

3Dビジョン、検出及び測定用途への 高性能標準CMOSセンサーの使用について

著者：Teledyne e2v 3Dイメージング・マーケティングマネージャー、Ha Lan Do Thu

概要

3Dイメージングの技術は、数十年前に登場しましたが、最初の製品は2000年代において初めて商品化、最新のHDビデオカメラに使用され、多くのスタジオ映画が3Dでリリースされました。それ以降、この分野は速度、精度、3Dイメージング解像度の観点から飛躍的に進化し、消費者市場だけでなくマシンビジョン業界でも広範囲に採用されています。

Industry 4.0の革命に伴い、複雑な対象物の認識、寸法測定のための精度と距離測定の観点から2Dビジョンでは限界があり、また高度なロボットの使用など複雑な相互作用により、3Dビジョンの必要性が高まっています。

3Dビジョンは、2Dビジョンでは限界がある高精度の品質検査、リバースエンジニアリング、オブジェクトの寸法測定に不可欠であり、FA市場におけるロボット/機械システムの自律性と有効性を向上させます。加えて、ビジョンシステム誘導ロボティクスの使用が増えつつあり、より優れた遠隔誘導、障害物認識、正確な移動のためにも3Dビジョンが必要です。

3Dビジョンは、危険な状況を防止し、解決するシステムやロボットまたはオブジェクトと人を区別できる監視システムを使用し、工場の労働者を人間と機械の集中的な相互作用から保護します。

3Dビジョンは、エンドユーザー向けに安全でパフォーマンスが高く、より効果的な支援システムを作成する能力で社会に貢献しています。たとえば、3Dビジョンは、自動運転車や協働ロボットなどの高度な自動車支援ドライバーシステムにも使われています。

バーコードとOCRのスキャンには、2Dイメージングが定着していますが、これはブロックチェーンの採用によって展開が拡大している工場や倉庫、配送センター、輸送の目覚ましい成長を推進しているeコマースブームにおいて不可欠な役割を果たしています。Teledyne e2vには、[Topazセンサーファミリー](#) などのコードスキャン専用の独自の2Dイメージング製品があり、高スキャン速度と高信頼性を実現する性能と機能を備えています。

3D画像を取得するために、いくつかのテクニックとテクノロジーが存在します。主なテクニックとテクノロジーは次のとおりです。

- ステレオビジョン - 2台のカメラが、オブジェクトの異なる視点からマウントされます。カメラ間のピクセル情報が調整され、かつ深度情報を抽出するためにキャリブレーション・テクニックが使用されます。これは、私たちの脳が視覚的に距離を測定する方法に似ています
- ストラクチャードライト（構造化光） 既知の光パターンがオブジェクトに投影され、パターンがオブジェクトの周囲で歪む方法によって深度情報が計算されます
- レーザー三角測量 レーザー三角測量システムを使用すると、カメラとレーザー光源をペアリングすることで3次元測定値をキャプチャすることが可能になります。レーザーとカメラの間の既知の角度オフセットにより、システムは三角法を使用してレーザーラインの幾何学的オフセット（値はオブジェクトの高さに関連します）を測定します。このテクニックは、オブジェクトのスキャンに基づいています
- タイム・オブ・フライト（ToF） 光源はイメージセンサーと同期され、光のパルスとセンサーに戻る反射光の間の時間に基づいて距離を計算します

それぞれの技術には長所と短所があるため、対象となるアプリケーション（特に距離範囲と深度精度の要求）により、適している技術が異なることもあります。

相対比較は下記の表1をご参照ください。

	ステレオビジョン	ストラクチャードライト	レーザー三角測量	タイム・オブ・フライト (ToF)
距離	制限あり (2m~5m) 光源と組み合わせること によって改善可能	スケーラブル	短距離、制限あり (cms~1m)	スケーラブル (<50cm~20~50m)
深度精度	低 (cm) 光源と組み合わせること によって改善可能	高 (μm ~ cm)	超高 (μm)	中 (mm ~ cm)
応答時間	中速	低速	低速	高速
低光のパフォーマンス	高	中	高	低
明るい光のパフォーマンス	弱	光源依存性 (赤外 光または可視光)	光源依存性 (赤外光 または可視光)	良好 (赤外光、レーザ ー光、LED)
明るい光のパフォーマンス	良好	中	中	良好
光条件の変化対応	弱	中	中	良好
コンパクト性	低	低	中	高
製造およびキャリブレーション対応	高	高	高	低
材料費	低	高/中	高/中	中
視野 (FoV)	制限あり (固定およびキ ャリブレーション)	制限あり (固定および キャリブレーション)	制限あり (固定およびキ ャリブレーション)	スケーラブル (可能な限り大きな FoV、センサーの解像 度、距離依存性)

表1.3Dイメージング・テクニックの「トップレベル」の比較

工場の自動化や倉庫で使用されるビジョンシステムのごく一部を表していますが、現在、3Dステレオビジョン、構造化光カメラ、またはレーザー変位に基づいて展開される3Dシステムがますます増えています。これらのシステムは、固定された作動距離で動作し、特定の検出領域に対してかなりのキャリブレーション作業を必要とします。タイム・オブ・フライト・システムは、これらの課題を克服し、アプリケーションの観点からより柔軟性を提供しますが、それらのほとんどは依然として画像解像度に制限があります。

Teledyne e2vは、ラインスキャンカメラとエリアスキャンセンサーの両方でマシンビジョンの成功実績があり、3Dイメージング専用の独自のプラットフォームを構築しました。これは、視覚誘導ロボティクス、ロジスティクス自動誘導車両 (AGV)、工場の監視と安全性、携帯スキャナー、ならびに屋外アプリケーションなどの最新の産業用アプリケーションをサポートします。Teledyne e2vは、顧客のアプリケーション要件を満たすいくつかの3D技術に基づいた提案をしています。

生産性向上の為、高速で高精度な検査が可能な2D、3Dビジョン

製品の検査と在庫のすべてのサイクルにおいて生産性を高め、時間と収益を獲得するために工場は自動化されます。これらの要因を最適化するには、ビジョンシステムを備えたマシンがより高速でより優れたパフォーマンスを発揮する必要があります。

2Dビジョンには制約がありますが、3Dビジョンは、より高精度の品質検査、リバースエンジニアリング、またはオブジェクトの寸法測定のために広く展開されます。レーザー三角測量テクニックは、3軸に高い解像度が要求されるため、これらのタイプのアプリケーションで一般的に使用されており、非常に高速なセンサーが必要です。

3D Inspection



Measuring Shapes



Volume Inspection (Logistics)



1 レーザー三角測量アプリケーションの例

Teledyne e2vは、10年以上にわたり、3Dレーザー三角測量の市場リーダーと協力してカスタムセンサーを開発してきました。2019年より、Teledyne e2vは、高速測定と厳しい検査の要件を満たす高速生産ラインに適したCMOSセンサー [Flash](#) を販売しております。

Flash は、4,096x1,024ピクセルと2,048x1,024ピクセルの解像度、1,800fpsと1,500fps（8ビット）のフレームレート、標準の光学フォーマット（APSのようなオプティクスとCマウント）にて、読み出し速度が、61.4Gbpsと25.6Gbpsが実現できるよう組み合わせられています。

カメラメーカーによって簡単かつ費用対効果の高いインテグレーションを可能にするように設計された新しいセンサーには、次のような高い柔軟性を可能にする幅広いアプリケーションベースの機能が含まれています。

- 最大100dBのHDRモードを使用して、同じ画像内の高反射面と暗い領域の両方の測定と検査を可能にする最大100dBの高ダイナミックレンジモード
- 高さ測定におけるプロファイリングレートとレンジ/解像度間の完全なトレードオフを可能にする複数の関心領域モード
- 柔軟性と環境条件へのリアルタイムの適応を可能にするいくつかのパラメータのフレーム間「ホット」変更モード
- 生産ラインの速度に完全に適応できるさまざまなトリガモード

産業市場の主なメリットは次のとおりです。

- 2kまたは4kの水平解像度と組み合わせられた非常に高いフレームレートによるより高い生産性を実現します
- 費用対効果の高いシステム - Flashファミリは、必要な垂直解像度（標準のフォームファクタと比較して）だけで高い水平解像度を提供し、シリコンサイズを削減して、センサーとシステムのコストを削減します
- シングルキャプチャHDRなどの機能により、環境条件や生産ラインの速度にリアルタイムで適応できるなど高い柔軟性を持ちます

工場の自動化と高効率化を実現する2D、3Dビジョン

工場自動化と効率を向上させるために、自律誘導ロボットの使用が増えています。工場や倉庫の自動化がますます進むにつれ、作業ステーションは人間と機械の間で集中的に連携し、予防と安全性をさらに不可欠なものにさせています。

このような予測不可能な作業環境では、タイム・オブ・フライト（ToF）システムは、リアルタイムの3D情報と意思決定能力、および高速シーン内のオブジェクトや人物を検出する能力により理想的です。タイム・オブ・フライト・テクニックには、直接タイム・オブ・フライトと間接タイム・オブ・フライトの2つの方法があります。

- 直接タイム・オブ・フライト - このシステムは、光がオブジェクトに当たって跳ね返るのにかかる時間を直接計算することにより、距離を測定します
- 間接タイム・オブ・フライト - このシステムは、光波がオブジェクトに放出されたときと跳ね返ったときの光波の位相差を計算することによって距離を測定します。これにより、システムは3Dマップを作成できます

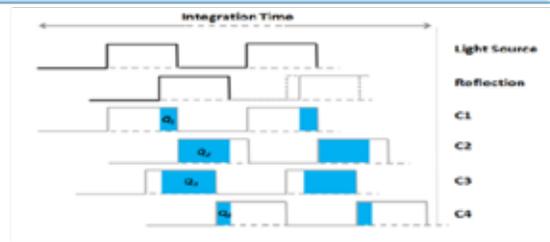
Indirect ToF – Phase shift

Advantages

- Full speed (with multiphase pixels)
- Background subtraction, compatible with outdoor
- Low software complexity

Weaknesses

- Aliasing



Direct ToF – Pulse reconstruction

Advantages

- No aliasing
- No wrong distance measurement (due to mist, dust, multipath reflections...)

Weaknesses

- Tough speed specifications (light pulses are ~ns)
- Computational complexity relatively high

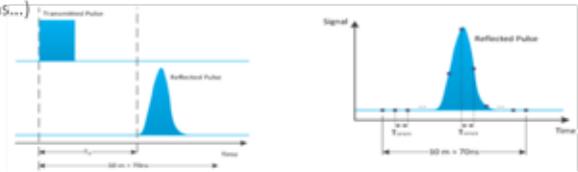


図2直接ToFと間接ToFの長所と短所

Teledyne e2vは、カスタムセンサーを介した直接タイム・オブ・フライト・システムと、標準製品の完全なポートフォリオを介した間接タイム・オブ・フライト・システムの両方のソリューションを提供します。

Teledyne e2vは、タイム・オブ・フライト・テクノロジーとソリューションに10年以上取り組んできており、自動化ロボティクス自動車、および監視のリーダー向けに開発されたカスタムセンサーの実績に基づく革新的なToFピクセルを搭載、強力な機能を備えています。

当社は、お客様が求めている次の主な差別化を備えた標準ToFセンサーを設計しました。

- 大きな視野率と高い角度分解能を可能にする高空間分解能センサー
- モーションアーチファクトのない高速でリアルタイムの3D検出と、フル解像度での30fpsを超える深度マップ
- 短距離と中距離の両方、長距離の検出と管理
- あらゆる条件での超信頼性の距離測定：優れた精度と周囲光条件および複数のシステム操作に対する堅牢性

複雑な環境操作を処理するためのタイム・オブ・フライト (ToF)

他の3Dテクニックと比較して、ToFシステムは高速、シンプル、安価で、中距離および長距離で優れた3Dパフォーマンスを発揮します。

前述したように、ToFシステムは非常に柔軟性が高いため、セットアップ（工場でのキャリブレーションなど）に応じてキャリブレーションする必要がないため、システムを移動中のロボットに取り付けることも可能になるでしょう。このシステムは、あらゆる運用セットアップに適合させることもできます、これによりToFシステムを複雑な環境や条件において運用するのによく適したものにします。

以下は、タイム・オブ・フライトが最適な工場および倉庫アプリケーションの例です。



図3 ToFアプリケーションの例

- ボックスまたはパッケージのサイズとボリュームの測定-ToFイメージングシステムは、最も効率的なパレタイズ化またはコンディショニング（パッキングとトラック積載の最適化）を達成するため、または効率的な製品ラインのために、ボックス/パッケージのサイズとボリュームを測定できます
- インテリジェントで効率的な倉庫管理のための商品識別 - ToFイメージングシステムは、2Dの従来の画像処理よりも短い時間でパッケージの商品または寸法を検出します
- ピックアンドプレース - ToFイメージングシステムは、非常に高いレベルの精度で、従来の2D画像処理よりも短時間で、正しい位置に、ピックアンドプレースする対象の正しいオブジェクトを検出および識別します

ToFシステムが、他の3Dテクニックと比較して優位であるアプリケーションとしてロボットの工場環境にて自律的かつ安全にナビゲートするのを支援します。



図4ロボットナビゲーション応用例

今日、ほとんどのナビゲーションシステムは、従来のLidarスキャナーを使用してオブジェクトを検出しますが、いくつかの短所があり、間接ToFなどの代替テクノロジーを使用したソリューションがますます出現しつつあります。従来のLidarスキャナーと比較して、間接ToFシステムは、応答時間が速く、モーションアーチファクトのないリアルタイムの画像情報を提供できます。また、機械部品が含まれていないため、より堅牢でコンパクト、かつより少ない電力とより少ない計算を使用するソリッドステート設計であるため、より安価です。

	従来のLidar	間接タイム・オブ・フライト (ToF)
距離	長 (最大 70m~100m)	スケラブル (短距離: 30~50cmまたは5m~10m; 長距離: >10m~100m)
精度	中:レーザースキャニング、mm	中: mm, cm
解像度	低	中-高:最大 1.3MP:1280x1024 (最先端技術)
速度	低速:20 fps	高:3D 深度マップ用 >60 fps
2D および3D画像	NG:画像なし、計算による座標再構成	OK:2Dグレースケール画像 (CMOSセンサー) +3Dマップ
モーションアーチファクトの除去	NG:オブジェクトの単一点スキャニングを行なうと、アーチファクトが発生したり、オブジェクトが見落とされたりする可能性があります	OK:移動するオブジェクトを瞬時に (1フレームで) キャプチャ
視野 (FoV)	水平方向に広い (最大360° のレーザー スキャニング) 垂直方向に狭い	中: センサー解像度、精度、照明に応じて拡大可能 (> 120°)
応答時間3D マップ	低: 3D 再構成前スキャニング	高視野全体におけるシーンのリアルタイムキャプチャ
システムの省スペース化	中	高: ソリッドステートシステム
システムの堅牢性	中: 機械部品	高: ソリッドステートシステム
屋外環境に対する堅牢性 (光量の変化、太陽光など)	高	中
価格	高価	安価

表 2 従来のLidarと間接ToFの「トップレベル」の比較

前述のアプリケーションでは、ToFシステムが多くの課題に取り組んでいます。このシステムは、短距離と中距離の両方、10メートルから始まる長距離を処理する必要があるとともに、モーションアーチファクトがない高速である必要があります (現在、市場に出回っているほとんどのToFソリューションは、5~6メートルまでの短距離に焦点を合わせています)。加えて、ロボットが工場/倉庫内全体を移動し、同じエリア内の他のロボットと干渉しないで動作する必要があるため、システムはいくつかの変化する光条件にさらされる可能性があります。

これらすべての困難な状況に対処するために、Teledyne e2vは2020年7月に Hydra 3Dセンサーを導入しました。このクラス最高のToFセンサーは、革新的なピクセルと非常に柔軟な構成を備えており、非常に高いダイナミックレンジを実現します。これは、ToFアプリケーション (オブジェクトの反射率と距離の両方の広い範囲の組み合わせ) に非常に大きなメリットがあります。

Hydra3Dは、10µmの3タップ最先端ピクセルを組み込んだ832 x 600ピクセルの解像度を備えており、高深度の解像度、高速、柔軟な動作条件など、最高レベルの3Dパフォーマンスを実現します。

SENSOR FEATURES

Spatial resolution of 832 x 600 pixels
in both 2D and 3D
LGA Ceramic package 24 x 22 mm
Compatible with 2/3" optics

Excellent temporal precision due to fast
transfer time as low as 20 ns
Three-tap, cutting-edge pixel
Multi-system management feature
embedded on-chip
More than 30 fps depth map

Short and long-distance range handling (>10 m)
High flexibility to trade-off distance range,
object reflectivity, frame rate, etc. combined
with powerful non-destructive readout HDR
Robust to ambient light and challenging
environments

CUSTOMER BENEFITS

**Large Field-of-View with good angular
resolution in a compact sensor**

**Real-time decision making combined
with reliable 3D detection, without motion
artefacts and interference with
other systems**

**Outstanding adaptability to all
environments, including outdoors, with
very high dynamic range management**

Hydra 3Dには、3D画像の構築に必要な3つのフェーズを同時に取得できる革新的なマルチタップピクセルもあり、モーションアーチファクトなしで動きの速いシーンの正確な3D情報をキャプチャできます。

3タップピクセルは、他の間接ToFテクノロジーで必要とされる複数のフレームではなく、1つの単一フレームで3Dマップを再構築するために必要なさまざまなフェーズの情報をキャプチャして保存する機能を提供します。これは、動きの速いシーンにおいてモーションアーチファクトを回避するのに特に強力です。これは、2Dビジョンにおいてグローバルシャッターモードをローリングシャッターモードと比較すると類似しています。

3タップのピクセルは、単一の光パルス列ですべてのフェーズをキャプチャでき、光パワーを最適に利用します。

説明した例では、3つの画像が必要です（2つのフェーズ+バックグラウンド）。1タップピクセルセンサー（現在最も一般的）を使用する場合は、複数のフェーズを順番に露光して読み取る必要があります。フェーズ0を取得するために1回ライトを発射し、次にフェーズ1を取得するためにもう一度ライトを発射し、次にライトなしで3回目の取得を実行し、バックグラウンドを取得するために読み出します。その後初めて、3D画像を計算します。したがって、移動するオブジェクトがある場合、オブジェクトは各キャプチャ内の異なる位置にあるため、モーションアーチファクトが現れます。また、ライトはフェーズごとに1回ずつ、2回ショットする必要があります。

マルチタップピクセルセンサー、たとえば上記の場合は3タップピクセルを使用して、すべての露光と読み出しがインターリーブされた方法で行われるため、すべてのフェーズが実質的に並行して取得され、モーションアーチファクトが最小限に抑えられます。さらに、単一の光パルス列で位相をキャプチャできるため、平均光パワーが低下します。これは、目の安全性と消費電力の両方の観点から重要です。

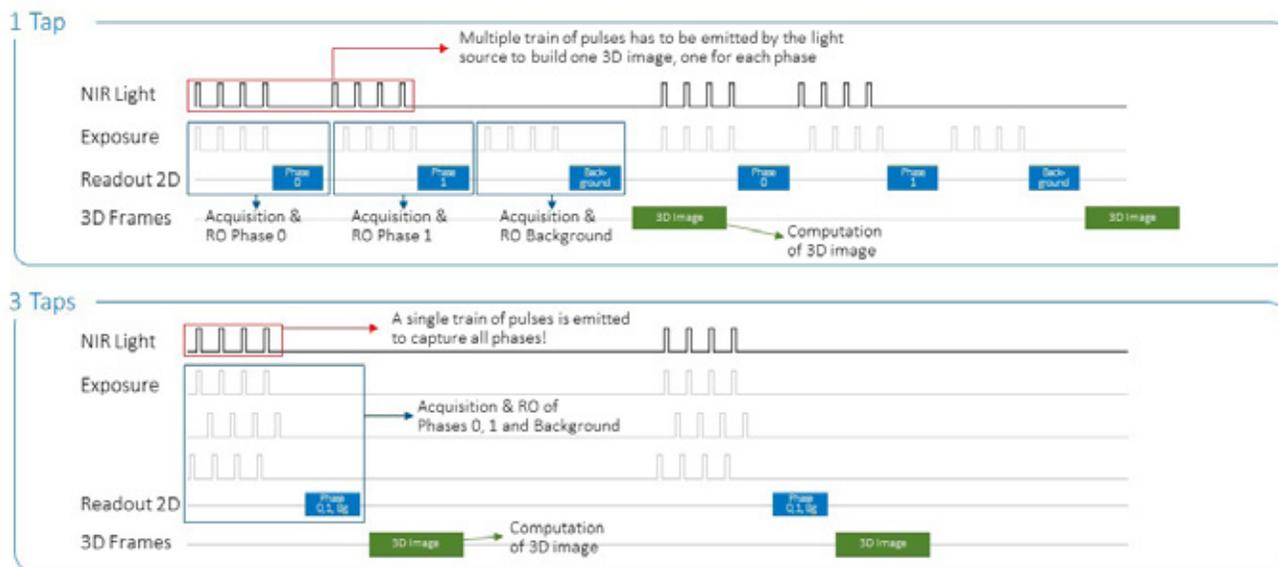


図5ワンタップピクセルとスリータップピクセルの説明図

モーションアーチファクトとモーションブラーの違いは、2Dビジョンのローリングシャッターとグローバルシャッターの違いに類似していることに注意してください。モーションブラー（動きボケ）は、高速で移動するオブジェクトをわずかに歪める可能性があります、誤った情報を提供することはありません。一方、モーションアーチファクトは、オブジェクトの外観を大幅に変えてしまい、誤った測定を提供する可能性があります。これは、一部のアプリケーションで大きな影響を与える可能性があります。

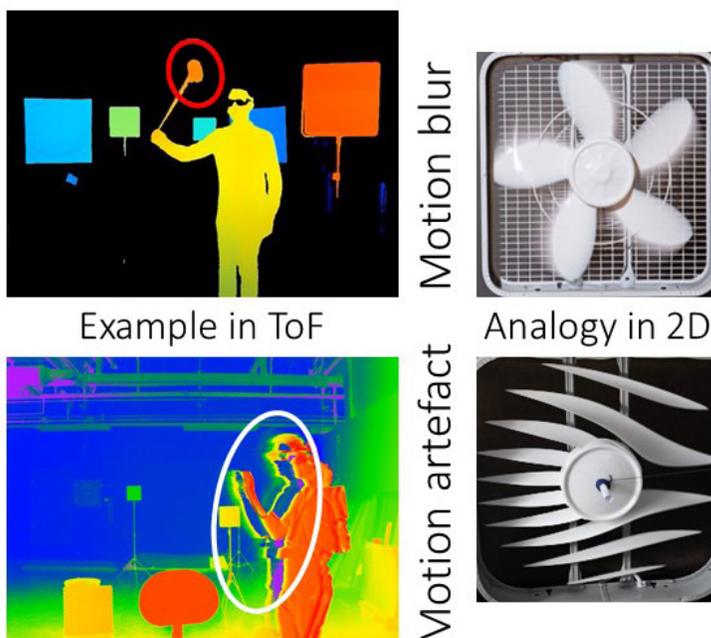


図6モーションブラーとモーションアーチファクト

Hydra3Dセンサーのその他の利点は、構成の柔軟性と複数のオンチップ機能です。たとえば、高いフレームレートと組み合わせられた強力なオンチップHDR機能、および柔軟な構成により、距離範囲、オブジェクトの反射率、フレームレートなどとの間のトレードオフを行なうことが可能になるだけでなく、周囲光に対してもロバストになります。単一のトリガーにおいて、Hydra3Dは一連の取得と読み出しを開始し、簡単にプログラムできるため、各アプリケーションの条件に適応する非常に強力なツールになります。複数の測定シーケンスにより、さまざまな距離範囲で、さまざまな精度で、または2Dキャプチャを行なうためにすべて単一のトリガー内で測定が実行可能になります。さらに加えて、センサーを停止することなく、ライブでシーケンスをフレームごとに変更できます。

ロバストな複数のToFシステム操作のための独自のオンチップ機能により、同期されていないシステムが互いに干渉することなく同時に動作することが可能になります。ToFはアクティブな照明を必要とするため、1つのシステムは、同じエリアで同時に動作する別のシステムから放出される光によって引き起こされる干渉に悩まされる可能性があり、誤った測距につながる可能性があります。

Hydra3Dセンサーの主な特徴：

SENSOR CHARACTERISTICS				
Resolution – pixels	832 x 600			
Aspect Ratio	4 : 3			
Size Type	2/3" (10.3 mm diagonal)			
Pixel Type / size – square	Three-tap global shutter – Gated global shutter / 10 μm			
Maximum frame rate @ 12 bits	416.7 fps ¹			
FFxQE – %, @ 850 / 940 nm	37 / 19 ²			
Transfer time – ns	Down to 20			
Readout noise – e- RMS	2.5			
Linearity: L _{Emin} / L _{Emax} – %	-1 / +1			
	Node A	Node B	Node C	A+B+C
Full well capacity – e-	10,000	10,000	10,000	30,000
Temporal noise – e-	10	10	10	17.3
Dynamic Range ³ – dB	60	60	60	64.7

1. Considering only readout. Exposure is not concurrent
2. In 2D greyscale mode
3. Single readout, 2D greyscale mode

CCD採用時代のタイム・オブ・フライト

タイム・オブ・フライト画像処理は、従来の2Dビジョンシステムよりもはるかに複雑です。これには、アプリケーションの要件に完全に適合するために、いくつかのパラメーター（センサーまたは視野、工場内キャリブレーション、特定のセンサー構成など）に依存するオプティクスとライトシステムが含まれます。

セットアップの複雑さはセンサーを統合するためにシステムレベルで多大な労力を必要とし、アプリケーションのセットアップを習得する必要性が重要になるため、タイム・オブ・フライトセンサーをCCDセンサーと比較することがよくあります。

CMOSセンサーに関する専門知識を踏まえて、かつお客様と緊密に連携することから、Teledyne e2vはToFシステムに固有の課題を評価する確かな経験を蓄積しています。お客様が市場投入までの時間を短縮することを支援し、最高のToFシステムをお客様のアプリケーション要件に適合させるために、CMOSイメージセンサーやカスタマイズされたカメラモジュールから完全なシステム・インテグレーション・サポートまで、さまざまなテクノロジーソリューションを提供します。これには、当社の評価プラットフォームのリファレンスデザイン、光とオプティクスの評価、目の安全性の考慮、モデル化とシミュレーション、アルゴリズムとキャリブレーションが含まれます。



図7システムレベルに至るまでのTeledyne-e2vToFの専門知識と機能

まとめ

工場や配送倉庫の自動化が進むにつれ、効果的で自律的な産業システム、特に誘導ロボットや機械の3Dビジョンに対するニーズが高まっています。

(オブジェクト認識、ナビゲーション、高速および高精度のため)。いくつかの3D技術が存在し、それぞれに長所と短所があり、アプリケーションの要件により要求内容が大きく変わります。これらの技術に対し、すべて要求は厳しく、複雑な機能を備えた高性能センサーが必要となります。

Teledyne e2vは、市場リーダーとともに成功した実績があり、3Dビジョンを含む幅広い独自のソリューションを提供して、工場の自動化、ロジスティクス、計測アプリケーションなどの産業市場にサービスを提供しています。当社の高性能CMOSイメージセンサー（最先端ピクセルと特殊機能を組み込んだ）に関する当社独自の専門知識と、ToFシステムでの10年以上の確かな経験により、お客様が抱える3Dビジョンの課題を克服できるようご支援いたします。