

## 耐久化したイメージングレンズの安定性を試験

安定性を耐久化したレンズは、環境の衝撃や振動にさらされた後でもその光学的ポイントを維持することができます。このポインティングの利点は、キャリブレーションが取れた画像、例えば計測/ゲージ、3Dステレオビジョン、ロボット工学/センシング、自律走行車、そしてオブジェクトトラッキングといったアプリケーションにおいて精度を向上させます。例えば、多くの3Dイメージングシステムは、デバイスの実視野内にある物体の重心（セントロイド）、もしくは幾何学的中心の計算を信用しています。セントロイド法のアルゴリズムは、センサーのピクセルサイズの1/10より小さい位置を決定するだけの感度があります [1]。言い換えれば、振動や衝撃が原因で起こるレンズ素子のとても小さな移動が、画像アルゴリズムの精度を落としたり、キャリブレーションから外れてしまう可能性があることを意味しています。

衝撃は、システムに負荷を与えるあらゆる種類の短時間高加速度です。衝撃荷重は、通常G、または重力加速度 (9.81 m/s<sup>2</sup>) の倍数で規定されます。典型的な衝撃荷重は、10Gから50Gを超過するまでの範囲内です。衝撃の持続時間は、殆どのアプリケーションにおいて、仕様を開発するのと同じくらいに重要です。例えば、宇宙飛行士は通常打ち上げ中に3Gの加速度を受け続けますが、レンズをテーブルに数センチ上から落とした時に受けるレンズの衝撃は20Gを容易に超えます。

エドモンド・オブティクスは、固定焦点レンズの製品群に3種類の耐久化 - 産業用目的の耐久化、外来保護目的の耐久化、安定化目的の耐久化を用意しています。ここでは、過酷な環境が原因で起こるイメージシフトを防ぐ、安定化目的の耐久化が行われたレンズの利点を掘り下げます。こうしたレンズは、大量生産や航空機の機体内に見つけることができます (Figure 1)。本ホワイトペーパーは、ピクセルシフトの根本原因の考察や非常に小さなレンズの移動を間接的に測定することへの課題を取り上げます。



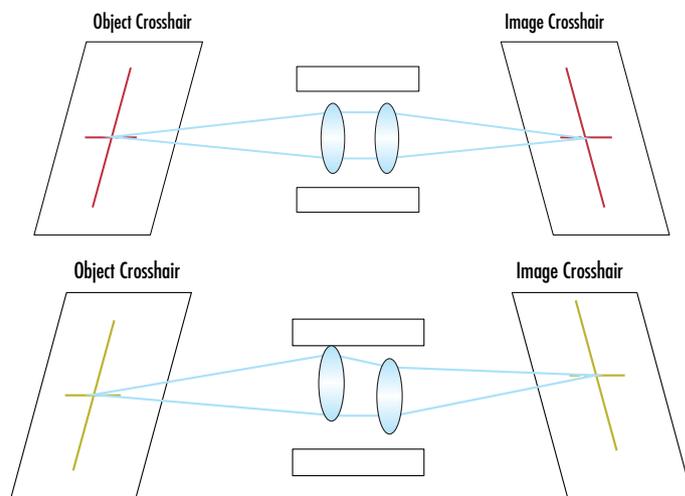
**Figure 1:** 衝撃や振動があっても性能を維持する耐久化したレンズが活躍できる環境例

### ピクセルシフトとは？

ピクセルシフトは、システム内の個々のレンズ素子がアセンブリ全体に対して動く時に発生します。素子の横方向の動きは、出力画像の位置と角度の両方をシフトさせます。シフト量は、レンズの倍率に応じて以下のように変わります：

$$\Delta x_i = \Delta x_l * (1 - m) [2]$$

ここで、 $\Delta x_i$  はセンサー上でのイメージシフトの大きさ、 $\Delta x_l$  はレンズ鏡筒内でのレンズ素子のシフトの大きさ、そしてmはシステムを通して画像を伝達する際のレンズ素子の倍率です。複数の素子で構成されたレンズアセンブリ内では、各素子に起こるイメージシフトの影響がシステム内を光が伝播するにつれて蓄積される可能性があります。この影響の様子をFigure 2に図解します。ここで、上と下のシステムの両方もが、MTFなどシステムレベルでの仕様で捉えた場合には依然として仕様に合致できることに留意してください。なぜなら、全ての光学系は、「組み立てた時」、即ちレンズと鏡筒間の公差を加味した上で機能するようにデザインされているからです。



**Figure 2:** レンズ系のイメージシフトの図： レンズ素子が動かない画像システム (上) と同素子が動くことでイメージシフトしてしまう画像システム (下) [3]

典型的な光学アセンブリの場合、衝撃力に対する耐性はニュートンの運動の第2法則、即ち加速度は質量に比例することで支配されます。標準的なレンズ鏡筒の場合、ねじリングが一枚のレンズに予圧を与え、摩擦力がレンズを所定の位置に留めさせます。これは数学的に次のように記述できます：

$$P = \mu \times M \times \alpha_{\max}$$

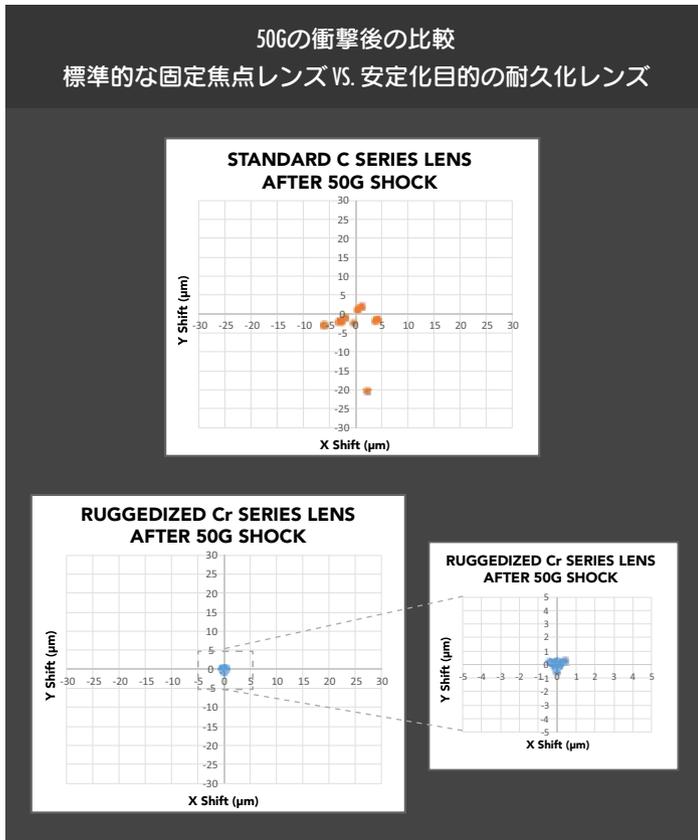
ここで、Pは予荷重、 $\mu$ はレンズとねじリング間の摩擦係数、Mは素子の質量、そして $\alpha_{\max}$ はレンズ素子が動く前に受けることができる最大加速度です。ただこの式には、予荷重と摩擦係数を正しく推量するのが難しいケースがあるという予測上の欠点があります。

## 耐久化したイメージングレンズの安定性を試験

エドモンド・オプティクスは、摩擦に頼るのではなく、レンズを所定の位置にポッティングすることで更なる一歩を進めています。チューブに各レンズ素子を接着固定することで、振動を減衰し、力を分散して、レンズを所定の位置に留めます。TECHSPEC® Cr シリーズ 固定焦点レンズの場合、「耐久化」とは、単なるサバイバビリティ（ひびが入った素子など、全体損傷に対するレンズの耐性）ではなく、画像の安定性を意図しています。

### ピクセルシフトはどのくらい小さくする必要があります？

3Dイメージングアプリケーションでのセントロイド法アルゴリズムは、センサーのピクセルサイズの $\frac{1}{10}$ より小さい位置を決定するだけの感度があります [1]。これは、イメージングシステムのピクセルシフトが3-5 $\mu\text{m}$  (典型的な1画素当たりのサイズ) よりも小さくしなければいけないことを意味しています。エドモンド・オプティクスの Cr シリーズ 固定焦点レンズは、50Gの衝撃でも1 $\mu\text{m}$ 以下のピクセルシフトを実現します (Figure 3)。



**Figure 3:** 上の標準的なイメージングレンズ (Cr シリーズ 固定焦点レンズ) は通常の条件下では良好に機能するが、50Gの衝撃では1画素以上のピクセルシフトが発生する。一方、安定化目的の耐久化がなされたCrシリーズレンズは、50Gの衝撃後にピクセルシフトが1 $\mu\text{m}$ 未満となり、1画素のサイズより遥かに小さくなる

### 衝撃の定量化

通常、衝撃は高加速度の場面で考えられます。しかしながら、より完全な描写は、単にピーク加速度だけを考えるのではなく、衝撃の持続時間も考慮に入れることです。ジェットコースターでは、4-6GのGを体感する

かもしれません。これに対して、レンズを硬い金属製のテーブルに数センチ上から落とすと、レンズの加速度は20-50Gになる可能性があります！両者の違いは加速の持続時間です。衝撃がレンズにかかる予荷重を数ミリ秒でも上回れば、レンズ素子は依然として自由に動き、数マイクロメートル分変位する可能性があります。

エドモンド・オプティクスの全ての試験において、耐久化されたレンズは50Gの衝撃を2msの間受けています。

### 安定化目的の耐久化の試験方法

エドモンド・オプティクスの耐久性試験は、2つの施設に分かれます。第1の施設は、集光スポットの位置を $\pm 100\text{nm}$ 以内で測定できる画像システムです。2番目の施設は、各レンズに衝撃を与える落下塔です。埃の粒子よりも小さい1 $\mu\text{m}$ 未満のピクセルシフトをテストするのはそう簡単ではありません。ピクセルシフトを測定する試験システムは、非常に敏感で再現性があり、正確でなければなりません。試験中、耐久化されたレンズをキネマティックマウントにねじ込み、施設間でレンズを繰り返し移動させます。設計上の大きな課題は、キネマティックマウントを十分に再現性のあるものにして、測定値が変わることなく、レンズを画像システムから落下塔に移動できるようにすることでした。この固定方法は、200nm、即ち3.45 $\mu\text{m}$ ピクセルの $\frac{1}{10}$ 小さい正確性をもつ測定を実現します。

衝撃荷重の下でレンズを試験するには、この装置が同じ衝撃荷重に対しても影響を受けないようにしなければなりません。当社のテストでは、テーブル上にレンズを落とすのと同じように、キネマティックマウントを施設間で移動する加速度も20Gを超える可能性があることがわかりました。この加速度は、1ms未満という極めて短い時間内に起こります。しかしながら、加速度はボルト締めされた界面間の静摩擦よりも十分に高く、試験装置内に微視的シフトを引き起こす可能性があります。この困難を克服するため、装置はキネマティックマウントを画像システムと36未満の衝撃力で優しく接触させる固定システムを使用しています。

### (マウントの考察)

エドモンド・オプティクスの安定化目的の耐久化がなされたCrシリーズレンズは、レンズ素子が筐体内で動かないようにデザインされています。ただ、レンズ筐体がカメラに対して動かないようにすることも重要です。レンズとカメラ間のインターフェース部分は、衝撃や振動下で不足する可能性があります。

エドモンド・オプティクスは、レンズアッセンブリとカメラ間のシフトを防ぐためのソリューションを試験し、次の2つを推奨しています：

1. カメラの(マウント側)を改良してレンズのネジ山をつかむためのナイロン先端チップ付きネジを装備する
2. レンズとカメラ間の(マウントのかみ合わせ部)に中程度の弾力性をもつ接着剤を充填する

エドモンド・オプティクスの安定化目的の耐久化が行われたCrシリーズレンズは、ステンレス製の(マウントクランプ)を採用します。クランプねじは、0.9-1.1 mmの締め付けトルクで締めつけることをユーザーに推奨しています。こうすることで、レンズが(マウント内で)シフトするのを防ぎながら、ピントや作動距離を所定の位置に留めることが確実にになります。

キャリブレーションを維持し、潜在的なピクセルシフトの量を減らすことを試みる時、考慮すべき可動部分はいくつかあります。レンズ素子は鏡筒内部で移動できます - これは各素子を所定の位置に接着固定することで対処できます。作動距離の調整を可能にするピント調整機構は、それが十分に固定されていない場合はシフトする可能性があります。レンズとカメラの(マウントインターフェースもシフトする可能性があります。画像システム内の固定部のいずれか一つの部分が静止摩擦力を上回ると、それが微視的尺度であっても、アライメントやキャリブレーションが失われ、誤ったデータになる可能性があります。

カメラ上の1画素よりも遥かに小さいイメージシフトを検討する際、エドモンド・オブティクスは、レンズシフト、機械的ドリフト、そして安定化目的の耐久化が行われたレンズの試験という課題に取り組んでいます。TECHSPEC® Gシリーズ 固定焦点レンズは、こうした課題に対する当社のソリューションを統合し、高衝撃用途で優れた性能を提供します。

### 参考文献

- 1.) Quine, Brendan M., et al. "Determining Star-Image Location: A New Sub-Pixel Interpolation Technique to Process Image Centroids." *Computer Physics Communications*, vol. 177, no. 9, 2007, pp. 700-706., doi:10.1016/j.cpc.2007.06.007.
- 2.) Schwertz, Katie, and Jim H. Burge. *Field Guide to Optomechanical Design and Analysis*. SPIE Press, 2012.
- 3.) *Ruggedization of Imaging Lenses*. Edmund Optics, 2017, [www.edmundoptics.com/document/download/416052](http://www.edmundoptics.com/document/download/416052).

衝撃や振動に対応した  
**Compact  
Ruggedized (Cr)**  
仕様

**TECHSPEC® Cr** シリーズ 固定焦点レンズ



- 衝撃や振動時に画素シフトを最小化するようデザイン
- 個々のレンズ素子を接着固定して光学的ポインティング安定性を維持
- 単純化したピント調整機構と広範な固定絞りオプション
- ステンレス製のC型クランプ式ロック機構を採用した機械機構部

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 Email: sales@edmundoptics.jp

 **Edmund**  
optics | japan

[www.edmundoptics.jp](http://www.edmundoptics.jp)