Time-of-Flight カメラ

(正会員) 安富啓太[†], (正会員) 川人祥二[†]

CMOSイメージセンサ技術の発展に伴い、Time-of-Flightカメラの開発が盛んに行われており、多方面での応用が期待されている。本稿では最近報告されているTOF撮像素子を中心にTime-of-Flightカメラについて解説する。

キーワード：Time-of-Flight, 距離撮像, CMOSイメージセンサ, 3Dイメージング, ロックインピクセル

1. まえがき

Time-of-Flight (TOF) カメラは、図1に示すように光源から放射された光が対象物で反射し、カメラに返ってくるまでの時間（飛行時間, time of flight）を計測し、既知である光の速度を元に距離を算出する手法である。TOFカメラには専用に備えられた光源があり、能動計測の一種である。

TOF法による距離計測は、フォトダイオード、短パルスレーザおよび時間計測回路がディスクリートで構築された点計測が元である。今日でも近距離から長距離を幅広く測定できる計測器として用いられている。近年、CMOSイメージセンサの発展に伴い、時間計測が可能なイメージセンサ（時間分解イメージセンサ）が提案・開発¹⁾²⁾されたことによって、2次元画素アレイ上で同時に距離計測を行える3次元撮像デバイスの開発が進んでいる。特に、後述する間接TOF法に基づく距離撮像デバイスは、画素構成が簡単であるため、多画素化（ 413×240^3 , 512×424^4 ）が実現されている。

ステレオ計測や光切断法といった三角測量に基づく距離撮像に対して、TOF法の強みは、①距離演算が簡単でリアルタイムな撮像が容易であること、②カメラ間、あるいはカメラ-光源間の距離（ベースライン）が不要、③通常は面発光、面計測であるため、スキャン機構が不要であることが挙げられる。ベースラインが不要であるため、光源とカメラを同軸、またはそれに近い構成を取ることができ、また返ってくる光量が変わらなければ、対象物までの距離に距離分解能が依存しないという特長を持つ。

本稿では、TOF法による距離撮像の基礎、TOF距離撮像素子のさまざまな分野へ向けた開発について解説する。2章では、直接TOF法、間接TOF法などのTOF法の分類

図1 Time-of-Flight撮像

について述べ、TOF距離撮像素子において重要なロックインピクセルについて解説する。4章、5章、6章では近距離用途、計測分野、長距離用途などといったさまざまな用途に向けた開発について述べる。

2. TOF距離撮像

2.1 TOFカメラの構成

図1のように、TOFカメラの構成は撮像素子とレンズ（いわゆるカメラ）とこれに同期した光源を備えている。この光源は正弦波あるいはパルス発光させて利用するため、半導体レーザやLEDが用いられ、波長としては850 nm付近の近赤外光が多く用いられている。太陽光などの背景光は雑音になるため、バンドパスフィルタによってカットされている。

TOFカメラはさまざまな分野での応用が期待されている（図2）。この中で最も盛んに取り上げられているのが、ジェスチャ認識によるゲームや家電制御のコントローラやリモコンの代替、バーチャルリアリティ（VR）や拡張現実（AR）の入力デバイスなどへの応用である。すでに製品化されているTOFカメラ⁵⁾⁶⁾の多くは、このような用途に向けて開発されている。これ以外にも、監視カメラや車載向け（フロントカメラ、リアカメラ）なども用途として期待さ

[†] 静岡大学 電子工学研究所

"Time-of-Flight Range Cameras" by Keita Yasutomi and Shoji Kawahito (Shizuoka University, Shizuoka)

図2 TOFカメラの期待される用途

れているが、屋外での使用は背景光による性能劣化があり、課題が残されている。また、距離分解能が改善され、サブミリメートルの距離分解能が実現されれば、形状計測などの計測分野への応用も期待できる。

2.2 直接TOF法と間接TOF法

先に述べたように、TOF法では光源から発せられた光が検出器に到達する時間を計測することで、距離を算出する(図1)。距離 L は、飛行時間 t_{TOF} 、光の速度 c により、

$$L = \frac{c}{2} t_{TOF} \quad (1)$$

で求めることができる。この飛行時間を計測する手法として、直接TOF法^{7)~9)}と間接TOF法^{1)~4) 10)~13)}の2つに大きく分類される。直接TOF法とは、図3に示すように発光の時刻と検出器に到来した時刻をストップウォッチのような時間計測器でそのまま測定する手法である。このため、短いパルス幅(100 ps~数ns)の光パルスを用いる。この直接TOF法の検出器にはアバランシェダイオード、特にゲインが無限大となるガイガーモードで動作するSPAD(Single-Photon Avalanche Diode)が用いられる。フォトンが到来した時刻でSPADがパルスを出力し、これをTDC(Time-to-Digital Converter)などで時間を直接計測する。このTDCは画素内、あるいはカラムに集積化されて、画素並列あるいはカラム並列にTOF計測が行われる^{7)~9)}。

間接TOF法では、光源に同期した時間窓(クロック)を用いて、フォトダイオードで発生した光電荷を後述するロックインピクセルによって変調する。このとき、時間情報が信号量に反映されるため、ここから飛行時間を算出することができる。間接TOF法は、画素内にTDCなどの時間算出回路が不要で、画素内の素子数を比較的少なくすることができるため、多画素化が容易という利点がある。

2.3 間接TOF法の変調方式

間接TOF法の変調には、図4に示すように、連続波変調^{1) 2) 4) 12)}とパルス波変調^{3) 10)}に大別される。連続波変調

図3 直接TOF計測法

図4 間接TOF法

では、4つの時間窓を用いてロックイン検出を行うことで、発射光と反射光の位相差を求めることができる。ここで用いるロックイン検出とは、光源と同期した短い電子シャッタによって、同じ位相の信号を複数回蓄積する動作を示している。正弦波で変調した場合には、4つの時間窓TW1, TW2, TW3, TW4で蓄積した信号 N_1, N_2, N_3, N_4 を用いて、位相差 ϕ_{TOF} は

$$\phi_{TOF} = \frac{1}{2\pi f_m} \arctan \left(\frac{N_1 - N_2}{N_2 - N_4} \right) \quad (2)$$

と求めることができる。変調周波数 f_m は既知であるため、

$$t_{TOF} = \frac{\phi_{TOF}}{2\pi f_m}$$

を用いて位相から時間に換算できる。受光した光には光源以外の直流成分、すなわち背景光成分が含まれているが、式(2)の演算によりキャンセルされる。したがって、センサが飽和しない範囲においては背景光の影響を受けずに距離が推定可能である。ただし、背景光にはショットノイズがあり、これが距離分解能に影響する。

図5 間接TOF法の距離分解能

一方で、パルス波変調の場合には、TW1, TW2により蓄積した信号をN1, N2とすると、飛行時間は

$$t_{TOF} = \frac{N_2}{N_1 + N_2} T_0 \quad (3)$$

と求めることができる。TDは排出窓で、余分な背景光は排出される。時間窓TWの数を3つ以上にする事で、背景光成分のみを知ることができ、背景光の影響を受けずに距離が推定可能となる。パルス波変調では、光源のデューティ比を高くすることで、背景光に対してロバストな距離撮像が実現できる。

2.4 TOF 距離撮像の距離分解能

間接TOF法における距離分解能(距離精度)は、変調周波数もしくは変調パルス幅および信号対雑音比SNRで距離分解能が決まる。信号電子の数が十分に多く、このショットノイズが支配的となっている場合には、次式として表すことができる。

$$\sigma_{L,t_{TOF}} \propto \frac{L_{MAX}}{SNR} \approx \frac{L_{MAX}}{\sqrt{N_s}} \quad (4)$$

ここで、 N_s は信号電子数、 L_{MAX} は最大測距範囲を示してあり、連続波変調方式の場合には

$$L_{MAX} = \frac{c}{2f_m},$$

パルス変調方式の場合には

$$L_{MAX} = \frac{c}{2} T_{PW}$$

となる。式(4)は、図5のようにものさしで考えれば解釈しやすい。測定可能範囲は変調周波数 f_m もしくは変調パルス幅 T_{PW} で決まり、目盛りの数は $\sqrt{N_s}$ で決まる。したがって、信号電子数を一定に保ち、パルス幅を短くし測距範囲を減らせば高分解能化が実現できる。式(4)は厳密ではなく、実際には、SNRは背景光によるショットノイズ、センサの読出しノイズが含まれる。

多くのTOFカメラで、連続波変調方式が採用されている。これらのカメラで変調周波数は20-30 MHz付近が利用されていたが、最近では100 MHzを超えるものも報告されている⁴⁾。連続波変調方式では計算結果が位相であるため、周期(2π)毎に推定される距離が存在する。この不確定性(Ambiguity)は変調周波数が高まるにつれて、誤った距離推定を起こしやすくなる。この不確定性による誤りを低減

するために、2つの周波数によってどここの周期にあるかを特定する手法が用いられている¹⁴⁾。

パルス波変調方式では、デューティ比を大きくとることで、不確定性の問題は解消されるため、長距離用途においてもほとんど問題とならない。また、高距離分解能と広い測距レンジを両立させるためにレンジシフト動作が提案されている¹⁵⁾。光源のトリガ信号との位相差を調整し、複数の計測を行うことで、距離分解能を高く保ったまま測距レンジをシフトすることができる。フレーム間で行ってもよいが、後述するマルチタップロックイン 픽セルであれば、単一フレームで測距レンジを拡大できる。

3. 高速ロックイン 픽セル

間接TOF法では、時間窓を用いた光電子の蓄積・非蓄積の制御を行う基本素子、すなわち高速な電荷変調が行えるロックイン 픽セルの実現が極めて重要である。電荷変調の速度が不十分な場合、時間窓内外での電荷蓄積・非蓄積が不完全となり、距離分解能の劣化あるいは距離演算の破綻を招く。

CMOSイメージセンサ上での実現方法としては、図6(a)、(b)に示すようなフォトゲート型¹⁰⁾、埋め込みフォトダイオード型^{13) 16)}などが報告されている。埋め込みフォトダイオード型は通常のCISプロセスと互換性が高く、製造の観点からみれば望ましいものの、電位障壁による転送劣化や検出部である浮遊拡散層(FD)からの電荷逆流などが起きやすい。また、フォトゲート型に類似した量子効率変調型⁴⁾と呼ばれる構造も報告されている。

最近、高速変調と複数タップ化に適した電荷変調素子構造として、ラテラル電界制御電荷変調素子LEFM (Lateral Electric Field charge Modulator) が提案されている¹⁷⁾。図7に、2タップ出力型の場合の断面および上面構造と電位分布を示す。低濃度の基板(p-sub.)上に、p+/n/p-subの埋め込みフォトダイオードを形成し、光電子を移動させる方向(X-X'方向)に沿って側面にMOSゲート構造を設けて、ゲート電位を変化させる。図7(b)のY-Y'の電位変化が示すように、ゲート電圧の変化によって、ダイオード中央部の電位が大きく変化する。2つのゲートG1, G2に異なる電位を与えると、図7(a)に示すように、発生した光電子を右または左方向に、高速に移動させることができ、ゲート電圧制御により2つの蓄積部への光電子の蓄積量を変化させることができる。

4. 近距離用途に向けた開発

先に述べたように、TOFカメラを用いたジェスチャや物体認識などが注目されている。これらの用途では、数mの範囲において数mmから数cmの距離分解能が求められる。すでにこのような用途に向けてTOFカメラが製品化されているが、特に最近でインパクトがあったものは、Microsoft

連続波変調、パルス波変調のどちらにおいても、背景光の影響を除くためには3タップ以上が必要となるが、一般にロックイン 픽セルは2タップ(出力)しかない。そこで、従来のTOFセンサでは2フレームを利用して、背景光除去を行っていた。この2フレームでの処理は蓄積時刻がずれているため、動きによるアーティファクトを引き起こす。

このような課題に対して、画素部に4タップLEFM構造を応用した単一フレームでの背景光除去機能を有するTOF距離撮像素子が開発されている³⁾。図8は開発した排出部を備えたH型の3タップLEFM構造であり、413×240の画素数を有している。この3タップ+排出のLEFM素子を用いることで、単一フレームでの背景光除去処理が可能となる。図9に示す駆動タイミングのように、G1ゲートでは背景光のみを蓄積し(N₁)、G2, G3によって反射光による信号電荷(N₂, N₃)を蓄積する。その結果、

$$t_{\text{TOF}} = \frac{N_2 - N_1}{N_2 + N_3 - 2N_1} T_0 - T_{\text{OFS}} \quad (5)$$

のように、N₂, N₃からN₁をそれぞれ差し引いて距離計算を

のゲーム機Xbox ONEの入力装置であるKinect v2⁴⁾であろう。Kinectは最大130 MHzの高速な電荷変調、512×424画素、高速なADCによる複数回の非破壊読出しと集積化されたシャッタエンジンによって、高いダイナミックレンジを実現している。ただし、フィルタ処理の選択や蓄積時間の制御が行えず、ユーザの自由度は低い。

手の動きなどを捉えようとしたときには、動きに対してロバストな距離撮像素子が求められる。2章で述べたように、

図9 3-tap型LEFMを用いたTOF計測のタイミング図

図11 排出部を備えた4-tap LEFMの性能

図10 排出部を備えた4-tap LEFM

図12 X型4-tap LEFMによる撮像例

行うことで、背景光成分を除去し距離演算が実現できる。

文献³⁾では背景光下で、上下に手を動かしたときの距離撮像があり、背景光によるアーティファクトが軽減されていることが示されている。図10に示すX型4タップLEFMも報告されており、H型に比べ対称性が改善し、図11に示すように高い変調率が実現されている。短パルス時の変調率の劣化は、光源のLED応答で律速されている。図12は160×240画素のX型4タップLEFM試作センサの撮像例であり、良好な距離画像が得られている。また、4タップ構造を活かして、先述したレンジシフト動作¹⁵⁾による測距レンジができ、分解能の劣化なく測距レンジを4倍に拡大できる¹⁸⁾。

5. 計測分野に向けた高距離分解能化

3次元スキャナのような計測分野への新たな応用に向け

て、高距離分解能化が進められている。図7に示すLEFM素子を単一出力にしたDraining-only Modulation (DOM) 素子¹⁹⁾を、TOFセンサの画素に応用し、サブミリメートルの分解能をもつTOF距離撮像センサが実現されている²⁰⁾。DOMの高速応答性能を活用するため、図12に示すような素子のインパルス応答を用いたTOF距離計測法を用いている²¹⁾。132×120画素を有し、測距レンジ30 mmにおいて距離分解能0.25 mmが実現されている。数mm程度に留まっていたこれまでのTOF距離センサと比べて、1桁高い距離分解能を示している。図13に示すような1 mmの段差なども取得可能である。高距離分解能化に伴い、画素毎のクロックスキューが顕在化するが、オンチップの補正回路により問題ないレベルまで低減している。このスキュー補正を全電子式にしたものも報告もされている²²⁾。

6. 屋外・長距離用途に向けたTOF撮像素子

自動車の衝突防止のための物体認識を目的とした長距離TOF距離撮像素子の開発が進められている。このような用途では、100 mほどの測距レンジが必要となるとともに、屋外で使用するため高い背景光に対する耐性が必須となる。豊田中研のNiclassらは、SPADの16画素のラインセンサと

図13 サブミリメートル分解能を有するTOFセンサの撮像例

ポリゴンミラーを利用した2次元スキャンによって、 202×96 画素相当の距離撮像素子を実現している⁹⁾。背景光による誤検出を低減するために、時間的な相関と空間的な相関の両方を利用し、さらにヒストグラムから信号光成分を抽出するDSPをチップ内に内蔵している。100 m先の物体(反射率9%)に対して距離分解能14.2 cmを実現している。

7. むすび

本稿では、TOFカメラの基礎技術および現在のTOF距離撮像素子の開発動向についてまとめた。Kinect v2の登場によって、TOFカメラへの関心は一層高まっている。スマートフォンに搭載されるとの発表²³⁾もあり、普及は確実に進んでいるが、撮像素子やカメラとしては未だ発展途上にあることは間違いない。これらの普及をきっかけとして、今後はより精度や信頼性が求められる車載用や監視用、マシビジョンなどへの開発が進むことを期待したい。

(2016年8月29日受付)

〔文 献〕

- 1) T. Spirig et al.: "The lock-in CCD-two-dimensional synchronous detection of light", IEEE J. Quantum Electron., **31**, 9, pp.1705-1708 (1995)
- 2) R. Lange et al.: "Solid-state time-of-flight range camera", IEEE J. Quantum Electron., **37**, 3, pp.390-397 (Mar. 2001)
- 3) S.-M. Han et al.: "A Time-of-Flight Range Image Sensor with Background Cancelling Lock-in Pixels Based on Lateral Electric Field Charge Modulation", IEEE J. Electron Devices Soc., **3**, 3, pp.267-275, May. (2015)
- 4) C.S. Banji, et al.: "A 0.13 μm CMOS System-on-Chip for a 512×424 Time-of-Flight Image Sensor with Multi-Frequency Photo-Demodulation up to 130 MHz and 2 GS/s ADC", IEEE J. Solid-State Circuits, **46**, 1, pp.248-258 (Jan. 2015)
- 5) S. Foix et al.: "Lock-in time-of-flight (TOF) cameras: A survey", IEEE Sens. J., **11**, 9, pp.1917-1926 (Sep. 2011)
- 6) P. Fursattel et al.: "A Comparative Error Analysis of Current Time-of-Flight Sensors", IEEE Trans. Computational Imaging **2**, 1 (Mar. 2016)
- 7) C.L. Niclass et al.: "Design and characterization of a CMOS 3-D image sensor based on single photon avalanche diodes", Solid-State Circuits, IEEE J., **40**, 9, pp.1847-1854 (2005)

- 8) S. Mandai et al.: "A 128-Channel, 8.9-ps LSB, column-parallel two-stage TDC based on time difference amplification for time-resolved imaging", IEEE Trans. Nucl. Sci., **59**, 5, pp.2463-2470 (2012)
- 9) C. Niclass et al.: "A 0.18- μm CMOS SoC for a 100-m-Range 10-Frame/s 200×96 -Pixel Time-of-Flight Depth Sensor", IEEE J. Solid-State Circuits, **49**, 1, pp.315-330 (2014)
- 10) S. Kawahito et al.: "A CMOS time-of-flight range image sensor with gates-on-field-oxide structure", IEEE Sensors J., **7**, 12, pp.1578-1586 (Dec. 2007)
- 11) C. Niclass et al.: "Single-photon synchronous detection", IEEE J. Solid-State Circuits, **44**, 7, pp.1977-1989 (2009)
- 12) D. Stoppa et al.: "A Range Image Sensor Based on 10- μm Lock-In Pixels in 0.18- μm CMOS Imaging Technology", IEEE J. Solid-State Circuits, **46**, 1, pp.248-258 (Dec. 2011)
- 13) S.-J. Kim et al.: "A CMOS Image Sensor Based on Unified Pixel Architecture with Time-Division Multiplexing Scheme for Color and Depth Image Acquisition", IEEE J. Solid-State Circuits, **47**, 11, pp.2834-2845 (Nov. 2012)
- 14) A.P.P. Jongenelen, et al.: "Analysis of errors in ToF range imaging with dual frequency modulation", IEEE Trans. Instrum. Meas., **60**, 5, pp.1861-1868 (May 2011)
- 15) T. Sawada et al.: "A range-shift technique for TOF range image sensors", IEEE Trans. On Sensors and Micromachines, **129**, 11, Sec.E, pp.421-425 (Nov. 2009)
- 16) H. Takeshita et al.: "High-speed charge transfer pinned-photodiode for a CMOS time-of-flight range image sensor", IS&T/SPIE EI2010 7536, pp.407536OR19 (2010)
- 17) S. Kawahito et al.: "CMOS Lock-in Pixel Image Sensors with Lateral Electric Field Control for Time-Resolved Imaging", Proc. 2013 Int. Image Sensor Workshop (IISW), pp.361-364, June 2013)
- 18) T. Kasugai et al.: "A time-of-flight CMOS range image sensor using 4-tap output pixels with lateral-electric-field control", Electronic Imaging 2016 pp.IMSE-048.1-6 (Feb. 2016)
- 19) S. Kawahito et al.: "A CMOS image sensor with draining only demodulation pixels for time-resolved imaging", Proc. 2011 Intl. Image Sensor Workshop, pp.185-188, Hakodate (June 2011)
- 20) K. Yasutomi et al.: "A Submillimeter Range Resolution Time-of-Flight Range Imager with Column-wise Skew Calibration", IEEE Trans. Electron Devices, **63**, 1, pp.182-188 (2016)
- 21) K. Yasutomi et al.: "An indirect time-of-flight measurement technique with impulse photocurrent response for sub-millimeter range resolved imaging", OPTICS EXPRESS, **22**, 16, pp.18904-18913 (2014)
- 22) L. Miao et al.: "A column-parallel clock skew self-calibration circuit for time-resolved CMOS image sensors", IEICE Electronics Express **12**, 24, pp.1-7 (2015)
- 23) Infineon Technologies, <http://www.infineon.com/cms/jp/>

やすとみ けいた
安富 啓太 2011年、静岡大学大学院博士課程修了。同年、静岡大学電子工学研究所助教となり、現在に至る。時間分解イメージセンサの開発に従事。2015年本学会鈴木記念奨励賞受賞。博士(工学)。正会員。

かわひと しょうじ
川人 祥二 1988年、東北大学大学院博士課程修了。同年、東北大学助手、豊橋技術科学大学講師、助教等を経て、1999年より、静岡大学電子工学研究所教授となり、現在に至る。2006年、(株)ブルックマン・ラボ(現、(株)ブルックマンテクノロジー)設立・取締役CTO就任。イメージセンサのデバイス・回路・信号処理および応用システム等に関する研究に従事。2009年、IEEE Fellow, 2013年、Walter Kosonocky Award, 2014年、本学会技術振興賞進歩開発賞等受賞。工学博士。当会フェロー認定会員。