



## Time of Flight方式デプスカメラとセンサー技術



ソニーセミコンダクターソリューションズ株式会社  
モバイル&センシングシステム事業部CVシステム開発部

やす よう たろう  
安 陽太郎

### 1. はじめに

近年、スマートフォンへの導入やインダストリー用途での普及が進むデプスカメラとそれを支える最新のセンシング技術の一つであるToF技術について紹介する。デプスカメラは一般的なRGB画像を出力するカメラとは異なり、撮影した被写体の深度情報(=奥行)を取得することが可能である。古くから光や電波などを点で照射して物体までの距離を測定できるセンサーは広く使われてきたが、ステレオ方式やストラクチャーライト方式など新しいイメージング技術とコンピュータビジョンの進歩によって、点ではなく面で3次元の深度情報を取得できるカメラデバイスが身近になってきている。デプスカメラには先述した2つの方式以外にも多様な手法が存在するが、近年特に注目を集めているのがToF(Time of Flight: 飛行時間法)方式のデプスカメラである。ToF方式が他の方式と大きく異なるのは、距離の測定に光子(光子)を用いる点にあり、LiDAR(Light Detection and Ranging)と呼ばれるリモートセンシング技術に含まれる。本稿ではまずToFの基本概念と代表的な2つの方式を可能な限り平易に解説する。後半では我々が開発に注力している間接ToF方式にフォーカスし、それを支える中核技術である裏面CAPDセンサー技術を中心に紹介する。

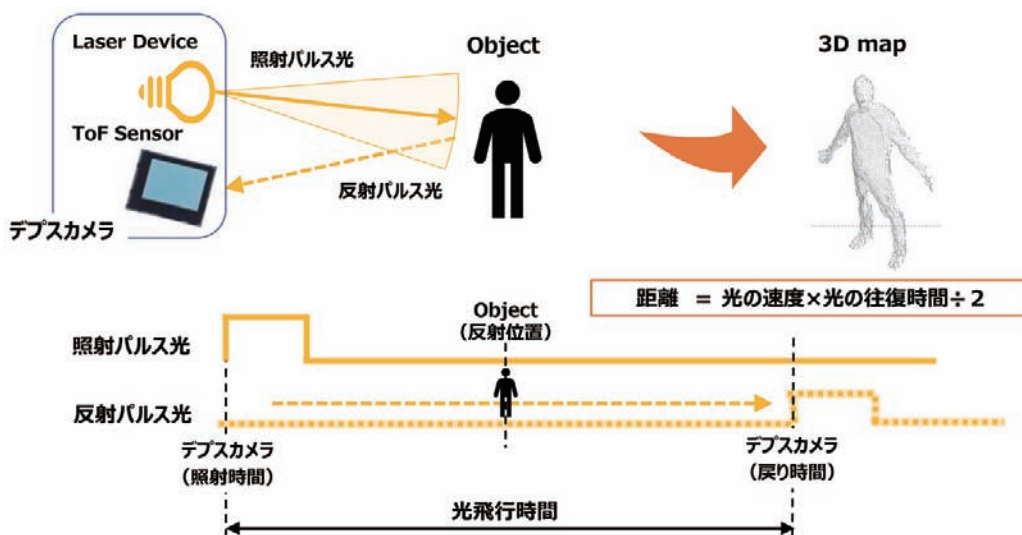
### 2. ToFの原理

ToF方式の原理について簡単に説明する(図1)。ToF方式では光源から照射したパルス光が被写体に当たって反射した光の戻り時間(=飛行時間)を計測することで被写体までの距離を取得する方法である。式で表現すると以下のように表される。

$$\text{距離} = \text{光の速度} \times \text{光の往復時間} \div 2$$

ここで光の速度は既知であるから、照射したパルス光の往復時間さえ分かれば距離が求まる。ただし、光の速度は広く知られるように約30万km/s(1秒間に地球を7周半する速度とも表現される)と非常に速く、光の往復時間を正確に捉えるには様々な工夫が必要である。原理理解のために簡単な例を使って説明する。光が3m進むのにかかる飛行時間は既知の光速から10n秒であると求められる。ToFは光の往復時間を計測することになるのでセンサーが10n秒を計測したとすると、物体との距離は1.5m(=3m÷2)だと判別することができる。加えて、もし1.5cmの凹凸を検知したいとなると、100p秒(10n秒の1/100)の時間を分解できるセンサーが必要となる。仕組みとしてはこのように測距の基準として扱う光速が非常に速いことを除けば比較的単純な原理である。

以上の原理を用いて、ToFセンサーでは照射する光を点



■ 図1. ToFの原理



ではなく、ある範囲の広がりを持たせて照射し、検出する画素（ピクセル）を2次元のアレイ状に配置して、画素ごとに距離を算出すると3次元の深度画像が取得できる。ToF方式のデプスカメラではこの光（光子）を照射する光源と光を受け取る画素を含むセンサーがセットで必要となる。光を照射する範囲を広げれば3D画像を撮影できる範囲を広げることができ、センサーにアレイ配置する画素の数を増やせばより高解像な3D画像を得ることができる。

### 3. 直接ToF方式と間接ToF方式

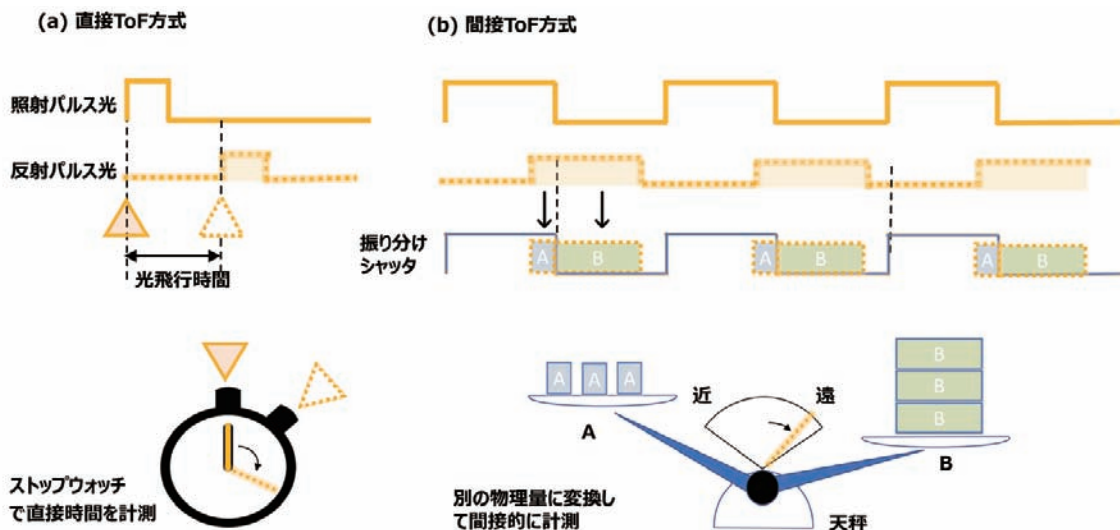
前節では光子と光速を使った測距の概念について説明した。本項ではToF方式において光の戻り時間を計測する具体的な手法について説明する。まず初めに、ToF方式には大きく分けて直接ToF方式と間接ToF方式の2つの代表的な手法がある。直接ToF方式も間接ToF方式も先に説明した「光飛行時間を計測して測距を行う」という点は共通であるが、光の戻り時間を算出する過程が異なる。

図2-(a)を用いて説明すると、直接ToF方式では光の戻り時間そのものを計測する。光を照射してからセンサーに戻ってくるまでの時間をストップウォッチで測るイメージを持つと理解しやすい。先に述べたように光は非常に速度が速く、戻り時間が非常に短いため使うストップウォッチは0.000000001秒（=1n秒）以下の時間差を捉える性能が必要である。また、戻ってくる光は照射した光よりずっと強度が小さいため、光子を増倍させる特殊な画素が使われる。近年、車載の自動運転向けに開発が進んでいるLiDARシステムの多くはこの直接ToF方式を採用している。特徴とし

ては高性能な増倍型画素と高出力のレーザーを組み合わせることで、100mを超える長距離の測距が可能となる。ただし、アレイにできる画素の数に制限があることから、後に説明する間接ToF方式と比較すると解像度が低い傾向にある。

一方、間接ToF方式では直接光の戻り時間を計測するのではなく、戻ってきた光を変換した電荷の数量を比較することで間接的に時間を計測する技術である。まず繰り返しパルス発光した光を対象に照射し、続いて戻ってきた光の連なりを画素で電荷に変換する。このとき照射した光と同期したシャッターで2つの電荷保存領域に振り分けながら、十分な信号量が得られるまで電荷を収集する。この2つの保存領域に貯めた電荷量の比が光の戻り時間によって変化することを利用して時間を計測することができる。この関係を図2-(b)の図を使って説明すると、被写体までの距離が遠ければBに振り分けられた電荷の量が多くなり、近くなるにつれてAに振り分けられる電荷の量が多くなっていく。先の直接ToF方式がストップウォッチだとすると、間接ToF方式はAとBに振り分けた電荷の量を、天秤を用いて比較するイメージである。間接ToF方式の特徴としては、画素の数を増やすことが比較的容易で解像度に優れる。また、近距離では高精度で物体の形状を検出できることと、システムが単純なため安価である点が挙げられる。一方で遠距離の測距では反射する光の強度が低下し、センサー内のノイズなどの影響が大きくなるため精度が低下する傾向にある。

以上、直接ToFと間接ToFの原理と特徴について述べた。これらの長所や短所は使いこなしや緻密なトレードオフ設計で性能差が前後することもあるものの、得意分野が異なる



■ 図2. 直接ToF方式と間接ToF方式



る。近距離/高解像度/低コストに向くのが間接ToF方式、長距離/高精度に向くのが直接ToF方式といったように用途に応じて使い分けが進むと考えられる。

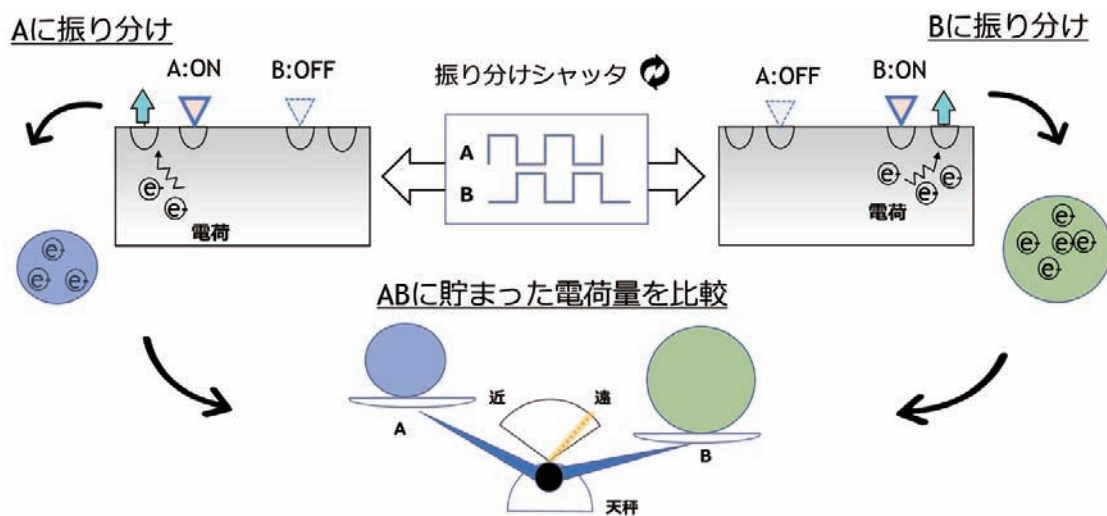
## 4. 裏面照射型CAPDセンサー

次に我々が開発した間接ToF方式の裏面照射型CAPDセンサーについて説明する。裏面照射型CPADセンサーは、ソニー株式会社（以下、ソニー）が従来から得意とする裏面照射型CMOSイメージセンサーのデバイス技術と2017年にM&Aによりソニー傘下に迎え入れたSoftkinetic Systems S.A.（現Sony Depthsensing Solutions）のCAPD技術を掛け合わせて開発されたものである。SoftKinetic Systems社について補足すると、長年間接ToF方式のセンサーを含むハードウェアとソフトウェア両方の開発経験を持つブリュッセル（ベルギー）発のスタートアップで、CAPDを筆頭にユニークな技術を数多く保有する。

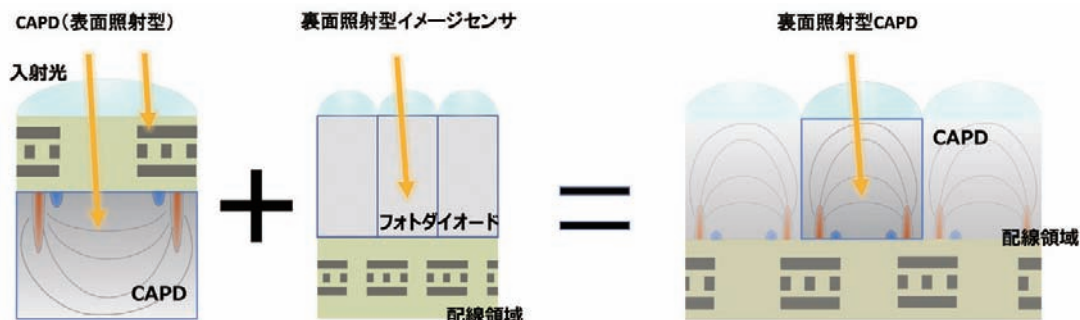
CAPDとはCurrent-Assisted Photonic Demodulatorの

略称で、電圧によって光から発生した電荷（電子）を制御する一般的なCMOSイメージセンサーの画素と異なり、CAPDは電流で電荷の進行方向を高速制御できる点が稀有な特徴である。図3を用いて原理を説明する。CAPDは一般的な画素（フォトダイオードとも呼ばれる）と同様に入射した光（光子）を電荷（電子）に変換する。この画素内で変換された電荷の進行方向をCAPDでは電流の向きによって任意に制御する。電流によって制御される電荷の進行方向はAとBの2つの異なる電荷保存領域に指向され、繰り返し高速にAとBの指向をスイッチすることで図2-(b)で説明した間接ToF方式に必要な電荷の振り分け動作を実現できる。電流アシストによって電荷の指向を切り替えるという、一見奇抜に見えるアイデアであるが、デバイスの構造は非常にシンプルのため製造工程で生じるばらつきに強く、製造性に優れたデバイス構造であると言える。

次に開発した裏面照射型CAPDについて図4を用いて解



■図3. CAPDの動作



■図4. 裏面照射型CAPD





説する。裏面CAPD画素は先に説明したCAPDに裏面照射型CMOSイメージセンサーの技術を適応することで開発された。配線領域を光照射面の反対側に配置する裏面照射型構造を採用することで画素に取り込める光の量が多く確保でき、少ない光でも損失なく有効な信号に変換できる。この性能向上によって測距性能を低下させずに画素を小さくすることが可能になった。さらに、裏面化によって画素の設計自由度が向上し、間接ToF方式の測距精度を決める重要なパラメータである電荷の転送速度を高めることで飛躍的な測距性能向上を達成することができた。この新しい画素構造は我々の得意とするCMOSイメージセンサーのアーキテクチャと親和性が高く、読み出し回路を含む多くの機能を転用することができる。そのため信頼性が高い従来のCMOSイメージセンサーの開発プラットフォームを活用した設計及び製造が可能である。

## 5. 間接ToFカメラモジュール

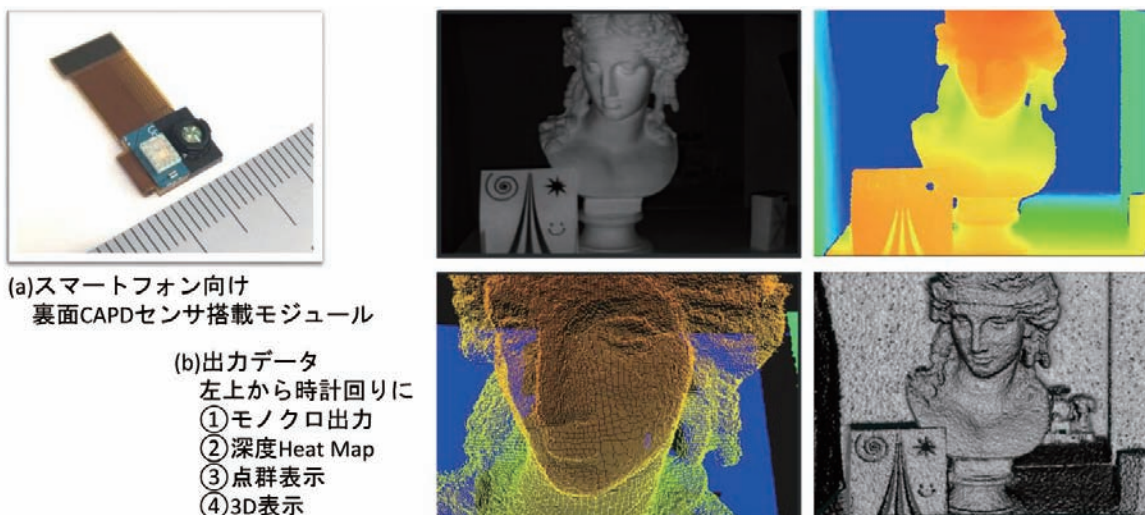
図5-(a)に開発した裏面照射型CAPDセンサーを搭載した間接ToFカメラモジュールを示す。これまでに説明した裏面照射型CAPDセンサーに加えてレーザーデバイスとレーザー駆動用のドライバ及び各種光学部品がスマートフォンへ搭載可能なスケールで実装されている。

図5-(b)はこのカメラモジュールから出力される深度画像である。このデモンストレーションでは被写体である石膏像のディテールが非常に高精細に再現されていることが分かる。このデプスカメラでは1mの被写体を撮像したときの測距精度は10mm以下を達成し、物体の3Dスキャンや顔認

証によるアンロックなどのアプリケーションに対して十分な精度を備える。また、被写体をレーザースキャンする方式のデプスカメラに対して、本デプスカメラでは距離画像をフレーム単位で一括に取得するため、ARゲームなどでも対応できる高フレームレート撮像が可能となっている。今後はスマートフォンだけでなく、パーソナルロボットや自動搬送機などのロボティクス分野、ファクトリーオートメーション分野への活用も期待されている。一方、ある程度の距離(例えば5m以上)の測距には、必要な信号強度を得るため消費電力が増加する課題があり、引き続き改善に取り組んでいく必要がある。

## 6. おわりに

ToFの動作原理及び2つの方式を解説し、裏面CAPDの開発成果の一端を紹介した。間接ToF方式を採用した裏面CAPD画素は従来技術に比べ、画素サイズが微細化し、測距性能も大きく向上した。一方で、デプスカメラやそれに用いられるセンサーの開発における課題(消費電力と測距レンジ/精度のトレードオフ、ソフトウェアの開発環境、一般消費者の認知)も明らかになってきた。昨今、デプスカメラへのニーズが徐々に拡大し、それに比してアプリケーションも増加してきている。特にVR(仮想現実)、AR(拡張現実)、MR(複合現実)の発展に向けて高度なデプスカメラはキーテクノロジーとなる可能性があり、今後も技術進歩が期待される。我々ソニーセミコンダクターソリューションズではテクノロジーの力で世界に感動を届け、スマートで価値あるソリューションを開発していく。



■ 図5. 試作したデプスカメラモジュールと撮像された深度画像