

UAV用の光学系の設計

フロリアン・ゴリエ

UAVが飛行する高度には、多くの過酷な環境が存在し、そのすべてがレンズの性能に影響を及ぼす。

技術の進歩に伴い、さらに多くの新しいアプリケーションでマシンビジョンの活用が推進されている。そうしたアプリケーションの大半が、従来のマシンビジョンの分野に属している。しかし、そうでないものも存在し、それらのアプリケーションは、従来のマシンビジョン実装とは要件が大きく異なる。従来とは異なる分野のアプリケーションに取り組む場合は、問題に遭遇する可能性が高い。イメージングシステムを、圧力、温度、衝撃や振動といったさまざまな環境条件に適応させなければならないためである。

無人航空機 (Unmanned Aerial Vehicle : UAV) のイメージングアプリケーションは、特に増加傾向にある。ドローン技術の進歩とともに、より従来型のマシンビジョンに対して一般的に期待されるのと同じ貫したイメージング性能を提供するために、イメージング技術も進歩する必要がある。

本稿では、増加の一途をたどる、UAV技術の進歩によって実現されるマシンビジョンアプリケーションを取り上げ、変動的でしばしば過酷なその環境におけるイメージングに生じる本質的な問題と、それらの問題を解決する方法について解説する。

UAV用のイメージングの重要性

UAV技術とイメージングの間には、常に密接なつながりがあった。初期に商用化されたドローンにさえも、イメージングシステムが搭載されていた(図1)。



図1 農業分野を対象にマシンビジョンを使用するドローン (Adobe Stock 159211646、提供:エドモンド・オブティクス社)

UAVにイメージングが必要となる理由は、かなり明白である。方角とガイダンスを得るために、ドローンの位置を把握できなければならないためだ。レーダーの使用を除けば、その視界を把握することが、UAVの位置を特定する唯一の手段である。しかし、UAV上のイメージングの目的は、単なる向きと動きの範囲にとどまらない。ドローンに搭載される多くのアプリケーションが、ビジョンシステムを使用して、広大な土地のイメージングを行う。その目的は、次に向かう方角を知ることではなく、環境を評価してさまざまな種類の有用なデータを取得することにある。

例えば、航空写真測量は、UAVに搭載されたカメラシステムによる2Dイメージングを使用して、地表の3Dマップを作成するアプリケーションである。地上サンプル距離 (Ground Sample Distance : GSD) は、航空写真測量が行わ

れる高度に相関する値で、イメージングシステムのナイキスト周波数とイメージングのサンプルに関連する。従って、高性能なイメージングシステムを搭載すれば、UAVの飛行高度を上げることが可能で、それによって視野が広がるため、撮影しなければならない写真の枚数は少なくなる。最新の軍用ドローン技術では、最大5万フィート (15.2km) の高度でドローンを飛行することが可能で、それは多くの課題をイメージングシステムにもたらす⁽²⁾。温度はおよそ30℃から氷点下50℃、気圧はおよそ100kPaから20kPaの範囲で変化する(図2)。

温度と圧力によって、レンズを構成する素子に変化とずれが生じるため、広範囲にわたるイメージングは非常に難しく、イメージングシステムがこのアプリケーションの制限因子となる。マシンビジョンシステムのイメージング性能を高める方法を見つけること

*これは Vision Systems Design Japan 2023年11月号掲載記事のリプリントです。
©e.x.press Co., Ltd. All rights reserved.

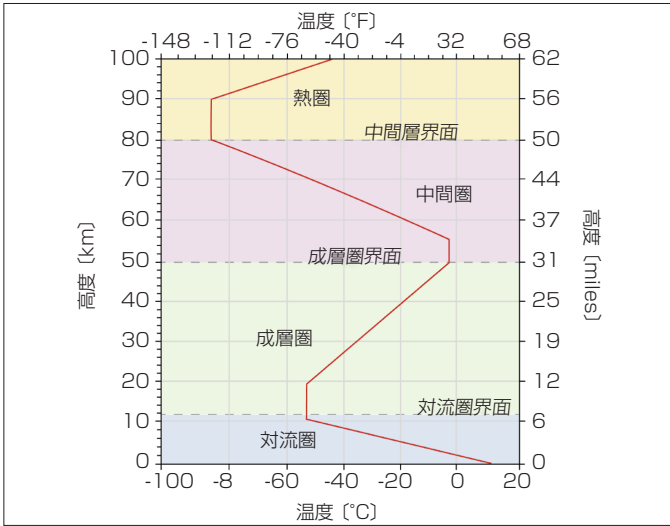


図2 高度に対する大気温度の変化⁽³⁾ (提供: エドモンド・オブティクス社)

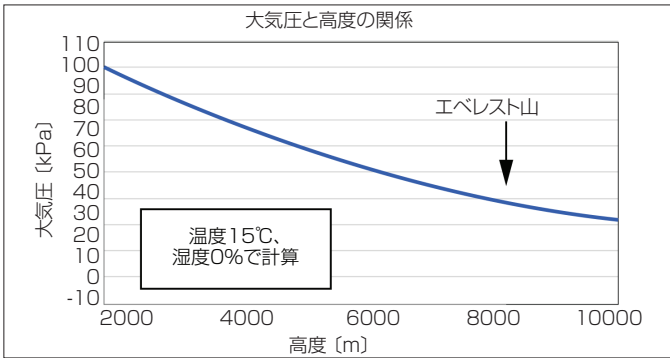


図3 高度に対する大気圧の変化⁽⁴⁾ (提供: エドモンド・オブティクス社)

マルチスペクトル/ハイパースペクトルイメージングの比較

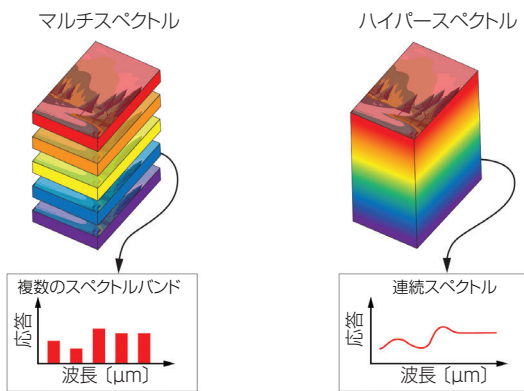


図4 マルチスペクトルイメージングとハイパースペクトルイメージングの違いは、波長情報が離散的に表されるか、それとも、連続的に表されるかである (提供: エドモンド・オブティクス社)

が、このアプリケーションにおいて航空写真測量の性能を進化させ続けるために、特に重要である⁽³⁾ (図3)。

UAVイメージング分野におけるもう1つの重要なアプリケーションが、植生のマルチスペクトル/ハイパースペクトルイメージングである。マルチスペクトルイメージングでは、複数の離

散的な波長領域のデータを収集するのに対し、ハイパースペクトルイメージングでは、1つの大きな連続した波長範囲のデータを収集する。UAVからの植生イメージングシステムに多大な影響を与えるという点で、その高度での写真測量と概念が似ているが⁽⁴⁾、この種のイメー

ジングには、波長に対する依存性という重要な要素が加わり、問題はさらに複雑になる。広範囲の温度と圧力に対応するシステムを設計するという、既に困難な作業に加えて、高いスペクトル分解能を維持しつつ、広い波長範囲で動作するシステムを設計しなければならない。システムのスペクトル分解能は、システムが識別可能な波長帯の最小サイズに関連する。マルチスペクトルイメージングは、ハイパースペクトルイメージングよりもスペクトル分解能が低い、設計ははるかに容易で、コストも低くなる傾向にある (図4)。

必要となるスペクトルイメージングの種類は、アプリケーションによって異なる。多くの植生タイプが、特定波長においてかなり異なる特性を示し、その波長のほとんどが可視域以外に存在する。そのため、マルチスペクトルイメージングの小さな離散的なスペクトルバンドが、UAVの2D画像から最大限の情報を収集するために非常に有効である。従って、高いスペクトル分解能と高いイメージング分解能の両方を持つシステムが、このアプリケーションに対して理想的である。

上記のイメージングアプリケーションは、非常に一般的なものだが、UAV技術とイメージング技術の急速な進歩によって、多種多様なアプリケーションが軍事分野と商用分野の両方で次々と登場している。軍事分野では、ターゲットデコイ、一般的な戦闘ミッション、監視にUAVを活用することによって、損失を減らし、より重要で時間的制約のある軍事作戦を展開することが可能になる。商用分野では、UAVは、写真測量や環境イメージングと同じ概念の活用によって時間と労力を低減することで、災害救助、考古学、探鉱に変革をもたらしている。

UAVアプリケーションにおけるレンズ性能の改善

上述のとおり、UAVが飛行する高度には、多くの過酷な環境が存在し、そのすべてがレンズの性能に影響を及ぼす。上記のアプリケーションを最適化するには、高性能なイメージングシステムを設計することが必要だが、条件の変動が大きいため、その作業は難しい。温度の変化は、熱膨張係数 (coefficient of thermal expansion: CTE) という概念に基づき、物体の物理的なサイズの変化を引き起こす(図5)。

物体や材料の変化量はこの係数に依存し、この係数は材料によって異なる。ガラスと金属ではCTEの値が異なり、それによって、イメージングレンズの構成素子に大きなずれが生じたり、加熱または冷却されたときに傾きや一般的な位置ずれが生じたりする可能性がある。これは、取差やイメージング性能の低下を引き起こし、UAVのイメージングアプリケーションに悪影響を及ぼす。レンズの屈折率も温度によって変化するが、この現象がシステム性能に与える影響は、熱膨張に起因する物理的なサイズの変化よりも小さい。従って目標は、レンズアセンブリの構成素子のずれを低減して、位置ずれに対するレンズの感度を抑えることである。

最初の問題であるレンズの位置ずれは、厳格なレンズ設計によってほぼ修正される。温度範囲全体で性能を維持

するには、いずれかの素子にずれが生じた場合に他の素子はその伸縮を補償するように、素子を設計する(図6)。

この設計は厳格で時間がかかるが、温度範囲全体で安定した性能を維持するための唯一の方法である。一般的に、素子数の少ない設計にもつながる。素子数の少ない設計と高性能な設計の間のバランスを図るのは、複雑だが不可能な作業ではない。ここで、設計にたわみを持たせるのも一般的であることに注意してほしい。それによって、金属素子とガラス素子の間の接点にかかる、熱膨張による圧力が緩和される。

素子間の動きのずれに影響されないようにレンズを設計することも重要である。公差は、これと同じ概念に基づくため、それはレンズ設計においてかなり一般的に行われていることだが、公差の上に温度変化に起因するずれが加わると、レンズ設計はさらに複雑になる。ずれに対するレンズの感度を抑えるために、レンズ設計者は、深刻な取差をシステムに引き起こす現象を低減する方法に目を向ける傾向にある。通常は、レンズの曲率半径、ガラスの種類、イメージングアセンブリの間隔や厚みを慎重に制御することによって、これが行われる。温度依存の空間的なずれと公差のずれの相乗的な影響により、ずれに影響されないレンズの設計はさらに難しくなるが、慎重なレンズ設計者は、上述の方法によって

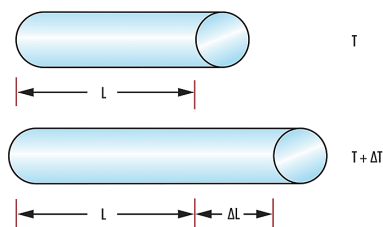


図5 温度の変化(ΔT)は、材料の線形のCTEに基づく材料長さの変化(ΔL)を引き起こす(提供:エドモンド・オブティクス社)

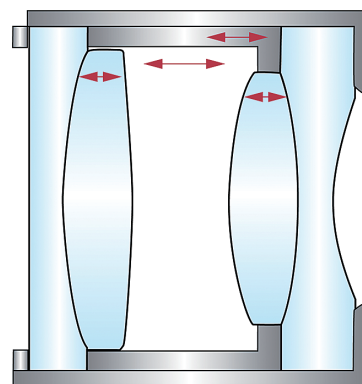


図6 厳格なアサーマル設計における伸縮補償(提供:エドモンド・オブティクス社)

そのバランスを図る。

高度の変化に関連する気圧の変化を補償するようにも、レンズを設計することができる。それを行うには、レンズ設計ソフトウェアにおいて、さまざまな圧力値でレンズ内外の空気を正確にモデル化することにより、レンズに対するその影響を正確に予測した上で、その変化に耐えられるレンズを設計する必要がある。

極度の衝撃と振動に耐えるレンズの設計

温度、圧力、そしてレンズに対するそれらの影響を緩和する方法は、UAVアプリケーションに有用なレンズを設計するための重要な要素だが、UAVイメージングに伴う高度の変化により適したレンズとするために追加できる堅牢化対策は、他にも存在する。

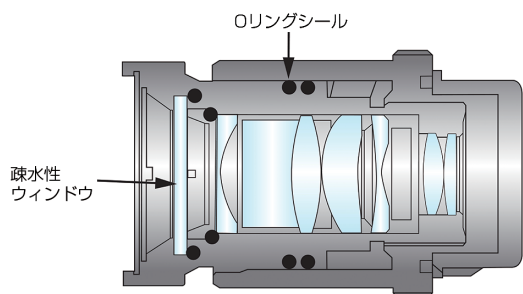


図7 外側からの水分や塵などの汚染物質の侵入を防ぐために封止された防塵防水レンズ(提供:エドモンド・オブティクス社)

例えば、ドローン飛行にありがちな、加速度の急な変化に対応するために、衝撃と振動に対する耐性が必要である。その耐性によって、イメージングレンズ内の素子は、大きな衝撃を受けてもかなり安定した状態を保つことができる。オプトメカニクスを簡素化し、単一素子レンズの周囲に接着剤を使用してレンズバレルの中のずれと位置ずれを防ぐことにより、これが行われる。

UAVアプリケーションで考察する必要のあるもう1つの要素が、IP (Ingress Protection: 防塵防水性能) である。イメージングアプリケーションにおいて ingress は、水や塵などの望ましくない微粒子の存在を指す。塵や水は、レンズのイメージング性能を低下させる。光がこれらの微粒子に当たると、予測不能な形で方向が変わるためである。レンズバレル内部の素子を外界から封止することにより、これを緩和することができる。アセンブリ時にレンズ内部の空気を不活性ガスに置き換えることも可能である。それによって存在する微粒子は除去され、外側からの他の微粒子はレンズの内側に侵入できなくなる。

これは、UAVアプリケーションに対して特に効果的である。熱変動に伴う大きな問題の1つが、レンズの結露だからである。レンズ内に湿気が存在すると、水粒子がレンズに付着しやすくなり、レンズに到達する光線の方向が変わってしまう。それは、イメージング性能を著しく低下させ、イメージングアプリケーションの低温時の主要な問題の1つである。図7に示すように、フロント素子に疎水性のウィンドウを追加することにより、この結露をさらに抑えることができる。

前述の複雑さに加えて、UAV イメージングにおける重要な検討項目の1

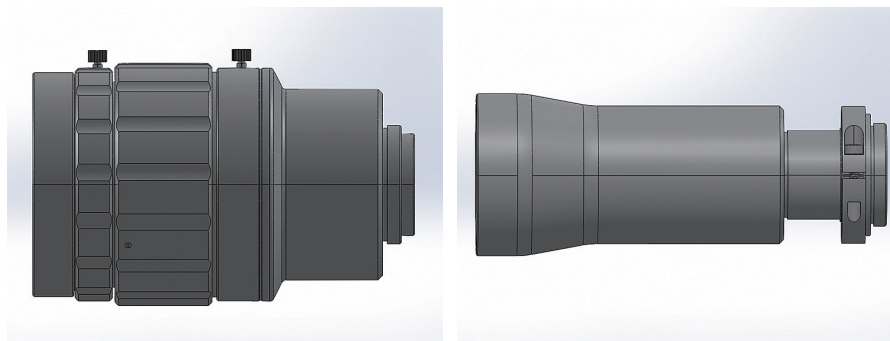


図8 標準的なイメージングレンズと、焦点長が同じでそれよりも小型で軽量のアサーマルレンズを並べて比較した様子(提供:エドモンド・オプティクス社)

つが重量である。高い高度でのイメージング用に設計されたレンズは、UAVの効率的に飛行する能力を損なわないように、軽量でなければならない。この条件によって、UAV イメージングレンズの設計は複雑になるのではないかと思うかもしれないが、実は設計の簡素化に役立つ。軽量のレンズほど、素子や複雑な光学機械部品は少なくなる傾向にある。

オプトメカニクスの簡素化は、このような種類のレンズの設計において、既に一般的に行われている。素子が多量にも多い場合や光学機械設計が複雑な場合に必要となる温度補償は、レンズ設計者にとって問題になるためである(図8)。

マシンビジョンシステムを、UAV イメージングのような、より過酷な環境を伴う、より幅広い種類のアプリケーションに適用するのは、気が滅入るほ

ど困難な作業のように思われるが、イメージング業界はこれに対処するために、複数の有効な設計パラダイムや技を取り入れている。その様子が最もよく見てとれる分野の1つが、UAV イメージングである。このアプリケーションでは、高度の変化によって、イメージングシステムの性能に悪影響を及ぼす可能性のある、あらゆる種類の条件が発生する。高度が高くて変動的であることから、温度の変化、気圧の変化、衝撃と振動、湿度のすべてが、イメージングシステムに問題をもたらす。UAV イメージングシステムに対するこれらの影響を低減する方法を見出すことで、UAV アプリケーションの効率と多用途性を高めることができる。UAV 技術はさらなる進歩が求められていることを考えると、UAV システムの機械部品に合わせてイメージングシステムの性能を向上させることが重要である。

参考文献

- (1) Wawrzyn, D. What is Ground Sample Distance and How Does it Affect Your Drone Data-Propeller. August 3, 2023 <https://www.propelleraero.com/blog/ground-sample-distance-gsd-calculatedrone-data/>
- (2) Leslie, J. How High Can a Drone Fly? Drone Survey Services. 2023. <https://dronesurveyservices.com/can-you-fly-adrone-in-a-public-park-in-the-uk/>
- (3) Pidwirny, M. Laboratory 2: Heat and Temperature in the Atmosphere. Pressbooks. April 5, 2021. <https://pressbooks.bccampus.ca/physgeoglabmanual1/chapter/lab2/>
- (4) Miller, C. Human Responses to High Altitude. Pressbooks. April 15, 2021. <https://humanbiology.pressbooks.tru.ca/chapter/8-8-human-responses-to-highaltitude/>

著者紹介

フロリアン・ゴリエ(Florian Gollier)は、米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)の光学システムエンジニア。