触針式による非軸対称形状の3次元測定*

伊藤 俊 治** 山本 昌 治** 成 清 辰 生***

Three-Dimensional Measurement of Unaxisymmetrical Form by Contact type Measuring Equipment

Shyunji ITOH, Masaharu YAMAMOTO and Tatsuo NARIKIYO

The purpose of the study is three-dimensional evaluation of unaxisymmetrical form by using a contact type measuring equipment. The characteristic of the proposed method is to be able to compensate six setting errors which are x,y,z-directional components and rotational components around x,y,z-axes. Algorism which is based on simplex method is proposed to search the errors. The merit of the proposed method is to be robust to multipolarity of the objective function. The function is composed of the sum of square deviations among measured data and reference model data. The errors to minimize the function are searched by the proposed method and are removed by coordinates transformation. The following facts are revealed by experiment: (1) The accuracy of three-dimensional evaluation is $0.7 \mu\text{m(P-V)}$, which is confirmed by measurement of a master paraboloidal mirror. (2) The measured results by the contact type measuring equipment and CMM resemble well.

Key words: form measurement, unaxisymmetrical form, 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非軸対称形状は、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、触針式による非軸対称形状の測定も、現状では、試料の取付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非軸対称形状の測定法についてはほとんど見当たらない。

筆者らは、非軸対称形状を触針式によって測定する際に、単独の断面曲線の評価を対象として、データ処理によって試料の6軸の取付誤差を除去する手法を提示した。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、初期値を多点用意する特徴があった。

本研究では、合致法⁴⁾を応用した手法との併用により非軸対称面を3次元的に総合評価することを目的とする。実験では、あらかじめ形状精度が検定されている軸外放物面鏡を用いて測定法の精度を検証した。また、離散座標値で参照3次元モデルが定義される遠近両用レンズのガラスモールドを触

針式と3次元測定機とによって測定し、両者がおおむね一致することを確認した。

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放射状に測定した断面曲線群と参照3次元モデルの対応する断面曲線群がベストフィットするように、6軸の取付誤差を除去する。

Fig.1 Image of fitting

* 原稿受付 平成8年5月20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 Definition of variables

2.1 基本原理

変数は、図2に定義した、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個の取付誤差である。図中、 O' は走査長さの midpoint から放射の交点である。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(1)で表す。

$$\begin{pmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{pmatrix} = T_1(\alpha) T_2(\beta) \begin{pmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m - z \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$x_r = x_t \cos(\gamma) - y_t \sin(\gamma) + x$$

$$y_r = x_t \sin(\gamma) + y_t \cos(\gamma) + y$$

$$z_r = \text{model}(x_r, y_r)$$

$$f = \sum (z_t - z_r)^2$$

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軸方向の取付誤差

α : X軸回りの取付誤差(あおり角)

β : Y軸回りの取付誤差(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軸回りの取付誤差(回転角)

x : X軸方向の取付誤差

y : Y軸方向の取付誤差

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

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

そして、評価関数 f を最小にする取付誤差 $x, y, z, \alpha, \beta, \gamma$ 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³⁾は評価関数の多極小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⁾を応用した探索手法を適用する。この手法の手順を以下に述べる。

まず、走査長さの midpoint における高さを参照3次元モデルの最小値と合致させるように、放射状の個々の走査測定データを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で、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 3次元的评价

本測定法は断面曲線のトレースを基本とするが、合致法⁴⁾を改善した手法によって、3次元的な総合評価を可能にする。ここで、合致法は、直径方向に放射状に測定した断面曲線の走査長さの midpoint における曲線の高さを合致させるように、断面曲線を縦方向にリフトさせる方式である。ただし、従来の合致法は、軸対称加工品の形状測定のために開発されたものであり、個々の断面曲線を購入のソフトウェアによって処理し形状偏差曲線を求めた後、 midpoint の高さを合致させていた。この場合、曲面の総合評価は、放射状に測定した断面曲線のチルトについての相互関係を無視していた。

ここで述べる3次元的评价是、チルトの相互関係の把握を含めるものである。まず、触針式の形状測定機をdatum modeにし、断面曲線を測定する。すなわち、走査測定データの基準線を触針の直線駆動方向と平行にする。この測定では、走査基準線と角度割出しテーブル軸との直角度誤差が走査測定データに影響するので、直角度誤差を次式で除去する。

$$z_m(s) = \{z_{m1}(s) + z_{m2}(-s)\} / 2 \quad (2)$$

s : 放射の交点を原点とする走査軸

z_m : 反転前後の走査測定データの平均値

z_{m1} : 試料を反転する前の走査測定データ

z_{m2} : 試料を反転した後の走査測定データ

そして、 z_m に対して、2.1節のデータ処理を適用し、試料の取付誤差を除去した後、形状偏差 $z_t - z_r$ を求める。

Fig. 3 Form of paraboloidal mirror

Fig. 4 Gray scale of glass mold form

Table 1 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						

さらに、円周方向には、測定直径数Nの2倍の計算点が得られるので、これらに離散的フーリエ変換を適用し、級数を求める。そして、平均値と1次からN次までの正弦波で、計算点の近傍を通過する仮想の形状偏差曲線を作成し補間する。円周方向に作成した形状偏差曲線と直径方向に測定した形状偏差曲線とを併用することによって、文献⁶⁾⁷⁾と同様の手法で、形状偏差の3次元表示が可能になる。

3. 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。

Fig. 5 Form deviation curves of paraboloidal mirror

3.1 予備実験

角度割出しテーブルのアンギュラモーションエラーの特性を把握する目的で、角度割出しテーブル上にオプティカルフラット(平面度30nm)を設置し、回転中心と半径20mm付近のZ変位の変化を電気マイクロメータの2つのフィーラA, Bで測定した。

まず、割出し角度を 45° とびとし、1回転するまで、半径20mm付近の変位から回転中心付近の変位を差し引いた値Cを測定した。そして、オプティカルフラットのチルトを除去し、テーブルのアンギュラモーションエラーの変動のみを抽出する目的で、次式で定義される値Dを計算した。

$$D = \{C(\theta) + C(\theta + \pi)\} / 2 \quad (3)$$

C(): フィーラBからフィーラAを差し引いた変位
 θ : 割出し角度

ここで、Dの変動成分はアンギュラモーションエラーの変動に等しく、そのばらつきは5回の繰返し測定の結果、 2σ で $0.216 \mu\text{m}$ になった。

3.2 測定実験

非軸対称面を持つ試料として、軸外放物面鏡、ならびに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

Fig. 6 Form deviation of paraboloidal mirror

照3次元モデルの形状を図3に示し、ガラスモールドの基準曲面を図4にグレースケールで表示する。ただし、この曲面は数百 μm ピッチの離散的な座標値で定義されているので、細密なデータについては双3次式Bスプライン曲面⁸⁾によって補間した。

探索に用いた初期値と初期探索幅は表1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 0.000001mm,rad 以下とした。

3.2.1 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後、本測定法によりデータ処理した結果を図5に示す。図において、 $(P-V)_{\max}$ は $0.70\mu\text{m}$ 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が、角度割出しテーブルのアンギュラモーションエラーのばらつきと良く符合する。また、2.2節の3次元評価の手法を適用し、形状偏差をグレースケールと陰影付きの3次元表示⁹⁾で図6に示す。ただし、円周方向に補間した同心円の数3である。図において、同心円状の細かな陰影は触針の引っかかり傷によるものであり、文献⁷⁾で示した手法の特徴に依存する測定誤差である。

3.2.2 遠近両用眼鏡のガラスモールドの形状測定

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、収束条件は前述と同じに設定し、データ処理によって求められた形状偏差曲線を図7の太実線で示す。この場合、 $(P-V)_{\max}$ 値は $13.1\mu\text{m}$ であった。

また、同一の試料の形状を3次元測定機(Zeiss製CARAT)で測定した。測定の方法は次のとおりである。まず、40mm角の

Fig. 7 Form deviation curves of glass mold

領域を格子状に2mmピッチで位置決めした後、Zの正方向からプローブを試料に接触させ、そのときのプローブ球の中心座標値を求める。そして、中心座標値から接触点の法線ベクトルを計算し、プローブ球の半径値を補正した形状を導出する。その後、2.1節と同じ測定原理にしたがって、参照3次元モデルとベストフィットさせ、形状偏差を導く。ただし、触針式と比較しやすいように、評価領域を直径40mmの円内でマスク処理する。図7の細実線は、この形状偏差を放射状の直径方向に抜き出したものであり、中心角 45° ごとに(a)~(d)に表示している。

図7において、太実線と細実線すなわち触針式と3次元測定機の両結果は比較的良く一致しているが、最大で $3\mu\text{m}$ 程度の相違が見られる。この理由として、下記が考えられる。

- (1) 角度割出しテーブルのアンギュラモーションエラーの影響
- (2) 触針の走査測定箇所が試料の反転前後で完全には一致しないことによる影響
- (3) 触針式と3次元測定機の測定箇所が完全には一致しないことによる影響

(a) Gray scale

(b) Three-dimensional display

Fig. 8 Form deviation of glass mold measured by contact type measuring equipment

(a) Gray scale

(b) Three-dimensional display

Fig. 9 Form deviation of glass mold measured by three co-ordinates measuring machine

(4) ベストフィットの対象が、触針式では放射状の断面曲線群で、3次元測定機の場合は格子の交点群であり、両測定機によって異なる影響

(5) 両測定機自体の測定精度

今回の実験では、(4)の影響が最も大きかったと思われる。

図8に、円周方向に補間した同心円の数を3とした、触針式の形状測定機による結果をグレースケールと陰影付きの3次元表示で表す。図において、同心円状の陰影は試料の表面粗さによるものであり、3.2.1項と同様に測定誤差と考えられる。また、図9に3次元測定機によるものを示す。図8と図9を比較すると、触針式によって4本の直径方向へ放射状に測定するという少ない情報量から、3次元的に総合評価した結果と、3次元測定機によって2mmピッチの座標値から評価した結果はおおむね一致していることがわかる。ちなみに、P-V値はそれぞれ23.5 μm と22.7 μm であった。さらに、測定直径数を増やせば合致度は上がると予想されるが、測定時間との兼ねで決定する必要がある。

4. ま と め

触針式の形状測定機を用いて、非軸対称形状を3次元的に総合評価する方法を検討した。ここでは、試料の取付誤差を探索する手法として、シンプレックス法を応用した手法と、総合的な3次元評価のために改良した合致法を提示し、以下の結論を得た。

(1) 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 0.70 μm (P-V) $_{\text{max}}$ を得た。

(2) 試料として、遠近両用レンズのガラスモールドを選択し、触針式と3次元測定機によって測定実験した。P-V値は、それぞれ23.5、22.7 μm であり、両者は最大差異3 μm 程度で合致した。

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) 伊藤俊治：超精密軸対称加工品の形状測定に関する研究(第3報)，精密工学会誌，61，3(1995) 391.
- 5) 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.
- 6) 伊藤俊治，山本昌治，成清辰生，堀内 幸：超精密軸対称加工品の形状測定に関する研究(第1報)，精密工学会誌，60，6(1994) 867.
- 7) 山本昌治，伊藤俊治，竹田道輝：超精密軸対称加工品の形状測定に関する研究(第2報)，精密工学会誌，60，12(1994) 1747.
- 8) 例えば，山口富士夫：形状処理工学[Ⅱ]，日刊工業新聞社，(1982) 89.
- 9) 渡辺 学，大平紀之，堀内 幸：超精密加工機の工具-工作物間運動誤差補償法(第3報)，1993年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，(1993) 491.