

# C-RED 3 による自由空間光通信と補償光学

C-RED 3は、600FPSフルフレームで撮影可能な640x512ピクセルのSWIRカメラです。

天文用赤外線高速波面センサの開発成果を受け継ぎ、

産業用途に特化したスマートでローコスト、

ロー SWaP (サイズ・重量・消費電力) という特徴を備えています。

特に、自由空間光通信システムの波面検出用補償光学ループに使用する検出器として最適です。

VO.0 19/10/2020

## 1. 自由空間光通信とは

情報は固体のケーブルを通してAからABの地点に伝送することができます。身近な例としては、有線の電話があります。しかし、用途によっては物理的な接続(ケーブル、ワイヤー、ファイバ)は非現実的であったり、コストが掛かり過ぎる場合があります。(ア)

### 自由空間光通信システム

最もシンプルな構成の自由空間光通信システムを図1に示します。送信するデータを2進数(1と0)にし、光パルス(ON/OFF)に変換します。トランスミッタ(レーザー光源とフォーカスレンズ)は、レシーバに向けて光パルスを送信します。レシーバは(ア)

このような場合、自由空間(大気、宇宙空間、真空など)を介して情報を伝送する技術が重要になります。自由空間光(FSO: Free Space Optical)通信は、光を使って情報を伝送することにより、物理的な接続を用いた通信手段が抱える大きな欠点を克服することができます。

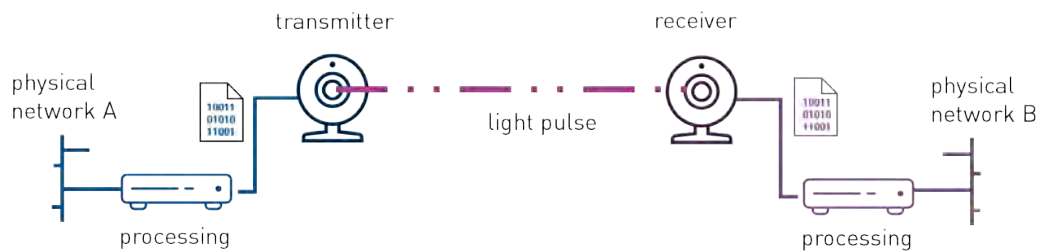


図1: フリースペース光通信の基本原則

### アプリケーション

自由空間光通信は、地上での遠隔通信に利用できます。例えば屋外での2G/3G、4G無線通信、物理ネットワークの最終端(「ラスト・マイル・アクセス」)をカバーするCCTV監視ネットワークなどです。さらに大きな利点は、地上と宇宙(衛星)間の通信にも使用できることです。

自由空間光通信は、高いスループットで多数の独立した接続を同時に利用することが可能で、スループットが限定されている指向性の低い無線周波数帯域(40GHz未満)と比較して、(ア)

光パルスを受信し、処理および変換を行います。なお、このシステム例では逆方向の使用も可能です。システムの両端は物理的なネットワーク(ケーブル、ファイバ)に接続されています。より複雑なシステムでは、レーザービームを変調することもできます。

2つの大きな利点があります。1つは地球を観測する衛星は1日に数分間しか地上局上空を通過しないので、収集した大量のデータを短時間で伝送することが重要です。特に軍事衛星の場合、限られた地域内でしか地上局と通信できないことが多いので尚更です。2つめに、自由空間光通信は今後数十年で実用化される可能性の高い地球外通信に対して最適な選択肢となります。

つまり、自由空間光通信は民間・軍事の分野を問わず、急成長している通信技術なのです。

### <お客様へのメッセージ>

自由空間光通信では、高速通信や長距離通信に利用できます。宇宙空間での通信など、要求の厳しい用途にも対応できます。

## 2. SWIRが自由空間光通信で有用な理由

自由空間光通信には様々な要因による課題があります。しかしながら可視光領域(400～700nm)や、近赤外光領域(ア)

(700～900nm)ではなく、短波長赤外領域(SWIR:900～1700nm)を使用することで解決が可能な課題もあります。

### 最適化された伝送

大気中や宇宙などの自由空間に存在する以下の要素は、自由空間光通信に悪影響を与えることがあります。

- 1) 霧、雨、雪などの気象条件
- 2) 水・塵の吸収、シンチレーション、散乱などによる様々な効果
- 3) 物理的な障害物(木、鳥、建築物)など

これらの影響により伝送信号が減衰し、信号を受信する際にエラーが増加してしまいます。なおこの場合、人間の目に対する安全性を確保するためにレーザーの出力密度はクラス1Mに(ア)

制限されているため、レーザーの出力を上げることは解決策としては使うことはできません。

SWIR帯のレーザーは、霧や一部のプラスチック製の障害物を通過する特性があるため、この課題の解決に非常に有用であると考えられていました。近年、SWIR帯のアイセーフ・レーザーの登場により、大きな改善が可能になりました。一般的な可視光領域カメラ(シリコン製センサー)はSWIR波長は検出できないため、受信側にはInGaAsセンサーを搭載したカメラを使用する必要があります。

### ユースケース

次の図2図3は、地上間および地球から宇宙間での自由空間光通信において、SWIRカメラを使用するメリットを示しています。可視光領域の画像と比較すると視認性が向上し、SWIR信号が効率的に伝播していることが解ります。



図2:  
霧の中の風景を可視光領域カメラと短波長赤外領域カメラで撮影した画像。SWIRでは、景色が鮮明に写り、約10km先まで見通すことができます。Nikon D5200カメラ(左)とC-RED 3カメラ(右)で撮影。



図3: C-RED 2カメラによる海上の霧の中での天体の検出

結論として、自由空間光通信では近赤外光領域(700～900nm)ではなく、短波長赤外領域のレーザー(一般的には1550nmまたは1330nm)を使用することが有効となります。

### 3. SWIR 領域における補償光学

大気中を伝搬する光は、大気の流れによる影響を受けることが知られています。これが最も困難な課題であるシンチレーションであり、光路中の大気変動すると、ビームのパワーや傾きなどが変化したり、ランダムな歪みが発生し、検出強度が大きく変動してしまいます。

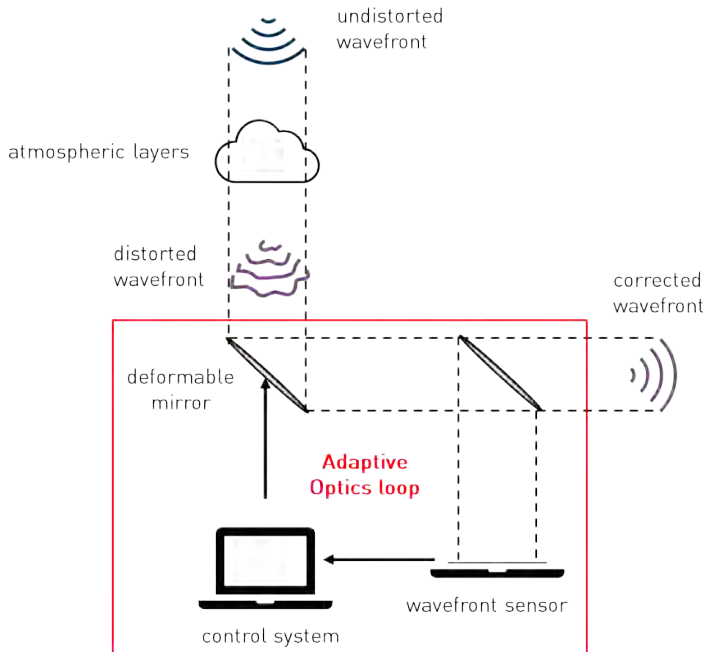


図4：補償光学システムのクローズドループ型アプローチの簡略図。遠くの物体からの光（波面）は、大気の影響により歪んでいます。その歪みを補正するのがデフォーダブルミラーです。コントロールシステムは、デフォーダブルミラーへの信号を計算します。この波面センサーは、歪みのない光（波面）との差を測定するものです。

前項でご紹介したとおり、SWIR 波長への関心は本当に高いものでした。通信速度を最適化するためには、小型のダイオードを使用します。電力損失を低減し、シングルモードファイバ<sup>[3]</sup>へ送信ビームを入射する際にも、補償光学が必須となります（図5参照）。

補償光学システム用の波面センサーに使用されるカメラの課題は、リアルタイムでの補正を可能にするために、光（波面）をリアルタイムで撮影しなければならないことです。したがって、カメラには高速度、低遅延、高感度が要求されます。

他にも、地球低軌道（LEO：Low Earth Orbit）衛星との間で自由空間光通信を行う場合、衛星を追跡する速度が速くなり、結果的に見かけ上の風の影響が大きくなるため、非常に高いフレームレートによる補正が必要になります。

C-RED 3は、このような目的のために特別に設計されており<sup>[4]</sup>、高速波面計測が抱える様々な課題の解決に有効なカメラです。

シンチレーションの影響を低減するために、いくつかの技術が開発されていますが、この中で最良の方法は、補償光学（AO：Adaptive Optics）技術を使用することです。天文観測用途において、大気の流れによる影響をリアルタイムで補正するというこのアイデアは、1953年にH.バブコックHorace Babcock）によって発表されました<sup>[1]</sup>。波面センサー、デフォーダブルミラー、コンピュータの進歩により、補償光学システムは非常に一般的な物になりました。比較的簡単に作成することができるようになりました。図4は、クローズドループ型補償光学システムの動作原理を説明したものです。

補償光学システムにおいて重要になるのは、波面センサーに入射する光（波面）を瞬時に検出する能力です。波面センサーは通常、レンズレット・アレイとフotonセンサーを組み合わせたシャック・ハルトマン波面センサーを使用します。First Light Imaging社では、可視領域における波面計測用カメラの改良に取り組み、この用途に特化した高速・低ノイズのカメラ“OCAM2”を開発しました<sup>[2]</sup>。

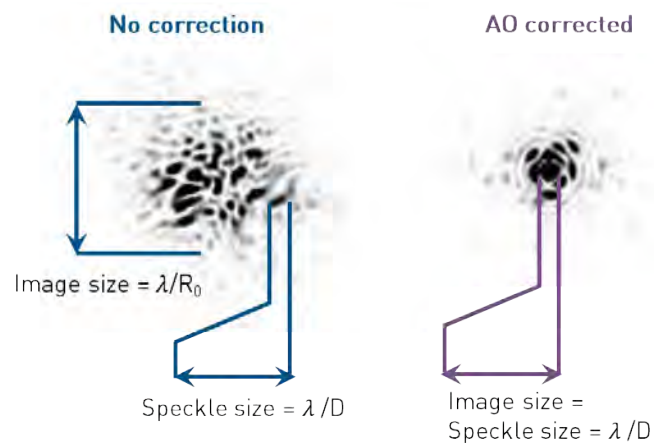


図5：補償光学技術によるレーザースポット検出の改善例  
 $\lambda$ ：波長、D：光学系の直径、 $R_0$ ：大気により歪んだ光の直径

#### <お客様へのメッセージ>

SWIR 領域は可視光域と比較し、大気の流れによる影響を受けづらくなります。小型のダイオードを使用することで、高速な自由空間光通信が可能になりますが、波面計測を行うためには高速・高感度のカメラが必要になります。C-RED 3はこのような目的のために開発された製品です。

## 4. C-RED 3 カメラ

天文学者のために、天文学者によって設計され、OCAM2とC-RED Oneカメラの設計で得られた技術・知識を活用したFirst Light Imaging社のC-RED 3は、SWIR FS0アプリケーションに最適です。

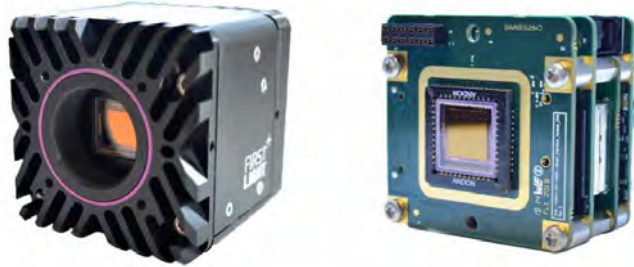


図6：C-RED 3カメラのSTD型(左)とOEM型(右)

C-RED 3では冷却システム(空水冷流路付きヒートシンクやファン)を取り除き、搭載する電子機器を厳選したことで、非常にコンパクトな高速SWIRカメラを実現しました。その魅力をご紹介します。

- **簡単な組込：** カメラはシステムに簡単に組み込むことができるよう、底面、側面、前面に固定用のネジ穴が設けられており、光学インターフェースにはC/CSマウントを備えています。OEM型では、さらに簡単に、どんなカスタムシステムにも対応可能です。C-RED 3は、オリジナルのマルチカメラソフトウェア「First Light Vision」に対応しています。また、汎用性の高いSDKも付属するため、MatLab、LabView、Pythonなどとの連携も可能です。
- **高感度：** C-RED 3は、TECLESSセンサーカメラでは必然的に高くなりやすい暗電流を、非常に高いフレームレートによって補正します。高フレームレート(最大32066fps)になるようにクロップ(ROI)モードで使用した場合、暗電流は完全に無視できます。
- **オンザフライの適応型バイアス／ダーク補正：** 温度や露光時間の変化に伴うダークフレームの影響を補正するために、C-RED 3は適応型補正を搭載しています。このダークフレームは、カメラのファームウェアによって自動的に計算されます。この補正は工場出荷時にキャリブレーションされているため、バイアス／ダークの測定を何度も行う必要がなく、実験をシンプルに行えます。
- **電子シャッター搭載：** C-RED 3は、フルフレームモードで5 $\mu$ sより短い露光が可能な電子シャッターを搭載しています。
- **補正クロップ(ROI)モード：** クロップ(ROI)モードでは非常に低いノイズを維持しながら、高速なフレームレートで撮影できます。これは補正対象のモード数が限られている自由空間光通信においては非常に有用であり、必要なピクセル数も少なく済みます。
- **高いフレームレート：** C-RED 3はフルフレームモード時、600FPSで撮影可能です。クロップ(ROI)モードにより、フレームレートを数kHzまで高速化できます(例：64x64ピクセルの場合、9.5kHzまで設定可能)。
- **低レイテンシー：** 通常読み出しモードのフルフレーム時、露光終了から最初の有効データまでの遅延は22.2 $\mu$ s(デフォルト)です。これは7.4 $\mu$ sまで調整することも可能です(Camera-Link接続時の場合)。
- **複数の同期機能を搭載：** 内部および外部トリガーにより、自由空間光通信システムおよび補償光学システムにおける、他の装置(レーザ、コンピューターなど)とカメラの最適な連携を実現します。

**C-RED3は、プラグアンドプレイ対応のSWIRカメラです。**

C-REDシリーズのカメラは、お客様の用途に合わせて

ハードウェアを最適化することができます。



## 5. 結論

低ノイズの高速赤外線カメラで波面センサーを作ることができるようになったことで、自由空間光通信のパラダイムが変化しました。SWIR領域のレーザは、可視域のレーザに比べて悪天候時の透過率が高く、大気の流れによる影響も少ないため、SWIR領域を用いて自由空間光通信を行うことは非常に有効です。この時、補償光学技術は信号検出をさらに最適化できます。

C-RED 3は、短波長赤外線用途に設計された高性能カメラです。非常に高速で高画質なセンシングを実現し（フルフレーム時最大600fps）、短い露光時間でも最高の性能を発揮します。自由空間光通信や、特に補償光学用途に適したカメラとして設計されています。（ア）

### さらなる進化へ向けて...

First Light Imaging 社では、お客様に常に一步先を行くサービスを提供するために、C-RED 3の宇宙空間仕様の開発を行っています。詳細は今後の情報をお待ちください。

もちろん、その用途は自由空間光通信のみに留まりません。C-RED 3は非常に柔軟性が高く、監視から農業モニタリングに至るまで、様々な用途で使用することが可能です。さらに、小型・軽量・低消費電力（SWaP）であることから、航空機やUAVなどへ搭載できる可能性も秘めています。

長時間露光とより低いフレームレートとを必要とするアプリケーションには、C-RED 2カメラが適しています。C-RED 2はC-RED 3と同等以上の機能を持つ冷却型（TECセンサー搭載）のカメラであり、空水冷流路付きヒートシンクやファンなどの冷却機構を搭載することにより、さらに少ない暗電流（ $<600e^-/pix/s$ ）を達成することができます。

## 6. 参考文献

- [1] Babcock, H. W. The Possibility of Compensating Astronomical Seeing. *Publ. Astron. Soc. Pac.* 1953, 65 (386), 229–236.
- [2] Feautrier, P.; Gach, J.-L.; Balard, P.; Guillaume, C.; Downing, M.; Hubin, N.; Stadler, E.; Magnard, Y.; Skegg, M.; Robbins, M.; Denney, S.; Suske, W.; Jorden, P.; Wheeler, P.; Pool, P.; Bell, R.; Burt, D.; Davies, I.; Reyes, J.; Meyer, M.; Baade, D.; Kasper, M.; Arsenault, R.; Fusco, T.; Diaz-Garcia, J. J. Characterization of OCam and CCD220: The Fastest and Most Sensitive Camera to Date for AO Wavefront Sensing; Ellerbroek, B. L., Hart, M., Hubin, N., Wizinowich, P. L., Eds.; San Diego, California, USA, 2010; p 77360Z. <https://doi.org/10.1117/12.856401>.
- [3] Muehlbrandt, S.; Melikyan, A.; Harter, T.; Köhnle, K.; Muslija, A.; Vincze, P.; Wolf, S.; Jakobs, P.; Fedoryshyn, Y.; Freude, W.; Leuthold, J.; Koos, C.; Kohl, M. Silicon-Plasmonic Internal-Photoemission Detector for 40 Gbit/s Data Reception. *Optica* 2016, 3 (7), 741. <https://doi.org/10.1364/OPTICA.3.000741>.
- [4] Gach, J.-L.; Boutolleau, D.; Brun, C.; Carmignani, T.; Clop, F.; Feautrier, P.; Lemarchand, S.; Stadler, E.; Wanwanscappel, Y. C-RED 3: 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>.

詳細情報またはアプリケーションに関してのご質問などは、(株) オプトサイエンスまでお気軽に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](http://www.first-light-imaging.com)  
[contact@first-light.fr](mailto:contact@first-light.fr)

### First Light Imaging Corp.

185 Alewife Brook Parkway, Suite 210, Cambridge, MA 02138 USA  
[www.first-light.us](http://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](http://www.optoscience.com)  
[info@optoscience.com](mailto:info@optoscience.com)



記載内容および画像の転載、複製、加工などは禁止です。  
また、記載内容は予告なく変更することがあります。ご了承ください。 Ver.1.0\_2208