累進レンズの断面曲線評価*

伊藤俊治** 成清辰生***

Evaluation of Sectional Curve on Progressive Lens

Shyunji ITOH and Tatsuo NARIKIYO

The purpose of this study is to evaluate sectional curves on a progressive lens by using a contact type form measuring equipment. Characteristic of the proposed method is to be able to compensate six setting errors of a specimen. The setting errors are x,y,z-directional components and rotational components around x,y,z-axes. The algorithm to search the errors is based on simplex method which is robust to multi-polarity of the objective function. The function is composed of the sum of square deviations between measured data and reference model data. The errors to minimize the function are searched by the applied simplex method and are removed by co-ordinates transformation. The following facts are revealed by simulation results and experiments. (1) Measurement accuracy was less than $0.05 \mu\text{m}(\text{rms})$ for 91 % of simulation results in the case of selecting progressive lens form as the reference model. (2) The form deviation curves of a paraboloidal mirror were experimentally obtained with the accuracy $0.3 \mu\text{m}(\text{rms})$. (3) The fitness between the form deviation curve along a diameter and the form deviation curve reversely scanned was about $0.3 \mu\text{m}(\text{rms})$ when a progressive glass mold was measured.

Key words: evaluation, sectional curve, progressive lens, simplex method, contact type

1. はじめに

眼鏡用の遠近両用レンズなどに用いられる累進レンズの形状は、光干渉計による測定が困難であり、触針式による形状測定が有利と考えられる。しかし、触針式による測定も、現状では、試料の取付け誤差による影響が大きく、センタリング、チルトを厳密に調整せねばならない。この調整は、試料にセンタリング、チルト用の基準がない場合や、要求される測定精度が $1 \mu\text{m}$ よりも小さい場合などは、極めて困難になる。

回転対称の非球面形状については、試料の取付け誤差を X Y Z 軸と、あおり 3 軸の計 6 軸について補正するソフトが実用化されており¹⁾、さらに、機上計測する手法も報告されている²⁾。しかしながら、離散的な Z 座標値で定義される形状の測定法についてはほとんど見当たらない。

本研究では、離散的座標値で定義される累進レンズ形状の断面曲線を触針式によって測定する際に、データ処理によって試料の 6 軸の取付け誤差を除去する手法を提示する。この手法は、シンプレックス法³⁾を基本とするが、評価関数の多極小値性を考慮して、初期値を多数点用意する特徴がある。シミュレーションでは、遠近両用レンズの形状を対象として、

Fig.1 Image of fitting

あらかじめ用意した $4 \times 5^\circ$ とおりの取付け誤差を探索可能か確認し、良好な結果を得た。実験では、軸外放物面鏡をマスタとして、本方式の測定精度を検証するとともに、評価関数を改善したうえで遠近両用レンズ用のガラスモールドを測定し、満足できる結果を得た。

* 原稿受付 平成7年12月6日

** 正会員 愛知県工業技術センター(刈谷市一ツ木町西新割)

*** 豊田工業大学(名古屋市天白区久方2-12-1)

Fig. 2 Searching process

2. 測定法

図1にイメージ図を示す。本測定法は試料の直径方向に測定した断面曲線と参照3次元モデルのある断面曲線がベストフィットするように、6軸の取付け誤差を除去する。

2.1 基本原理

変数としては、直交3軸方向の x , y , z と、その回りの回転 α , β , γ の合計6個の取付け誤差を選択する。また、評価関数としては、参照3次元モデルと走査測定データとの誤差の2乗和を定める。この評価関数 f を式で表すと、

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} = T_1(\alpha) T_2(\beta) \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m - z \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} x_r &= x_t \cos(\gamma) - y_t \sin(\gamma) + x \\ y_r &= x_t \sin(\gamma) + y_t \cos(\gamma) + y \\ z_r &= \text{model}(x_r, y_r) \\ f &= \sum (z_t - z_r)^2 \end{aligned} \quad (1)$$

x_m, y_m, z_m : 測定座標系における測定データの座標値

z : Z軸方向の取付け誤差

α : X軸回りの取付け誤差(あおり角)

β : Y軸回りの取付け誤差(あおり角)

$T_1(\alpha)$: X軸回りの回転座標変換行列

$T_2(\beta)$: Y軸回りの回転座標変換行列

x_t, y_t, z_t : 座標変換後の測定データの座標値

γ : Z軸回りの取付け誤差(回転角)

x : 走査軸方向の取付け誤差

y : 走査軸に直交する方向の取付け誤差

$\text{model}(\cdot)$: 参照3次元モデルの形状を表す関数

Fig. 3 Model form of glass mold

x_r, y_r, z_r : 座標変換後の参照3次元モデルの座標値
 f : 評価関数

になる。そして、評価関数 f を最小にする取付け誤差 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ を直接探索によって求め、座標変換によって除去することを基本原理とする。

評価関数は6変数を含むので、多極小値性となり、通常の探索法では1つの極小値に収束し、最小値を探し得ないおそれがある。また遺伝的アルゴリズム⁴⁾は評価関数の多極値性に対してロバストな特長を持つが、6つのアナログ変数を多くの染色体に割り付ける結果、十分な収束には時間を要する。

そこで、本研究では直接探索法のうちシンプレックス法³⁾を応用した測定手法を提示し、短時間で評価関数の最小値に十分に近づき得ることを明らかにする。

図2に本探索法の流れ図を示す。まず、走査測定データの最小値と参照3次元モデルの最小値とが合致するように、走査測定データをZ方向にリフトさせる。次に、 z の初期値を零の近傍に設定し、他の5変数について各々3とおりの初期値を準備する。したがって、すべての初期値の組合せは 3^5 とおりであり、これらの初期値から、初期シンプレックスの頂点、鏡像点、縮小点、拡張点の1回までの探索をシンプレックス法により 3^5 とおりで行う。続いて、評価関数を小さくした初期値を 3^5 とおりの中から順に6とおりでだけ選択し、この6とおりの初期値から、通常のシンプレックス法によって、収束条件を満たすまで、並列的に6回の探索を繰り返す。最終的には、この6回の探索のうち、評価関数を最も小さくした変数を解とする。ただし、探索数を6にした理由は、後述の実験におけるデータ処理の時間的効率を考慮したため、多極小値性が著しければ増やすことによって改善できる。

2.2 評価関数の改良

本測定法では測定した断面曲線と参照3次元モデルのある断面曲線とがベストフィットするように取付け誤差を探索する結果、XY平面上で、実際の測定とは大きく異なった位置の断面曲線を参照3次元モデルから選択するおそれがある。したがって、評価関数 f に次の要素を組み込むことによって改良を図る。

$$f = \sum (z_t - z_r)^2 + A(x^2 + y^2) + B(\alpha^2 + \gamma^2) \quad (2)$$

A, B : 重み係数

この評価関数 f において、第2項、第3項は x, y, α, γ を小さな値に保持する効果を持つから、極端に試料の設置

Fig. 4 Position of scanning line

Table 1 Setting errors given in advance

x mm	y mm	z mm	α°	β°	γ°
0	0	0	0	0	0
0.5	0.5	0	0.25	0.25	0.25
1.0	1.0	0	0.50	0.50	0.50
1.5	1.5	0	0.75	0.75	0.75
2.0	2.0	0	1.00	1.00	1.00

Table 2 Initial value and initial search width

	x mm	y mm	z mm	α°	β°	γ°
initial	2	2	0.001	1.0	1.0	1.0
value	0	0	0.001	0	0	0
	-2	-2	0.001	-1.0	-1.0	-1.0
initial	1	1	0.0005	0.5	0.5	0.5
width						

Table 3 Simulation result

θ°	0	45	90	135
percentage of rms $< 0.05 \mu\text{m}$	92	96	95	81

をずらしていないとき、すなわち x , y , α , γ の要素が小さいと予想されるとき、現実に近い断面曲線を参照 3 次元モデルから選り出す。また、式 (2) の第 3 項に β を入れない理由は、触針式の形状測定機の LS LINE MODE でデータを取り込む結果、直線成分のチルトが補正されるからである。

Fig. 5 Paraboloidal mirror

3. シミュレーション

シミュレーションに用いた累進レンズの参照3次元モデルを図3に示す。このモデルは眼鏡用の遠近両用レンズの形状で、数百 μm ピッチの格子点におけるZ座標値で定められている。したがって、さらに細密な形状データを双3次式Bスプライン曲面⁶⁾で補間して求める。次に断面曲線の測定箇所を図4に示す。測定は4つの直径方向に沿って行う。また、あらかじめ用意した取付け誤差を成分ごとに表1に示す。成分の組合せは、1本の断面曲線について5°とおりであり、これらの取付け誤差で走査測定データは乱されていると仮定する。そして、本測定法によって、取り付け誤差を十分に除去できるか検証する。すなわち、4本 $\times$ 5°回のシミュレーションを行い、評価関数が十分に小さくなるシミュレーションの数を求める。

探索に用いた初期値と初期探索幅は表2のとおりである。また、収束判定条件は、できるだけ厳しい方が好ましいとの考えから、評価関数値の収束については、 $0.000001 \mu\text{m}^2$ 以下、変数の収束については 0.000001 mm, rad 以下とした。この条件でも、1本の断面曲線についての探索時間は2分程度で、実用上、問題なかった。本測定法によるシミュレーション結果を表3に示す。同表では、参照3次元モデルとの差を rms で表した結果が、 $0.05 \mu\text{m}$ 以下になる割合が90.7%であり、良好な結果であった。

4. 実 験

実験システムは触針式形状測定機(フォームタリサーフS5)、角度割出しテーブル、パーソナルコンピュータなどで構成される。そして、試料として軸外放物面鏡、ならびに3章と同じ形状の遠近両用眼鏡のガラスモールドを測定した。軸外放物面鏡の参照3次元モデルの形状を図5に示す。なお、測定箇所は図4と同じである。

4. 1 軸外放物面鏡の形状測定

軸外放物面鏡の直径方向に放射状に測定長さ30mmの4つの断面曲線を測定した。そして、初期値、初期探索幅、収束条件を3章と同じに設定し、本測定法によりデータ処理した形

Fig.6 Form deviation curves of paraboloidal mirror

形状偏差曲線を図6に示す。図において、細実線は試料を反転して測定した結果を、位相を合わせて表示しており、合計8本の形状偏差曲線の $(P-V)_{\max}$ は $0.673\mu\text{m}$ であった。試料の形状精度が $0.15\mu\text{m}$ と検定されているから、この値は本測定法の測定精度と考えられる。

4. 2 遠近両用眼鏡のガラスモールドの形状測定(1)

遠近両用眼鏡のガラスモールドの直径方向に放射状に測定長さ40mmの4つの断面曲線を測定した。そして、初期値、初期探索幅、収束条件を3章と同じに設定し、データ処理によって求められた形状偏差曲線を図7に示す。ただし、評価関数としては、式(1)を用いた。図において、細実線は試料を反転して測定した結果を反転前の位相に合わせて表示しており、太実線と細実線との差は、4つの断面の平均で、 $0.48\mu\text{m}$ (rms)であった。この値は、反転時の走査位置の微妙な

Fig.7 Form deviation curves of glass mold by using objective function (1)

Table 4 Fitness before and after rotation of specimen

B \ A	0	0.001	0.002	0.005	0.01	0.02	0.05	0.1
10	0.45	0.55	0.39	0.51	0.33	0.39	0.29	0.44
20	0.40	0.39	0.39	0.40	0.37	0.39	0.37	0.43
40	0.36	0.39	0.41	0.42	0.37	0.39	0.41	0.60
70	0.48	0.43	0.46	0.43	0.45	0.39	0.43	0.43
100	0.54	0.38	0.41	0.39	0.45	0.40	0.43	0.49

ずれによる誤差や本測定の繰返し誤差などを合せた値である。

4. 3 遠近両用眼鏡のガラスモールドの形状測定(2)

Fig.8 Form deviation curves of glass mold by using objective function (2)

4. 2節と同じ走査測定データに対し、式(2)の評価関数を用いて、データ処理した。ここで、初期値、初期探索幅、収束条件は3章と同じである。また、測定の評価基準を便宜

的に繰返し性に求めることにする。表4に、試料を反転する前後に測定した形状偏差曲線の合致度を rms で示す。同表の太線の枠内は、十分に小さな領域であり、重み係数 A, B を、この領域に設定すれば繰返し性の良い結果が得られることがわかる。また、最良の合致度 ($0.29 \mu\text{m}$) が得られた条件 $A = 0.05, B = 10$ のとき、評価関数における成分比は

$$\begin{aligned} \Sigma (z_i - z_r)^2 : A (x^2 + y^2) : B (\alpha^2 + \gamma^2) \\ = 1 : 1 : 0.3 \end{aligned}$$

の近傍になった。この条件での形状偏差曲線を図8に示す。図7と図8を比較すると、図8の方が繰返し性が良く、評価関数として、式(2)の方が好ましいことがわかる。これは、XY平面上の走査位置と参照位置とが大きく異なるようなベストフィットを避けられた結果である。

5. ま と め

累進レンズの断面曲線を評価する方法として、シンプレックス法を応用した手法を提示し、以下の結論を得た。

- (1) 参照3次元モデルとして、遠近両用レンズの形状を選択し、あらかじめ4本×5°とおりの取付け誤差を用意した場合、本測定法では、91%のシミュレーション結果が測定精度 $0.05 \mu\text{m}(\text{rms})$ 以下で測定可能であった。
- (2) マスタとして、軸外放物面鏡を選択し、本測定法で測定実験したところ、測定精度 $0.67 \mu\text{m} (P-V)_{\text{max}}$ を得た。
- (3) 試料として、遠近両用レンズのガラスモールドを選択し、測定実験した。繰返し性は $0.29 \mu\text{m} (\text{rms})$ であった。また、本方式では、探索により参照3次元モデルから選出した曲線と走査測定データとのXY平面上での位置関係は、個々の走査ごとに基本的には無関連だから、3次元的な総合の評価はできない。レンズなどの光学部品の品質管理には、3次元的な評価が望ましいので、今後、非軸対称形状の3次元的な測定に拡張する予定である。

参 考 文 献

- 1) 吉住恵一：非球面三次元計測装置，光学，24，4，(1995) 218.
- 2) 鈴木浩文，小寺 正，杉本耕一，太田 努：非球面形状の機上測定システムの開発，精密工学会誌，61，11，(1995)1594.
- 3) 例えば，山下 浩：非線形計画法，日科技連，(1978) 284.
- 4) 例えば，樋口哲也，北野宏明：遺伝的アルゴリズムとその応用，情報処理，34，7，(1993) 871.
- 5) 例えば，山口富士夫：形状処理工学 [II]，日刊工業新聞社，(1982) 89.