

イメージング分野に 変革をもたらす可能性を秘めた ハイパースペクトルイメージング

ジェレミー・ピコット・クレメンテ

本稿では、欧州の企業によって開発されている、ハイパースペクトルイメージングに基づく製品を紹介する。

ハイパースペクトルイメージング(HSI)は、同じ空間領域に対して異なる波長の数千もの画像を収集する、分光法に基づく分析手法である。人間の目には、青、緑、赤の3色の受容体しかないが、HSIは、シーンの各ピクセルに対する光の連続スペクトルを、可視域だけでなく近赤外域(NIR)を含めて、細かい波長分解能で測定する。各ピクセルに入射する光を、多数の異なるスペクトルバンドに分解することによって、撮影対象物に関する詳しい情報が得られる。収集されたデータは、3次元のハイパースペクトルキューブを形成する。2つの次元は、シーンの空間的広がりを表し、3つ目に次元は空間的コンテンツを表す。

HSIは、スペクトルイメージングやスペクトル分析と一般的に呼ばれる手法の1種である。マルチスペクトルイメージング(MSI)もこれらの手法の1つだが、両者の最大の違いは、HSIは、連続的な隣接する波長範囲を(例えば、400~1100nmを1nm間隔で)使用するのに対し、MSIは、選択領域における対象波長のサブセットを(例えば、400~1100nmを20nm間隔で)使用することである。MSIセンサは一般的に、各ピクセルに対して3~10個の異なるバンドを測定するのに対し、HSI画像には、それよりも狭い数千もの隣接す

るスペクトルバンドを含めることができる。その結果、HSIセンサはMSIセンサよりもはるかに多くのデータを取得することができる。例えば、MSIは森林地帯のマッピングに利用できるのに対し、HSI画像は森林の中の樹木の種類のマッピングに利用できる。

MSIは、HSIの能力を低減したサブセットと考えることができるが、2つの技術は相補的な関係にあり、どちらを選択するかは用途の要件によって決まる。例えば可視域において、ブルーベリーなどの果物の形状の識別や目では見にくい傷の検出には、MSIが使用できる。しかし、アボカドの脂肪含量の非常に細かい分析結果を得ることが目的ならば、HSI技術でなければ対応できない。

MSIとHSIの両方の背景にあるアルゴリズムや画像処理手法は1970年代から存在し、米国のランドサット(Landsat)プログラムで打ち上げられた最初の衛星であるランドサット1号に、初めてマルチスペクトルスキャナが搭載されたことに端を発している。その後、1980年代半ばには、NASAのAIS(Airborne Imaging Spectrometer)やAVIRISが開発されて、「ハイパースペクトルイメージング」という造語が、米カリフォルニア工科大(California Institute of Technology)



図1 スペクトルイメージングプラットフォーム「SpecimONE」(提供:スベシム社)

のイメージング分析システムグループ(Imaging Analysis Systems Group)を率いるジェリー・ソロモン氏(Jerry Solomon)によって作られた⁽¹⁾。

当時は、マイクロプロセッサが存在せず、画像処理は大規模な中央コンピュータセンターで行う必要があった。その後、特にこの5年間で、マイクロプロセッサとチップベースのセンサが開発されたことで、HSI技術は地球観測だけでなく、農業、産業仕分け、医療研究、食品品質管理、環境モニタリングなど、多数の分野に適用範囲が拡大されている。

HSIの応用分野

物質はそれぞれ固有のスペクトルシグネチャを持ち、一意に識別することができる。従ってHSIは、非侵襲的に、ラベルフリーで、非破壊的に物質の成分を確認する能力を理由に、以下のような幅広い分野に適用される。

- ・医療：拡張現実(AR)を利用した手術や医療診断

- ・マシンビジョン：食品、鉱物、布地、プラスチックなど、ほぼあらゆる物質の分類
- ・リモートセンシング：農業用土壌、鉱物、プラスチック、汚染物質の分類と、監視
- ・農業：生育過程の最適な制御のための病害の初期症状、水ストレス、土壌品質の検出
- ・芸術と文化遺産の分析：芸術品がどのように、いつ、どこで最初に製作されたかや、その後変更されたかどうかの判定
- ・食品品質管理：食品の化学成分の識別と定量化による、栄養素、脂肪含有率、糖度、新鮮さなどの情報の提供
- ・廃棄物の仕分け：プラスチック、布地、金属、ガラス、紙、段ボール、アスベストなどの危険物質の仕分けと分類
- ・製薬：医薬品の化学成分の品質保証
- ・採鉱と石油：採掘物などの地質サンプルの迅速で確実な鉱物分析
- ・フォレンジック：血痕や残留弾薬など、犯罪現場からの証拠の収集

HSIシステムの商用化

最近の市場レポートによると、世界ハイパースペクトルイメージング市場は、2020年から2027年の間に8.2%の年平均成長率(Compound Annual Growth Rate:CAGR)で成長し、2027年までに35億2000万ドル規模に達するという⁽²⁾。最も急速な成長が見込まれている地域はアジア太平洋と欧州で、CAGRはそれぞれ9.3%と8.5%になるとされている。

主な推進要因は、物質の正確で確実な分析に対する需要が高まっていること、人工知能(AI)などの新技術の開発とともに低コストのイメージングシステムが開発されていること、リモー



図2 ハイパースペクトルカメラ「Specim FX10」「Specim FX17」「Specim FX50」(提供:スペシム社)

トセンシングに対する需要が高まっていることである。主な応用分野は、医療診断、産業用マシンビジョン、環境モニタリング、軍用監視である。

HSIの種類

ハイパースペクトルカメラは、以下の5つの方法で3Dデータキューブを形成する情報を取得することができる。

ウィスクブルーム(whiskbroom、ポイントスキャン)方式は、1度に1つのピクセルを取得する。画像は、サンプル周辺のカメラスキャンとして構築され、そのすべてのスペクトル情報を含む。画像取得に非常に長い時間がかかるが、非常に高いスペクトル分解能が得られる。

プッシュブルーム(pushbroom、ラインスキャン)方式は、1度に1列のピクセルを取得し、産業用品質管理プロセスに広く採用されている。最大の制約は、分光器の入射スリットによって高い損失が生じることである。

フーリエ変換(FT)分光法は、連続スペクトルを測定するための代替手法である。モノクロのイメージセンサに干渉計を組み合わせた手法で、プッシュブルーム方式よりも高い光スループットが得られる。

スペクトルスキャンは、特定波長の空間情報全体を、1度に1波長ずつ収集する。画像取得は高速だが、波長変

更に必要な時間によって、キューブ生成は遅くなる。

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。移動物体のイメージングに対しては高速で理想的だが、一般的にはスペクトル分解能と空間分解能が限られている。

HSIシステムを製造する 欧州メーカー

フィンランドのスペシム社(Specim)は、プッシュブルーム技術に基づくHSIソリューションのグローバルサプライヤーである。「SpecimONE」プラットフォームには、業界で実証済みのハイパースペクトルカメラ「Specim FX」、分類モデルを作成するためのソフトウェアツール「SpecimINSIGHT」、モデルをインラインシステムでリアルタイムに実行する処理装置「SpecimCUBE」が含まれている。この使いやすい完全型のスペクトルイメージングプラットフォームは、かつてないほど簡単、高速、安価にハイパースペクトル技術を産業用途に適応させることを目的に設計されている(図1)。Specim FXシリーズは、産業用マシンビジョンを明示的な対象として設計された、初めてのハイパースペクトルカメラで、可視域とNIRから遠紫外域までの波長をカバーする(図2)。「Specim FX50」は、中波赤外域(MWIR)全体(2.7~5.3 μ m)をカバーする、市場唯一のハイパースペクトルカメラで、黒色プラスチックの検出などに用いられている。

産業要件に見合うコストパフォーマンスを実現するようになったことで、スペシム社のハイパースペクトルカメラは、アスベストなどの有害廃棄物の仕分けや、プラスチック、布地、金属、



図3 imecの一連のハイパースペクトルセンサ。分光フィルタがモザイクまたはストライプのパターンで、イメージセンサに適用されている(提供:imec)

ガラス、紙、段ボールなどの物質の分別のほか、食品業界におけるジャガイモの糖度判定など、マシンビジョンの幅広い用途に利用されている。

ベルギーの imec (Interuniversity Microelectronics Centre) は、ナノエレクトロニクスとデジタル技術の分野で世界をリードする国際的な研究開発機関である。imec は、半導体製造施設、装置、プロセス技術に特に焦点を当て、オンチップのスペクトルイメージングなどの先進技術を専門としている。従来の HSI カメラは、光を選択して回折するための高精度な光学部品を搭載しており、そのために比較的重く、高額、低速、繊細で、頻繁に再校正が必要である。imec はこれらの問題を解決するために、薄膜分光フィルタをウエハレベルでイメージセンサピクセル上に直接堆積するという、ユニークな CMOS プロセスをスペクトルイメージング向けに開発した(図3)。このフィルタは、複雑な光学カメラ設計を取り除くもので、スマートフォンや、科学用イメージング機能を備えるモデルに搭載されているような、商用 CMOS イメージセンサに適用することができる。

imec の製造プロセスによって、センサを手頃な価格で量産することが可能となり、その薄膜フィルタ設計は、具体的な用途に合わせて調整することが

できる。このオンチップのスペクトルイメージング技術は、分光フィルタのパターンに応じて異なる「フレーバー」で提供されている。例えば、スナップショット型の分光センサは、ベイヤー配列に似たモザイクパターンがイメージセンサの上に重ねられており、狭帯域の分光フィルタがピクセル毎に適用されていて、多数の動きを伴うシーンや動的なプロセスの監視に最適な、ビデオレートのスペクトルイメージングが可能である。ラインスキャン方式のハイパースペクトルセンサは、ストライプのパターンが各ピクセル列に重ねられており、高分解能 HSI が可能である。imec の技術は、2次元画像をチップ上で直接カラーチャンネルに分解するため、プッシュブルーム方式のラインスキャン技術に匹敵する性能を、よりコンパクトで堅牢で使いやすい形状で実現する。応用分野は、医療、マシンビジョン、リモートセンシング、農業、芸術と文化遺産の分析、フォレンジックなどである。

伊ニレオス社(NIREOS)は、光の分散ではなく干渉を使用してスペクトルを測定する、FT に基づく新しいハイパースペクトルカメラ「HERA」を開発した(図4)。空間またはスペクトルスキャンに基づくハイパースペクトルシステム(プッシュブルーム方式のスキ

ャナやフィルタベースのカメラなど)には、スリットやグレーティングが含まれており、それによって検出器に届く光の量が制限される。これに対して HERA は、大きくクリアなアパーチャを備え、非常に高い光スループット、高い感度、可変のスペクトル分解能を提供する。低照度条件下でも使用可能で、例えば、サンプルのさまざまな領域から放射される弱い蛍光スペクトルを記録することができる。

そのカメラは静止モードで動作し、カメラまたはサンプルを動かすための面倒な移動ステージを追加する必要がない。また、焦点深度が大きく、3次元の物体や景色の HSI が可能である。HERA は、使いやすいポイントアンドシュートカメラ(被写体に向けてシャッターを押すだけの全自動カメラ)で、物質分類や食品検査、文化遺産、環境モニタリング、リモートセンシングなどのさまざまな分野における透過率、反射率、蛍光の測定に適している。

HSI は顕微鏡分野ではあまり利用されていないが、ベルギーのラムダ X 社(Lambda-X)が調査しているのはこの分野である。ラムダ X 社は、以前の宇宙プロジェクトを対象に、宇宙船などの物体が大気圏に再突入する際の燃焼現象の化学分析を行うオリジナルの HSI カメラを開発した。この目的に対して同社は、制約のある環境内のシーン、特に振動を測定することのできる、専用の HSI アーキテクチャを開発した。

この革新的な HSI システムは、共通ビームの干渉計構造と、可視および NIR 域(VNIR: 400~950nm)で動作する FT 干渉計に基づいている。カメラは、回折限界の光学系を使用するため、顕微鏡分野に適用できる。それと同時に、十分に高いスペクトル分解能(400nm で 8cm^{-1} または 0.13nm まで)

を備えるため、高度な蛍光イメージングやラマンイメージングの用途に対応できる。これに関連してラムダX社は最近、このような高分解能のイメージング装置が、食品業界におけるメラミンと粉ミルクの区別に適用できることを実証した。この技術は、大気ガスのリモート分析や植物蛍光のリモート検出など、高いスペクトル分解能と空間分解能の両方を必要とする、それ以外の用途にも適用できる。

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、「HySpex」シリーズとして、VNIRと短波赤外域(SWIR)に対応する3種類のプッシュブルーム方式のハイパースペクトルカメラを、航空機、



図4 ニレオス社の「HERA」カメラ。拡張SWIR-3領域(900~2300nm)をカバーする(提供:ニレオス社)

実験室、無人航空機(Unmanned Aerial Vehicle: UAV)、野外や、産業用途を対象に提供している(図5)。「HySpex Mjolnir」は、UAVからの科学グレードのデータの収集を対象として、小型化と軽量化を特に念頭に設

計されている。例えば、Mjolnirを装備するドローンは、露天採鉱場の上を飛行して、化学的、物理的、鉱物学的特性をすばやくマッピングすることができる。「HySpex Baldur」は、食品業界の品質管理、異物検出、仕分け、分類の用途を対象とした、産業用カメラである。2スペクトルバンドのスペクトル分解能を持ち、従来のシステムの4倍の光を取得することによって、タラの切り身の中の寄生線虫の自動検出が可能で、コストの削減、食品安全の向上、廃棄物の削減に寄与する。HySpexシリーズの最新モデル「VS-1200」は、航空用途向けに設計された高分解能カメラである。40°の視野角を持ち、高い精度と分解能での広域マ

THE FUTURE DEPENDS ON OPTICS™

TECHSPEC®

非軸放物面ミラー (金コート)

- NIRやIR アプリケーション用の金コーティング
(保護膜付き or なし)
- 50Åと100Åの面粗さをラインナップ
- 15°, 30°, 45°, 60°, 90°の非軸角度オプション
- アルミコートと銀コートの非軸放物面ミラーもラインナップ



エドモンド・オプティクス・ジャパン株式会社

〒113-0021 東京都文京区本駒込2-29-24

パシフィックスクエア千石 4F

TEL: 03-3944-6210 E-mail: sales@edmundoptics.jp

Edmund
optics | japan

詳しい情報はこちらへ:

www.edmundoptics.jp/073-8154

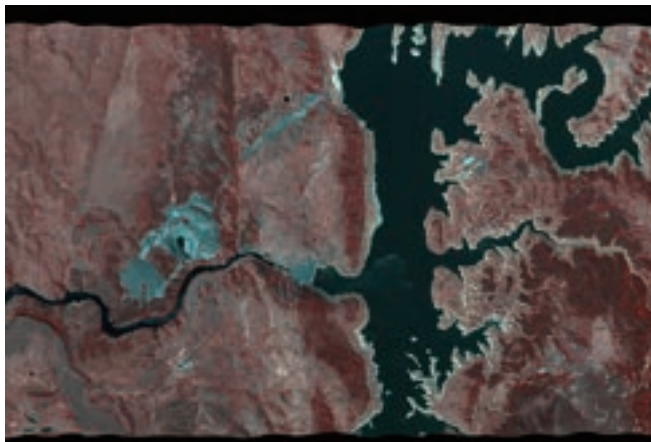


図5 HySpexシリーズの新しい成層圏用VNIR/SWIRシステムによる画像。画像の赤い部分は、この成層圏用システムを使ったNASAの観測活動の最初の飛行経路の撮影画像から切り取った、擬色RGB画像である(提供:NEO社)

ッピングに最適である。

NEO社は2022年に、HySpexシリーズの新しい成層圏用VNIR/SWIRシステムを設計した。NASAが有人航空機「ER-2」で2022年9月に行った最初の航空観測用に、これを購入している。

残る課題

HSIは、MSIシステムよりもはるかに高い分解能を持つが、コストと複雑さの面でデメリットがある。ハイパースペクトルキューブは、大きな多次元データセットで、ハイパースペクトルデータの分析には、高速な処理、高感度の検出器、大容量のデータストレージが必要である。これらの要因によって、ハイパースペクトルデータの取得と処理のコストと複雑さは、著しく増大する。例えば、宇宙分野では、自らデータを仕分けして重要な画像だけを送信するように、いかにしてハイパースペクトル衛星をプログラムするかが、主要な問題である。大量データの送信と保存は、困難でコストのかかる処理になる可能性があるためだ。

同様に産業分野では、画像保存とデータ出力をローカルとリモートのどちらで行うかという決断が、製造速度に合わせなければならない処理速度に、影響を与える可能性がある。その他の問

題としては、適切な波長の判断、適切なスペクトル分解能と空間分解能を持つ正しいカメラの選択、主要波長で適切な強度を持つ照明の選択などがある。また、HSIには一般的に、高いレベルの物理的理解が必要であるため、ソフトウェアはできるだけ直感的で、物質を簡単に分類できなければならない。

このような問題に対応するために、これまでのHSI技術の開発は、複雑さを抑えて、HSIの産業用途をこれまでよりも簡単に、迅速に、安価に利用できるようにすることを、共通の目的としている。本稿で紹介した、複雑な光学カメラ設計を取り除くためのCMOSプロセスや、カメラ/ソフトウェアツール/処理装置で構成される使いやすい完全型のスペクトルイメージングプラットフォーム、高い光スループットを実現して低照度条件下でも使用できるFT手法に基づくカメラも、これに

含まれる。

今後数年間でHSI技術は、複雑さの緩和とコストの低下に伴って、主流のイメージング分野へと進出していくだろう。正確で確実な物質の分析という、さまざまな分野で高まる需要に対応できる、十分なスペクトル分解能と空間分解能を持つ技術は、これ以外に存在しないためである。それに続いてHSIの応用範囲は、農業、環境モニタリング、生物医学といった新しい業界へと拡大していくだろう。より高精度で正確な物質分析に対する需要は高まっているため、HSI技術はこれらの市場において、重要な役割を担うことになる。また、リモートセンシングやUAVの成長は、環境モニタリングやマッピングの分野において、HSI技術に対する需要を促進すると予想される。HSI技術は継続的な進化に伴って、私たちが物質を理解して分析する方法を大きく変えて、新しい洞察と機会を幅広い業界にもたらす可能性がある。

HSIは、私たちの生活と地球に多大な好影響を与える可能性を秘めた手段である。その目的が、サステナビリティ(持続可能性)の推進であれ、公衆衛生の向上であれ、安全性とセキュリティの強化であれ、この最先端技術は、新しい胸躍る方法で世界を見る手段を私たちに与え、人類が直面する最大の課題の一部に取り組む意欲を私たちに吹き込むだろう。

参考文献

- (1) A. F. H. Goetz, G. Vane, J. E. Solomon, and B. N. Rock, *Science*, 228, 4704, 1147-1153 (Jun. 7, 1985); doi:10.1126/science.228.4704.1147.
- (2) See www.researchandmarkets.com/reports/4535750/global-hyperspectralimaging-market-growth.

著者紹介

ジェレミー・ピコット-クレメンテ(Jérémy Picot-Clément)は、欧州フォトニクス産業コンソーシアム(European Photonics Industry Consortium: EPIC)のフォトニクス技術マネージャーで、フランスのオーヴェルニュ＝ロヌ＝アルプ在住。e-mail: jeremy.picot-clemente@epicassoc.com URL: www.epic-assoc.com