

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：13801

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H02194

研究課題名(和文) TOF距離撮像素子のためのジッタ低減技術の確立と極限的距離分解能の追究

研究課題名(英文) Jitter reduction techniques for high-range precision time-of-flight range imagers

研究代表者

安富 啓太(Keita, Yasutomi)

静岡大学・電子工学研究所・准教授

研究者番号：50621661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、Time-of-flight(TOF)による距離撮像素子の極限的距離精度の達成のために、距離精度を律速する列ドライバジッタ低減手法の提案・原理実証を実施した。

1つ目のDRPSでは、追加光源を列並列距離精度として、52 μm (1フレーム)、27 μm (10フレーム平均)を実現した。2つ目のCI-RPSは、電荷注入疑似光入力を利用した電子式で、追加の光源が不要で簡素な光学系で実現できる。試作したチップの評価結果より、距離精度として、55 μm (1フレーム)、38 μm (10フレーム平均)を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光の飛行時間(TOF: Time-of-Flight)を利用した距離イメージングは、リアルタイム処理や装置の小型化、安価なシステムの構築などから、ジェスチャや物体の「認識」のために開発されている。これを「計測」のための応用まで広げるためには、TOF距離撮像素子の距離精度の改善が欠かせない。本研究では、50 μm を超える距離精度を実現するためのTOF距離撮像素子のジッタ低減手法を提供するものである。

研究成果の概要(英文)：In this study, for achieving the extremely high range precision using time-of-flight (TOF) range imagers, we have proposed and demonstrated jitter reduction techniques to reduce column-driver jitters, which is the dominant factor in range precision. The first technique, DRPS, uses an additional light source to generate a column-parallel reference. It has demonstrated a range precision of 52 μm (single frame) and 27 μm (10 frames average). The second technique, CI-RPS, uses pseudo photocurrent generated by charge injection. CI-RPS does not require additional light sources and any optical components. The prototype chip has demonstrated a range precision of 55 μm (single frame) and 38 μm (10 frames average).

研究分野：撮像素子

キーワード：Time-of-Flight イメージセンサ 3次元計測

1. 研究開始当初の背景

光の飛行時間 (TOF: Time-of-Flight)を利用した距離イメージングは、リアルタイム処理や装置の小型化、安価なシステムの構築に対する優位性から、ジェスチャ認識や物体認識などを目的として、様々な研究開発が進められている。一方で、TOF 距離撮像素子の距離精度は、他の三角測量に基づいた3次元計測手法よりも乏しく、数ミリメートルに留まっていた。別の見方をすれば、その乏しい距離分解能により、TOF 距離撮像素子は、「認識」への応用展開しか期待されていなかった。TOF 距離撮像は、光源とカメラの視差(ベースライン)が不要であり、3次元スキャナなどの「計測」を目的とした応用においても、三角測量に基づく3次元計測とは異なる価値を見出すことができる。本研究者は、このような3次元形状を正確に測る3次元スキャナなどへTOF 距離撮像素子を展開するために、独自の電荷変調方式、高速な電荷変調素子、光源ジッタの低減手法を提案し、100 マイクロメートルを超える距離精度が得られることを示してきた。しかしながら、さらなる距離精度の向上にはドライバジッタ低減が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、さらなる距離精度向上のために、TOF 距離撮像素子のジッタ低減手法の確立を目指す。TOF 距離イメージングにおけるジッタは、光源ジッタとドライバジッタに分類できる。これまで本研究者が提案してきた参照光サンプリング法では、光源ジッタは低減できるもののドライバジッタには効果がなかった。そこで、本研究ではドライバジッタの低減手法を検討し、TOF 距離イメージングで極めて高い距離精度が実現できるかどうかを明らかにする。

3. 研究の方法

本研究では、Time-of-Flight(TOF)による距離撮像素子の極限的な距離分解能の達成のために、ジッタ低減手法について検討した。これまでの取り組みにより、列ドライバに起因するジッタが支配的となっていることがわかっており、これを解決するための2つの手法を考案し、ジッタ低減の効果について検証を進めた。

(1) 2重参照光サンプリング法 (Dual Reference Plane Sampling: DRPS)

一つ目に考案した手法は、2重参照光サンプリング(DRPS)である。図1に2重参照光サンプリングの概念図を示す。これまでの参照光サンプリング(RPS)と同様に、光源(Laser 1)からの光を分岐させ、既知の距離にある固定参照面に照射する。この固定参照面からの反射光を画素アレイの一部(参照画素)で検出することで、光源に起因するジッタ成分を抽出する。これを主画素との出力との差分をとることで、光源ジッタが低減できる。DRPSでは、このRPSの光学系に加えて、新たな光源(Laser 2)を追加している。このLaser 2の光を列並列に参照面に投影することで、列ドライバのジッタ($\delta_d(i)$)を抽出することができる。ドライバジッタは列毎に同じ成分を持つため、列毎の差分処理によって低減できる。これまで試作したチップを用いて原理検証器を製作し、列ドライバジッタ低減効果の検証を実施した。

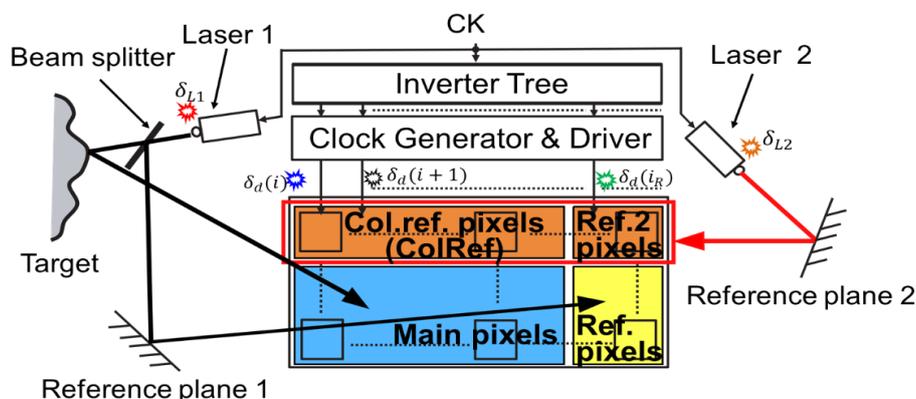


図1 2重参照光サンプリング法

(2) 電荷注入型参照光サンプリング法 (CI-RPS: Charge-injection Reference Plane Sampling)

二つ目の手法は、電荷注入による疑似光を利用した電子式のジッタ低減手法(CI-RPS)である。図2に提案するCI-RPS方式の概念図を示す。CI-RPSでは列並列の参照光の代替として、電荷注入による疑似光入力を利用する。この電荷注入を入力する画素(CI画素)が、列並列に並べられており、主画素・参照画素とゲート信号を共有している。全CI画素で共有しているCIパルス線が低レベルになることで、電荷注入がなされ疑似光が発生する。これを主画素などと同様に

TOF 計算を行うことで、列ドライバの成分を抽出することができる。DRPS と異なり、追加の光源や光学系を要しないため、RPS と同等の光学系のみで光源ジッタ・ドライバジッタの両方を低減できる。また、CI パルスをきわめて短いパルス幅とすることで、インパルス駆動方式と類似した距離算出方法で高い時間精度の TOF 距離算出が可能となる。本研究では、提案する CI-RPS 機能を組み込んだセンサを試作し、距離精度の改善効果を検証した。

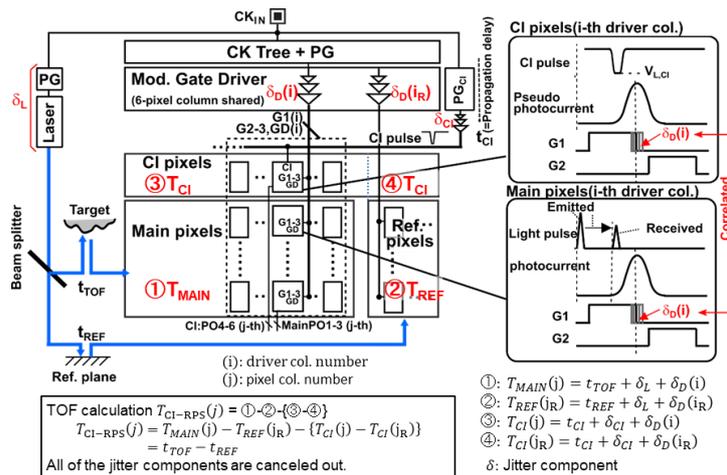


図 2 電荷注入・参照光サンプリング法

4. 研究成果

(1) DRPS の原理検証器とその効果の確認

図 3 に本研究で構築した原理検証器を示す。Laser 1 からの光（青色矢印）はラインジェネレータレンズによってライン光となり、ビームスプリッタにより対象物・固定参照面に分岐している。これらは、主画素・参照画素（Ref. Pixel）によって検出される。一方で、Laser 2 からの光（赤色矢印）はラインジェネレータレンズ、ミラーを介して拡散版に照射されており、この拡散版が固定参照面 2 に相当する。なお、Laser 1 と 2 は同一の波長（473 nm）、短パルス（80 ps 程度）の光源を用いて実験を行った。

本原理検証器に用いた TOF センサは、本研究者が以前開発したセンサであり、0.11 μ m CMOS イメージセンサプロセスで試作し、有効画素 192 x 8 でラテラル電界制御変調器（LEFM）に基づく 3 タップロックイン画素が集積化されている。光源に短パルスレーザを用いて、光電流応答より距離算出を行うインパルス駆動型の変調方式により距離計測を行う。

図 4 は距離計測実験の結果であり、(a) は距離精度の列依存性（RPS なし、RPS のみ、DRPS あり）、(b) は DRPS を適用した時のフレーム平均枚数と距離精度の関係を示している。図 4(a) より、RPS によって距離精度の改善は見られるが、列によって距離精度が極端に悪い列が含まれていることがわかる。これは列ドライバに依存するジッタによって劣化が生じていることを示している。一方で、DRPS を適用することで、列ドライバジッタが低減されたため、距離精度の列依存性が改善できることが確認できた。DRPS の適用により、1 フレームで 52 μ m、10 フレーム平均により 27 μ m と高い距離精度を実現した。

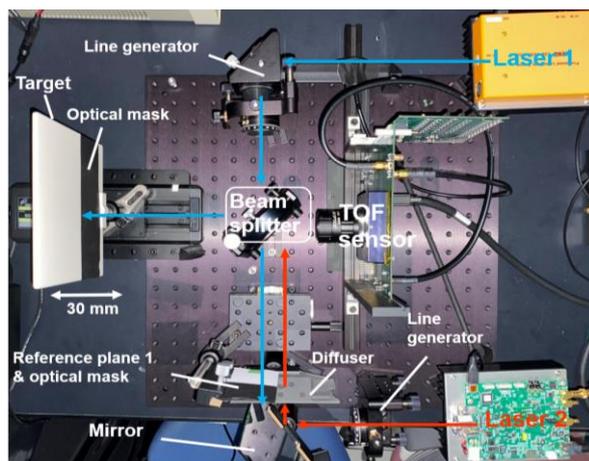


図 3 構築した DRPS の原理検証器

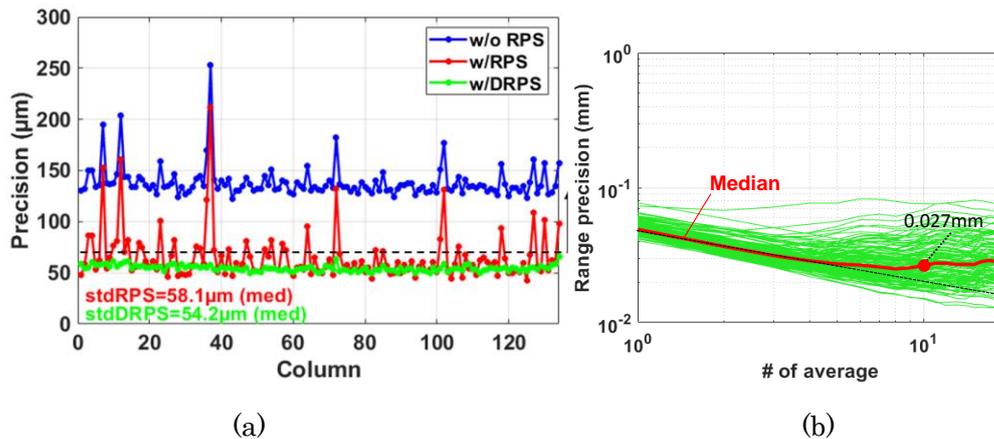


図 4 (a)距離精度の列ばらつき (RPS, DRPS 有無での違い), (b)DRPS を適用したときの平均化による改善効果

(2) CI-RPS を実現する TOF 距離イメージセンサの試作と評価結果

図 5 は試作したチップ写真である。画素数は主画素 120×16 、参照画素 36×16 であり、画素サイズは $33.6 \times 33.6 \mu\text{m}^2$ である。それぞれの画素には、30 個の 3 タップ LEFM が集積化されている。試作チップは、 $0.11 \mu\text{m}$ CMOS イメージセンサプロセスを用いて製造した。CI 画素は主画素と同じ 3 タップ LEFM 構造を用いている。ここで、ゲート間に形成されているドレイン (DR) 端子の一つを電荷注入用の CI 端子に割り当てている。ゲートによって振り分け可能な疑似的な光電流を生成するには、CI 端子から中央のフォトダイオード部に電荷注入を行う必要がある。この電荷注入経路を形成するために、n1 層を追加して電位障壁を低く設定している。荷注入量、すなわち CI 画素の信号量は、CI パルスのローレベルと電位障壁の高さに強く依存する。変調器毎の電位障壁のばらつきにより、CI 画素の感度が大きくばらつくこととなる。また、CI パルスは全 CI 画素共通であり、この信号線の有限なインピーダンスの影響でも、CI 画素毎の CI 感度が変動する要因となる。これを解消するために、感度補正機能を CI 画素に組み込んでいる。CI 画素には 60 個の変調器を集積化されており、これらの信号出力の加算数を制御するスイッチを画素毎に制御するため、画素毎にレジスタを組み込んでいる。このレジスタの値を画素毎に調整することで、感度の均一化が実現できる。図 5 右のグラフは感度補正前後の CI 画素の出力を示しており、効果的に感度の均一化が実現できていることがわかる。

図 6 に距離測定の結果を示す。ここでは、RPS の有無、CI-RPS の適用後の 3 つのパターンを示している。電荷比から距離を算出する際に、5 次近似による線形化を行っている。また、距離精度は 1,000 点からの標準偏差としている (10 フレーム平均時は 10,000 点のデータを利用)。結果として、測距可能範囲 23 mm、非線形誤差は 6.3%FS、CI-RPS により 1 フレームでの距離精度は $55 \mu\text{m}$ であった。10 フレーム平均を行うと、距離精度は $38 \mu\text{m}$ まで向上した。CI-RPS を適用することで、距離精度の列ばらつきが改善されていることも確認できる。図 7 は 3 次元データの取得結果である。1 軸ステージを用いて 0.2 mm ステップでスキャンして取得した。良好な 3 次元データが取得できている。

これらの成果により、提案する手法は TOF 距離撮像素子のジッタ要因となる光源ジッタ、ドライバジッタの両方に有効であることが示された。また、ジッタ低減により、フレーム平均による距離改善ができることが明らかとなった。現時点では、素子の出力の非線形性によって、ジッタ低減効果が制限されているため、この点の改善することによってさらなる高い距離精度が期待できる。

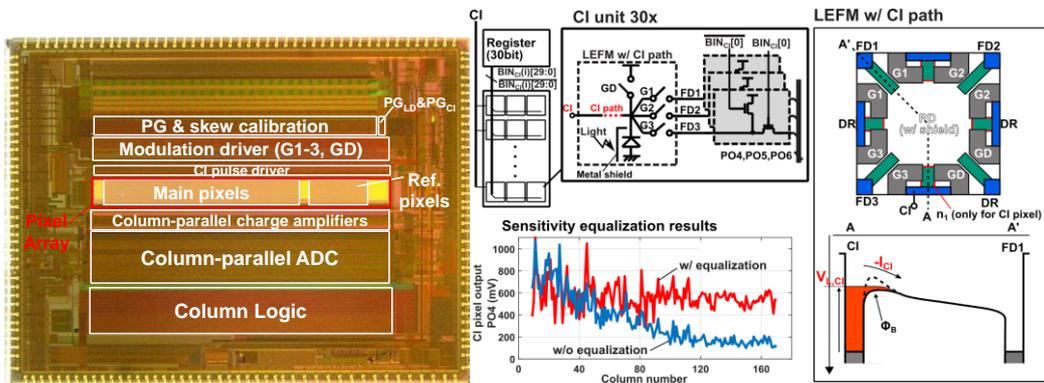


図 5 CI-RPS 機能を有する TOF イメージセンサ(左), CI 画素の回路・デバイス構造

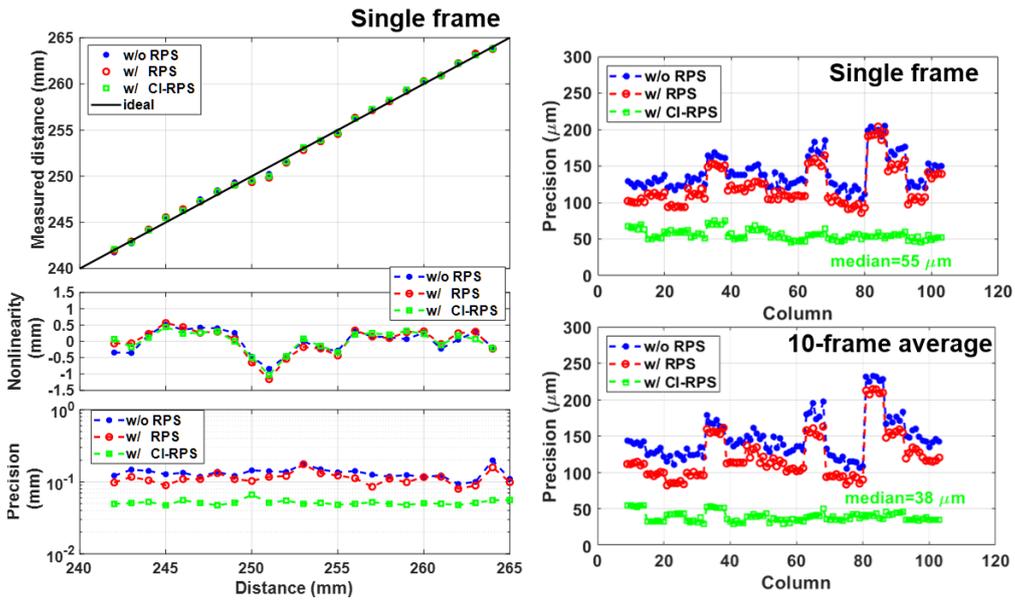


図 6 距離測定の評価結果

左：測定距離と非線形誤差，1 フレームでの距離精度．右：カラム毎の距離精度（上：1 フレーム，10 フレーム平均後）

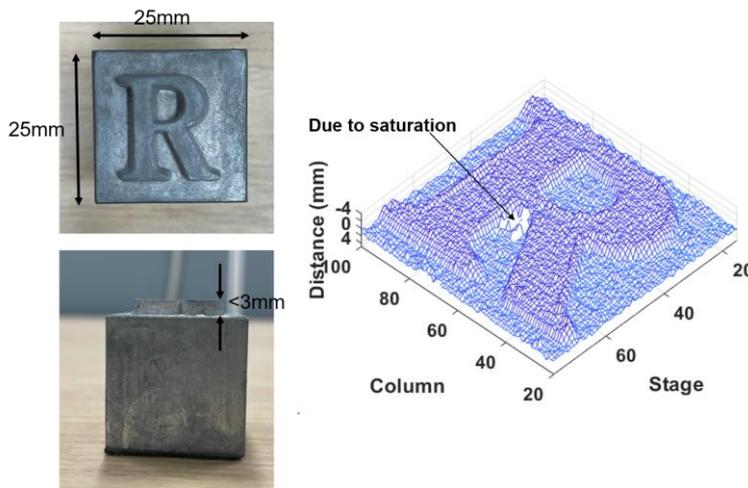


図 7 3D データの取得結果(@IEEE)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 安富啓太	4. 巻 5
2. 論文標題 計測分野へ向けた高精度な距離・形状計測を実現するTOF距離イメージセンサ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 OPTRONICS	6. 最初と最後の頁 pp.140-144
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 無
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 Yasutomi Keita, Okura Yushi, Kagawa Keiichiro, Kawahito Shoji	4. 巻 54
2. 論文標題 A Sub-100 um-Range-Resolution Time-of-Flight Range Image Sensor With Three-Tap Lock-In Pixels, Non-Overlapping Gate Clock, and Reference Plane Sampling	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Journal of Solid-State Circuits	6. 最初と最後の頁 2291 ~ 2303
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/JSSC.2019.2916310	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 Furuhashi Tatsuki, Yasutomi Keita, Hatada Ryosuke, Tamaya Mitsuru, Kagawa Keiichiro, Kawahito Shoji	4. 巻 29
2. 論文標題 Range-precision improvement of a time-of-flight range sensor using dual reference plane sampling	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 38324 ~ 38324
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1364/OE.441219	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 YASUTOMI Keita, KAWAHITO Shoji	4. 巻 -
2. 論文標題 Lock-in Pixel Based Time-of-Flight Range Imagers: An Overview	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/transele.2021CDP0004	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 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 3件）

1. 発表者名 安富啓太
2. 発表標題 高精度な距離・形状測定を実現するTOF距離イメージセンサ
3. 学会等名 JST新技術説明会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 安富啓太
2. 発表標題 高速ロックインピクセル技術による時間分解イメージング～高距離分解能Time-of-Flight距離イメージングなどの紹介～
3. 学会等名 東京都医工連携HUB機構 "光の先端都市「浜松」発のシーズ"
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 河西穂高, 安富啓太, 高田直樹, 谷畑篤史, 葛西大樹, 柴口 拓, 三浦規之, 川人祥二
2. 発表標題 Time-of-Flight距離イメージセンサのための裏面照射型全空乏SOIロックイン画素の特性評価
3. 学会等名 映像情報メディア学会創立70周年記念大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Yasutomi, T. Furuhashi, K. Sagawa, T. Takasawa, K. Kagawa, and S. Kawahito
2. 発表標題 A 38um Range Precision Time-of-Flight CMOS Range Line Imager with Gating Driver Jitter Reduction Using Charge-Injection Pseudo Photocurrent Reference
3. 学会等名 IEEE International Solid- State Circuits Conference (ISSCC) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 K. Yasutomi, S. Kawahito
2. 発表標題 Recent Progress of Time-of-Flight Range Imagers
3. 学会等名 International Display Workshop 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 K. Yasutomi, M. Inoue, S. Daikoku, M. Kamel, S. Kawahito
2. 発表標題 A 4-tap Lock-in Pixel Time-of-Flight Range Imager with Substrate Biasing and Double Delta Correlated Multiple Sampling
3. 学会等名 2021 INTERNATIONAL IMAGE SENSOR WORKSHOP (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安富 啓太, 川人 祥二
2. 発表標題 ジッタ低減によるサブ100um精度を有するTOF距離センサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 古橋樹, 安富啓太, 畑田峻介, 香川景一郎, 川人祥二
2. 発表標題 高距離分解能TOFセンサのための二重参照光サンプリング法を用いたジッタ低減手法の検討
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安富啓太, 古橋樹, 佐川航輝, 高澤大志, 香川景一郎, 川人祥二
2. 発表標題 電荷注入による疑似列参照光を用いた列ドライバジッタ低減機能を有する高距離精度TOFセンサ
3. 学会等名 映像情報メディア学会情報センシング研究会
4. 発表年 2022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
研究分担者	飯久保 正弘 (likubo Masahiro) (80302157)	東北大学・歯学研究科・教授 (11301)	

	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	川人 祥二 (Kawahito Shoji) (40204763)	静岡大学・電子工学研究所・教授 (13801)	

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
---------	---------