

多彩なマシンビジョンアプリケーションを可能にするSWIRイメージング

リンダ・ウィルソン

SWIRイメージングを使用してエンジニアらは、食品検査、水分検出、メタンガス検知などのアプリケーションを開発している。

短波赤外(shortwave infrared:SWIR)イメージングによってマシンビジョンの専門家は、可視光では簡単に実現できないアプリケーションを開発することができる。

SWIRは、人間の目には見えない電磁スペクトルの光波長帯である。SWIRは一般的に0.9~1.7 μm の波長範囲の光として定義されるが、米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)によると、0.7~2.5 μm とする分類もあるという。

SWIR光はほとんどの場合、「可視光について皆さんが既にご存じのとおり動作する」と、米マシンビジョンソース社(Machine Vision Source)創業者のデビッド・デホー氏(David Dechow)は、SWIRイメージングに関する2023年のVision Systems Design ウェビナー(bit.ly/45b0Q2k)で説明していた。

概して可視光と同じように動作するが、SWIR光は、水、プラスチック、ガラスなど、いくつかの一般的な物質に対して、可視光とは異なる反応を示す。この性質によってSWIRは、それらの物質が関係するマシンビジョン用途に対して、可視光よりも有効である。

例えば、一部のSWIR波長は水に吸収される。これは、SWIRカメラで撮影した画像において、水分を含有する部分が暗く現れることを意味する。その一方で、SWIR光は一部の種類のプ



図1 SWIRイメージングは、水分含有量の高い食品の検査に有効である

ラスチックを透過するため、それらのプラスチックはSWIRカメラで撮影しても画像に現れない。

この性質を利用してエンジニアは、SWIRイメージングを使用して「完全に不透明なプラスチック容器の中の水性物質(白一色の牛乳瓶の中の牛乳など)」を検出するアプリケーションを開発できるとデホー氏は述べた。それらのカメラは、果物などの水分含有量が高い食品の品質検査にも有効で、傷や痛みなどが確認できるためだと、同氏は言う。

独アライド・ビジョン・テクノロジー

ズ社(Allied Vision Technologies)のSWIRイメージング事業開発マネージャーを務めるイエンス・ハシャゲン氏(Jens Hashagen)は、次のように付け加えた。「SWIRイメージングは、多くの用途で利用が広がっている。多くの物質がSWIR範囲において独自のスペクトル反応を示すことを、ますます多くのユーザーが理解しているからである」。

水分の検出

容器の中の液体レベルの測定に加え、衣類の水分の検出も、SWIR光の



図2 SWIRカメラシリーズ「Goldeye」には、ソニーのSenSWIR InGaAs センサが搭載されている(提供:アライド・ビジョン社)

水に対する反応を利用するアプリケーションである。「SWIR イメージングを使用した衣類の水分の検出は、反射率パターンのわずかな変化を捉えることによって行われる。水分は、1400nmで光の反射率が変化するためだ。SWIRは、布地のどこにどれだけ水分が含まれているかを検出できるため、繊維業の品質管理において非常に貴重である」と、米プリンストン・インフレアド・テクノロジー社(Princeton Infrared Technologies)の社長兼最高経営責任者(CEO)のマーティン・H・エッテンバーグ氏(Martin H. Ettenberg)は説明している。

医療イメージング

アライド・ビジョン社のハシャゲン氏は、別の重要な用途におけるSWIRイメージングの役割について、次のように説明してくれた。「医療イメージングの分野では、SWIRの導入が特に有望である。水分、脂肪、コラーゲンといった重要な人体成分が、この波長範囲に明らかな吸収ピークを持つためだ。医療イメージングにおいてNIR-IIウィンドウ(第2近赤外光学窓)と呼ばれることの多いSWIRは、イメージング深度を高め、自家蛍光と400~950nmで

生じる光子散乱を大幅に低減する。可視域における透明や半透明の画像ではなく、SWIRは、前臨床または臨床分野への応用を促進する、特徴的な高コントラストの画像を提供する」。

メタンガスの検知

SWIRは、汚染のモニタリングにも利用されている。例えば、プリンストン・インフレアド・テクノロジー社のエッテンバーグ氏は次のように語った。「SWIR技術は、メタン検出に対する数多くの利点を備える。SWIRはメタンガスに感度があり、複数の光波長を使用してこの温室効果ガスを微量でも検出することができる。この感度は、発生源と蔓延範囲の検出に不可欠である。SWIRは、室温動作時の量子効率(Quantum Efficiency: QE)が高く読み取りノイズが低いため、この用途に最適な選択肢である。また、将来的には衛星にも配置できるほど、システムの小型化と軽量化が可能である」。

太陽光パネルの検査

「太陽電池の検査は新しいものではないが、進歩し続けているSWIRの応用分野だ。EVは需要と普及が拡大することが期待されるため、電力需要も世界規模で拡大するだろう」と、加テレダイナルサ社(Teledyne DALSA)のCMOSセンサ開発責任者のマシアス・モーザー氏(Matthias Moser)は説明した。「電力需要の増加に対応するために電気料金が引き上げられるにつれて、太陽光パネルや、さらに大規模なソーラーファームという形態での太陽光エネルギーが、高騰する価格と、充電用電力の生成に対する国内需要に対応するための代替手段になるだろう」(モーザー氏)。

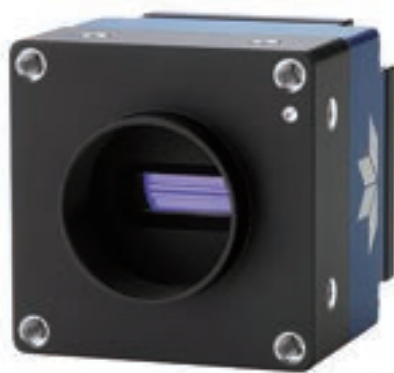


図3 テレダイナルサ社のSWIRカメラシリーズ「Linea」は、分解能が1kまたは512のモデルで提供されている。(提供:テレダイナルサ社)



図4 プリンストン・インフレアド・テクノロジー社の「1280BPCam」は、レーザービームプロファイリングを特に対象として開発されている。(提供:プリンストン・インフレアド・テクノロジー社)

「SWIR技術の最も重要な応用分野の1つはやはり、鉱業と鉱物の識別である。多くの基本的な鉱物にOH結合(酸素原子と水素原子の結合)が含まれていて、その一部はSWIR範囲でしか識別できないためだ」と、フィンランドのスベシム・スペクトラル・イメージング社(Specim Spectral Imaging)のリードアプリケーションスペシャリストであるマシュー・マーミオン博士(Mathieu Marmion, PhD)は述べた。

鉱物の採掘

SWIRイメージングは、広い範囲の

SWIRイメージングは、広い範囲の



図5 SWIRカメラ「Specim」は1000～2500nmの波長範囲で動作する(提供:スペシム社)

岩石を調査するために上空から使用される。また、掘削コアや地質サンプルの分析にも使用されると、スペシム社のウェブサイトには記載されている。

自由空間光通信

アライド・ビジョン社は、未来的な応用分野に言及した。自由空間光通信(Free Space Optical Communication: FSOC)は、レーザを使用して大気中や宇宙空間でデータを無線で伝送する通信方法である。

しかし、この分野で一般的に使用されるレーザは、地上通信に対するFSOCの欠点に対応しない。FSOC伝送は、雨、霧、雪、汚染に起因する大気吸収や散乱などの大気干渉によって妨害される可能性がある。また、日光などのバックグラウンド光源の干渉も受けやすい。

SWIRベースのレーザを使用すればこの問題が解決されるとして、ハシャゲン氏は次のように説明した。「1550nmで動作するレーザは、FSOCに非常に適している。大気干渉の影響を受けにくいために長距離データ伝送が可能で、目に安全であること、高品質の送信器と検出器のコンポーネ

ントが、通信業界においてファイバ通信で既に使用されているために、簡単に入手できるということが、その理由である」。

SWIRベースのレーザは、SWIRカメラに搭載されており、SWIRカメラはこの用途において受信器として使用される。

「SWIRカメラはFSOCシステムにおいて、信号検出能力のさらなる強化とシステムの性能と信頼性の最適化を目的とした、補償光学系(Adaptive Optics: AO)の調整に使われている。主な性能特性は、1550nmにおける感度が高く、ノイズが低く、高いフレームレートに対応することである。また、センサガラスを持たないカメラは、信号電力を高めて、ガラス内の反射とセンサガラスの反射防止膜の汚れに起因する画像アーチファクトを防ぐために効果的である」と、ハシャゲン氏は述べた。

SWIRイメージングのコンポーネント

SWIRイメージングに対し、エンジニアや技術専門家は、センサを含む特



図6 JAI社のSWIRカメラは、RGBとSWIRの画像データを同時に取得する(提供: JAI社)

殊な製品を使用する。SWIR光は、シリコンを直接透過するため、SWIRセンサには可視光センサとは異なる材料が使用される。最も一般的な材料は、InGaAs(ヒ化インジウムガリウム)である。SWIRセンサに使われるその他の材料としては、コロイド状量子ドット(Colloidal Quantum Dot: CQD)とCu-Cu結合がある。

プリンストン・インフレアド・テクノロジーズ社によると、InGaAsは、「950～1650nmで80%を超える量子効率を持つものに対し、CQDは、ほとんどのSWIR波長で10%に届かないという。

しかし、米SWIRビジョンシステムズ社(SWIR Vision Systems)のグローバルセールスマネージャーを務めるサム・ワイマン氏(Sam Wyman)は、「CQD SWIRセンサの現在の量子効率は、商用提供されているInGaAs SWIRセンサよりも低いかもしれないが、次世代のCQD SWIRセンサの量子効率の改善で大きな進歩が得られていることに注目することが重要である」と述べている。同氏はさらに、CQDセンサは一般的にInGaAsセンサよりもスペクトル範囲が広いと、1つのセンサで複数のスペクトル範囲に対応できることも指摘した。

センサの材料が何であろうと、技術の継続的な進歩に伴って、SWIRの応用分野は拡大すると、専門家らは予想している。スペシム社のマーミオン氏が述べているように、「ここ数年のSWIRカメラの進化は、より多くのピクセルを搭載する、より高速でより手頃な価格のカメラを製造するという、一般的なトレンドに従って進行している。それによって、産業ラインシステムにより適したものとなり、顧客はSWIR技術を、さまざまな分野におけるさらに正確な物質検査と品質管理に、さら

に幅広く適用できるようになる」。

エリアスキャンセンサは、SWIR イメージングに使われる最も一般的な種類だが、一部のメーカーはラインスキャン方式を採用していると、デホー氏は付け加えている。

SWIR イメージングを利用するマシンビジョン製品には、光源、フィルタ、レンズなど、その他の一般的なコンポーネントも使用されている。

以下では、商用提供されている製品の例をいくつか紹介する。

- ・テレダインダル社社のInGaAsセンサ搭載SWIR CMOS GigEカメラ「Linea」は、分解能1k、ピクセルサイズ $12.5\mu\text{m}$ のモデルと、分解能512、ピクセルサイズ $25\mu\text{m}$ のモデルで提供されている。どちらも最大ラインレートは40kHzで、950~1700nmの波長範囲で動作する。
- ・RGBとSWIRの画像データを同時に撮像する米JAI社のSWIRラインスキャンカメラは、4センサラインスキャン技術を搭載し、3つの個別のCMOSセンサで赤、緑、青の画像データ、InGaAs技術に基づく4番目のセンサでSWIR波長領域からの画像データを、同時に収集する。「SW-4010Q-MCL」カメラのInGaAs SWIRセンサの分解能は1024ピクセル、センサ幅は25.6mm、最大分解能でのスキャンレートは39kHzである。このカメラはJAI社の「Sweep+」シリーズの1つである。
- ・アライド・ビジョン社のSWIRカメラシリーズ「Goldeye」には、ソニーのSenSWIR InGaAsセンサが搭載されている。このカメラは、ピクセルサイズが $5 \times 5\mu\text{m}$ 、シングルステージセンサ冷却機能を搭載



図7 SWIRビジョンシステムズ社のSWIRカメラ「Acuros」は、CQD-on-CMOSセンサを搭載し、可視域、近赤外域(NIR)、SWIR域のイメージングを行う(提供: SWIRビジョンシステムズ社)

し、ファンレス設計が採用されている。400~1700nmの波長範囲の画像取得が可能で、複数の画像補正機能を搭載する。Camera LinkまたはGigE Visionのいずれかのインターフェースに対応する。「IMX991」センサを搭載する「Goldeye G-030」は、 656×520



図8 ニュー・イメージング・テクノロジー社のHD SWIRカメラ-Smart Version「SenS 1280」は、 1280×1024 ピクセルの分解能を備える(提供:ニュー・イメージング・テクノロジー社)

ピクセルの分解能でフレームレートは234fpsで、「IMX990」センサを搭載する「Goldeye G-130」は、 1280×1024 ピクセルの分解能で最大フレームレートは94fpsである。

- ・SWIRビジョンシステムズ社のSWIRカメラ「Acuros」は、CQD-on-CMOSセンサを搭載し、可視域、近赤外域(NIR)、SWIR域のイメージングを行う。USB 3.0またはGigE Visionのいずれかのインターフェースを備え、2.1MPで 1920×1080 フォーマット、1.2MPで 1280×1024 フォーマット、VGAで 640×512 フォーマットの各センサによる3つの分解能のカメラが提供されている。

- ・仏ニュー・イメージング・テクノロジー社(New Imaging Technologies)のHD SWIRカメラ-Smart Version「SenS 1280」は、 1280×1024 ピクセルの分解能、60Hzフルフレームレート、80%を超えるQEを備える。最適な輝度とコントラストを実現する自動利得制御(Automatic Gain Control: AGC)など、手動調整を不要にする画像処理機能を搭載している。
- ・SWIRカメラ「Specim」は、1000~2500nmの波長範囲で動作し、384の空間ピクセルを持ち、Camera Link接続を使用して最大400fpsのフレームレートを達成する。また、IP54の耐候性を備えた頑丈な筐体に収められている。
- ・プリンストン・インフレアド・テクノロジー社の「1280BPCam」は、レーザビームプロファイリングを特に対象として開発されている。画素数は 1280×1024 ピクセル、ピクセルサイズは $12\mu\text{m}$ で、フル分解能で90fpsのフレームレートを備える。