

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・大学院工学研究科・教授

研究者番号：90152008

研究代表者の専門分野：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、法線ベクトル、5軸同時制御、形状誤差、超精密加工

1. 研究計画の概要

本研究の目的は、X線自由電子レーザー（X-ray Free Electron Laser；XFEL）や波長13.5nmの極紫外光（Extreme Ultra-Violet；EUV）を用いたEUVリソグラフィ（EUVL）技術から要請される次世代高精度ミラー、すなわち最大サイズ500mm×300mm（EUVLの場合φ300mm）、非球面量15μm以上に対して、形状誤差を0.08nm-RMSの精度で大型自由曲面の形状計測可能なシステムを構築することである。提案した新しい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ミラーに反射されて、光源の位置にある検出器の中心に戻るように2軸2組のゴニオメータを制御して、ミラーの任意測定点（座標）の法線ベクトルを測定することから形状を求めるものである。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。また、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。そして、基準面を用いる必要が無いため、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。

2. 研究の進捗状況

(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発

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0.17rad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10nm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400mm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、0.2μradの角度変化に対して設計通りのQPD出力が、十分な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=400mmの球面ミラーの形状を計測し、繰り返し精度が1nm以上であることを明らかにした。また、同じ球面ミラーを三次元測定機（パナソニックUA3P）と位相シフトファイザー干渉計（ZYGO GPI）で測定した結果、それぞれの誤差範囲の10nm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。

3. 現在までの達成度

②おおむね順調に進展している。

超精密形状測定装置における法線ベクトルを追跡する光学センサーヘッドを誤差解析に基づき詳細に設計するとともに、試作装置により目的の角度分解能 $0.2 \mu\text{rad}$ を達成した。また、直交する 2 軸のゴニオメータと 1 軸の直進ステージからなる 3 軸の高精度ステージを製作し、光学センサーヘッドを搭載し、球面ミラーを形状測定する装置を完成した。当該装置を用いて、 $R=400\text{mm}$ の球面ミラーの形状を計測し、測定時間 5min で、繰り返し精度が 1nm 以上であることを明らかにした。測定時間・形状測定精度とともに、当初の目的を達成している。また、同じ球面ミラーを三次元測定機（パナソニック UA3P）と位相シフトファイブザー干渉計（ZYGO GPI）で測定した結果、それぞれの誤差範囲内で測定形状がほぼ一致した。

今後、試料系の 2 軸のゴニオメータを設計・製作することによって、当初計画した 5 同時制御の超精密形状計測装置をシステムとして完成し、自由曲面の形状計測が可能になる。

4. 今後の研究の推進方策

本研究課題では、当初 49,800 千円の予算を申請していたが、採択時は 36,600 千円に減額された。そのため、当初計画していた自由曲面を形状測定するために不可欠な 5 軸同時制御の装置を完成するには予算が不足し、光学系 3 軸の装置に変更した。そのため、球面の測定に制限され、制御システムも不十分である。

そこで、平成 22 年度基盤研究(S)に研究課題「次世代高精度ミラーに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」を申請し、予算の不足を補う計画である。採択されれば、試料系 2 軸のゴニオメータを追加し、5 軸同時制御の形状測定装置として完成することによって、自由曲面の測定が可能になる。また、光学センサーヘッドが試料表面の法線ベクトルを常に追跡する QPD 出力をフィードバックする追従制御によって入反射光路一致の零位法が実現する制御システムを開発すれば、空気揺らぎによる外乱の影響を受けない高精度・ロバストな形状装置となる。また、光学センサーヘッドの角度分解能を保つのが困難な曲率半径 10mm 以下の形状測定にも挑戦する。

5. 代表的な研究成果

（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）

- ①T. 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、査読有り

〔学会発表〕（計 16 件）

- ①Y. Higashi, T. Kume, K. Enami, K. Endo, J. Uchikoshi, K. Nomura, T. Miyawaki, S. Tachibana, 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
- ②Y. 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 1 日、San Diego, USA
- ③Y. 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：特願
番号：2008-203495
出願年月日：2008 年 8 月 6 日
国内外の別：国内
- ②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：特願
番号：2008-169911
出願年月日：2008 年 6 月 1 日
国内外の別：国内