高精度自由曲面形状測定装置の開発*

根 岸 真 人**

Development of a high precision free-form measurement machine

Mahito NEGISHI

This paper describes a high-precision free-form measurement machine named “A-Ruler.” It will be used to measure the shape of freely curved surfaces with a precision of 5 nmRMS at a measurement volume of 350 x 80 x 50 mm³. A contact-type probe guided by a pair of parallel springs is employed for its capacity to easily measure oblique surfaces. The probe's five motion errors are measured and compensated for using six laser interferometers and three mirrors arranged perpendicularly to each other. This is the core structure of the device, and it ensures accuracy of measurement. On the other hand, other portions such as XYZ-slides are made with rather ordinary components. Studies on margin of error indicate that the measurement of a spherical surface is influenced by almost all types of errors. Therefore, the performance of A-Ruler can be assessed by measuring a spherical surface. A concave sphere work-piece made of ZerodurTM was prepared for this purpose. Its curvature radius is 104.508 mm, the evaluation area is ϕ 120 mm and the maximum angle of obliqueness is 35 degrees. The repeatability, or the difference between two consecutive measurements, is 3.8 nmRMS. The error of the probe's sphericity is found to be sufficiently small compared to this repeatability. Precision is assessed by comparison with an interferometer. The difference between A-Ruler and the interferometer is 3.5 nmRMS per ϕ 120mm area.

Key words: coordinate measurement machine, free form, aspherical optics, contact probe, parallel spring, laser interferometer

1. 緒 言

デジタルカメラやレーザープリンタ, HMD(Head Mounted Display)など光を利用した情報機器の急速な性能向上を高性能光学素子が支えている。特に光学素子の形状を非球面,あるいは自由曲面とすることで,設計段階での著しい性能向上が可能となり,新しい製品コンセプトにつながっている。これら光学素子は単品ごとに製作するか,型を製作し,プラスチックやガラス成形によって大量生産する。いずれの場合でも球面や平面の場合と異なり,形状を創成する加工原理が存在しないため,測定にもとづいて形状を修正する必要がある。この形状修正サイクルの採用により,自由曲面形状においても加工精度を測定精度にまで,高めることが原理的には可能である。特に,研磨のように除去量を小さくできる加工方法との組み合わせにおいては測定誤差が光学素子の精度を大きく左右する。これまで大型非球面光学素子を対象に CSSP (Canon Super Smooth Polisher) と呼ぶオンマシン形状測定装置を開発し,繰り返し性 9 nmRMS が得られることを確認してきた¹⁾。本研究では前述したニーズに応えるため,自由曲面を再現性 5 nmRMS,精度 5 nmRMS で測定することを目標に小型の形状測定装置を開発し²⁾,ナノメートルオーダーの測定が可能であることを示す。

2. 装置構成

2-1 概要

干渉計を用いた方法は,被測定物全面を同時に,しかも高精度に測定できるため広く使用されており,その測定再現性はすでに 50 μ m に達している³⁾。しかしミリメートルオーダーの大

Fig.1 A-Ruler, a high-precision coordinate measurement machine

きな非球面量に対して参照波面を作ることは困難であり,前述したニーズに応えることは不可能と思われる。そこでプローブを走査させ,1点づつ測定する測定方法を採用した。このような装置⁴⁻⁷⁾は,形状に追従するプローブ部分とプローブの位置を測定する座標測定部分からなる。プローブは簡便に被測定物の傾斜角度に対応できる接触式を採用し,座標測定は3面の位置基準に対する距離を測定して位置,姿勢誤差を補償する構成とした。図1にA-Rulerと呼ぶ装置の外観を示す。測定領域は 350 x 80 x 50 mm とし,恒温クリーンチャンバーに設置する。このチャンバーの温度は空気の吹き出し口で 23.00 $\pm$ 0.05 $^{\circ}$ C、クリーンクラスは 100 である。次に主な構成要素であるプローブと座標測定について述べる。

* 原稿受付 平成13年2月19日

** 正会員 キヤノン(株)(東京都大田区下丸子3-30-2)

Fig. 2 Cross sectional view of A-Ruler

Fig. 3 Contact probe comprising parallel springs

Table 1 Error factors

Error factors		Measurement test		
Item	A main cause	Point	Flat	Sphere
Probe	Contact	Contamination	✓	✓
	Tip sphere	Sphericity	✓	✓
	Probe shaft	Deformation	✓	✓
Coordinate measurement	Data sampling	Digitizing	✓	✓
	Interferometer	Air turbulence	✓	✓
	Mirror	Deformation	✓	✓
	Frame	Mirror alignment	✓	✓
	Scanning	Vibration	✓	✓
Workpiece	Holder	Gravity	✓	✓
	Sample	Temperature	✓	✓

2-2 接触式プローブの構成

図2は装置の断面図である。形状測定にゼロ位法を採用した。つまりZ軸を用いてプローブの変位を一定に制御しながらX, Y, Z座標を測定する。従ってプローブの非線形性が問題なくなるほか、ストロークを狭くすることができ、姿勢変動も少なくなるため精度向上が期待できる。今回、ストロークは狭いが容易に高い精度が得られる平行板ばねを採用した。板ばねのたわみを一定に制御することによって一定の押し付け力を得る構成である。板ばねのたわみは光てこを用いた変位計で測定する。光ファイバから出射するレーザー光をレンズでコリメートし、プローブに固定した凸球面で反射、ポジションセンサに集光させる。するとプローブ変位は光てこで拡大され、焦点位置が動く。約40倍の拡大率を採用したが、この構成でサブミクロンの分解能が容易に得られる。また、この変位計の誤差は針圧の

変動となるが、プローブの位置はレーザー測長器で測定しているので精度に直接は影響しない。プローブの先端には $\phi 0.8 \sim 2 \text{ mm}$ の鋼球を取り付ける。現在グレード2の鋼球が使用可能で、この場合、真球度の規格は50 nmである。実際の真球度については後述する実験により影響を確認する。針圧については光学材料の中でも脆性材料である CaF_2 結晶面に傷をつけないことを実験的に確認した針圧3~10 mNを採用した¹⁾。板ばねの設計例とFEM計算結果を図3に示す。後述するように縦横の剛性比が大きき方が有利であるので板ばねの間隔は約60 mmと長くとした。また、板ばねの形を3回対称とし、方位による横剛性の変化が小さい構成とした。そして、被測定物との衝突を避けるため板ばねの支持点を内側に配置している。また、温度変化の影響を軽減するためプローブシャフトは線熱膨張係数 $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ のスーパーインバーで、プローブ上の参照ミラーは合成石英ガラスで製作した。

2-3 座標測定方法

図1, 2に示したように、低熱膨張ガラス ZerodurTMで製作した3面の参照ミラーを互いに直行して配置し、分解能1.25 nmのレーザー測長器でミラーに対するプローブの位置を測定する。この場合、測定の基準は被測定物を固定するベースとそれに柱を立てて固定した上部フレーム、参照ミラーからなる箱状の構造物となる。これとZ軸は測定精度を左右するので線熱膨張係数 $0.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ の低熱膨張鋳鉄で製作する。一方、測定基準を支えるベッド、およびプローブ走査に用いるXY軸は測定精度に直接影響しないので通常の構成要素で十分である。ころがり式のガイドとボールネジを採用した。このため例えばX軸の分解能は約 $0.2 \mu \text{ m}$ 、さらに約 $60 \mu \text{ rad}$ の姿勢誤差が生じる。そこで、レーザー測長器で複数の位置を測定し、この誤差を補償する。その方法は、図2において、測長軸 x_1, x_2 および先端球中心の上下方向の間隔を L_1, L_2 とすると次式でプローブ先端球中心のXY座標を計算すればよい。

$$\begin{aligned} x &= x_1 + (x_2 - x_1)(L_1 + L_2)/L_1 \\ y &= y_1 + (y_2 - y_1)(L_1 + L_2)/L_1 \end{aligned} \quad (1)$$

この方法でX, Y方向の位置決め誤差とX, Y軸まわりの回転誤差を補償できる。また、Z座標はZミラーとプローブ間の距離を干渉計で直接測定する。

3. 測定誤差

3-1 誤差要因

装置構成に基づいた測定ループを考え、誤差要因を表1のように分類する。第1の項目は接触式プローブに関し、さらに、被測定物と先端球間の接触部分、先端球、それを支えるシャフト部分に分ける。第2の項目は座標測定に関し、サンプリング、レーザー測長器(干渉計)、参照ミラー、フレーム、そして走査軸に分類する。最後の項目は被測定物の変形である。この誤差要因の影響を調べるために3種類の測定、点測定、平面の測定そして球面の測定を行った。点測定は座標の測定再現性、特に温度ドリフトやレーザー測長器の空気ゆらぎ、振動などに影響される。平面の測定はZ方向の座標測定精度、走査に関する誤差要因が加わる。そして球面の測定は全部の項目について影響を受ける。つまり、球面を測定することで、本測定装置の性能を検査することができる。

次に第1, 第2の項目について述べる。

Fig. 4 Influence of probe's (a) lateral deformation and (b) radius error

3-2 接触式プローブに関する測定誤差と補償方法

この項目の中で最も影響が大きいのは被測定物表面のよごれであり、数十 nm から数十 μm の測定誤差を生じる。被測定物の洗浄と、ソフトウェアによる異常な測定点の抽出がポイントとなる。プローブシャフトの変形については図3のFEMモデル(縦剛性 $K_1=1.47\text{N}/\mu\text{m}$, 横剛性 $K_2=417\text{N}/\mu\text{m}$) から検討する。図4(a)はプローブと θ 傾斜した被測定面の間に作用する力を示している。前述したように ARuler では垂直方向の力 F_1 が一定になるように制御される。摩擦力を無視するとプローブにかかる横方向の力 F_2 は $F_1 \tan \theta$ となり、法線方向の測定誤差 e_p は次式のようにかける。

$$e_p = \frac{F_1}{K_2} \tan \theta \sin \theta \quad (2)$$

従って傾斜角 θ のほぼ2乗に比例した測定誤差が予想される。例えば傾斜角 45° 、針圧 10mN とすると 17nm の誤差となる。

また、図4(b)に先端球半径誤差 δ の影響を示す。傾斜角 θ の表面を測定する場合、測定誤差 e_r は次式となる。

$$e_r = \delta(1 - \cos \theta) \quad (3)$$

さきほどの e_p と同様、傾斜角のほぼ2乗に比例する。そこで、先端球半径を補正し、これらの誤差を補償することができる。具体的な方法は曲率半径が既知の形状を測定し、その結果から先端球半径の補正量 δ を計算する。

また別の方法は、プローブの剛性から補正量 δ を推定することである。傾斜角が 0 と θ_0 の時に補正誤差 $e_c = e_p - e_r$ をゼロと仮定することにより、

$$\delta = \frac{F_1 \tan \theta_0 \sin \theta_0}{K_2(1 - \cos \theta_0)} \quad (4)$$

この時の補正誤差は

$$e_c = e_p - e_r = \frac{F_1(\cos \theta - 1)(\cos \theta - \cos \theta_0)}{K_1 \cos \theta \cos \theta_0} \quad (5)$$

Fig.5 Error caused by orthogonal errors

この最大値 $e_{c\max}$ は θ が $\cos^{-1}(\sqrt{\cos \theta_0})$ の時で次式となる。

$$e_{c\max} = \frac{F_1}{K_2} \left(\frac{2}{\sqrt{\cos \theta_0}} - \frac{1}{\cos \theta_0} - 1 \right) \quad (6)$$

例えば図3に示したプローブで θ_0 を 45° とすると、さきほど計算したプローブシャフトの変形による測定誤差 $e_p=17\text{nm}$ に対し、これを補正した時の残差 $e_{c\max}$ は 0.86nm となる。

3-3 座標測定に関する測定誤差と補償方法

上側のフレームに懸架されている基準ミラーは重力により変形する。特に上下のZ座標を測定するミラーについて 12.7nm の変形が予想された。そこで、多点でこれを支持し、自重変形を 2.7nm に押さえる²⁾。

また、XYZ座標軸間の直角度は、XYZミラーの取り付け誤差にかかっているの大きな測定誤差となる。例えば直角度 $1\mu\text{rad}$ に組み立てるのは難しい課題である。そこで、球面原器を測定し、それを真球と仮定して直角度を推定する。いわゆるボールバートストと同じ原理である。座標軸間の直角度を θ_{xy} , θ_{zx} , θ_{zy} , 誤差を含んだ座標を $\tilde{x}$, $\tilde{y}$, $\tilde{z}$ と表す。また、測定結果には球面原器の取り付け位置誤差が含まれるのでこれを x_0 , y_0 , z_0 とし、これらのパラメータがすべて微小だとすると誤差を含んだ座標は次のように定義できる。

$$\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\theta_{xy} & \theta_{zx} \\ 0 & 1 & -\theta_{zy} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

凹球面原器 $z = R - \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}$ を測定した場合、測定される形状誤差、すなわち法線方向の偏差 $e(x,y)$ は、

$$e(x,y) = \left(\begin{bmatrix} \tilde{x} \\ \tilde{y} \\ \tilde{z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} -x \\ -y \\ R-z \end{bmatrix} \bigg/ R \quad (8)$$

$$= (\theta_{xy}xy - (\theta_{zx}z + x_0)x + (\theta_{zy}z - y_0)y + z_0(R-z)) \bigg/ R$$

次に被測定物の取り付け位置誤差を最小2乗法を用いて推定計算する。測定範囲を半径 p の円領域とし、次の積分を考える。

$$Q = \int_0^{2\pi} \int_0^p e(r \cos \phi, r \sin \phi)^2 r dr d\phi \quad (9)$$

これが最小になるように取り付け位置誤差を計算すると、

$$\begin{aligned} x_0 &= \theta_{zx}(8R^5 - 15p^4R - 2R_0(2R^2 - 2p^2)(2R^2 + 3p^2))/15p^3 \\ y_0 &= -\theta_{zy}(8R^5 - 15p^4R - 2R_0(2R^2 - 2p^2)(2R^2 + 3p^2))/15p^3 \\ z_0 &= 0 \end{aligned} \quad (10)$$

ここで $R_0 = \sqrt{R^2 - p^2}$ 、これを式7に代入し測定誤差を計算することができる。誤差の評価はPV(Peak to Valley)値や次式で計算されるRMS(Root Mean Square)値を用いる。

$$E = \sqrt{Q/\pi p^2} \quad (11)$$

Fig. 6 Measurement error caused by θ_{xy} Fig. 7 Measurement error caused by θ_{zx}

Fig. 8 Point measurement test (Stability of Z-axis)

つまり10式は上記 RMS 値を最小にする計算だった。例えば最大傾斜 35度、領域 $\phi 120$ mm で球面原器を測定する場合を考える。これは後述する測定評価に用いた球面サンプルである。直角度誤差 θ_{xy} を $1 \mu\text{rad}$ とし、式 8 から測定誤差を計算すると 34.4 nmPV, 7.0 nmRMS となる。 θ_{zx} の場合は 7.6 nmPV, 1.3 nmRMS となる。このようにして計算した $\phi 120$ mm 測定領域における測定誤差の形状を図 5 に示す。このように同じ角度誤差でも θ_{xy} の影響が θ_{zx} よりも 4 倍以上大きい。

球面の測定において直角度誤差の影響は測定領域の大きさと最大傾斜角によって変わる。そこで $1 \mu\text{rad}$ の直角度誤差を仮定し、測定誤差の RMS 値を様々な被測定物の形状に対して計算すると図 6、図 7 が得られる。上図には先ほどの球面サンプルも示す。この球面を用いて補正すれば、球面サンプルのカーブよりも左下にある被測定物については直角度誤差の影響が小さいと言える。また、全般的に θ_{xy} は θ_{zx} よりも影響が大きい。

今回は 4-3 節で説明する真球度 18 nmPV の球面を用いたが、この誤差の影響については今後検討する必要がある。

4. 性能評価

4-1 1点の測定

表 1 に示した誤差要因の大きさを見積もるため前述したよう

Fig. 9 Measurement of a flat surface

Fig. 10 Measurement of a sphere surface

に 3 種類の測定を行った。まず、点測定はゼロデューで製作した平面原器にプローブを接触させ、Z 座標の変化を測定する。図 2 に示した構造から、Z 座標の変化は精度基準であるベースなどの構造物の温度ドリフトやレーザー測長器の空気ゆらぎ、振動などに影響され、本測定装置の座標測定誤差を表すと考えられる。

10 時間測定した結果を図 8 に示す。ランダムなばらつきが 3.7 nmRMS ある。これを低減するために、形状測定結果に空間的なローパスフィルタをかける。すると複数の測定点を平均することになるので、ランダムな座標測定誤差の影響を低減することができる。この時、測定する空間周波数に対して十分測定点数が多くなるように注意が必要である。また、この方法では対処できないドリフト誤差は 1 時間あたり 1.8 nm であった。実際の測定は 20 分程度を想定しているので目標の測定精度に対し十分小さいと言える。

4-2 平面の測定

図 9 は合成石英ガラスで製作した $\phi 100$ mm、厚さ 10 mm の平面を測定した結果である。先端球は $\phi 2$ mm の鋼球、針圧 7.9 mN、走査速度 9 mm/s とした。1 回の測定時間は約 9 分である。被測定物の取付け誤差である Z 方向と傾斜成分は測定結果から除去する。先ほどの 1 点の測定に対し、プローブ走査に伴う誤差、Z ミラー形状誤差などの影響が増えるが、前述したようにランダムな誤差を低減するためにローパスフィルタを用いる。走査ラインのピッチが 2 mm なのでこのフィルタのカットオフ

周期を4 mmとした。

繰り返し性を評価するのに、2回の測定結果の差を用いた。この評価値 (E_r とする) は評価領域を A 、第 n 回の測定を $f_n(x, y)$ 、2回の差を $d(x, y) = f_1(x, y) - f_2(x, y)$ 、評価領域を A とすると次式で定義される。

$$E_r = \left[\iint_A d(x, y)^2 dx dy / A - \left(\iint_A d(x, y) dx dy / A \right)^2 \right]^{1/2} \quad (12)$$

図9に示した $\phi 75$ mm 平面測定における繰り返し性を2回の測定結果の差 E_r で評価すると2.3 nmRMSであった。

また、測定結果が多数ある場合には平均形状からの差のばらつきで評価するほうが便利である。この評価値 E_s は、

$$E_s = \left[\frac{1}{A} \iint_A \left(\sum_{n=1}^N f_n(x, y)^2 / N - \left(\sum_{n=1}^N f_n(x, y) / N \right)^2 \right) dx dy \right]^{1/2} \quad (13)$$

偶発的な測定誤差が位置や測定回数によらず一定とすると、これら2つの評価値の関係は $E_r = \sqrt{2} E_s$ となる。

4-3 球面の測定

図10はゼロデュアで製作した曲率半径約104.508 mmの凹球面原器の測定結果である。評価領域は $\phi 120$ mmで最大傾斜角35度である。ただし、本装置の最大測定領域の制約からX方向については80 mmに制限されている。先端球は $\phi 2$ mmの鋼球、針圧9.8 mN、走査速度4 mm/sで測定した。1回の測定時間は約20分である。

被測定物の取り付け誤差である位置と曲率半径は最小2乗法で推定し測定結果から除去する。表1で説明したように本測定装置の誤差要因を全部含むので、この球面の測定が本装置の総合的な性能評価になると考えられる。

評価領域において繰り返し性 $E_r = 3.8$ nmRMS が得られた。また、式13による評価値は $E_s = 2.5$ nmRMS となる。

4-4 先端球の影響

図11はさきほどの凹球面原器の同じ中央断面において、先端球を毎回変えながら10回測定した結果である。用いた球はグレード2の $\phi 2$ mm 鋼球、針圧9.8 mN、走査速度は4 mm/sである。被測定物の位置と曲率半径を最小2乗法で推定して除去したあと、カットオフ周期2 mmのローパスフィルタにかける。10ラインのうち式12で計算する任意の2ラインの差 E_r は平均3.8 nmRMSであり、評価値 E_s は2.4 nmRMSであった。

また、最小2乗法で計算する被測定物の曲率半径は先端球の大きさに影響を受けるはずである。先端球を交換しない場合、被測定物の曲率半径は11.2 nmRMSのばらつきだった。先端球の交換を伴う場合は14.4 nmRMSとなる。

4-5 干渉計との比較

総合的な測定精度を評価するため、さきほどの凹球面原器を用い、干渉計と比較した。ARulerは5回、干渉計(Zygo社Mk4: 精度 $1/10 \lambda$)は4回の測定を行い、その平均形状を図12に示す。測定再現性を平均形状からの差のばらつき E_s で評価するとARulerが2.5 nmRMS、干渉計が0.9 nmRMSであった。

Fig. 11 Influence of tip-sphere's sphericity

Fig. 12 Cross check with an interferometer

そして平均形状の差をとると3.5 nmRMSとなった。前述したように、全部の誤差要因が反映される球面の測定において干渉計との差が目標に対して小さいことが確認できた。

5 結 論

自由曲面を精度5 nmRMSで測定する接触式の測定装置ARulerを開発している。プローブの変形、座標軸間直角度誤差の影響を補償する方法を開発し、すべての誤差要因を含む球面において装置性能を評価した。 $\phi 120$ mm, 最大傾斜角度35度において繰り返し性3.8 nmRMSが得られ、干渉計と比較したところ両者の差は3.5 nmRMSであった。

今後、形状誤差を有する球面を用いた場合の直角度誤差の補償方法、および自由曲面における装置性能の評価が課題である。

謝 辞

装置製作に同社、大石信司氏、出口明伸氏に尽力頂きました。

参 考 文 献

- 1) M. Negishi, M. Ando, M. Takimoto, A. Deguchi, H. Narumi, N. Nakamura and H. Yamamoto: A Super-Smooth Polishing for Aspherical Surface(I) -- High-Precision Coordinate Measuring and Polishing Systems --, SPIE, 2576 (1995), 336.
- 2) M. Negishi, K. Watanabe, K. Matsushita, T. Kasahara and K. Hosaka: A High-Precision Coordinate Measurement Machine for Aspherical Optics, Proc. 9th-ICPE Japan, (1999) 354.
- 3) M. Weiser, J. Froschke, H. Handschuh, M. Julich, M. Mayer and C. Seitz: Aspherical Surface at 100 pm -- Accuracy Results on Manufacturing and Metrology, Proc. 9th-ICPE Japan, (1999) 51.
- 4) K. Becker and E. Heynacher: A High Resolution Coordinate Measuring Machine for the Testing of X-Ray-Mirror, SPIE, 733, (1986) 149.
- 5) P. B. Leadbeater, W. J. Wills-More and P. A. McKeown: Ultra Precision Stylus Profilometry for Large Optical Components, ASPE, Annual Conf., (1990) 114.
- 6) 吉住恵一、久保圭司: 原子間力プローブ搭載超高精度三次元測定機, National Tech. Report, 39, 5 (1993) 598.
- 7) H. Shiozawa and Y. Fukutomi: Development of an Ultra-Precision 3D-CMM with the Repeatability of Nanometer Order, Proc. 9th-ICPE (1999), 360.