

最新高精度レンズを実現する、 レンズ設計ソフトウェア

ジョン・ウォレス

数十年間に及ぶ開発によって機能が拡大した最新の光学設計ソフトウェアは、複雑な光学システムのモデル化、最適化、公差解析を簡単に行うことができる。

レンズ設計ソフトウェアが登場する前にも、高度な光学システムが定期的に設計されていたというのは事実である。卓越した機能を備える顕微鏡、望遠鏡、カメラレンズ、その他の光学部品も、手計算に基づいて設計され、その目的を支えてきた。しかし今、レンズ設計者はコンピュータによる高速演算を利用して、非常に複雑な光学システムに対する最適化されたソリューションを見つけ出すことができる。ガラス、製造方法、機械的欠陥の影響を精密なレベルで考慮に入れて、素子数を減らすために非球面を追加したり、対象領域を広げたりするなど、メリット

を簡単に追加することができる。その結果、今では熟練したレンズ設計者が熟練した光学部品製造者と緊密に連携して、スマートフォンカメラ、軍用赤外 (IR) イメージング、コンピュータのチップ製造、拡張現実／仮想現実 (AR/VR) など、さまざまな目的に向けた高精度な光学部品を製造するようになっている。

一般的な光学設計ソフトウェアパッケージでは、レイトレーシング (スポットダイアグラムを視覚的要素とする) や、波形に基づく物理光学計算 (回折パターンを視覚的要素とする) によって、光学システムをモデル化すること

ができる。後者のほうが、必要となる演算量が多い。イメージングレンズ設計ソフトウェアには、非イメージングの光学設計ソフトウェアや統合型 CAD/CAM プログラムなど、無数の派生形が存在し、その一部またはすべてが、元のソフトウェアパッケージに組み込まれている場合もある。本稿では、現在商用提供されている、レンズ設計ソフトウェアパッケージをいくつか取り上げ、その背景を少し紹介したいと思う。

高度なレイトレーシング

OSLO (Optics Software for Layout and Optimization : レイアウトと最適化のための光学ソフトウェア) は、ミラムダ・リサーチ・コーポレーション社 (Lambda Research Corporation) が開発した光学設計ソフトウェアで、多種多様な光学システムの設計と解析を支援するものである。同社社長のエド・フレニエール氏 (Ed Freniere) が説明するように、このプログラムの中核にあるのは、幾何学及び物理光学のモデリング機能を備えるシーケンシャルな光線追跡エンジンである。「OSLOには、単純なものから複雑なものまで、あらゆるイメージングシステムを設計するための、多数のローカル及びグローバルな最適化手法が含まれている」と、フレニエール氏は述べた。「OSLOには、

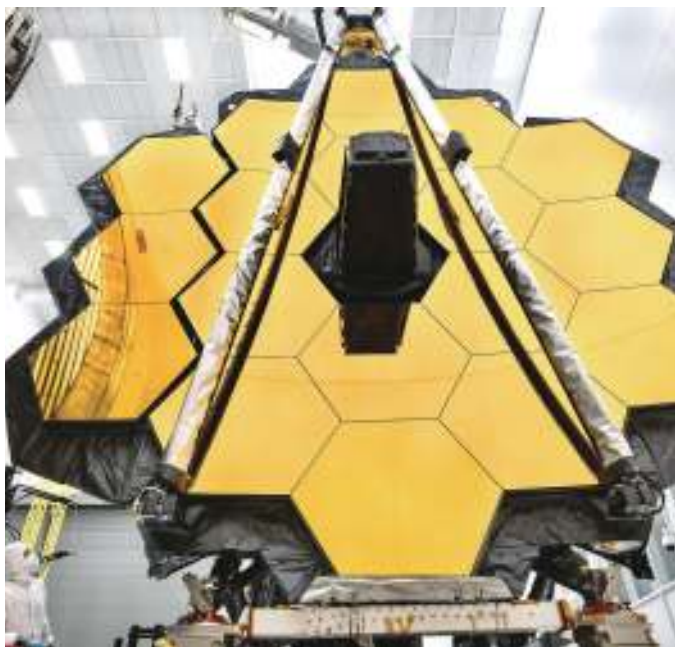


図1 ラムダ・リサーチ・コーポレーション社のOSLOは、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) の設計と解析に用いられた。(画像提供: NASA)

公差を解析してシミュレーションする機能と、さまざまな表面交差機能を必要とするシステム向けのノンシーケンシャルな光線追跡解析カーネルが組み込まれている。OSLOはオープンアーキテクチャで柔軟性が非常に高く、膨大な数の表面タイプと最適化ターゲットを含む。また、データの生成と解析のための高速マクロ言語と完全統合型のコンパイル済みプログラミング言語も備える」。

フレニエール氏によると、OSLOの基本的な強みは、高度なレイトレーシングにあるという。それは、追跡効率が最重要要件となるズームシステムの設計のカギを握る要素である。例えば、300:1のズームレンズの設計開発において、この機能が重要だったと同氏は付け加えた。OSLOの光線追跡効率は、フォトリソグラフィレンズなど、多数の光線を必要とするシステムの設計と解析にも役立っている。OSLOにはアパーチャ関数が組み込まれており、ジェイムズ・ウェッブ宇宙望遠鏡 (James Webb Space Telescope) を含む、セグメントミラーシステムの設計とモデル化に利用されている (図1)。このソフトウェアパッケージには、座標変換と非球面の機能も、3ミラーアナスタグマートなどの軸外システムや公差解析を格段に簡素化する最適化とともに搭載されていると、フレニエール氏は述べた。

CADの統合

米ゼマックス社 (Zemax) が開発した「OpticStudio」は、光学部品、サブアセンブリ、システム全体の解析、設計、最適化、公差解析に用いられている。イメージングと非イメージング (照射と照明) の両方のシステムのシミュレーションが可能だ。OpticStudioは、シ

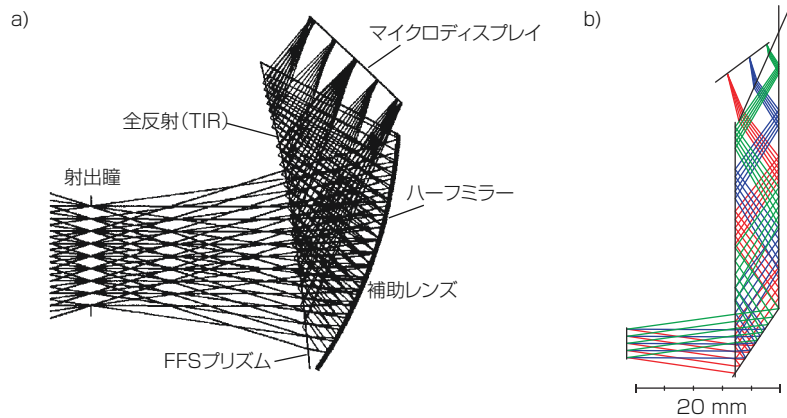


図2 (a)はフリーフォーム光学部品を用いた光学透過型ヘッドマウントディスプレイ設計、(b)は回折光学部品を用いたヘッドセット設計。(提供:ゼマックス社)

ステムのモデル化機能を中心に構築されている。システム内の光学部品はシステム内を伝搬する光の波長よりもはるかに大きいので、幾何学的光線として光をモデル化してよいという、幾何学的な光学部品が満たす条件が仮定されている。ただし、(フーリエやホイヘンスの理論に基づく)回折ベースの計算をサポートしており、多くの用途(レ

ーザ走査やファイバ結合など)に対して有効な、(フレネルとフラウンホーファーの原理を用いた)自由空間のコヒーレントな光伝搬のモデル化も可能である。マイクロ光学部品がそれよりも大きなマクロスコピック (巨視的) な光学システムに含まれる場合 (ARヘッドセットに含まれる表面レリーフ格子など) の特性評価のサポートも、最近追



図3 OpticStudioでモデル化されたあるARヘッドセット光学設計では、ホログラム結合光を導波路に入射し、光をディスプレイから目まで伝搬する。この図は、入力画像(挿入図)、導波路の効率を無視した場合(a)、考慮した場合(b)を示している。より現実的な計算によって画像の結果は悪化するが、再度最適化することによって、所望の高品質画像(c)が生成される。(提供:ゼマックス社)

加されている。

与えられた設計に対する初期設定と解析以外にも、OpticStudioは、システムのパラメータを最適化して、その設計から最大限の組み立て後性能を引き出すことができる。最近追加された機能によって、表面ジオメトリを記述するために用いられる離散データの最適化も可能になり、フリーフォーム設計の柔軟性がさらに高まっている。組み立て後性能の検証は、堅牢な公差解析によって行われる。摂動がシステム性能に与える影響の特性評価を行うことにより、設計の製造と組み立て時にその摂動を補償することができる。ゼマックス社のエンジニアによると、製造歩留まりを早い段階でだまかに予測して、設計過程で使用できるようにする機能が、まもなく提供されるという。

光学設計を終えたら、「Optics Builder」を用いた光学機械パッケージング及びアセンブリのコンピュータ支援設計(Computer Aided Design : CAD)に移ることができる。Optics Builderでは、光学モデルのジオメトリを自動的にCADプラットフォーム上に正確に再現することができる。光学部品はスタティックなCAD部品としてではなく、ネイティブなCADオブジェクトとして取り込まれる。現時点で「Solid Works」と「Creo Parametric」のCADプログラムをサポートするこのツールは、OpticStudioで提供されているのと同じ光線追跡エンジンを使用するため、光学機械アセンブリ全体の光学性能をCADで直接解析することも可能である。従って、機械パッケージとアセンブリの影響を、光学機械系を定義したパッケージ内で直接モデル化することができる。システムを製造する準備が整えば、OpticsBuilderは、光学モデルと機械モデルから必要なデータ

を引き出して、自動的に製造図面を作成する機能も備えている。

OpticStudioを使用する興味深い例が、AR/VRヘッドセットのディスプレイの設計である。現在の設計は、フリーフォーム光学部品と回折光学部品という2つの競合する技術に基づいている。米国特許2014/0009845 A1に基づく、フリーフォーム光学部品を用いた光学透過型ヘッドマウントディスプレイ(Optical See-Through Head-Mounted Display : OST-HMD)設計の例を、図2(a)に示す。このシステムの主要な光学部品は、フリーフォームプリズムである。このプリズムを完全に表現するには3Dモデルが必要だが、プリズムの光線追跡特性は、OpticStudioの表面ベースのシーケンシャルモードで、座標ブレイク(Coordinate Breaks)を用いて正確に特性評価することができる。これを行うことにより、このモデルの高速な設定、設計、最適化、公差解析が可能である。このシーケンシャルモデルをその後、OpticStudioのノンシーケンシャルモードに移して、迷光や散乱がシステム性能に与える影響の特性評価を含む、完全な3D解析を行うことができる。シーケンシャルモデルであってもノンシーケンシャルモデルであっても、Optics Builderを用いた光学機械パッケージングに向けて、CADに直接転送することができる。

この事例におけるプリズム表面のジオメトリは、さまざまなパラメータを使用して記述することができるが、グリッド・サグ(Grid Sag)面という形式の離散データを使用して記述することも可能である。OpticStudioの複数の構成モデリングを使用して、OST-HMDの透過・投影経路を同時に最適化して設計することができる。

回折光学部品を用いたヘッドセット設計例を、図2(b)に示す。この設計には、ホログラム結合光を導波路に入射して、光をディスプレイから目まで伝搬する構造が含まれている。OpticStudioは、理想化されたホログラムと現実的なホログラムをモデル化することができる(後者は、同ソフトウェアによって光学的に作製されたホログラム面を使用する)。ここでも、シーケンシャルモードで座標ブレイクを使用してモデルを作成することにより、完全な3Dジオメトリを模倣することができる。モデルの物理的ジオメトリを確保するために、OpticStudioのメリット・ファンクション・エディタ(Merit Function Editor)で提供されている境界制約も使用される。続いて、コーゲルニックの理論に基づく計算によって、導波路の機能領域及び光源偏光としての効率を算出し、それらの入力条件に対して設計を最適化することができる。図3は、導波路の効率を無視した場合と考慮に入れた場合の例を示している。OpticStudioは、厳密結合波解析(Rigorous Coupled Wave Analysis : RCWA)を用いた回折部品のモデル化もサポートする。

非球面とする表面の選択

米シノプシス社(Synopsys)の「CODE V」は、イメージ形成システムのモデル化と解析に用いられる光学設計・計算工学パッケージである。CODE Vによってエンジニアは、最大限の性能と製造可能性が得られるように、光学システムを設計及び最適化することができる。例えば、CODE Vの最適化時に公差感度を抑制して、最も製造しやすく最も製造歩留まりが高い設計を生成することができる。

「CODE Vが光学設計の課題の解決

レーザー技術の進歩と共に50年
レーザー・光技術の
ソリューションプロバイダ



レーザー光源



光計測器・測定器



光学関連部品・光周辺機器



検査装置・
イメージング機器



加工装置



光技術に関するご相談は

<https://www.japanlaser.co.jp/>

E-mail: jlc@japanlaser.co.jp



本社 〒169-0051 東京都新宿区西早稲田2-14-1

TEL: 03-5285-0861

大阪支店 TEL: 06-6323-7286

名古屋支店 TEL: 052-205-9711

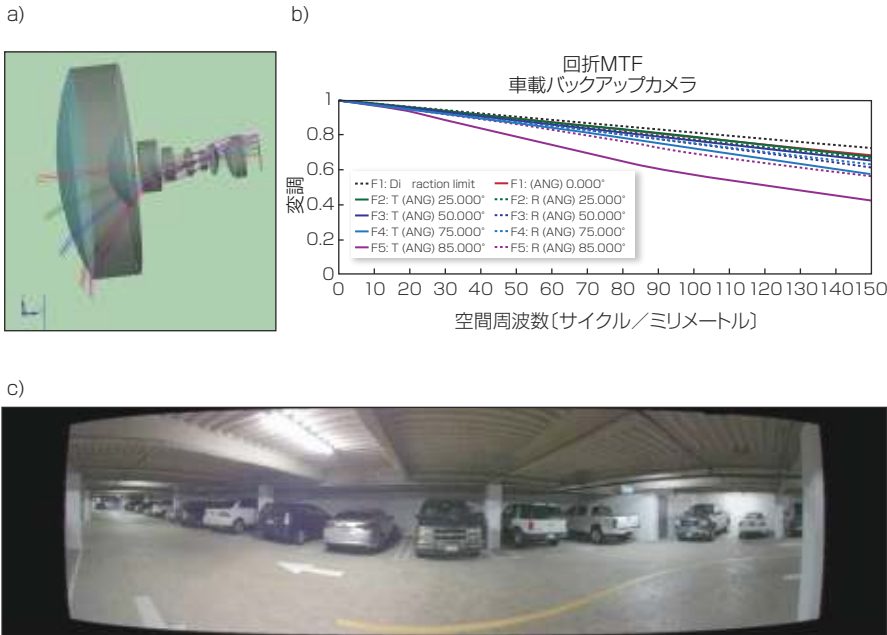


図4 (a)は、成形ガラス製の広視野車載バックアップカメラ設計のCODE Vによる3Dビュー。(b)は、公称バックアップカメラ設計の変調伝達関数 (MTF)。(c)は、バックアップカメラ設計の性能を現実的に表現した、CODE Vによる画像シミュレーション。(提供:シノプシス社)

に役立つ1つの例として、コンパクトな車載バックアップカメラの複雑な性能・製造要件を考えると、CODE V シニアカスタマーアプリケーションエンジニアのマット・ノヴァック氏 (Matt Novak) は述べた。同氏によると、それらのカメラモジュールは量産されており、ほとんどあるいは全く調整することなく簡単に組み立てられる必要があるという。また、広い視野を備え、コンパクトなパッケージに収容されるにもかかわらず、卓越したイメージング性能が必要で、製造と組み立ての公差も考慮に入れる必要がある。

「CODE Vは、バックアップカメラの実用的な設計を構築するための強力な最適化エンジンと、Asphere Expert や Glass Expert といった、専門的なエンジニアリング機能を内蔵するツールを、設計者に提供する」とノヴァック氏は述べた。図4に示す設計例において、Asphere Expertは、光学収差補正を改善するために非球面として製

造するのが最も有効な2つの表面を特定している。Glass Expertは、色収差補正を最大化するための成形用ガラスの最適なセットを選択している。

Asphere Expert と Glass Expert によって、パッケージと性能の要件を満たす最終設計を実現し、簡単に入手可能で費用対効果の高い材料を使用し、傾斜や球面からの隔たり (aspheric departure) に関する製造ベストプラクティスに従って非球面を制御することができるようになっている。

初心者設計者のためのソフトウェア

最大限にメリットを享受するにはエキスパートレベルの知識が必要な、大規模で複雑なソフトウェアパッケージとは対照的に、米エクセリタス・テクノロジー社 (Excelitas Technologies) が提供する「Winlens」というレンズ設計プログラムはそれよりも小規模で、経験の浅い学生やエンジニアを

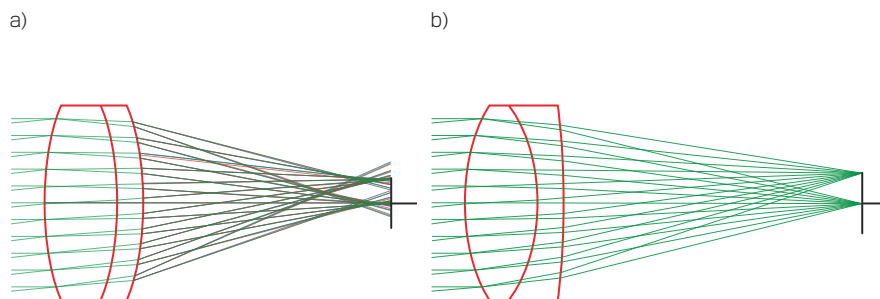


図5 Winlensによるダブルレットの最適化例。(a)は最適化前、(b)は最適化後を示している。(提供:エクセリタス社)

ターゲットとしている。このソフトウェアの歴史は長い。「WinLens v1」が開発されたのは、DOSからWindows 3への移行があった時期である。「当時、かなりの数の非常に高性能なレンズ設計プログラムがメインフレームまたはDOS上で提供されていたが、ユーザーフレンドリーではなかった。操作には全く柔軟性がなく、グラフィックスは特別で贅沢な機能だったため、かなり数字指向だった」と、エクセリタス社でカタログ製品マネージャーを務めるパトリック・ジャナセック氏(Patrick Janassek)は述べた。「フルタイムのレンズ設計者でなければ、使いこなすことはできなかった。部品を回転させるといった、簡単であるべき操作が非常に難しく、その要素に含まれる各表面とガラスを手作業で編集する必要があった」。

ジャナセック氏によると、Windows 3や新しいソフトウェア開発ツールによって、フルタイムの設計者向けの専門的なツールを提供しつつ、新しい学生や光学エンジニアがついていけるような、それとは異なるはるかに柔軟性の高い手順が用意されるようになったという。「学生や講師が、単純なシステムを簡単に設定して微調整すること

により、直ちに効果を確認したり、意味のある形で光学データを表示したりできることが重要だった。例えば、より有意義な形でレンズのデータや計算結果の表示である。それまでは、光学ガラスデータは、屈折率や透過率の表が数多く掲載された大きなカタログにしか載っていなかったが、それをグラフィカルに、また、非標準的な波長帯で表示する機会を、Windowsはもたらした」と同氏は述べた。

スピンドラー & ホイヤー社(Spindler & Hoyer)の「Microbench」(現在は「LINOS Microbench」)が登場したのもその頃である。複雑な光学設定用の高精度光学ケージシステムである同製品では、シングレットやダブルレットなどのあらゆる種類の光学部品が提供されており、それらの設計データが利用可能だった。そうした条件が揃ったことで、エクセリタス社は、LINOS Microbenchの部品からなるシステムを、ユーザーが部品番号だけを用いてモックアップして、完全なカスタム光学部品や2つのタイプの組み合わせをモデル化し、編集、解析、比較といったシンプルな作業を簡単に実行して、知見や理解を得ることのできるプログラムを

開発した。最初の製品であるWinLens v1は非常に機能が限られたもので、中心に配置されたLINOS Microbenchレンズにしか対応していなかった。

バージョン2では、ユーザーが独自のレンズやミラーを定義して、カスタムシステムを解析できるようになった。年月を重ねて同プログラムは、大小さまざまな方法で改良されている。透過率計算、ズーム、システム最適化(図5)、ゴースト解析、チルトや偏芯などの3D機能、ガウシアンビーム計算、カスタムコーティング、編集ツール、ブックマーク、比較のためのグラフの複数コピーなどだ。特に注力したのがガラス選択ツールの追加で、最終的には、カスタマイズ可能でインタラクティブなガラスプロットが提供されている。

「目的は常に、最先端光学部品を扱うことではなく、顧客にとって良好でユーザーフレンドリーなツールを提供することだった。研究開発チームに所属する設計者向けの特殊ツールを作成する場合でも、そのツールを経験の浅いユーザーにとっても柔軟で使いやすいものにするに、特別な配慮を払った」とジャナセック氏は述べた。

エクセリタス社は常に、無料版として「WinLens3DBasic」を提供してきた。こちらは、大学において光学教育や基礎的な光学設計に広く利用されている。このプログラムには、最適化やゴースト解析はないが、それ以外の機能はすべて搭載されている。「WinLens3D」も無料版のWinLens3DBasicも、教育用に大学で使用されている他、光学設計や試験用に企業で使用されている。このプロフェッショナルスイートには、ISO10100の図面付きの公差解析プログラムや、「Glass Manager」と「Material Editor」の各プログラムも含まれている。