

令和 2 年 5 月 20 日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17K06457

研究課題名（和文）レーザ光の光周波数掃引による高精度かつ高速な三次元形状計測システムの開発

研究課題名（英文）Development of highly accurate and high-speed three dimensional object profiling system by using optical frequency-swept laser light

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） 3,600,000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光距離センサに関して、光周波数掃引幅が大きな面発光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-サンプリング法の確立により、17cmの距離に対して測定精度2.7μmと、5桁の精度を実現した。この光距離センサを三次元物体形状計測に応用し、硬貨の形状および表面刻印の計測に成功した。また、レーザ光を空間的に掃引するガルバノスキャナの過渡応答を考慮して、データ取得とガルバノスキャナの角度変化のタイミングを最適化することにより、測定時間を600秒から22.6秒に短縮した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光距離センサは遠隔計測が可能で、電磁ノイズに影響されないことから、工場などでの工作部品検査などへの応用が期待されている。本研究で開発したFMCW光距離センサは、光の干渉を利用することから高感度である、測定精度が高い、測定範囲が広い、低コストであるなどの特徴を持つため、工場ラインでの部品検査だけでなく、測量、ロボットアームの高速位置決めや自動運転自動車のためのレーザレーダへの適用など応用範囲は広い。本研究成果は、モノづくりの高度化・高信頼化や、自律自動機械の発展に大きく貢献するものである。

研究成果の概要（英文）：High-accuracy and high-speed optical ranging system was developed by utilizing FMCW sensing system using an optical frequency-swept laser source. The measurement accuracy of 2.7 μm at 17cm measurement length was achieved by using a vertical-cavity surface-emitting laser as the frequency-swept laser source and by utilizing the k-sampling technique. The developed system was applied to three-dimensional object profiling, and very fine profiling of the shape and incuse of a coin was successfully realized. Finally, the timing of the data acquisition and angle change of the Galvano scanner was optimized to stabilize the transient property of the Galvano scanner for high-speed profiling, and the measurement time of as fast as 22.6 sec was achieved for fine profiling of a coin, which is about 25 times faster as compared to the measurement time of 600 sec when a DFB laser is used as the frequency-swept laser source.

研究分野：光電子計測工学

キーワード：光干渉計測 FMCW法 距離計測 三次元物体形状計測 光イメージング

様式 C-19, F-19-1, Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

レーザ光を用いた光距離センサは、①遠隔計測が可能であること、②光の干渉を利用することにより高感度測定が可能であること、③強い電磁波環境下でも影響を受けずに測定が可能であること、などの利点を持つ。このことから、大型建造物の形状測定、ロボットや工作機械における距離センサ・位置制御用計測、工作部品やプリント基板部品実装の検査などへの応用が検討されている。これらの応用分野では、1 mm 未満の高い距離測定精度と計測の高速化が要求される。

光距離センサは広く研究されており、代表的な方法は以下である。

【光パルス法】光パルスを測定対象に照射し、反射光の時間遅れから距離を測定する。精度向上のためには短パルス化と受信回路の高速化が不可欠であり、1 mm の精度達成は困難である。

【光コム干渉法】光周波数コムと言われる新しいレーザ光源を用い、干渉を利用して距離を測定する。10 μm 以下の測定精度が得られるが、複雑な光学系の光源が必要で高コストである。

【FMCW 法】光周波数を掃引したレーザ光源を用い、干渉を利用して距離を測定する。100 μm 以下の精度が得られている。通常の半導体レーザで実現でき、低コスト化が可能である。

上記より、コストも考慮すると FMCW 法が有力であるが、精密加工・成形部品の検査では測定精度は 100 μm でも不十分である。また、計測の高速化も実現する必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、FMCW 光距離センサの高速化と高精度化を両立し、工作部品の形状計測・加工精度計測や、工場ラインにおける組立検査における物体形状計測システムとして実用化を目指す。解決すべき課題、解決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。

【高精度化】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

【高速化】物体形状計測の高速化のためには、1点での測定時間の高速化と、レーザ光のスキャン速度の高速化が必要である。そこで、以下の方法により、高速化と高精度測定の両立を目指す。

- ・レーザ光スキャンタイミングの最適化
- ・測定点の多点化

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 1310 nm の面発光レーザ（VCSEL）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 1 kHz である。VCSEL 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。

さて、VCSEL 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の FC1 で分岐した光を参照干渉計に入射し、その干渉信号を用いて距離測定信号を AD 変換し、FFT 解析する。このとき、TTL 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。この TTL

信号で距離測定のための干渉信号をサンプルすることにより、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、物体形状を計測する。

使用した VCSEL のしきい電流値は 1 mA、最大電流値は 15 mA である。そこで、バイアス電流を 8 mA、変調電流は 12 mA_{p-p} とした。このときの光周波数掃引幅は 710 GHz であり、DFB レーザの約 5 倍である。距離分解能は光周波数掃引幅に反比例するため、VCSEL を光源に用いることにより、高い距離測定精度が期待できる。

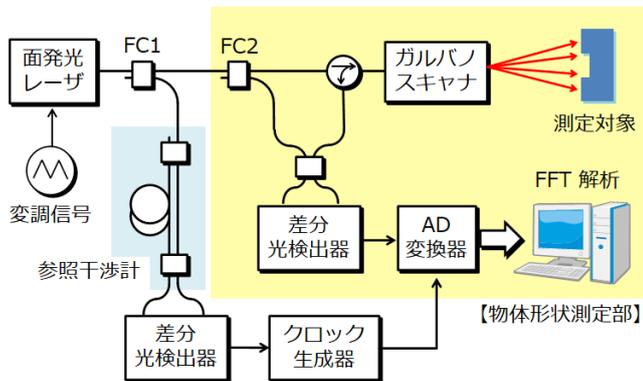


図 1：システム構成図

(2) 距離分解能と距離測定精度

測定対象を鏡とし、測定距離 17 cm のときの距離測定結果を図 2 に示す。同図(a)は測定結果全体であり、同図(b)はピーク付近の拡大図である。光周波数掃引幅は DFB レーザが 136 GHz、VCSEL が 710 GHz であり、対応する距離分解能の理論値は DFB レーザが 2.20 mm、VCSEL が 422 μm である。同図より、両レーザ光源とも鋭い距離信号が得られているが、光周波数掃引幅が大きな VCSEL を光源に用いた方が、距離分解能が高いことがわかる。

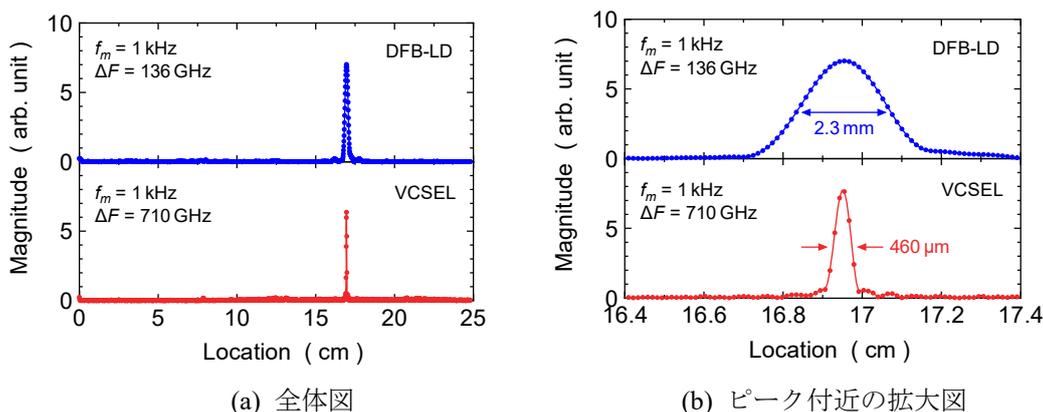


図 2：測定結果（測定距離 17 cm）

次に、17 cm の距離測定を 10000 回繰り返して、測定誤差を評価した。図 3 に測定値のヒストグラムを示す。図の横軸は平均値からのずれ、縦軸は頻度である。VCSEL を用いた方が測定精度は高いことがわかる。これは、距離分解能が高いことに起因している。また、測定のパラツキは正規分布（実線で表示されている）に従っており、VCSEL を用いたときの標準偏差は 2.7 μm と、高い距離測定精度が得られた。17 cm の測定距離に対して 2.7 μm の標準偏差であることから、当初目標の【5桁の測定精度】を実現した。

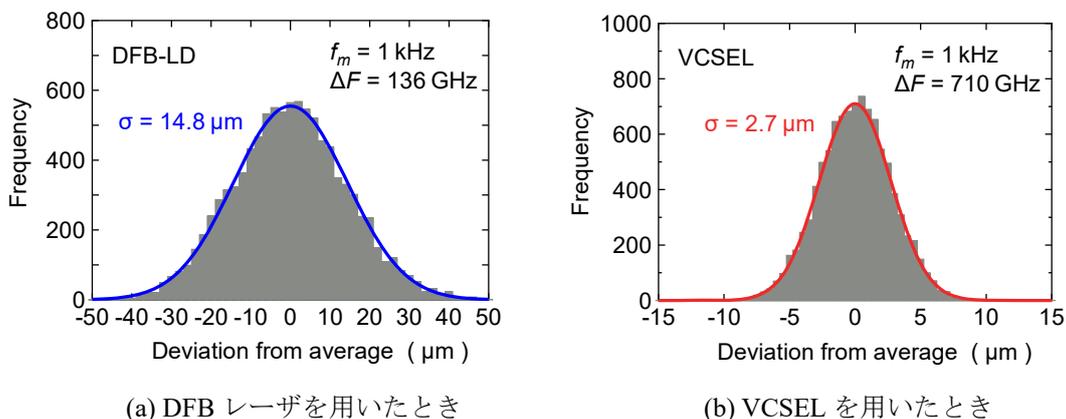
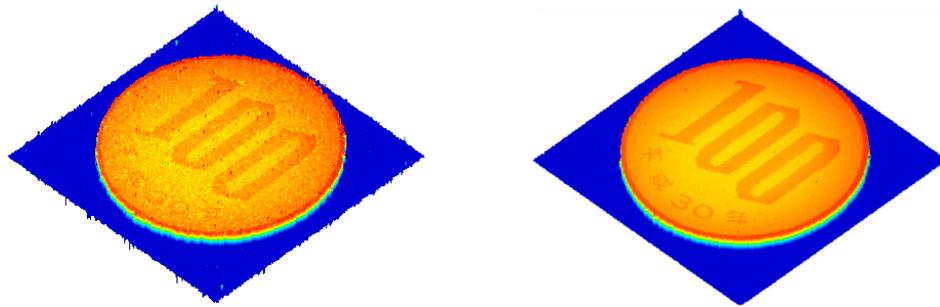


図 3：距離測定のためのヒストグラム

(3) 物体形状計測

上記のシステムにより高精度の光距離センサが実現できたので、物体形状計測へと応用した。図4は、100円硬貨の形状計測結果である。測定点は 201×201 点である。両レーザ光源とも100円硬貨の形状や硬貨表面の刻印が計測されているが、VCSELを用いた方が、きれいな結果が得られている。これは、距離測定精度が高いためである。また、測定時間は約42秒であるが、注入電流の変調周波数が1kHzであるため、1点の測定時間が1msであるからである。なお、測定結果の平均化を行えばDFBレーザを用いた場合でもきれいな形状計測が可能であるが、測定時間は長くなる。具体的には、8回の平均化処理によりVCSELを用いたときと同等の形状計測結果が得られるが、測定時間は8倍の6分程度となる。また、測定時間が長くなるほど振動などの外乱の影響を受けやすくなるため、VCSELを光源に用い、平均化処理をしない測定法が有効であると言える。



(a) DFB レーザを用いたとき

(b) VCSEL を用いたとき

図4：100円硬貨の形状計測結果

(4) 物体形状計測の高速化（レーザ光スキャンタイミングの最適化）

物体形状計測の高速化のためには、VCSELの注入電流変調の周波数を高くすれば良い。本システムでは、変調三角波の上り区間でデータを取得し、ガルバノスキャナの角度を変えた後にFFT解析を行っている。ガルバノスキャナの角度は、変調三角波の折り返し点付近で変化させており、変調三角波の下り区間でガルバノスキャナの過渡応答を安定化させている。ところが、ガルバノスキャナの過渡応答時間は $360 \mu\text{s}$ 程度であるため、変調周波数を高くすると、上記の方法ではガルバノスキャナの過渡応答安定化のための十分な時間がなく、物体形状結果は大きく劣化する。図5に、変調周波数1.8kHzのときの100円硬貨の形状計測結果を示す。

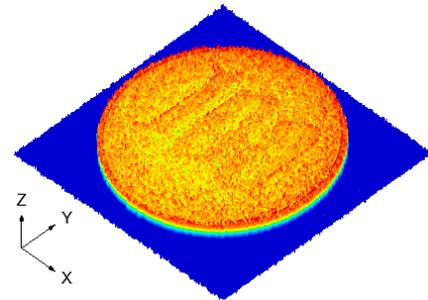


図5：タイミング最適化前の計測結果
(変調周波数1.8kHz)

「100」の刻印は何となく確認できるものの元号は確認できず、荒い計測結果となっている。

そこで、図6に示すように、データ取得を変調三角波の折り返し点より早く終了してガルバノスキャナの角度変化のタイミングを早くすることで、変調周波数が高い場合でもガルバノスキャナの過渡応答を安定化して物体形状計測を行った。ただし、このタイミングでは実質的な光周波数掃引幅は狭くなり、測定精度は劣化することが予想される。

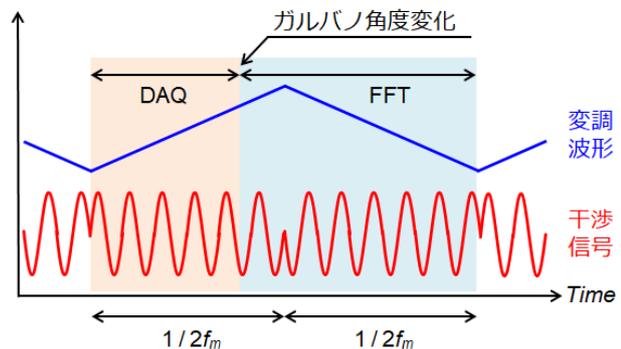


図6：ガルバノスキャナのタイミング

図7に、タイミング最適化後の100円硬貨の形状計測結果を示す。変調周波数は1.8kHzである。図5の測定ではデータ点数は1450点であるが、図7のデータ点数は600点であるため、実効的な光周波数掃引幅は全体の40%程度と想定される。同図(a)より、

「100」や元号の刻印がはっきり確認され、図5と比べると計測品質が大きく向上していることがわかる。しかしながら、スパイク状の雑音も認められる。スパイク状の雑音はメディアンフィルタにより効果的に除去される。メディアンフィルタ処理後の形状計測結果は同図(b)であり、像全体をボカすことなくスパイク状の雑音のみが除去され、計測品質がさらに向上している。この方法により、201×201点の計測時間として、本研究開始前の600秒から22.6秒に短縮した。当初目標の10秒には届かなかったが、同等の計測時間を実現した。

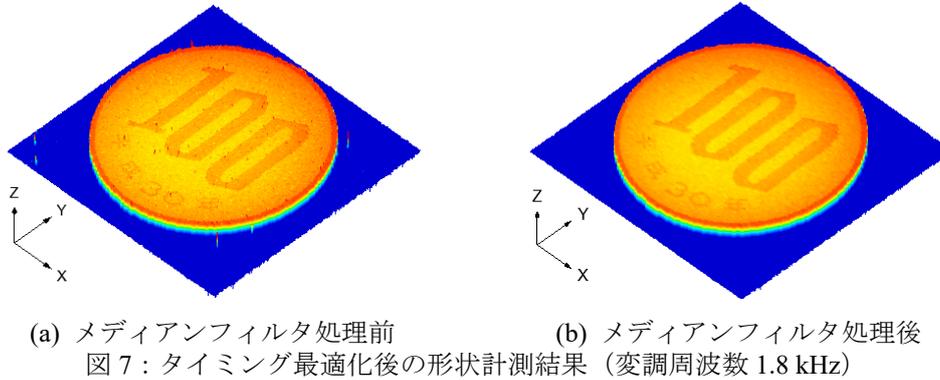


図7：タイミング最適化後の形状計測結果（変調周波数 1.8 kHz）

以上の結果より、本研究で開発したシステムの測定時間はガルバノスキャナの過渡応答時間で決定されるため、これ以上の変調周波数の高速化は不可能であった。

(5) 測定点の多点化

測定の高速度の別方法として、図8に示す多点測定システムを開発した。このシステムでは、レーザー光のビーム径を大きくし、測定対象に広く照射する。干渉信号は光検出器アレイで受光することにより、距離の空間分布を一度に測定する。なお、図8には示していないが、k-サンプリング法を利用している。また、光検出器アレイは16素子タイプであり、高さ200 μm 、幅80 μm の素子が100 μm 間隔で並んでおり、全体の受光幅は1.58 mmである。また、ビーム径は3 mm程度である。

図9に、0.5 mmの段差がある金属板に対する測定結果を示す。図上部の青色の信号は段差上部に対する距離計測結果、図下部の赤色の信号は段差下部に対する距離計測結果であり、図中央部の緑色の信号は段差付近に対する距離計測結果である。青色の信号と赤色の信号の間には0.5 mmの距離差が確認できるが、この距離差は金属板の段差に相当しており、図8の多点化システムで、表面形状が一度に計測できたと言える。しかし、緑色の信号には段差の上部と下部の信号が現れており、クロストークが生じていることがわかる。光検出器アレイを使うということはカメラを使っていることと同じであるから、カメラと同様の光学系を構築することにより、クロストークは抑えられる可能性がある。

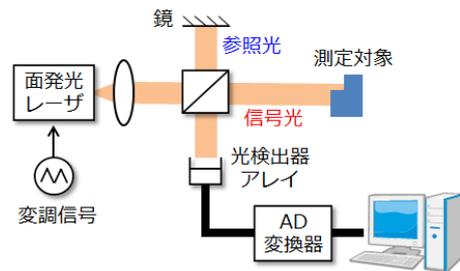


図8：多点測定システム

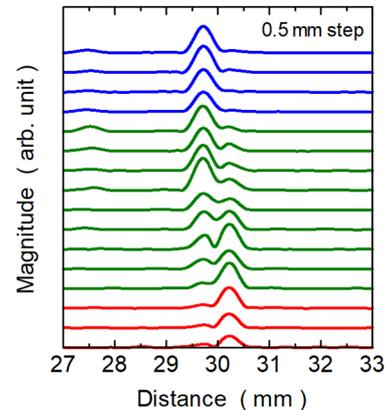


図9：多点測定システムの測定結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 4件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Ula R K, Yusuke N, Iiyama K	4. 巻 1191
2. 論文標題 High speed measurement for object profiling using FMCW optical sensing system	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Physics: Conference Series	6. 最初と最後の頁 012005 ~ 012005
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1742-6596/1191/1/012005	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 Ula Rini Khamimatul, Noguchi Yusuke, Iiyama Koichi	4. 巻 37
2. 論文標題 Three-Dimensional Object Profiling Using Highly Accurate FMCW Optical Ranging System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Lightwave Technology	6. 最初と最後の頁 3826 ~ 3833
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JLT.2019.2921353	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
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
1. 著者名 Mohammed Napiyah Zul Atfyi Fauzan, Hishiki Takuya, Iiyama Koichi	4. 巻 92
2. 論文標題 Wavelength dependence of silicon avalanche photodiode fabricated by CMOS process	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Optics & Laser Technology	6. 最初と最後の頁 193 ~ 197
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.optlastec.2017.01.019	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 -

1. 著者名 Iiyama Koichi, Maruyama Takeo, Gyobu Ryoichi, Hishiki Takuya, Shimotori Toshiyuki	4. 巻 E101.C
2. 論文標題 High Speed and High Responsivity Avalanche Photodiode Fabricated by Standard CMOS Process in Blue Wavelength Region	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 574 ~ 580
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.574	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 -

1. 著者名 Zul Atfyi Fauzan Mohammed Napiah, Koichi Iiyama	4. 巻 13
2. 論文標題 A monolithically integrated photoreceiver with avalanche photodiode in CMOS technology	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 2148-2152
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 該当する

〔学会発表〕 計11件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 Koichi Iiyama, Misaki Isoda, Atsushi Nakamoto
2. 発表標題 Linearly optical frequency chirped DFB laser with pre-distorted modulation waveform for High resolution FMCW ranging system
3. 学会等名 Pacific Rim Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO-PR) 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Iiyama
2. 発表標題 Frequency-modulated continuous-wave (FMCW) optical sensing system for 3D profiling, LiDAR and fiber-optic sensing system
3. 学会等名 4th International Symposium on Frontier Applied Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Koichi Iiyama, Tatsuya Washizuka, Kohei Yamaguchi
2. 発表標題 Three-dimensional Object Profiling by FMCW Optical Ranging System Using a VCSEL
3. 学会等名 12th Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Koichi Iiyama, Kohei Yamaguchi
2. 発表標題 Two-dimensional object profiling by FMCW optical sensing system using one-dimensional photodiode array
3. 学会等名 International Symposium on Imaging, Sensing, and Optical Memory 2017 (ISOM '17) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 山口航平, 飯山宏一
2. 発表標題 光検出器アレイを用いたFMCW方式物体形状計測に関する研究
3. 学会等名 電子情報通信学会2017年ソサイエティ大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 飯山宏一
2. 発表標題 高分解能・高精度FMCW光距離センサの開発とその応用
3. 学会等名 電子情報通信学会集積光デバイスと応用技術研究会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 R. K Ula, Y. Noguchi, K. Iiyama
2. 発表標題 High speed measurement in object profiling using FMCW optical sensing system
3. 学会等名 4th International Symposium on Frontier Applied Physics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 池田貴洋, 北村健人, 飯山宏一
2. 発表標題 レーザレーダのための非干渉型FMCW光距離センサの開発
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中村優哉, 佐藤衛, 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光距離センサの開発
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大岡泰之, 飯山宏一
2. 発表標題 FMCW光距離センサシステムを用いたレンズの形状計測
3. 学会等名 2019年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 飯山宏一, 中村優哉, 佐藤衛
2. 発表標題 外部共振器レーザを用いた中距離FMCW光距離センサの開発
3. 学会等名 電子情報通信学会2019年ソサイエティ大会
4. 発表年 2019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
--	---------------------------	-----------------------	----