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2報)*

—複合公差感度解析システムの実現—

佐々木豊春** 新海雅彦*** 東山孝一郎** 田中文基† 岸浪建史†

Development of Statistical Tolerancing for Optical Products (2nd Report)
- Realization of Complex Tolerance Sensitivity Analysis System -

Toyoharu SASAKI, Masahiko SHINKAI, Kohichiro HIGASHIYAMA,
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. However, with optical products, precise, quantitative prediction of tolerance sensitivities, optical performance, and productivity in a mass production environment have been very difficult in the design stage. The purpose of this study was the development of a statistical tolerancing system for optical products based on computer simulations (called Virtual PT System). The development of the mass-production simulation system was already reported in the first paper. As the second step of this study, the development of the complex sensitivity analysis system, which is based on the stepwise multiple regression method are reported in this paper. This system analyzes the error data and the MTF data output by mass-production simulation system, and output analysis result of the statistical complex tolerance sensitivity. Furthermore, this paper reports the effect the sensitivity analysis result confirmed by the mass-production simulation.

Key word: optics, tolerance, statistical method, complex sensitivity, multivariate analysis, virtual production

1. はじめに

適切な公差決定を行う上で、公差が製品性能に与える影響の度合い、すなわち公差感度を正確に把握することは、光学製品の設計において必要不可欠な作業である。しかしながら、カメラの交換レンズに代表される鏡筒光学製品では、設計段階において量産時の光学性能や量産性、また光学性能に対する量産時の実効的な公差感度を、正確かつ定量的に判断することは極めて困難であった。このために設定公差の適切性が十分検証できず、量産の初期段階においては予想外のトラブルが多発し、製品開発期間の長期化やコストの増加を招いていた。

本研究は、これらの問題解決と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システムの提案と開発を目的とするものである。

前報¹⁾では鏡筒光学製品の製品開発工程を調査した結果から、製品開発工程における問題点の抽出と、問題点を解決するための「仮想量産試作システム (Virtual PT System)」の提案並びに提案に基づく量産シミュレーションシステムの実現と、実測値との比較による信頼性の検証までを報告した。

本報では前報で提案した「仮想量産試作システム」構想に基づき、量産シミュレーションから出力されるデータを用いて、量産時における統計的な複合公差感度を求める方法の提案と、提案した複合感度解析システムの実現並びに感度解析結果の有効性を検証した結果を報告する。

量産シミュレーションの実施後に、本報で提案する複合公差

感度解析を行うことで、設定公差における相互作用を考慮した量産時の統計的な公差感度が定量的に得られる。従って、設計者はこれらの情報を元にして公差を修正することで、量産時を想定したより最適な公差設計が実施可能となる。

なお、前報と同様に本研究で提案する手法自体は「一般光学製品」すべてに対して適用可能であるが、実証についてはカメラ用交換レンズで行った。

2. 公差の設計と感度の解析

光学製品の公差設計では、公差感度の把握と公差配分が設計作業の大部分を占めると言っても過言ではない。これは、一般に光学製品の要求する公差幅が、他の機械製品に比べて非常に厳しく、公差感度を考慮して数 μm 単位や数秒単位のぎりぎりの公差配分をしなければならないからである。

公差感度の特定には古くから「変化表」が用いられてきた。変化表は収差や MTF などの各性能評価指標に対し、各公差に対応する設計値が任意の単位量ずつ変化した際の、性能評価指標値を一覧表形式で出力したものである。これは表の作成が簡単なことと、だれがみても容易に理解できることから、現在でもよく利用されている(表をグラフ化し見やすくしたものも利用されている)。しかし、変化表は人が見ることを前提としているために、二次利用が難しい点や相互作用など詳細な分析には膨大な量の表を作成しなければならないなど欠点も多い。

公差配分法としてよく知られている「松居法」⁶⁾⁷⁾では、この変化表のある偏差値での値を感度として用いて、公差決定や配分を行っている。この方法は分散の加法性から各公差に対応する偏差量と、それによる収差の変化量(感度と偏差の分散値の積)の自乗和が許容収差量以下であるという不等式を立て、これを満足するように公差幅や配分を決める方法である。これは

* 原稿受付 平成 10 年 9 月 16 日

** 正 会 員 (株)ニコン(東京都品川区西大井 1-6-3)

*** (株)ニコン

† 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)

公差配分法としては合理的であるが、使用する感度は基本的に変化表中のある代表値にすぎない。従って、感度を単一の数値として取り扱うために、線形性のよい「収差」などにしか利用できないという大きな制限がある。

Rimmer は、ある一つの設計値に対して、その偏差量の変化に対する MTF の変化を 2 次式で近似できるとの研究成果から⁹⁾、公差感度を 2 次式の係数で表現する方法を提案している。更に、Koch はこの考えを多数の偏差量（各設計値に対応する）が同時に変化した場合に拡張し、1 次・2 次・相互作用の三つの項からなる多項式で、MTF の変化量を表現する近似式を提案している¹⁰⁾。感度を意味する近似式の係数は、光線追跡法によって求めているとしているが、詳細は報告されていない。また、膨大な数の相互作用項（入力公差の組合せ項）の係数をどのように求めているかについても報告されていない。この理論は市販の光学設計ソフト（米 ORA 社 CODE-V）に組み込まれ実現されている¹¹⁾。前報でも報告したように、この近似式を基にした量産シミュレーションは比較的よい予測結果を出す。設計された光学系によっては極端に悪い結果を出すことも多々ある。しかしながら、実現手法を別にすれば、この近似式ならびにその考え方は非常に有効性の高いものであると考えられる。

上記のような設計状態（光学系の各設計値に対して偏差が無い理想の状態）を基準とした理論的・数学的解法は、ある状態における個々の製品の挙動を知るには必要十分なものである。しかし、実際の量産現場における製品では、各設計値に対する偏差（製造誤差）はある確率分布に従ってランダムに発生し、それらの偏差が複雑に相互作用をしているものと考えられる。また、数学的解法により求めた感度は、大量生産現場において作業者が感じている感度とは大きな隔たりのあることも少なくない。これは、従来の感度解析法が、基本的には単一の偏差量のみが変化した場合の感度を基に、全体の性能変化を推測しているからであると考えられる。すなわち、大量生産時における製品の、偏差（製造誤差）の複合状態を適切に取り扱っていないためと考えられる。

そこで本研究では、前報で報告した量産シミュレーションシステムと合わせて、光学製品の量産時における複合公差感度を、直接的かつ統計的に求める方法並びにシステムを開発するものである。以下に、本研究における感度解析システムの機能要件を上げると、

- (1) 量産時における公差感度が定量的に得られること。
 - (2) 設定公差幅に対する感度の大小を評価可能なこと。
 - (3) 感度の非線形性と相互作用を考慮した解析が可能。
 - (4) 量産シミュレーションの結果に対し感度解析可能。
- の四つとなる。

3. 仮想量産試作システム (Virtual PT System)

前報¹⁾において提案した「仮想量産試作システム」の IDEF0 表現を図 1 に示す。本システムは図 1 に示されるように、三つのアクティビティから構成される。第一は前報で報告したモンテカルロ法による「量産シミュレーションシステム (A1)」である。第二は本報において報告する「公差の複合公差感度解析システム (A2)」である。また、第三は感度解析結果と製造コスト情報とから、量産性と量産性能および生産コストがつりあ

Fig.1 IDEF0 of Virtual PT System for SLR lens

うように、公差を自動的に修正する「自動最適化システム (A3)」である。これら三つのアクティビティからなるシステムを、光学設計ならびに鏡筒設計の各段階において使用することで、要求された量産性と量産性能および製造コストを同時に満足する、より適切な公差設計が実現可能となる。

4. 複合感度解析システム

4.1 量産シミュレーションと公差感度の解析

前報における量産シミュレーションシステム（図 1 の A1）の実現により、光学公差のみならず鏡筒公差をも含めて、量産性と量産性能を同時に定量評価可能となった。しかし、量産シミュレーションの結果、設定公差に問題があったとしても「どこに原因があるのか」や「どの公差をどの程度にすればよいか」については依然不明のままであった。

このため、設計者は従来どおりに変化表などから量産時に感度の高そうな公差を推定し、それに基づく数多くの公差設計案を作成して、感度の高い公差特定のための量産性評価を何度も繰り返さなければならなかった。例えば、量産シミュレーションは 1 回当たり数十分から数時間で計算可能である。しかし、モンテカルロ法自体は計算コストの極めて高い方法であり、そのような高コスト計算を数十回から数百回も行うことは、決して効率のよいことではない。この点が前報の量産シミュレーションを用いた公差設計上の大きな課題であった。

もし、量産シミュレーション時に量産性能に対する公差感度をも同時に得ることができれば、変更すべき公差やその修正量を適切かつ容易に決定可能となる。その結果、公差感度や原因特定（公差特定）のための量産シミュレーションは不要となり、その実施回数を最小化できると共に、自動化への可能性も大きくなると考えられる。

4.2 複合公差感度の解析方法

感度の解析方法としては種々の方法が考えられるが、本研究においては前記機能要件を踏まえて、量産シミュレーションで使用されたデータ並びに結果データを有効利用する方法を模索した。量産シミュレーションで計算された MTF 値と実測 MTF 値との一致性は前報にて定量的に確かめられている。従って、それらデータを使って求めた公差感度は、現実の公差感度と遜色が無いものと推測される。

感度解析の方法を決定するにあたり、各公差ごとに対応する

Fig.2 IDEFO of complex sensitivity analysis system

偏差量と MTF 値との相関をグラフ作成し確かめてみた。これらのグラフから感度の高い公差と低い公差では、大きくはないが明らかな分布の違いを読みとることができた。そこで、次にはこれら偏差データと MTF データとの相関を数学的に求める方法を模索した。調査の結果、相関分析法としては多変量解析の一手法である「重回帰分析法」が適していると判断した。その理由は、この方法が相関分析法として広く用いられており、その特徴や信頼性がよく知られていたことと、計算方法が比較的単純なためにソフトウェアを開発しやすかったことである。

次に、重回帰分析法を用いる上で問題になるのが、重回帰式（重回帰モデル）の決定である。前述の相関グラフから考えると、単純に各偏差値と MTF 値との線形結合式をモデルとしただけではそれほど明確な相関が得られるとは考えにくい。そこで、今回は Rimmer や Koch が提唱する MTF の二次近似式を重回帰モデル式として採用することにした。この式は設計状態の光学系において、ある設計値に対し偏差 p が発生した場合の MTF 値を、

$$MTF = Ap + Bp^2 + D \quad (1)$$

と近似可能であるとしたものである⁹⁾。ここで、 A 及び B はそれぞれ一次と二次の係数であり、 D は定数項である。Rimmer は光線追跡法によって求めた MTF 値と、(1)式によって求めた MTF 値の比較を行い、(1)式は比較的広い公差幅においても MTF の変化をよく近似できたと報告している。更に複数の設計値に対する偏差 ($p_i: i=1 \sim n$) が同時に変化する場合には(1)式を、

$$MTF = \sum_i^n a_i p_i + \sum_i^n b_i p_i^2 + \sum_i^n \sum_{j=i+1}^n c_{ij} p_i p_j + d \quad (2)$$

と拡張できる¹⁰⁾。Koch は光線追跡法により(2)式の係数を直接求める方法と、(2)式を用いた量産性の評価法並びに公差決定法を提案・報告している。しかし、Koch の提案する方法では、対象とするレンズによっては極端に現実から乖離した結果を出すこともあり、係数の求め方に議論の余地があった。

本研究では同じモデル式を用いながら、量産シミュレーションで使用した偏差と MTF のデータとから、重回帰分析法によって係数を求める方法を提案するものである。重回帰分析法は一種のフィッティング手法とも考えられるので、同じモデル式でありながら違った解が得られるものと考えられる。また、これによってモデル式の信頼性も検証できると考えられる。

4.3 複合公差感度解析システム

図 2 に、今回開発した複合公差感度解析システムの IDEFO 表現を示す。本システムは前述のように、量産シミュレーションシステム（モンテカルロ法）の計算過程で使用された偏差データと、偏差データから算出された個々の光学性能データ（ここでは MTF）をすべてファイルとして記録し、これらを偏差量と MTF との関係に着目して統計分析することで、光学性能に対する統計的な複合公差感度を求めるものである。

システムは図 2 の破線部で示されるように、アクティビティ A21 で示される「データ変換モジュール」と、アクティビティ A22 及び A23 からなる「解析計算モジュール」の、二つのソフトウェアで構成される。

「データ変換モジュール」は、偏差と MTF のデータファイルを読み込んで、重回帰分析用のデータファイルを出力するものである。量産シミュレーションから出力された MTF のデータは、そのまま重回帰分析法における「観測値」として用いられる。また、偏差データは指定された解析条件と前述の重回帰式に基づき、「説明変数」となるパラメータ（各偏回帰係数に対応する偏差値のデータ： $p_i, p_i^2, p_i p_j$ ）に変換される。そして最後に、これら説明変数と観測値の二つを合わせた重回帰分析用データファイル（テキスト形式）を出力する。

次に「解析計算モジュール」は、重回帰分析用データファイルを読み込み、指定された条件に従って重回帰分析を行い、結果を画面とファイルに出力するものである。このモジュールではデータ・ファイルを読み込んだ後に、まず各変数の平均値や標準偏差、最大・最小値などの基本統計量を計算し出力する (A22)。操作者はこの出力結果を見ることで、入力データの間違いや操作ミスの有無などを大まかに確認することができる。その後、基本統計量と偏差データとから、回帰分析に直接使用される「偏差平方和行列」や「偏相関行列」などの「正規方程式」の作成が行われる (A22)。その後、アクティビティ A23 が、これらのデータと指定された回帰分析の条件（重回帰分析の種別や終了条件など）に従って、各性能評価点ごとに重回帰分析を行い、結果を CRT とファイルへ同時に出力する。

重回帰分析法には、正規方程式をそのまま解析する方法以外に逐次的な探索解析法として、(1)変数増加法 (forward selection)、(2)変数減少法 (backward elimination)、(3)変数増減法 (stepwise forward regression)、(4)変数減増法 (stepwise backward regression) がよく知られている^{11) 12)}。これら四つの解析方法は、全説明変数の中からより有意性の高いものだけを探索しながら、全体の

重相関係数が最も大きくなるように逐次計算する方法である。

実際の設計・製造上の観点から見ると、公差感度の解析においては特に感度の高いものだけがわかればよく、感度の低いものまでは取り立てて知る必要が無い。これは、低感度な公差には「一般公差」のように低コストな公差を割り振ればよいからである。特に、本システムで扱う重回帰式は説明変数の数が極めて多いため、前述のような逐次分析法が最も適していると考えられる。実際のシステムは上記四つの解析方法を任意に選択可能となっているが、その中でも「変数増減法」が最も適していると考えられる。これは、変数減少法や変数増減法などは、いったん全変数に対して重回帰分析を行い、それを出発値として変数を減少させてゆくため、初期計算の負荷が非常に重いためである。

今回開発した「解析計算モジュール」は、汎用的な重回帰分析専用ソフトとして作成されている。一般の統計解析ソフトと違う点は、前述のように説明変数の数が極めて多いことから、計算機のハードウェア限界一杯まで説明変数を取り扱えるようになっている点である。現時点では、表1に示される計算機を用いた場合で、約8500変数（130公差）まで取扱いが可能である。また、本システムにおいて、重回帰式が直接関係しているのはアクティビティA21の「データ変換モジュール」だけである。従って、このモジュールを交換することで、他の重回帰式（重回帰モデル）にも容易に対応可能となっている。

5. 複合公差感度解析の実施例と意味の解釈

5.1 解析結果の出力例とその意味

あるカメラ用ズームレンズに対し、本システムを用いて複合

Table1 Mass-production simulation and sensitivity analysis condition:

Mass-production simulation	
Target lens	SLR zoom lens (2 groups, 7 glasses)
Zoom position	Telescope side
Number of sample data	504
Number of tolerance	54
Tolerance type	radius, distance, ref. index, dispersion decentering (lens & lens barrel)
Error function	truncated Gaussian form (±2σ)
Calculation time	40 min
Complex sensitivity analysis	
Number of tolerances	54
Number of parameter	1539
Regression method	Stepwise forward regression method
Stepwise condition	Fin=Fout=2.0
Stopping rule	limit number of parameter N=15 or multiple correlation R<=0.8
Calculation time	17 min
Computer hardware	
CPU	Ultra-SPARC 85MHz
OS	UNIX (Solaris)
Memory	2G byte

公差感度解析を行った結果例を図3に示す。また、このときの量産シミュレーション並びに複合感度解析の実施条件を表1に示す。感度解析は前述のように変数選択型重回帰分析法（変数増減法）で行っている。従って、図3の出力内容も指定された探索数分（上位15個）だけの回帰分析結果が表示されている。

重相関係数R（Multiple correlation）は、探索されたパラメータ（説明変数）による回帰推定値とMTF性能（観測値）との相関であり、探索された説明変数によってどの程度MTFのばらつきが説明できるかを意味する（寄与率とも呼ばれる）。つま

Fig.3 Example of complex sensitivity analysis result

り、探索された公差（説明変数）が MTF の変動に寄与する程度を定量的に表したものである。逆に標準回帰残差（Standard error of residuals）を見ることで、探索された以外の変数が MTF 変動に与える程度も定量的に知ることができる。

次に、任意の偏差値における MTF 性能を推定する場合には、偏回帰係数 b_i (Partial regression coefficient) からなる回帰式に偏差値を代入することで直接計算することができる。一般には、この偏回帰係数を見ることで感度の大小を判断可能であるが、本システムではこの値だけで判断することはしていない。確かに、偏回帰係数は各説明変数の単位量における MTF 感度（変動量）と見なすことが可能である。しかし、入力された説明変数には様々な種類の単位系が混在しているために、単純に数値の大小で公差感度の比較を行うことはできないからである。特に単位系の違う偏差どうしの相互作用項などが顕著な例である。

これに対し、標準偏回帰係数 $std.b_i$ (Standard partial regression coefficient) は、入力された説明変数並びに観測値の標準偏差をすべて 1 ($\sigma = 1$) となるように正規化した際の偏回帰係数である。つまり、入力された公差の種類や単位系によらず、与えられたすべてのパラメータの変動幅が等しくなるように正規化した際の、MTF 変動に対する相関値であると見なせる。これは、設定された公差の種類や誤差分布・幅と言ったものに依存することなく、純粹に与えられた偏差（説明変数）のばらつき幅に対する相対的な公差感度（相関値）と解釈することができる。従って、公差感度の大小比較や順位付け並びに設定公差幅の適切性は、この標準偏回帰係数を見ることで定量的に判断することが可能となる。

更に、この標準偏回帰係数は、その説明変数が他の説明変数に対し完全に独立していれば、単相関係数 R_{xy} (Simple correlation coefficient) と同じ値になることが分かっている。従って、これらを合わせて比較することで、他の公差に対する従属性の有無も定量判断可能となる。

5.2 公差感度解析結果の解釈に関する考察

解析結果を単純に回帰式として見た場合には、前述のように統計解析的な情報が得られる。ところが、仮定した重回帰式の持つ意味も合わせて考慮すると、更に色々な情報の得られることが分かる。そこで、次には重回帰式と標準偏回帰係数の両方から得られる情報について考察してみる。今回採用している重回帰式は、1 次成分、2 次成分、複合作用成分の三つの成分で構成されている。また、性能評価指標として採用している MTF 値は 0~1 までの正の実数値であり、大きいほど性能がよいことを意味する。この条件と重回帰式の各成分の次数や符号から、

設計上極めて有効な情報が得られる。以下には偏芯を例に取ってその解釈例を説明する。

まず、1 次の成分は各公差の偏差量に比例して性能のばらつきが大きくなることを意味するものである。従って、標準偏回帰係数の符号と偏差量の符号が同じであれば、MTF の性能低下には寄与しないことが分かる。すなわち、部品公差や機械構造を考慮する上で、なるべく標準偏回帰係数の符号と同じ方向に偏芯が起こるように設計すれば性能低下が起こりにくくなる。

次に、2 次の成分について考えてみる。偏差が正負のどちらの方向に振れたとしても、偏差の自乗は正の値である。従って、2 次の標準偏回帰係数が負の場合には、偏差の自乗に比例して性能低下を起こすことが分かる。従って、設計上はできる限り偏芯が起こらないような配慮が必要になる。

更に、複合作用成分からは、二つの公差の相互作用による影響を直接知ることができる。例えば、この標準偏回帰係数の符号が正の場合、関係する二つの公差の偏差値が同一符号であれば、性能低下には寄与しないことが分かる。つまり、二つのレンズが同一方向に偏芯する場合には、性能低下を起こさないのである。逆に符号が負であれば、二つの偏差値が反対方向に振れるように鏡筒構造を設計することによって、偏芯に強い鏡筒構造を実現可能となる。

このように、本システムを用いることによって、量産シミュレーションを行った直後に、量産時における実効的な公差感度を得ることが可能となる。更に感度だけでなく、得られた重回帰分析の結果と重回帰式の意味も合わせて考慮することで、量産製品において極めて重要な設計情報までもが容易に得られるのである。実際の解析では、一つの公差に対して 1 次、2 次、複合作用のすべての項が現れる場合もあるので、単純にここでの解釈を鵜呑みにして設計することは危険を伴う。しかし、従来に比べてより具体的な設計情報が明快に得られるメリットは大きく、これらの情報とその他の設計情報とをバランスよく考慮することで、より適切な公差設計が実現できるだけでなく、設計の質自体を向上させることも可能となる。

なお、この考察自体は十分に分析整理がなされたものではなく、分析内容に関しては不十分な点が多々ある。これらの点については、今後も本研究における重要な課題として研究を進めて行く予定である。

6. 信頼性の検証実験

重回帰分析法は最小自乗法による多項式近似であり、標準誤差 (Standard error of residuals) で示される平均残差程度で、複合公差感度係数が推定できたことを意味する。この解析結果の信頼性を確認するために行った実験結果を図 4 に示す。

左側のグラフは公差を修正する前の良品率であり、右側は感度解析結果から公差を修正した後の良品率である。公差の修正は図 3 に示された説明変数（像高 0.0 mm における感度解析結果）のうち、上位 5 個に対応する公差を取り出し、その公差の幅を 1/2 とする方法で行った。

シミュレーション結果は低像高側になるに従い量産性の改善度合が高く、予想どおりに撮影領域中心部（像高 0.0 mm）で最も量産性能が改善されている。同様に、選択されなかった公差から 5 個を任意に選択し公差幅を 1/2 とする実験も行ったが、結果は図 4 の初期状態グラフとはほぼ同じであった。このことから、本システムによる感度解析結果は十分信頼性が高いと判断

Fig4 Effect of complex sensitivity analysis result

できる。また、量産シミュレーションと実測値との整合性は、前報で既に確認されている。図4の両グラフより、像高0.0mmにおける良品率50.0%のMTF改善量は0.116であり、感度解析で得られた偏帰係数を用いて計算したMTFの改善量0.085と比較的近い数値になっている。統計的な平均値の改善量と個別の帰帰推定値から求めた改善量とは厳密に一致するものではないが、これら二つの値が比較的近いことから、定量的な面でも十分に信頼できると判断できる。

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、鏡筒光学製品における複合公差感度を定量評価する方法並びにシステムの開発を行い、以下の結論を得た。

- 1) 従来の製品設計における公差感度解析の問題点を指摘し、鏡筒光学製品の感度解析に必要となる機能要件を明らかにした。
- 2) 量産シミュレーションシステムから出力される偏差データとMTFデータを用い、これを多変量解析法（重回帰分析法）によって分析することで、統計的な複合公差感度を求める方法を提案した。
- 3) 「仮想量産試作システム (Virtual PT System)」の概念に従い、提案した方法に基づく「複合公差感度解析システム」を実現した。
- 4) 「複合公差感度解析システム」の結果から公差を修正する実験を行い、予測どおりに量産性が向上することを確認し、提案した手法並びにシステムの有効性を確認した。

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23回光学シンポジウム講演論文集, (1998) 13.
- 3) T.Sasaki, M.Shinkai, K.Higashiyama, F.Tanaka and K.Kishinami: Development of Statistical Tolerancing System for Optical Product, SPIE Proc. Int. Opt. Desi. Conference 1998, 4382 (1998) 582.
- 4) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 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4報), 1997年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 133
- 5) 佐々木豊春, 新海雅彦, 東山孝一郎, 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5報), 1998年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 85
- 6) 松居吉哉: 光学公差の合理的決定方法について, 光技術コンタクト, 4, 2 (1966), 13.
- 7) 松居吉哉: 考慮すべき特定値が多い場合の公差の決め方, 品質管理, 25, 4 (1974), 24.
- 8) M.P.Rimmer: Analysis of Perturbed Lens System, App. Opt., 9, 3 (1970) 533.
- 9) M.P.Rimmer: A Tolerancing Procedure Based on Modulation Transfer Function (MTF), SPIE Computer Aided Opt. Desi., 147 (1978) 66.
- 10) D.G.Koch: A Statistical Approach to Lens Tolerancing, SPIE Computer Aided Opt. Desi., 147 (1978) 71.
- 11) R.S.Hilbert: Semi-Automatic Modulation Transfer Function (MTF) Tolerancing, SPIE Computer Aided Opt. Desi., 193 (1979) 34.
- 12) D.Force: Statistical Tolerancing for Optics, SPIE Int. Soc. Opt. Eng., 2775 (1996) 18.
- 13) 奥野忠一, 久米 均, 芳賀敏郎, 吉澤 正: 多変量解析法, 日科技連出版社, (1971) 25.
- 14) 奥野忠一ほか: 続多変量解析法, 日科技連出版社, (1976) 18.
- 15) 久米 均: JUSE-QCASによる品質管理, 日科技連出版社, (1987) 115.