ハイパースペクトルイメージング用のセンサとカメラの要件

ル・チェン、ブラッド・コイル、アルバート・トゥ

適切なコンポーネントを選択すれば、ハイパースペクトルイメージング技術は、可視波長外の画像のキャプチャにも有効である。

当初は地球観測に使われていたハイパースペクトルイメージング（HSI）技術だが、今やその応用範囲は、工場の分別処理から、医療研究（例えば、科学者が皮膚や皮下組織のデータベースを生成するための手法として）に至るまでの多様な分野に拡大している。ハイパースペクトルイメージングは、カメラと分光計のメリットを組み合わせることによって（**図1**）、空間情報とスペクトル情報の両方を同時に収集する。

イメージセンサとカメラの性能が向上したことで、ますます多くのハイパースペクトルイメージングの応用分野が現在、研究者や開発者によって見出されている。例えば、食品品質管理、製薬プロセス制御、プラスチックの分別、生体計測などである。

応用事例

食品品質管理

以前は、食品品質管理には破壊的な測定が必要だった。品質保証担当者は、各ロットから1つのサンプルを選択して、その外見を検査し、破壊的な測定手法を用いて、分析結果に基づく等級を定義していた。今では、SWIR（短波赤外）ハイパースペクトルイメージングを利用して、食品の化学組成の識別と定量化を行い、分析した各分子の固有波長（指紋スペクトル）に基づいて、栄養素、脂肪含有率、糖度、鮮度などの情報を明らかにすることができる。例えば、ドローンに搭載したSWIRハイパースペクトルカメラによって、木になっている状態のリンゴの糖度を測定し、収穫期の前に等級や品質を予測することができる。

プラスチックの分別

2017年の米国におけるプラスチックのリサイクル率は8.4%だったが（bit.ly/VSD-EPA）、リサイクル工場に搬入されるプラスチックの量は、年間300万トンにものぼる（**図2**）。リサイクル意識の高まりに伴い、自分が出したゴミがリサイクルされることを期待する人が増えており、リサイクル工場で処理するプラスチックの量はますます増加している。しかし、プラスチックの素材ごとに異なるリサイクル処理が必要で、その分別ができずに誤った処理が適用されれば、有害化学物質が発生したり、処理中に装置が破損したりする恐れがある。ハイパースペクトルイメージングをリサイクル工場で利用すれば、1.7～2.6μmのスペクトル情報によってプラスチック素材を分別し、カメラから収集された空間情報によってベルトコンベア上の位置に簡単にマーキングできるようになる（図2）。

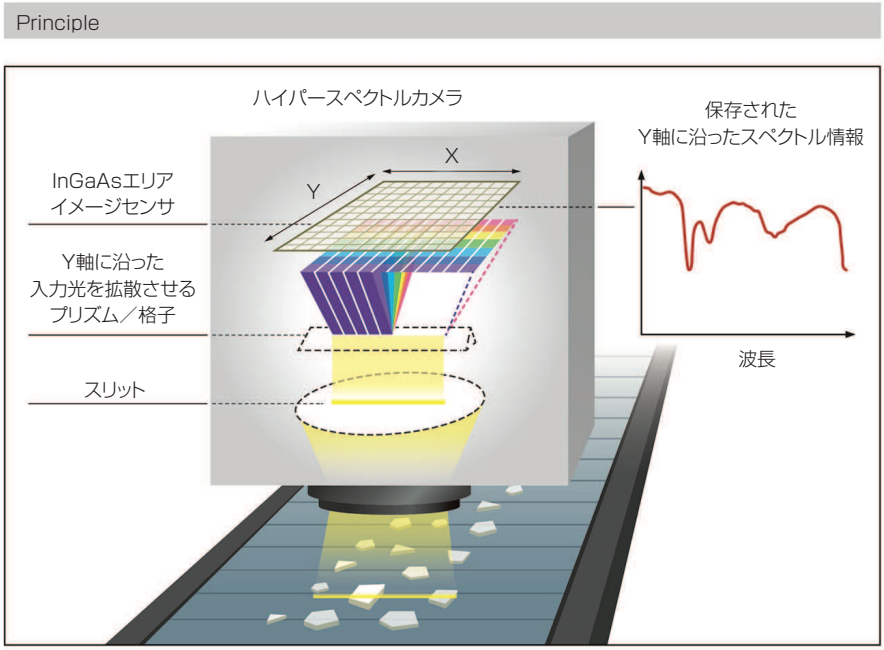


図1　プッシュブルーム方式は、ハイパースペクトル画像を取得するための手法の1つである。

ハイパースペクトルイメージングの種類

ハイパースペクトルカメラは、4種類の方法で情報を取得することができ

る。4種類とは、ウィスクブルーム方式（ポイントスキャン）のカメラ、プッシュブルーム方式（ラインスキャン）のカメラ、スペクトルスキャンに基づくカメラ（エリアスキャンまたはプレーンスキャン）、スナップショット（シングルショット）カメラである。

ウィスクブルーム方式のカメラは、一度に1つのピクセルを取得する（**図3**a）。カメラがサンプル上をラスタスキャンするにつれて画像が構築され、画像にはすべてのスペクトル情報が含まれる。画像取得にかなりの時間がかかるが、非常に高いスペクトル解像度の結果が得られる。

プッシュブルーム方式は、一度に1つのラインを取得するもので、ウィスクブルーム方式よりも高速で、高いスペクトル解像度が得られる（図3b）。カメラは、サンプル上のラインをスキャンすることにより、画像全体を生成する。ウィスクブルーム方式よりも高速ではあるが、得られる画像には、エイリアスや動きによるアーチファクトが生じる可能性がある。

スペクトルスキャンカメラは、所定の波長の空間情報全体を一度に収集する（図3c）。各波長で撮影した画像を積層することにより、ハイパースペクトルキューブが生成される。1つの画像を取得する速度は高速だが、波長変更に要する時間により、キューブの生成には時間がかかる。

ハイパースペクトルスナップショットカメラは、ハイパースペクトルビデオを取得することができ（図3d）、高速で、移動物体のイメージングに理想的である。ただし、スペクトル解像度と空間解像度は一般的に限定される。

イメージセンサの要件

ハイパースペクトルプラットフォームにかかわらず、光学センサはデータ取得において、最も重要な役割を担う。以下では、HSIに求められるセンサ仕様について説明する。

スペクトル応答範囲

従来のRGBイメージングと比較した場合のHSIの主要なメリットは、より広いスペクトル応答範囲とより高いスペクトル解像度で、より詳細な情報を取得できることにある。CCDイメージセンサやCMOSイメージセンサなどのシリコン技術により、例えば、肉製品の中の変色や異物を、400～1100nmの可視域及び近赤外域の波長範囲で検出することができる。

しかし、反射型のイメージング手法によって、肉に含まれる水分（柔らかさ）を検出するには、900～1700nmの波長範囲が必要である。CCD/CMOSイメージセンサは、この波長範囲に十分な応答性を持たないが、標準的なInGaAs技術を利用すれば、まずまずのコストで70%以上の量子効率を得ることができる。

別の例として、牛肉に含まれる脂肪酸の検出には、1000～2300nmの波長範囲が必要である。拡張InGaAs技術を採用するセンサは、900nmから2.5μmまでの波長範囲が検出可能であ

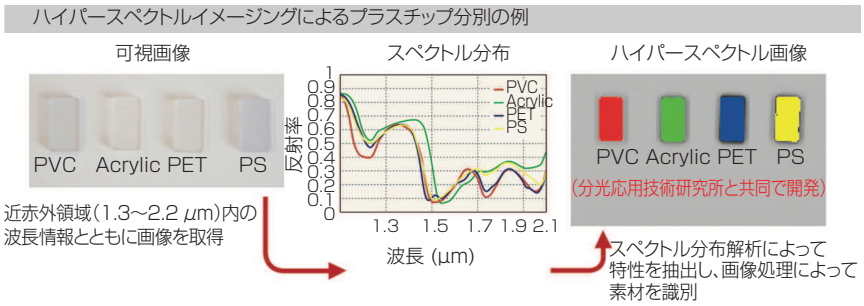


図2　リサイクル工場（上）には、年間300万トンのプラスチックが搬入される。ハイパースペクトルカメラは、4種類のプラスチックを分別できる（下）。

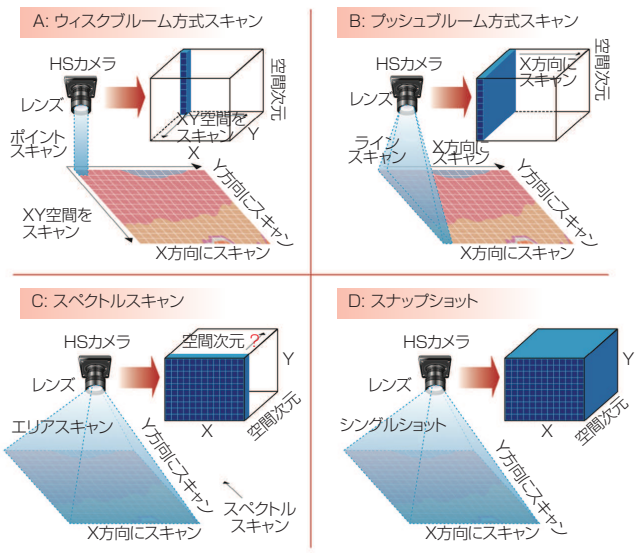
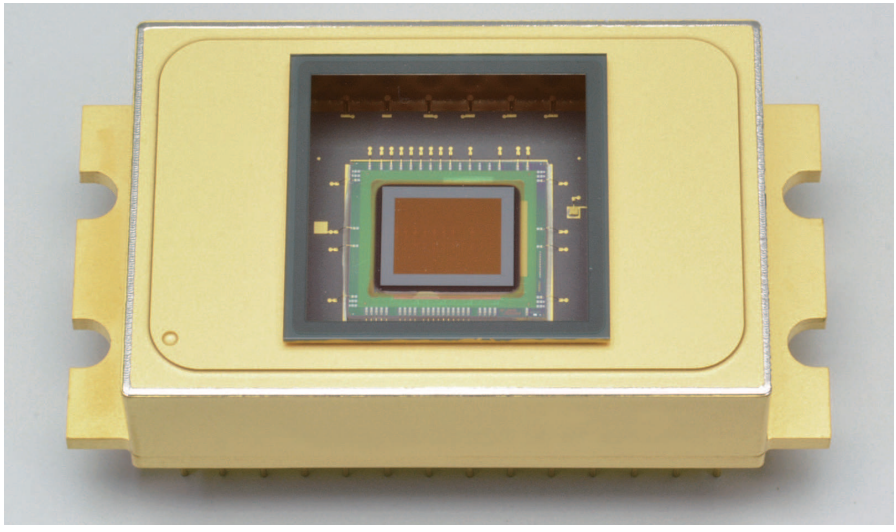


図3　ハイパースペクトルカメラの種類とそれぞれの画像取得及びデータ保存方法。(a)はウィスクブルーム方式のカメラ、(b)はプッシュブルーム方式のカメラ、(c)はスペクトルスキャンに基づくハイパースペクトル（HS）カメラ、(d)はスナップショットカメラ。



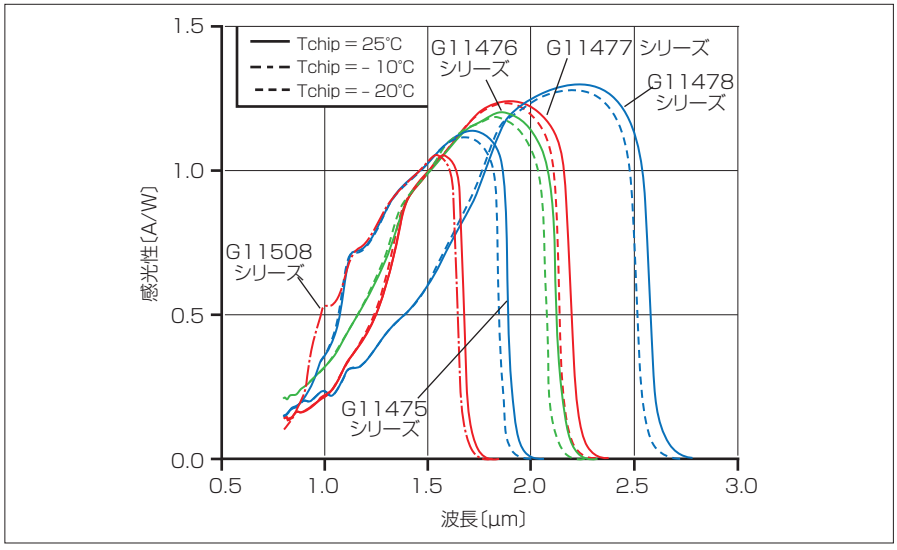


図4　浜松ホトニクスは、InGaAsエリアイメージセンサ「G14741-0808W」（上）を提供している。下のグラフは、この製品の受光感度とスペクトル応答を示している。

るため、1.7μmを超える範囲のハイパースペクトルイメージングに適している。波長範囲を拡大したInGaAsエリアイメージセンサを提供できる数少ないサプライヤーの1社である浜松ホトニクスは、カットオフ波長が1.7μm、1.9μm、2.2μm、2.5μmの一連のQVGA InGaAsエリアイメージセンサを提供している（**図4**）。

ダイナミックレンジ

光学センサのダイナミックレンジは、特にプッシュブルーム方式の技術を採用して画像取得を行う場合は、広い波長範囲の情報を取得するために非常に重要である。プッシュブルーム方式のカメラは、一度に1本の画像ライン全体をスペクトル情報とともに取得し、露光時間は、すべての波長に対して1つの値にしか設定できないため、センサは、波長範囲全体の非常に低レベルの信号とピーク信号を取得できるだけの十分なダイナミックレンジを備える必要がある。ダイナミックレンジは、センサの読み出しノイズと飽和レベルの両方に依存する。読み出しノイズによって一般的に、センサが検出可能な最小信号レベルが決まる。例えば、1.2 Vの飽和出力レベルで1500のダイナミックレンジを得るには、読み出しノイズは800μVrmsでなければならないが、CMOS ROIC設計でそのレベルを達成するのは容易ではない。露光時間が長い場合は、暗電流によるダークショットノイズを考慮する必要がある。特に拡張InGaAs技術を利用する場合は、これが必要である。例えば、ピクセル形式が同一である場合、標準的なInGaAsセンサ（カットオフ波長:1.7μm）の暗電流の規定値は0.03pAであるのに対し、拡張InGaAsセンサ（カットオフ波長：2.5μm）の暗電流の規定値は

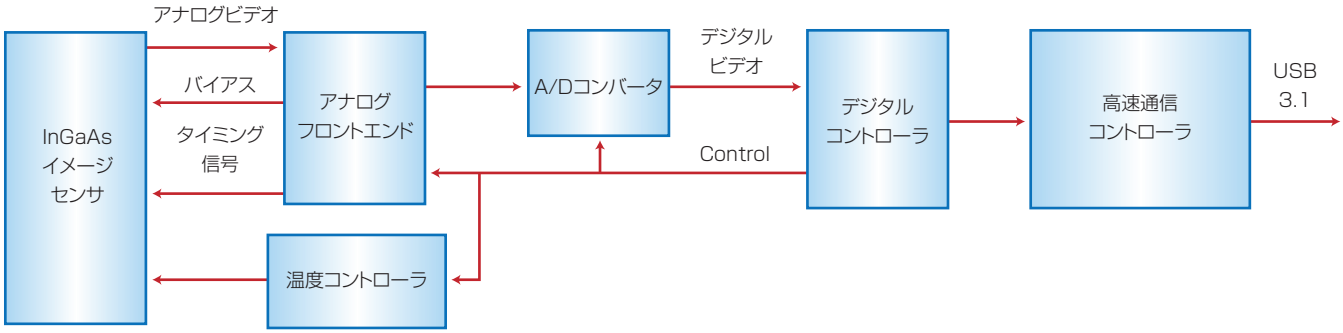


図5　松ホトニクスのQVGA InGaAsエリアスキャンカメラ「C14041-10U」の写真と、このカメラ設計のブロック図。

30pAにも上る場合がある。

感度

従来の分光法では、露光時間が最大で約30秒に設定可能であるのに対し、HSIでは、どの波長においても飽和が生じないように、露光時間を十分に短くする必要がある（ミリ秒か、マイクロミリ秒の範囲が求められる場合もある）。飽和は、いずれかの波長におけるセンサの感度が十分でない場合は、一部のスペクトルバンドの露光不足や、スペクトル測定精度の低下につながる恐れがある。センサの感度には、フォトダイオードアレイの受光感度と、オンチップの読み出し回路の電荷／電圧変換利得が含まれる。ただし、読み出しノイズレベルは一般的に、感度の増加とともに増加する。エリアスキャン方式のHSIでは、適切な露光時間とオンチップ利得を波長ごとに設定することが可能である。例えば、低信号範囲に対しては、長い露光時間や高い変換利得を設定し、強信号範囲に対しては、短い露光時間や低い変換利得を設定することにより、波長範囲全体にわたって滑らかな出力スペクトルを得ることができるのである。浜松ホトニクスは、オンチップの電荷／電圧変換利得がプログラム可能な、ラインとエリアの両方のInGaAsイメージセンサを提供している。

高速取得：IWRとROI

最も一般的なハイパースペクトルイメージング手法であるプッシュブルーム方式では、ハイパースペクトルデータキューブがBIL形式（Band Interleaved by Line）形式で保存され、スキャンは一方向に連続的に行われる。このことから、プッシュブルーム方式のカメラは、食品品質や安全性検査、リサイクル工場の分別、薬品のラベル付けやパッケージングなどの産業プロセスに一般的に使用される、ベルトコンベアシステムに特に適している。高速に移動する物体を対象とする場合は、高速な画像取得が不可欠となる。露光時間を短くするだけでなく、センサ設計のアーキテクチュアによっても、読み出し速度を向上させることができる。例えば、オンチップにサンプルアンドホールド回路を搭載すれば、IWR（Integrate While Readout：読み出しながら蓄積）機能が可能となり、（1つ前の露光によるデータを含む）ライン全体を読み出している間に、センサは

次の露光を開始することができる。

エリアスキャン方式は、一連の波長における空間情報とスペクトル情報の両方を記録するため、高速イメージングに対して魅力的だが、エリアスキャンカメラは、移動するサンプルの測定を必要とするアプリケーションには適さない。浜松ホトニクスは、カラムパラレル構造と部分読み出し（ROI）機能を備えたエリアイメージセンサを製造している。これは、ピクセル数に比例して読み出し時間を短くできるだけでなく、データの保存と処理にかかる時間も短縮する。

カメラの要件

カメラ

ハイパースペクトルイメージングカメラには、ラインスキャンとエリアスキャンの2種類がある。

ラインスキャンカメラは、線形の1次元センサを搭載し、40,000ライン／秒を超える高いフレームレートがメリットであるため、組み立てラインのインライン検査に適している。欠陥識別やパターン認識用の人工知能（AI）と組み合わせれば、高い取得速度によってAIベースの分別や欠陥識別が可能になるため、検査システムの貴重な要素である。

エリアスキャンカメラは、2次元センサを搭載し、シーン全体のスナップショット画像を生成することによって、高い空間情報を提供する。標準的なエリアスキャンInGaAsカメラは、QVGAまたはVGAのフォーマットで提供されている（**図5**）。多数の画像をすばやく取得可能で、広い視野を備え、農業分野の広域イメージングに適している。

ハイパースペクトルイメージングカメラも、食品検査、セキュリティ、プラスチック分別、創薬の分野に適用されている。多くのカメラが、ノイズと暗電流を抑えて、全体的な画質を向上させるための冷却機構をセンサに備える。また、オンボードメモリや、ユーザーがアクセス可能なFPGAは、カメラのカスタマイズを非常に魅力的にする要素である。

インタフェース

インタフェースの選択は、カメラを選択する際の重要な検討項目である。それによって、カメラの速度、接続性、装置の他の部分との統合性が定義されるためである（図5）。カメラには、それぞれ異なる目的に向けて設計された多数のインタフェースが提供されている。最も一般的なのはUSBとGigEだが、その他にRS-422/LVDS、Camera Link、RS-232、CoaXPressなどが存在する。

ソフトウエアサポート

適切なソフトウエアをハイパースペクトルハードウエアに組み合わせることが、システム開発の重要なステップである。カメラは選択されたソフトウエア環境で機能しなければならないため、ハードウエアドライバのサポートを考慮する必要がある。米ナショナルインスツルメンツ社（National Instruments）の「LabVIEW」、米マスワークス社（MathWorks）の「MATLAB」、米コグネックス社（Cognex）の「Vision Pro」、伊データロジック社（Datalogic）の「IMPACT」など、異なるメーカーのカメラと適切に統合するサードパーティソフトウエアプラットフォームが、現在多数存在する。

ソフトウエア開発キットのサポートは、インタフェースのセルフプログラムを求めるユーザーにとって、重要な検討項目である。カスタムインタフェースを作成することにより、エンドユーザーのエクスペリエンスを完全に制御することが可能になる。PythonやC++が一般的なプログラミング言語だが、Linux OSは、デバイスとデータフローを制御するための素晴らしい柔軟性を備える。開発者は、コストのかかるシステムの再設計を行わずに済むように、そうしたプログラミングツールをカメラがサポートするかを確認しておく必要がある。

結論

ハイパースペクトルイメージングには、産業用カメラと分光計の機能が組み合わされている。分光計とカメラの両方を使用する代わりに、1台のカメラによってスペクトル情報と空間情報を同時に収集することにより、時間とコストの両方を節約する。以前のイメージセンサとカメラは、速度、解像度、感度、ソフトウエアに制約があった。新たな技術進歩によって、ハイパースペクトルイメージングはかつてないほど簡単になっている。浜松ホトニクスなどの企業によって、高い速度、解像度、感度を備えたイメージセンサとカメラが開発されている。また、改良されたソフトウエアやプログラミングツールによって、ハイパースペクトルイメージングを任意のアプリケーションに簡単に統合することができる。ハイパースペクトルイメージングには現在、多数のオプションが提供されている。

著者紹介
ル・チェン（Lu Cheng）は、浜松ホトニクス株式会社のシニアアプリケーションエンジニア、ブラッド・コイル（Brad Coyle）は、同社OEMカメラ製品マネージャー、アルバート・トゥ（Albert Tu）はマーケティングエンジニア。

VSDJ