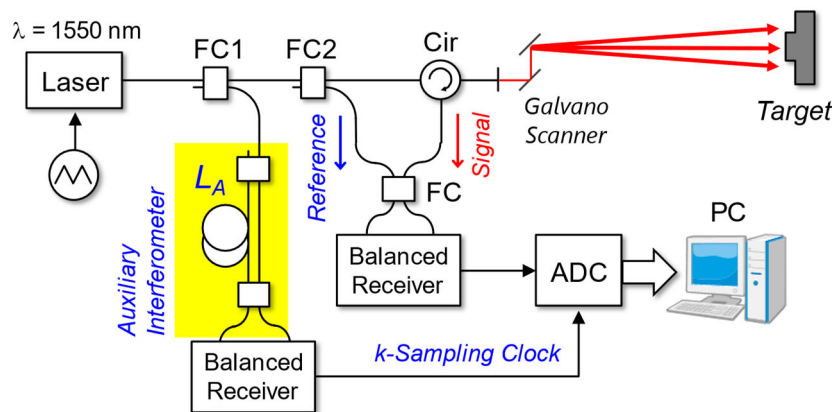


図1：システム構成図

(2) 距離分解能と距離測定精度

測定対象を 100 m 長の光ファイバ（空間距離換算 150 m）とし、その出射端からの反射光を測定することで、空間換算の光ファイバ長を測定した。DFB レーザの変調信号の変調周波数が 1 kHz のときと 30 kHz のときの測定結果を図2に示す。概ね 150 m の位置に鋭い信号が得られていることから距離測定が実現されているが、変調周波数が 30 kHz のときには測定信号が広がって距離分解能が劣化していることと、測定距離が変調周波数 1 kHz のときと比べると長くなっていることがわかる。

この原因をシミュレーションで検討したところ、補助干渉計の干渉信号の生成タイミングと距離測定用の干渉信号の生成タイミングとの間に時間差があることが原因であることがわかった。しかし、LiDARにおいては障害物までの距離は時々刻々変化するため、両干渉信号の生成タイミングを合わせることは不可能である。

この問題は、DFBレーザの光周波数掃引を線形化することで解決できる。そこで、DFBレーザの変調波形を補正して光周波数掃引を、完全ではないがほぼ線形化し、k-サンプリング法を併用して、測定結果の性能向上を検討した。

変調波形の補正は、以下のように行った。干渉信号の周波数が一定であれば、干渉信号の位相変化は時間に対して線形に増加する。一方、干渉信号の周波数が変動しているときには、干渉信号の位相変化は時間に対して非線形に増加する。そこで、測定した干渉波形の位相変化を求め、線形関数との差分を元の変調波形に重畳することで、変調波形を補正した。

図3(a)に補正した変調波形の一例を示す。横軸は周期で規格化してある。三角波の折れ曲がり点直後の波形の電圧変化率が大きくなり、その後はほぼ同じ電圧変化率となっていることがわかる。図3(b)は、補正した変調波形を用いて長さ100 mの光ファイバの長さを測定した結果である。変調周波数が1 kHzのときと30 kHzのときを重ねて描いてあるが、変調周波数にかかわらず同じ距離と測定していることがわかる。また、距離信号の幅は変調周波数によらず同程度であることから、距離分解能も同程度であることがわかる。

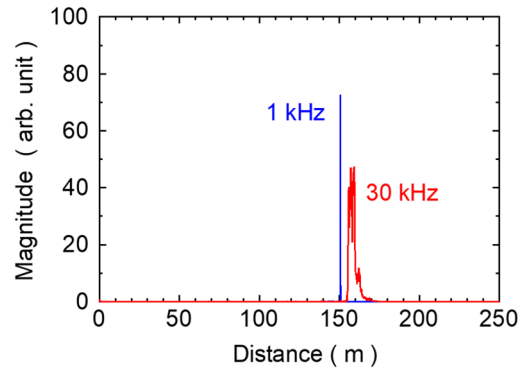
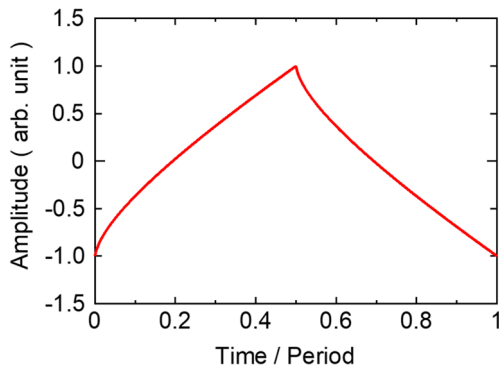
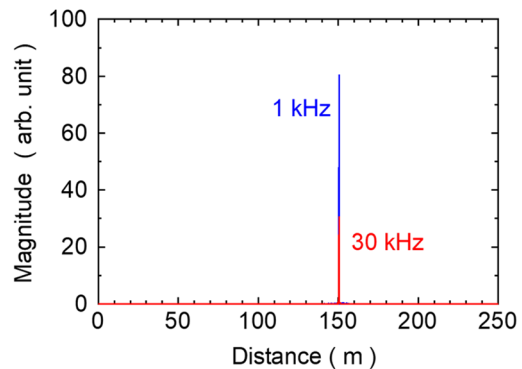


図2：測定結果（三角波変調のとき）



(a) 補正した変調波形



(b) 距離測定結果

図3：変調波形補正後の距離測定結果

長さ100 mの光ファイバの長さ測定を1000回繰り返したときの、平均の長さ、距離分解能（半値全幅で評価）および距離測定精度（標準偏差で評価）をまとめると、下表となる。この表より、変調波形の補正により、距離分解能および測定バラツキとも大きく向上することがわかり、その効果は変調周波数が高くなるほど大きいこともわかる。

変調周波数	波形補正の有無	測定距離	距離分解能	距離測定精度
1 kHz	なし	150.65 m	10.8 cm	2.18 mm
	あり	150.47 m	7.30 cm	1.69 mm
10 kHz	なし	152.16 m	29.1 cm	210 mm
	あり	150.47 m	11.3 cm	2.85 mm
30 kHz	なし	157.33 m	53.9 cm	608 mm
	あり	150.45 m	18.9 cm	12.1 mm

(3) 物体形状計測

上記のシステムにより高精度の FMCW LiDAR が実現できたので、物体形状計測へと応用した。まず、50 m 遠方の建物外壁の測定を行った。図 4 に測定結果を示す。測定点は 401×151 点であり、 3×3 のメディアンフィルタを利用してノイズ除去を行っている。同図 5 より、変調周波数が 30 kHz の結果は、1 kHz の結果と比べると若干の劣化は見られるものの、同等の測定結果が得られていることがわかる。また、窓のサッシの箇所もはっきりと確認できる。測定時間は、変調周波数 1 kHz のときが 60 秒、30 kHz のときが 2.2 秒であり、変調周波数の増加比率に応じて、測定時間が短くなっていることがわかる。

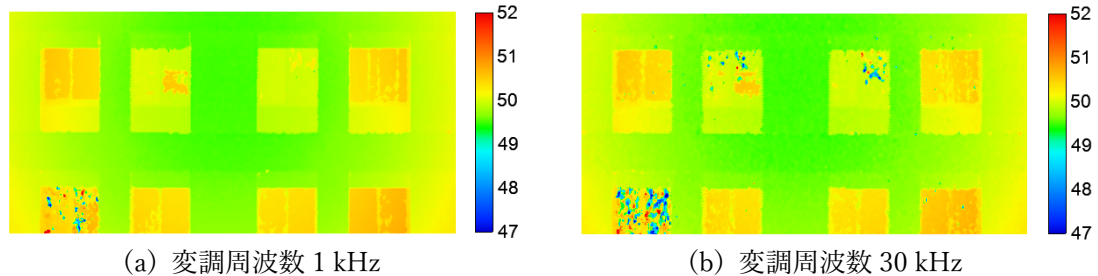


図 4 : 50 m 遠方の建物外壁の測定結果

FMCW LiDAR を実用化するためには、建物のような構造物だけでなく、人の検知も重要である。図 5 に、80 m 遠方に立っている人の測定結果を示す。同図(a)はその写真であり、異なる距離に 2 名の人が、片手を挙げて立っている。同図(b)は変調周波数 20 kHz のときの測定結果であり、同図(c)は変調周波数 30 kHz のときの測定結果である。測定点は 401×151 点であり、 3×3 のメディアンフィルタを利用してノイズ除去を行っている。いずれの変調周波数においても、手を挙げている 2 名の人の検知していることがわかる。変調周波数 30 kHz のときに床や天井の測定結果が若干劣化しているが、人の検知には問題ない。洋服などからの非常に弱い反射光の測定が可能であることから、本システムが非常に高感度であることがわかる。

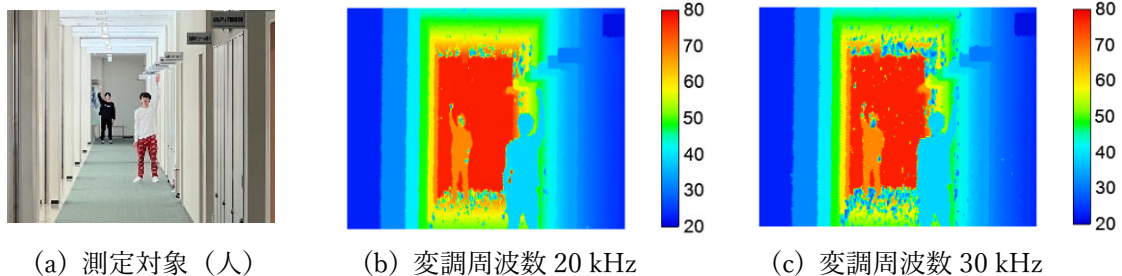


図 5 : 80 m 遠方の人の測定結果

最後に、建物内 120 m 遠方の測定結果を図 7 に示す。同図(a)はその写真であり、120 m 遠方は壁 (石膏ボード) となっている。同図(b)は変調周波数 30 kHz のときの測定結果である。測定点は 401×151 点である。この測定ではメディアンフィルタを利用していないため、若干ノイズのある結果となっている。しかし、120 m 遠方の壁だけでなく、手すりの構造も精度よく測定できている。

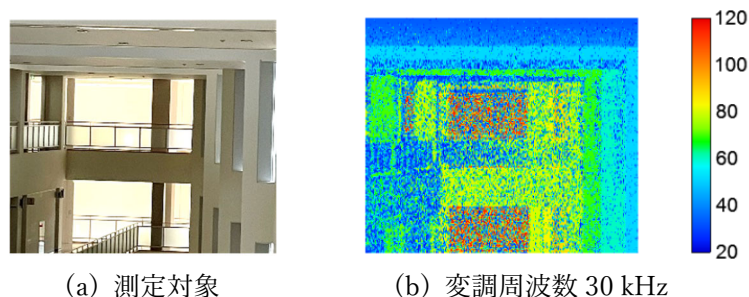


図 7 : 建物内 120 m 遠方の測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 1件 / うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Konishi Tomoharu, Iiyama Koichi, Yoshii Yotsumi	4. 巻 498
2. 論文標題 Path length calibration-free optical spectrometer with multi-pass absorption cell based on frequency modulated continuous wave ranging system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Communications	6. 最初と最後の頁 127208 ~ 127208
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.optcom.2021.127208	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 -

1. 著者名 Hanto Dwi, Iiyama Koichi	4. 巻 20
2. 論文標題 Low-Cost Interrogation of Long-Distance and Multipoint FBG Sensor Using Incoherent-FMCW Optical Ranging System	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 3599 ~ 3607
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSEN.2019.2959798	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 該当する

〔学会発表〕 計19件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 Yogetsu Nagasaka, Tomoharu Konishi, and Koichi Iiyama
2. 発表標題 Fast and accurate three-dimensional object profiling by FMCW optical ranging system using asymmetrically optical frequency chirped VCSEL
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2022 (ISOM '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Momose, Zhou Yu, and Koichi Iiyama
2. 発表標題 Detection and profiling of building and human by FMCW LiDAR using highly coherent laser source
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2022 (ISOM '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉田悠斗, 飯山宏一
2. 発表標題 FMCW光距離センサを利用した多点型光ファイバグレーティングセンサ
3. 学会等名 2022年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中壮太, 飯山宏一
2. 発表標題 瞬時ビート周波数の比較によるFMCW光距離センサシステム
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 くぬぎ知弥, 飯山宏一
2. 発表標題 電氣的周波数通倍kサンプリング法を用いたFMCW光距離センサ
3. 学会等名 2022年電子情報通信学会ソサイエティ大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yogetsu Nagasaka, Tomoharu Konishi, Koichi Iiyama
2. 発表標題 Fast and accurate three-dimensional object profiling by FMCW optical ranging system using asymmetrically optical frequency chirped VCSEL
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2022 (ISOM '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuki Momose, Zhou Yu, Koichi Iiyama
2. 発表標題 Detection and profiling of building and human by FMCW LiDAR using highly coherent laser source
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2022 (ISOM '22) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉田悠斗, 飯山宏一
2. 発表標題 FMCW光距離センサを利用した多点型光ファイバグレーティングセンサ
3. 学会等名 2022年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田中壮太, 飯山宏一
2. 発表標題 瞬時ビート周波数の比較によるFMCW光距離センサシステム
3. 学会等名 2022年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 くぬぎ知弥, 飯山宏一
2. 発表標題 電氣的周波数逡倍kサンプリング法を用いたFMCW光距離センサ
3. 学会等名 2022年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Koichi Iiyama, Zhou Yu, and Yuya Nakamura
2. 発表標題 Development of long-range FMCW LiDAR using highly coherent laser source in eye-safe wavelength range
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (ISOM '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Meng Shan, Takahiro Ikeda, and Koichi Iiyama
2. 発表標題 Linearizing optical frequency chirp of a DFB laser by modulation waveform optimization utilizing K-sampling technique for FMCW LiDAR
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (ISOM '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoharu Konishi and Koichi Iiyama
2. 発表標題 High-speed three-dimensional object profiling using FMCW optical ranging system by continuous scanning of laser beam
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2021 (ISOM '21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小西朋春, 長坂揺月, 飯山宏一
2. 発表標題 レーザービームの連続走査によるFMCW法を用いた3次元物体形状測定の高速度化
3. 学会等名 2021年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 喻舟, 桃瀬侑生, 飯山宏一
2. 発表標題 外部共振器レーザを用いた中距離FMCW LiDARの開発”, 2021年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
3. 学会等名 2021年電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoharu Konishi and Koichi Iiyama
2. 発表標題 High-speed and high-accuracy three-dimensional object profiling using FMCW optical ranging system by continuous scanning of laser beam
3. 学会等名 2021年電気学会電子・情報・システム部門大会, Student Competition Session
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tomoharu Konishi and Koichi Iiyama
2. 発表標題 High-speed three-dimensional object profiling using FMCW optical ranging system by continuous scanning of laser beam
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2020 (ISOM '20) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小西朋春, 飯山宏一
2. 発表標題 レーザービームの連続走査によるFMCW法を用いた3次元物体形状測定の高速度化
3. 学会等名 レーザー学会第41回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 飯山宏一, 池田貴洋
2. 発表標題 変調波形の最適化による FMCW光距離センサのための光周波数掃引の線形化
3. 学会等名 レーザー学会第41回年次大会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 測距装置及び測距方法	発明者 飯山 宏一	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2022-109041	出願年 2022年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
研究協力者	小西 朋春 (Konishi Tomoharu)		
研究協力者	桃瀬 侑生 (Momose Yuki)		
研究協力者	長坂 揺月 (Nagasaka Yogetsu)		
研究協力者	喻 舟 (Yu Zhou)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	杉田 悠斗 (Sugita Yuto)		
研究協力者	田中 壮太 (Tanaka Sota)		
研究協力者	くぬぎ 知弥 (Kunigi Tomoya)		

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