

C-RED3 について

- 非冷却SWIRイメージングのユースケース -

短波長赤外 (SWIR) イメージングの多くのアプリケーションでは、通常 10ms 以下の短い露光時間が必要です。

本冷却型 SWIR カメラは、このようなアプリケーションに最適化されたカメラです。

C-RED3 は、非冷却型、コンパクトかつコスト効率の高い VGA (640x512) InGaAs カメラで、露光時間が短いイメージングで高いパフォーマンスを発揮します。

C-RED は、産業や理化学分野のさまざまなアプリケーションで、新たな可能性を広げていきます。

v.0.0 22/09/2020

1. C-RED3 のご紹介

C-RED3 は、LYNRED 社の TECless SNAKE ディテクタをベースとした非冷却型カメラです。性能、コンパクト性、対費用効果の点で最良の効果を考慮して、この非冷却型のアプローチが採用されました。

C-RED3 開発の背景

First Light Imaging 社が一番最初に開発したカメラは、可視領域の波面センシング用途に特別設計された高速・低ノイズカメラ、OCAM2 です。しかし、このカメラは天文学者たちの間では“赤外線スペクトルを使えない”という点で不満の声が挙がっていました。どのくらいの天空領域がカバーできるかは重要で、星の明るさが問題となるからです。

OCAM2 の SWIR 版として開発された C-RED One は eAPD 技術をベースとしています。

eAPD 技術をベースとして開発された C-RED One は OCAM2 の SWIR 版という位置づけです。しかし、C-RED One は大型に部類されるカメラで、超高性能が求められる用途のみをターゲットにしたものでした。

その後、C-RED One カメラが eAPD から InGaAs 技術へと移行し、C-RED2 カメラが登場しました。この高速で低ノイズの冷却型カメラは、低次波面センシングのような中程度の性能を必要とする用途向けとなっています。ただし、シグナルレベルが高いアプリケーションでは、必ずしもカメラを冷却する必要はありません。(ノ)

カメラの仕様

C-RED3 の主な特徴は右の表の通りです。詳細については、カメラの [データシート](#) を参照してください。

C-RED3 は汎用性が高く、容易に統合できるように次のような設計が採用されています。

- ❖ 出力: Camera Link® または USB3
- ❖ レンズマウント: C マウント、CS マウント、T マウント

C-RED3 は、First Light Vision ソフトウェアで制御可能です。お客様の環境への統合は、ソフトウェア開発キット (SDK) をご利用ください。



C-RED3

そこで、すべての冷却システムを削除し、電気系を絞り込むことで、非常に小型かつ高速な、SWaP に最適化されたカメラを必要とするアプリケーション向けの SWIR カメラ、C-RED3 が、登場しました。そのコンパクトな本体はわずか 55x55x60mm にまで縮小されています。

Test measurement	Result	Unit
Maximum speed (full frame)	602	FPS
Mean dark + readout noise at 600 FPS	<50	e-
Quantization	14	Bit
Quantum efficiency (0.9 to 1.7 μm)	> 70	%
Operability	> 99.7	%
Full well capacity at low gain, 600 FPS	1400	ke-
Full well capacity at high gain, 600 FPS	33	ke-
Maximum speed 32 x 4 window	32066	FPS
Maximum speed 320 x 256 window	1779	FPS
Power consumption	6.5	W

2. 温度による影響を理解する

カメラの使用を検討されている方の中には、冷却なしのカメラを使うことに不安を抱く方もいるかもしれません。

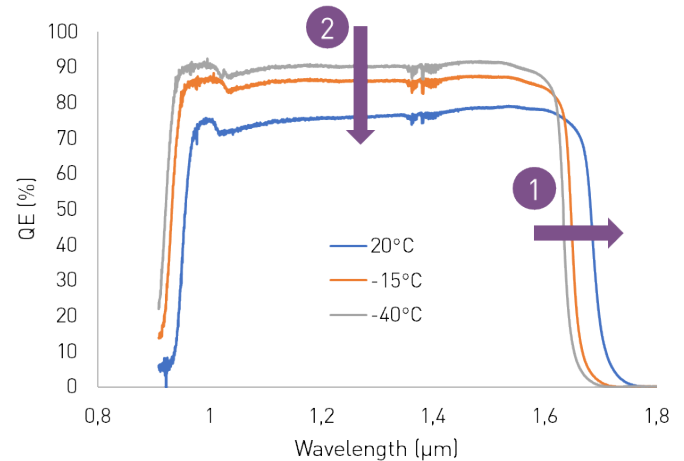
C-RED3を採用するにあたり、まず最初のステップは、“動作温度の上昇がイメージング性能にどのような影響を及ぼすか”を理解することです。

量子効率とは温度によってどのような影響を受けますか？

右の図は、波長と動作温度に対するInGaAsの量子効率 (QE) の関係を表したグラフです。

量子効率は、温度が上昇すると、長波長にシフト①と減少②の両方が発生します。

- ❖ このグラフでは2°Cあたり～1nmシフト。
- ❖ 最大QE値は、2°Cあたり～1%減少。



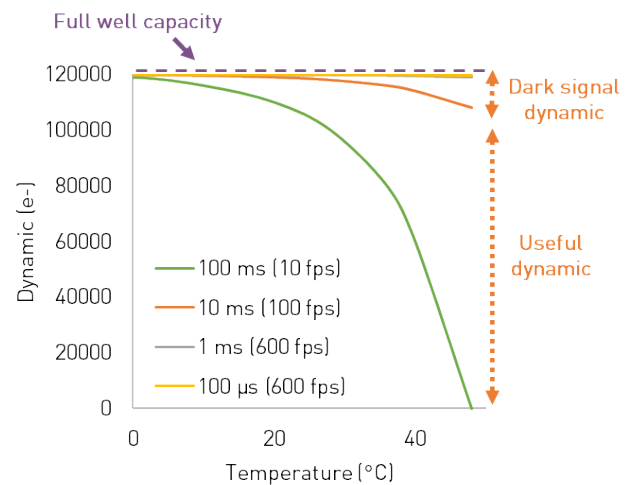
Example: レーザ発光が1200nmで、QE曲線のシフトが計測に影響していない場合。カメラが30°Cになると、QEはカメラを0°Cに冷却した場合と比較すると、15%低下します。積分時間を上げることで同じ信号レベルに到達することができます。

センサのダイナミックレンジは温度によってどのような影響を受けますか？

使用可能なダイナミックレンジは光子の飽和容量の一部です。これは、センサ内で熱によって発生した電子によって発生する、ダークシグナルによって制限されます。

ダークシグナルは積分時間に比例して増加し、ディテクタが飽和するまで温度上昇と共に指数関数的に増加します。

積分時間が短い場合、ダークシグナルは低くなり、使用可能なダイナミックレンジが保持されます。右の図では、中程度のゲインでの典型的な値を示しています。



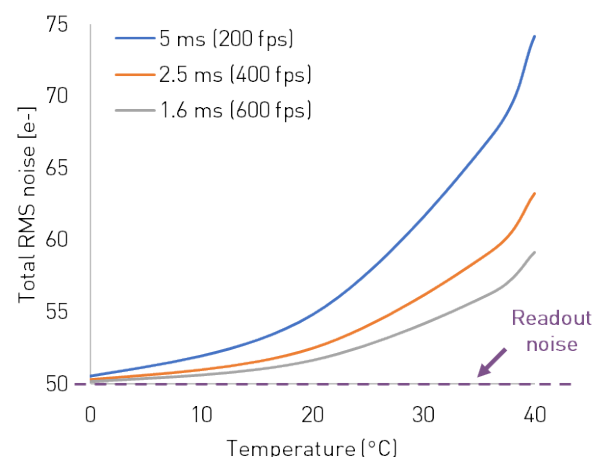
Example: 1msの積分時間と中程度のゲインモードが必要なアプリケーションの場合。室温が上昇し、カメラは40°Cで動作すると、熱によって600e⁻生成され、これは全ダイナミックレンジの0.5%を占めることになります。

トータルノイズは温度によってどのような影響を受けますか？

ディテクタに関連する2つの主なノイズ源は、暗電流ノイズと読み出しノイズです。暗電流ノイズは、ダークノイズの平方根です。従って、積分時間と温度の両方によって増加します。

右の図では、高フレームレート/短い積分時間に対して中程度のゲイン・モードでは、トータルノイズが小さく抑えられていることが示されています。

シグナルを正確に検出するには、ダークノイズよりも少なくとも3倍高いシグナル量でなければなりません。



Example: 1300nmのレーザが検出器に入射すると、10¹⁴光子・s⁻¹・mm⁻² (15μW・mm⁻²) が生成されます。中程度のゲインとティント1ミリ秒では、得られるシグナルは10¹⁴・tint・QE・pix_size=15・10⁹e⁻・pix⁻¹となります。ダークノイズの合計は<60e⁻、S/N比は3を大きく上回り、簡単にシグナル検出ができます。

以上の考察から、「C-RED3の温度安定化はどのようなケースで必要か?」、「C-RED2 (冷却型カメラ) への移行が必要となるタイミングは?」という2つの疑問が生まれます。

C-RED3の温度安定化はどのようなケースで必要ですか?

C-RED3単体では温度が安定せず、時間の経過とともに温度変化が生じることがあります。

- ❖ カメラが極端に高温の環境や直射日光が当たる場所に設置されている場合
- ❖ カメラが35°C以上に加熱されている場合
- ❖ 画像ADUレベルを使用して定量測定を行う場合

これらのような特定のケースでは、センサー温度を安定化させることでパフォーマンスが改善することがあります。センサーの温度を安定化させるために、C-RED3ではオプションの小型冷却アダプタをご用意しています。

カメラ下部にネジ止めし、本体の温度を安定化させることが可能です。本アダプターには、パッシブ/アクティブ水冷チラーを接続する必要があります。コンパクト性とコスト効率を兼ね備えたソリューションです。



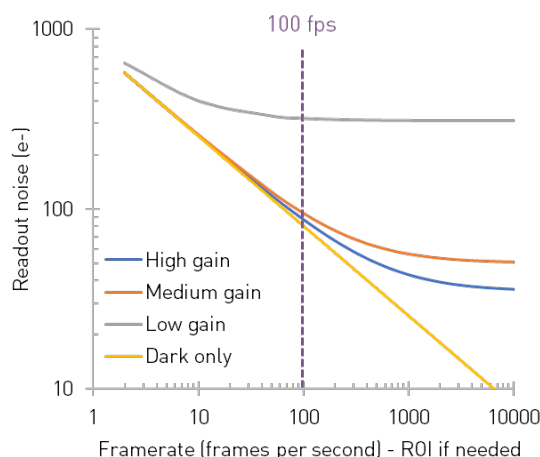
冷却アダプタ (オプション)

C-RED2に切り替えるべきタイミングは?

冷却型または非冷却型カメラを選択する際は、「データ取得が、光子ノイズや暗電流ノイズで制限されているか?」という観点で考えてみてください。

35°CにおけるC-RED3の読み出しノイズとフレームレート (積分時間はフレームレートの逆数と同じ) のグラフからは次のことがわかります。

- ❖ 高ゲインや中ゲインで100FPSを超え、低ゲインで5fpsを超えるスピードでは、カメラの読み出しノイズは制限されてしまいます。暗電流の影響については無視できる範囲内です。
- ❖ より低いフレームレートでは、カメラは暗電流に制限されるため、そのような用途ではC-RED2などの冷却型カメラがより適しています。



<忘備録>

カメラのパフォーマンスは、温度上昇によって次の3つの影響が発生します:

1. 量子効率曲線は長波長側にシフトし、最大効率が低下する。
2. 温度によってダークレベルが増加し、利用可能なダイナミックレンジが低下する。
3. ダークレベルを高いと、ダークノイズが増加する。

しかし、これらの影響は必ずしも欠点ではありません。

C-RED3では、積分時間を短くすることで (10ms未滿) で高性能を発揮できます。

特定のアプリケーションや長い積分時間を使用する場合のみ、センサの制御や冷却を検討する必要があります。

3. C-RED3 の補正と適応バイアスについて

C-RED3は、First Light ImagingによってC-REDおよびC-BLUEカメラ用に開発されたグラフィカル・ユーザー・インターフェース (GUI)、First Light Visionと統合されています。このGUIはUSBとCLの両方のインターフェースと互換性があり、クロスプラットフォーム (x86/ARM、Windows/Linux) です。ユーザーフレンドリに設計されており、またハイエンドユーザーの方にも対応する多機能性を備えています。プログラマーの方がC-RED3用の独自のインターフェイスを開発

できるソフトウェア開発キット (SDK) は、C/C++、Labview、Python、MATLABのショートデモのソースコードが提供されています。Micro Managerを使用してC-RED3を制御することもできます。

rawデータの最適化には、C-RED3にオンザフライ補正を適用することができます。C-RED OneカメラとC-RED2カメラで培った専門知識をベースに自社開発されたハードウェアプロセスにより、C-RED3も高性能なカメラへと完成されています。

❖ 不良ピクセル

製造中にBADピクセルマップがカメラに構築されています。このマップは、ユーザー側で不良ピクセルの追加や削除などの編集が可能です。

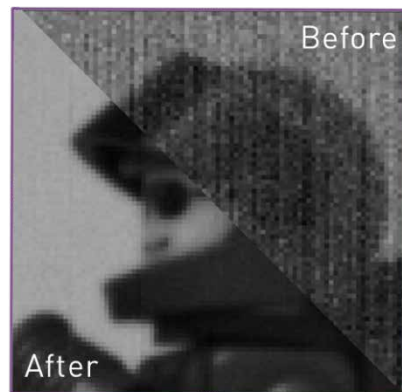
❖ 2ポイントによる不均一性補正 (NUC)

ダークシグナル非均一性 (DSNU) はパターンノイズの一因です。これは、電気的な不均衡に起因するオフセット (バイアス) と暗電流から生じます。DSNU補正は、通常、有用な画像からダークフレームを差し引くことで修正されます。

固定パターン非均一性 (FPNU) は、ピクセルゲイン値の不均一性 (光子を電子に変換する能力) によって引き起こされます。これはフラットフレームで画像を分割することで補正できます。

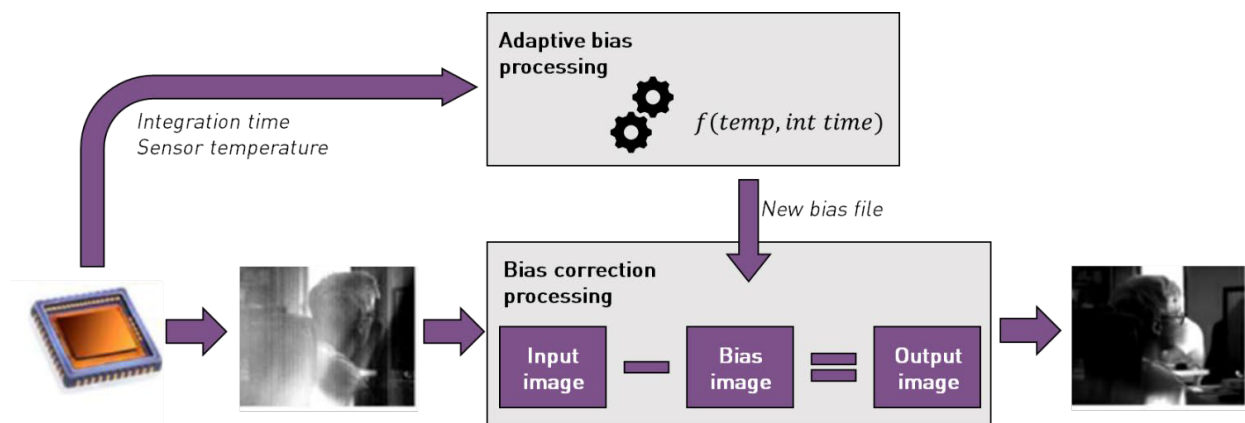
❖ 適応バイアス

暗電流レベルは、温度と積分時間に依存します。従って、安定化されていないカメラでは、時間と共に変換する温度が暗電流レベルの変動を引き起こします。つまり、最適なバイアス/ダーク補正を行うには、ユーザーが定期的にバイアスフレームを構築し直さなければならないと言えます。これは実験を行うにあたり、多くの場合許容されません。適応バイアスという考えは、温度が変動したときに手動で(ス



[After/Before]は、未加工のイメージに対するバイアス補正の効果を示します。40°Cで動作するC-RED3で取得したLego®figurineは、低ゲイン、600fps (テント1.6ms) で取得します。

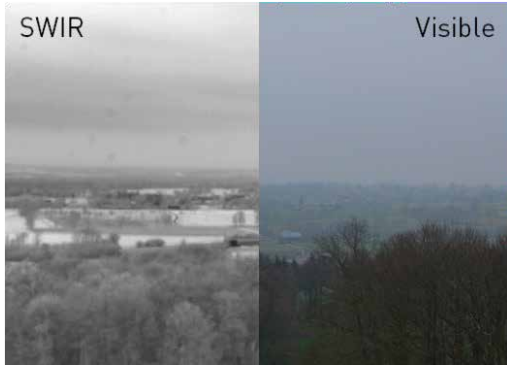
再構築せずに、どんな時でも許容可能なバイアスを適用できるようにすることです。First Light Imagingではこれを達成するために、そのセンサで予測される物理的な挙動に基づいたモデリング理論を開発しました。温度が1°C変化する、あるいは積分時間が変更されるたびに、バイアスフレームが再構築されます。C-RED3では、バイアスフレームの構築して、オンザフライでそれを差し引くことを完全自律型でおこないます。



オンザフライ型適応バイアスプロセスの概念図。バイアスフレームの計算は、積分時間とセンサ温度に基づいて、カメラ内で直接達成されます。合成バイアスフレームは、その後、その場で差し引くことができます。

4. C-RED3 のユースケース

C-RED3には、産業から研究分野に至るまで多岐に渡る数多くのアプリケーションがあります。ここでは、C-RED3の有効性がすでに実証されている、そのごく一部をご紹介します。



・ フリースペース光学系 (FSO) とフリースペース光通信

当初C-RED3は、FSO用途の特定ニーズに対応するために開発されました。詳細については、[C-RED3: a SWIR camera for FSO application^{\[1\]}](#)を参照してください。

・ レーザビームプロファイリングとレーザアライメント

通常、レーザ関連のアプリケーションでは、磁束レベルが高くなります。C-RED3は、レーザビームのパワー分布とアライメントを研究するための小型カメラのニーズに応えます。

▲ 霧の多い町並みの可視(左)画像とSWIR(右)画像。

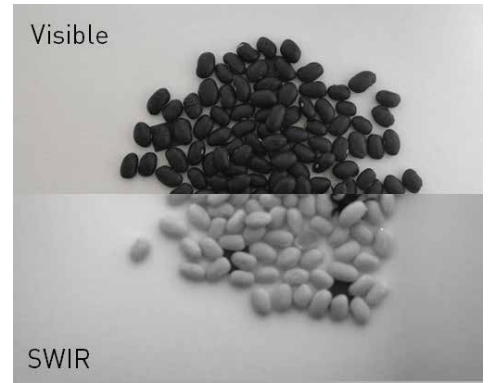
SWIR画像には、SWIR16mmレンズに組み合わせた安定化されていないC-RED3カメラが使用されます。

・ 大量生産および高機能マシンビジョン

品質・生産管理、廃棄物の分別、非破壊検査.....たとえば、食品の仕分けでは、プラスチックや岩などのパラサイトオブジェクトが見えます。

▶ 異物が入った黒豆の可視画像(上)とSWIR画像(下)。

SWIR画像には、SWIR16mmレンズを組み合わせた非安定化C-RED3カメラが使用されます。積分時間は、低ゲインで10ms(100fps)です。



・ 監視・保安

C-RED3の特長である小型、軽量、低消費電力(SWaP)は、航空機(飛行機、UAV)への応用の可能性を広げています。C-RED3はJetsonミニコンピュータから制御可能で、本体は低消費電力のため電池で駆動させることもできます。

◀ 70~200mmの望遠鏡と組み合わせた非安定化C-RED3カメラの監視用途での使用例。積分時間は、低ゲインで20ms(50fps)。

・ その他のアプリケーション...

一部のアプリケーションでは、SWIRが見えないものの可視化を可能にします。例えば、美術品研究では、アーティストが最初に描いた絵具の下にあるデッサンを見ることができます。偽造検出、サーモグラフィーなどの用途もあります。

▶ 紙に鉛筆でデッサンをおこないその上に水彩絵の具で描かれた絵の可視画像(上)とSWIR(下)画像。SWIR画像は、SWIR16mmレンズを組み合わせた非安定化C-RED3カメラを使用。積分時間は、低ゲインで20ms(50fps)です。



5. 結論

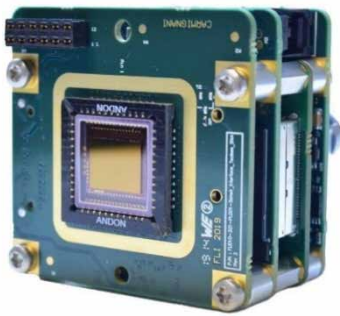
C-RED3は、高磁束短波長赤外線向けに設計された低SWaPカメラです。

C-RED3は、同等品のカメラと比較しても、最速のパフォーマンスを有しフルフレームで600FPSで動作します。冷却システムを持たないことから、市販されている最もコンパクトな高性能SWIRカメラの1つです。

当初C-RED3は当初フリースペース・オプティクス・コミュニティの特定の必要性に応えるために設計されたことから、First Light Imagingは非冷却から のアプローチを採用しました。

そしてその高速性、読み出しノイズ、低SWaPなどの優れた性能により、FSOだけでなく、空気中の浮遊物質や産業可視化などの新しいアプリケーションでも使えるツールとなることが実証されています。C-RED3は概念実証のアプリケーションでも使用されており、SWIRイメージングにおける数多くのメリットが実証されています。

コンパクトでありながら高性能なC-RED3は、天文から産業ビジョンに至るまで、あらゆるアプリケーションで使用できる高い柔軟性を備えたカメラです。



さらに... : C-RED3 OEM モジュール

このカメラは、ハウジングの無いOEM向けモジュールもあります。

必要に応じてカスタム機能を装備することも可能です。

C-RED3の重量は、標準バージョンが230g、OEMバージョンが100gになります。

6. 参考文献

- [1] Gach, J.-L.; Boutolleau, D.; Brun, C.; Carmignani, T.; Clop, F.; Feautrier, P.; Lemarchand, S.; Stadler, E.; Wanwanscappel, Y. CRED3: A SWIR Camera for FSO Applications. In Free-Space Laser Communications XXXII; Hemmati, H., Boroson, D. M., Eds.; SPIE: San Francisco, United States, 2020; p 14. <https://doi.org/10.1117/12.2545823>.

C-RED3に関するご質問、詳細に関しては、(株) オプトサイエンスまでお問い合わせください。

First Light Imaging SAS

Europarc Sainte Victoire Bât 6, Route de Valbrillant, Le Canet 13590
Meyreuil FRANCE
Tel.: + 33 4 42 61 29 20

www.first-light-imaging.com

contact@first-light.fr

First Light Imaging Corp.

185 Alewife Brook Parkway, Suite 210, Cambridge, MA 02138 USA

www.first-light.us

OPTO SCIENCE, INC.

株式会社オプトサイエンス

〒160-0014 東京都新宿区内藤町1番地 内藤ビルディング
Tel.: 03-3356-1064

www.optoscience.com

info@optoscience.com