

イメージングレンズに対する高度なアセンブリ手法

ジェレミー・ゴヴィエ

用途の要件が高まるにつれて、それに対応するためにイメージングレンズには、さらに高度なアセンブリ手法が必要になる。

カメラ技術の継続的な進化に伴い、イメージングシステムの用途の要件はますます高まり続けていく。カメラのピクセル数が増加するにつれて、収集しなければならない画像の中の情報はますます増えていく。カメラのピクセル数を増加させるために、ピクセルは小さくなり、より多くのピクセルが収まるようにセンサは大きくなっている。その両方によって、レンズをカメラ性能に対応させる処理は、さらに難しくなっている。

Drop Together アセンブリ

マシンビジョンレンズ、すなわち、産業用または科学用カメラに搭載されて、コンピュータがそれを基に判断を下せるような画像を取得することを目的に設計されるレンズの大多数が、「drop together」と呼ばれる手法で構築されている。この手法は、精密に加工されたバレル、スペーサー、光学素子を結合して、リテーナーによって適切な位置に保つというものである。金属の内径に対するレンズの外径のフィット（密着度合い）の機械的公差や、その他の機械的公差によって、すべての光学面の正確な位置が定義される。この手法では、ガラスと金属の両方の機械的公差を厳格に制御することが必要である。直径、同心度、厚さが $10\mu\text{m}$ の単位で制御される、他の業界から来た機械エンジニアから見ると、これら



の光学的公差は、気が遠くなるような面倒な作業に感じられる場合が多い。

高度なアセンブリ手法が求められる理由

マシンビジョンに求められる高精度な光学アセンブリでは、公称位置から $10\sim 50\mu\text{m}$ の範囲で光学面の位置を制御することが一般的に必要である。求められる性能が高まり続けるにつれて、光学面の配置精度に対する要件もますます高くなっていく。

レンズの中心がシステムの光学軸から数 μm でもずれると、各光線がレンズの曲面に当たる角度が変わってしまう。これが変わると、面を通過する光線がどれだけ屈折するかが変わる。このような変化のすべてによって、光線がセンサに当たる位置が変わり、1つの物点 (object point) からの一部の光線が、同じ物点からの他の光線とは異なるピクセルに到達してしまうことに

なる。これは、画像のピンボケやコントラストの低下につながる。

ピクセルが小さくなるにつれて、像面 (image plane) 上の各光線の位置に対する許容誤差は小さくなり、許容の範囲内に収める処理はより難しくなる。上述のレンズ面上の位置誤差に対する感度も高くなる。ピクセルサイズが大きいほど、小さな誤差に対する許容度は高くなる。

高いアセンブリ精度が必要になる、さらに複雑なもう1つの要因は、センサが大きくなるにつれて、ピクセルサイズが同じだったとしても、そうした誤差に対する感度が著しく高くなることである。これには多数の理由があるが、最も単純な最大の理由は、角度に関係している。光学面の位置の誤差による結果の1つは、ビームポインティングと呼ばれるものである。レンズ面の中心がずれると (レンズの曲率の中心がパレルの中心 [z 軸] からずれるような形でレンズ面が配置されると)、レンズを通る光は z 軸から遠ざかる方向に曲がることになる (図1)。このビームポインティングにより、レンズによって形成される画像は傾き、z 軸に完璧に垂直ではない状態になる。光学面のアライメントが誤差の要因になることに加えて、レンズのマウンティング状態に対するカメラのセンサの実際の傾きも、画像の傾きの要因になる (図2)。これらの要因はどちらも数分 (arc minute) 程度で、一般的には些細なものといえる。しかし、センササイズが大きくなるにつれて、小さな角度のずれに起因する、

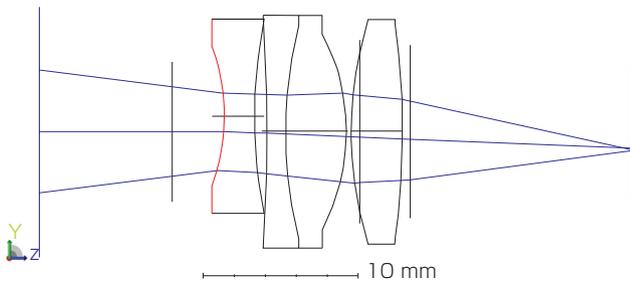


図1 たった1つの素子の中心がずれるだけでも、光学系を通過するビームは軌道から外れてしまう可能性がある。この図は、影響がはっきりと視認できるように、ディセンダー(中心ずれ)の量が誇張して描かれている(本稿の図と写真はすべてエドモンド・オプティクス社提供)

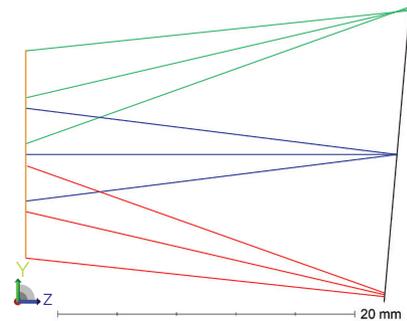


図2 イメージセンサが傾いているために、緑色の光線はセンサに到達する前に集束し、赤色の光線は適切に集束する前にセンサに到達することから、画像のピンボケが生じることを示す、「Zemax OpticStudio」の出力。図示を目的に、傾きは誇張されている

理想的な像面からのセンサの変位は大きくなっていく。従って、中心では焦点が完璧に合っていたとしても、画像の縁や四隅では、焦点が理想的な位置よりも遠くまたは近くなり、縁や四隅に焦点ずれ、すなわちピンボケが生じることになる。

この傾きの影響を明らかにするために、数年前の一般的なチップサイズである1/1.8インチのフォーマットを、ソニーの新しい「Pregius IMX530」と比較して、同量の像面の傾きによって、画像にどれだけの影響が生じるかを示そう。1/1.8インチのセンサは対角が9mmで、つまり四隅は、チップの中心から4.5mm離れている。IMX530の対角は19.3mmで、四隅はチップの中心から9.65mm離れている。センサの中心において焦点が完璧に合っている場合、5分の傾きによって、1/1.8インチのセンサの四隅では約6.5 μ mの焦点ずれが生じ、IMX530では14 μ m以上の焦点ずれが生じる。これらは非常に小さな値だが、焦点が14 μ mずれると、比較的高速なレンズであっても、画質に劇的な違いが生じる可能性がある。

図3は、像面が5分の傾いた近軸レンズ(完璧なレンズ)の変調伝達関数(Modulation Transfer Function: MTF)を示している。青色のラインは

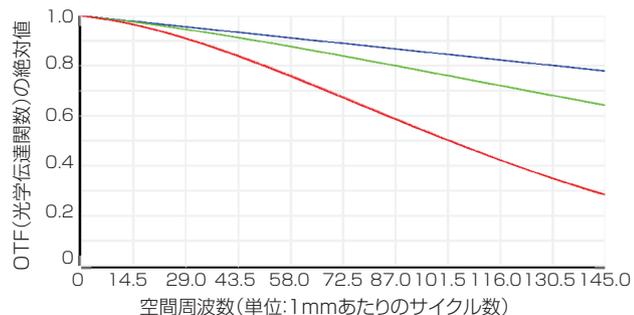
画像の中心で、焦点が完璧に合っている。緑色のラインは1/1.8インチのチップの四隅で、MTFは145lp/mmにおいて約10コントラストポイント低下しているのに対し、赤色のラインはIMX530の四隅で、MTFは約50コントラストポイント低下している。

解決策: アクティブアライメント

ますます小さくなるピクセルと大きくなるセンサに歩調を合わせて、システムの性能をさらに高めるには、異なるアセンブリ手法が必要である。それらの手法は必ずしも新しいものではなく、その大

半が他の業界や製品で使用されているが、マシンビジョン市場に適用されるのはほぼ初めてである。それらの手法のうちの一部は、顕微鏡法や天文学など、スキルを必要とする労力が増えることによるコストが許容される業界で、長い間使用されている。量産品の民生用電子機器においても、類似の手法が使われている。オートメーションやロボットによって、アセンブリコストは大幅に削減されるが、設定コストを償却するには量産が必要になる。

これらのアセンブリ手法は、アクティブアライメントまたはアクティブ補



□ -Diff. Limit-Tangential □ -Diff. Limit-Sagittal □ -0.0000 mm-Tangential □ 0.0000 mm-Sagittal □ -4.5000 mm-Tangential □ 4.5000 mm-Sagittal □ -9.6500 mm-Tangential □ 9.6500 mm-Sagittal

Polychromatic Diffraction MTF	
1/20/2023 Data for 0.4861 to 0.6563 μ m Surface: Image Legend items refer to Field positions	Edmund Optics LENS.zmx Configuration 1 of 1

図3 MTF曲線により、センサが5分傾いている場合に、1/1.8インチフォーマットのセンサ上のコントラストは低下するが(緑色)、ソニーの新しいPregius IMX530センサ上のコントラストは、同量の傾きでそれよりもはるかに著しく低下することがわかる(赤色)

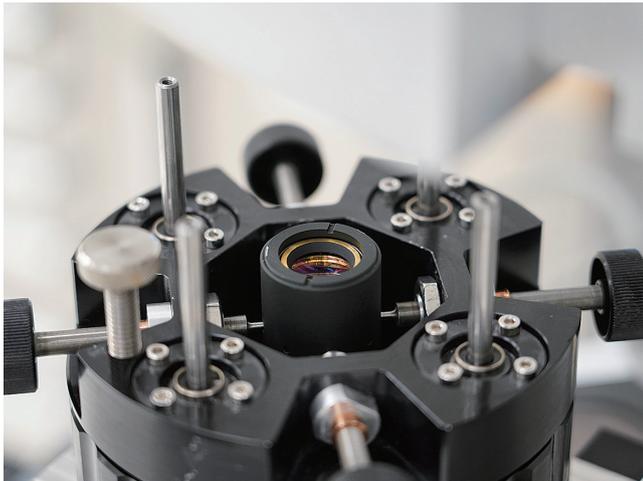


図4 アクティブアライメントにおける顕微鏡対物レンズの中の素子の手動調整。この種の調整は、drop togetherシステムのアセンブリ時には行われない

償と呼ばれることが多い。すべての光学面のx、y、z座標における位置と角度の傾きを共通軸を基準として位置合わせするか、あるいは、光学面の一部を調整しつつ、性能のフィードバックを得ることによって性能を最適化する(図4)。

どちらの手法にも、各面の位置、または、MTFや透過波面誤差などの性能指標のいずれかの精密な試験が必要である。それには、熟練した技能を持つ技術者が調整を行うか、自動化システムの中に高精度なロボティクスを搭載するかのいずれかが必要になる。1つ以上の面の光学的位置が定まった時点で、位置を固定するための手段も必要である。その手段は、カメラシステムの動作中を通してその位置を維持できるほど十分に堅牢でなければならない。これには、一般的には接着剤が用いられるが、その他の機械的な方法も可能である。接着剤を使用すると、部品を結合して保持する従来のシステム(drop together)よりも、アセンブリ時間はかなり長くなる。この追加のアセンブリ時間は、追加で必要となる接着処理のアセンブラ/マシンの時間

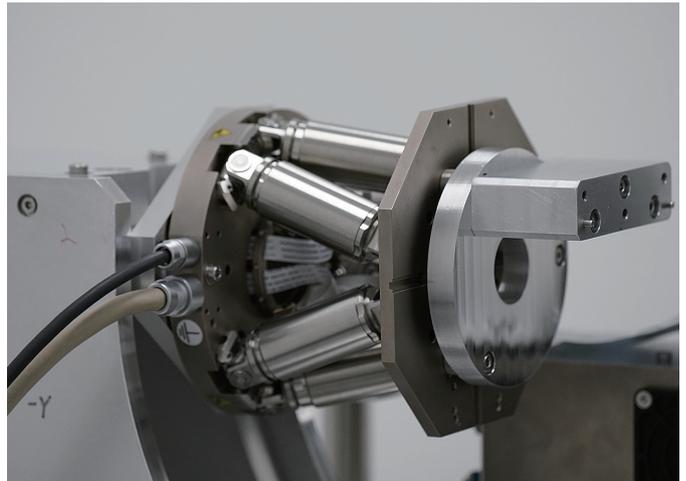


図5 ロボティックオートメーションの進歩により、アクティブアライメントの実装は容易になった。例えば、この自動ヘキサポッドは、アセンブリ中の光学素子の高精度なアライメントに使用される

と、接着剤が硬化するのを待つ時間の両方を合わせたもので、接着剤が硬化するまでの間、アセンブリは通常、固定具の中に入れられる。

全体的な性能を最適化する際に行われる、1つ以上の光学部品の補正はおそらく、レンズ素子の配置に関するものか、あるいは、センサそのものの位置である。性能を最適化する際にセンサをアクティブに傾ければ、ビームポインティングの誤差と、カメラとレンズインタフェースの間に本質的に存在する機械的な傾きの誤差の両方を解消することができる。

光学面の正確な位置決めには、光学素子をほんの少しだけ正確に移動させて、レンズを固定する間、その位置に正確に保持する機能も必要である。これには一般的に、特殊な固定具と精密なモーション制御が必要になる。ロボティクスやモーション制御の進歩は、この実装をより簡単かつ安価にしており、アセンブリ工程を自動化するさらなる機会を生み出している(図5)。

これらの手法を本当に最大限に活用するには、光学素子の設計時に特別な注意を払う必要がある。レンズシステムから最大限の性能を引き出すには、アセンブリ手法を念頭にそれを設計する必要がある。drop togetherアセンブリ向けに最適化された設計をそのまま採用するだけでは、アクティブ補償を最大限に活用するように特別に最適化されたレンズほどの高い性能は、同じアセンブリ手法を適用したとしても、得られない可能性が高い。

こうした高度なアセンブリ手法は、新しいレベルの性能をマシンビジョンカメラ市場にもたらすが、レンズアセンブリの設計と実行に、一層の技術的労力を必要とする。これによってレンズ開発のコストと時間は増加するが、新しいレベルの性能が達成できるようになる。センサ技術によって性能がますます引き上げられていくにつれて、このような手法をレンズの設計とアセンブリにおいて、より一般的に適用することが必要になる。

著者紹介

ジェレミー・ゴヴィエ(Jeremy Govier)は、米エドモンド・オブティクス社(Edmund Optics)のシニア・プリンシパル・エンジニア。URL: www.edmundoptics.com