2 方位法と半径方向シフト法とを用いた 平面度の高精度測定*

伊 藤 俊 治** 日 名 地 輝 彦*** 堀 内 宰†

High Precision Flatness Measurement by Combining
Two-Orientation Method and Radial Shift Method

Shyunji ITOH, Teruhiko HINAJI and Osamu HORIUCHI

A study is presented of a high precision measuring method of flat form errors by combining two-orientation method and radial shift method, when a laser interferometer is applied. The method can remove the measuring errors due to the form errors of the reference surface. In the two-orientation method, two sets of data measured before and after a rotation of the specimen are translated from orthogonal array into polar coordinates expressions. Then the differences between the two are Fourier transformed and the true form errors along the concentric circles are determined by phase operation. In the radial shift method, the differences between two sets of data measured before and after a radial shift are calculated along the radius. Then the true radial straightness errors are determined through polynomial approximation and least square method. Finally the true flat form errors can be obtained by combining both results. It has been ascertained by experiments that the measuring errors are within several nanometers which is comparable with the repeatability of the interferometer.

Key words: flatness measurement, measuring errors, interferometer, reference surface, two-orientation method, radial shift method

1. は じ め に

広い領域の平面形状偏差を測定する方法として、従来より複数の断面曲線から求める方法¹⁾²⁾あるいは、正方形の4頂点の位置に変位計を配置した測定ヘッドを用いる方法³⁾が提案されている。

これに対して、比較的狭い領域を高精度に測定する場合には、光干渉計がよく利用されている。この干渉計のうち、参照面を圧電素子で $\lambda/2$ だけずらしたとき、干渉じまの濃淡の位相のずれを測定する干渉計がある。これは位相測定干渉計と呼ばれており、最近、広く普及しつつある。

この装置の位相分解能がかなり高いので、測定精度は参照面の平面形状偏差と測定中の大気の揺らぎ、振動などで決定される。そして、大気の揺らぎや振動な

どを十分に管理した環境下では参照面の平面形状偏差が測定精度を主に支配する。

一方、高精度なオプティカルフラットなどの平面度はこの参照面の平面度とほぼ同等であるので、位相測定干渉計のみでは測定され得ず、何らかの対応が切望されていた。

こうした背景から本研究では参照面の平面形状偏差をデータ処理で分離する新たな方法を提案する。この方法は、計算機に取り込まれた格子配列状のデータの位置を複数の同心円の番号と偏角とで表すことを前提とする。測定の手順は次のとおりである。

まず、光軸に対して垂直な面内で試料をある一定の角度だけ回転させ、この回転前後における極座標表示データから、試料の円周方向に測定した平面形状偏差を求める。次に、試料を半径方向に適切な距離だけ移動させ、移動の前後のデータから、この半径の断面曲線を低次の多項式に最小2乗近似する。そして、これらの2方位法と半径方向シフト法との併用によって、参照面の平面形状偏差を取り除くものである。

実験ではオプティカルフラットを測定試料とした場合、本方式を用いることによって測定誤差を数 nm に

* 原稿受付 平成3年9月10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)

*** 豊橋技術科学大学大学院 (現, (株)コンピュータ・テクノロジー・インテグレイタ)

† 正 会 員 豊橋技術科学大学 (豊橋市天伯町雲雀ヶ丘1-1)

Fig. 1 Base circles of two-orientation method

押さえ得ることを確認した。

2. 原 理

2.1 2 方位法

円筒の断面形状を測定する場合、回転軸の運動誤差を測定データから分離する方法として、各種の手法^{4)~6)}が提案されている。本節で記述する2方位法は、これらのうち、位相差2点法⁴⁾を平面度の測定に応用したものと言える。この方法は測定に要する手間や時間が多方位法に比べて少ない点で優れた方法である。

図1において半径の異なる複数の同心円を試料の中心から外周に向けて、円番号 $i=1, 2, \dots, N$ とする。次に、最小2乗法によって、傾斜補正した後の格子配列状の測定データを計算機に取り込む。そして、この測定データのうち、複数の同心円における円周方向のデータを、円番号 i と偏角 θ を用いて、 $v_1(i, \theta)$ 、真の平面形状偏差を $z(i, \theta)$ 、参照面の平面形状偏差を $e(i, \theta)$ とすると次式が成り立つ。

$$v_1(i, \theta) = z(i, \theta) + e(i, \theta) \quad (1)$$

次に、図2のように試料を角度 ϕ だけ回転させて、同様の測定を行うと、新たな円周方向のデータ $v_2(i, \theta)$ は

$$v_2(i, \theta) = z(i, \theta - \phi) + e(i, \theta) \quad (2)$$

と表せる。従って、式(1)と式(2)とのデータの差 $v_d(i, \theta)$ は

$$\begin{aligned} v_d(i, \theta) &\equiv v_1(i, \theta) - v_2(i, \theta) \\ &= z(i, \theta) - z(i, \theta - \phi) \end{aligned} \quad (3)$$

になり、参照面の平面形状偏差を取り除ける。両辺を

Fig. 2 A rotation of specimen in two-orientation method

離散フーリエ変換しスペクトルの次数を k とし、 $z(i, \theta)$ 、 $v_d(i, \theta)$ の複素フーリエスペクトルを大文字で表すと、

$$\begin{aligned} Z(i, k) &= \frac{V_d(i, k)}{1 - \exp(jk\phi)} \\ &= \frac{A(k) + jB(k)}{1 - \exp(jk\phi)} \\ &= \frac{[A(k)(1 - \cos k\phi) - B(k)\sin k\phi] + j[B(k)(1 - \cos k\phi) + A(k)\sin k\phi]}{T(k, \phi)} \end{aligned} \quad (4)$$

が成り立つ。ここで

$A(k)$: $V_d(i, k)$ の実部

$B(k)$: $V_d(i, k)$ の虚部

$$T(k, \phi) = (1 - \cos k\phi)^2 + \sin^2 k\phi$$

である。

データの差 $v_d(i, \theta)$ を離散フーリエ変換することによって、 $A(k)$ 、 $B(k)$ が求まるので、上式を逆フーリエ変換して試料の円周方向に測定した真の平面形状偏差を導き出せる。

また、試料の回転角度 ϕ の整数倍の値 $k\phi$ が 2π の整数倍にはほぼ等しくなるとき、式(4)の分母が零に近くなるので、円周方向のデータに含まれる誤差が増幅されるおそれがある。従って、このような次数 k の場合、やむをえず $Z(i, k)$ を零にセットする。

このことから ϕ はその整数倍の値が 2π の整数倍値にできるだけ接近しないように、また、試料の平面形状偏差の特徴となる山成分で零セットが生じないように定めるものとする。

2.2 半径方向シフト法

2.1節で述べた2方位法は試料の円周方向の平均高さを求め得ないので、この結果、半径方向の形状偏差を導出できない。従って本節では試料の半径方向の真の断面曲線を求める方法について記述する。

最小2乗法によって傾斜補正した格子配列状の測定データから偏角 $\theta = \pi/2$ 方向の断面曲線のデータを $S_1(y)$ とし、同方向の試料の真の断面曲線を $S(y)$ 、

Fig. 3 A shift of specimen in radial shift method

参照面の断面曲線を $S_r(y)$ とすると、

$$S_1(y) = S(y) + S_r(y) \quad (5)$$

が成り立つ。

次に図3のように、この半径方向に距離 Δy だけ試料を移動すると移動後の半径方向のデータ $S_2(y + \Delta y)$ は次式で表される。

$$S_2(y + \Delta y) = S(y + \Delta y) + S_r(y) \quad (6)$$

従って、

$$S_1(y) - S_2(y + \Delta y) = S(y) - S(y + \Delta y) \quad (7)$$

になり、参照面の半径方向の断面曲線を除去できる。

一方試料の真の断面曲線 $S(y)$ は n 次の多項式

$$S(y) = g_1 y^n + g_2 y^{n-1} + g_3 y^{n-2} + \dots + g_n y + g_{n+1} \quad (8)$$

で近似できるものとする。例えば $n=4$ とし、これを式(7)に代入すれば、 g_1, g_2, g_3, g_4 の最小2乗解が次の式から求まる。ただし、 R は最外周円の半径である。

$$\begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \\ g_3 \\ g_4 \end{pmatrix} = (B^T B)^{-1} B^T \begin{pmatrix} S_1(0) - S_2(0 + \Delta y) \\ \vdots \\ S_1(y) - S_2(y + \Delta y) \\ \vdots \\ S_1(R) - S_2(R + \Delta y) \end{pmatrix}$$

上式において、 B は行列であり、

$$B = \begin{bmatrix} \lambda_1(\Delta y, 0), \lambda_2(\Delta y, 0), \lambda_3(\Delta y, 0), \lambda_4(\Delta y, 0) \\ \vdots \\ \lambda_1(\Delta y, y), \lambda_2(\Delta y, y), \lambda_3(\Delta y, y), \lambda_4(\Delta y, y) \\ \vdots \\ \lambda_1(\Delta y, R), \lambda_2(\Delta y, R), \lambda_3(\Delta y, R), \lambda_4(\Delta y, R) \end{bmatrix}$$

$$\lambda_1(\Delta y, y) = 4y^3 \Delta y + 6y^2 \Delta y^2 + 4y \Delta y^3 + \Delta y^4$$

$$\lambda_2(\Delta y, y) = 3y^2 \Delta y + 3y \Delta y^2 + \Delta y^3$$

$$\lambda_3(\Delta y, y) = 2y \Delta y + \Delta y^2$$

$$\lambda_4(\Delta y, y) = \Delta y$$

である。

Fig. 4 3-D plot of topographic map

このようにして求めた試料の半径方向の断面曲線と2.1節で導いた円周方向に測定した平面形状偏差とが $\theta = \pi/2$ の位置で一致するように円周方向の平均高さを定めることが本方式の主眼である。

3. 実 験

3.1 再現性の実験

測定試料として $\phi 50$ のオプティカルフラットを選択し、試料の裏面からの反射光の影響を除去する目的で、裏面に白色ワセリンを塗った。次に試料の基準点を回転ステージの 0° の位置に設定し、さらにそれぞれの中心が一致するように試料をステージに取り付けた。そして、測定平面が光軸に垂直になるようにチルティングした後、位相測定干渉計 (Zygo 社製 Mark IV) を起動させ、最小2乗法によって傾斜補正された試料全面の格子配列状の測定データを計算機に取り込んだ。この測定データの3次元表示を図4に示す。ちなみに、P-V 値は 41 nm であった。

次に、取り込まれたデータの配列を次のように変換する。まず、測定平面上に半径 $r = 2 \text{ mm} \times i$ ($i=1, 2, \dots, 10$) の10個の同心円を考える。そして、それぞれの円周上に等間隔に $2\pi r$ 個の測定点を配置し、各点における平面形状偏差を同心円に対する半径差として表示する。図5は5回の繰返し測定結果を表したものである。図5において、5回の平均平面度は約 31 nm であった。これは前述の3次元表示の平面度と異なるが、前者の場合、平面度の対象領域が全面であったのに対し、後者の場合は半径 20 mm までとした結果である。また、10個の同心円における最大のばらつきは約 8 nm であった。この値は本実験で使用した位相測定干渉計の繰返し精度 $\lambda/200$ (2σ) とおおむね合致する。

3.2 2 方位法の実験

回転ステージに取り付けられた試料を 0.401 rad だ

Fig. 5 Repeatability expressed in polar coordinates

Fig. 6 Differences between two sets of data in two-orientation method

け回転し、3.1節と同様の測定を行い、回転前後の5回の繰返しの平均に対して、2方位法を適用した。ここで、計算機に取り込む測定データとして、最小2乗法による傾斜補正後のデータを用いた。これは、試料の回転前後で厳密な同一チルティングが実際上かなり難しいことによる。図6は式(3)の $v_d(i, \theta)$ 、すなわち2方位で測定した極座標表示データの差を表しており、 $i=10$ のとき、このフーリエスペクトルは図7(a)になる。また式(4)の分母 $T(k, \phi)$ を図7(b)に示す。

図7(b)から15, 16山成分などでは $T(k, \phi)$ が零

(a) Differences between two sets of data

(b) Characteristics of $T(k, \phi)$

(c) Form errors obtained

Fig. 7 Fourier spectra in two-orientation method

に近いことが分かる。従って、 $k=15, 16$ などにおいては、測定誤差の増幅を避ける目的で、式(4)の左辺 $Z(i, k)$ を零にした。この場合の $Z(i, k)$ を図7(c)に示す。図7(c)からは $Z(i, k)$ の高次のスペクトル成分が十分に小さいことが分かるので、逆フーリエ変換の対象次数を30次以下にした。そして2方位法によって求めた円周方向の平面形状偏差を図8に示す。

この段階では、図8に示す10個の平面形状偏差においてそれぞれの平均高さが決定されないで、半径方向の真の形状偏差は未定である。

3.3 半径方向シフト法の実験

半径方向の真の形状偏差を決定する目的で半径方向シフト法による断面曲線の測定を行った。図9はその結果である。図9において、 S_1 は円の中心から y 方向に25 mm (約50ピクセル)までの区間でのデータであり、 S_2 は試料を y 負方向に5 mm移動させた場合のものである。 S_1, S_2 における短波長成分は、図5の繰返し測定の際に混入した偶然誤差による短波長成分と同様に再現性が得られなかった。また、測定対象がオプティカルフラットであったため、あまり高次の成

Fig. 8 Form errors obtained by two-orientation method

Fig. 9 Form errors obtained by radial shift method

Table 1 Coefficients of polynomial expression

g_1	g_2	g_3	g_4
3.37×10^{-6} nm/pixels ⁴	-1.68×10^{-4} nm/pixels ³	9.45×10^{-3} nm/pixels ²	1.43×10^{-1} nm/pixels

分は含まれないと推察された。従って、2.2 節の方法によって、 S_1, S_2 から真の断面曲線を4次までの多項式で近似し、図9の曲線Sとして求めた。曲線Sの領域は試料の中心からy方向に20 mmまでであり、この領域においてP-V値は約23 nm、各次の係数は表1のとおりであった。また、5回の繰返し測定におけるP-V値のばらつきは約4 nmであった。

3.4 試料の平面度

前節の半径方向の断面曲線と図8の円周方向に測定した平面形状偏差が偏角 $\theta = \pi/2$ の位置で合致するように円周方向の平均高さを決定し、さらに平面形状偏差全体について平均値を求め、この値を平面形状偏差から差し引いた結果を図10に示す。この場合、平面度は約30 nmであった。なお図10における破線は、

Fig. 10 Form errors obtained by combining two-orientation method and radial shift method

Fig. 11 Form errors of reference surface

試料の基準点を回転ステージの270°の位置に設置して同様の実験を行い、さらに0°設置の結果と試料の方向を合致させた表示である。この場合の平面度は28 nmであり、両方の平面形状偏差の最大差異は約8 nmであった。この最大差異は本方式の測定精度と考えられるが、3.1節で求めた干渉計の繰返し精度とはほぼ一致する。

3.5 参照面の平面度

3.1節で求めた5回の繰返し測定の平均から図10の平面形状偏差を差し引くと、参照面の平面形状偏差が求まる。図11はこの結果であり、実線は0°設置、

(a) Specimen

(b) Reference surface

Fig. 12 Radial straightness errors

破線は270°設置の場合を示しており、それぞれの平面度は17 nm, 15 nmであった。また、これらの平面形状偏差の最大差異は約9 nmであった。

3.6 試料および参照面の断面曲線

3.4 および3.5節で示した半径方向の断面曲線を図12に示す。同図において、実線は試料の0°設置、一点鎖線は270°設置の場合を示す。両結果は試料、参照面とも約8 nm以下の誤差で一致し、同図より、試料は中央部が低く、参照面は中高な傾向を持つことが分かる。

4. 結 び

位相測定干渉計による平面度の高精度な測定方法として、2方位法と半径方向シフト法とによって参照面の平面形状偏差を除去する方法を考案し、いくつかの実験から、次の知見を得た。

- (1) 2方位法において、逆フーリエ変換するスペクトルの次数は30次程度までで十分であった。
- (2) 測定試料としてオプティカルフラットを選択する場合、半径方向シフト法によって、半径の断面曲線を低次の多項式で近似できた。
- (3) 2方位法と半径方向シフト法との併用によって参照面の平面形状偏差を除去し、試料の平面形状偏差を測定誤差約8 nmで測定できた。この測定誤差は使用した干渉計の繰返し精度とほぼ等しかった。

参 考 文 献

- 1) J. Meijer & W. De Bruin: Determination of Flatness from Straightness Measurements and Characterization of Surface by Four Parameters, *Prec. Eng.*, 3, 1, (1981) 17.
- 2) W. De Bruin & J. Meijer: Some Results of Flatness Measurement, *Prec. Eng.*, 3, 1, (1981) 23.
- 3) 伊藤俊治, 成清辰生, 佐藤 豊, 岡田弥高: 2次元最小2乗逐次2点法による平面形状誤差の測定, *精密工学会誌*, 57, 10 (1991) 1844.
- 4) 中村 隆, 船橋鉦一: 位相差2点法による形状誤差測定, *日本機械学会論文集 (C編)*, 52, 473 (1986) 387.
- 5) 沢辺雅二: 高精度回転軸の回転精度測定法とその問題点, *精密機械*, 45, 10 (1979) 1237.
- 6) 藤本邦夫: 真円度測定機のスピンドル回転精度, *精密機械*, 45, 10 (1979) 1215.