

可視からLWIRをイメージングする 超広帯域光学系

クリストファー・アレクセイ

光学分散の「変動」を考慮に入れば、光学材料の組合せによって、可視および赤外、もしくはこの範囲の分離した複数の小領域を同時に結像する単一屈折レンズ系を作製することができる。

マルチスペクトルイメージングのアプリケーション数が増大するのに伴い、価値の高い情報を捕捉、供給、伝達するためのより高度な光学系に対する需要も増大する。しかし、伝統的な光学アプローチは、異なる複数領域は勿論、広い電磁スペクトル領域を一般的な光学系を用いて同時にイメージングする手段にはならない。

マルチスペクトルイメージングシステムの設計は、長い間、完全にではないにしても主に反射面を利用するアプローチが大半であった。反射鏡は本来アクロマティックだが、多数の例が示すように、反射設計は挑戦的なイメージングシ

ステムでの使用に適さないという欠点がある。反射幾何学は狭～中程度の角度視野が必要なシステムに最も適しているが、それでも多くの場合、そのような設計はオブスキュレーションを含む。

オブスキュレーションなしの設計はマルチミラー形式において定式化することができる。その好例が3ミラーアナスタグマートであり、これは提案されて以来、広範囲に利用されてきた。その主たる欠点は、その機能を達成するためにかなりの空間と複雑なアーキテクチャが必要になることだ。設計者は、いったん反射型ではなく屈折型を選択すると、屈折性媒質自身によって

引き起こされる色誤差の難題と戦わなければならない。

高次色収差

色分散は光学材料の屈折率の波長による変化である。ほとんどすべての場合に、媒質の屈折率は波長が長くなるにつれて減少する。補正なしでは、屈折率設計において、十分なイメージングが可能なスペクトル範囲が分散によって制限される。

長年使用されてきた光学設計の分散特性を最小化する方法は、分散値(V数で定量化)と倍率が異なる2種類の材料を合体させて関心スペクトル内の少なくとも二つの波長で補正された良好な画像を生成するマッチドペアを定式化することである。設計に高次収差が導入されないようにV数が大きく異なる2種類の材料が最適な選択になる。

しかし、このアプローチは非常に広いスペクトル範囲を処理する光学系の場合には全く機能しない。材料の分散関数の非線形性が、広帯域の光学系における異常イメージングの主な原因の一つである。それは、多くの場合、コントロールが極めて困難な高次色収差または非線形残留色の形で顕在化する。この馴染みの薄い収差群は、制限されたスペクトル範囲の設計においてもほとんどの場合、厄介ものと見なされるが、設計スペクトル範囲が広くな

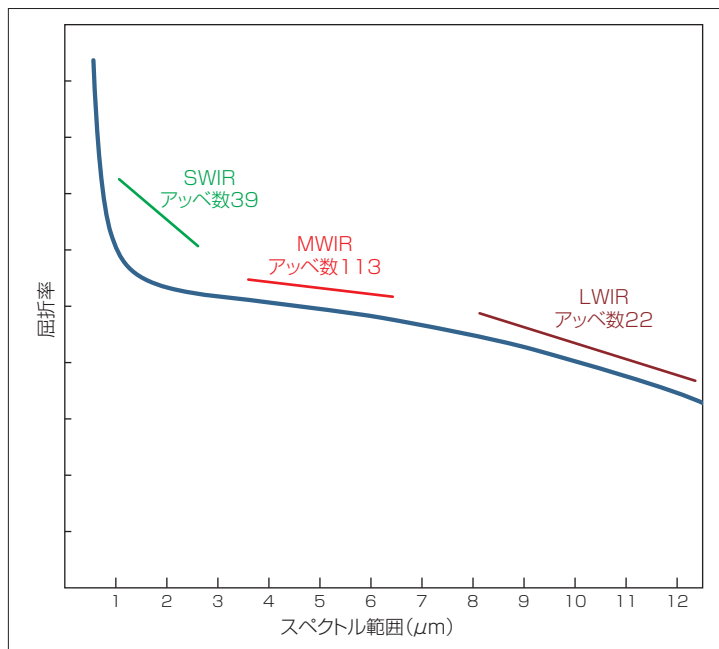


図1 硫化亜鉛 (ZnS)の屈折率におけるスペクトル変動はSWIR、MWIR、LWIRの各領域で非常に異なるV数(またはアッペ数)を示した。

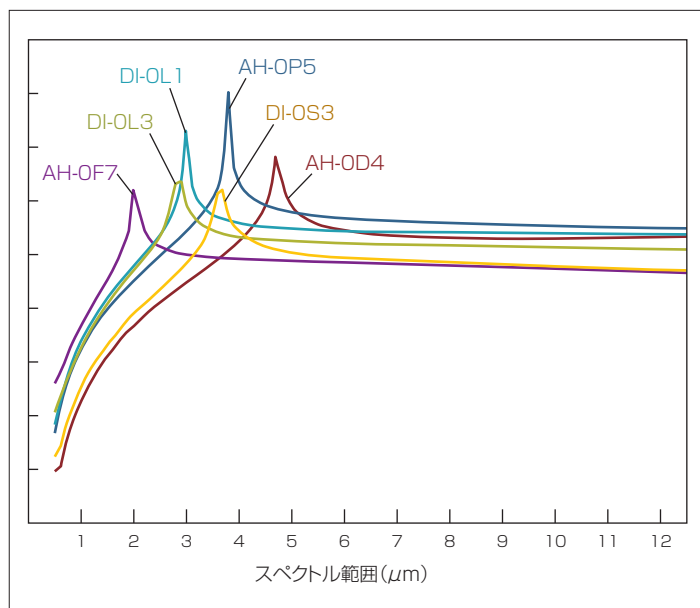


図2 0.5~12.5 μmのスペクトル範囲の分散応答を6種類の広帯域光学材料について示した。

の利用によって本当に実現できるか否かを明らかにするのに役立つだろう。線形多段階法は $n(\lambda_i)$ と $n(\lambda'_i)$ の組合せを使って分散の瞬間値とその相対的な変化率、すなわちスペクトル応答の偏導関数を計算する。

$$\sigma_n(\lambda_i) / \sigma\lambda_i$$

しかし、変動を解明する鍵は、この第1層を超えた二つ目の層、あるいは、これまでの段階を使用した上でさらに精密化する多段階法に注目して、スペクトル応答曲線に沿ったすべての点における2次偏導関数の値、つまり変動を計算することである。ここで、目的の増分はその材料の一般的な分散デルタと各増分段階 λ_{n+i} に対して予測されるその変化率は以下の式に基づく。

$$f'(\lambda) = \lim_{h \rightarrow 0} ([f(n(\lambda_{i+h})) - f(n(\lambda_i))] / h)$$

われわれが探しているものは、スペクトルエネルギーに対する材料の自然な共鳴または応答である。そのスペクトル応答と、分散スペクトルのすべてに自然な「周波数」を識別する能力によって、有限領域のいたるところで緩和され十分に補正されたアクロマティックな性能をもつ最も適した材料の組合せが選択できるようになる。さらに重要なことは、この能力が、解析のスペクトル帯域幅を単純に増大させるだけで、より広い帯域にわたってそのままの状態であり続ける能力に直接つながっていることだ。2階偏導関数の節点はいずれも分散の変動の最大化であり、そのようなものとして、アクロマティックにおいてその相補的材料と理想的に整合させるべきだ。

$$f''(\lambda) = \lim_{h \rightarrow 0} ([f'(n(\lambda_{i+h})) - f'(n(\lambda_i))] / h)$$

実のところ、このタイプの数学的解析は統計データの還元に変換都合が良

るとそれが一層厳しくなる。

水分を含まない硫化亜鉛、クリアトランの材料特性を考察しよう(図1)。三つの主要な関心スペクトル領域は約0.7~1.9 μmの短波長赤外(SWIR)、3.0~5.0 μmの中波長赤外(MWIR)、8.0~12 μmの長波長赤外(LWIR)である。これらの各サブ領域内で、伝統的なV数法で計算された変化率は、三つの明瞭に異なる勾配近似で示されるように、その挙動は1本の線からかなり逸脱することを示している。3領域のすべてに適切な材料の組合せを探すとすれば、設計者は、大きく異なるV数と同一の部分分散を同時にもつ二つの要素を整合させることが不可欠になる。二つの要素の共通分散応答からのいかなる逸脱も残留色、つまり画像コントラストと解像度の劣化につながる。三つの領域すべての橋渡しをするソリューションを見出そうというのであれば、設計者は適切な「クラウン-フロント」型の関係を再度維持しながら、各勾配がほとんど同じになるように整合させなければならない。

これは容易な業ではない。これらの

領域を横切って両方の領域を透過し、実用的な方法で製造できる材料の数に制限があるからだ。そのため、広いスペクトル領域にわたって非線形性、より具体的には分散の変動を互いに補償しあうことができる材料調製を識別する方法を見出すための斬新なアプローチが必要になる。

しかし、センサソリューションが体積と重量の最小化を目標に展開される場合のように、異なるバンドに対して異なる光学系に落ち着くことは一般に良いオプションとはいえない。無人の車両システムがその明らかな例である。

多段階法

従来のアクロマティック材料の識別法の限界を突破するには、一つのスペクトル領域における1種類の材料の分散問題にとどまらず、その変動についても研究する必要がある。これを実行するには、大まかな定式化を越えて、厳密な数学的処理によって分散特性を掘り下げる必要がある。例えば、数値法を使用した各種の解析は、発散性の強いスペクトルの補正が1種類の材料

く、1階導関数の前進差分方程式と密接に関係している。これと微分方程式中の導関数表現を置換する同様の定式を使うことによって、誤った推測につながる特定の状況において、予測のできない計算をする必要なく、その解の近似値を求めることができる。

コンパクトな画像融合システム

米スティンレイ・オプティクス社 (StingRay Optics) のエンジニアたちの研究によって、いくつかの広帯域な透明材料の分散応答性は、マルチスペクトル画像融合アプリケーションに利用できることが確認された(図2)。注目に値する重要なポイントは、この解析において互いに交差するいかなる二つの材料も、それらが交差スペクトル領域を通して移動する際に、その相補的役割における両極性を本質的に交換することである。これによって、そうした選択が誤ったものになり得る。さらに、高倍率の要素によって生じる高次収差を避けるためには、それらの個々の倍率を落とし、最終設計の物理幾何学が低歪みになるように規模と節点における差が最大になるような組合せを識別することが最も好ましい。これは、主に、分散特性の近い材料でアクロマティックソリューションを実現するには非常に急峻な曲率が必要になるという事実による。強く曲がった表面は高次収差から厳しい公差にいたる多数の問題を誘起し、そのすべてが光学系のコスト増加を導くであろう。

材料分散の非線形性を予測して、かつ抵抗し、その分散調和の位置を決定する厳密な数値法にしたがって材料の適切な組合せを識別する標準アプローチからは離れて、われわれは、可視から遠赤外(FIR)の広いスペクトル帯域と分離スペクトル帯域にわたって色彩バラ

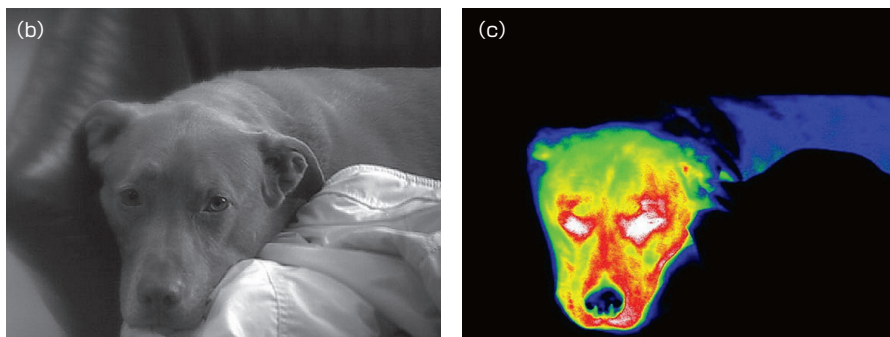
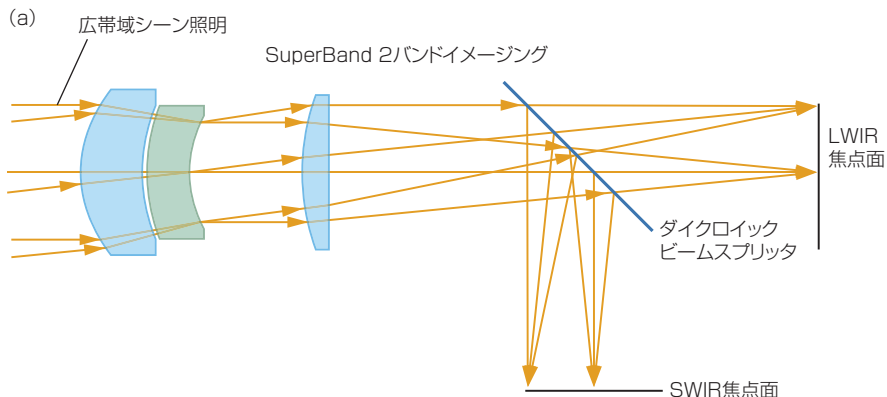


図3 SuperBand設計が二重検出器配置(a)において示されている。犬(ジュース)の画像で示されるように、このようなシステムの100mm、f/2.3バージョンの光学系はSWIR(b)とLWIR(c)を同時に処理することができる。(注:カメラが独立して設置されているため、いくぶん視差が存在する)

ンスのとれた最適手段として、Super-Band光学系(図3)を考案した。これは、画像融合プラットフォームの空間に対する要求と、パッケージのサイズと重量を低減するのに必要な手段を集積系に与える、これまで実現不可能であった光学系の製造を可能にする。さらに、斬新な積層型検出器技術の出現によっ

て、鮮明な画像を提供するために、このシステムを超広帯域の受像機にインタフェースさせることも容易である。さらに、このシステムでは、デュアルイメージングチャンネルまたは観測不能な反射イメージング光学系を使ったシステムに比べて、空間と重量の要求も控えめになり得る。

参考文献

- (1) W. Wolfe, "The Status and Needs of Infrared Optical Property Information for Optical Designers," Proc. SPIE(1990).
- (2) D. Dawes, "Sensor Fusion Payloads: The Key to Information Rich Imaging," Unmanned Systems(December 2009).
- (3) J. Nocedal and S.J. Wright, Numerical Optimization, Berlin/New York: Springer-Verlag(2006).
- (4) E. Suli, An Introduction to Numerical Analysis, Cambridge, England: Cambridge University Press(2003).
- (5) D. Malacara, Handbook of Lens Design, New York: Marcel Dekker(1994).
- (6) P. Klocek, Handbook of Infrared Optical Materials, New York: Marcel Dekker(1991).

著者紹介

クリストファー・アレクセイ(Christopher Alexay)はスティンレイ・オプティクス社のチーフ光学設計者である。e-mail:calexay@stingrayoptics.com