

マルチスペクトル／ ハイパースペクトルカメラ、 産業用イメージングの範囲を拡大

ジェームズ・キャロル

可視波長域を超えるイメージング手法は、マシンビジョン分野の向上につながる。

マルチスペクトル／ハイパースペクトルカメラは、多数の分野や業界に導入されているが、こうした技術の出現によって改善された分野の1つが、産業用検査である。食品や飲料商品の品質検査、医薬品の検査と分類、色検査、プロセス監視は、非可視光イメージングが今日のマシンビジョンシステムにどのように活用されているかを示す、ほんの一部の例にすぎない。

マルチスペクトルイメージング

可視波長外の画像をキャプチャするための2つの方法が、マルチスペクトルイメージングとハイパースペクトルイメージングである。ハイパースペクトルイメージングでは、狭帯域で一般的には連続したスペクトルバンドを使用し、おそらくは数百や数千ものスペクトルを処理するのに対し、マルチスペクトルイメージングでは、帯域幅がまちまちで必ずしも連続ではないスペクトルバンドを使用し、最大で10本のバンドが戦略的に選択される。

どちらの手法も基本的には同じイメージング概念に基づき、マルチスペクトルイメージングのほうが、使用する離散スペクトルバンドが少ない。マルチスペクトルカメラは通常、1枚の画像で複数の波長を取得する。標準的な広帯域幅のピクセルフィルタ構造を採



図1 プリズム技術に基づく「Sweep+」と「Fusion」シリーズのマルチスペクトルカメラは、単一の光学経路によって異なる光スペクトルを同時に撮像する。

用するものから、狭帯域のチューナブルフィルタをピクセル空間に使用するものまで、さまざまな手法が存在する。材料検査、半導体／エレクトロニクス検査、食品品質検査などの産業用途に導入されているマルチスペクトルカメラには、エリアスキャン型とラインスキャン型がある。

例えば、加テレダイン・イメージンググループのテレダインダルサ社 (Teledyne DALSA) は、2018年度の Innovators Award を受賞した「Linea ML」カメラを提供している。8k画素×4ライン／16k画素×4ラインのクアドリニアCMOSセンサを搭載し、3

つのネイティブRGBチャンネルと独立した近赤外 (NIR) チャンネルを備える。このカメラは、ウエハレベルのダイクロイックフィルタによって可視域 (400～700nm) と近赤外域 (700～1000nm) の波長を検知し、1回のスキャンで独立したRGB+NIR画像をキャプチャする。Linea MLカメラは、カメラリンクHSファイバインタフェースを介して、75kHz×4のラインレートまたは5GB/secのスループットを提供する。カメラリンクを介したラインレートは70kHzで、スペクトルチャンネルをクリアに分離するためのウエハレベルのフィルタを備える。

同社によると、8、10、または12ビットの出力オプションと、複数のROI (Region Of Interest: 関心領域) モードを備えるこのカメラは、印刷物検査、エレクトロニクス検査、材料等級分類、ウェブ検査、色選別、食品検査の分野を対象としているという。

米JAI社は、プリズム技術に基づいて、フィルタホイールなどの可動部品なしで単一の光学経路に沿って同時キャプチャを行う、複数のマルチスペクトルカメラを提供している(図1)。エリアスキャンカメラとしては、3種類のマルチスペクトルカメラが「Fusion」シリーズで提供されている。2個のCCDセンサを搭載する3つのモデルは、解像度とデータインタフェースだけが異なり、「AD-080CL」は0.8メガピクセル/カメラリンクインタフェース/30fps、「AD-080GE」は0.8メガピクセル/GigE Visionインタフェース/30fps、「AD-130GE」は1.3メガピクセル/GigE Visionインタフェース/31fpsである。どのカメラも同じマルチスペクトル概念に基づいており、1つめのチャンネルでBayer CCDによって可視カラー画像(400~700nm)をキャプチャし、2つめのチャンネルでモノクロセンサによって近赤外データ(750~900+nm)をキャプチャする。

ラインスキャンカメラとしては、3種類のマルチスペクトルカメラが「Sweep+」シリーズで提供されている。これらのプリズムベースのクアドリニアカメラは、R、G、B、NIRの各データに対して個別のチャンネルを提供する。「SW-2001Q-CL」は、2048画素×4ラインのCCDピクセルアレイを搭載し、カメラリンクインタフェースを備え、ライン周波数は19kHzである。「LQ-401CL」もカメラリンクインタフェースを備えるが、4096画素×4ライ

ンのCMOSアレイを使用し、ライン周波数は18kHzである。「SW-4000Q-10GE」は10GigEインタフェースを備え、4096画素×4ラインのCMOSアレイを使用し、ライン周波数は72kHzである。

最後に、同社は「Wave」シリーズでも、マルチスペクトルラインスキャンカメラを提供している。「WA-1000D-CL」は、プリズムを装備するInGaAsラインセンサを2個搭載する(1024画素×2、カメラリンクインタフェース、ライン周波数は39kHz)。1つめのチャンネルは、NIR域上側とSWIR(短波赤外)域下側(900~1400nm)に対応し、2つめのチャンネルは、SWIR域上側(1400~1700nm)に対応する。

「NIRとSWIRの範囲のさまざまな狭帯域光源を、画像融合手法とともに利用することにより、このカメラは、特に食品検査やプラスチック再生などの用途において、判別が難しい物質の検出と分類に使用することができる」と、JAI社のマーケティングコミュニケーション担当マネージャーを務めるリック・ディッカーソン氏(Rich Dickerson)は述べた。

米サルボ・テクノロジーズ社(前PIXELTEQ社、Salvo Technologies)は、フィルタを製造し、アクティブアライメントシステムによってマイクロパターンフィルタをイメージセンサに直接取り付けることにより、マルチスペクトルカメラを開発しており、一連のマルチスペクトル/偏光測定イメージング装置を提供している。UV(紫外線)、VIS(可視)、SWIRの各バージョンで提供されている「SpectroCam」シリーズのカメラは、6~8枚の交換可能な光学フィルタで構成された、連続的に回転するフィルタホイールをベースとしている。UVとVISのバージョン(それぞれ

200~900nmと400~1000nmに対応)にはCCDイメージセンサ、SWIRのバージョンにはInGaAsセンサが搭載されている。

「PixelCam」マルチスペクトルカメラは、3~9のスペクトルバンドからのマルチスペクトルイメージングを、最大30fpsのフレームレートで実行することができる。3つすべてのモデルにCCDセンサ(4または8メガピクセル)が搭載されている。カスタムメイドのダイクロックフィルタアレイがウエハレベルで焦点面アレイに組み込まれており、特定の可視波長および近赤外波長におけるハイコントラストのスペクトル情報を抽出すると、同社は説明している。これらのカメラの検知波長範囲は400~1000nm、フレームレートは最大15fpsで、GigEまたはCoaX Pressのバージョンが提供されている。

加スペクトラル・デバイス社(Spectral Devices)は、スナップショット型とラインスキャン型の2種類のマルチスペクトルカメラを提供している。同社のラインスキャンカメラには、オーストリアのams社が提供する、2メガピクセルのグローバルシャッターCMOSイメージセンサ「CMV2000」が搭載されており、3種類の標準的な4バンドカメラと、2~16の異なるバンド数のカスタムカメラモデルが提供されている。これらのカメラは、食品の品質管理と検査やウエハ検査などの用途をターゲットとしている。

スナップショットカメラには、同じくams社が開発した4メガピクセルのCMOSイメージセンサ「CMV4000」が搭載されており、複数バンドの画像を同時にキャプチャするように設計されている。6種類の標準モデルに加え、カスタムモデルが提供されており、2~16の任意の数のバンドをフルフレ

ームレートで最大94fpsの速度でキャプチャする。同社によると、これらのマルチスペクトルカメラは、ロボティクス、食品加工、色測定などの用途に適しているという。

センサについては、ベルギーの研究機関であるimecが、「Argus」という、CCD-in-CMOS技術に基づくマルチスペクトルTDI(Time Delay Integration: 時間遅延積分方式)イメージセンサを開発している。このセンサには、CCDアレイ(バンド)あたり4096コラム、256ステージのフォーマットが採用されており、ピクセルサイズは $5.4\mu\text{m}$ である。7つのスペクトルフィルタをユーザーが追加可能な、7バンドバージョンも提供されている。

CMOSドライバと読み出し回路が統合されたプロトタイプは、最大300kHzのラインレートを達成する。スペクトルフィルタを組み合わせることによりマルチスペクトルTDIイメージングが可能で、バンド数とTDIステージ数はカスタマイズできる。カラーフィルタやスペクトルフィルタは、ウエハまたはガラスカバー上に後処理で追加可能である。

ハイパースペクトルイメージング

imecはハイパースペクトルイメージングを実現するために、ams社のCMOSイメージセンサCMV2000のピクセル上に直接ウエハを配置した、既製のハイパースペクトルイメージセンサも開発している(図2)。これらのイメージセンサには、スナップショットモザイク型、スナップショットタイル型、ラインスキャンウェッジ型、ラインスキャンCCD TDI型があり、4/7/16/25/32/100+/150+の各バンドオプションが用意されている。このイメージセンサは、複数のマシンビジョ

ンカメラモデルに搭載されており、そのすべてがさまざまな産業用検査での使用に適している。

独シミア社(XIMEA)は、imecのセンサに基づく4種類のモデルを提供している。2つは、16バンドと25バンドのモザイクタイルセンサで、残り2つは、100バンドと150バンドのラインスキャンモデルである。これらのカメラは、最大速度170fpsのUSB3インタフェース、または最大速度340fpsのPCIeインタフェースを備え、RGB+NIRの波長範囲に対応する。波長範囲はモデルによって異なり、それぞれ470~630nm、600~950nm、600~975nm、470~900nmである。

「半導体薄膜加工を利用してピクセルレベルで狭帯域スペクトルフィルタを適用するimecの技術は、小型化と軽量化を実現して組込みビジョンシステムに適したハイパースペクトルイメージセンサソリューションを可能とするものだ。シミア社は、imecのハイパースペクトルセンサを当社のxiQカメラプラットフォームに搭載し、寸法を $26.4 \times 26.4 \times 31\text{mm}$ 、重量をわずか31gとすることで、重要なサイズの問題に対応している」と、シミア社の主要アカウントマネージャーを務めるイヴァン・クリムコヴィック氏(Ivan Klimkovic)は述べた。

スイスのフォトンフォーカス社(Photonfocus)も、imecのセンサを搭載した3種類のハイパースペクトルカメラを提供している。スナップショットモザイク型のこれらのカメラには、16バンドまたは25バンドのオプションが用意されている。GigEインタフェースを備え、撮像速度は最大50fpsである。波長範囲はモデルによって異なり、470~630nm、470~900nm、595~860nm、600~975nm、665~

975nmである。

上記に加えて、imecは蘭アディメック社(Adimec)と提携し、imec VNIRハイパースペクトルシステムを開発した。2メガピクセルのCMOSイメージセンサを搭載する、アディメック社のマシンビジョンカメラ「Quartz」をベースとしている。ラインスキャン型で150以上のバンドに対応し、カメラリンクインタフェースを備えるこのシステムは、470~900nmまたは600~1000nmの波長範囲に対応する。

imecが独自に開発したハイパースペクトル製品も存在する。例えば、「SNAPSCAN NIR」「SNAPSCAN VNIR」「SNAPSCAN SWIR」の各システムは、USB 3.0インタフェースを備え、スナップショット型とラインスキャン型で提供されており、100以上または150以上のバンドに対応する。波長範囲はモデルによって異なり、470~900nm、600~1000nm、1100~1700nmである。

imec以外のセンサを採用したハイパースペクトルカメラを開発するマシンビジョン企業も、多数存在する。例えば、フィンランドのスペシム社(Specim)は「FX」シリーズのカメラを提供している。これらのハイパースペクトルカメラは、ラインスキャンモードで動作し、GigE、カメラリンク、またはカスタムイーサネットのバージョンがあり、産業用マシンビジョン用途を特に対象として設計されている。

「FX50」カメラ(図3)は、冷却されたInSb検出器をベースとし、640ピクセルの空間分解能、2.7~ $5.3\mu\text{m}$ の波長範囲、380fpsの撮像速度を備え、カメラに用意されている154バンドから自由に波長を選択することができる。同社によると、黒色プラスチックの仕分けや金属表面の汚染検出に適し

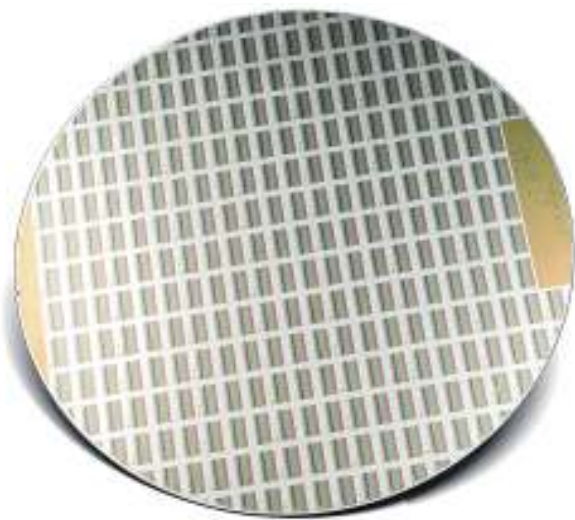


図2 imecは、干渉ベースの光学フィルタをウエハレベルで設計および製造している。イメージセンサのピクセルの上に直接堆積してパターンニングを施すことにより、ハイパースペクトル撮像を可能にしている。



図3 冷却されたInSb検出器をベースとする「FX50」ハイパースペクトルイメージングカメラは、黒色プラスチックの仕分けや金属表面の汚染検出に利用することができる。

ているという。

「プラスチックごみは大きな問題になっている。2050年までに、海洋中のプラスチックの量は魚の量を超えると推定されている。再生不可能なプラスチックの大半は、従来のプラスチック仕分け技術が産業要件を満たしておらず、十分な信頼性と効率で選別できないために再利用ができない、混合プラスチックである。そこで登場するのが、スペシム社のFXシリーズのハイパースペクトルカメラだ。FX17と最新型のFX50により、黒色プラスチックを含む異なる種類のプラスチックを最大99%の精度で識別し、分類することができる」と、スペシム社のセールスおよびマーケティング責任者を務めるハンヌ・メキマートゥネン氏(Hannu Mäki-Marttunen)は述べた。

同氏はさらに、「これは、スペシム社の最終顧客がプラスチックごみを、プラスチック業界の原材料として再利用可能な貴重な資源に変換できるようになることを意味する」と続けた。

「FX17」モデルはInGaAsベースのカメラで、波長範囲は900～1700nm、

撮像速度は670fpsで、カメラに用意されている224バンドから自由に波長を選択することができる。ターゲット用途は、食品や飼料の品質検査、ごみの分別、リサイクル、水分測定などである。「FX10」モデルはCMOSイメージセンサを搭載するカメラで、波長範囲は400～1000nm、撮像速度は330fpsで、カメラに用意されている224バンドから自由に波長を選択することができる。同社によると、ターゲット用途は、食品や飼料の品質検査、印刷物の色／密度の検出などのマシンビジョン分野であるという。

スペシム社は、これ以外にも多数のハイパースペクトルカメラを提供している。「Fenix」「PFD-65-V10E」「sCMOS-50-V10E」の各モデルのほか、400～1000nmの波長範囲で携帯型の材料分析を可能とする、ポータブル型カメラ「Specim IQ」などが提供されている。

米ヒナリア・イメージング社(Hina Lea Imaging)からも、ハイパースペクトルカメラが提供されている。例えば、広視野カメラ「Model 4200」は、2.3メガピクセルのセンサ空間分解能、

400～1000nmの検知波長範囲を備え、最大600のスペクトルバンドに対応する。携帯型の「Model 4100H」も提供されており、こちらは、可視波長から近赤外波長(400～1000nm)において、最大550のスペクトルバンドで2.3メガピクセルのデータキューブを取得するという。このデバイスには、組み込みプロセッサと内蔵照明も搭載されている。

「食品安全検査や半導体加工において、当社のカメラに対する関心がかなりの勢いで高まっている。費用対効果の高いスペクトルソリューションを導入すれば、深いレベルの新しい情報によって、自動検査に変革がもたらされる可能性がある」と、エンジニアリング担当副社長を務めるアレクサンドル・フォング氏(Alexandre Fong)は述べた。

高度なマシンビジョン分野を中核市場の1つとして位置づける米ヘッドウォール・フォトニクス社(Headwall Photonics)も、スペクトルカメラを開発する企業の1社である。例えば、同社の「Micro-Hyperspec」カメラは、マシンビジョンをターゲット用途の1つ



図4 400～1000nmの波長範囲に対応する「Pika L」ハイパースペクトルカメラは、サイズがわずか3.9×4.9×2.2インチで、マシンビジョンやリモートセンシングの用途をターゲットとしている。

に挙げている。このカメラは、VNIR(可視近赤外)、NIR、拡張NIR、SWIRの各バージョンで提供されており、すべてカメラリンクインタフェースを備える。具体的なモデルは以下である。「VNIR A-Series」(400～1000nm、シリコンCCDセンサ、324の選択可能なスペクトルバンド、90fps)、「VNIR E-Series」(400～1000nm、sCMOSセンサ、369の選択可能なスペクトルバンド、250fps)、「NIR 640」(900～1700nm、InGaAs検出器、134の選択可能なスペクトルバンド、120fps)、「NIR 320」(900～1700nm、InGaAs検出器、67の選択可能なスペクトルバンド、346fps)、「Extended VNIR 640」(600～1700nm、InGaAs検出器、267の選択可能なスペクトルバンド、120fps)、「SWIR 384」(900～2500nm、MCT検出器、166の選択可能なスペクトルバンド、450fps)、「SWIR 640」(900～2500nm、MCT検出器、267の選択可能なスペクトルバンド、200fps以上)となる。

同社の「Hyperspec MV」カメラはマシンビジョンに特化して設計されて

おり、波長範囲は400～1000nm、スペクトルバンドは270から選択可能で、カメラリンクインタフェースを備え、撮像速度は485fpsである。

米ベイスペック社(BaySpec)は、研究開発、生物医学、光通信などの業界向けのスペクトル装置を開発する企業だが、産業用検査に適したハイパースペクトルカメラも提供している。そのようなカメラの1つがUSB 3.0対応の「OCI-OEM」カメラで、同社のハイパースペクトルイメージング装置「OCI-1000」(プッシュブルーム方式、最大120fps)および「OCI-2000」(スナップショット方式、最大120fps)の光学エンジンとして採用されている。OCI-1000は最大100、OCI-2000は最大25のスペクトルバンドが選択可能で、測定波長範囲は600～1000nmである。

もう1つの選択肢が、同社の独自技術「FT-PI」を搭載する「GoldenEye」スナップショットハイパースペクトルカメラである。測定波長範囲は400～1700nmに拡張されており、40～52のスペクトルバンドが選択可能で、648×488の空間ピクセルでフレーム

レートは1fpsである。

同様に、米レゾノン社(Resonon)は、研究施設、屋外、リモートセンシング向けのハイパースペクトルカメラを開発する企業だが、マシンビジョン市場にも目を向けている。産業用イメージング用途に適しているとして同社が挙げたカメラは、以下である。「Pika L」(図4、波長範囲は400～1000nm、281の選択可能なスペクトルバンド、249fps、USB 3.0インタフェース)、「Pika XC2」(波長範囲は400～1000nm、447の選択可能なスペクトルバンド、165fps、USB 3.0インタフェース)、「Pika NIR-320」(波長範囲は900～1700nm、164の選択可能なスペクトルバンド、520fps、GigEインタフェース)、「Pika NIR-640」(900～1700nm、328の選択可能なスペクトルバンド、249fps、GigEインタフェース)となる。

最後に、ノルウェーのノルスク・エレクトロ・オプティック社(Norsk Elektro Optikk:NEO)は、産業用イメージング用途向けに2種類のハイパースペクトルイメージングカメラを提供している。「HySpex SWIR-384」は、MCTセンサをベースとし、波長範囲は950～2500nm、288のスペクトルバンドが選択可能であり、フレームレートは全バンドを選択した場合で400fps(範囲を絞ることによって高速化が可能)である。また一方の「HySpex VNIR-1024」は、CMOSイメージセンサをベースとし、波長範囲は400～1000nm、108のスペクトルバンドが選択可能で、フレームレートは最大スペクトル分解能で700fpsである。

同社によると、どちらのハイパースペクトルカメラも、スペクトル的にも空間的にも非常にシャープで、空間上/スペクトル上のずれ(スマイルおよびキーストーン)は10%未満であるという。