

機関番号：14401

研究種目：基盤研究（A）

研究期間：2007～2010

課題番号：19206019

研究課題名（和文） 次世代高精度ミラー製作のための傾斜角積分型超精密形状計測法の開発

研究課題名（英文） Development of a surface gradient integrated profiler for the next generation high accuracy mirror

研究代表者

遠藤 勝義 (ENDO KATSUYOSHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90152008

研究成果の概要（和文）：

第三世代放射光施設やX線自由電子レーザー、極紫外光リソグラフィーから求められる次世代高精度非球面ミラーを製作するために、高精度光学素子の非球面形状を、測定精度1nm PV以上、スロープエラー0.1 $\mu$ rad以下、測定時間5min/sample以下で測定できる傾斜角積分型超精密形状測定法を開発した。本装置によってR=400mmの球面ミラーの形状を計測し、繰返し精度が1nm以上であることを明らかにした。また、同じ球面ミラーを位相シフトファイゾー干渉計と三次元測定機で測定した結果、それぞれの誤差範囲10nm程度で測定形状が一致した。絶対形状測定の実現には、系統誤差を解明することが不可欠である。

研究成果の概要（英文）：

In order to develop X-ray free electron laser sources, the ultraprecision asymmetric mirrors which realize nano-focusing and high coherence are indispensable. In industry, the high accurate asymmetric mirrors are required for extreme ultraviolet lithography which is a promising fabrication technology for semiconductor devices.

A surface gradient integrated profiler can be developed for the next generation high accuracy asymmetric mirrors. The new profiler is based on the straightness of laser light without a reference surface. The performances of the profiler are as follows. The accuracy of measurement of the mirror profile is 1 nmPV. The resolution of measurement of the rotation angle is 0.17  $\mu$ rad. And the time of measurement is 5 min/sample. A spherical mirror with a radius of 400 mm is measured by the profiler. The repeatability of two-dimensional profile measurements is less than 1 nm. The profile of the spherical mirror with R = 400 mm to be measured by using the profiler is compared with that measured by using the Fizeau interferometer and coordinate measuring machine. The profile measured by using the profiler coincides with that measured by using other profilers, within approximately 10 nm. These differences of profiles are based on systematic errors, respectively.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	8,700,000	2,610,000	11,310,000
2008年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2009年度	5,800,000	1,740,000	7,540,000
2010年度	0	0	0
年度			
総計	29,000,000	8,700,000	37,700,000

研究分野：精密科学、物理計測

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、非球面光学素子、法線ベクトル、5軸同時制御、形状誤差、絶対形状測定、超精密加工

## 1. 研究開始当初の背景

第三世代放射光施設によって、高輝度だけでなく、高コヒーレンシーをもつ X 線を扱うことが可能になった。さらに、次世代の光源として X 線自由電子レーザーが日本、ヨーロッパ、米国でそれぞれ計画されている。これらの光源の実用化に向かって、従来の性能を覆す科学機器や分析機器が数多く考案されている。このようなナノスケールの空間分解能を持つ硬 X 線は、ナノテクノロジー、材料、バイオテクノロジー、医療、製薬分野での幅広い利用が期待されている。一方、産業応用では次世代半導体製造技術として、波長 13.5 nm の極紫外光 (Extreme Ultra-Violet; EUV) を用いた EUV リソグラフィ技術の開発が急務である。

これらの光源をナノメートルサイズの空間分解能を持たせてその特徴を發揮させて活用するには、硬 X 線、EUV の集光および結像光学系のミラーに対して、回折限界に迫る分解能が求められる。つまり、次世代超高精度非球面ミラーとして、表面粗さ 0.5nm PV、形状精度 0.08nm RMS が要請されている。このような次世代超高精度ミラー製作のためには、超高精度計測技術の大幅な進展が不可欠である。空間波長 1mm 以下の表面粗さやうねりの計測技術は、原子レベ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、位相シフト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 以上の形状計測技術は、被測定物に  $\phi$  1mm 程度の細いレーザービームを照射して、得られる反射光の位置ズレ量を測定して被測定物表面の傾斜角を求める、Long Trace Profiler (LTP)がある。LTP は、0.5  $\mu$  rad RMS の測定精度 (3nm RMS) が得られているが、その測定範囲は  $\pm$  5mrad(100mm の長さで曲率半径が  $\pm$  500m)に限られており、直線上断面の二次元形状のみの測定である。また、EUVL 用ミラーの計測に関しては、Point Diffractive Interferometer や Line Diffraction Interferometer によって、0.3nm RMS の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、原理上凸面や一般的な非球面の形状計測が困難である。位相シフトフィジック干渉計やステッピング干渉計も、参照面が不可欠で、曲率の大きいミラーには対応できず、また被測定物も 100mm 程度までしか測定の実績がない。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 0.08nm RMS を測定できる計

測法は現時点では皆無である。

このように、高精度光学素子の三次元の自由曲面形状を、1nm PV の精度で測定することができる、従来にない独創的な超精密形状計測装置の開発が求められている。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、XFEL や EUVL から要請される次世代高精度非ミラーの非球面形状を、測定精度 1nm PV 以上、スロープエラー 0.1  $\mu$  rad 以下、測定時間 5min/sample 以下で測定できる傾斜角積分型超精密形状測定法を開発することである。

本計測方法は、レーザーの直進性を用いてミラーの任意測定点(座標)の法線ベクトルを 2 軸 2 組のゴニオメータによって測定することから形状を求める。これまで広く用いられている干渉法と異なり、基準面を必要としない点が大きな特徴である。このように、直進運動より精度の高い回転運動を用いることで、広範囲に亘って超精密な形状を計測する方法である。さらに、光路長 L は常に一定に保つ制御すれば、法線ベクトルの測定位置を求めるために必要な直線 1 軸の動きが分かり、測定点座標が算出できる。

すでに、基礎実験装置によって種々のミラーを、二次元計測とは言えナノメートルオーダーの精度で形状計測することに成功している。しかしながら、曲率やサイズの大きいミラーの三次元計測を行うためには、測定環境中の温湿度制御や微振動対策、測定全範囲にわたるロータリーエンコーダの絶対角度校正、測定の高速度や膨大なデータを処理するためのアルゴリズムの開発等が必要である。また、本測定装置は試料側も回転運動させるため、重力の影響で測定中に変形しないミラーの保持方法も新たに開発しなければならない。

なお、本形状測定法は、基準面を用いることなく、直線運動より高精度な測定が可能な回転運動を用いることから、法線ベクトルとその測定点座標を測り、ミラーの形状を導出する独創的な形状測定法である。したがって、原理的に測定形状に制限がなく、自由曲面の計測に対応している。

## 3. 研究の方法

初年度は、傾斜角積分型超精密形状測定装置を設計する。2年度目は設計した装置を製作するとともにステージ系の系統誤差を明らかにするとともに、光学系の法線ベクトル

角度測定における感度を評価する。3年度目は、試料系2軸のゴニオメータを使用せずに形状測定が可能なR=400mm凹球面ミラーの形状を測定する。また、その結果を、位相シフトフィゾー干渉計と三次元測定機で測定した結果とを比較することによって、それぞれの測定誤差について考察する。

#### (1) 傾斜角積分型超精密形状測定装置の設計

##### ① 光学系・試料系の設計

本計測装置は、Y軸直進ステージに載る2軸ゴニオメータ( $\theta, \phi$ )にレーザー光源と4分割位置検出器(QPD)からなる光学系と、ミラー保持具(試料ホルダー)が載る2軸ゴニオメータ( $\alpha, \beta$ )からなる試料系によって構成されている。光源から出射されたレーザービームはミラーに反射され、QPDの中心に戻るよう2軸2組のゴニオメータを制御する。また、ミラー表面とQPD間の距離Lが一定になるようY軸ステージを制御する。このときのゴニオメータの回転角度とステージの動きをエンコーダから読み取ることによってミラー面の法線ベクトルとその測定点座標が求まる。本計測法の精度は、ロータリーエンコーダで読取れる絶対角度の精度で決定される。したがって、ロータリーエンコーダの絶対角度校正は本研究の最も重要な研究項目の一つである。本装置の要求性能は $0.17 \mu\text{rad}$ 以下の精度である。法線ベクトルの測定誤差要因となるレーザー光の出射位置とQPD測定面の回転中心は、ゴニオメータの回転中心と $10 \mu\text{m}$ 以下のズレに抑えればよいことは証明済みである。また、直進ステージの組立取付け誤差が、角度にして $\pm 5 \mu\text{rad}$ 以下にしなければならない。このように、基礎実験装置での実験の成果を基に、ミラー上で絶対角度 $0.17 \mu\text{rad}$ 以下の精度が装置組立て後に実現できるように設計する。

##### ② 光路一致、L一定のフィードバック制御系の設計

本測定法は、光学系から出射されたレーザービームの中心が常にQPDの中心に戻るようゴニオメータをフィードバック制御する高精度位置決めが可能な零位法を採用する。このように試料ミラーの入射光の光路を一致させることで、光路の空気の揺らぎをキャンセルすることができる。また、Lを一定に制御することから測定点座標を高精度に決定できる。全計測時間を5min以下におさめるために、各測定点での位置決めとエンコーダの読み取りという一連の計測時間が30msec以下になるようフィードバック制御系を設計する。

##### ③ ミラーホルダーの設計

ミラー保持方法による変形には2種類が考えられる。ミラーホルダーへ固定する力による変形と、ゴニオメータ( $\alpha, \beta$ )でミラー

が回転した時の重力の影響による変形である。これらの変形はナノメータ以下にする必要があるが、市販されている計測機では測定できない。したがって、保持による変形および回転時の重力の影響を最小にする条件を有限要素シミュレーションによって、形状の変化を予測するとともに、ミラーホルダーの最適設計をする。

##### ④ 定盤および恒温チャンバーの設計

形状計測装置が設置されるウルトラクリーン実験施設では、建物そのものに微振動対策(マットスラブ1.5m)が既に施されおり、床面はあらゆる振動数で加速度100mgal以下である。さらに装置が搭載される定盤をアクティブダンパーにより微振動制御すれば、現在の最新技術をよって初めて達成できる数mgalという最高水準の微振動除去が可能になる。当然、高剛性定盤の上に装置を設置することで、建物(床)の外乱(熱、振動)による変形が装置に与える影響を除去できる。また、測定時には装置が定盤上を動くことから発生する重心移動によって、定盤そのものが変形する。ここでは、定盤の支持方法、熱変形、重心移動等による変形を、有限要素法を用いてシミュレーションすることで、定盤のサイズや材料を最適化する。さらに、計測評価室の温度変化の超精密測定と熱解析を実施し、温度変化 $\pm 0.01^\circ\text{C}$ になる恒温チャンバーの構造を設計する。

##### (2) 測定点の座標とその点での法線ベクトル

から形状を算出するアルゴリズムの開発  
計測したミラー上の各測定点座標と法線ベクトルから二次元ライン形状に変換するためのアルゴリズムを既に開発している。これは、各測定ラインを計算し、そのラインと直角方向に複数測定して三次元形状を算出している。しかし、測定ラインと直交する方向の測定データは活用されておらず、測定領域が広がると測定点数が増大し、現状の測定点座標と法線ベクトルの測定値から形状に変換するアルゴリズムでは誤差が増大する。この誤差を最小化する新たな形状算出アルゴリズムを開発する。

##### (3) 傾斜角積分型超精密形状計測システムの開発

大面積の三次元形状を計測すると、測定点数が増して測定時間も増え、計測装置の温度ドリフトも大きくなる。そのため、可能な限り高速に温度ドリフトを保証できる計測システムを開発する必要がある。たとえば、1ラインごとの測定後、ミラーの中心を基準法線ベクトルとして温度ドリフトを補正できる。また、本測定装置は、測定時に光学系と試料系のゴニオメータとステージが動くことにより装置に弾性変形が生じる。そこで、一般の三次元測定機と同様に測定時の弾性変形を校正してそれを補正できるアルゴリ

ズムを開発する。さらに、計測全体を自動化して統合するシステムを開発する。

#### (4) 超傾斜角積分型精密形状計測装置の製作・性能評価

設計仕様に基づいて光学系と試料系、試料ホルダー、定盤(架台)、断熱チャンバーを製作し、必要な精度で装置を組立てる。試料設置場所で、自由曲面上における入反射レーザー光の向きを $0.17\mu\text{rad}$ 以下の精度で測定するためには、角度検出器の分解能 $0.1\mu\text{rad}$ は必須事項である。また、ミラー面上での測定点座標の精度も $1\mu\text{m}$ 以下に抑える必要がある。

#### (5) 傾斜角積分型超精密形状計測装置の校正

傾斜角積分型精密形状計測装置の組立て精度を評価して構成をするために以下の項目を実施する。

- ① 被測定面上でのレーザーの強度分布測定
- ② 検出器の分解能評価
- ③ ロータリーエンコーダ(ゴニオメータ)の分解能評価と角度絶対値校正
- ④ 組立誤差(回転時のローリング、直進ステージ移動時のピッチング、ヨーイングの計測評価)

#### (6) 傾斜角積分型超精密形状計測装置変形の校正データベースの構築

本測定法は、形状計測時に2軸2組のゴニオメータと直進ステージが動き、そのために生じる重心の移動によって装置全体が弾性変形して測定誤差となる。そこで、一般の3次元測定装置では、測定時のプローブの動きによって構成構造物(メトロロジーフレーム)が弾性変形する量を予め測定し、校正するためのデータベースを構築する。本装置でも測定時のゴニオメータとY軸ステージの運動によって発生する装置の弾性変形を校正するデータベースを構築し、本データベースを活用することによって、測定値を補正して目的の精度で形状計測することを可能にする。

#### (7) 傾斜角積分型超精密形状計測装置の性能評価

$R=400\text{mm}$ 凹球面ミラーの形状を計測し、製作した傾斜角積分型超精密形状計測装置の性能を評価する。具体的には、測定再現性をミラーの左右を反転して測定することから測定精度を評価する。また、位相シフト干渉計や三次元測定機の測定結果を比較する。

### 4. 研究成果

(1)本超精密形状計測法では、試料表面の法線ベクトルとその測定点座標を測定する。そして、完全系であるフーリエ級数で形状を表し、法線ベクトルの残差が最小となる新しい形状を導出するアルゴリズムの開発することに成功した。また、測定点座標を決めるために

必要な光路長を求める独自の自律校正法を提案した。

(2)超精密形状測定装置は、自由曲面を測定するためには、本来、2軸2組のゴニオメータと1軸の直進軸の5軸が必要である。実際は、予算の都合で、角度分解能 $0.17\mu\text{rad}$ の直交するエアベアリングを用いた2軸ゴニオメータと位置分解能 $1\text{nm}$ の1軸の直進ステージからなる、光学系を搭載するための3軸の高精度ステージを設計・製作した。

(3)新設計の装置では、光路長は従来の数 $m$ から $400\text{mm}$ と短くなり、光学系の検出感度は悪くなる。光学センサーヘッドとしては、レーザー光源と、ビームスプリッター、 $1/4$ 波長板、レンズ系、4分割フォトダイオード(QPD)の配置を光線追跡によって設計した。本試作装置によって、 $0.2\mu\text{rad}$ の角度変化に対して設計通りのQPD出力が、充分なS/Nで検出されることを実証した。

(4)球面形状を計測するために、3軸の高精度ステージを数値制御するとともに、3軸のエンコーダ出力と法線ベクトルを測定するQPD出力をコンピュータに読み込む計測システムを構築した。3軸のエンコーダ出力とQPD出力を同時に読み込むことによって、数値制御システムにおける位置定常偏差と速度定常偏差は、形状測定精度に影響を与えない。また、測定時間は、従来の500分間から5分間と大幅に短縮することに成功した。

(5)実際に、 $R=400\text{mm}$ の球面ミラーの形状を計測し、繰り返し精度が $1\text{nm}$ 以上であることを明らかにした。また、同じ球面ミラーを位相シフトファイバー干渉計(ZYGO GPI)と三次元測定機(パナソニックUA3P)で測定した結果、それぞれの誤差範囲の $10\text{nm}$ 程度で測定形状がほぼ一致した。今後、絶対形状測定の実現には、系統誤差を明らかにし、エンコーダを絶対校正することが不可欠である。

### 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1件)

- ① T. Matsushita, E. Arakawa, Y. Niwa, Y. Inada, T. Hatano, T. Harada, Y. Higashi, K. Hirano, K. Sakurai, M. Ishii, M. Nomura, A simultaneous multiwavelength dispersive X-ray reflectometer for time-resolved reflectometry, The European Physical Journal Special Topics, VOL.167, 113-119, 2009

[学会発表](計15件)

- ① T. Ueno, S. Tachibanada, Y. Higashi, J. Uchikoshi, K. Endo, Development of s

- urface gradient integrated profiler- Precise coordinate determination of normal vector measured points by self-calibration method and new data analysis-3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology,2009年11月11日,Kitakyusyu,Japan
- ②Tadasgi.Matsushita,Etsuo Arakawa, Tetsuo Harada, Tadashi Hatano, Yasuo Higashi,York F. Yano, Yasuhiro Niwa,Yasuhiro Inada, Shusaku Nagano, Takahiro Seki,Time-Resolve X-ray Reflectometry in the Multiwavelength Dispersive Geometry,SRI09,2009年9月29日,Melbourne, Australia
- ③東保男, 角度測定を利用した高精度形状計測, 2009年度精密工学会秋季大会シンポジウム, 2009年9月10日, 神戸市
- ④上野智裕, 橘田繁樹, 打越純一, 遠藤勝義, 東保男, 超精密非球面形状計測法に関する研究—小型試料の高精度, 高速計測装置の開発—, 2009年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2009年9月10日神戸市
- ⑤松下正, 荒川悦雄, 羽多野忠, 原田哲男, 東保男, 矢野陽子, 多層膜分光光学系を用いた多波長同時分散型X線反射率計—II, 応用物理学会2009年度秋季大会, 2009年9月8日, 富山市
- ⑥Y.Higashi, T.Kume, K.Enami, K.Endo, J.Uchikoshi, K.Nomura, T.Miyawaki, S. Tachibanada, T.Ueno, High-precision profile measurement of a small radius lens by surface gradient integrated profiler, SPIE Optics+Photonics 2009, 2009年8月2日, San Diego, USA
- ⑦上野智裕, 橘田繁樹, 打越純一, 遠藤勝義, 東保男, 超精密非球面形状計測法に関する研究—法線ベクトル測定値からの形状導出アルゴリズムの開発—, 精密工学会2009年度関西地方定期学術講演会, 2009年5月13日, 豊中市
- ⑧上野智裕, 橘田繁樹, 遠藤勝義, 東保男, 超精密非球面形状計測法に関する研究—法線ベクトル測定値からの形状導出アルゴリズムの開発—, 精密工学会2009年度精密工学会春季大会, 2009年3月11日, 東京都
- ⑨T.Ueno, S.Tachibanada,Y.Higashi, K.Endo,Development of surface gradient integrated profiler—Precise coordinate determination of normal vector measured points by self-calibration method and new data analysis from normal vector to surface profile—, First International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology—Surface and Thin Film Processing—,2009年2月16日,Suita

- ⑩上野智裕, 遠藤勝義, 東保男, 傾斜角積分法による超精密形状計測法, —自立較正法による法線ベクトル測定点の座標位置の高精度化—, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2008年9月19日, 仙台市
- ⑪Y.Higashi, T.Ueno, K.Endo, J.Uchikoshi, T.Kume, K.Enami, Development of a surface gradient integrated profiler-precise coordinate determination of normal vector measured points by self-calibration method and new data analysis from normal vector to surface profile, SPIE Optics+Photonics 2008, 2008年8月11日, San Diego,USA
- ⑫上野智裕, 遠藤勝義, 東保男, 超精密非球面形状計測法に関する研究, —法線ベクトル測定値からの形状導出アルゴリズムの開発—, 2008年7月30日, 堺市
- ⑬東保男, 遠藤勝義, 打越純一, 他傾斜角積分法による超精密形状測定装置の研究—自立較正法による法線ベクトル測定点の座標位置の高精度化—, 2008年度精密工学会春季大会学術講演会, 2008年3月18日, 川崎市
- ⑭東保男, 遠藤勝義, 打越純一, 他, 傾斜角積分法による超精密形状測定法—焦点距離150mmの軸外し放物面での測定点座標の決定—, 2007年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2007年9月13日, 旭川市
- ⑮Y.Higashi, K.Endo, T.Kume, J.Uchikoshi, K.Ueno and Y.Mori, Surface Gradient Integrated Profiler for X-ray and EUV Optics, SPIE Annual Meeting, 2007年8月30日, San Diego, USA

〔産業財産権〕

- 出願状況 (計5件)
- ①名称: 法線ベクトル追跡型超精密形状測定方法  
 発明者: 遠藤勝義, 打越純一, 東保男  
 権利者: 大阪大学、大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2010-182197  
 出願年月日: 2010年8月17日  
 国内外の別: 国内
- ②名称: 回転対称形状の超精密形状測定法及びその装置  
 発明者: 遠藤勝義  
 権利者: 大阪大学  
 種類: 特許  
 番号: 特願 2009-180408  
 出願年月日: 2009年8月3日  
 国内外の別: 国内
- ③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  
 発明者: 遠藤勝義, 東保男

権利者：大阪大学、大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

番号：特願 2008-203494

出願年月日：2008年8月6日

国内外の別：国内

- ④名称：法線ベクトル追跡型超精密形状測定  
装置における駆動軸制御方法

発明者：遠藤勝義、東保男

権利者：大阪大学、大学共同利用機関法人  
高エネルギー加速器研究機構

種類：特許

番号：特願 2008-203495

出願年月日：2008年8月6日

国内外の別：国内

- ⑤名称：超精密形状測定方法

発明者：遠藤勝義、稲垣耕司

権利者：大阪大学

種類：特許

番号：特願 2008-169911

出願年月日：2008年6月1日

国内外の別：国内

[その他]

[http://www.upst.eng.osaka-u.ac.jp/21coe/  
atom/measure.html](http://www.upst.eng.osaka-u.ac.jp/21coe/atom/measure.html)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

遠藤 勝義 (ENDO KATSUYOSHI)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：90152008

### (2) 研究分担者

東 保男 (HIGASHI YASUO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・機械工学センター・准教授

研究者番号：70208742

打越 純一 (UCHIKOSHI JYUNICHI)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：90273581

### (3) 連携研究者

久米 達哉 (KUME TATSUYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・機械工学センター・助教

研究者番号：40353362

(H19 まで分担者、H20 から連携研究者と  
して参画)

江並 和宏 (ENAMI KAZUHIRO)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速  
器研究機構・機械工学センター・助教

研究者番号：00370073

(H19 まで分担者、H20 から連携研究者と

して参画)