



Title	自由曲面光学素子のための法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法の開発
Author(s)	宮脇, 崇
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/91966">https://doi.org/10.18910/91966</a>
rights	
Note	

*The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA*

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

## 論文内容の要旨

氏名(宮脇 崇)	
論文題名	自由曲面光学素子のための法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法の開発
論文内容の要旨	
<p>第1章では、研究の背景と目的について述べた。光学素子の開発の需要は学術領域、産業領域を問わず様々な領域で存在している。光学性能を發揮するためにミラーやレンズなどの光学素子には「複雑な光学素子形状」と「形状の高精度化」を同時に実現させることが求められている。光学素子の形状は球面形状、非球面形状、自由曲面形状とより複雑な形状が要望されている。各所で自由曲面光学素子の加工・計測技術が開発されており、自由曲面形状を30 nmの精度で測定することが目標として掲げられている。ただし、実現に向けては技術的な課題が多いとされる。そこで、我々は光学素子の法線ベクトル（被測定面の傾き）分布を測定し形状分布を算出する法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を用いて不確かさ30 nm、測定繰り返し性0.1 nmの達成を目指し本研究を行った。</p> <p>第2章では、法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法の測定原理を説明し、第3章では、測定原理を実現するため開発したnano-profilerの装置構成を説明した。</p> <p>第4章では、目標とする不確かさと測定繰り返し性を実現するために新たな校正手法と測定手法を提案した。校正を行ったのは、法線ベクトルの角度を規定するロータリーエンコーダと形状算出時に重要なパラメータとなる光路長である。ロータリーエンコーダの校正については、産業技術総合研究所の角度国家標準器によるロータリーエンコーダの校正結果をさらに等分割平均法により高精度化する手法を提案し、0.027 <math>\mu</math> radの角度校正を実現させた。また、光路長の校正では新たにマルチステップキャリブレーション法を提案し、光路長を5.3 <math>\mu</math> mの標準偏差で測定することに成功した。形状測定手法の提案に関しては、並進軸駆動を削減した測定とスパイラル走査測定の2つの新たな測定手法を実現させた。並進軸駆動を削減した測定では、現行の測定方法と同様の測定ができるなどを検証した。軸数を削減することで装置の誤差を低減させ、不確かさの向上が可能となる。また、スパイラル走査測定では測定時の駆動動作を変更することで測定時間の短縮を試みた。φ150mmの大型の測定サンプルの測定時間がこれまで163分掛かっていたのに対し、17分にまで短縮されることに成功した。さらに、測定精度も維持できていることを検証し、測定時間の短縮に目途を立てた。</p> <p>第5章では、前述の校正手法を用いて測定装置の性能検証を行った。自由曲面形状の1種であるシリンドリカルミラーとパターン形状を加工した自由曲面ミラーをターゲットにしてnano-profilerと干渉計との測定比較検証を行った。シリンドリカルミラーの検証では、両装置の測定の差は±15nm以内となっていることが確認できた。さらに、パターン形状を加工した自由曲面ミラーの検証では、顕微型干渉計とフィゾー干渉計により比較評価を行い、パターンの深さは2.1 nm、全体の形状のPV値は2.9 nmの差となっていることを確認した。これらの結果から目標とする30 nmの不確かさが達成できていると結論付けた。</p> <p>さらに、第6章では形状測定の繰り返し性を向上するために、測定環境に着目し、一定風速で層流の空気を流すことによって、測定に用いられるレーザー光を安定させることを提案した。空気の流れが無い状態で302 pmPVであった測定繰り返し性を14pm PVまで低減させた。</p> <p>最後に、第7章で研究内容を総括した。これまでの研究結果から目標と定めた形状測定の不確かさ30 nm、繰り返し性0.1 nmを達成することができた。また、これらの成果は法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法に限らず、その他の光学素子の形状測定装置、もしくは形状測定装置に限らない別の測定装置にも適用可能であり、幅広い技術の応用と展開を期待できる。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 宮脇 崇 )	
	(職)
論文審査担当者	主査 教授 遠藤勝義
	副査 教授 山内和人
	副査 教授 山村和也
	副査 教授 荻博次
	副査 教授 桑原裕司
	副査 教授 森川良忠
	副査 教授 渡部平司

## 論文審査の結果の要旨

自由曲面光学素子は、基礎科学、先端産業を問わず様々な領域から要請されている。さらに、高機能に向けて複雑な形状と高精度化が同時に求められ、自由曲面光学素子を30 nm以下の精度を目指して加工・計測する技術が開発されている。本論文は、光学素子の法線ベクトル（被測定面の傾き）を測定して形状を導出する法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を提案し、不確かさ30 nm、繰り返し性1 nmを目標に研究した成果をまとめたものである。

自由曲面光学素子の機能を保証するためには絶対形状測定が不可欠である。従来の干渉計や三次元測定機では形状測定の不確かさの定量化が困難であるため、絶対形状測定は不可能である。そこで本研究では、光の直進性と高精度回転運動を利用し、基準面を必要としない、法線ベクトルを測定して形状を導出する独自の原理の法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を提案し、nano-profilerとして装置を開発した。出射されたレーザー光がミラー面で反射され、光検出器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制御すれば、その点の法線ベクトルが求まる。また、並進ステージで光路長が一定になるように制御すれば、測定点座標が決まり、法線ベクトルと測定点座標から形状が導出できる。法線ベクトルを追跡する回転4軸と並進1軸の5軸数値制御する駆動系のエンコーダ出力と光検出器出力を同期して取得すると任意の測定点座標と法線ベクトルを同時に得て、形状測定の高繰り返し性に繋がる。

まず、不確かさの目標達成のために系統誤差を低減する校正法を提案した。校正したのは法線ベクトルの角度を測定するロータリーエンコーダと形状算出時に重要な光路長である。ロータリーエンコーダの校正は、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校正して $0.027 \mu\text{rad}$ のオンマシン角度校正を実現した。また、光路長の校正では、マルチステップキャリブレーション法を提案し、光路長を $5.3 \mu\text{m}$ の標準偏差で測定することに成功した。これらの校正手法の確立により不確かさ目標達成の礎ができた。

そして、自由曲面の形状を測定した。シリンドリカルミラーの形状をnano-profilerとCGH干渉計で測定した結果を比較し、形状測定の差は $\pm 15\text{nm}$ 以内となった。また、パターン付き平面ミラーの形状を測定した。顕微型干渉計と位相シフトフィゾー干渉計による形状測定を比較し、パターンの深さの差は $2.1 \text{ nm}$ 、全体形状の差は $2.9 \text{ nm}$ となつた。これらの結果から不確かさの目標30 nmの達成を示した。さらに、形状測定の繰り返し性向上を目指した。測定環境に着目し、一定風速で層流の空気を流すことから測定に用いられるレーザー光を安定させることを提案した。空気の流れが無い状態で $302 \text{ pm}$ PVであった形状測定の繰り返し性を $14 \text{ pm}$ PVまで低減した。

以上のように、本論文は従来の形状測定法では困難な自由曲面光学素子の形状を国際的な目標である不確かさ30 nm以下、繰り返し性1 nm以下で絶対測定することに、独自の法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法によって世界に先駆けて成功している。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。