

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2010-38791  
(P2010-38791A)

(43) 公開日 平成22年2月18日(2010.2.18)

(51) Int.Cl.  
G01B 11/24 (2006.01)

F I  
G01B 11/24 A

テーマコード(参考)  
2F065

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 14 頁)

(21) 出願番号 特願2008-203494(P2008-203494)  
(22) 出願日 平成20年8月6日(2008.8.6)

(71) 出願人 504176911  
国立大学法人大阪大学  
大阪府吹田市山田丘1番1号  
(71) 出願人 504151365  
大学共同利用機関法人 高エネルギー加速器研究機構  
茨城県つくば市大穂1番地1  
(74) 代理人 100074561  
弁理士 柳野 隆生  
(74) 代理人 100124925  
弁理士 森岡 則夫  
(74) 代理人 100141874  
弁理士 関口 久由

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法

(57) 【要約】

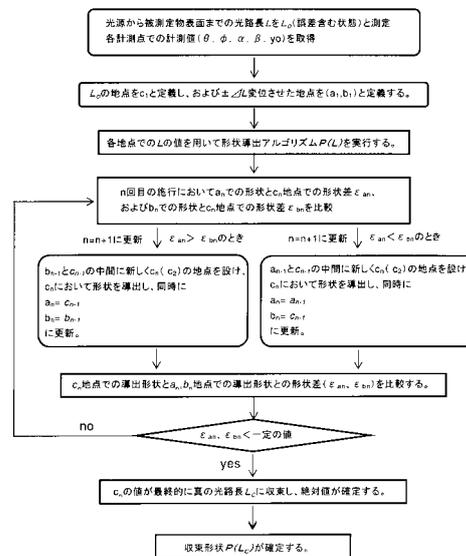
【課題】

計測点座標と法線ベクトルの計測値から被測定物の表面形状を導出する法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法において、現状の2軸2組のゴニオメータと1軸直進ステージの装置構成をえることなく、ある測定手順を付加するだけで、自律的に光路長Lを校正によって決定することが可能な光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法を提供する。

【解決手段】

各計測点毎に2軸2組のゴニオメータから得られる4つの角度データと1軸直進ステージから得られる1つの距離データとを取得し、計測点の数だけの計測値セットから形状導出アルゴリズムPにより形状を導出する際に、光路長Lを変数として複数の形状P(L)を導出し、形状変化の収束を利用して真の光路長L<sub>c</sub>と収束形状P(L<sub>c</sub>)を算出する。具体的には、形状残差の収束性を見ながら二分法により光路長を決定する。

【選択図】 図5



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

少なくとも 2 軸 2 組のゴニオメータと、その回転中心間の距離を変える 1 軸直進ステージとで構成し、1 組のゴニオメータは試料系を構成し、その可動部に被測定物を保持し、もう 1 組のゴニオメータは計測系を構成し、その可動部に光源と光検出器を設け、光源から出射された計測ビームと被測定物表面で反射された反射ビームが完全に重なるように、2 軸 2 組のゴニオメータを制御するとともに、光検出器と被測定物表面間の光路長  $L$  が一定になるように 1 軸直進ステージを制御して、被測定物表面の任意計測点の法線ベクトルを計測することから形状を求める法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法において、各計測点毎に、2 軸 2 組のゴニオメータから得られる 4 つの角度データと 1 軸直進ステージから得られる 1 つの距離データとを取得し、これら計測点の数だけの計測値セットから形状導出アルゴリズム  $P$  により形状を導出する際に、光路長  $L$  を変数として複数の形状  $P(L)$  を導出し、絶対形状は不変であることを原理として、光路長  $L_c$  と収束形状  $P(L_c)$  を算出することを特徴とする光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法。

10

## 【請求項 2】

光路長を  $L$  としたときの形状  $P(L)$  と光路長を  $L + \Delta L$  だけ微小変化させたときの形状  $P(L + \Delta L)$  又は  $P(L - \Delta L)$  とを比較し、形状変化が所定範囲内になるときの  $L$  の値を真の光路長  $L_c$  とし、収束形状  $P(L_c)$  を決定する請求項 1 記載の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法。

20

## 【請求項 3】

光路長  $L$  の値を任意に変化させて  $L$  変位前と変位後の形状導出を行い、複数の形状差のデータを作成し、複数の形状差のデータの中の任意の座標において、 $L$  の値と形状差をパラメータとした関数を導出し、その関数の極小値を計算で求め、形状差が最小になるときの  $L$  の値を真の光路長  $L_c$  とし、収束形状  $P(L_c)$  を決定する請求項 1 記載の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法。

## 【請求項 4】

光路長  $L$  の近似値を  $L_0$  に設定するとともに、真の光路長  $L_c$  が閉区間  $[L_0 - \Delta L, L_0 + \Delta L]$  に含まれるように変位  $\Delta L$  を設定し、この閉区間内で形状  $P(L)$  を導出し、区間の中間の形状に対する区間の両端の形状の差をそれぞれ計算し、この形状差の小さい方の半区間を新たな区間とする二分法により、形状差が所定範囲内になったときの区間中間の値を真の光路長  $L_c$  とし、収束形状  $P(L_c)$  を決定する請求項 1 記載の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法。

30

## 【請求項 5】

光路長  $L$  の近似値  $L_0$  を、誤差を含む実測値とし、変位  $\Delta L$  を光路長の計測誤差よりも大きな値に設定してなる請求項 4 記載の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法。

## 【発明の詳細な説明】

40

## 【技術分野】

## 【0001】

本発明は、光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法に係わり、更に詳しくは被測定物表面における有限数の離散した計測点の座標と法線ベクトルの実測値を用いて被測定物表面の全体形状を測定する法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法において、光路長を自律校正することにより被測定物表面の全体形状を超精密に測定する技術に関するものである。

## 【背景技術】

## 【0002】

X 線自由電子レーザーや波長 13 . 5 nm の極紫外光を用いたリソグラフィ技術から

50

要請される次世代高精度光学素子の製作には、非球面で形状誤差を $1 \sim 0.1 \text{ nm RMS}$ の精度で自由曲面の形状を計測することが不可欠である。このようなX線光学素子、代表的にはX線用反射ミラーは、 $10 \sim 500 \text{ cm}$ のサイズを有し、この反射面全体にわたって前述の形状誤差を達成しなければならない。空間波長 $1 \text{ mm}$ 以下の表面粗さの計測手段として、原子レベルの分解能をもつプローブ顕微鏡があり、現状でも要求精度を満たしているが、一度に計測できる範囲は約 $50 \mu\text{m}$ 四方と非常に狭く、また計測時間も長いので、被測定物全体の形状を計測するには全く不向きである。一方、空間波長 $1 \text{ mm}$ 以上の形状計測技術は、被測定物に $1 \text{ mm}$ 程度の細いレーザービームを照射して、得られる反射光のズレを測定して被測定物表面の傾斜角を求める、LTP (Long Trace Profiler) がある。これは、 $5 \times 10^{-7} \text{ rad RMS}$ の測定精度 ( $3 \text{ nm RMS}$ ) が得られるが、測定範囲は $\pm 5 \text{ mrad}$ に限られて2次元形状測定である。また、点光源干渉法によって、 $0.3 \text{ nm RMS}$ の測定精度が得られているが、点光源からの球面波を参照するため、原理上非球面の形状計測が困難である。

10

20

30

40

50

#### 【0003】

このような従来課題を解消する方法として、特許文献1に記載されるような超精密形状測定方法が提案されている。この形状計測法の原理は、レーザーの直進性を活用し、光源から出射されたレーザービームが被測定物表面に反射されて、光源の位置にある検出器の中心に戻るように、即ち入射ビームと反射ビームが完全に重なるように2軸2組のゴニオメータを、また検出器と被測定物表面間の光路長 $L$ を一定になるように光軸方向の1軸直進ステージを制御して、被測定物表面の任意計測点(座標)の法線ベクトルを計測することから形状を求めるものである(図1参照)。ここで、計測点の座標とは、最初の計測点への光線ベクトルに直交する試料面上の座標である。

#### 【0004】

そして、計測点座標と法線ベクトルの計測値から被測定物の表面形状を導出する方法として、特許文献1にも記載された傾斜角積分法と、最近本発明者らによって提案されたフーリエ級数展開最小二乗法とがある。傾斜角積分法は、各計測点の表面スロープとその1階積分により各計測点の高さを求めることによって形状を算出する方法であり、フーリエ級数展開最小二乗法は、被測定物表面における有限数の離散した計測点の座標と法線ベクトルの実測値を用いて、フーリエ級数展開によって表された近似曲面が、各計測点での誤差が最小になるように次数と係数を最適化する新規な形状導出アルゴリズムによって被測定物表面の全体形状を超精密に測定する方法である。これらの測定方法をまとめて法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法と称することにする。

#### 【0005】

被測定物の表面形状は、前述の法線ベクトル追跡型超精密形状測定装置の2軸2組のゴニオメータのロータリーエンコーダの出力と、検出器と被測定物表面間の光路長 $L$ によって決定される。ここで、ロータリーエンコーダの出力は要求精度で容易に読み取ることができるが、光路長 $L$ を必要な精度で測定することは困難であり、現状では $50 \mu\text{m}$ 程度の誤差を有している。この光路長 $L$ の絶対測定における誤差は、被測定物の表面形状に無視できない形状誤差として影響を及ぼすことになる。つまり、表面形状の測定精度を上げようとするれば、光路長 $L$ の測定精度を上げることが必要である。相対距離はレーザー測長機によって $\text{nm}$ オーダーで測定することが出来るが、3次元空間の任意の点の絶対距離を $\text{nm}$ オーダーで超精密に測定する方法は現状ではない。

【特許文献1】特許第3598983号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

#### 【0006】

高精度光学素子の製作に必要な自由曲面を形状精度 $0.1 \text{ nm RMS}$ で測定できる形状測定方法を確立することは急務である。法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法は、被測定物に対する大きさの制限が少なく、基準面を用いず、非接触で測定することができる等の利点を備えており、この測定方法でネックとなっていた光路長 $L$ の高精度計測の問題を

解消すれば、本測定方法のブレークスルーを図ることが可能である。

【 0 0 0 7 】

そこで、本発明が前述の状況に鑑み、解決しようとするところは、計測点座標と法線ベクトルの計測値から被測定物の表面形状を導出する法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法において、光路長 $L$ を測定するために、新たな測長機を導入することなく、現状の2軸2組のゴニオメータと光軸方向の1軸直進ステージの装置構成を変えることなく、ある測定手順を付加するだけで、自律的に光路長 $L$ を校正によって決定することが可能な光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法を提供する点にある。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 0 8 】

本発明は、前述の課題解決のために、少なくとも2軸2組のゴニオメータと、その回転中心間の距離を変える1軸直進ステージとで構成し、1組のゴニオメータは試料系を構成し、その可動部に被測定物を保持し、もう1組のゴニオメータは光学系を構成し、その可動部に光源と光検出器を設け、光源から出射された計測ビームと被測定物表面で反射された反射ビームが完全に重なるように、2軸2組のゴニオメータを制御するとともに、光検出器と被測定物表面間の光路長 $L$ が一定になるように1軸直進ステージを制御して、被測定物表面の任意計測点の法線ベクトルを計測することから形状を求める法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法において、各計測点毎に、2軸2組のゴニオメータから得られる4つの角度データと1軸直進ステージから得られる1つの距離データとを取得し、これら計測点の数だけの計測値セットから形状導出アルゴリズム $P$ により形状を導出する際に、光路長 $L$ を変数として複数の形状 $P(L)$ を導出し、絶対形状は不変であることを原理として、光路長 $L_c$ と収束形状 $P(L_c)$ を算出することを特徴とする光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法を構成した(請求項1)。

【 0 0 0 9 】

これまで提案してきた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法及び測定装置は、2軸2組のゴニオメータと光軸方向の1軸直進ステージを同時5軸制御することによって、高精度に形状計測するものである。このとき、表面形状再現に必要である法線ベクトルの方向は2軸2組のゴニオメータで精確に測定できるが、光路長 $L$ の絶対値は十分な精度で直接測定することは不可能であった。本発明では、複数の光路長 $L_1 \sim L_n$ における形状測定を実施することによって、真の形状に近ければ微小な $L$ の変化すなわち $L_i \pm \Delta L$ に対して形状が不変であることを原理として、 $L_i \pm \Delta L$ における表面形状を求め、その形状残差が最小となる光路長 $L$ が真の形状に近いと判断して形状を決定する。

【 0 0 1 0 】

具体的には、光路長を $L$ としたときの形状 $P(L)$ と光路長を $L + \Delta L$ だけ微小変化させたときの形状 $P(L + \Delta L)$ 又は $P(L - \Delta L)$ とを比較し、形状変化が所定範囲内になるときの $L$ の値を真の光路長 $L_c$ とし、収束形状 $P(L_c)$ を決定する(請求項2)。

【 0 0 1 1 】

あるいは、光路長 $L$ の値を任意に変化させて $L$ 変位前と変位後の形状導出を行い、複数の形状差のデータを作成し、複数の形状差のデータの中の任意の座標において、 $L$ の値と形状差をパラメータとした関数を導出し、その関数の極小値を計算で求め、形状差が最小になるときの $L$ の値を真の光路長 $L_c$ とし、収束形状 $P(L_c)$ を決定することも好ましい(請求項3)。

【 0 0 1 2 】

また、光路長 $L$ の近似値を $L_0$ に設定するとともに、真の光路長 $L_c$ が閉区間 $[L_0 - \Delta L, L_0 + \Delta L]$ に含まれるように変位 $\Delta L$ を設定し、この閉区間内で形状 $P(L)$ を導出し、区間の中間の形状に対する区間の両端の形状の差をそれぞれ計算し、この形状差の小さい方の半区間を新たな区間とする二分法により、形状差が所定範囲内になったときの区間中間の値を真の光路長 $L_c$ とし、収束形状 $P(L_c)$ を決定することがより好ましい(請求項4)。

【 0 0 1 3 】

10

20

30

40

50

この場合、光路長  $L$  の近似値  $L_0$  を、誤差を含む実測値とし、変位  $L$  を光路長の計測誤差よりも大きな値に設定してなるのである（請求項 5）。

【発明の効果】

【0014】

以上にしてなる本発明の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法は、光路長  $L$  を測定するために、新たな測長機を導入することなく、現状の 2 軸 2 組のゴニオメータと光軸方向の 1 軸直進ステージの装置構成を変えることなく、自律校正の手順を付加するだけで、光路長  $L$  の絶対値測定を行うことなく、フーリエ級数展開最小二乗法などの形状導出アルゴリズム  $P$  を用いて被測定物の表面形状を精密に測定することが可能となる。

10

【0015】

具体的には、光源から出射された計測ビームと被測定物表面で反射された反射ビームが完全に重なるように、2 軸 2 組のゴニオメータを制御するとともに、光検出器と被測定物表面間の光路長  $L$  が一定になるように 1 軸直進ステージを制御して、被測定物表面の任意計測点の各計測点毎に、2 軸 2 組のゴニオメータから得られる 4 つの角度データと 1 軸直進ステージから得られる 1 つの距離データとを取得し、これら計測点の数だけの計測値セットから形状導出アルゴリズム  $P$  により形状を導出する際に、自律校正により真の光路長  $L_c$  を見つけ出し、収束形状  $P(L_c)$  を算出することができるのである。測定装置を駆動して計測点の数だけの絶対計測値セット又は差分計測値セットを取得できれば、あとは数値計算処理だけである。

20

【0016】

つまり、本発明の光路長の自律校正を用いた法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法を用いれば、測定時間は増加するが、装置構成を変えないため、コストをかけずに、従来不可能であった光路長  $L$  の絶対値を算出することが可能となり、その正確な光路長  $L_c$  を用いて形状導出を超精密に行うことができる。これまで、本計測法は、光路長  $L$  が十分な精度で測定できていないため、形状の測定精度が光路長  $L$  の測定精度で支配されていた。本発明により、高精度に光路長  $L$  の絶対値測定が可能になったことから、形状測定そのものの高精度化のブレークスルーを達成できた。

【発明を実施するための最良の形態】

【0017】

次に、添付図面に示した実施形態に基づき、本発明を更に詳細に説明する。図 1 及び図 2 は、本発明の測定方法における法線ベクトルを計測する原理を示し、光の直進性を利用して被測定物 1 の表面上における各点の法線ベクトルを測定するのである。具体的には、2 軸 2 組のゴニオメータと、その回転中心間の距離を変える 1 軸の直進運動（Y 軸）とで構成されている。1 組のゴニオメータは試料系 2 を構成し、その可動部に被測定物 1 を保持し、もう 1 組のゴニオメータは光学系 3 を構成し、その可動部に光源と検出器  $D$  を設けている。光源と検出器  $D$  の動きは一体化している。具体的な測定装置の構造は特許文献 1 に示されている。

30

【0018】

本実施形態における被測定物の表面形状の測定方法は次の通りである。計測中、試料系 2 の 2 軸ゴニオメータの回転中心は不動であり、この回転中心の Y 軸座標  $R_y$  は一定の値をとる。更に、計測中、被測定物表面から検出器  $D$  までの光路長  $L$  が一定になるように、1 軸の直進運動を用いて調整する必要がある。まず、2 軸 2 組（ $\theta_1, \theta_2$ ）、（ $\theta_3, \theta_4$ ）の回転運動により、計測基準点  $A_0$  の法線ベクトルを計測する。それには、被測定物表面上の計測基準点  $A_0$  への入射光とその点での反射光とが重なるように調整する。そのとき、その点の法線ベクトルは光線の方向と等しくなる。最初の計測基準点  $A_0$  を原点（0, 0, 0）とし、法線ベクトルと一致した光線の方向と、光源の位置調整用座標系である Y 軸を一致させ、更に、その軸上に試料系 2 の回転中心を設定する。そのときの光学系 3 の位置座標を  $T_0(0, Y_0, 0)$ 、測定系の Z 軸周りと X 軸周り、及び試料系 2 の Z 軸周りと X 軸周りの角度を（ $\alpha, \beta$ ）=（0, 0）、（ $\gamma, \delta$ ）=（0, 0）とする。試料系 2 の回転

40

50

中心の座標は  $S_0(0, R_y, 0)$  である。そして、光路長  $L$  と、計測基準点  $A_0$  と回転中心のずれ  $R_y$  を別の測定機を用いて測定する。

【0019】

次の計測点  $A_1(x, z)$  の法線ベクトルを求めるために、2軸( )の回転運動で  $A_1$  近傍に入射光が来るように調整する。それから、2軸( )の回転運動によって、入射光と反射光を一致させ、4分割フォトダイオード(検出器D)を用いた零位法により法線ベクトルを計測する。ここで、第1計測点  $A_1(x, z)$  の法線ベクトルを計測した際の、光学系3の位置座標を  $T_1(X_1, Y_1, Z_1) = (0, Y_0 + y_{01}, 0)$ 、光学系3のZ軸周りとX軸周り、および試料系2のZ軸周りとX軸周りの角度を  $(\alpha, \beta) = (\alpha_1, \beta_1)$ 、 $(\theta, \phi) = (\theta_1, \phi_1)$  とする。このときの変位量・変角量  $(y_{01}, \alpha_1, \beta_1, \theta_1, \phi_1)$  を法線ベクトル計測値とする。計測点における法線ベクトルは光学系3と試料系2の変角量より求まり、更にこの法線ベクトルから被測定物表面の傾きが求まる。また、法線ベクトル計測点の座標は、光学系の変位量・変角量、試料系の変角量、光路長  $L$  及び回転中心変位  $R_y$  から求まる。

10

【0020】

つまり、不変の値  $L$  と  $R_y$ 、法線ベクトルの計測値  $(\alpha, \beta, \theta, \phi, y_0)$  を用いて以下の数1により被測定物表面上の計測点  $A(X_A, Z_A)$  と、数2により法線ベクトル  $N(n_x, n_z)$  の導出が可能である。

【0021】

【数1】

20

$$\begin{aligned} X_A &= f(\theta, \phi, \alpha, \beta, y_0, L, R_y) \\ Z_A &= g(\theta, \phi, \alpha, \beta, y_0, L, R_y) \end{aligned}$$

【0022】

【数2】

$$N = \begin{pmatrix} n_x \\ n_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tan(\alpha - \theta) \\ \tan(\beta - \phi) \end{pmatrix}$$

30

【0023】

本測定方法では、フーリエ級数で測定面形状を近似し、最小二乗法によって、その点でのスロープ残差を最小にするフーリエ級数展開係数を求めて測定面形状を一意的に決定するのである。ここで、計測点での面のスロープ(傾き)は、法線ベクトルから算出することができる。実測データを用いてフーリエ級数形式形状関数を特定する前に、本測定方法では理想形状関数を用いて、形状残差とスロープ残差を共に所定の精度以下になるようなフーリエ級数展開の次数  $n$  を見出すことが特徴である。ここで、ある点の傾きは理想形状関数の一階微分から容易に算出することが可能である。

40

【0024】

通常、被測定物の表面形状は、球面、円筒面、放物面、楕円体面は勿論、非球面、さらには解析関数で表現できない自由曲面でも光学系の設計において正確に関数で表され、その理想形状関数に近づけるように超精密に加工されるのである。従って、本測定方法において理想形状関数から導かれる理想データを用いて形状残差とスロープ残差を共に所定の精度以下になるように次数  $n$  を決定することは、何ら実用的価値を損なうものではない。そして、フーリエ級数展開の次数  $n$  が決まると、二次元形状の場合には少なくとも  $n$  個の計測点、三次元形状の場合には少なくとも  $n \times n$  個の計測点で、座標と法線ベクトルを計測するのである。こうすることによって、計算誤差が保証された状態で、実測データを用いてフーリエ級数形式形状関数を求めることが可能となる。一般には、フーリエ級数展開

50

を用いて最小二乗法によって任意曲面を近似する場合、座標（形状）の残差を最小にするが、本測定方法では、提案した法線ベクトル形状計測法に合わせて、形状残差とともに、スロープの残差を最小にすることが特徴である。

【0025】

以上説明した形状を導出する一連の手順を形状導出アルゴリズムPと称することにする。2軸2組のゴニオメータから得られる4つの角度データ（ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ ）と1軸直進ステージから得られる1つの距離データ（ $y_0$ ）とが、各計測点毎に得られる。つまり、計測点 $A_i$ 毎に、計測値セット（ $\theta_{1i}, \theta_{2i}, \theta_{3i}, \theta_{4i}, y_{0i}$ ）が得られる。そして、これらの実測データを用いて形状導出アルゴリズムPによって形状を導出するのである。ここで、特定の光路長Lの値で導出した形状を $P(L)$ と表す。尚、光路長Lは、初期状態において原点と測定系3の回転中心までの距離として、別途測長機を用いて測定しておき、その実測値 $L_0$ を得るが、被測定物の要求される測定精度より遥かに大きな計測誤差を有している。各計測点で光路長Lが一定になるように1軸直進ステージを駆動するが、それには検出器Dを構成する距離モニター用の4分割フォトダイオードの出力が一定になるようにフィードバック制御する（特許文献1参照）。尚、形状測定装置に組み込み、光路長Lをモニターする機構は他のものでも良い。

【0026】

そして、本発明は、光源から出射された計測ビームと被測定物1の表面で反射された反射ビームが完全に重なるように、2軸2組のゴニオメータを制御するとともに、光検出器Dと被測定物表面間の光路長Lが一定になるように1軸直進ステージを制御して、被測定物表面の任意計測点を計測し、各計測点毎に、2軸2組のゴニオメータから得られる4つの角度データと1軸直進ステージから得られる1つの距離データとからなる計測値セットを取得する。この計測値（ $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, y_0$ ）は、計測基準点 $A_0$ を原点とし、原点からの変位として取得した計測値を用いるか、あるいは前後の測定点間の差分として取得した計測値を用いる。そして、計測点の数だけの計測値セットから形状導出アルゴリズムPにより形状を導出する。この際に、光路長Lを変数として複数の形状 $P(L)$ を導出し、形状変化の収束を利用して真の光路長 $L_c$ と収束形状 $P(L_c)$ を算出するのである。

【0027】

光路長Lの変化によって形状変化の収束を見つけ出す方法には、いくつか方法がある。第1の方法は、図3に示すように、任意に設定した光路長Lに対して一定の微小変位 $\Delta L$ を与え、形状 $P(L)$ と形状 $P(L + \Delta L)$ 又は $P(L - \Delta L)$ とを比較し、形状変化が所定範囲内になるときのLの値を真の光路長 $L_c$ とし、収束形状 $P(L_c)$ を決定する方法である。実際には、光路長の実測値 $L_0$ の周囲でランダムに光路長を与えて計算する。この方法は、形状の収束性が悪く、多数の形状導出の計算が必要であり、計測に長時間を要する。

【0028】

第2の方法は、光路長Lの値を任意に変化させてL変位前と変位後の形状導出を行い、複数の形状差のデータを作成し、複数の形状差のデータの中の任意の座標において、Lの値と形状差をパラメータとした関数を導出し、その関数の極小値を計算で求め、形状差が最小になるときのLの値を真の光路長 $L_c$ とし、収束形状 $P(L_c)$ を決定するのである。

【0029】

図4は、 $R = 2000$  mm球面ミラーの中心を通る断面形状を導出した例であり、 $L = 2000$  mm、 $\Delta L = 50$  mmに設定して計測し、理想形状に対する導出形状の残差を示したグラフである。当然、 $P(L = 2000)$ は、理想形状に対する残差は全測定範囲で略零であるが、 $P(L + \Delta L = 2050)$ や $P(L - \Delta L = 1950)$ は、中心から離れるに従って理想形状から大きくなっていく。そこで、複数の形状 $P(L)$ と形状 $P(L + \Delta L)$ の対を導出し、形状の任意の座標、例えばミラー中心から20 mmの位置での形状 $P(L)$ と形状 $P(L + \Delta L)$ との形状差を取得し、これらをL軸上でプロットし、その点を通る関数が極小値をとるLの値を求め、このLの値を真の光路長 $L_c$ とするのである。

。この方法は、前述の第 1 の方法を改良したものであり、形状の収束性は若干改善されるが、十分ではない。

【 0 0 3 0 】

第 3 の方法は、二分法を用いて形状収束性を高めた方法である。この方法は、光路長  $L$  の近似値を  $L_0$  に設定するとともに、真の光路長  $L_c$  が閉区間  $[L_0 - \Delta L, L_0 + \Delta L]$  に含まれるように変位  $\Delta L$  を設定し、この閉区間内で形状  $P(L)$  を導出し、区間の中間の形状に対する区間の両端の形状の差をそれぞれ計算し、この形状差の小さい方の半区間を新たな区間とする二分法により、形状差が所定範囲内になったときの区間中間の値を真の光路長  $L_c$  とし、収束形状  $P(L_c)$  を決定する方法である。この場合、光路長  $L$  の近似値  $L_0$  を、誤差を含む実測値とし、変位  $\Delta L$  を光路長の計測誤差よりも大きな値に設定することが好ましい。勿論、近似値  $L_0$  を任意に設定し、変位  $\Delta L$  を十分大きな値に設定することも可能であるが、その場合には収束性が悪くなる。

10

【 0 0 3 1 】

第 3 の方法の詳細を図 5 及び図 6 に基づいて説明する。図 5 は、フローチャートを示し、図 6 は計算手順を可視化したものである。先ず、超精密形状計測機の光源から試料までの光路長  $L$  を  $L_0$  (誤差含む状態) と測定する。そして、超精密形状計測機を駆動して各計測点での計測値 ( $x_1, y_1, x_2, y_2, \dots, x_n, y_n$ ) を取得する。

【 0 0 3 2 】

そして、 $L_0$  の地点を  $c_1$  と定義し、おおよび  $\pm \Delta L$  変位させた地点を  $(a_1, b_1)$  とそれぞれ定義する。それから、各地点での  $L$  の値  $(a_1, b_1, c_1)$  を用いて形状導出アルゴリズム  $\Delta P(L)$  を実行する。

20

【 0 0 3 3 】

$n$  回目の施行において  $a_n$  での形状と  $c_n$  地点での形状差  $\epsilon_{a_n}$ 、および  $b_n$  での形状と  $c_n$  地点での形状差  $\epsilon_{b_n}$  を比較する。

【 0 0 3 4 】

【 数 3 】

$$\begin{aligned}\epsilon_{a_n} &= P(a_n) - P(c_n) \\ \epsilon_{b_n} &= P(b_n) - P(c_n)\end{aligned}$$

30

【 0 0 3 5 】

そして、 $\epsilon_{a_n} > \epsilon_{b_n}$  のとき、 $n = n + 1$  に更新し、 $b_{n-1}$  と  $c_{n-1}$  の中間に新しく  $c_n$  ( $c_2$ ) の地点を設け、 $c_n$  において形状を導出し、同時に  $a_n = c_{n-1}$ 、 $b_n = b_{n-1}$  に更新する。これらの関係を数 4 に示す。

【 0 0 3 6 】

【 数 4 】

$$\begin{aligned}c_n &= (b_{n-1} + c_{n-1}) / 2 \\ a_n &= c_{n-1} \\ b_n &= b_{n-1}\end{aligned}$$

40

【 0 0 3 7 】

また、 $\epsilon_{a_n} < \epsilon_{b_n}$  のとき、 $n = n + 1$  に更新し、 $a_{n-1}$  と  $c_{n-1}$  の中間に新しく  $c_n$  ( $c_2$ ) の地点を設け、 $c_n$  において形状を導出し、同時に  $a_n = a_{n-1}$ 、 $b_n = c_{n-1}$  に更新する。これらの関係を数 5 に示す。

【 0 0 3 8 】

## 【数5】

$$c_n = (c_{n-1} + a_{n-1}) / 2$$

$$a_n = a_{n-1}$$

$$b_n = c_{n-1}$$

## 【0039】

新しく設けた  $c_n$  地点での導出形状と  $a_n$ ,  $b_n$  の地点において導出された形状差 ( $a_n$ 、 $b_n$ ) を数3により計算して比較する。そして、 $a_n$ 、 $b_n$  が一定の値よりも小さくなったときに、形状が収束したと判断する。 $c_n$  の値が最終的に超精密形状計測機の光源から試料までの真の光路長  $L_0$  に収束し、絶対値が確定する。 10

## 【0040】

例えば、図6に示すように、先ず  $a_1$  と  $b_1$  を比較する。 $a_1$  および  $b_1$  がある一定の値以上であり、 $a_1 < b_1$  という結果になったと仮定すると、真の  $L$  の値は  $a_1$  と  $c_1$  の間に存在するので、新しく  $c_2$  という距離の地点で形状導出を実行する。

## 【0041】

次に、 $a_2$  と  $b_2$  を比較する。 $a_2$  および  $b_2$  がある一定の値以上であり、 $a_2 > b_2$  という結果になったと仮定すると、真の  $L$  の値は  $b_2$  と  $c_2$  の間に存在するので、新しく  $c_3$  という距離の地点で形状導出を実行する。 20

## 【0042】

それから、 $a_3$  と  $b_3$  を比較する。 $a_3$  および  $b_3$  がある一定の値以下になったとき、その地点での  $c_3$  が真の  $L$  の値となる。 $a_3$  および  $b_3$  がある一定の値以下になるまでこのルーチンを繰り返すのである。

## 【0043】

二分法による測定手順、自律校正手順を用い、光路長  $L$  の決定をおこなった。 $R = 2000\text{ mm}$  球面ミラーの形状測定において、測定条件として、 $L_0 = 2000\text{ mm}$  とし、球面ミラーの中心から  $\pm 20\text{ mm}$  の範囲を計測し、その点を中心に  $L = \pm 1.00\text{ mm}$  の地点変位させた地点で計測及び形状導出を行い、基準となる  $L_0$  地点との形状差を求めた。形状残差の大きさを比較することで光路長  $L$  の真の値がプラス方向にあるのかマイナス方向にあるのかを判別し、新たな基準点を中間に設けて計測を行うことを図5のフローチャート通りに繰り返し、 $L = \pm 0.50\text{ mm}$ 、 $\pm 0.25\text{ mm}$  の地点まで追い込み真の  $L$  の値を導出した結果を図7～図9に示す。横軸は球面ミラーの半径方向位置、縦軸は形状残差を示している。20 mm の位置は球面ミラーの中心で計測基準点である。 30

## 【0044】

図7は、 $P(2000.00)$  と  $P(2001.00)$  及び  $P(1999.00)$  との形状残差を計算した結果であり、図中実線は  $P(2000.00)$  と  $P(2001.00)$  との形状残差の絶対値、点線は  $P(2000.00)$  と  $P(1999.00)$  との形状残差の絶対値を示している。この結果、真の  $L$  は、 $2000.00\text{ mm}$  と  $2001.00\text{ mm}$  の間にあることが分かる。そこで、新たに中間地点  $2000.50\text{ mm}$  を設定する。 40

## 【0045】

図8は、 $P(2000.50)$  と  $P(2000.00)$  及び  $P(2001.00)$  との形状残差を計算した結果であり、図中実線は  $P(2000.50)$  と  $P(2001.00)$  との形状残差の絶対値、点線は  $P(2000.50)$  と  $P(2000.00)$  との形状残差の絶対値を示している。僅かに実線の方が、形状残差が小さいので、真の  $L$  は、 $2000.50\text{ mm}$  と  $2001.00\text{ mm}$  の間にあることが分かる。そこで、新たに中間地点  $2000.75\text{ mm}$  を設定する。

## 【0046】

図9は、 $P(2000.75)$  と  $P(2000.50)$  及び  $P(2001.00)$  との 50

形状残差を計算した結果であり、図中実線は  $P(2000.75)$  と  $P(2001.00)$  との形状残差の絶対値、点線は  $P(2000.75)$  と  $P(2000.50)$  との形状残差の絶対値を示している。この結果、真の  $L$  は、 $2000.50\text{ mm}$  と  $2000.75\text{ mm}$  の間にあることが分かる。

【0047】

このように、 $L$  変位させた地点での形状残差が小さい方に真の  $L$  の値を追い込むことで、3回の繰り返しにより真の光路長  $L$  の値が  $2000.50 \sim 2000.75\text{ mm}$  の間にあると求められた。これらを更に繰り返すことにより、更に値を絞り込むことが可能である。但し、図8の結果より、両区間の形状残差の差が僅かであるので、真の光路長  $L$  は  $2000.50\text{ mm}$  に非常に近い値になることは予測される。

10

【0048】

図10は、 $R = 2000\text{ mm}$  球面ミラーの三次元形状を測定した結果である。計測範囲は  $50\text{ mm} \times 50\text{ mm}$ 、フーリエ級数展開の次数  $n$  は50、測定点の数は  $51 \times 51$  個である。次数  $n$  は、理想形状に対するスロープ残差が  $1 \times 10^{-7}\text{ rad}$  以下と形状残差が  $1\text{ nm}$  以下となる条件で見出した。図10(a)は実測データを用いたフーリエ級数展開による三次元導出形状を示し、図10(b)は理想形状からのずれを示している。測定対象の球面ミラーは、中心から  $25\text{ mm}$  離れた位置で理想形状から約  $50\text{ nm}$  ずれていることが分かる。このように、フーリエ級数展開最小二乗法の形状導出法で原理的に三次元形状が正確に測定可能であることが示された。

20

【図面の簡単な説明】

【0049】

【図1】被測定物表面の座標と法線ベクトルを計測する方法の原理図である。

【図2】同じく2軸2組のゴニオメータの角度と法線ベクトル及び位置座標との関係を示す説明図である。

【図3】光路長  $L$  での形状  $P(L)$  と  $L$  だけ微小変位させた形状  $P(L \pm \Delta L)$  との関係を示す説明図である。

【図4】 $R = 2000\text{ mm}$  理想球面ミラーの  $30\text{ mm}$  範囲計測での  $L$  変位前変位後の残差を示すグラフである。

【図5】二分法を用いた自律校正により形状導出する手順を示したフローチャートである。

30

【図6】同じく二分法を用いた自律校正により形状導出する手順を可視化した説明図である。

【図7】中心値  $L_0$  が  $2000.00\text{ mm}$  で  $L = \pm 1.00\text{ mm}$  の地点間の形状残差を計算した結果のグラフである。

【図8】中心値  $L$  が  $2000.50\text{ mm}$  で  $L = \pm 0.50\text{ mm}$  の地点間の形状残差を計算した結果のグラフである。

【図9】中心値  $L$  が  $2000.75\text{ mm}$  で  $L = \pm 0.25\text{ mm}$  の地点間の形状残差を計算した結果のグラフである。

【図10】 $R = 2000\text{ mm}$  球面ミラーの三次元導出形状を示し、(a)は実測データを用いたフーリエ級数展開による導出形状を示すグラフ、(b)は理想形状からのずれを示すグラフである。

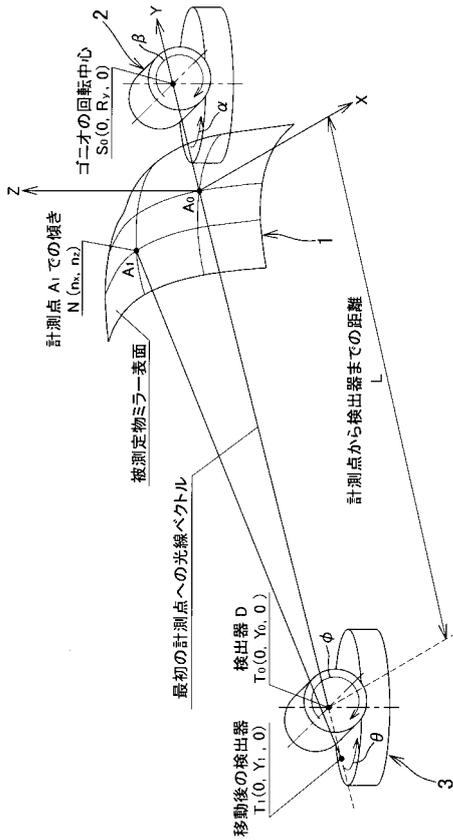
40

【符号の説明】

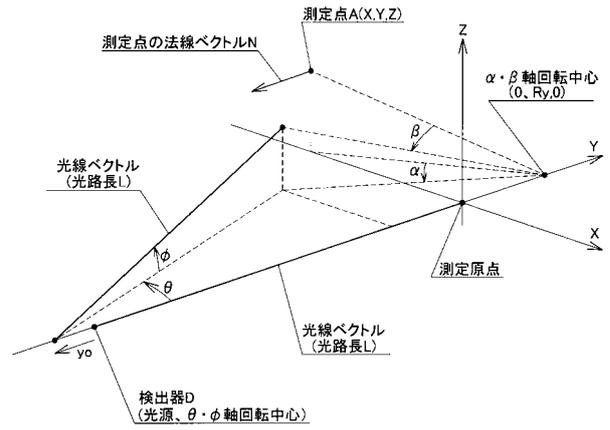
【0050】

- 1 被測定物
- 2 試料系
- 3 光学系

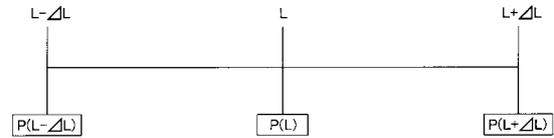
【 図 1 】



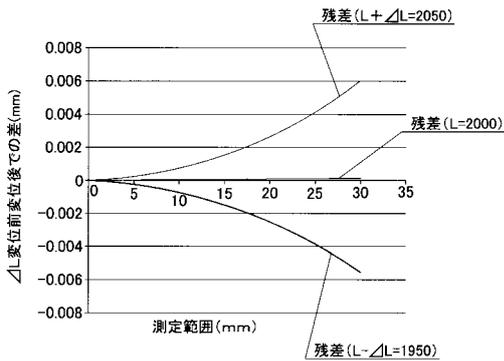
【 図 2 】



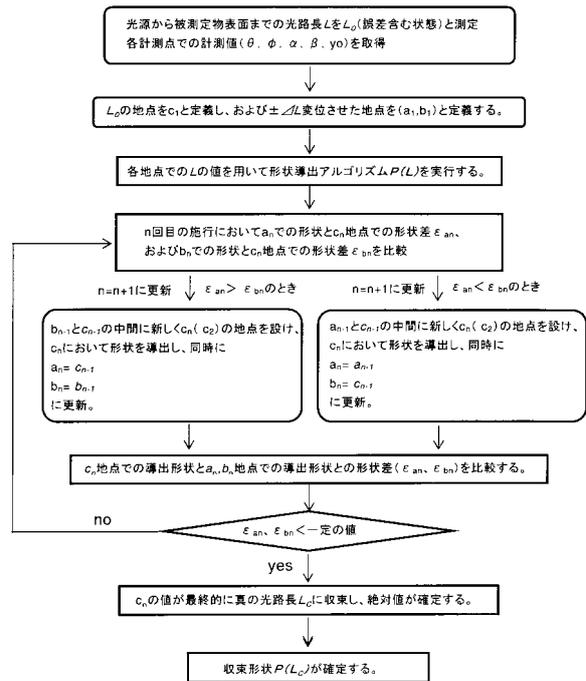
【 図 3 】



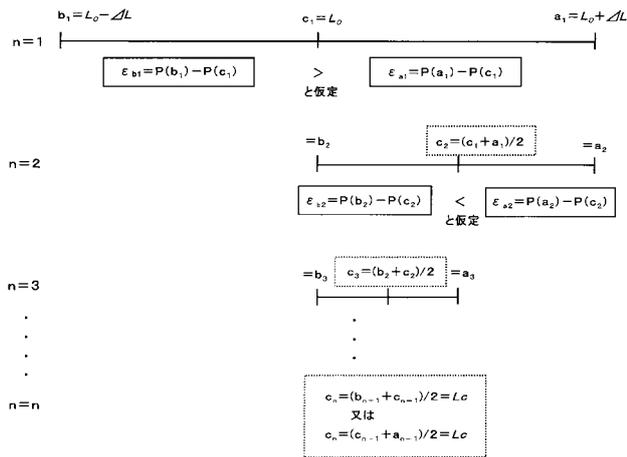
【 図 4 】



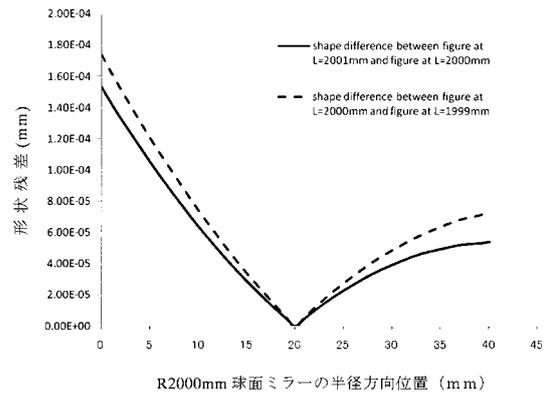
【 図 5 】



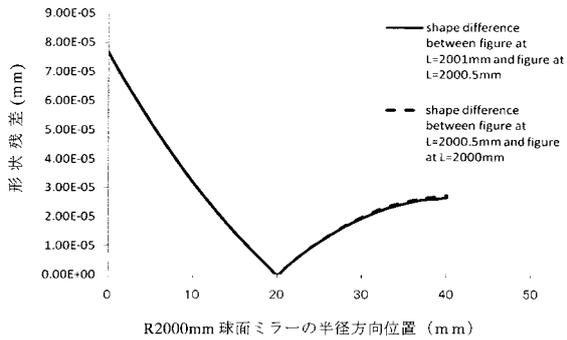
【 図 6 】



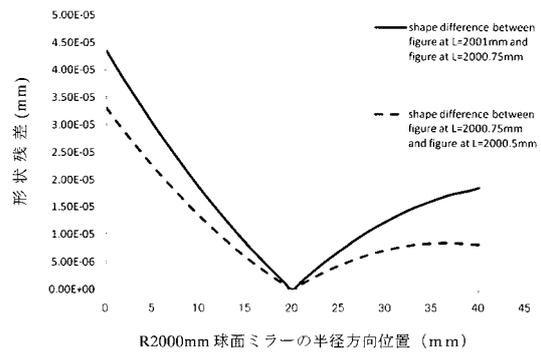
【 図 7 】



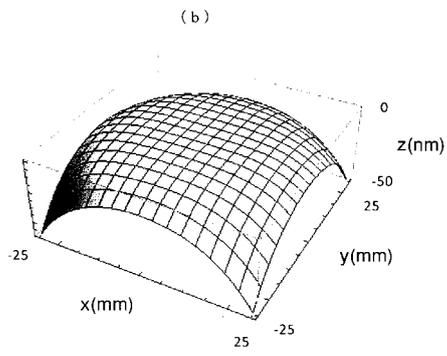
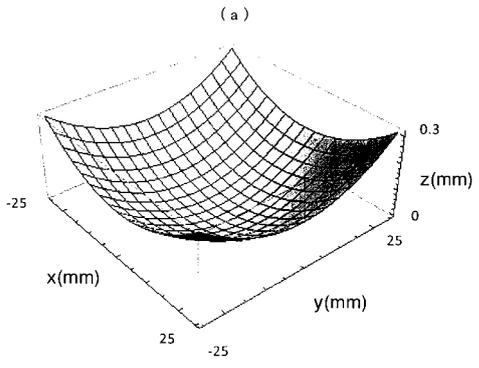
【 図 8 】



【 図 9 】



【 図 1 0 】



---

フロントページの続き

(72)発明者 遠藤 勝義

大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内

(72)発明者 東 保男

茨城県つくば市大穂1番地1 大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構内

Fターム(参考) 2F065 AA53 CC21 DD03 FF01 HH13 JJ22 MM04 PP04 QQ16 QQ18

UU05