

産業オートメーションを支える 複数の3D手法

アンドリュー・ウィルソン、欧州エディター

多数の3Dビジョン手法が、ロボットガイダンスや工業検査に用いられている。

ロボットが、自律的に動作し、部品を識別してピック&プレース(取り上げて配置)を行い、人間のオペレーターと協調的に作業することが求められるケースは多い。それを実現するには、写真測量、ステレオビジョン、ストラクチャード・ライト、TOF (Time of Flight)、レーザ三角測量など、多数のマシンビジョン手法をシステムに採用して、物体の位置推定と測定というタスクを実行する必要がある。

シーンとオブジェクト

ビジョンシステムは用途によって、シーンに関連するかオブジェクトに関連するかのいずれかである。シーン関連の用途では、カメラが一般的に移動型ロボットに搭載され、SLAM (Simultaneous Localization And Mapping、自己位置推定と環境地図作成を同時に行うこと)などのアルゴリズムを用いて、周囲環境地図の構築と更新が行われる。

オブジェクト関連のタスクでは、1つ以上のカメラ、レーザ、またはTOFシステムを、産業用ロボットのエンドエフェクタに取り付けることにより、エンドエフェクタの動きに伴って新しい画像が取得できるようにする。当然ながら、異なるタスクには異なる種類の3Dイメージングシステムが必要になる可能性がある。

シーン関連の用途では、ロボットは周囲を認識し、自分の進路を妨げる物

体や人間が存在しないかを確認する必要がある。このような場合は、物体をピック&プレースする能力も追加する必要があるかもしれない。このような用途の例としては、自動運転車、倉庫のピックアンドフェッチロボット、疑わしい物体などを特定するための軍用

ロボットシステムなどがある。

特定のピック&プレース機能を実行するように設計される、オブジェクト関連のタスクとは異なり、これらのシステムは、局所的な空間の位置推定と地図作成のための手法を搭載し、位置が特定されれば、果物狩りなどの特定

図1 6リバーシステムズ社の協調型自動倉庫ロボット「Chuck」は、ジック社のライドセンサ「TiM」を使用して、環境の地図を作成し、商品をピックするための正しい場所へと倉庫作業員を導く。



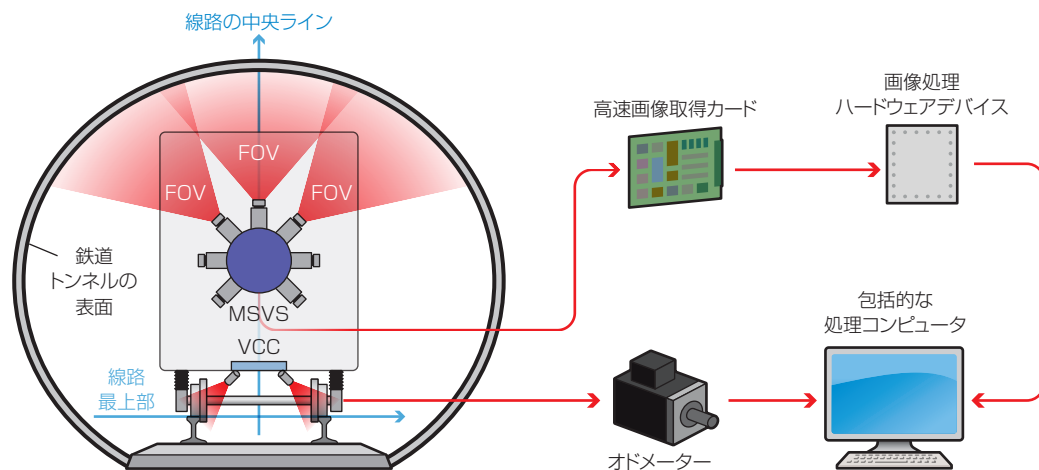


図2 中国西南交通大のドン・チャン氏のチームは、複数のカメラを装備したストラクチャード・ライト方式のビジョンシステムに基づき、鉄道トンネルの動的な3Dクリアランス検査を設計し、構築した。

の機能を実行する必要がある。ある意味において、これらのシステムは、ロボットシステムにさらなる洗練性を加えるものであり、それを行うために、多数の異なるハードウェアおよびソフトウェアオプションが利用できる。

環境の地図作成

周辺環境の地図を作成するには、米ジック社 (SICK) や米ベロダイン社 (Velodyne) などの企業が提供するライダー (LiDAR) 走査型距離計を搭載し、それによってシーンマッピングの問題を解決する。

例えば、米6リバーシステムズ社 (6 River Systems) では、「Chuck」という同社の協調型自動倉庫ロボットが、ジック社のライダーセンサ「TiM」を使用して、環境の地図を作成し、商品をピックアップするための正しい場所へと倉庫作業員を導く (図1)。類似の応用例として、米RKロジスティクスグループ社 (RK Logistics Group) は、米フェッチロボティクス社 (Fetch Robotics) と提携し、RKロジスティクス社の倉庫内の商品移送作業を自動化すること

によって、従業員の生産性向上を図った (Vision Systems Design 誌2018年5月号の記事「Autonomous mobile robots target logistics applications」(物流分野をターゲットとした自律移動ロボット)、<http://bit.ly/VSD-AMR> を参照)。フェッチロボティクス社の自律移動型ロボット「Freight」には、ジック社のライダー走査型距離計「TIM 571」が採用されており、イーサネットスイッチを介してオンボードコンピュータに接続されている。ToF測定を使用するTIM571は、850nmのレーザパルスを放射し、可動ミラーを使用して220°の視野 (FOV: Field Of View) 範囲を走査する。

自動運転車に最適なシステムを評価するために、フランスの国立高等教育機関であるエコール・サントラル・ドゥ・ナント (Ecole Centrale de Nantes) のシモーナ・ノビリ氏 (Simona Nobili) のチームは、2つの一般的なライダー構成を解析した。1つは、3基のジック社製平面ライダーセンサ「LMS151」、もう1つは、ベロダイン社製の3Dライダーセンサ「VLP-16」をベースとするもので

ある。同氏らが開発したシステムは、SLAMアルゴリズムを搭載し、仏ルノー社 (Renault) の電気自動車「Zoe ZE」とセダン「Fluence」の地上から高さ50cmの位置に取り付けられた3基のジック社製LMS151センサを使用した。車両のルーフ上には、16チャンネルのベロダイン社製ライダー「PUCK」(VLP-16) を装備した。

同氏らはこの研究により、VLP-16のデータによって作成された地図は、道路脇に車両が駐車したなどのよくある中期的な環境変化に対する堅牢性が高いことと、このように1基のセンサを実装すれば、設置と校正が容易になることを明らかにした (「16 channels Velodyne versus planar LiDARs based perception system for Large Scale 2D-SLAM」(大規模2D-SLAMに対する、16チャンネルのベロダイン社製ライダーと平面ライダーをベースとする認知システムの比較)、<http://bit.ly/VSD-VEL> を参照)。

3D測定

当然ながら、多くのマシンビジョン

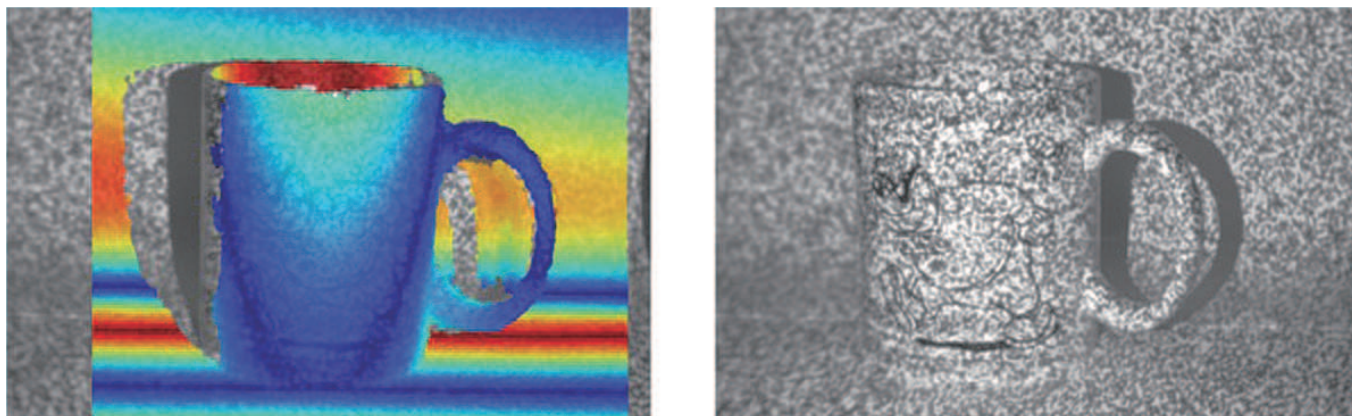


図3 IDSイメージング開発システムズ社の3Dカメラ「Ensenso」には、CMOSイメージセンサ2個とプロジェクターが搭載されている。プロジェクターによって、パターンマスクを使用して高コントラストのテクスチャを撮像対象の物体に投影する。その結果、シーンのより詳細な視差マップとより完全に均質な深度情報が得られる。

用途において必要になるのは、3D測定を実行するといったオブジェクト関連のタスクのみである。ここで、検査対象となる製品の性質に応じて複数の異なる手法が存在するが、最も一般的に使われるものの1つが、ストラクチャード・レーザ・ライト解析またはレーザライン・プロファイリングである。この手法では、構造化されたレーザ光を物体に対して走査するか、あるいは、コンベア上を移動する物体に照射するかかのいずれかが行われる。

続いて、反射したレーザ光の個々のラインを、産業用カメラでデジタル化し、各表面ポイントの距離を計算することにより、物体の3Dプロファイルを取得する。このようなシステムを構築する場合、開発者には、米コヒレント社 (Coherent) や独Zレーザ社 (Z-Laser) などが提供するシングルレーザライン源を使用し、反射光をデジタル化するためのカメラをそれとは別に用意する、という選択肢がある。このようなシステムは、電子部品検査、部品の次元解析、自動車用タイヤのトレッド検査など、多数のマシンビジョン用途に用いられている。

この技術のより新しい応用分野の1

つが、鉄道トンネルの正確な3D測定である。中国西南交通大 (<https://english.swjtu.edu.cn/>) のドン・チャン氏 (Dong Zhan) のチームは、複数のカメラを装備したストラクチャード・ライト方式のビジョンシステムに基づく、鉄道トンネルの動的な3Dクリアランス検査を構築した (図2)。

トンネルの3D画像を取得するために、中国マイクロビュー社 (Micro view) の解像度1280×1024の産業用カメラ「MVC1000SAM GE60」7台と、興和の焦点距離5mmのレンズを使用して、Zレーザ社の構造化レーザ「Model ZM18」からの7本の反射レーザラインを取得するとともに、それとは別に2台のカメラとレーザを用意して、線路のモニタリングを行った。

これを列車の前面に取り付け、光学式エンコーダによって画像取得をトリガして、トンネルの2Dレーザマップを取得する。続いて、画像処理ソフトウェアを使用して、トンネル表面の再構築を行った (<http://bit.ly/VSD-MSVS>)。

このようなシステムでは、カメラシステムの校正が非常に重要である。このようなレーザ/カメラシステムを開発するメーカーはそれを認識している

ので、カメラとレーザの両方を組み込んだ製品を開発し、校正済みの状態で提供している。例えば、米コグネックス社 (Cognex) の3Dレーザ変位センサ「DSMax」や、キーエンスの「LJ-V」シリーズのレーザプロファイル測定器、加LMIテクノロジーズ社 (LMI Technologies) の3Dレーザライン・プロファイルセンサ「Gocator」などの製品はすべて、システムインテグレーターがレーザベースの3Dプロファイリングシステムを簡単に構成するための手段を提供している。

ステレオカメラ

走査型距離計とレーザベースの手法は、どちらも能動的な3Dイメージング手法だが、1台か2台のカメラを用いた受動的な手法でも、それと同等の効果が得られる場合がある。一般的には、2台の校正済みカメラによって3D空間内の単一点を特定し、この情報を元に深度マップを生成する。しかし、必ずしもそれが必要というわけではない。

1台のカメラを、例えばロボットアームのエンドエフェクタに取り付け、3D空間内でカメラを動かすことにより、2つの独立した画像を取得し、深

度マップを生成することができる。米モートマン社 (Motoman) と米ロボティック・ビジョン・テクノロジー社 (RVT: Robotic Vision Technology) の2社が、この機能を開発している。

モートマン社の「MotoSight 3D CortexVision」は、1台のカメラをロボットに取り付けることによって、ロボットガイダンスにおける3Dビジョンの利用を簡素化するものである。システムは複数の画像を取得し、部品の位置特定を最適化するためにカメラ位置を自動的に調整する (Vision Systems Design誌2008年11月号の記事「Robot Guidance」(ロボットガイダンス)、<http://bit.ly/1pUVMUG>を参照)。

RVT社も、類似のコンセプトで3D空間内の部品の位置を特定する。RVT社の「eVisionFactory」ソフトウェアは、「AutoTrain」という機能によって、ロボットとカメラを複数の撮像位置に自動的に動かしながら、撮像部品の形状を測定する。カメラ1台のシステムで3D空間内の部品の位置を特定することができるが、3D空間内で物体の位置をどれだけ正確に特定できるかは、ロボットの位置精度によって決まる。

レーザとカメラを用いた能動的なシステムと同様に、2台のカメラを使用する場合も、それらを正確に校正することが必要となる。能動的なシステムが、カメラとレーザの両方を組み込んだ校正済みの製品として提供されているのと同様に、受動的なステレオシステムも、2台(またはそれ以上)のステレオビジョンカメラを校正済みの状態で搭載することで、システム開発者の負担を軽減している。このような3Dステレオカメラシステムとして最も良く知られているのが、米フリーインテグレーション・イメージング・ソリ

ューション社 (FLIR Integrated Imaging Solutions) の「Bumblebee」シリーズ、リコーの「SV-M-S1」、そして米ステレオラブズ社 (Stereolabs) の「ZED」である。

SV-M-S1とZEDでは、2台の固定カメラが使用されるのに対し、フリー社のBumblebeeシリーズの「XB3」は、1.3メガピクセルのCCDイメージセンサを搭載した、3センサ、マルチベースラインのステレオカメラである。3つのセンサを使用するため、拡張されたベースラインで動作して、より長い距離で高い精度を実現できるとともに、狭いベースラインでは近距離でのマッチングを改善する。

3Dイメージングやロボットの分野で広く利用されているこれらのシステムだが、撮像対象の物体が低テクスチャであったり、テクスチャがなかったりする場合には、有効ではない。そのような場合には、物体に光を投射して構造を強調することが必要になる。独IDSイメージング開発システムズ社 (IDS Imaging Development Systems) の3Dカメラシリーズ「Ensenso」などの射影テクスチャステレオビジョンカメラには、CMOSイメージセンサ2個とプロジェクターが搭載されている。プロジェクタによって、パターンマスクを使用して高コントラストのテクスチャを撮像対象の物体に投影する。その結果、シーンのより詳細な視差マップとより完全に均質な深度情報が得られる(図3)。

タイムオブフライト(TOF)

テクスチャが比較的低めの物体を撮像する場合の問題を克服する1つの代替手段が、TOFセンサである。TOFセンサは、シーンに変調光を照射して反射光を観測することによって機能する。

照射光と反射光の位相のずれを測定し、距離に変換する。

比較的コンパクトかつ軽量で、高いフレームレートで動作するため、ロボット分野に導入されるケースが多い。このようなTOFシステムにおいて、照射された変調赤外光は物体で反射して、イメージセンサによって取得される。照射光と反射光の位相差と振幅値から、距離情報とシーンのグレースケール画像が得られる。

複数の企業がこのようなデバイスを開発しているが、最も有名な企業としては、独バスラー社 (Basler)、独ifmエレクトロニック社 (ifm electronic)、独インフィニオン・テクノロジーズ社 (Infineon Technologies)、英オドス・イメージング社 (Odos Imaging) などがある。オドス・イメージング社は最近、米ロックウェル・オートメーション社 (Rockwell Automation) に買収されている。

ストラクチャー・ライト、TOF、ステレオイメージングなどの能動的/受動的システムが、やはり、3Dイメージングを実行するための、最も一般的な手段ではあるが、その他にも、Shape from Shadingなどの手法が利用できる。

Shape from Shadingでは、異なる角度からシーケンシャルに部品を撮像することにより、画像を計算して、表面のスロープと形状を生成することができる。独ステマイメージング社 (Stemmer Imaging) が開発し、独スヴォボダ社 (Swoboda) が自動車部品検査に利用する「Trevista」システムは、この原理に基づいている(「Shape from shading images steering components」(Shape from Shadingによる、ステアリング部品の撮像)、<http://bit.ly/VSD-SFS>を参照)。