

高速3Dイメージングの最新技術を理解するーパート2

ジェームズ・キャロル

現在提供されているストラクチャードライト製品と共焦点イメージング製品による、3Dデータの取得速度について解説する。

ストラクチャードライト、つまりアクティブな照明設定では、レーザーやLEDなどの光源によって、対象面に狭帯域の光またはパターンが投影される。光源以外の観測点から撮像すると、パターンはゆがんで見える。このパターンをカメラによって取得し、これを使用して表面形状を幾何学的に再構築する。

ストラクチャードライト技術は、現在市場で提供されている多数の3Dイメージング製品に採用されている。例えば、スロバキアのフォトネオ社(Photoneo)の「MotionCam-3D」カメラには、同社が特許を取得した技術である「パラレル・ストラクチャードライト」が用いられている。これは、ストラクチャードライトの複数画像を、連続的ではなく並列的に取得できる技術である。MotionCam-3Dは、最大40m/秒の速度で動く物体の高解像度画像をとらえることができる。米エヌビディア社(NVIDIA)の「Maxwell」GPUとフォトネオ社独自のCMOSイメージセンサを搭載し、1068×800のポイントクラウド(点群)を最大20fpsで取得できる。2種類のモデルで提供されているこのカメラの照明として使用されるのは、クラス3Rの赤色光レーザー(波長:638nm)である。

フォトネオ社の共同創設者で最高技術責任者(CTO)を務めるトーマス・コワコウスキー氏(Tomas Kovacovsky)によると、このカメラはピンピッキン

グの他、パレタイジング、デパレタイジング、マシンテンディング、品質管理、計測において、ロボットが小さくて繊細な物体を扱えるようにすることを念頭に設計されているという。

「当社のカメラが非常に得意とする処理の1つは、異なる視点から動きを伴うシーンをとらえ、そのシーンの完全な3D再構築を行うことである」とコワコウスキー氏は述べた。

これに加えて同社は、「PhoXi」という3Dスキャナシリーズで、ベースライン、スキャン範囲と領域、校正精度などの仕様が異なる5つのモデルを提供している。これらのスキャナには、クラス3Rの赤色可視光(638nm)レーザー投影(M/L/XL/2Rの各モデル)と、エヌビディア社のMaxwell GPUが採用されており、データ取得時間はそれぞれ、250～2000ms(XSモデル)、250～2250ms(Sモデル)、250～2500ms(Mモデル)、250～2750ms(Lモデル)、250～3000ms(XLモデル)である。

独IDSイメージング・デベロップメント・システムズ社(IDS Imaging Development Systems)の「Ensenso」カメラは、ステレオビジョンの原理に基づいて動作する。各モデルには、2つのCMOSイメージセンサ(それぞれ752×480～5MP)と、プロジェクターが搭載されている。プロジェクターは、パターンマスクを使用して高コントラス



図1 トーディヴェル社の「Scorpion 3D Stinger」ステレオビジョンカメラは、ソニーとバスラー社のカメラ(VGA～29MP)をベースとし、パッシブステレオ、ランダムパターン投影レーザー、マルチラインレーザー、赤色レーザー(660nm)のオプションを備えるモデルが提供されている。

トのテクスチャを被写体に投影する。2台のカメラが同じシーンの画像を2つの異なる位置から撮影する。カメラは同じシーンを撮影するが、カメラの投影光によって被写体の位置は異なる。照合アルゴリズムによって2つの画像を比較し、対応する点を検索してすべての点の位置を視差マップとして視覚化する。

Ensensoカメラのターゲットアプリケーションは、3D物体認識及び再構築、ロボティクス、物流、コンベアベルトピッキングなどである。Nシリーズ(USBまたはGigE、最大作動距離3m)、Xシリーズ(GigE、最大作動距離5m)、XRシリーズ(GigE、Wi-Fi、オンボード処理、最大作動距離5m)という3つの製品ラインが用意されている。また、同社の「FlexView」技術によって、

静的シーンの視差マップの詳細度をさらに向上させることができる。投影光におけるパターンマスクの位置を、圧電アクチュエーターを使用する機械システムによって、小刻みに変換できるためである。

「現時点で、Ensenso XRの3Dフレーム／データレートは、Ensenso Xを4コアのCore i7 CPUとともに使用する場合と同等で、将来的にはさらに高速になる予定である。Ensenso 3Dカメラは、1mの領域で約1mmの空間分解能を提供しつつ、約1～15Hzの3Dデータレートを提供でき、それ以上の性能を達成できる」と、3D製品マネージャーを務めるマーティン・ヘンネマン氏(Martin Hennemann)は述べた。

独ジック社(SICK)は、「Visionary-S」という3Dスナップショットカメラを提供している。ステレオ技術を採用し、赤外レーザー光(808nm)によって最大毎秒最大30枚の色深度画像を記録する。分解能は640×512で、サブミリメートル精度の深度分解能を備える。ターゲット用途は、ピンピッキング、ロボットナビゲーション及び位置決め、品質管理、パレタイジング／デパレタイジングなどである。

米コグネックス社(Cognex)は「3D-A5000」シリーズで、「3D LightBurst」技術を採用する3Dカメラを提供している。部品に青色光パターンを照射し、視野全域(FOV)の3D点群画像を200msもの速度で取得する。10GbE(10ギガビットイーサネット)インタフェースを備え、自動車、日用品、物流業界などの分野をターゲットとする。

ノルウェーのシビッド社(Zivid)の「One」及び「One Plus」のカラー3Dストラクチャードライトカメラは、3Dロボティクスビジョン向けに設計されており、13Hzを超える取得速度で、



図2 クロマセンス社の「3DPIXA」ステレオビジョンカメラは、ラインスキャンイメージセンサを使用して3Dデータを生成する。フル解像度で最大30 kHzの速度を達成する、コンパクトとデュアルの2つのモデルで提供されている。

1920×1200の3D RGB画像(ピクセルごとにX、Y、ZとR、G、B)を出力する。One Plusカメラは、小、中、大のモデルで提供されており、それぞれ作動距離、視野、空間分解能、ポイント精度が異なる。また、USB 3.0インタフェース、防塵防水仕様の頑丈なアルミニウム筐体、パッシブな冷却システムを備える。

ノルウェーのトーディヴェル社(Toridel)は、「Scorpion Vision」という3D製品ラインにおいて、3種類の3Dカメラを提供している。その1つが、「Scorpion 3D Stinger」(図1)で、ロボティクス、アセンブリ検証、計測の用途をターゲットとしている。35～1500mmのベースラインが選択可能なこのステレオビジョン製品は、ソニーと独バスラー社(Basler)のカメラ(VGA～29MP)をベースとし、パッシブステレオ、ランダムパターン投影レーザー、マルチラインレーザー、赤色レーザー(660nm)のオプションを備えるモデルが提供されている。

VGAの場合、Scorpion 3D Stingerカメラは最大30fpsに対応するが、パレットや、茶葉の入った袋の3Dピッキングなど、より要件の厳しい用途では、速度はやや低下すると、トーディヴェル社の最高経営責任者(CEO)

を務めるソー・ヴォルセット氏(Thor Vollset)は述べた。

同氏によると、「作動距離5m、作動範囲1500×1500mm、作動高さ2500mmのシステムにおいて、0.5～2秒で高密度の3D画像を生成し、信頼性の高い3Dピッキング座標を算出しつつ、2または3fpsを達成することができる」という。

「Scorpion 3D Venom」カメラは、ID追跡、物体追跡、高さ測定、個数カウント、アセンブリ検証をターゲットとし、VGA～20MPの解像度の単一のカラーまたはモノクロカメラを使用する。ミラー設計によって、ユーザー指定の作動距離に焦点を持つ、2つの仮想的な3Dカメラが生成される。最大200fpsのフレームレートを達成可能である。同社はさらに、FPGAで3Dレーザー三角測量を行う「Scorpion 3D Stinger Scanner」を提供している。ヴォルセット氏によると、このスキャナは、毎秒5万fps／レーザーラインの速度を達成し、動くコンベアライン上で動作するためのエンコーダインタフェースを備えるという。

トーディヴェル社からは、「Scorpion 3D Box」カメラも提供されている。白色または赤外LEDを搭載する標準版と、赤色または赤外照明を搭載するラ



図3 フォーカルスバック社の共焦点イメージングセンサ「LCI1220」及び「LCI1620」は、表面の3Dトポグラフィ、3Dトモグラフィ、2D強度データを、16,000プロファイル/秒の速度で同時に取得する。

ンダムパターン投影版がある。照明に加えて、2台以上のScorpion Boxカメラと、長さが自由に変えられるStingerカメラブラケットで、全体が構成される。このステレオビジョンカメラでは、最大10MPのカメラが使用可能で、パレットピッキングなどの3D測定や物体位置特定用に設計されている。

仏ビジョ・ナーフ社(Visio Nerf)の「cirrus3D」スキャナは、青色LEDによるストラクチャードライト方式に、ステレオビジョンシステム用の2台の4MPカメラが組み合わされており、3Dポイント計算用のプロセッサを搭載する。ビンピッキング、位置特定、識別、品質検査などの用途に適したこのスキャナは、100万個の3Dポイントを0.2秒で取得可能で、作動体積と3D画像解像度が異なる6つのモデルで提供されている。

加アジャイル・ライト・インダストリーズ社(Ajile Light Industries)の3Dストラクチャードライトシステム「DepthScan」には、パターン生成用

のデジタルミラーデバイス(DMD)プロジェクター、RGB LED、4MPのCMOSイメージセンサ、処理用のFPGAとGPU、同社独自のこのシステム向けの照明コントローラが使用されている。DepthScanのスキャンレートは、最大精度と解像度で2Hz、解像度を落とせば最大30Hzを達成することができる。

米インテル社(Intel)の「RealSense」シリーズは、ステレオビジョン技術の代表的な例で、非常に高い人気を誇る。独フラモス社(FRAMOS)のデプスカメラ「D435e」は、インテル社のデプスモジュール「D430」を搭載し、0.9MPのグローバルシャッター深度センサと2MPのローリングシャッターRGBモジュールを備える。ロボティクス、自動車、スマートマシンにおける3Dビジョンに適している。また、30fpsのフレームレートでRGBとデプスの同時ストリームが可能である。

米e-conシステムズ社(e-con Systems)の「Tara」及び「TaraXL」カメラにも、ステレオビジョン技術が採

用されている。どちらにも米オン・セミコンダクター社(ON Semiconductor)のCMOSイメージセンサ「MT9V024」が搭載されており、USB3.0を介して60fpsでWVGAをサポートする。Taraは、マシンビジョン、ドローン、医療用ロボット、デプスセンシング(深度検出)などの用途向けの製品に、ステレオカメラを組み込みたいと考える顧客をターゲットとしているのに対し、TaraXLは、エヌビディア社のGPU開発キット「Jetson AGX Xavier」向けに最適化されている。

同社はこれ以外にも、エヌビディア社の開発者キットである「Jetson Nano」「Jetson AGX Xavier」「Jetson TX2」向けに設計された2MPの3D MIPIカメラである「STEEReoCAM」を提供している。米オムニビジョン・テクノロジーズ社(OmniVision Technologies)のCMOSイメージセンサ「OV2311」を搭載するこのカメラには、エヌビディア社の「Tegra」プロセッサのGPU上で実行する、同社独自のCUDAアクセラレーションのStereo SDKが付属している。30fpsでの3Dデプスマッピングが可能で、自動運転車、ロボティクス、顔認識などの用途に適している。

現在提供されているそれ以外のステレオビジョンカメラとしては、加FLIRシステムズ社(FLIR Systems)のマシンビジョン部門(FLIR Machine Vision)が提供する「Bumblebee 2」がある。48fpsが達成可能なこのカメラは、カラーまたはモノクロで0.3MPで、外部トリガとストロボ機能のためのGPIOコネクタを備える。

独クロマセンズ社(Chromasens)の「3DPiXA」カメラ(図2)は、ステレオビジョン方式に基づくが、エアラスキャンセンサの代わりにラインスキャ

ンセンサを使用して3Dデータを生成する。コンパクトとデュアルの2つのモデルが提供されており、フル解像度で最大30kHzのラインスキャン速度を達成し、最大速度は、コンパクトモデルで147mm/s、デュアルモデルで148 mm/sである。Quad-linear (コンパクトモデル) または Tri-linear (デュアルモデル) のRGB CCDラインセンサを搭載し、ターゲットアプリケーションは、3Dウェブ検査、高速インライン高さ測定、ワイヤボンド検査、PCB検査、金属表面検査などである。

ファナックの3Dカメラ「iRVision」は、市場に提供されているステレオビジョン技術を採用する製品の中でも、成熟した製品の1つである。ファナックロボットだけに対応するように設計されているこのカメラは、ロボットコントローラと直接結合する、ステレオストラクチャードライト方式のイメージングシステムを提供する。

ストラクチャードライトの速度の解釈方法

ストラクチャードライト、つまりアクティブな照明設定の速度は、他の手法よりも単純明快である。RAW速度は、一般的に数枚から数十枚の画像を使用する、非常に複雑なステレオ解析またはシングルカメラによる3D解析の結果であると理解することが重要である。これらのシステムは、複数の画像に対する大量の処理に加えて、フル3D画像を得るためのステレオ相関を実行する必要があると、米インテグロ・テクノロジーズ社 (Integro Technologies) のデビッド・デホー氏 (David Dechow) は述べた。

「これらのカメラは、ストラクチャードライトパターンのグレースケール画像を取得し、画像を修正し、ポイン

ト間の対応をとり、個々の対応点から視差画像を抽出し、それを各ピクセルのXYZ座標を提供するデプスマップ画像に変換する。これを行うには、多数の画像が必要になるだけでなく、フルエリアの3D画像に対して他のシステムよりもはるかに多くの処理を実行する必要がある」と同氏は述べた。

また、ストラクチャードライト方式には、速度と解像度の間のトレードオフが必要である。ToFと比べると、ストラクチャードライト方式に基づく製品は3D画像の解像度と精度がはるかに高いが、速度ははるかに低くなる。

共焦点イメージング

ライン共焦点イメージング (Line Confocal Imaging: LCI) 技術は、センサのトランスミッタから照射された白色光が、波長の連続スペクトルに分割される、特許化された3D測定手法である。各波長は、センサから一定の距離だけ離れた測定面に集光され、垂直の焦点面を形成する。反射光のドミナント波長を調べることによって、表面までの距離が測定される。フィンランドのフォーカルスベック社 (FocalSpec) は、LCIセンサにおいてこの技術を採用している。同社は最近、蘭TKHグループ社 (TKH Group) に買収され、TKHグループ傘下のLMIテクノロジーズ社 (LMI Technologies) に加わっている。

フォーカルスベック社のセンサは、透明な材料や光沢のある表面に対する標準的な光学3D技術の制約を克服することを目的に設計されている。最新モデルである「LCI1220」と「LCI1620」(図3) は、表面の3Dトポグラフィ、3Dトモグラフィ、2D強度データを、16000プロファイル/秒の速度で同時に取得する。1プロファイルあたり

1728ポイントで、被写界深度によっては、最大2700万データポイント/秒のサンプリング速度が得られる。

これらのセンサは、スマートフォンの曲面エッジディスプレイの測定、透明/不透明表面の粗さ解析、複数レイヤーからなる部品の欠陥検出、金属業界におけるバリ高さ解析など、マシンビジョン検査の用途をターゲットとしている。

共焦点イメージングの速度の解釈方法

フォーカルスベック社のように共焦点イメージング技術を採用する製品は、非常に狭視野の検査に適している。例えば、コンピュータ基板全体ではなくコンピュータチップの検査に利用される。また、デホー氏によると、ToF、レーザベースの手法、または一部のストラクチャードライト方式ほど高速ではないかもしれないが、解像度との間にトレードオフがあるという。

「共焦点イメージングセンサは、速度に関しては、理にかなう生産性が得られるだけの良好な速度を提供する程度だが、精度に関しては、他の種類の製品では達成できないような、はるかに高いレベルの精度を提供する」と同氏は述べた。

結論

もちろん他にも複数の企業が、マシンビジョン用の3Dイメージング製品を現時点で市場に提供している。例えば、Canon USA (キャノン米国法人)、リコー、独トリナミックス社 (trinamiX)、加クレアフォーム社 (Creaform) などである。パート1と2で紹介した製品と同様に、記載されている速度の意味と、対象とするマシンビジョン用途の要件にそれがどのように適用されるかを理解することが重要である。