

レンズの設計と公差が イメージング性能に与える影響

ジェレミー・ゴヴィエ、グレッグ・ホローズ、カイル・ファイアストーン

イメージングシステムは、光学イメージングレンズ、マシンビジョンカメラ、照明源など、それ以外にも多数の要素で構成されており、そのそれぞれが、全体的なビジョンシステムの複雑さを高める要因となっている。

イメージングシステムの品質は、そのシステムが所定の用途に対してどれだけの性能を発揮するかで決まる。性能は、個々の構成要素と、それらの要素がどれだけうまく相互に作用するかに依存する。性能基準を確保するには、構成要素の仕様を、特定用途の要件に基づいて定義しなければならない。

イメージングシステムは、光学イメージングレンズ、マシンビジョンカメラ、照明源など、それ以外にも多数の

要素で構成されており、そのそれぞれが、全体的なビジョンシステムの複雑さを高める要因となっている。本稿では、その中から光学イメージングレンズを取り上げて、その設計と製造の課題について説明する。

光学設計性能

性能は、ある用途の具体的な要件に比べると、やや主観的なものだが、ビジョンシステムの最も基本的な性能指

標のうちの2つは、コントラストと解像度である。従ってレンズ性能は一般的に、変調伝達関数 (Modulation Transfer Function: MTF) という、空間周波数 (解像度) の関数としてのコントラスト比 (%) で規定される。図1は、MTF曲線の例である。

光学システムの性能には、開口サイズと波長に基づく基本的な限界が存在する。回折限界は、どのような光学システムでもそれ以上の物体細部は再現

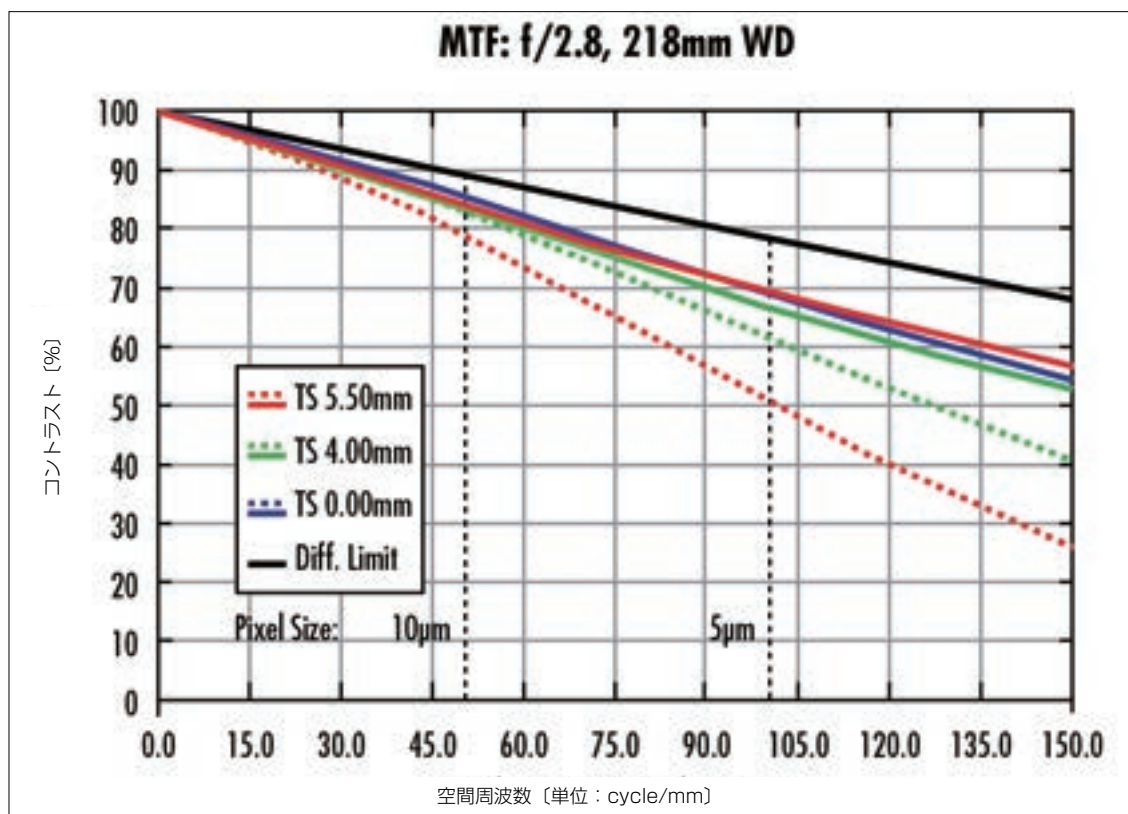


図1 このMTF曲線は、イメージングレンズの理論的な光学性能であるレンズのコントラストが、空間周波数の関数として表せることを示している

f/#	回折限界解像度	被写界深度	光スルーブット	開口数
↑ ↓	↓ ↑	↑ ↓	↓ ↑	↓ ↑

表1 レンズのF値(f/#)設定が大きいほど、回折限界解像度は低下し、被写界深度は増加し、全体的な光スルーブットは低くなる。その逆も成立する(図と表はすべてエドモンド・オプティクス社提供)

できないという能力の限界である。寸法長の単位で表されるこの細部の大きさは、解像度に反比例する(つまり、解像度の逆数)。解像度は、特定のコントラスト比における1ミリあたりのコントラスト周期(黒と白のラインペア)の数(単位:lp/mm)で表される。

前述のとおり、イメージング性能は、必ずしもMTFだけで決まるものではない。しかし、その他のほとんどのレンズ要件は、MTFと、F値(f/#)の開口設定などの他のいくつかのレンズ属性または設定の組み合わせに、直接的に関連づけることができる。

製造性考慮設計 (Design For Manufacturability:DFM)

レンズ設計には、大まかに言って理想的でないばかりか、製造/組み込み/試験や、対象用途への搭載さえも不可能になり得る方法が、多数存在する。レンズ設計ソフトウェアは、非常に強力なツールだが、細部に対する慎重な配慮や、光学製造固有の微妙な差異に関する考察が不要になるというわけではない。レンズを適切に設計するには、製造公差に細心の注意を払う必要がある。設計プロセスで公差の予測とモデル化を行うための分析的及び統計的手

法は、組み立てプロセスでそれらを制御するために役立つ手段である。

ガラスの公差

屈折率と分散(アッベ数)は、レンズによっても製造ロットによってもまちまちとなる。その差は小さいものの、設計の性能に影響を与える可能性があるため、レンズ設計の公差において適切にモデル化する必要がある。屈折率の小さな差は、焦点や、球面収差やコマ収差などの収差に影響を与える可能性があり、アッベ数の差は、横方向と軸方向の両方の色補正に影響を与えることになる。

ウェッジ、ロール、チルト、ディセクター

レンズ設計を構成する個々の光学面、素子、光学機械部品について、公差に寄与する多くの項目を考察しなければならない。図2に示すように、光学素子の2つの主要面の間には、いくらかのウェッジが存在する。ウェッジは、角度単位(通常は分単位)で表され、一方の面に対するもう一方の面の傾きと考えることができる。この角度は、以下の式のように、中心厚の長さの差をクリアアパーチャの直径で割ることによって、計算できる。

$$\omega = \tan^{-1} \left| \frac{\Delta CT}{CA} \right|$$

ここで、 ω はウェッジ角、 ΔCT は中心厚の最大値と最小値の差、 CA は球面レンズのクリアアパーチャの直径である。

素子のロールとディセクター(偏心)は、サブアセンブリにおける後続の素子に影響を与える可能性がある因子である。ロールはウェッジと同様に、公称配置からの素子の傾きを表している。ただしロールは、1つの面に対する素子全体の傾きである。

図3aは、隣接するスペーサーとの球面の接触方法が原因で、素子にロールが生じている様子を示している。このロールは、角度の偏向に加えて、上方向とバレルに向かう方向の線形シフトとして現れる。この光学素子に、プラノ面(度の入っていない面)、または、図3cのように平らに接地する円環部分が存在する場合は、この素子に生じるのはディセクターのみとなる。ロールまたはディセクターが生じている素子の形状と、後続の結合素子によっては、公称方向からのさらなるシフトが生じる可能性がある。

光学設計ソフトウェアにおけるウェッジ、ロール、ディセクターの公差のモデル化は、モンテカルロシミュレーション

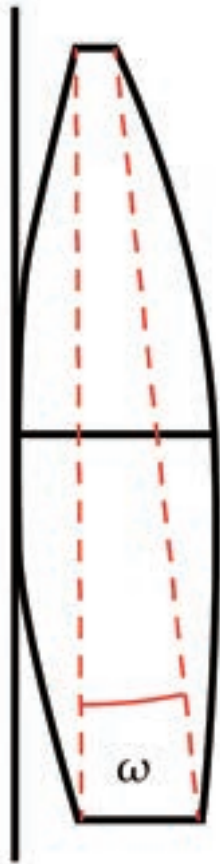


図2 2つの面の間にウェッジが存在する、単一のレンズ素子

ンによって、各素子または素子集合に対して、ディセクターと角度の動き(チルト、傾き)の量を変更することにより、行われる。これらのシミュレーションでは、すべての角度は十分に小さく、小角度近似が有効であると仮定される。角度にずれがある球面光学素子の場合、球面形状の対称性から、ウェッジからの表面の傾きとロールからの表面の傾きは区別できない。素子毎に、2つの面のうちの一方の面(通常は、固定シートに近い方の面)を固定してもう一方を傾ける。マウント(取り付け)に起因するウェッジとロールからのチルトの両方が、個別に公差モデルに追加される。

公称動作からのこれらのずれは、そ

れぞれ個別に性能と画質を損なうほどの影響を与えるとともに、それらの影響は複合的にも作用する。ここで、熟練した設計者は、全体的な光学性能を考慮して、ある程度のチルトまたはディセクターを、事前に前方の素子に意図的に設けて、設計の下流工程における素子や素子集合に対するチルトやディセクターの影響を補償する場合があることに、注意することが重要である。

公差がある中での製造性考慮設計

アセンブリの設計に影響を与え得る、このようなさまざまな種類の公差がある中で、光学設計者やメーカーが、許容できる歩留まりで確実かつ適切に製造を行うためのいくつかの方法が存在する。最初の方法は、公差の影響を受けにくいように、設計の感度を低減することである。

設計の感度を低減する

公差に対する感度が低い光学設計は一般的に、複雑な部品や特殊部品の少ない、かなりシンプルな設計である。従って、確実に繰り返し製造することがより簡単で、歩留まりも高くなる。複雑さが低いということは、直接的な設計対象ではないシステムに搭載するのは難しいことを意味する。設計ソフトウェアの最適化ツールがソリューションとして提示する設計は、構築完了時に最高性能を発揮する設計と同じではない場合が多い。公差がある中で最大限の性能を発揮する、感度を低減した設計へと最適化するために設計者が利用できる、多くの手段が存在する。例えば、レンズ設計ソフトウェアに組み込まれた最適化ツールを使用したり、ブレのある素子に設定を追加して敏感な公差に配慮して設計を行った

り、面の屈折と収差に制約を設けたりすることができる。これらの手段はすべて、設計全体の屈折動作を全素子の間でバランス化することにより、単一の素子が問題点にならないようにすることを目的としている。そうすることで、公差に起因して設計にブレが生じる場合に、システムレベルの性能に与える深刻な影響が緩和される。

公差を縮小する

公差の影響に対する感度をこれ以上低減できないという場合、次の選択肢は、公差仕様を厳しくすることである。部品の公差を縮小する方法は、主に2つある。1つめは、製造ロットの中で、必要品質によるふるい分けを行い、要件を満たさない部品を廃棄することである。この方法は通常、製造部品の品質の信頼性が、統計分布によって適切にモデル化されている場合に、より有効である。例えば、一般的な自動センタリング処理により、ほぼすべての製造部品でビーム偏向は1分以下になる。しかし、それらの部品のうちの何パーセントかは、0.5分のビーム偏向を満たす可能性がある。80%の部品が0.5分のビーム偏向を満たす場合、残り20%の部品(廃棄部品)のコストは、顧客に転嫁されることになる。

公差を縮小するための2つめの方法は、製造プロセスまたはプロセス条件を変更することである。メーカーには、より高性能な装置や特殊な装置が必要になる可能性がある。しかし、この装置のコストだけでなく、それを維持及び運用するためのコストも、非常に高額である。これらのコストの増分も、顧客に転嫁されることになる。

公差の補償

設計の感度の低減や公差の縮小がで

きない場合は、フィードバック機構を採用する製造方法を適用して、それらの公差の影響を補償することができる。アクティブアライメントは、光学素子をアセンブリしながらアライメントするためのアクセスホールが付いた、特殊なバレルアセンブリを使用するアセンブリ手法である。アクティブアライメントにおいて、公差の影響を緩和するための方法は、主に2つある。1つめは、アセンブリ技術者が、アセンブリ全体のチルトやディセクターをできるだけ低減することである。しかしこの方法には、アセンブリ時間が長くなり、各素子の製造精度によって制約されるという問題がある。もう1つの方法は、事前にある程度設計柔軟性を組み込んだ上で、アクティブアライメントを適用することである。性能指標をモニタリングしながら上流部品を調整することにより、設計の下流工程における公差が緩和される可能性がある。

例えば、素子の厚み、半径、屈折率、機械的な配置公差によって、理想的な公称焦点位置にずれが生じる。設計者は、MTFの形で画質を測定しつつ、最後の素子とセンサの間の空隙を調整することにより、それらの誤差を補償できる可能性がある。しかし、チルトとディセクターには、焦点補償よりも複雑な補償が必要である。性能を比較しながら、素子または素子集合のチルトやディセクターを調整することにより、システム内の他のすべてのチルトとディセクターを補償することができる。調整された素子または素子集合のディセクターは、意図的に通常よりも大きくなっている可能性がある。しかし、システムの全体性能の観点で見ると、このディセクターは、他のすべての誤差を補正する最良の位置である可能性がある。この方法は、どのような

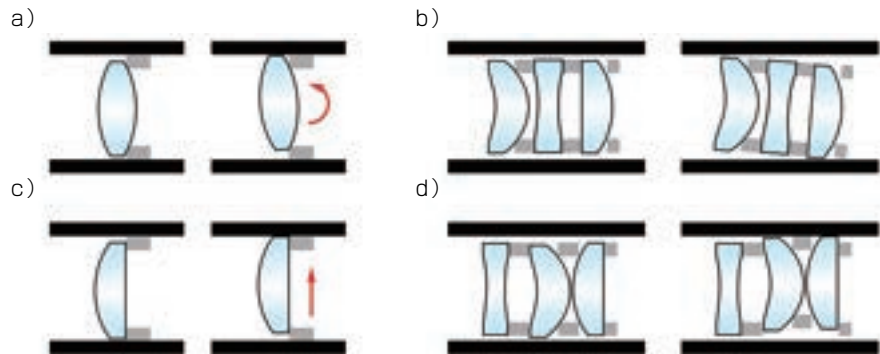


図3 a) レンズ素子のロールの動き。b) 結合されたロールの動き。c) レンズ素子のディセクターの動き。d) 結合されたディセクターの動き

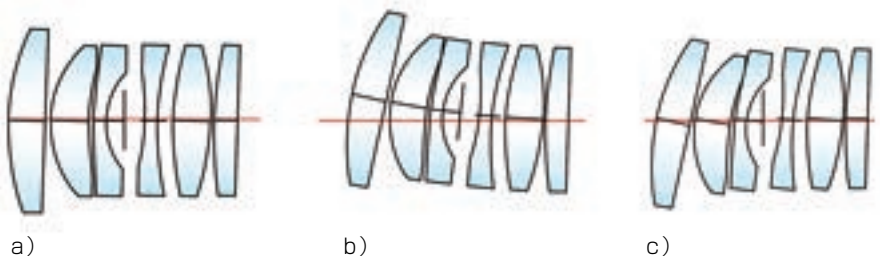


図4 結合アセンブリにおけるレンズ素子の傾きに対する3つのアプローチ。違いを示すために、すべての素子が同じ方向に2°傾けられている。a) チルトは個別にモデル化されている。b) チルトとディセクターは、アセンブリ順に累積される。c) チルトはアセンブリ順に累積されるが、ディセクターの追加はない。この動きをせん断と呼ぶ

場合にも対応するソリューションではないため、必ずうまくいくとは限らない。

結論

イメージングレンズの性能には、いくつかの主要な定義方法が存在する。しかし、ほとんどの設計者、メーカー、エンドユーザーが、コントラストを解像度の関数で表したMTFによって、この性能を規定する。非常に複雑な光学設計を採用する高性能イメージングレンズを製造可能にするには、かなりの時間と労力に加えて、多くの場合でコストをかけて、製造プロセスの設計

と計画を行う必要がある。これは、量産の場合は特に難しい可能性がある。複雑な設計は、光学素子の作製とアセンブリに、非標準的で非常に高度な製造手法が必要になるためである。すべての構成部品を製造した後も、個々の部品のレベルとアセンブリ全体のレベルの両方で、公差の影響とその緩和策について考察し、それらのバランス化を図って、全体的な性能仕様を満たす必要がある。このような理由から、必要な性能仕様を正確に理解することが、エンドユーザーとインテグレータにとって不可欠である。

著者紹介

ジェレミー・ゴヴィエ(Jeremy Govier)は、米エドモンド・オプティクス社(Edmund Optics)のシニア・プリンシパル・エンジニア、グレッグ・ホロズ(Greg Hollows)は、同社製品戦略及び新製品開発担当副社長、カイル・ファイアストーン(Kyle Firestone)は、同社テクニカルマーケティングエンジニア。URL: www.edmundoptics.com