鏡筒光学製品における統計的公差設計システムの開発(第3報)*

—光学性能評価を目的とした鏡筒光学製品モデルの提案—

佐々木豊春** 黒田陽子*** 田中文基† 岸浪建史†

Development of Statistical Tolerancing for Optical Products (3rd Report)
- Proposal of Product Model of SLR Lens for Optical Performance Estimation -

Toyoharu SASAKI, Yohko KURODA, Fumiki TANAKA and Takeshi KISHINAMI

Determination of tolerances is very important during product manufacturing in order to maintain low cost while achieving a consistent level of product performance. The purpose of this study was the improvement of productivity of optical products like as SLR lens. Therefore this study had proposed the "Virtual PT System" concept as a method to realize the suitable tolerancing for optical products and realized this system. According to this concept, this report proposes the new product model of SLR lens to evaluate the optical performance in real product condition. The proposed SLR lens model can represent uniquely the position and orientation of all parts as relationship of coordinate transformation. And also, this model can represent the mechanical structure with both manufacturing error and assembling error by same manner. Using this SLR lens model, the designer can easily obtain the both lens surfaces decentering amount and optical performance on real product condition precisely.

Key word: product model, optics, tolerance, manufacturing error, assembling error, computer simulation, virtual production.

1. は じ め に

一般に、公差は「組立可能性」を保証するための、設計値に対する許容幅として理解されている。ところが、カメラの交換レンズに代表される「鏡筒光学製品」では、公差は「組立可能性」の保証のみならず、光学機能面（レンズ面）の空間上での位置と姿勢を、光学機能面の空間配置状態によって決定される仮想的な理想光軸に対して、 μm 単位で維持できることも保証しなければならない。これが光学製品での公差決定を困難にしている理由の一つである。

本研究は鏡筒光学製品の生産性向上のために、設計段階で量産時の光学性能・量産性・公差感度を定量評価可能な方法の提案ならびにシステムの開発を目的とするものである。そして、このシステムによって、鏡筒光学製品の公差設計をより効率的かつ適切に実施可能とするものである。

前報^{1), 2)}までの研究により、設計段階において量産性と量産性能を定量評価（予測）し、より適切な公差設計を実現するための方法として「仮想量産試作システム（Virtual PT System）」を提案した。そして、提案に基づく量産シミュレーション・システムならびに複合感度解析システムを実現し、実測値との比較によるシステムの信頼性検証までを報告した。

実現した仮想量産試作システムでは、光学性能の計算に一般の光学設計システム（ソフトウェア）をそのまま利用している。通常、光学設計システムは光学パラメータの設計と、光学性能の評価を主目的としているため、そのデータ表現モデルには、「構造物」としての概念や物体構造に関する情報をほとんど持

っていない。そのため、構造物の位置・姿勢などは、直接的に考慮できない仕組みになっている。従って、これらの情報は他の機構系システムなどを用いて計算し、その結果を光学計算に変換・転用するという方法を取らざるを得なかった。

本研究では、現在の光学設計システムが持つ「光学モデル」の問題点を解決し、公差が量産時の製品（光学）性能に与える影響を統計的かつ定量的に評価するために、光学製品に適した「鏡筒光学製品の統計公差モデル」を提案するものである。

機械系分野において従来行われてきた公差モデルの研究としては、乾⁷⁾が公差の幾何学的な意味をソリッドモデリング技術でモデル化した研究や、公差モデルやソリッドモデルに基づいて、公差の機能に及ぼす影響の解析を試みた研究を紹介している。また、乾は^{8), 9)}可変形体モデルを提案し、「独立の原則」を満足する公差表現モデルを提案している。

海外では Fleming¹⁰⁾が組立部品における公差の累積を、公差域による位置拘束不等式の代数処理で求める方法を提案している。Rajneet と Turner¹¹⁾は、誤差量の小さい範囲において、誤差を持った部品の組立状態における位置や姿勢を、最適化手法で数学的に求める方法を提案している。また、Swami と Turner¹²⁾は、統計的な方法による公差解析方法やシステムの調査を行い、統計的公差解析システムの方向性を報告している¹²⁾。さらに、Whitney¹³⁾らは、統計的公差解析において、誤差による機能面の幾何学的な変動を座標変換によって表現する方法を提案している。また、最近では Laperriere¹⁴⁾らが、公差域を伴った接合関係を、仮想的なジョイントの連鎖で表現する方法を提案し、公差と各部品の位置や姿勢などの機能的関係を数学的に表現する方法を報告している。

本研究で提案するモデルは、従来研究されてきた公差モデルと異なり、公差による機構運動やその過程の表現をする必要はなく、最終的な安定状態における状態表現と、その状態の誤差によるバラツキを厳密に表現できればよい。また、その際に誤

* 原稿受付 平成 11 年 7 月 7 日

** 正 会 員 (株)ニコン (東京都品川区西大井 1-6-3)

*** (株)東芝 (深谷市播磨町 1-9-2)

† 正 会 員 北海道大学大学院工学研究科(札幌市北区北 13 条西 8 丁目)

Fig.1 Design process of SLR lens products

差を陽に表現し取り扱い可能であればよい。そこで本報では、従来の研究で行われている公差モデルとは違い、誤差と光学性能との関係表現ならびに統計評価に必要な「鏡筒光学製品の誤差モデル」を提案するものである。

なお、本研究で提案する鏡筒光学製品モデルは、一般光学製品すべてに対して適用可能であるが、モデルの検証などはカメラ用交換レンズで行った。

2. 鏡筒光学製品の設計プロセスと問題点

図1に鏡筒光学製品の設計プロセスをIDEF0で表現した図を示す。通常的设计プロセスでは、製品計画に基づいて「目標仕様」が与えられ、それに従って「基本光学設計 (A1)」が行われる。基本光学設計では、過去の設計例などを参考にして、光学系の基本構造 (光学系の構成、レンズ枚数、群構造、ズーム方式など) が設計される。基本構造が決まると、次は各レンズ面の「詳細パラメータ設計 (A2)」 (曲率半径、面間隔、屈折率、非球面形状など) が行われる。パラメータ設計は「光学性能評価 (A3)」とペアで実施されることが多く、各収差が目標値になるようパラメータを調整しながら、徐々に追い込んで行く作業が繰り返される (これは「収差補正」とも呼ばれる)。

光学性能が目標値に達すると、次には「鏡筒設計 (A4)」が実施される。鏡筒設計では与えられた光学設計解に従い、各光学部品を保持・移動させるための機構や部品の設計が行われる。そして、すべての設計作業が完了した後に「機能試作」や「量産試作」の工程が順に実施され「量産」工程へと移行する。

しかし、従来の設計工程 (図1の A1~A4) には「鏡筒設計の完了後に、最終製品としての性能評価・検証を行う工程が存

在していない」という大きな問題点が存在していた。

従来、製品としての光学性能の確認や検証は「機能試作」や「量産試作」などの、試作工程においてのみ行われていた。これは、設計段階で製品性能の検証をしようとしても、実際に試作を行って光学性能を測定しない限り、製品性能を把握・評価する方法がなかったためである。従って、設計者は単に要求仕様に対する機能設計を行うだけとなり、設計の正当性や製品 (光学) 性能の検証、量産に対する公差の検証などは、実際に試作や量産工程に移行するまで全く判断できなかったのである。

我々が提案してきた「仮想量産試作システム」は、部品製造・組立・性能検査に相当する各工程を、計算機シミュレーションによって行い、実際に製品を作ることなしに量産時の製品性能や量産性を定量評価可能とするものである^{1), 2)}。Turnerらは、製造プロセスを模倣した部品 (インスタンス) の仮想的製造・組立工程と、数値的な検査工程のシミュレーションによる、可変ソリッドモデルを用いた統計的解析システムによって、公差に対する機能的応答特性を解析できると提案している。本システムは、Turner¹²⁾らの提案概念と基本的には同一であり、鏡筒光学製品分野における実現方法の一つであると考えられる。

本研究では、図1の設計工程に対して「鏡筒設計 (A4)」の後に、光学系と鏡筒構造ならびに製造・組立誤差までを同時に考慮した「鏡筒光学誤差モデル生成 (A5)」の工程と、この誤差モデルを用いた「誤差モデルの量産性能評価 (A6)」の工程を設けることによって、設計段階で実製品状態における製品性能の評価を実現させるものである。アクティビティ A5 では、本報で提案する製品モデルに対して、各公差 (誤差) パラメータごとに「誤差分布関数」を定義し、乱数によって所定サンプル数分の「鏡筒光学誤差モデル」を生成する。そして、アクテ

Fig.2 Optical lens design model and real SLR lens product

Fig.3 Ray trace method on the optical coordinate system

イビティ A6 では、この（サンプル数分の）誤差モデルに対して光学性能計算を行うことで、量産製造を仮想的に計算機内で実現するものである。本提案システムにより、設計段階において量産時の製品性能や量産性を定量的に把握可能となり、実際に製品を作ることなしに量産時に起こるであろう種々の問題が予測可能となる。

3. 光学性能計算と光学面モデル

通常、光学設計は「光学設計システム」と呼ばれる光学設計・性能評価専用のソフトウェアを用いて行われる。これらのソフトウェアでは複数のレンズ面から構成される光学計算用の「面モデル」が一般に利用されている（以下、「光学面モデル」と呼ぶ）。図2は、この光学面モデル（上側）と、実製品でのレンズ部品（下側）の一例を示したものである。

光学面モデルは、理論光軸座標系を基準とした回転対称モデルであり、原点を含むYZ面を第一レンズ面の接平面として、光軸上に順に定義されたレンズ面と、レンズ面間の屈折率（媒質）を主要パラメータとして定義されている⁵⁾。

光学性能計算は、通常「光線追跡法」^{3),4)}によって行われる。図3はその概念図を示す。光線追跡法とは、光源から発した光線を一本の直線として扱い、レンズ面ごとに交点計算と屈折計算を行い、光源から結像面まで順に経路を追跡する方法である。そして、この光線追跡を数百本の光線に対して行い、光線の分布状態や光路長などから、光学理論を用いて各種の光学性能（各収差やMTFなど）を計算するものである。

光学設計システムでもレンズ面ごとに「偏芯（理論光軸に対する位置と姿勢のずれ）」を定義することが可能である。偏芯は通常シフトとチルトの2種類に分類され、各面ごとに独立に定義可能である。しかし、この偏芯定義機能は、折れ曲がった光学系やレンズを偏芯させた特殊光学系の設計を目的としたものであり、偏芯定義自体が光路を対象として面ごとに独立しているため、複数面をまとめて物体として扱うことはできない。

また、実製品では図2（下側）に示されるように、レンズ自身は「レンズ室」と呼ばれるレンズ固定部品に取付けられ、レンズ室は複数の鏡筒部品の入れ子構造を通して、カメラボディに取付けられている。これら部品には当然製造誤差や組立誤差があり、理論光軸に対して図のように偏芯している。さらに、レンズ自身も製造誤差による固有な偏芯を持っている。従って、

Fig.4 coordinate transformation chain for the assemble model

実製品状態での光学性能を計算する場合には、これらすべての誤差ならびに鏡筒構造により発生する偏芯を正しく考慮することが必要となる。

4. 鏡筒光学製品モデルの機能要件

次に、鏡筒光学製品開発において必要となる「鏡筒光学製品モデル」に要求される機能要件を考えてみる。まず、これまでの分析で明らかになった問題点をまとめてみると、

- (1) 光学部品・鏡筒部品の製造誤差および組立誤差が、レンズの位置と姿勢に与える影響をモデル化できていない。
- (2) 部品ならびに組立の累積誤差が製品全体の光学性能に与える影響を評価できていない。
- (3) 設計完了後に製品状態での性能評価や、設計および公差の正当性検証を行う工程が存在しない。

であると考えられる。

既に述べたように、理論光軸に対するレンズ面ごとの位置と姿勢（偏芯量）が分かっているれば、さまざまな偏芯状態にある光学系でも光線追跡法によって光学性能を求めることが可能である。つまり、実製品での偏芯状態を適切に表現し算出することができれば、実際に製品を試作することなしに製品状態での光学性能を求めることは可能である。

鏡筒製品にかかわらず、一般の機械製品は複数の機構部品の組合せで構成されている。また、これらの機構部品は、それぞれの部品の中に複数の「機能面（feature）」を持つ。これらの機能面は、設計者の意図に基づき各部品内で互いに幾何学的な位置関係を維持している。さらに、それら機能面は他の部品の機能面と接続されることで、組立状態を維持し所望の製品として機能していると考えられる。

ここで、各機能面の位置関係ならびに部品の連鎖関係に着目すると、これら機能面の接続関係は「各部品内における機能面間の幾何関係（設計形状）」と「各部品間における機能面の接合関係（連鎖関係）」として分類できることが分かる。図4はこの機能

Fig.5 EXPRESS-G of the SLR lens product model for the optical performance estimation

Fig. 6 Classification of typical feature_feature_relation (joint)

面の接続状態の一例を模式的に表現したものである。

さらに、製造・組立誤差を考慮した各レンズ面の位置と姿勢を求めるという観点から考えると、これら幾何関係と接合関係はどちらも機能面間の「座標変換関係」の連鎖として表現できることが分かる。また、製造・組立誤差も同様に、それぞれの「座標変換関係」に対する付加的な「誤差座標変換関係」として扱えることが分かる。

従って、これら誤差を含んだ機能面間の接続関係を「座標変換列」として表現できれば、鏡筒製品に限らず一般光学製品においても、実製品状態での光学性能評価に必要となる、各レンズ面の偏芯状態を的確に表現し算出可能となる。

以上のことから、「鏡筒光学製品モデル」に対する要求事項として下記の3項目が得られる。

- (1) 幾何関係と接合関係を適切かつ明確に表現可能である。
- (2) 幾何関係と接合関係に対し、誤差を考慮可能である。
- (3) 誤差を含む幾何関係と接合関係から理論光軸に対する各レンズ面の位置と姿勢を算出可能である。

ここで機能面とは、各部品がもつ平面や円筒面およびレンズ面など、その部品において何らかの機能を担う面のことをいう。「幾何関係」とは、部品内における機能面間の位置関係（設計形状）を意味する。また、これに誤差がある場合には「加工誤差」となる。また「接合関係」とは複数部品間において、ある部品と他の部品との機能面の接続状態をいう。従って、これに誤差がある場合には「組立誤差」となる。

これら三つの要求事項を満足できる「鏡筒光学製品モデル」を提案できれば、計算機内において実製品状態における光学製品の製品（光学）性能を正確に計算可能となる。

5. 鏡筒光学製品モデル

図5に本研究で提案する「鏡筒光学製品モデル」の EXPRESS-G 表現を示す。この EXPRESS-G モデルは、前述の機能面間の連鎖関係ならびに各誤差を、座標変換の連鎖関係として表現し、かつ提案した各機能要件を満足するように考えられたものである。

鏡筒光学製品（optical_products）は、部品（parts）から構成され、部品は機能面（feature）から構成される。機能面は接合関係（joint）を持ち、他の部品の機能面と接合する。また、鏡筒光学製品ならびに機能面は、それぞれローカル座標系を持ち（axis2_placement_3d）、それら座標系間の接合関係として

Fig. 7 Example of the instance model about the mount block

(relation)、座標変換（cartesian_transformation）による連鎖構造を定義可能である。また、この接合関係は部品間の変換関係（feature_feature_relation）と、各部品内での変換関係（parts_feature_relation）の2種類に区別可能である。

図6には、本研究で提案する部品間の「接合関係」の分類例を示す。鏡筒光学製品は一般に回転対称な形状をしているものが多い。また、このような回転対称な光学製品では、図6の①から④に示されるような接合関係により製品として組立られている。従って、それらの接合形態に合わせた関係分類を定義できるようにしておくことで、製造や組立誤差（およびガタなど）の運動（または拘束）をより表現しやすくなる。

本研究の提案モデルと、従来研究されてきた公差モデルとの違いは、モデルとして誤差を陽に表現し取扱い可能な点と、機構運動の最終的な安定状態における状態表現と、その状態の各誤差によるバラツキのみを厳密に表現できればよい点である。従って従来研究のように、安定状態に至るまでの運動過程などを厳密に表現できる必要はないのである。また、本報では触れていないが、実際には図5に示されるモデル（情報）だけでは

Fig. 8 Experimental implementation method

Fig.9 Instance model with coordinate transformation chain (considering with an error)

なく、光学計算に必要となる光学面モデルの情報も同様に定義される。従って、提案モデルは「光学面モデル」と「組立モデル」および「誤差モデル」が融合された、ハイブリッドモデルと考えることもできる。

しかしながら、この EXPRESS-G モデルだけでは、鏡筒光学製品の機械構造の状態表現ができたにすぎない。さらにこのモデルを統計公差モデルとするためには、さらに誤差と公差との関係表現ならびに公差と統計公差との関係表現も適切にできなければならない。また、公差と光学性能との関係は、機械製品のように誤差の単純な累積で表現することはできず、一般に非線形で誤差間の相互作用も強く複雑である。したがって、このような複雑な関係でも公差解析可能なモデルの実現する方法を考える必要がある。この点に関しては、今後の重要な課題である。

図 7 には本提案モデルを用いたインスタンスモデルの例を示す。インスタンスを示す項目の頭文字を英大文字で示し、エンティティを英小文字で示す。図はカメラボディとマウント部品および固定鏡筒の接合部分を示したものである。三つの部品間における各機能面の接続関係に対して、誤差を個別に定義できていることが分かる。また、それら機能面が座標変換の関係を通して、他の部品の機能面と連鎖関係にあることも分かる。

この例から、本提案モデルは部品内・部品間の機能面間に直接誤差（公差）を定義できること、またそれら部品の連鎖関係を明確に定義できることが分かる。

6. 実 装 例

提案した鏡筒光学製品モデルの正当性を確認するために、このモデルを実際にソフトウェアとして実装した。図 8 は、その実装方法とソフトウェアの構成を示したものである。

ソフトウェアの実装は、提案したモデルの EXPRESS-G を「EDM Visual Express」（市販ソフトウェア）に入力し、言語形式の

EXPRESS モデルへと変換する。次に「EDM Supervisor」（市販ソフトウェア）にこの EXPRESS モデルを入力し、提案モデルのデータベースを構築する。このデータベースに対してインスタンス・データ入出力のための GUI と、モデルデータにアクセスするためのインタフェースソフトを C++ で作成し、モデルのデータベースに対して、鏡筒部品の各インスタンスデータの入出力が行えるようにした。

こうして実装された簡易的なモデリングシステムに対し、実際の製品の部品形状や構造データを入力した。図 9 は、実装された製品モデルのインスタンスデータの一部（接続関係のみ）を EXPRESS-G で表したものである。

この製品モデルにおいて、誤差伝搬が正しく行われていることを確認するために、第 1 群の接合部に対してレンズ室を 1° だけ回転させる誤差（チルト）を与えた（図 9 参照）。結果は与えた回転誤差に対して接合する関連部品が正しく動作し、必要とされるレンズ各面の位置と姿勢が正しく算出できることを確認した。これにより、本提案モデルが前述の機能要件を満足していることを確認できた。

実際には、この製品モデルおよびモデルのデータベースを用いて、製品時に発生するであろう誤差量のインスタンスデータを、誤差分布関数に従った乱数関数で発生させる（モンテカルロ法）。そして、その全モデル（鏡筒光学製品誤差モデルのインスタンスモデル）に対して光学設計システムで光学性能を求め、その結果から統計評価および複合感度評価を行う。

以上の方法により、従来は不可能であった「鏡筒光学製品」としての製品性能評価が直接実施可能となった。

7. 結 論

本研究では、前報で提案した「仮想量産試作システム（Virtual PT System）」構想に基づき、よりの確かつ効率的に実製品状態

での光学性能評価を可能とする「鏡筒光学製品モデル」の提案を行い、以下の結論を得た。

- (1) 実製品状態における光学性能評価を実現するために、鏡筒光学製品モデルに必要とされる機能要件を明らかにした。また、この機能要件を満足する鏡筒光学製品モデルを提案し、そのモデルを EXPRESS-G によって表現した。
- (2) 部品の機械構造ならびに製造・組立誤差を、各機能面間の座標変換の関係で統一的に表現する方法を提案し、製品を構成する部品が持つ各機能面の連鎖関係を表現可能なことを示した。
- (3) 各機能面間の接続関係を、その接続形態別に分類する方法として、鏡筒製品に特徴的な4種類（Against, Fit, Screw, Abutting）の分類法を提案した。
- (4) 提案した製品モデルをソフトウェアとして実装し、実際に部品の製造誤差や組立誤差を考慮した際の、各光学機能面の位置と姿勢が導出可能であることを実証した。

参 考 文 献

- 1) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 田中文基, 岸浪建史: 鏡筒光学製品における公差設計システムの開発—仮想量産試作システムと量産シミュレーション—, 精密工学会誌, 64, 7 (1998) 1090.
- 2) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 田中文基, 岸浪建史: 鏡筒光学製品における公差設計システムの開発 (第2報)—複合感度解析システムの実現—, 精密工学会誌, 65, 2 (1999) 279
- 3) H. H. Hopkins: Wave Theory of Aberrations, Oxford Clarendon Press, (1950) 48
- 4) G. H. Spencer, M. V. R. K. Murty: General Ray-Tracing Procedure, J. Opt. Soc. Am, 52 (1962) 672
- 5) 佐々木豊春, 田中文基, 岸浪建史: Product Model による鏡筒光学製品の公差設計に関する研究 (第2報), 1997 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集 (1997) 131
- 6) 佐々木豊春, 黒田陽子, 田中文基, 岸浪建史: 鏡筒光学製品の公差設計に関する研究 (第2報), 1999 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 (1999) 372
- 7) 乾 正知: 拡張された幾何公差に基づく機械部品の誤差の表現, 旭硝子財団研究成果報告, (1993) 197
- 8) 乾 正知: ソリッドモデリングに基づく公差の表現と解析, 日本設計工学会誌, 28, 11 (1993) 451
- 9) 乾 正知: 複数の面分かなる形体へ適用可能な幾何公差方式の提案, 精密工学会誌, 60, 6 (1994) 837
- 10) Alan Fleming: Geometric Relationships between Toleranced Features, Artificial Intelligence, 37 (1988) 403
- 11) Rajneet Sodhi, Joshua U Taner: Relative positioning of variational part models for design analysis, CAD, 26, 5 (1994) 366
- 12) Swami D Nigam, J U Tuner: Review of statistical approaches to tolerance analysis, CAD, 27, 1 (1995)
- 13) Daniel E. Whitney, Olivier L. Gilbert, Marek Jastrzebski: Representation of Geometric Variation Using Matrix Transforms for Statistical Tolerance Analysis in Assemblies, Research in Engineering Design, 6 (1994) 191
- 14) Laperriere L., Ladond P.: Tolerance Analysis And Synthesis Using Virtual Joints, Proc. 6th CIRP Int. Seminar on Computer-Aided Tolerancing (1999) 405