

サーマルイメージングの原動力となる LWIRカメラ

ジョン・ウォレス

長波長赤外焦点面アレイにより、室温に近い温度のサーマルイメージングの
応用分野が広がっている。

室温またはそれに近い温度の物体のサーマルイメージングは、8~14 μm の長波長赤外(LWIR)のスペクトル帯で一般的に行われる。プランクの法則に基づき、室温(300K)の物体の黒体放射は、約9 μm のLWIR帯でピークとなるためだ。LWIRイメージングには、それ自体の光で物体を撮像し、温度に基づいて物体を識別できるという、大きなメリットがある。また、太陽光はLWIR波長の出力が比較的低いため、LWIRイメージングは屋外での

利用にも適している。

LWIRイメージングで最も広く使われている種類のセンサで、本稿でも最も多く紹介するのが、非冷却ボロメータ焦点面アレイ(Focal Plane Array:FPA)である。通常は(必ずしもそうであるとは限らないが)、酸化バナジウムが材料として用いられる。LWIRイメージングの応用分野は多岐にわたり、監視及びセキュリティ、生物学や地質学などの科学分野、産業検査とプロセス制御、医療や獣医学の分野など

に、多くの用途が存在する。本稿では、現在商用化されているLWIRイメージング装置の例をいくつか挙げて、その背景を簡単に紹介したいと思う。

小ピクセルのイメージング装置

米レオナルドDRS社(Leonardo DRS)は、非冷却酸化バナジウムマイクロボロメータFPA、カメラモジュール、カメラシステムを、軍用及び商用市場向けに製造している。同社の電気光学及び赤外システム事業担当バイスプレジ



図1 Tenum 640(上の写真)などのDRS社製カメラに搭載されているImage Contrast Enhancement(ICE)アルゴリズムは、同社が特許取得済みのEnhanced Multiresolution Local Area Processing(emLAP)に基づいている。DRS社によると、emLAPは、元のセンサ出力の帯域全体にわたる最大限の視覚情報を安定して維持し、ディテールエンハンスメントのレベルはユーザーが定義可能であるという(下の画像参照)。emLAPは、広ダイナミックレンジのセンサデータを、それよりも低いダイナミックレンジのクリアな画像シーメンスにマッピングする。場面が大きく変化する場合や極端な温度差が存在する場合でも、滑らかに安定した変換が行われる。一番左の標準的な画像では、消防士の姿がほとんど確認できないことに注目してほしい。中央の低モードでは、細部がもう少し明らかになっている。細部をさらに強調した一番右の画像では、開いた窓を通して見える建物内の様子など、かなり詳しい情報が確認できる。(画像提供:レオナルドDRS社)



デントを務めるダグ・ランサム氏(Doug Ransom)によると、同社は、17 μ mピッチアレイのシリーズを補完する形で、小ピクセル(10 μ mピッチ)アレイのシリーズを開発したという。「U6800」(640×512)や「U9000」(1280×1024)というFPAを含む、同社の10 μ mピッチアレイは、「Tenum 640」と「Tenum 1280」のカメラモジュールに加え、複数の米軍プログラムで用いられているカメラに、センサとして搭載されている。「U3600」(320×240)、「U6160」(640×480)、「U8000」(1024×768)のFPAなど、同社の17 μ mピッチアレイは、「Tamarisk」というカメラモジュールファミリーに加え、同社のその他さまざまなシステムレベル製品に、センサとして搭載されている。

「当社は最近、ピクセル設計とプロセス改善で進歩を遂げ、所望の性能レベルを達成したままで、ピクセルサイズ

を縮小することができるようになった」とランサム氏は述べた。「ピクセルサイズを小さくすると一般的に感度が落ちるので、サイズを縮小する際のこの性能は重要である。当社は、ボロメータの放射吸収素子と変換素子を分離する、特許化されたアンブレラピクセル設計を採用している。この分離によって、焦点面のフィルファクタを最大にすることが可能で、独自のアンブレラ構造設計により、ボロメータの質量と熱時定数が小さくなる」(ランサム氏)。

DRS社は、Tenum 640サーマルイメージングモジュールの量産を2020年第4四半期に開始する。ランサム氏によると、同モジュールは、OEM(Original Equipment Manufacturer)向けに市場に提供される、初めての10 μ mピッチの非冷却サーマルカメラモジュール(640×512)だという。

OEMによる組み込みを簡素化する

ために、このモジュールはTamariskシリーズとI/O互換性があり、同じコネクタとフィーチャボードが使用されている。通信プロトコルも同一であるため、OEMはそれぞれの現行製品にTenum 640を接続するだけで、大がかりな設計上の変更を加えることなく、撮像とカメラ制御を開始することができる。

ランサム氏によると、DRS社の非冷却カメラモジュールは2014年から、携帯型消防用カメラに使用されているという。「非冷却LWIRカメラによって消防士は、煙の中でクリアな視界を確保し、被災者の居場所を特定して救助し、危険なホットスポット(火災発生箇所)を確認することができる。DRS社のLWIRカメラモジュールの放射測定(温度測定)機能により、消防士は、危険な建物崩壊に遭遇したり危険な部屋に突入したりする前に、天井や

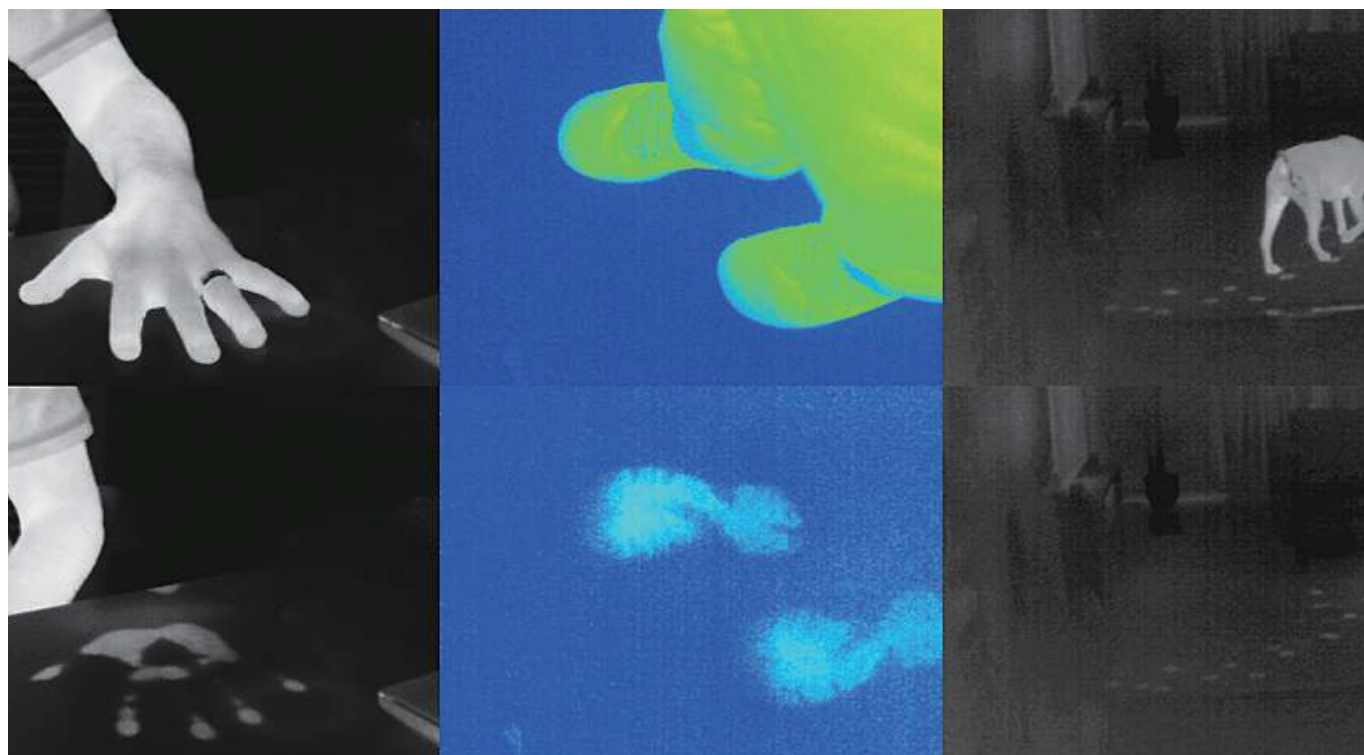


図2 イエナオプティック社のサーマルカメラは感度が高く、小さな温度差をとらえることができる。例えば、表面に手を押し付けた場合(左)や、人間や動物が床の上を歩いて横切った場合(右)の温度変化を検出することができる。(画像提供:イエナオプティック社)

扉の温度を把握することができる」とランサム氏は説明した。DRS社のImage Contrast Enhancement (ICE) アルゴリズムによって、消防士の任務が支援される(図1)。

人間を含む遠隔温度測定

米イエナオプティック・オプティカル・システムズ社(Jenoptik Optical Systems)を傘下を持つ独イエナオプティック社(Jenoptik)は、サーマルイメージング装置を複数の製品シリーズで提供している。同社の現行製品としては、「IR-TCM」カメラ、「VarioCAM」携帯型カメラ、「Blackbird Precision」ポータブル監視キットなどがあり、そのすべてが、モバイルまたは固定型アプリケーションにおいて熱を視覚化して温度異常を検出することを目的に設計及び校正されている。これらに加えて、イエナオプティック社は2020年に、「EVIDIR」という小型非冷却サーマルカメラモジュールの新しいシリーズを発表した。

同社のサーモグラフィカメラ製品シリーズには、VGAまたはXGAで17 μ mのアモルファスシリコン(A-Si)に基づくマイクロボロメータ技術が採用されているが、新しいEVIDIRシリーズの製品には、VGAまたはQVGAで12 μ mのA-Siマイクロボロメータが搭載されている。イエナオプティック社のすべてのサーマルカメラで、さまざまな標準構成オプション(カメラフォーマット、フレームレート、通信インタフェース、レンズオプションなど)が提供されている。「これらのカメラはスタンドアロンのデバイスとして完全に機能するが、IR-TCM、Blackbird、EVIDIRはOEMアプリケーションに組み込みやすいように設計されている」と、イエナオプティック・オプティカル・シ

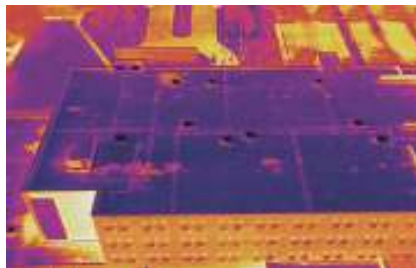


図3 建物検査、特に熱漏洩やホットスポットの検出は、LWIRイメージングの重要な応用分野である。この図は、フリーア社のTauカメラによって建物の屋根の航空サーマル動画を撮影したものである。このカメラを同社のジンバル搭載サーマルイメージング装置「Zemuse XT」に装備し、ドローンに取り付けて撮影した。(画像提供:フリーシステムズ社)

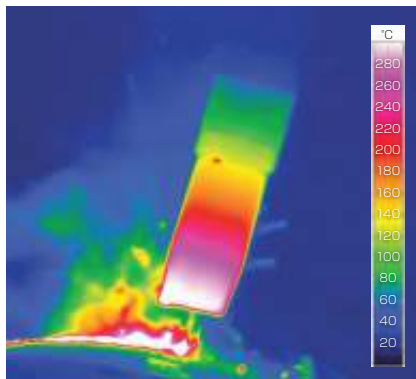


図4 この例では、インフラテック社のImageIRカメラによって溶射プロセスをモニタリングしている。プロセス温度を最適化することにより、製品品質を向上させることができる。(画像提供:インフラテック社)

テムズ社で先端システム担当北米ディレクターを務めるG・スコット・リボネート氏(G. Scott Libonate)は述べた。「すべてのOEM向けカメラ、特にEVIDIRは、OEMによるカスタマイズを容易にするための構成オプションを提供するという、『ツールボックス』アプローチを採用している。レンズ、シャッター、撮像フォーマット、フレームレート、通信インタフェースなどのオプションはモジュラー式で、顧客が自らのアプリケーションに最も合うように自由に組み合わせられるようになっている」。

リボネート氏によると、イエナオプ

ティック社のすべてのサーマルカメラは、高い感度と温度分解能を備え(NETDは40mK未満)、1/10度以下の相対温度差を判別できるという(図2)。Blackbirdなどのサーモグラフィカメラは、-40~600°Cの温度範囲に対して2°C未満の絶対精度で、温度を遠隔測定可能だと同氏は付け加えた(最大1200°Cまでの高温キャリブレーションがオプションで提供されている)。

リボネート氏によると、適用分野は、安全とセキュリティ(監視、捜索救助、消防、国境管理、状況認識、UAV)、自動車(先進運転支援システム[ADAS]、自動運転)、産業オートメーション(プロセス制御、予知保全、故障状態検出)などだという。Blackbirdは、プロセス監視、障害検出、サーマルスクリーニングなどの産業用途における遠隔温度測定を特に対象に設計されており、サーマル監視キット(カメラ、タブレット、視覚化/分析/録画ソフトウェアパッケージを含む)とともに購入することができる。

「これらの機能は最近、新型コロナウイルス感染症(COVID-19)対策において有効活用されている。医療用機器を特に意図したわけではないが、Blackbirdを再校正し、ソフトウェアを変更して、ドイツのイエーナにあるイエナオプティック社の施設の入口での体温測定用にその機能を最適化した。そのスクリーニングステーションは現在、施設に入館するすべてのイエナオプティック社従業員の体温チェックに使用されている」とリボネート氏は述べた。

チクソモールドディングによるウエハスケール光学系

米フリーシステムズ社(FLIR Systems)が製造したOEM向け非冷却

カメラモデルには、酸化バナジウムを使ったマイクロボロメータ検出器が採用されており、用途の要件に応じて、検出器アレイフォーマットやレンズのさまざまなオプションが提供されている。同社のエンジニアによると、フリーア社は、マグネシウムのチクソモルディングをサーマルカメラに最初に適用した企業で(最初に採用したのは「Tau」モデル)、それによって、軽量ながらも頑強で低コストのカメラ筐体を実現したということだ。ウエハスケール光学系技術を適用した興味深い製品として、同社の低コストのマイクロサーマルカメラ「Lepton」がある。ウエハ成形された固定焦点レンズと、すべてのカメラ機能をシングルチップ内で実行するカスタム ASIC を搭載し、携帯端末や家電製品に組み込めるように設計された、非常に小さなモジュールとなっている。

フリーア社の Tau カメラは、製造コストを抑えるために、一般的なカメラフレームを使用して 336×256 または 640×512 のセンサ ($17\mu\text{m}$ ピクセル) を搭載している(図3)。2つのレンズホルダー(それぞれ広視野と狭視野の光学系用)によって、一連の交換可能レンズが使用できる。このカメラは、放射測定用または非放射測定用として提供されている(放射測定用の場合、処理とキャリブレーションによって、シーン温度に線形比例する出力値が生成される)。

ウエハ成形固定焦点レンズとカスタム ASIC を採用する、低コストのマイクロサーマルカメラである Lepton は、携帯端末、家電製品、商用と産業用の両方のモノのインターネット (Internet of Things: IoT) 機器と接続できるように設計された、超小型マイクロモジュールである。Lepton カメラは、 $160 \times$

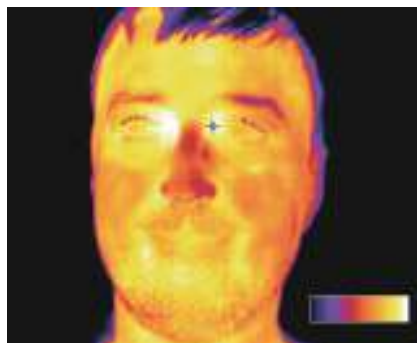


図5 カメラは、病気を診断することはできないが、COVID-19の症状の1つである発熱を示唆する可能性のある、高い皮膚温度を測定することができる。新型コロナウイルスの感染拡大を受けて、企業各社は従業員をオフィスに復帰させるための最良の方法を検討しており、気づかぬうちに症状を持ち、COVID-19を拡散させる恐れのある従業員を選別するための新しい措置を導入している。病院、モール、劇場、官庁施設などの公共施設においても、訪問者を選別するための最良の方法が検討されている。最終的には、スポーツイベント、コンサート、映画館など、多くの人々が集まって濃厚接触が生じる場所では、「新たな常態」として体温検査が必須となる可能性がある。サーマルイメージングカメラがあれば、人が建物に入る度に最初の体温チェックを自動的に行うことができる。高い皮膚温度を示す人がいた場合のみ、医療専門家が携帯型サーモメーターで詳しく診断すればよい。この図は、テレダインダルサ社の Calibir シリーズの LWIR カメラによって生成された、発熱のある人の温度マップである。(画像提供:テレダインダルサ社)

120 の2つのモデル(一方は放射測定用)と 80×60 の1つのモデルで提供されている。

最後に、「Boson」センサは、ウエハレベルパッケージ(WLP)を採用した $12\mu\text{m}$ ピクセル設計で、高速で低コストの製品をサポートする。Boson は、電子部品として SoC と超低消費電力のビジョン処理コアを搭載し、周辺デバイス(ディスプレイ、SDカード、GPS、USB インタフェース)と統合するための多数の I/O を内蔵する。消防などで使用される携帯型サーマルイメージングシステム、サーモグラフィ、セキュリティと監視、無人システム、自動車運転時の視界支援装置への組み込みな

ど、同製品の応用分野は多岐にわたる。Tau カメラと同様に、Boson も 320×256 と 640×512 といった2つの異なるセンサフォーマットが選択可能で、さまざまなレンズオプションが提供されている。

2種類のセンサ

独インフラテック社 (InfraTec) は、低速と高速のイメージングを対象に、2つの全く異なる種類の LWIR サーモグラフィカメラ(完全に放射測定であることを意味する)を製造している。「VarioCAM HD」シリーズは、非冷却マイクロボロメータ検出器で構成されており、それよりも高速な「Image IR」シリーズは、冷却テルル化カドミウム水銀 (Mercury Cadmium Telluride: MCT) 光子検出器で構成されている(図4)。

同社の海外販売営業の責任者を務める イェンス・フォクト氏 (Jens Vogt) によると、「VarioCAM HD head 900」カメラは、XGA (1024×768) ピクセル解像度のマイクロボロメータ検出器を搭載し、 $-40 \sim 2000^\circ\text{C}$ の温度範囲で完全に放射測定を行い、 20mK に達する温度感度を備える。「これらの仕様は、幅広い用途にメリットを与える。その1つが積層造形で、個々の温度測定に基づいてプロセスパラメータを正確に設定する必要がある。この用途に対し、このカメラは、最大 240Hz の高い処理速度でのイメージングを可能にするサブウィンドウレンジを備える」と同氏は述べた。

より高速な用途に対しては、「Image IR」シリーズの MCT ベースのカメラの使用を推奨していると、フォクト氏は述べた(例えば「ImageIR 8800」は、スペクトル範囲 $7.7 \sim 10.2\mu\text{m}$ 、最大フレームレート $14,593\text{Hz}$)。「インフラ



図6 (a)シエラオリンピック社のLWIRカメラで撮影した、2017年にオレゴン州で起きたイーグルクリーク火災の画像には、火災発生地点がはっきりと示されている。(b)は、同じ場所のLWIR画像と可視光画像を比較したもので、煙の向こう側を撮影するLWIRの能力が見てとれる。(画像提供:シエラオリンピック社)

テック社のすべてのカメラに、幅広い種類のレンズと固有の保護ウィンドウが付属しているため、さまざまな規模の積層造形プロセスに装備して、空間分解能の非常に高い要件に対して最適化することができる」とフォクト氏は続けた。

ゲインを落とすことなく 高いダイナミックレンジを実現

加テレダインダルサ社 (Teledyne DALSA) は、赤外線イメージングポートフォリオの一環として、SWIR から非冷却LWIRに至るまでの高性能で多目的なソリューションを、産業、セキュリティ、防衛分野向けに製造している。同社が提供するLWIRイメージング装置としては、非冷却IRマイクロボロメータセンサを搭載して放射測定を行うLWIRカメラファミリー「Calibir GXM」、非冷却IR VGAカメラコア搭載のLWIRカメラファミリー「Calibir

DXM640」、WLP採用のLWIR酸化バナジウムマイクロボロメータなどがある。

Calibirシリーズ担当製品マネージャーを務めるジーン・ブルネレ氏 (Jean Brunelle) によると、Calibir GXMファミリーのカメラは、8~12 μ mのスペクトル範囲における高い感度と、工場場で校正済みの放射測定性能を備えるという。シャッター操作とシャッターレス操作、電源投入時の高速画像出力、動作温度範囲全体にわたる一貫した応答を特徴とし、そのすべてによって、途切れることのない画像取得が実現されている。21ビットのA/Dコンバータ設計によって、ゲインを落とすことなく高いダイナミックレンジを維持することで、600°Cを超える温度範囲において最大限のNETDが達成されている。

「Calibirは、体温検査における高い皮膚温度の検出などの重要な用途に対し、正確で再現可能な結果を生成する」

とブルネレ氏は述べた(図5)。「体温検査以外にも、Calibir GXMシリーズは、溶接、焼結、焼成、製錬、消火など、放射測定を必要とする多くの産業監視用途に有効である」。

消防用のLWIR

米シエラオリンピックテクノロジーズ社 (Sierra-Olympic Technologies) が製造する長波長赤外 (LWIR) FPAは、「オープンフレーム」(カスタマイズしやすいようにアクセスが可能)のカメラコア、電子部品、ファームウェア、固定焦点距離レンズまたは連続光学ズームレンズ、ソフトウェアで構成されており、OEMやインテグレートに適した、小型で軽量で低消費電力のデバイスが構築できるようになっている。

「『Vayu HD』は、当社の主力LWIRカメラだ」と、シエラオリンピック社のマーケティングマネージャーを務めるアダム・ラピエール氏 (Adam



図7 従来のLWIRサーマルカメラ(左)とポラリス社の偏光ベースのLWIRカメラ「Pyxis」(右)で撮影したさまざまな画像の比較。1)顔認識(上):偏光を利用するサーマルイメージングでは、形状の微妙な変化をとらえて、顔の特徴を分析する。2)自動運転車のナビゲーション(中央):サーマル画像ではコントラストが低かったり、影で紛らわしかったりする場合でも、偏光を利用すると、車道、障害物、遠くにある他の車両を簡単に識別することができる。3)標的検出(下):偏光に特殊なソフトウェアを組み合わせることにより、煩雑な背景を除去しつつ、サーマル画像ではほとんど見えない軍用車両などの脅威を検出することができる。(画像提供:ポラリスセンサテクノロジーズ社)

Lapierre)は述べた。「フルHD、1920×1200、12μmの酸化バナジウムマイクロボロメータアレイにより、Vayuは、市場で最も高解像度の非冷却LWIRカメラとなっている。重さは約1ポンド(454g)で、手のひらにすっぽりと収まるほどコンパクトだ。SWaPが最適化されたパッケージで、最大限の解像度で最高画質が実現されることを望む、特に航空分野のインテグレート向けに最適化されている」(ラピエール氏)。

同氏によると、Vayuが有効とシエラオリムピック社が考える応用分野の1つが、山火事の監視と偵察だという。山火事が地域一帯に急速に燃え広がると、動的な風や天候条件、多様な地形、

煙などの要素が絡んで、正確な追跡とマッピングは難しい可能性がある(図6)。火事は、風が鎮まって湿度が比較的高くなる夜間に「落ち着く」傾向があるため、夜間は、最も危険なホットスポットや日中の火事の範囲の広がり方を調べたり、翌日の活動でどこに力を注ぐかという最も重要な項目を検討したりするための、絶好の機会である場合が多い。

「そのような場合に、サーマルイメージングカメラが大きな違いをもたらす。夜間にはよくあることだが、火災地域が煙で覆われている場合、視覚調査はあまり役に立たない。しかし、Vayu HDのようなカメラは、猛煙が

まるで存在しないかのように、その向こう側を撮影することができる。また、他のサーマルカメラに勝るVayuの大きなメリットは、解像度がはるかに高いことだ。より広域にわたって細部をとらえることができるため、翌日の活動で最前線に立つ消防隊に、はるかに優れた画質と情報を提供することができる」とラピエール氏は述べた。

偏光サーマルイメージング

サーマルイメージングにはさまざまな能力があるが、米ポラリスセンサテクノロジーズ社(Polaris Sensor Technologies)は、偏光と極小サイズのカメラを利用してそれらの能力を強化した、LWIRイメージング装置を製造している。「Pyxis」は、小型(2立方インチ)で軽量(83g)のLWIR偏光イメージング装置で、画像の温度成分と偏光成分の両方を測定する。偏光の利用により、標準のサーマルイメージング装置では検出できない、細部やコントラストなどのデータを取得することができる(図7)。

640×512の非冷却酸化バナジウムマイクロボロメータFPAを搭載するこのカメラには、「Pyxis Vision Science」ソフトウェアによって画像の後処理を行うツールが付属している。ポラリス社によると、偏光の利用により、レンジが広くなり、コントラストが高まり、特異性が強化されて、標準のサーマルイメージング装置だけでは得られない細部が明らかになるという。例えば、偏光を利用するLWIRカメラは、温度のコントラストがない場合でもコントラストを検出することができる。ジオメトリと材料組成を利用して、標準のサーマルに偏光を追加することにより、コントラストと細部を向上させている。