

## TOF 距離画像カメラの実力

はじめに

TOF とは Time Of Flight の省略形であり、秒速 30 万 km で進む光の飛行時間を計って、距離を計測するという意味である。決して簡単な技術ではないが、高速光センサーと半導体レーザー、LED など発光素子の技術進歩が TOF を身近な存在にした。ホームセンターに行けば、レーザー距離計として数十メートル先までを数ミリの精度で計れるコンパクトな機器が数万円で売られているのを目にする。この距離計を 2 次元のイメージで捕らえるようにしたものが、TOF 距離画像カメラである。最も実直な方法は、MEMS ミラーなどでレーザービームを 2 次元スキャンし、3 次元の画像を得る方法だろう。実際にその方式での実用例も多く、地下鉄のホームドアの安全確保に使われていると聞く。しかしながら、この方法では、コスト的にも走査時間的にも自動車や家電機器に広く利用されるようにはなりそうにない。そこで考えつくのが、CCD のようなイメージセンサーの各画素に TOF の機能を埋め込むことである。研究レベルでは 1998 年頃に各国でセンサーが開発され、2004 年頃に最初の製品が発表された。2006~8 年頃の画像関連の展示会ではスイス、独国、米国の各社が競って製品を展示し、国内からも数社が参考出品を始めた。当社とスタンレー電気が共同研究をスタートさせたのは 2006 年からで、全くの後発であるが、単に TOF を作るということではなく、TOF センサーは外乱光に弱いという短所を克服し、夏の炎天下でも使える TOF センサーを標榜した。試行錯誤の結果、2009 年にこの目標をクリアした距離画像カメラを発表した。今も画像品質や感度の向上に努力を続けている最中であるが、市場の要求を満足させるものの開発は簡単ではない。本稿では TOF 距離画像カメラの実体とそれが抱える課題、新技術の紹介、市場の要求、開発動向などを述べようと思う。

## TOF 距離画像カメラの実体と課題

TOF カメラに使われるイメージセンサーの方式は各社各様であるが、どれもナノ秒オーダーの光の飛行時間を 1 発で直接計測するのではなく、高周波で強度変調された連続照明の位相遅れを検出する方法が採用されている。原理を示した図 1 を参照して欲しい。光源は例えば 10MHz で変調し、対象物を照明する。対象物からの反射光はその距離に応じた遅れ時間をもってイメージセンサーに到達するので、変調光の位相角はシフトする。各画素が変調周波数と同期した正弦 (SIN) 成分と余弦 (COS) 成分の検出機能を備えれば、一定時間、露光した後に、それら成分を読み出し、計算処理 (ARCTAN) で位相角を求め、距離に変換することで目的が達成できる。この位相検出の方法には各社独自の技術が使われている。米 CANESTA 社(現在はマイクロソフトに買収)は電圧変調フォトゲート、独 PMD 社は光電変調混合素子、スイス META 社は電子移動制御素子、パナソニックは多段 CCD 転送、当社の 3 段 MOS ゲート素子 (文献 1) などである。先行メーカーの素子ほどシンプルな構造で性能が良いと言うと当社は不利であるが、逆に、先行メーカーのものはどれも

外乱光に弱いという決定的な問題があるために、当社がスタンレー電気と共に開発に踏み切ったのも事実である。開発当初、おそらく、屋内環境での画質で比べれば、他社が有利で我々のカメラの画質は見劣りしたが、屋外では立場は逆転した。なぜなら、撮影できるのは我々が開発したカメラのみだったからである。今では、各社とも屋外撮影を意識した製品を発表しているので、単純な比較が出来ないが、今のところ、夏の炎天下では我々が開発したカメラに敵はいない。

当前のことではあるが、TOF カメラはイメージセンサーだけではなく、高周波で変調された強力な光源が実装されている。TOF カメラを生かすも殺すも、これを理解することが最も重要なポイントである。1m 先の対象物にカメラから発した光がイメージセンサーに戻るまでの時間は、光速の秒速 30 万 km から計算すると、僅か 6.7nsec である。1cm の精度を得るために必要な時間分解能は 67psec となる。さらに、光源から発した光は、対象物に届くまでに距離の 2 乗で減衰し、センサーに戻って来る反射光はその数パーセントに過ぎない。つまり、弱い光の極僅かな時間ズレを計測するのが TOF カメラの役割であるが、前述したように実際には位相検出で行なうため、時間分解能は輝度の S/N 比に帰着され、1m において、1cm の精度を確保するためには、40db 以上の S/N が要求される。しかも、使用される環境には蛍光灯のような商用電力周波数で変調された光や太陽光、車のヘッドランプなど強烈な外乱光に溢れていて、40db の確保は容易ではない。我々の開発したセンサーには外乱光を除去する回路（文献 2）が実装されているが、本質的に外乱光の影響を減じるには光源を強くすることが必須であり、我々のセンサーを実装しスタンレー電気が開発した屋外向け TOF カメラ P401（図 2）は LED 光源が全電力の 80% を使い、その放熱のために筐体寸法が決まっている。TOF カメラの最大の課題は、外乱光に打ち勝つ強力な光源を実装し、その電力と熱発生を解決する対策である。

それだけでは解決が困難な課題として、光源からの距離に従い戻って来る反射光が減衰するために生じる課題がある。例えば、30cm 程度の近い対象物と 3m 程度の遠い対象物から反射して来る光量は 100 倍程度の差があり、極僅かな画素間クロストークが遠方の対象物の距離計測に大きく影響し、実距離よりも短く計測されてしまう。また、対象物の反射率の影響で計測距離が狂うということが知られている。この原因はイメージセンサー感度の非線形性が考えられる。具体的には、同じ距離にある高反射対象物の明るい光と低反射対象物の暗い光とでは、本来同じ位相のはずであるが、明るい物は位相信号が過小評価されされる。つまり、高反射物は低反射物より近いと判定される。同じことが、明るい背景光下での撮影でも起こり、非線形性に由来し、位相差が実際より過小評価されて、遠方の物は実際の距離よりも近くに、近いものは実際より遠くに評価されてしまうという不可解な現象が生じる。定量的な距離精度を必要とする応用ではこれら課題を補完するような解決策を講じる必要がある。

もう 1 つの TOF 距離画像カメラの課題は、その価格である。開発する立場からすれば、簡単な技術ではないので、安価であることはあまり期待しないようにと言いたいところで

あるが、後述するように、低価格化が時代の要求である。その要求に応えるため、当社はベルギーの CAELESTE 社とライセンス契約を結び、新しい方式（文献 3）のセンサーを開発した。これは光電子をナノ秒の時間分解能で破棄するか、回収するかを選択する基本機能を各画素に集積したシンプルな撮像素子である。この方式の最大の利点はセンサー構造が簡素であるため高解像度が可能なこと、製造プロセスが安定で歩留まりが高いこと、カスタム設計が容易なことである。試作品（図 3）では未だ十分な性能に達してはいないが、省電力、超小型化、低価格の実現が可能であることを示すことができた。詳細については、当社 WEB にて確認願いたい。

## 市場の要求

展示会などでの質問や引き合い案件などから見ると、距離精度に対する要求、空間分解能や画角に対する要求、計測距離に関する要求、屋外使用に対する要求などが多い。これを具体的な応用別に整理したものを表 1 に示す。

表 1 距離画像カメラの応用例と要求仕様（当社調べ）

	具体的な応用	距離精度 (cm)	解像度 (画素)	距離 (m)	環境	他の要求	目的
1	自動車の前方モニタ	5~10	20K	50	屋外	高信頼性	衝突防止
2	スマートエアバッグ	1~3	20K	1	車内	小型	子供の識別
3	自動車の後方モニタ	1~2	100K	2	屋外	小型	接触防止
4	駐車場の防犯カメラ	5~10	20K	15	屋外	屋外設置	実寸法の計測
5	店舗の人数カウント	5~10	10K	5	屋内外	自動計数	複数人の往来
6	ATM の防犯カメラ	5~10	10K	3	屋内外	自動検出	覗き見の防止
7	自動ドア監視	5~10	10K	5	屋内外	自動検出	子供の保護
8	ジェスチャー操作	1~3	30k	2	屋内	高信頼	非接触操作
9	ジェスチャー操作	3~5	30k	2	屋内外	安価	自販機、案内板
10	ロボットのセンサ	0.2~0.5	300k	5	屋内	小型高速	高度な自動制御
11	鋳物工場のセンサ	0.1~0.3	1M	1	暗	移動中計測	NG 品識別
12	実装工場のセンサ	0.1 以下	5M	0.3	暗	移動中計測	NG 品識別

この表から分かるように、TOF の活躍が期待される分野は、自動車からロボットまで幅広く、目的に依存して、要求される仕様も大きく異なる。

1 の自動車応用は、自動車各社が様々な方法で古くから進めているが、TOF 方式を使う場合、必要な計測距離が長く、高い信頼性が要求されるため、光源はレーザー以外に考え

られない。言い換えると、自動車がレーザーを照射して走っても危険がないと確認されるまでは実現できそうにない。信頼性規格や法規的な問題があるので、本格的な自動車応用は未だ時間がかかる。

2~4の応用例では、一般の監視カメラでは、遠くの物は小さく、近くのもの大きく写るので、対象物の実寸法は分からない。ところが、TOFの距離計測能力を使うと、対象物の実寸法が光学幾何の応用で簡単に計算できることを利用する。これらは、実にベタな応用であるが、他の例と比較して桁違いに市場サイズは大きい。社会的なインパクトとしても、安全に関わるだけに大きい。5~7の応用例は、天井などに設置すると、人の存在を距離と大きさから識別できるので、複雑な画像処理を要せずに自動化が可能であると期待されている。おそらく、これらの例以外にも、距離画像を用いると画像処理の負担が大幅に軽減されるという応用は相当あるように思う。8の医療分野や食品産業での触らない機器操作とは、スイッチなどに触ることで再消毒などの工数が必要になる機器の操作を非接触化する技術で、一部で実用化が始まっていると聞く。信頼性や精度が求められる点で、コストが重視される9の自販機、大型店舗での案内板などの操作用とは同じジャスチャー操作と言っても、応用によってかなり違う課題を含んでいる。ここまで、1~9の応用例は現状技術で既に対応が可能、あるいは、努力次第で実現可能と言える。言い換えれば、価格的なことを除き、共通している課題である屋外使用が可能でcmオーダーの精度という仕様は技術的に概ねクリアされている。

しかしながら、これより下、10~12の実現にはさらなる技術開発が必要である。特に、10はこの表の中で最も難しい応用例で、環境的に安定ではない中で、高精度、高解像度、小型化が求められ、かつ、速度的にも100fps程度が要求される応用である。世界中のどの距離画像カメラでも達成できず、当社のみならず、各社が実現に向け取り組んでいる目標の1つであり、完成すれば、究極の距離画像カメラだと思われる。難しい課題ではあるが、エンジニア魂の見せどころであろう。

要求される距離精度と空間解像度だけを見れば、11と12はさらに難しく見えるが、実はラインセンサでも良いため、専用センサーを作る気になればそれほど難しくない。ラインセンサはエリアセンサに比べ複雑な構造の素子を集積し易く、静電容量が圧倒的に小さいため、高い周波数で光を変調できるなどのメリットがあり、エリア型とは比較にならない性能のものが製造可能だと考えられる。また、この用途では、遮光した中で計測することが可能なので、外乱光問題が生じないことも実現性を支持している。

おわりに

TOFカメラは実用技術であり、市場の性能・機能上の要求を満たす可能性が高い応用例も案外多いのだが、今のところ、実用例は少ない。その理由は、あまりに高かったという価格的な問題、互換性の問題、応用ソフト開発の遅れなどの問題が目立つ。しかし、これ

らをめぐる世界状況はこの 1~2 年で大きく変化している。マイクロソフトが PrimeSense を買収 Kinetic というジェスチャーゲームを発売、さらに Canesta 社も買収したこと、各メーカーが追従する製品を発表し、実際、量産価格が数 10 ドルの TOF カメラが出現しつつあること、TOF 以外の三次元カメラやユーザーインターフェース機器（リープモーション：WEB6）の開発競争も盛んになることは確実なこと、などがその要因である。競争激化は製造側には苦しいことであるが、新技術の発展には欠かせないことであり、普及による市場の拡大は大いに楽しみである。我々も、その時流に乗った市場獲得が直近の目標ではあるが、世界的に見ても数少ないオリジナルセンサーの開発企業として、数量は少なくとも、特徴のある TOF センサーを市場の要求に応じて提供できれば幸いである。

#### 図 1 TOF の位相検波法

A:変調光源は 10MHz 以上の高周波で強度が変調されている。その光は対象物で反射し、センサーに戻って来る。B:センサーの各画素で変調光源の位相に同期して位相蓄積を行ない、 $0^\circ$ 、 $90^\circ$ 、 $180^\circ$ 、 $270^\circ$  の各光強度を得る。C: 正弦成分と余弦成分で位相角に書き直すと、各反射光の位相角は対象物までの距離に比例する。10MHz のとき、 $360^\circ$  は約 15m である。

図 2 スタンレー電気 P401 カメラ(寸法 W150,H75,D45)、サンプル画像は夏の炎天下 (20 万ルクス) で屋上にて撮影

図 3 当社オリジナル BVTOF-QB カメラ(寸法 W50,H50,D63)、サンプル画像は屋内で撮影

#### 参考文献

- 1 US-Patent 7,888,716 Ichikawa ,et al.; Pixel structure of solid-state image sensor
- 2 US-Patent 7,683,954 Ichikawa , et al.; Solid-state image sensor
- 3 US-Patent 7,564,022 Dierickx; Method and device for time-gating the ensitivity of an imager structure

#### 参考 WEB アドレス

1. ブレインビジョン株式会社 <http://www.brainvision.co.jp/>
2. ベルギーCaeleste 社 <http://www.caeleste.be/>
3. ドイツ PMD 社 <http://www.pmdtec.com/>
4. スイス MESA 社 <http://www.mesa-imaging.ch/>
5. パナソニック社 <http://www2.panasonic.biz/es/densetsu/device/3DImageSensor/>
6. リープモーション <http://www.leapmotion.com/>