

TOF技術を導入するのに 絶好のタイミング

ハー・ラン・ドー・トゥー、ピエール・フェレール

3Dイメージング技術は数十年以上前からある技術だが、コンシューマーマーケットだけでなくマシンビジョンにおいても急速に発展してきた。高度なレベルのプロセス監視や自動化が求められるインダストリー 4.0化の動きや人間とロボットが共同で作業するような環境では、複雑な相互の位置関係を認識する必要があり、3Dビジョン技術導入が急がれている。この記事では、3Dイメージング技術の種類と、Time-of-Flight(光飛行時間測定、ToF)が現在最も有望視されている理由、さらにToFに特化した最新のCMOSイメージセンサの開発状況を紹介する。

3Dイメージングの概略

3Dイメージを取得するには、主に4つの方法がある。ステレオビジョン、ストラクチャード・ライトによる3Dイメージング、レーザ三角測量、そしてToFである。後ろの3つの方法は、“アクティブ”イメージング技術に分類されるもので、人工的な光源を使用する必要がある。

ステレオビジョン方式

ステレオビジョン方式では2台のカメラを設置し、物体を異なる視点から見た画像を取得する。キャリブレーション技術を駆使してカメラ間の画素情報を調整し、奥行き情報を抽出する。人間の脳が目視で距離を測ると似た仕組みである。従って、認知プロセスをシステムに組み込むのに膨大な計算処理が必要になる。

一般的なイメージセンサを使用したカメラを利用することでコストが抑えられる。ただし、センサの性能が良いほど(たとえば、高性能なセンサや、グローバルシャッターなど)システムのコストは高くなる。2つのカメラの配置によっても距離測定範囲が制限され

る。距離測定範囲によっては、より大きなサイズのモジュールが必要になる。

さらに、この技術では照明の悪条件化や光の変化などではうまく測定できず、測定は物体の反射特性に大きく依存する。

ストラクチャード・ライト方式

ストラクチャード・ライトによる方式では、あらかじめ定められたパターンの光を対象物に投影し、パターンのひずみ具合を解析して奥行き情報を取得する。フレーム時間の理論上の制約や動きによる被写体ぶれがなく、マルチパス干渉に対して影響が小さい。しかしアクティブな照明に合わせるために複雑なカメラが必要で、レンズとパ



図2 ストラクチャード・ライト方式(画像元:ケンタッキー大学、レーザフォーカスワールド誌)

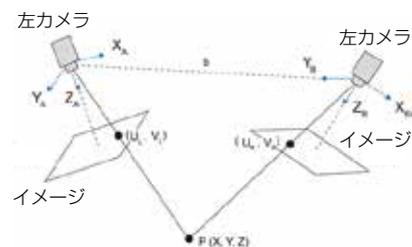
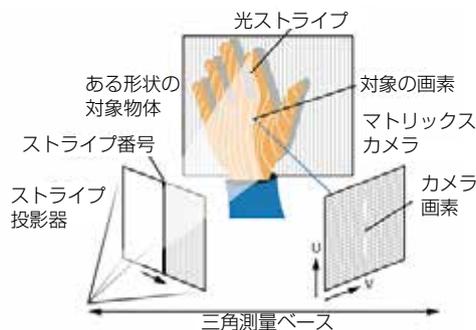


図1 ステレオビジョン方式 画像元: Tech Briefs

ターン投射器とを正確に安定させた位置に合わせる必要もある。屋外では、キャリブレーションの効果が失われるリスクや投影パターンが環境による光学的干渉の影響を受けやすいため、この方式は屋内使用に限定される。

レーザ三角測量方式

レーザ三角測量方式では、物体の高さに関連づけられた光線の幾何学的なオフセット量を測定する。これは物体のスキャンに基づいた一次元のイメージング技術である。レーザ光が当たる物体表面までの距離に応じて、レーザドットがカメラの視野内の異なる平面



で表示される。レーザドット、カメラ、レーザ光源が三角形をなすことから、この技術は三角測量と言われる。

一般的にこの測定には、高性能なレーザが用いられるが、これは変位と位置モニタリングの用途に高い精度、安定性、そして低温度ドリフトが要求されるためである。この方式のマイナス面としては、測定距離が近距離に限られること、環境光の影響を受けやすい、そしてスキャン用途に限られることが挙げられる。複雑なアルゴリズムやキャリブレーションも必要である。さらにこの方式は、表面が複雑な構造や形状をしている場合にも影響を受ける。

タイム・オブ・フライト(TOF)方式

距離測定時に、カメラと測定物の間で直接または計算により光子(光子)の飛行時間の二倍の時間を求め、目的の距離を測定するすべての方式がこの技術にあたる。この測定には、直接ToF測定法(D-ToF)と間接ToF測定法(I-ToF)がある。直接ToF測定法の概念は単純だが、複雑な時間分解装置が必要である。一方、間接ToF測定法はよりシンプルな方法(光源をイメージセンサと同期させる)で動作する。まず光パルスをカメラのシャッターと同じ位相で照射する。光子の飛行時間の計算は戻ってきた光パルス

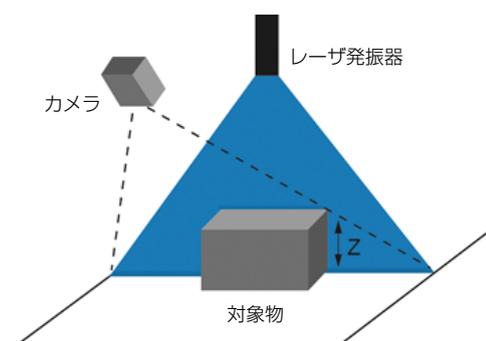


図3 レーザ三角測量法

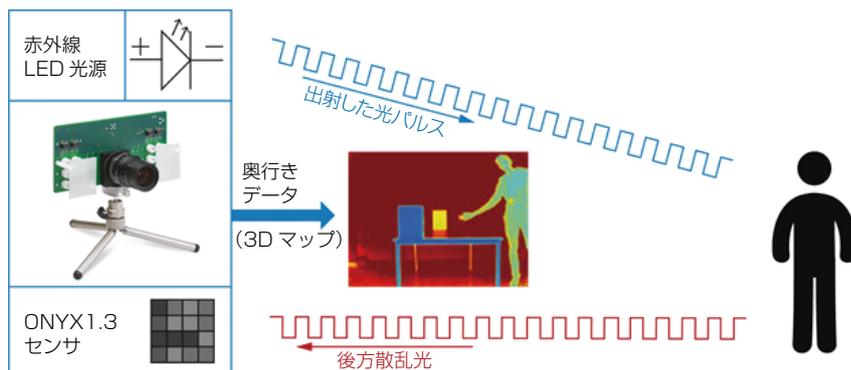


図4 タイム・オブ・フライト(TOF)方式の原理

の同期ずれ量を使用する。これにより、パルスの出射点と対象物との間の距離を推定できる。

この方式では、各画素における奥行きと強度を確実に直接測定できる。この画像は距離画像と呼ばれる。キャリブレーションは一度だけですむ。

各測定方式の比較

各測定方式の長所と短所を表1に示す。現在利用されている3Dシステムはほんの少数で、主に3Dステレオビジョン、ストラクチャード・ライトカメラ、そしてレーザ三角測量に基づくものである。これらのシステムは固定の作業距離で動作するもので、特定の検出範囲でのキャリブレーションに多大な手間がかかる。

上記の問題点を克服したToFシステムは、アプリケーションの観点からみればより多くの柔軟性を提供する。現状

では、センサの画素の複雑さと消費電力の高さにより、市販品では画像の解像度がVGA以下に制限されている。

ToF用CMOSセンサソリューション

ToF技術の持つ広範囲なアプリケーションの可能性の広がりにより、テレダインe2v社は1.3MP(メガピクセル)の解像度、1インチの光学フォーマットを採用した最初の3Dソリューションを開発した。このソリューションでは、専用の高感度高ダイナミックレンジのCMOSセンサをベースにしている。

このアプローチにより、グレースケールの画像と奥行き情報の同時取得が可能になる。

- ・業界最高水準1.3MPの距離画像の解像度。精度は±1cm、しかも高速である。
- ・高速移動する物体の3Dイメージが測定可能。最大解像度で30fpsの距離画像取得が可能。
- ・広範囲の3D検出が可能。測定レンジは、0.5mから5mまで。90dBの高ダイナミックレンジ(HDR)を実現。
- ・可視および近赤外領域の高感度センサを搭載。850nmでの量子効率(QE)は50%、夜間/昼夜の測定にも対応できる高ダイナミックレンジ。

表1 3Dイメージング技術「トップレベル」比較

	ステレオビジョン方式	ストラクチャード・ライト方式	レーザ三角測量方式	ToF方式
測定距離と範囲	中距離から遠距離 (2台のカメラの距離による)、2mから5m限定	短距離から中距離、数cmから2m程度まで計測可能	短距離、数cmに限定	遠距離、計測可能30~50cmから20~50mまで計測可能
解像度	中	中	多様	高
距離測定精度	中	近距離では中から非常に高い	非常に高い	中
ソフトウェアの複雑さ	高	中	高	低
リアルタイムの能力	低	低	低	高
光が弱い場合の挙動	弱	良	良	良
屋外光	良	弱	弱	弱から良
コンパクトさ	中	中	中	非常にコンパクト
材料コスト	低	高	高	中
全動作コスト (キャリブレーションの手間も含む)	高	中から高	高	中

・埋め込みの3Dプロセッシング:マルチROI、2つのウィンドウ、ピニング、オンチップヒストグラムのデータコンテキストなどの機能がある。

1.3MPの解像度で奥行き情報を取得できる性能を評価するための評価システムが用意されており、距離画像、あるいはポイントクラウドフォーマットにデータを出力することができる。

このToF評価システムは、図5に示すように、コンパクトな1インチ光学フォーマットのボードカメラシステムで構成されている。ボードカメラシステムは高感度の1.3MPセンサをベースに光源、光学系が搭載され、マルチ



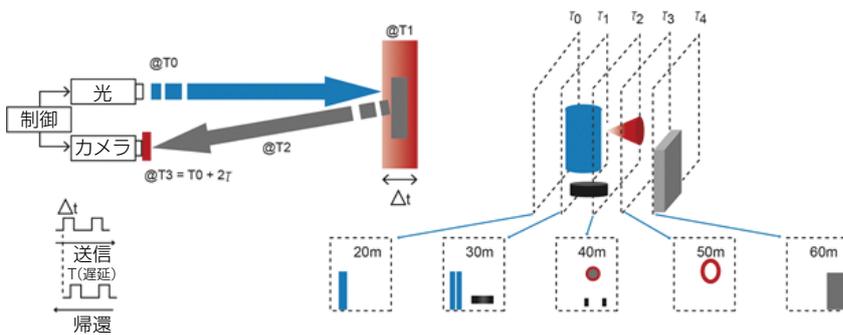
図5 ToF評価システム 画像元: テレダイne2v

ングレーション・オンチップ機能により、ToF原理による測定を1.3MPのフル解像度で実施することが可能である。

ToFに適応5T CMOSセンサを利用したアクティブイメージング

アクティブイメージングには、同じセンサを用いて、レンジゲーティングとToFの2つの能動的イメージング技術が実施可能である。

レンジゲーティングは、2つの要素の組み合わせから成り立っている。パルス状の光の波面と特殊な高速シャッ



@T0: 光パルス (Δt) 出射/カメラグローバルシャッター閉
 @T1: 光パルスが対象物に到達/カメラグローバルシャッター閉
 @T2: 反射光が対象物から帰還/カメラグローバルシャッター閉
 @T3 = T0 + 2 τ : 対象物からの反射光がレンズに入射/カメラグローバルシャッター開 (Δt)

図6 レンジゲーティングの原理

ターカメラである。光は対象物に向かって放出され、反射光が反射面から戻ってきたときにカメラの高速電子シャッターのタイミングを合わせて動作させる。レンジゲートイメージングでは、光とセンサの同期の調整により像平面距離を選択できる。光源の出力によっては、レンジゲーティング技術は長距離までほとんど制限なく動作する。

ToFは、レンジゲーティングとは違う方式で動作する。ToFシステムの光を直接測定が可能になることで、反射平面が置かれた場所の距離が算出される。ToFに基づくシステムでは対象物が近距離にあるため、高速動作が可能でグローバルシャッターを持つカメラが必要である。アクティブイメージングと異なり、ToFは特定の像平面に焦点を当てない。このため、対象範囲内で直接距離画像を生成することができる。

図6に示すように、レンジゲーティング画像取得は、カメラと光源を同期するシステムをベースとしている。カメラには、数百ナノ秒オーダーの非常に高速なグローバルシャッターがついている。まずカメラが t_0 でトリガーすると、光パルスが光源から放出される。しばらくすると(t_1 のとき)、光パルスは測定範囲に到達する。物体の

有無により、光は反射されたりされなかつたりする。反射される場合、 τ を光の帰還時間とすると、反射光はカメラに向かって 2τ の間進む。 $T3 = T0 + 2\tau$ のときに、カメラのシャッターが開き、そして反射光を取得する。この循環プロセスをフレーム時間中に数千回繰り返し、ノイズと分別できる十分な量の信号を蓄積する。距離の画像を生成するには、画像を複数の奥行きで掃引するか、あるいは遅延を調整する必要がある。

図7に示すように、イメージセンサの画素が同期した積分時間を生成するアプローチをグローバルシャッターと呼んでいる。もっとも単純な構造では、5トランジスタ(5T)画素と、関連する専用のフェーズドライバーを使用して駆動する。従って、信号の積分フェーズはすぐに実行されるのではなく、同期して少しずつ積分して蓄積し、連続して実行される。

テレダインe2v社では専用の技術を自社開発し、5トランジスタ画素とタイミング生成を1つおきのラインで行い、10ナノ秒とごく短時間の Δt を実現している。このことにより、時間分解能が大きく向上した。高感度でノイズの低い1.3MPのCMOSイメージセンサは、

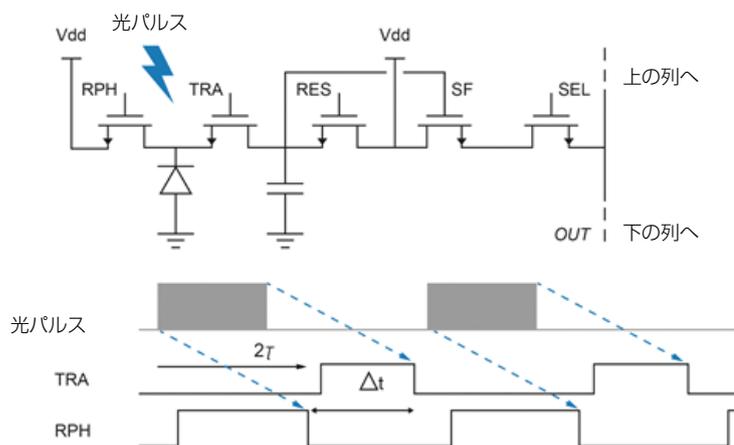


図7 グローバルシャッター画素

マルチ積分または「蓄積」モードを備えたこの機能が含まれている。ゲーティング「オフ」の時間の寄生光を除去することでシーンのバックグラウンドノイズを除去し、鮮明な画像を取得している。

BORA センサ タイム・オブ・フライト用の 最新 1.3MP センサ

ToFの性能を向上させるために、テレダインe2v社は、近距離レンジのシステムオペレーティング最適な新たなBORA 1.3MPのCMOS画像センサを開発した。

産業分野で利用できるよう、最適化されたマルチ積分モードを備えており、

光が少ない条件下でも優れた測定性能を発揮することができる。このセンサは、グローバルシャッターモードで使用できるが、精度とフレームレートの性能は既存のToFシステムと変わらない。

BORAセンサ、および評価キットは2018年3Qより出荷予定である。

既存センサとBORAセンサの性能比較を表2に示す。

総括

ロボットシステムやそのほかの自立マシンなどに視覚システムを適用することが主流となっている現在では、3Dビジョン(物体認識、精度)への期待が大きくなっている。3D技術には、いくつかの方法があり、それぞれには用途の要件により利点や制限がある。タイム・オブ・フライト(ToF)方式は現在、3Dビジョンにおいて非常に有望視されている測定手法であるが、弊社が開発した新世代の専用CMOS画像センサは測定性能の向上に大幅に寄与することになった。

著者紹介

ハー・ラン・ドゥー・トゥーは、テレダインe2v社プロフェッショナル イメージング事業部のマーケティングマネージャー。ピエール・フェレルは、同社イメージセンサエキスパート。
URL: www.e2v.jp
Email: japan.sales@teledyne-e2v.com

表2 ToFプラットフォーム性能比較

仕様項目	現行のテレダインe2v社デモンストレーター性能	BORA センサ付きテレダインe2v社デモンストレーター性能
測距画像解像度	1280 × 1024 (1.3MPm SXGA)	1280 × 1024 (1.3MP、SXGA)
照明光源電力(光学的)	QE=44%@850nm 6W	QE=50%@850nm 5W
測距範囲	[1m-5m]	[0.5m-5m]
精度(1)	+2cm	<+1cm
近距離での時間ノイズ(RMS)(2)	・7cm@SXGA ・3cm@VGA ・2cm@QVGA	・<3cm@SXGA ・<1.5cm@VGA ・<1cm@QVGA
フレームレート	15-20fps	30fps

(1)精度は、測定値と実際の値との差になる。

(2)時間的ノイズは、フレーム間の測定のRMS精度で、システムの繰返し精度を表す。