

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 28 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2010～2013

課題番号：22226005

研究課題名(和文)次世代高精度ミラー製作のための法線ベクトル追跡型高速ナノ精度形状測定法の開発

研究課題名(英文)A new high speed nano-profiler using the normal vector tracing method for next generation ultraprecision mirrors.

研究代表者

遠藤 勝義(Endo, Katsuyoshi)

大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90152008

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 157,400,000円、(間接経費) 47,220,000円

研究成果の概要(和文)：高精度ミラー・レンズをナノ精度で形状測定することが要請されている。平面から平均曲率半径25mm以下の非球面の形状を、測定精度1nm PV以上、測定時間10min/sample以下で測定できる法線ベクトル追跡型高速ナノ形状測定法を開発した。

本装置によって、R=100,400mm,1000mm凹球面ミラーとR=46.818489mm基準球、平面ミラー、非球面ミラーの形状を測定した。非球面ミラーの形状測定において、再現性0.37nm(標準偏差)、1.60nm PV(偏差値相当)を達成した。フィゾー干渉計による形状測定と比較すると、それぞれの系統誤差範囲内である±5nm PV以下で一致した。

研究成果の概要(英文)：It is necessary to measure the high accuracy aspherical mirror and lens with nano scale precision. We succeeded to develop the high speed nano-profiler using the normal vector tracing method. The performances of the nano-profiler are as follows. The precision in other words reputability is greater than 1nm. The measuring time is less than 10min/sample.

The convex spherical mirrors with 100mm, 400mm and 1000mm radius of curvature, a reference sphere with 46.818489mm±10nm radius of curvature, plane mirror and an aspherical mirror measured by the nano-profiler. In the case of an aspherical mirror measurement, the reputability indicated by the standard deviation is 0.37nm. The reputability indicated by the deviation value equivalent is 1.60nm PV. We also compared the aspherical mirror measurement results with those obtained using a Fizeau interferometer. The two measurement results of the mirror were consistent within the range of the each equipment systematic error.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学/生産工学・加工学

キーワード：形状測定 高精度ミラー 非球面ミラー 法線ベクトル ナノ精度 形状誤差 走査型形状測定装置 5軸同時制御

1. 研究開始当初の背景

第三世代放射光施設やX線自由電子レーザー(X-ray Free Electron Laser; XEEL)や波長 13.5nm の極紫外光を用いたリソグラフィ(Extreme Ultraviolet Lithography; EUVL)、また、人工衛星搭載イメージャーや医療機器、高級カメラ、プロジェクター等の多くのデジタル映像機器からは、多種多様な形状を持つ高精度ミラー・レンズ等の光学素子が要請されている。具体的には、第三世代放射光施設や XEEL の硬 X 線、EUVL の軟 X 線領域の次世代高精度ミラーは、非球面量 $15\mu\text{m}$ 以上に対して形状誤差 1nm PV の精度が求められている。さらに、人工衛星搭載のイメージング光学素子は、球面と比較して光学特性(明るく、高解像)が向上し、光学系の小型化と軽量化が図れることから、非球面ミラー必要となる。この場合、非球面量は $100\mu\text{m}$ を超え、形状誤差も 10nm PV 以下が要求される。

このような次世代超高精度ミラー・レンズ製作のためには、超精密加工技術と超高精度計測技術の大幅な進展が不可欠であり、計測技術は加工技術に対して一桁以上高い精度が必要である。空間波長 1mm 以下の表面粗さやうねりの計測技術は、原子スケールの分解能をもつ走査型トンネル顕微鏡や原子間力顕微鏡、走査型白色干渉顕微鏡等があり、現状でも要求精度を満たしている。一方、空間波長 1mm 以上の形状測定技術には、位相シフトフィゾー干渉計やスティッチング干渉計、三次元測定機等があるが、必ず基準面や基準となる直線運動機構が必要であり、要求される自由曲面で 1nm PV の形状測定精度を満たしていない。このように、次世代高精度ミラー製作に不可欠な自由曲面で形状精度 1nm PV を測定できる計測法は現時点では皆無である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これら次世代光学素子を製作するために、最大 300mm までの非球面(自由曲面)において、非球面量 $10\mu\text{m}$ から 1mm の形状を、再現性 1nm (標準偏差)以上、不確かさ 10nm 以下、スロープエラー $0.1\mu\text{rad}$ 以下、測定時間 5min/sample 以下で測定できる法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定システムを構築することである。

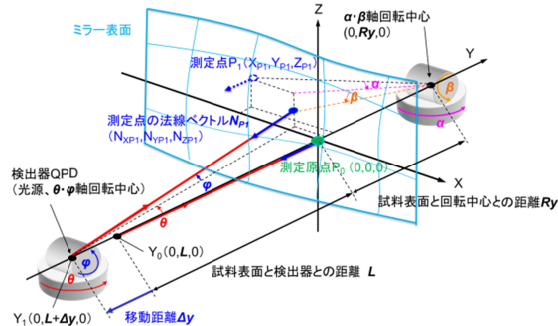


図1 法線ベクトル追跡による形状測定の原理

図1に、独自に提案した自由曲面の形状を測定する法線ベクトル追跡による高速ナノ精度形状測定法の原理を示す。本形状測定法は、レーザーの直進性を活用し、並進運動より高精度な回転運動を用いることによって、ミラーの法線ベクトルとその測定点座標を測定することから形状を求める。光源から射出されたレーザー光がミラー面で反射され、光源と光学的に同等の位置にある検出器4分割フォトダイオード(Quadrant Photo Diode; QPD)の中心に反射光が戻るように、2軸2組のゴニオメータを調整すれば、その点での法線ベクトルが求まる。また、同時にy方向の並進ステージで、光路長Lが一定になるように調整すれば、結果的に測定点座標(Xp,Zp)が求まる。光源とQPDで構成された光学ヘッドと2軸ゴニオメータと並進1軸からなるステージを光学系、試料が保持される2軸ゴニオメータを試料系と呼ぶ。このとき、測定時間を短縮するために、試料系2軸ゴニオメータを数値制御で測定点座標を変え、同時に、光学系の2組のゴニオメータを用いて法線ベクトルを追跡し、またY軸を光路長Lが一定になるように、常に数値制御する。このような5時同時制御によって、測定時間 5min/sample を達成する。本測定法は、基準面を用いることなく、原理的に測定形状に制限が無いすなわち自由曲面の形状測定が可能である。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するためには、要求測定精度を満たす法線ベクトル追跡型高速ナノ形状測定装置を開発しなければならない。その形状測定装置の概要を図2に示す。本装置は光学系2軸ゴニオメータと光路長調整用並進1軸ステージ、試料系2軸ゴニオメータの計5軸構成である。光学系には、独立した方向に回転する2軸のゴニオメータ(θ, φ)と、1軸の並進ステージ(y)がある。光学系に搭載される光学ヘッドは、光源のレーザーと、それと光学的に等価の位置にある検出器QPDから構成される。そして、2軸の回転中心にレーザーとQPDが配置される。試料系には、独立した方向に回転する2軸のゴニオメータ(α, β)がある。ロータリーエンコーダ

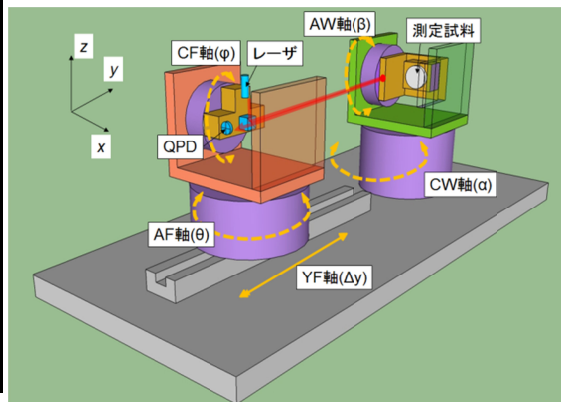


図2 高速ナノ形状測定装置の概要図

は分解能が 1.5 nrad で、並進ステージの位置決め精度は 1 nm である。法線ベクトルは、レーザー光を試料表面に入射させ、試料系 2 軸ゴニオメータを数値制御し、その反射光が QPD に返ってくるように光学系 2 軸ゴニオメータを数値制御する。同時に、レーザーの光路長 L が一定となるように、1 軸の並進ステージを数値制御する。この時、ゴニオメータの回転角($\theta, \varphi, \alpha, \beta$)と QPD の出力値から法線ベクトルが算出できる。また、その座標は、各ゴニオメータの回転角と並進ステージの変位量を読み取り、光路長 L を決定することから求まる。また、4 軸のロータリーエンコーダと 1 軸のリニアエンコーダ、光検出器である QPD の出力を同期して取込むデータタイミングシステムを構築している。本測定法では、エンコーダおよび QPD 出力を同時に取得することによって、5 軸制御システムの定常偏差の影響を受けることなく、法線ベクトルとその測定点座標が決まる。図 3 に 5 軸同時制御システムのブロック線図を示す。

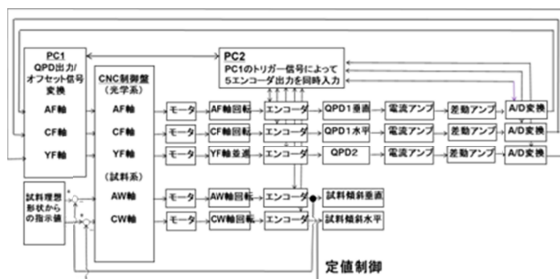


図 3 5 軸同時制御システムのブロック線図

図 4 に法線ベクトルを検出する光学ヘッドの概要図を示す。レーザー光源として、波長 670 nm の横単一モード半導体レーザーを用いる。レーザー光は、オプティカルファイバーを通過した後、ファイバー端に取り付けられたコリメーターレンズによって平行光となり出射される。出射されたレーザーは、集光レンズ 1 によって集光される。集光後再び広がった光は、偏光ビームスプリッターによって進行方向を 90° 曲げられる。その後、 $\lambda/4$ 波長板によって直線偏光を円偏光に変換された光は、集光レンズ 2 を通過後、試料表面上に $\phi = 0.3$ mm のスポットとして入射する。入射したレーザー光は試料によって反射され、再度集光レンズ 2、 $\lambda/4$ 波長板を通過した後、偏光ビームスプリッターを直進し、光検出器 QPD 上に集光される。このとき、

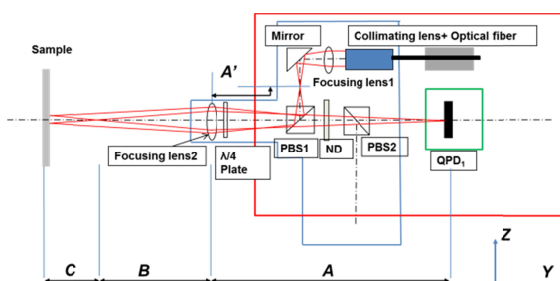


図 4 光学ヘッドの概要図

本光学素子の配置では、試料ミラーの傾きに対して、QPD 上のレーザースポットの移動量 x は AC/B によって求まる。なお、現在の光学ヘッドは曲率半径 $R = 400$ mm 凹球面ミラーの法線ベクトルが $0.1 \mu\text{rad}$ 変化した時に、QPD 上での集光位置が 10 nm 変位する光学配置である。このように、レーザー各光学素子配置については、使用する光学素子の焦点距離と光学的な関係から一意に決定できる。

また、測定点座標と法線ベクトルから形状を求める必要がある。測定した測定点座標と法線ベクトルから形状を導出する方法は、法線ベクトルが形状の傾きそのものであることを考えれば、傾きを積分すれば形状が求まる。しかし、傾斜角積分法では測定点数が増大するにつれ形状の誤差が蓄積する。そのため、測定した法線ベクトルを、フーリエ級数による形状のモデル関数の微分(傾き)にフィッティングすることで形状を復元するアルゴリズム、フーリエ級数最小二乗法を開発した。特に、フィッティング関数の基底関数の最適化が不可欠である。

さらに、形状測定の偶然誤差を最小限に抑えるために、高速ナノ精度形状測定装置はウルトラクリーン実験施設内に設置した。ウルトラクリーン実験施設は、清浄度がクラス 1、微振動が 0.1 gal 以下で、温度は ± 0.1 になるように制御されている。そこで、精度 1 nm PV の形状測定を実現するために、ウルトラクリーン実験施設内に、さらに温度の変化が ± 0.01 になる恒温チャンバーを設計・製作し、ナノ形状測定装置を設置した。この測定環境は、形状測定の再現性 1 nm (標準偏差) 以上を実現するために必須である。

4. 研究成果

(1) ロータリーエンコーダの校正

ナノ精度形状測定法はその測定原理から、角度測定の精度と確かさを向上することが不可欠である。採用したロータリーエンコーダの精度は、 1.5 nrad で充分である。確かさは、現在市販最高クラスのロータリーエンコーダでも $\pm 2 \mu\text{rad}$ 程度であり、形状測定精度 1 nm PV を達成するためには不十分である。そこで、新たに 6 センサーを持つロータリーエンコーダを独自に開発し、産業技術総合研究所の角度国家標準器により、ロータリーエンコーダを絶対校正した。その結果、装置への取付け時の変動を考慮しても、角度の確かさは、 $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ ($\pm 0.024 \text{ arcsec}$) となった。さらに、オンマシンの状態でも、外部取付けロータリーエンコーダによって確かさが変わらないことを確認した。

(2) 凹球面ミラーの形状測定

3 種類の曲率半径 $R = 100, 400, 1000 \text{ mm}$ の凹球面金属ミラーを高速ナノ精度形状測定装置によって測定した結果について述べる。超精密切削加工した 3 種類の曲率半径の凹球面金属ミラー(東芝機械製)の形状を測定し

た。測定範囲 $20 \times 20 \text{ mm}^2$ をラスタースキャン方式で測定した。得られた法線ベクトルと座標から、フーリエ級数展開最小二乗法を用いて形状を導出した。代表して曲率半径 $R=400 \text{ mm}$ の凹球面金属ミラーの理想形状からの形状誤差の平均を図5に示す。 $R=100, 400, 1000 \text{ mm}$ の凹球面ミラー形状誤差の平均は、 66.6 nm PV , 43.4 nm PV , 44.9 nm PV である。次に、各測定点での標準偏差を測定面全体の平均標準偏差で再現性を評価した。本測定装置の再現性（標準偏差）は、それぞれ 0.65 nm , 0.29 nm , 0.60 nm となる。このように、再現性の目標を達成している。

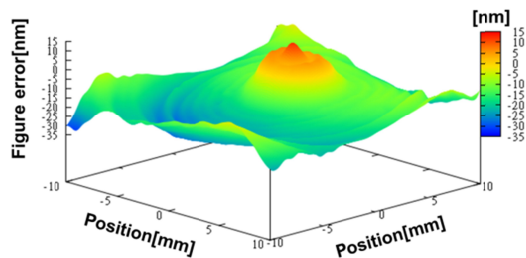


図5 曲率半径 $R=400 \text{ mm}$ の凹球面ミラーの形状誤差の測定結果

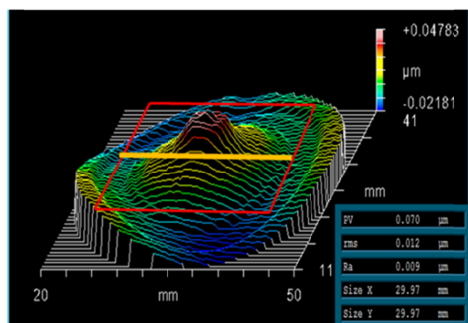
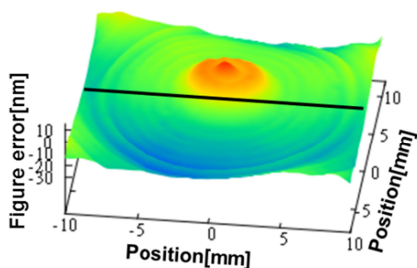


図6 $R=400 \text{ mm}$ 凹球面ミラーの本測定装置（上）と位相シフトフィゾー干渉計（下）による形状測定結果の比較

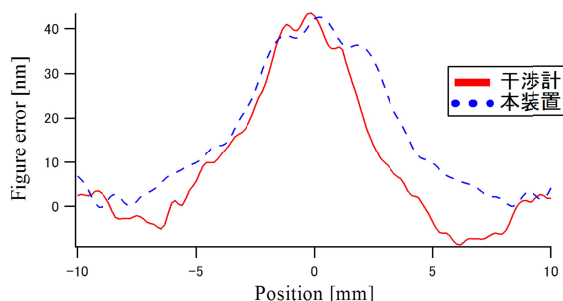


図7 $R=400 \text{ mm}$ 凹球面ミラーの本測定装置と位相シフトフィゾー干渉計による断面曲線測定結果の比較

次に、高速ナノ形状測定装置による形状測定結果の妥当性を検証するため、位相シフトフィゾー干渉計による $R=400 \text{ mm}$ の凹球面ミラーの形状測定結果と比較する。図6に本測定装置と位相シフトフィゾー干渉計との比較を示し、図7に図6のラインで示した断面曲線測定結果の比較を示す。本測定装置の形状誤差は 43.4 nm 、位相シフトフィゾー干渉計の形状誤差は、 45.0 nm PV である。

二つの測定結果が異なる要因は、高速ナノ形状測定装置とフィゾー干渉計が持つ、それぞれの測定装置の 10 nm 程度と推定される系統誤差である。このように測定結果は、それぞれの測定装置の系統誤差範囲内で一致している。なお、 $R=100, 1000 \text{ mm}$ 凹球面ミラーでも同様の結果である。

(3) 基準球の形状測定

曲率半径 $R=46.818489 \text{ mm} \pm 10 \text{ nm}$ の Si 基準球の形状を測定する。形状誤差は 49 nm PV 、酸化膜厚は $5 \pm 1 \text{ nm}$ である。基準球を測定する際には、試料中心と試料系の回転中心を一致させることによって、試料系の α 軸および β 軸の走査だけで試料全面を測定することが可能になる。 α 軸と β 軸を常に回転させ、試料表面を走査し、その結果、らせん状の走査となる。 α 軸と β 軸を同時に一定の速度で回転させて、緯度 $70-90 \text{ degree}$ の3次元測定した。導出された形状から球面へのフィッティングを行い、形状誤差を求めた。形状誤差の平均を図8に示す。図8より形状誤差の大部分を占めるものは回転の周方向に低次の周期的な誤差である。これは、測定試料の基準球の偏心などのアライメント誤差や装置の組立て誤差に依存するもので基準球の形状誤差ではない。そこで、1次の周期成分を取り除く補正を行った。この補正を施した測定結果を図9に示す。補正を行うことで形状誤差は 8.02 nm PV になる。本基準球は、 49 nm PV の形状誤差を有していることから、本測定結果は基準球の仕様範囲内である。基準球の仕様を反映した妥当な形状測定結果である。

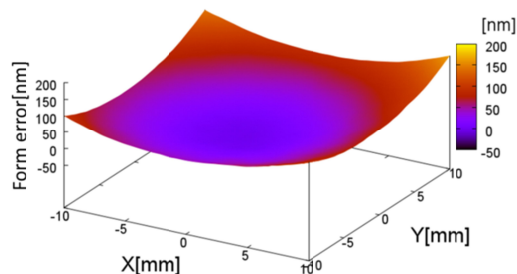


図8 基準球の形状誤差

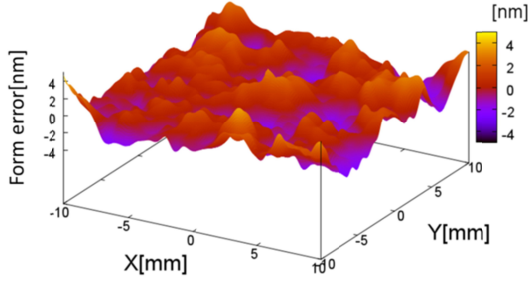


図 9 補正後の基準球の形状誤差

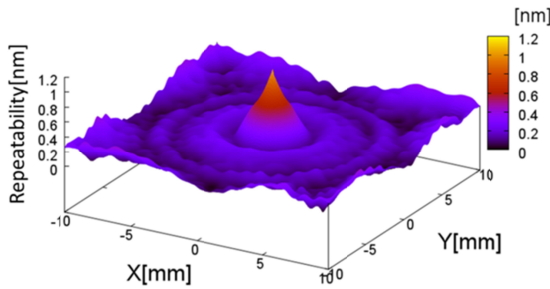


図 10 基準球の形状測定のリピータビリティ (標準偏差)

次に、測定のリピータビリティを求める。形状誤差の各座標について測定のリピータビリティをそれぞれ求め、図 10 のようにマッピングし、各座標のリピータビリティを平均したものをリピータビリティとする。リピータビリティは 0.17 nm (標準偏差) と目標を超える良い結果である。しかしながら中心から直径約 5 mm の範囲のリピータビリティが他の範囲と比べて悪い。現在、中心部のリピータビリティが悪い原因を特定することはできない。しかし、中心部のリピータビリティが悪いとはいえ、 $R=46.818$ mm と曲率半径が小さい基準球をリピータビリティ 0.17 nm (標準偏差) で測定できている。目標である形状測定のリピータビリティ 1 nm PV 以上を十分に達成している。

(4) 非球面ミラーの形状測定

超精密切削によって加工した非球面凹球面金属ミラーを測定した。非球面形状は以下のように示される。

$$X = \frac{Y^2/R}{1 + \sqrt{1 - (K+1)Y^2/R^2}} + \sum_{n=0}^m C_n Y^n$$

$$R = 500.000 \quad C_2 = 0.00000E-00$$

$$C_4 = 588234134322E-09$$

$$C_6 = -6.02541612923E-15$$

$$K = 0.0000 \quad C_8 = -2.71914997789E-21$$

測定範囲 20×20 mm² をラスタースキャン方式で形状測定し、得られた測定結果と理想形状との差から形状誤差を求めた。形状誤差を平均した結果を図 11 に示す。また、形状誤差の最大値と最小値の差から非球面ミラーの表面の形状誤差を算出すると 59.2 nm PV である。

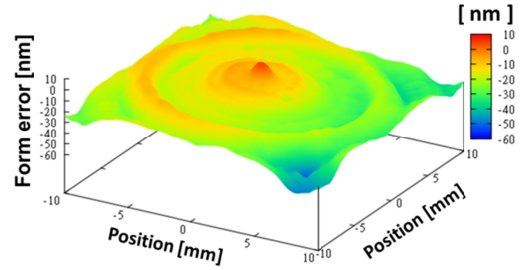


図 11 非球面ミラーの形状誤差の測定結果

また、各測定点での標準偏差をとり、その平均値を再現性として評価する。得られた再現性は 0.371 nm (標準偏差) であり、目標の 1 nm 以上を達成している。

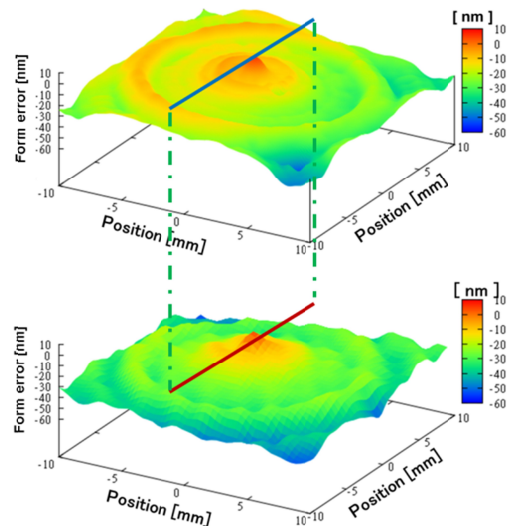


図 12 非球面ミラーの本測定装置 (上) と位相シフトフィゾー干渉計 (下) による形状測定結果の比較

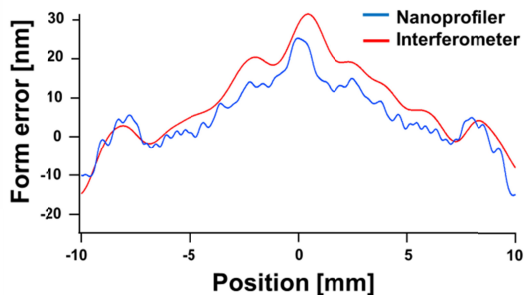


図 13 球面ミラーの本測定装置と位相シフトフィゾー干渉計によるセンターラインの断面曲線測定結果の比較

また、これまでの本測定装置による非球面ミラーの形状測定結果を評価するため、ヌルレンズを用いた位相シフトフィゾー干渉計による形状測定結果と比較する。図 12 に本測定装置と位相シフトフィゾー干渉計との比較を示す。ナノ形状測定装置の形状誤差は 59.2 nm PV であり、位相シフトフィゾー干

渉計での形状誤差は 61.4 nm PV である。さらに図 13 に図 12 のラインで示した断面曲線測定結果の比較を示す。このように、二つの形状測定結果の差は約 10 nm の範囲内で一致しており、それぞれの測定装置の系統誤差範囲内で一致していると結論できる。

このように、高速ナノ精度形状測定装置は、偶然誤差である再現性（標準偏差）において目標である 1 nm 以上を達成している。系統誤差に関しては、位相シフトフィゾー干渉計と同程度であると推定できる。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 5 件)

R. Kudo, K. Okuda, K. Usuki, M. Nakano, K. Yamamura, K. Endo, Three-dimensional surface figure measurement of high-accuracy spherical mirror with nanoprofiler using normal vector tracing method, Review of Scientific Instruments, vol.85 (2014) 045101 ~ 045105. 査読有 DOI:10.1063/1.4869473

Koji Usuki, Takao Kitayama, Hiroki Matsumura, Takuya Kojima, Junichi Uchikoshi, Yasuo Higashi and Katsuyoshi Endo, Profile measurement of concave spherical mirror and a flat mirror using a high-speed nanoprofiler, Nanoscale Research Letters, vol.8 (2013) 231 ~ 241. 査読有 DOI:10.1186/1556-276X-8-231

Hiroki Matsumura, Daisuke Tonaru, Takao Kitayama, Koji Usuki, Takuya, Kojima, Junichi Uchikoshi, Yasuo Higashi, Katsuyoshi Endo, Effects of a laser beam profile to measure an aspheric mirror on a high-speed nanoprofiler using normal vector tracing method, Current Applied Physics, vol.12 (2012) S47-S51. 査読有 DOI:10.1016/j.cap.2012.04.022

〔学会発表〕(計 27 件)

Kenya Okita, Profile measurement of a convex spherical mirror by high-speed nanoprofiler using normal vector tracing method, ASPEN2013, 2013,11, Taipei, Taiwan

Kohei Okuda, Development of high-speed nanoprofiler using normal vector tracing method for high-accuracy mirrors, SPIE Optifab 2013, 2013.10, Rochester, New York,

USA.

Koji Usuki, Development of a nanoprofiler using the follow-up normal vector to the surface for next-generation ultraprecise mirrors, SPIE Optical System Design, 2012.11, Barcelona, Spain.

Takuya Kojima, Absolute calibration of the rotary encoder considering the influence on-machine for development of High-Speed Nanoprofiler, 14th International Conference on Precision Engineering, 2012.11, Hyogo Japan.

Takao Kitayama, Development of a high-speed nanoprofiler using normal vector tracing, SPIE Optics+Photonics, 2012.8, San Diego, California, USA.

Takao Kitayama, Development of a High-Speed Nanoprofiler Using Normal Vector Tracing, 4th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2011.11, Hong Kong, China

〔図書〕(計 1 件)

遠藤 勝義, 超精密加工と表面科学-原子レベルの - 生産技術, 2014, 71-82, 281-289

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称: 法線ベクトル追跡型超精密形状測定法

発明者: 遠藤勝義、打越純一

権利者: 国立大学法人大阪大学

種類: 特許権

番号: G20110007

出願年月日: 平成 23 年 6 月 11 日

国内外の別: 国外

〔その他〕

超精密科学研究センターHP

<http://www.upst.eng.osaka-u.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

遠藤 勝義 (ENDO KATSUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 90152008

(2) 研究分担者

打越 純一 (UCHIKOSHI JYUNICHI)

大阪大学・工学研究科・招聘教員

研究者番号: 90273581