

令和元年6月24日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H05524

研究課題名(和文) マイクロメータ分解能を有する高精度光飛行時間型撮像素子に関する研究

研究課題名(英文) Development of High-range-resolution Time-of-Flight range Image Sensors

研究代表者

安富 啓太 (Yasutomi, Keita)

静岡大学・電子工学研究所・助教

研究者番号：50621661

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、独自のTOF距離計測方式と高速な電荷変調素子により、極めて高い距離精度(分解能)を有する距離撮像素子の開発を目的としている。高速な電荷変調と高い光の利用効率を実現する3タップ出力のラテラル電界制御変調素子と、補正時間を大幅に短縮できる全電子式スキュー補正回路を組み込んだTOF距離撮像素子を開発した。試作した撮像素子の評価の結果、距離分解能180 μm が得られたが、光源トリガ信号のタイミングゆらぎ(ジッタ)が大きな影響をおよぼすことを明らかにした。これを低減するための手法として参照光サンプリング法を考案した。これを適用した結果、距離分解能64 μm 、時間分解能にして430fsを達成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来のTOF距離撮像では、数ミリメートルの距離分解能(時間にして数10ピコ秒)しか得られておらず、その用途は「認識」用途に限られる。本研究により、100マイクロメートル以下の距離計測が可能であることが実証され、3次元スキャナなどの計測分野にも応用できる可能性が示された。また、イメージセンサ内のジッタを低減することにより、さらなる高距離分解能化も期待でき、TOF距離撮像素子の新たな応用展開が期待できる。また、要素技術として高速なロックイン検出が可能な複数出力の電荷変調素子や、スキューを短時間で補正できる全電子式スキュー補正回路も実証しており、他の時間分解撮像にも有用な技術を確立した。

研究成果の概要(英文)：A time-of-flight range CMOS image sensor with sub-100- μm range resolution has been developed. By using a lateral electric charge modulation, a three-tap lock-in pixel with photocurrent response of several hundred picoseconds have been developed. To suppress the low-frequency jitter in the light trigger that limits the range resolution, we have developed a novel technique using reference plane sampling (RPS) with a reference pixel array embedded in the same focal plane of the main pixel array. This technique improves the range resolution significantly. To reduce the clock skew of the gating clocks, a column-parallel digital delay-locked loop (DLL) with a dual clock tree is implemented with a short calibration time of approximately 42 μs .

The prototype range imager with 192 x 4 effective pixels is implemented in a 0.11- μm CMOS image sensor technology. Using the RPS, a range resolution of 64 μm has been achieved, corresponding to a 430-fs time resolution with a 25-mm range.

研究分野：撮像素子

キーワード：Time-of-Flight 3次元計測 CMOSイメージセンサ 距離計測 時間分解撮像

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

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分解能 (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を提案し、サブミリメートルの高い距離分解能を得ることができた。しかしながら、3次元スキャナなどへ応用するためには、さらなる距離分解能の向上および機能的な改善が必要であった。

2. 研究の目的

本研究では、独自の TOF 距離計測方式と高速な電荷変調素子に基づいて、極めて高い距離分解能を有する TOF 距離イメージセンサを開発し、3次元スキャナなどの TOF 距離撮像の新たな応用展開を目指すものである。これを実現するために、ラテラル電界制御変調(Lateral Electric Field charge Modulation: LEFM)による複数タップの高速電荷変調素子の開発し、また、提案手法に必須であるクロックスキューの補正時間を大幅に短縮できる全電子式スキュー補正回路に関する研究を行う。さらに、距離分解能が向上するにつれて顕在化するジッタを低減するための手法として、参照光サンプリング法を提案する。これを開発した距離撮像素子に適用し、100 マイクロメートルを超える距離分解能が得られることを実証するとともに、さらなる高距離分解能化への課題を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究で進めているインパルス駆動による TOF 距離計測(図1)では、ロックイン検出を行う電荷変調素子の高速な光電流応答が重要となる。これまで利用していた排出制御型変調(Draining Only Modulation: DOM)素子では、高速な変調は行えるが、1度に単一の位相の信号取得のみしか行えず、3回にわたった信号蓄積が必要であった。本研究では、LEFM に基づいた3タップ電荷変調素子を開発し、光の利用効率を3倍に向上させ、光強度変動に依存しない距離計測の実現を図った。

インパルス駆動による TOF 計測では、光電流応答は、300 ピコ秒以下であり、全てのゲート信号は、この範囲内にエッジがある必要がある。ゲートクロックは列単位でドライブされ画素アレイに供給されるが、このときの画素間でのタイミングのずれ、すなわちクロックスキューが問題となる。スキューが十分に低くなければ、距離計測が行えない画素や極端に計測範囲の低い画素が生じる。従来は、列ドライバに遅延調整機能を設けてスキューを補正していたが、光の応答からスキューの補正值を求めていたために、補正のために半日以上の時間がかかっていた。これをより実用的な時間に留めるために、全電子式のスキュー補正回路の開発を試みた。

通常の TOF 距離撮像素子においては、光ショットノイズにより、距離分解能が決まる。しかしながら、距離分解能が 150 μm を超えるあたりから、クロックのタイミングゆらぎ (ジッタ) が制限により距離分解能が律速されることがわかってきた。これを解決するために、参照光サンプリング法を考案し、光源トリガ信号に重畳するジッタを低減させ、100 μm 以下の距離分解能の実現を試みた。

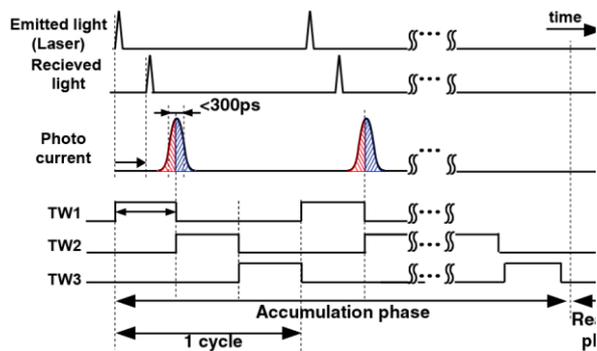


図1 インパルス駆動と光電流応答を利用した TOF 距離計測方式

4. 研究成果

(1) 高速電荷変調が可能な3タップラテラル電界変調素子の開発

図2に開発した3タップラテラル電界制御変調(LEFM)素子と電位分布のシミュレーション結果を示す。電荷蓄積部(FD1-3)と電荷排出部(Drain)に向けて、チャンネルを挟むようにG1-3、GDゲートを配置している。これらの印加電圧を変化させることで、チャンネルの表面のホール濃度が変化し、結果的にチャンネルの電位が変化し、電荷変調が行われる。通常の転送ゲートと異なり、ゲート直下を電荷が通過しないため、界面トラップの影響を受けず、また連続的な電位分布を形成できることにより、高速な電荷変調が可能となる。図3は、電荷変調の応答を示すシミュレーション結果である。G1をオン状態とし、80 psのパルスを与えて、各端子の電流を観測している。半値全幅としておよそ120psの光電流応答が得られている。また、転送先のFD部以外への漏れは小さく、ゲートからの漏れを示すDrain2への漏れ込みも6%に留まっている。

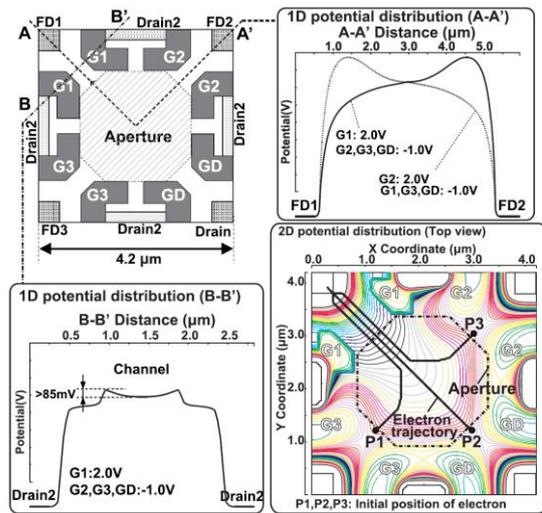


図2 ラテラル電界制御変調素子(LEFM)

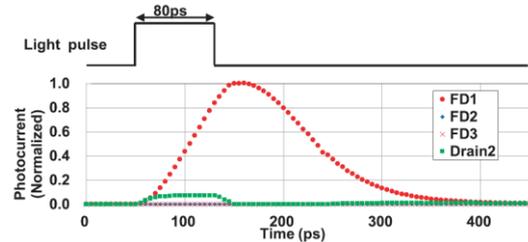


図3 光電流応答のシミュレーション結果

(2) 全電子式スキュー補正回路の開発

ゲートクロックは列並列ドライバ回路により供給されるが、全画素が同時に駆動されるため、電源配線の電圧降下やドライバのばらつきなどにより、ナノ秒オーダのスキューは避けられない。前述したように、光応答によるスキュー計測および補正は多数の計測が必要であり、補正遅延値の設定までに長い時間を要する。これを解決するために、全電子式スキュー補正回路を開発した。図4に提案する補正回路を示す。列ドライバ回路にデジタル遅延同期回路を組み込み、全列並列にスキュー検出および補正を行うことで、大幅な補正時間の短縮が可能となる。遅延同期回路の参照クロックが必要であるが、この参照クロックは分離したクロックツリーにより分配される。分離したクロックツリーは、画素アレイに比べて小さな寄生容量であるため、この部分によるスキューは十分に小さく抑えることができる。実際に TOF 距離イメージセンサに組み込んだ結果、補正前に $115 \text{ ps}_{\text{rms}}$ だったスキューが $10 \text{ ps}_{\text{rms}}$ まで低減できていることが確認できた(図5)。補正にかかる時間はわずか42マイクロ秒であり、これまでの手法に比べて大幅な時間短縮を実現できている。

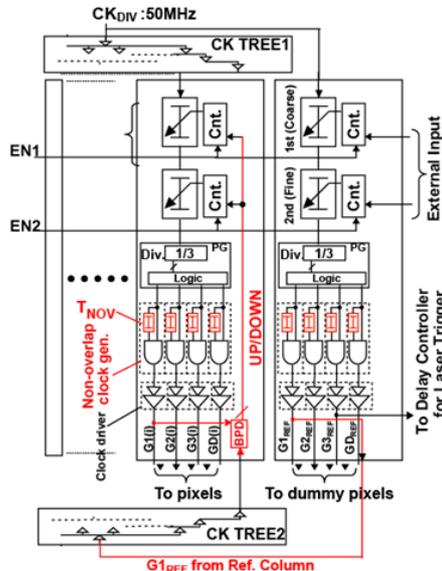


図4 全電子式スキュー補正回路の構成

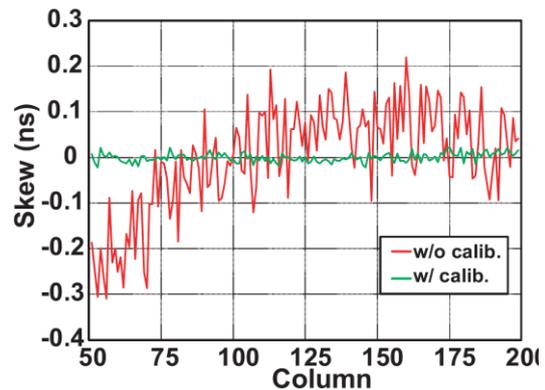


図5 補正前後のスキューの計測値

(3) 試作したイメージセンサと参照光サンプリングによる高距離分解能化

図6に前述した3タップLEFM素子と全電子式スキュー補正回路を組み込んだTOF距離撮像素子を示す。有効画素数は、 192×4 画素であり、画素サイズは $22.4 \mu\text{m} \times 67.2 \mu\text{m}$ である。本デバイスは、 $0.11 \mu\text{m}$ CMOSイメージセンサプロセスで製造された。チップサイズは、 $9.3 \text{mm} \times 7.3 \text{mm}$ である。

距離分解能が高まるにつれて、光ショットノイズではなく、光源トリガ信号やゲートクロック自体のタイミングゆらぎ、すなわちジッタが顕在化する。ホワイトノイズのようにランダムな揺らぎであれば、平均化による低減が可能だが、実際にはドリフトなど $1/f$ ゆらぎを持つジッタ成分が支配的となる。本研究では、まずジッタとして問題となる光源トリガ信号に重畳するジッタを低減するために、図7に示す参照光サンプリング法を考案した。本手法は間接 TOF の特長である多画素構成を利用したものである。照射光を2つに分離し、一方を撮像対象で通常の TOF 計測、他方は固定参照面に照射することで、参照面に対応する画素(参照画素)はゆらぎ成分のみを検出することとなる。したがって、これらの距離演算値の差分をとることで、相関のある光源トリガ信号に起因するジッタを低減できる。この手法の適用によって、距離レンジ 25mm において距離分解能 $64 \mu\text{m}$ を達成した。これは、時間分解能にして 430 フェムト秒に相当するものである。通常の TOF 距離撮像素子の距離分解能が数ミリメートル(時間にして 10 ピコ秒程度)を考えると、20 倍以上の距離分解能が得られている。

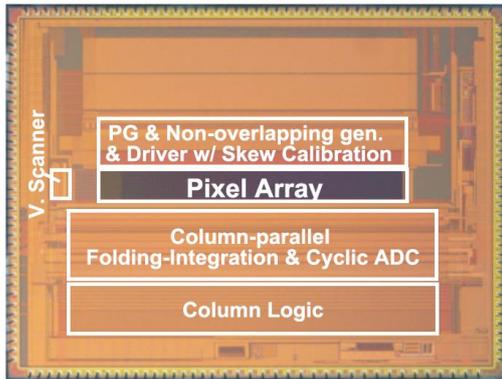


図6 試作したイメージセンサ

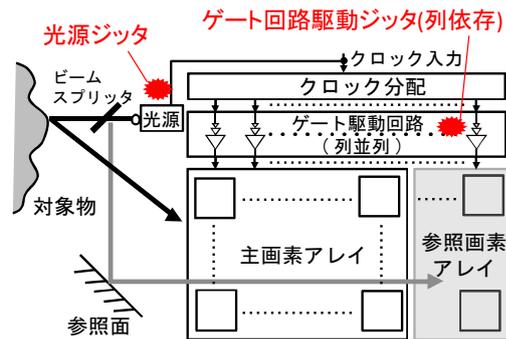


図7 参照光サンプリングの概念図

さらなる高距離分解能化に向けた理論的な見通しを得るために、インパルス駆動による TOF 計測の理論式を構築した。図8は信号強度に対する距離分解能の実測値と、構築した理論式との比較であり、よく一致していることがわかる。残留するジッタは、列並列のドライバ回路で重畳するものであることも、わかっており、今後さらなる距離分解能の向上が見込まれる。図9は試作したイメージセンサで取得した3次元点群データであり、参照光サンプリングの適用前後の違いを示している。撮像対象は直径 20mm の球であり、1次元の機械式ステージを使用した。ステージのスキャン方向の揺らぎが参照光サンプリングにより低減され、良好な3次元計測ができてきていることがわかる。さらに、複数の視点から3次元点群データを取得し、メッシュ生成と合成にも実施した。図10は $32\text{mm} \times 50\text{mm} \times 30\text{mm}$ の猫のフィギュアの角度を変えて6枚取得し、それらを3次元モデリングソフトにより合成した結果である。良好な3次元合成ができており、高精度な3次元スキャンが実現できていることを実証した。

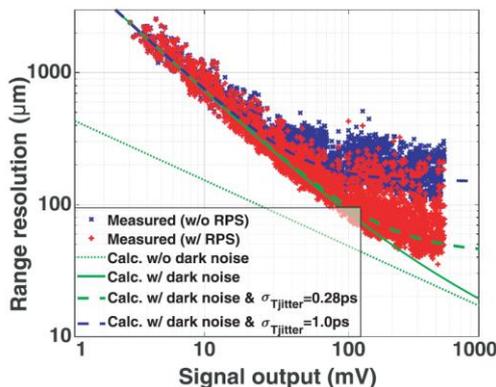


図8 信号強度に対する距離分解能の測定値と構築した理論式の比較

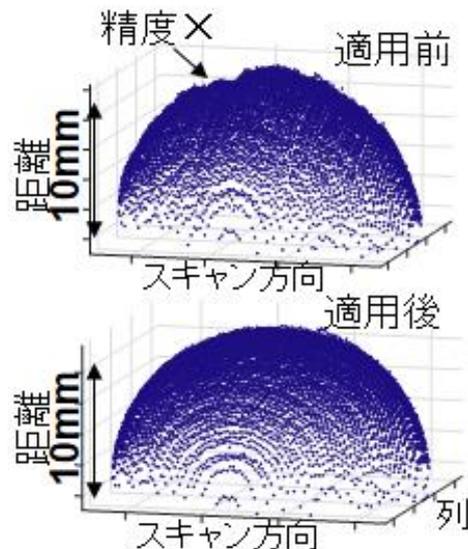


図9 半径 10 mm の基準球の点群取得結果 (上) 参照光サンプリング適用前, (下) 参照光サンプリング適用後

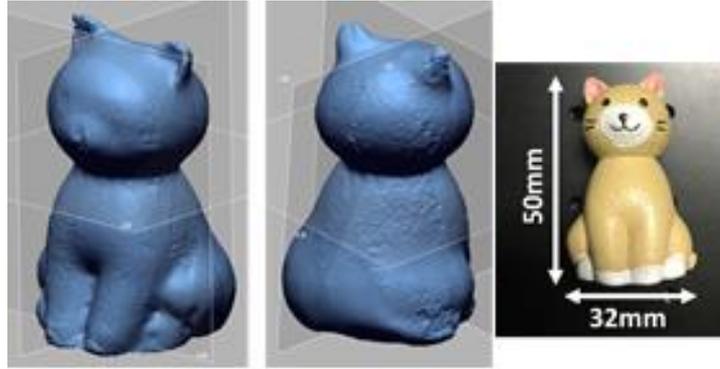


図 10 3D スキャン結果. 点群データからメッシュ生成までを行い良好な 3D データを取得した

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

1. K. Yasutomi, Y. Okura, K. Kagawa, S. Kawahito, “A Sub-100 μ m-Range-Resolution Time-of-Flight Range Image Sensor With Three-Tap Lock-In Pixels, Non-Overlapping Gate Clock, and Reference Plane Sampling,” IEEE J. Solid-States Circuits, pp. 1-13, 2019.
DOI:10.1109/JSSC.2019.2916310,
2. K. Yasutomi, T. Usui, S. Han, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, “A Submillimeter Range Resolution Time-of-Flight Range Imager With Column-Wise Skew Calibration,” IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 63, No. 1, pp. 182-188, 2016. DOI: 10.1109/TED.2015.2447525
3. L. Miao, K. Yasutomi, S. Imanishi, S. Kawahito, “A Column-Parallel Clock Skew Self-Calibration Circuit for Time-Resolved CMOS Image Sensors,” IEICE Electronics Express, vol. 12, No. 24, pp. 1-7, 2015. DOI: 10.1587/elex.12.20150911

〔学会発表〕(計 18 件)

1. Y. Okura, K. Yasutomi, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, “3D scanning measurement using a time-of-flight range imager with improved range resolution,” Electronic Imaging 2019
2. 大倉雄志, 安富啓太, 高澤大志, 香川景一郎, 川人祥二, “参照光サンプリングによる TOF 距離イメージセンサの高距離分解能化,” 映像情報メディア学会年次大会, 14C-3, 2018.
3. K. Kondo, K. Yasutomi, K. Yamada, A. Komazawa, Y. Handa, Y. Okura, T. Michiba, S. Aoyama, S. Kawahito, “A Built-in Drift-field PD Based 4-tap Lock-in Pixel for Time-of-Flight CMOS Range Image Sensors,” 2018 International Conference on Solid State Devices and Materials, 2018.
4. 安富啓太, 川人祥二 “Time-of-Flight 距離撮像素子の開発動向,” 映像情報メディア学会情報センシング研究会, 2017
5. K. Yasutomi, S. Imanishi, Y. Morikawa, T. Takasawa, K. Kagawa, S. Kawahito, “A High-Resolution Time-of-Flight Range Image Sensor with a 3-Tap Lateral Electric Field Charge Modulator,” 2017 INTERNATIONAL IMAGE SENSOR WORKSHOP, 2017.
6. K. Yasutomi, M. W. Seo, M. Kamoto, N. Teranishi, S. Kawahito, “A 0.61 E- Noise Global Shutter CMOS Image Sensor with Two-Stage Charge Transfer Pixels,” The 2017 Symposium on VLSI Technology and Circuits, 2017.
7. K. Yasutomi, S. Kawahito, “Clock management in high resolution Time-of-Flight range imagers,” 3rd International Workshop on Image Sensors and Imaging Systems (IWISS) 2016 (Invited.)

他 1 1 件

〔産業財産権〕

○出願状況（計 3 件）

名称：距離計測装置

発明者：安富啓太、川人祥二

権利者：静岡大学

種類：特許

番号：特願 2018-120638

出願年：2018 年

国内外の別：国内

名称：PIXEL CIRCUIT AND IMAGING ELEMENT

発明者：安富啓太、川人祥二

権利者：静岡大学

種類：特許

番号：W0/2017/170568

出願年：2017 年

国内外の別：国外

他 1 件

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者 なし

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：川人祥二

ローマ字氏名：(KAWAHITO, shoji)

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。