

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

A new high speed nano-profiler using the normal vector tracing method for next generation ultraprecision mirrors

遠藤 勝義 (ENDO KATSUYOSHI)

大阪大学・大学院工学研究科・教授



研究の概要

次世代のナノ精度光学素子を製作するために、平面から平均曲率半径 10mm 以下の非球面(自由曲面)の形状を、測定精度 1nm PV 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高速超精密形状測定法を開発する。本測定法は、レーザーの直進性を用いてミラーの任意測定点(座標)の法線ベクトルの測定から形状を求めるため、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ため、絶対形状測定が可能である。

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、精密位置決め・加工計測、超精密加工、高精度ミラー

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(XFEL)では、高コヒーレンス・ナノメートルサイズの集光を可能にする高精度非球面ミラーが要求されている。一方、産業応用では、次世代半導体製造技術として、波長 13.5nm の極紫外光(EUV)を用いた EUV リソグラフィ(EUVL)技術の開発が急務である。また、可視光においても、数多くのデジタル映像機器から、10mm 以下の平均曲率半径の高精度非球面レンズが求められている。これら次世代高精度ミラー・レンズは、形状精度 1nmPV 以上が要請されている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、上記次世代ナノ精度光学素子を製作するために、XFEL や EUVL から求められる最大サイズ 500mm×300mm の次世代高精度ミラーや民生用の平均曲率半径 10mm 以下の高精度レンズの非球面形状を、測定精度 1nm PV 以上、スロープエラー $0.1 \mu \text{ rad}$ 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高速超精密形状測定法を開発することである。

3. 研究の方法

提案した新しい形状計測法の原理は、図1に示すように、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。また、y方向並進ステージで、光路長Lが一定になるように調整すれば、測定点座標が決まる。そして、法線ベクトルと測定点座標から、独自に開発したフーリエ級数展開最小自乗法によって形状が導出できる。

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。法線ベクトルの測定から形状を求めることから、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ため、原理的に測定形状に制限がなく、自由曲面の絶対形状測定が可能である。

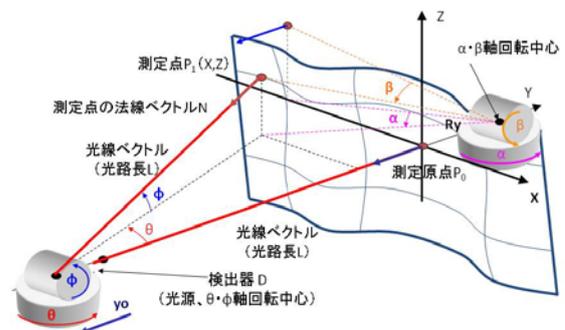


図1 形状測定の方法

4. これまでの成果

初本年度は、平成 19~22 年度科学研究費基盤研究(A)から引続き開発しているプロトタイプ機を完成した。試料系 2 軸のゴニオメータを搭載し、5 軸同時制御のための制御システムを導入することによって、プロトタイプ超精密形状計測装置を完成した。そして、その装置の基本性能を評価し、設計運動精度を有することを明らかにした。また、測定点座標とその点での法線ベクトルから形状を導出するフーリエ級数最小自乗法のアルゴリズムに新規な手法を取り入れた。その結果、従来問題となっていた非周期成分による形状端のギブス現象を抑えるとともに、計算時間を大幅に短縮する画期的な形状導出プログラムの開発に成功した。さらに、本装置を用いて $R=400\text{mm}$ の凹球面ミラーを形状測定したところ、測定再現性は PV1nm 程度で、フィゾー干渉計による形状測定結果とは、PV10nm 以下で一致した。形状の微細構造（短空間波長）が一致していることから、この形状測定結果の差は、それぞれの測定機の系統誤差に起因することが分かった。

平成 23 年度は、系統誤差の原因となる形状測定装置の幾何学的組立誤差を明らかにし、組立誤差が形状測定の系統誤差に与える影響を定式化した。その結果に基づき、系統誤差シミュレーションを実施することから、測定対象の曲率半径に依存した測定精度 PV1nm を満たす許容組立誤差を求めた。

また、非球面ミラーから反射されるレーザービーム強度は、ミラー表面の半径方向と周方向で曲率半径が異なれば、光検出器である QPD 上でガウス分布にならない。そこで、このような非球面ミラーでもレーザービーム強度が QPD 上でガウス分布に近づき、法線ベクトルが検出できるような光学ヘッドの構造を波動光学シミュレーションによって設計し、製作した。

さらに、2号機となる高速ナノ精度形状測定装置を設計した。このとき、本装置の精度を支配するロータリーエンコーダを産業技術総合研究所の角度国家標準器を用いて絶対校正した。その結果、各ロータリーエンコーダは、装置取り付け時の偏心や負荷の影響を考慮しても不確かさは $\pm 0.12\mu\text{rad}$ で絶対校正された。この不確かさは、国家標準器の限界に迫る。

そして、プロトタイプ超精密形状計測装置によって、 $R=400\text{mm}$ の凹球面ミラーと平面ミラーの形状を測定した。球面ミラーの測定結果は、再現性が PV1nm 以下でフィゾー干渉計の測定形状とも、それぞれの誤差範囲内である PV5nm 以下で一致した。また、光路長 L の自律校正法を確立し、本球面ミラーの曲率半径 $R=396.12\text{mm}$ と求めた。一方、平面ミラーの場合、2 軸 2 組のゴニオメータと 1 軸の並進ステージの 5 軸すべてを使って形状測定する。そのため、形状測定の再現性は、

PV1nm であるものの、測定形状は、フィゾー干渉計と比較すると PV20nm の違いがあった。これは、5 軸の組立誤差による形状測定の系統誤差の影響と考えられる。

5. 今後の計画

高速ナノ精度形状測定装置ステージ系に新規に設計・製作した光学ヘッドを搭載し、形状測定装置を完成する。また、ゴニオメータと並進ステージの組立誤差をそれぞれに測定し、系統誤差を定量的に明らかにする。特に、光学系 2 軸と試料系 2 軸のゴニオメータの相対的運動誤差が重要である。測定した系統誤差に基づき測定値を補正する校正データベースを構築する。

本データベースを活用することによって、形状誤差が既知の基準球や基準平面ミラーを形状測定することから、本装置の性能を評価する。また、次世代に期待されるナノ精度非球面ミラーの形状測定に挑戦する。

6. これまでの発表論文等（受賞等も含む）

・ Development of a High-Speed Nanoprofiler Using Normal Vector Tracing: Takao Kitayama, Daisuke Tonaru, Hiroki Matsumura, Junichi Uchikoshi, Yasuo Higashi and Katsuyoshi Endo, Key Engineering Materials, 2012, accepted

・ Effects of a Laser Beam Profile to Measure an Aspheric Mirror on a High-Speed Nanoprofiler Using Normal Vector Tracing Method: H. Matsumura, D. Tonarua, T. Kitayama, K. Usuki, T. Kojima, J. Uchikoshi, Y. Higashi, and K. Endo, Current Applied Physics, 2012, accepted

・ 法線ベクトル追跡型高速ナノ形状測定法の開発 — 自律較正法を用いた光路の絶対長決定 — : 北山貴雄, 戸成大輔, 松村拓己, 薄木宏治, 小嶋拓也, 打越純一, 遠藤勝義, 東保男, 2012 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, 2012.3, 首都大学東京

・ 法線ベクトル追跡型高速ナノ精度形状測定法の開発 — 誤差解析と測定装置の校正 — : 戸成大祐, 松村拓己, 北山貴雄, 打越純一, 東保男, 遠藤勝義, 2011 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, 2011.9, 金沢大学

・ Development of a new high-speed nano-profiler using normal vector tracing method for next-generation, K. Endo, J. Uchikoshi and Y. Higashi, Third International Symposium on Atomically Controlled Fabrication Technology, 2010.10, Osaka, Japan

ホームページ等

<http://www.upst.eng.osaka-u.ac.jp/21coe/atom/measure.html>
endo@upst.eng.osaka-u.ac.jp