



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	https://doi.org/10.18910/91966
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

博士学位論文

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

宮脇 崇

2022年12月

大阪大学大学院工学研究科

博士論文目次

第1章 序論	1
1.1 研究の背景と目的	1
1.2 本論文の構成	3
第2章 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法の原理	5
2.1 緒言	5
2.2 形状測定の原理	5
2.3 角度分布から形状分布を測定するメリット	6
2.4 法線ベクトル検出の原理	7
2.5 設計面情報を用いた5軸数値制御による法線ベクトル検出の原理	8
2.6 4分割フォトダイオードによる法線ベクトルの測定	11
2.7 形状算出アルゴリズム	12
2.8 結言	14
第3章 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定装置	16
3.1 緒言	16
3.2 Nano-profiler の装置仕様	16
3.3 Nano-profiler の光学系と試料系の構成	20
3.4 データテイキングシステム	22
3.5 測定環境	24
3.6 Spiral-nano-profiler の装置仕様	25
3.7 結言	30

第4章 誤差の低減	31
4.1 緒言	31
4.2 ロータリーエンコーダの校正	31
4.2.1 等分割平均法によるロータリーエンコーダの校正	31
4.2.2 国家標準機によるロータリーエンコーダの校正方法	32
4.2.3 国家標準機による校正結果	38
4.2.4 国家標準機による校正量の低減	40
4.2.5 校正量の評価	41
4.3 光路長の校正	44
4.3.1 マルチステップキャリブレーション法	44
4.3.2 シミュレーションによる測定パラメータの最適化	46
4.3.3 実験のための光学調整	48
4.3.4 マルチステップキャリブレーション法による光路長評価	55
4.4 駆動軸数の削減による誤差低減	57
4.4.1 並進駆動軸削減による系統誤差削減効果	57
4.4.2 QPD 感度補正による駆動軸の削減	59
4.4.3 提案手法と通常測定と比較	60
4.5 スパイラルスキャンによる大面積・短時間形状測定	66
4.5.1 スパイラルスキャンとラスタースキャンの比較	66
4.5.2 大型非球面の形状測定の干渉計との比較	67
4.5.3 スパイラル測定時の回転軸による誤差	69
4.6 結言	70
第5章 自由曲面の形状測定	73
5.1 緒言	73
5.2 シリンドリカルミラーの形状測定	73
5.2.1 シリンドリカルミラーの測定条件	73
5.2.2 フィデューシャルマークによる測定位置の特定	74
5.2.3 シリンドリカルミラーの形状測定結果と干渉計との比較	75
5.2.4 測定繰り返し性の評価	78
5.2.5 不確かさの算出	79
5.3 パターン付き平面ミラーの形状測定	81
5.3.1 パターン形状の加工	81

5.3.2	パターン付き平面ミラーの形状測定	82
5.3.3	干渉計との測定各結果の考察	85
5.3.4	測定繰り返し性の評価	87
5.3.5	不確かさの算出	88
5.4	結言	89
第6章	形状測定の繰り返し性向上	91
6.1	緒言	91
6.2	測定環境における空気中の屈折率影響	91
6.3	屈折率分布を最小化する風速条件の最適化	92
6.4	測定繰り返し性の評価	95
6.5	結言	97
第7章	総括	98
	参考文献	105
	謝辞	111

第1章 序論

1.1 研究の背景と目的

物を作るためには設計、測定、加工の3つの技術が必要とされる。設計により作る物の形を定め、測定により現状と設計の違いを把握し、加工によりその違いを修正することで物作りが完成する。人類が生まれてから様々な道具が作りだされ、さらにその道具により新たな物が作られてきた。この繰り返しにより工業が発達し、現在の社会が作り上げられている。光学技術の領域においても同様に3つの技術を起点に革新が進んでいる。光学素子の設計技術、測定技術、加工技術は、古代の金属鏡から始まり、眼鏡、顕微鏡、望遠鏡などの様々な光学機器を生み出した。これら光学機器の発明により、これまで肉眼では見ることができなかった世界を人類は新たに知覚することとなった。さらに現在も光学技術は発展を続けており、学術領域では宇宙望遠鏡や放射光集光ミラーなど先端研究に活用されている。¹⁾⁻²⁾ また産業領域ではデジタル映像機器や半導体露光装置など民生品や工業装置に幅広く活用されている。³⁾⁻⁶⁾ 光学技術の革新に伴い使用されるミラーやレンズなどの光学素子もより高度化が求められている。特に光学素子の形状と形状精度はこの数十年で著しい革新が見られている。コンピューターの技術革新により設計技術が大幅に向上したことで、高い光学性能を発揮できる複雑な形状の光学素子が設計可能となった。光学素子の形状は球面形状から非球面形状にそして自由曲面形状へと形状が複雑化している。また同時に光学素子製造装置の性能や新たな加工手法の開発により、光学素子の加工技術も大幅に向上している。それに伴って光学素子の測定技術には複雑な形状を高精度に測定することが求められている。

光学素子の測定技術も様々な開発が行われており、中でも近年においては干渉計と三次元測定機 (Coordinate Measuring Machine ; CMM) の技術発展が目覚ましい。干渉計は測定対象となる光学素子と基準となる光学素子の形状の差を非常に高い繰り返し性で測定することが可能である。⁷⁾⁻¹⁸⁾ また CMM は高精度な駆動機構を有して測定プローブを駆動させ、直接被測定物の形状分布を測定することが可能である。¹⁹⁾⁻²³⁾ 両測定装置が現在の光学素子の形状測定では最も広く使用されており、様々な機関で盛んに研究されている。しかし前述の通り光学素子の測定技術には複雑な形状を高精度に測定することが求められており、近年では米国や欧州でも自由曲面形状の高精度測定が目標として掲げられている。その中でも自由曲面形状の測定技術発展を推し進めている European Association of National Metrology Institutes では、自由曲面を不確かさ 30 nm で測定することを目標として掲げている。²⁴⁾⁻²⁵⁾ ただし干渉計や CMM で自由曲面形状を 30 nm で測定するためにはそれぞれ解決すべき課題がある。干渉計では高い測定繰り返し性を有しているが、不確かさを保証す

するためには基準となる参照面の形状を保証しなければならない。自由曲面形状を測定する際には自由曲面形状に応じた参照波面を形成可能な参照面が必要である。干渉計で測定される形状は参照面との差分であるため、干渉計での測定形状を保証するためには参照面自体の形状不確かさを保証する必要がある。自由曲面を測定するためには主に2種類の参照面が利用される。1つ目は自由曲面形状を持つ参照レンズや参照ミラーであり、自由曲面形状を持つのでこの参照面の形状測定自体が課題となる。2つ目はパターン形状により自由曲面形状の参照波面を形成する Computer Generated Hologram (CGH) である。自由曲面形状の参照波面を形成するためには複雑な凹凸パターン形状が必要であり、凹凸パターン形状の高さと位置を高精度に測定することが課題となる。一方 CMM においては測定プローブの三次元的な位置精度を保証すれば自由曲面形状測定における不確かさが保証可能となる。位置精度の保証は干渉を利用したレーザー測長機や基準平面ミラーを用いることで実現可能である。しかし CMM では測定プローブにより被測定面の高さ分布を測定する際の不確かさの保証と測定繰り返し性が課題となる。接触式プローブを用いる場合、プローブの摩耗により測定の間不確かさ自体が変化してしまう懸念がある。また非接触プローブを用いる場合でも干渉計と同程度の測定繰り返し性を達成することは難しい。この様に干渉計では測定繰り返し性は高いが不確かさの保証が難しく、CMM では不確かさの算出は可能であるが、測定繰り返し性が干渉計に比べると低い。

これまでに法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を開発し、曲率半径が数mとなるような球面、非球面の測定を実現してきた。そして測定形状の複雑化と高精度化にともない、新たに「光の直進性・高速性と高精度回転運動を利用し基準面を使わない高精度な自由曲面光学素子の絶対形状測定の実現」を研究目標と定めた。研究目的達成に向けては装置構成の変更、測定性能の向上、測定性能評価の3点が必要である。測定構成の変更では軸構成の最適化やデータ平均手法を検討し nano-profiler を開発する。また測定性能向上ではロータリーエンコーダ校正、光路長校正などの誤差低減と共に、駆動軸削減、スパイラル測定などの新規測定手法の開発に取り組む。さらに測定性能評価では実際の自由曲面の測定にて繰り返し性と測定不確かさを検証する。達成すべき数値目標を自由曲面の測定不確かさ 30 nm、繰り返し性 0.1nm と定めて研究に取り組む。これらの成果が光学測定技術に現在求められている目標精度を達成すると同時に、将来的な要求を先取りする研究成果となる。さらに本研究が法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法に限らず様々な光学技術発展の一助となることを望む。

1.2 本論文の構成

本論文は自由曲面形状測定において測定繰り返し性 0.1 nm と 30 nm の不確かさの保証を両立させる法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法いわゆる nano-profiler の開発に向けた一連の研究結果をまとめたものである。研究の概要を測定原理、系統誤差要因の不確かさの保証、自由曲面の形状測定に基づく不確かさと測定繰り返し性の改善の順に以下のように記す。

第2章では法線ベクトル追跡型ナノ形状測定方法の測定原理について論じる。本測定法では被測定面の各測定点における法線ベクトルをレーザー光の直進性を利用して検出する。法線ベクトルは測定面の傾斜と対応し、測定点情報を用いて積分することで測定面の形状を導出することが可能となることを説明する。

第3章では法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現させる装置として nano-profiler の装置構成について説明する。全体の装置構成と仕様を述べ、光学系と試料系の構成、測定環境について説明する。さらに繰り返し性の向上に最も寄与する大量データ平均に関しても論じる。

第4章では nano-profiler の不確かさを保証するために必要な誤差の低減について論じる。主要な誤差を低減するためにはロータリーエンコーダ校正と光路長校正について述べ、その後測定誤差を低減させる新たな測定手法である駆動軸削減測定とスパイラル測定について詳述する。

ロータリーエンコーダの校正では保証角度精度に関して評価する。Nano-profiler では各ステージ駆動軸の角度精度が直接的に不確かさに影響する。30 nm の不確かさを達成するためには高精度な角度制御が必要となる。一般的には国家標準器によりロータリーエンコーダの校正が行われるが、本研究では高精度な角度制御が必要となるため通常は校正の対象外となるロータリーエンコーダの取り付け誤差に着目する。多数のエンコーダーヘッドを nano-profiler に搭載することで取り付け誤差をオンマシンで校正し、国家標準器で校正する成分を限定する手法を提案する。さらに nano-profiler に別の評価用ロータリーエンコーダを取り付けることで、取り付け誤差と国家標準器による校正値の差を確認する。この結果から nano-profiler にとって重要な駆動軸が必要とする角度精度を検証する。

また物理的な測定検証が難しい角度測定光学系の系統誤差である光路長の推定手法について説明する。光路長は nano-profiler では形状算出の重要なパラメータであり、30 nm の形状不確かさを達成するためには光路長の精度が必要である。本研究では光路長を物理的に測定するのではなく、測定パラメータを意図的に変更した複数の測定データから光路長を推定する。測定結果のシミュレーションから光路長推定に最適な測定パラメータを特定し、さらに実測結果から光路長の推定を行いその測定繰り返し性を検証する。

次に新たな測定手法として駆動軸削減測定をについて説明する。nano-profiler では回転駆動4軸と並進駆動1軸の計5軸の駆動により測定するが、運動誤差が大きい並進軸を動かさずに回転4軸で測定する。並進軸を駆動させない事で光路長が一定でない状態となる

が、光路長が一定でない影響を事前に数値化し測定結果を測定後に補正する事で 4 軸でも測定への影響を無くす。通常の 5 軸駆動と 1 軸減らした 4 軸駆動の測定結果を比較し検証する。

最後にスパイラルスキャン測定による大面積の測定と測定時間短縮について説明する。これまでの nano-profiler では測定経路をラスター状に作成し測定していたが、回転軸の構成を変更しスパイラル状の測定を実現する。スパイラル状の測定により測定時間を短縮することで大型の被測定物においても高い測定繰り返し性での測定が可能となる。 $\phi 150$ mm の非球面レンズにおいて干渉計との比較測定を行い、形状の PV 値の差を確認する。

第 5 章では自由曲面の形状測定における不確かさについて論じる。不確かさ検証のためにシリンダリカル面形状とパターン付き平面形状の測定を行う。

シリンダリカル面形状は球面形状や非球面形状とは異なり曲率半径が 1 方向に変化する自由曲面形状である。また、CGH を用いた干渉計で測定が可能な形状であり、nano-profiler と干渉計の比較と共に nano-profiler の不確かさについても確認する。

パターン付き平面形状の測定では測定の空間分解能による違いを検証するために平面ミラーにパターン形状を加工したサンプルを用いて他装置との比較測定をする。全体形状をフィゾー干渉計で測定し、パターン形状の深さを顕微干渉計で測定しそれぞれの測定結果と nano-profiler の測定結果を比較する。

第 6 章では測定繰り返し性を更に向上させるため、測定環境の改善を試みる。繰り返し性に影響する環境として風速に着目し、風速とレーザー光の安定性に関連性があることを確認する。最適な風速で繰り返し性の評価を行い測定繰り返し性の改善を検証する。

最後に第 7 章では本研究の成果を総括する。

第2章 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法の原理

2.1 緒言

法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法は通常の CMM とは異なり高さ分布から形状を算出するのではなく、角度（傾斜角）分布から形状を算出する測定方法である。本測定法では被測定面の各測定点における法線ベクトルをレーザー光の直進性を利用して検出する。法線ベクトルは測定面の傾斜と対応し、測定点情報を用いて積分することで測定面の形状を導出することが可能である。本章では、はじめに法線ベクトル検出の原理と理想面の情報を用いた装置の数値制御について述べる。続いて、本測定法に用いる光学系を示し、測定法の概要を説明する。最後に形状算出のアルゴリズムについて詳述する。

2.2 形状測定の原理

被測定面の法線ベクトルを取得することにより、被測定面の傾斜は一意に決まる。したがって被測定面の座標を x 、試料の形状を P とすると被測定面の法線ベクトルを取得することは被測定面形状の傾斜角 dP/dx を把握することと同義である。取得した dP/dx を積分に相当する計算を行うことで被測定面形状 P を求められる。図 2.1 に法線ベクトルと傾斜角、被測定面形状の関係を示す。

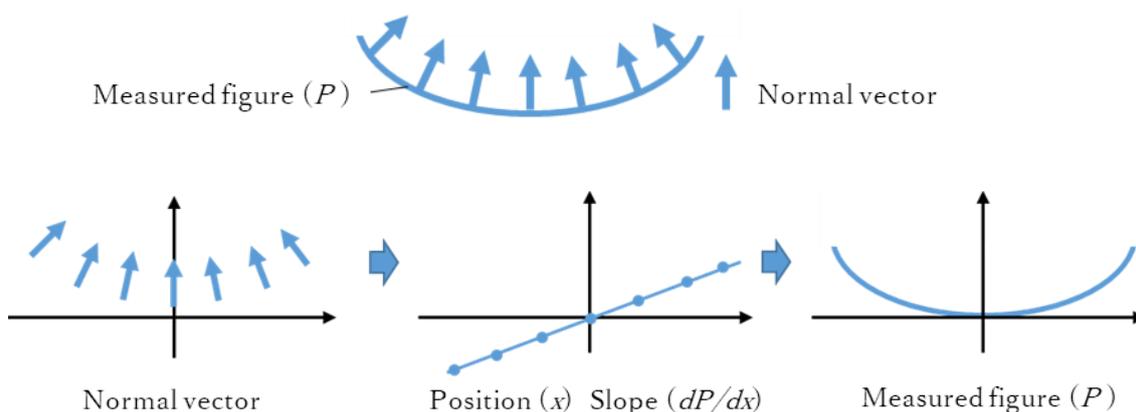


図 2.1 法線ベクトル，傾斜角，試料形状の関係

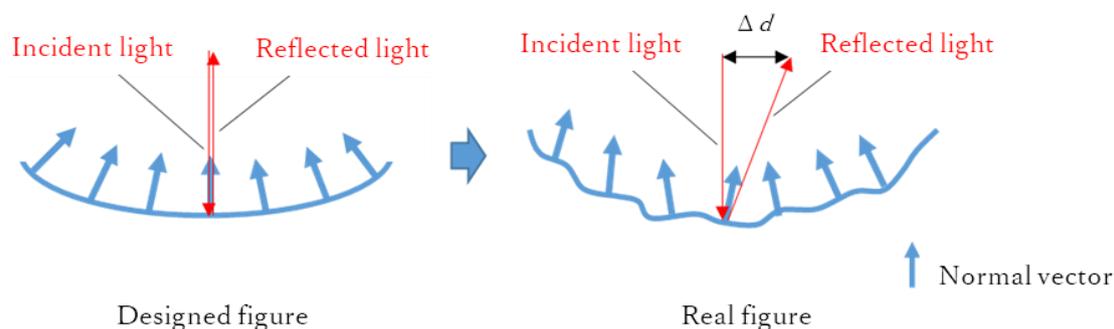


図 2.2 法線ベクトル取得原理

次に法線ベクトルを取得する方法について述べる。図 2.2 の左図のように被測定面が設計通りの形状であると仮定して、入射光と反射光が同じ経路を通るようにレーザー光を試料表面に照射する。¹⁾しかし実際には図 2.2 の右図のように試料は形状誤差を有しているため入射光と反射光は同じ経路を通らない。この時の入射光と反射光のずれ (Δd) から試料表面の法線ベクトルを算出できる。試料の測定範囲全体をレーザー光でスキャンし、この入射光と反射光のずれ (Δd) から試料表面の測定範囲全体の各測定点における法線ベクトルの取得が可能である。

2.3 角度分布から形状分布を測定するメリット

一般的な CMM が高さ分布から形状分布を測定するのは異なり、法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法では角度（傾斜角）分布から形状分布を測定する。角度分布から形状分布を測定する最大のメリットは高さ方向の誤差の影響を無くすことにある。²⁾CMM の測定ではプローブが接触式であるか非接触式であるかを問わず、高さ方向の誤差を制御することが非常に重要となる。

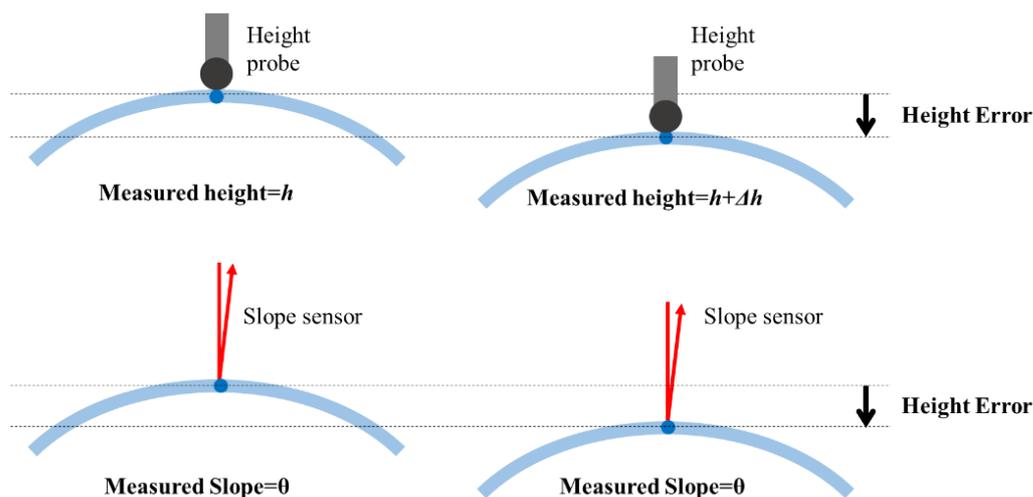


図 2.3 高さ測定と角度測定の違い

図 2.3 に示す様に駆動軸やプローブの誤差により高さ方向の誤差が発生した場合、高さ分布から形状を測定すると高さ方向の誤差が直接的に形状誤差に影響を与える。10 nm の高さ方向の誤差が形状分布における 10 nm の誤差に相当する。CMM の誤差バジェットにおいて最も影響の大きい誤差であり、校正が難しい項目となっている。具体的にはメトロロジーフレーム等の参照ミラーを用いた校正が行われることが多いが、3次元的な測定エリア全域の高さ誤差を 3 次元位置座標毎に全て数値化する必要があり校正の難易度が高い。一方角度の測定では図 2.3 に示す様に高さ方向の誤差は角度に影響しない。この特性により最も校正難易度が高い、高さ方向の制御・校正が不要となる。当然角度自体の誤差量を校正する必要はあるが、角度制御は高精度なロータリーエンコーダを用いることで回転駆動は並進駆動に比べて高精度化を図りやすいという特徴がある。したがって、角度による測定によって高精度な測定が実現できる。

2.4 法線ベクトル検出の原理

法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法はレーザー光線のベクトルを用いて測定面の法線ベクトルを取得し、測定面形状を導出する。本手法は図 2.4 に示すように 2 軸 2 組の回転軸と 2 軸の直線軸によって構成されている。光学系の 2 軸の回転中心が重なる点に検出器が取り付けられており、検出器と光学的に同じ位置にレーザー光源が取り付けられている。試料系は回転中心から R_y 離れた点に試料面上の測定開始点が設定されている。また試料系の回転 2 軸は直線軸上に設置されており、光学系との距離を任意に変化させることが可能である。試料系の 2 つの回転軸の間にある直線軸は回転中心を試料の測定開始点と一致させるための軸であり、測定中は動作しない。5 軸同時に数値制御することにより、試料上の

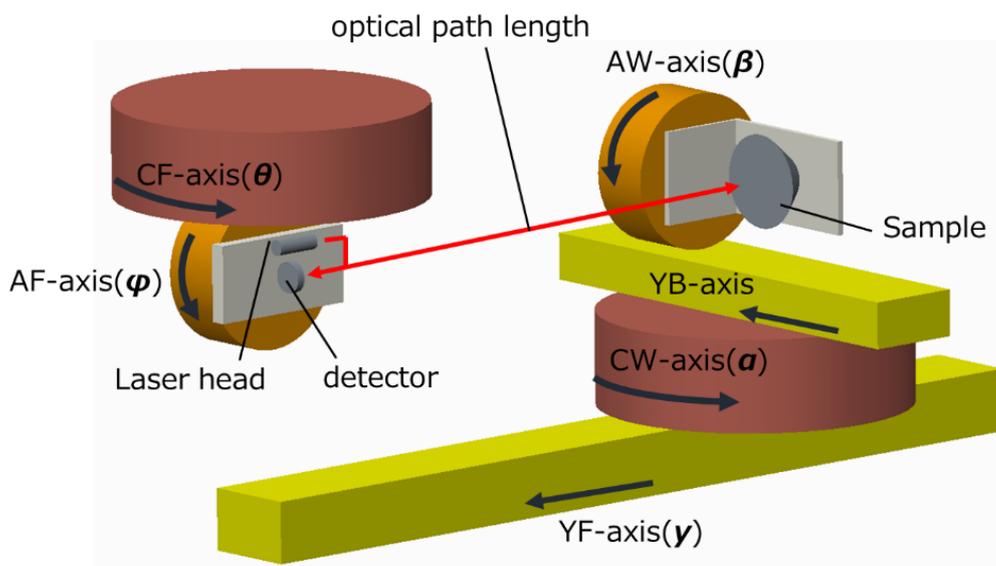


図 2.4 法線ベクトル検出型ナノ形状測定法の概要図

測定点に任意の角度でレーザー光を入射させることが可能である。³⁾

5軸同時制御による形状測定法を以下に示す。被測定面における入射光と反射光の経路が一致するように2軸2組の回転軸を動作させると光線のベクトルは測定面の法線ベクトルと一致する。また、理想面における法線ベクトルの方向にレーザー光を入射した場合には反射光のずれが法線ベクトルの理想面からのずれの情報を含むことになる。直線軸を回転軸と同時に動かして光路長を一定にすることで、光検出器で取得できる反射光の位置情報を試料面上での角度情報に置き換えることが可能となる。このとき反射光の位置情報が2次元で得られる場合には、法線ベクトルのずれ量を2次元で見積もることができるので、法線ベクトルを1意に決定することができる。以上のように、5軸のエンコーダ出力と検出器面での反射光の位置情報からレーザー光の経路を推定することで、試料表面の法線ベクトルを取得することが可能となる。⁴⁾

2.5 設計面情報を用いた5軸数値制御による法線ベクトル検出の原理

理想面における測定点座標 P と法線ベクトル N 、光路長 L を用いて5軸の数値制御を行う手法について説明する。本測定法の座標系は図 2.5 に示すように3つの座標系(光学系 F、試料系 W、測定面 S)によって成立する。本測定法で既知の P と N は測定面の座標系 S における座標であり、光学系の座標系 F と試料系の座標系 W のいずれかに準ずる各軸の数値制御情報 θ 、 ϕ 、 α 、 β 、 ΔY を得るためには、 P と N を座標変換して5つの未知数を導く方程式を求める必要がある。⁵⁾⁻⁶⁾

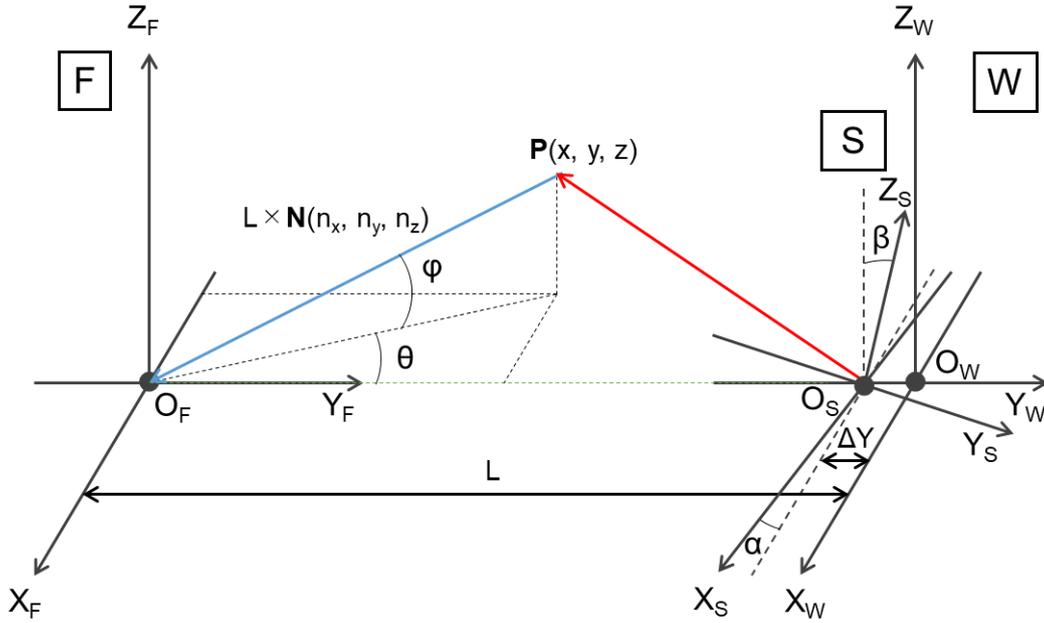


図 2.5 本測定法における座標系

光源から出て光路長 L の光線が到達した点が測定点であり、その光線方向が法線ベクトルと正負反転することから、光学系の座標系 F における \mathbf{P} と \mathbf{N} は

$${}^F\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ L \\ 0 \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (式 2.1)$$

$${}^F\mathbf{N} = - \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (式 2.2)$$

と表せる。光学系の座標系 F と試料系の座標系 W は共有の Y 軸上で L だけ直線移動した座標系なので、座標系 W での測定点座標 \mathbf{P} および \mathbf{N} は

$${}^W\mathbf{P} = L \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \varphi \cos \theta \\ \sin \varphi \cos \theta \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ L \\ 0 \end{pmatrix} = L \begin{pmatrix} -\sin \theta \\ \cos \varphi \cos \theta - 1 \\ \sin \varphi \cos \theta \end{pmatrix} \quad (式 2.3)$$

$${}^W\mathbf{N} = {}^F\mathbf{N} \quad (式 2.4)$$

また、試料系の座標系 W とサンプルの座標系 S は α 、 β および Δy によって座標変換が出来るので、座標系 W における \mathbf{P} と \mathbf{N} は

$${}^W\mathbf{P} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ \Delta y \\ 0 \end{pmatrix} \quad (式 2.5)$$

$$\begin{aligned}
{}^w\mathbf{P} &= \begin{pmatrix} x \cos \alpha + y \sin \alpha \\ -x \sin \alpha \cos \beta + y \cos \alpha \cos \beta + z \sin \beta - \Delta y \\ x \sin \alpha \sin \beta - y \cos \alpha \sin \beta + z \cos \beta \end{pmatrix} \\
{}^w\mathbf{N} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{pmatrix} \\
{}^w\mathbf{N} &= \begin{pmatrix} n_x \cos \alpha + n_y \sin \alpha \\ -n_x \sin \alpha \cos \beta + n_y \cos \alpha \cos \beta + n_z \sin \beta \\ n_x \sin \alpha \sin \beta - n_y \cos \alpha \sin \beta + n_z \cos \beta \end{pmatrix}
\end{aligned} \tag{式 2.6}$$

と変換できる。式 2.2~2.6 より

$$x \cos \alpha + y \sin \alpha = -L \sin \theta \tag{式 2.7}$$

$$-x \sin \alpha \cos \beta + y \cos \alpha \cos \beta + z \sin \beta - \Delta y = L \cos \varphi \cos \theta - L \tag{式 2.8}$$

$$x \sin \alpha \sin \beta - y \cos \alpha \sin \beta + z \cos \beta = L \sin \varphi \cos \theta \tag{式 2.9}$$

$$n_x \cos \alpha + n_y \sin \alpha = \sin \theta \tag{式 2.10}$$

$$-n_x \sin \alpha \cos \beta + n_y \cos \alpha \cos \beta + n_z \sin \beta = -\cos \varphi \cos \theta \tag{式 2.11}$$

$$n_x \sin \alpha \sin \beta - n_y \cos \alpha \sin \beta + n_z \cos \beta = -\sin \varphi \cos \theta \tag{式 2.12}$$

式 2.7 および 2.10 から α を求めることができる。

$$\begin{aligned}
x \cos \alpha + y \sin \alpha &= -L n_x \cos \alpha - L n_y \sin \alpha \\
\therefore \alpha &= \tan^{-1} \left(-\frac{x + L n_x}{y + L n_y} \right)
\end{aligned} \tag{式 2.13}$$

α を式 2.7 に代入して θ を求めることができる。また、式 2.9 と 2.12 から

$$\begin{aligned}
x \sin \alpha \sin \beta - y \cos \alpha \sin \beta + z \cos \beta \\
= -L(n_x \sin \alpha \sin \beta - n_y \cos \alpha \sin \beta + n_z \cos \beta)
\end{aligned} \tag{式 2.14}$$

となり、 β を求められる。求めた β と式 2.9 から φ が得られる。最後に式 2.8 と 2.11 より

$$\begin{aligned}
-x \sin \alpha \cos \beta + y \cos \alpha \cos \beta + z \sin \beta - \Delta y \\
= L(n_x \sin \alpha \cos \beta - n_y \cos \alpha \cos \beta - n_z \sin \beta) - L
\end{aligned} \tag{式 2.15}$$

となり、 Δy が求められる。以上より 5 軸の数値制御情報を求めることができる。

2.6 4分割フォトダイオードによる法線ベクトルの測定

4分割フォトダイオード(Quadrant Photodiode : QPD)を検出器に用いた法線ベクトル検出光学系の概略図を図 2.6 に示す。本光学系における座標系はレーザー光進行方向を Y 軸、検出器面における水平方向を X 軸、鉛直方向を Z 軸とする。レーザー光源から射出された直線偏光レーザー光は、集光レンズ 1 によって集光され、ミラーと偏光ビームスプリッター(Polarizing Beam Splitter : PBS)により進行方向を試料照射方向に曲げられる。その後、 $\lambda/4$ 波長板で直線偏光を円偏光にし、集光レンズ 2 で再び集光された光は測定点上で集光径 ϕ のスポットとなる。試料面で反射した光は再度集光レンズ 2、 $\lambda/4$ 波長板、PBS を通過して QPD に集光径 ψ で集光される。

QPD は図 2.6 に示すように水平方向と垂直方向に 2 つずつセルを持つ設計のため、光線の X 方向、Z 方向のシフト量に応じて QPD の各セルからの出力 V_A 、 V_B 、 V_C 、 V_D が変化する。したがって、 $V_A + V_B$ と $V_C + V_D$ の差分の変化および $V_A + V_D$ および $V_B + V_C$ の差分の変化から光線の重心位置の変化が 2 次元情報で得られる。この手法は差分の変化を確認する手法であるため、QPD 内に光線全てが入射されることが実験条件になる。したがって、測定可能な形状誤差の上限は検出器面における集光径 ψ と QPD の検出面の大きさ、測定試料の理想形状によって決定される。集光径 ϕ が大きすぎると測定できる形状の制限が厳しくなり、小さすぎると外乱や迷光の影響が大きくなる。

次に光学素子の配置について述べる。集光レンズ 1 の焦点位置と集光レンズ 2 間の距離を A 、集光レンズ 2 と QPD 面の距離を A 、試料面による反射がある時の集光レンズから集光点までの距離を B 、集光点と試料面の距離を C 、試料がないときの集光レンズ 2 から集光点までの距離を $B + C + C'$ とする。試料が平面である場合を除いて $C = C'$ は成り立たない。測定における光路長 L は、試料面と検出器の距離なので $L = A + B + C$ となる。光学素子の選定および配置は平面試料を設置した時のサンプル面の集光径 ϕ と QPD 面での集光径 ψ 、光路長 L によって決定する。

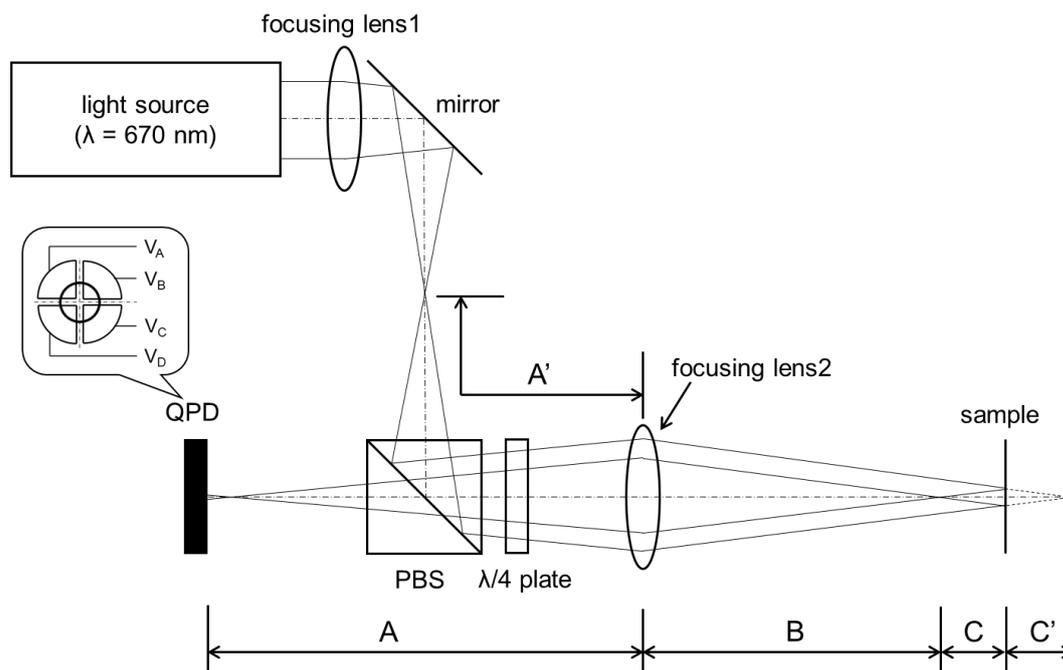


図 2.6 法線ベクトル検出光学系の概略図

このような光学系において問題になるのが試料の曲率半径によって集光位置が変化し、 B と C の長さが変化することである。また、曲率半径が小さい試料においては光線が大きく変形するため、QPD 上でのレーザー光の形状を円形に維持できない場合がある。球面およびシリンダカルのような測定点ごとの光線変形が一定である試料、曲率半径が大きく平面に近い試料の形状測定については測定開始点付近で4つの回転軸を ± 0.05 度で回転することで角度変化に対するQPD出力の応答を事前に調べることで解決可能である。曲率変化を含む非球面では、曲率の変化の大きさによってはレイトレースをして形状による光線の変形とQPD上での集光を確認してから形状測定する必要がある。

2.7 形状算出アルゴリズム

本測定法における座標と法線ベクトルから形状を導出する方法は、形状をモデル関数で表現する手法である。モデル関数を微分した関数を基底関数として最小二乗法で法線ベクトルデータにフィッティングし、求められた係数を基にモデル関数を計算することで形状を求める。⁷⁾ここでは、一般的な関数フィッティングによる形状導出について述べる。

最初に、2次元での形状導出を考え、形状 $y(x)$ を以下の関数の線形結合で表現する。ここでの ϕ_n は n 次のモデル関数、 a_n は係数である。

$$y(x) = a_1\phi_1(x) + \dots + a_N\phi_N(x) = \sum_{n=1}^N a_n\phi_n(x) \quad (\text{式 2.16})$$

両辺を微分して、 $y(x)$ の微分関数 $y'(x)$ を求めると

$$y'(x) = a_1\phi'_1(x) + \dots + a_N\phi'_N(x) = \sum_{n=1}^N a_n\phi'_n(x) \quad (\text{式 2.17})$$

ここで、 M 個のデータ (x'_j, y'_j) ($j=1\sim M$)があれば N 式からなる連立一次方程式となり、式 2.18 が得られる。 $M=N$ であれば通常の一次方程式、 $M>N$ であれば過剰適合の連立一次方程式となる。

$$\begin{pmatrix} y'_1 \\ \vdots \\ y'_M \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \phi'_1(x_1) & \dots & \phi'_N(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi'_1(x_M) & \dots & \phi'_N(x_M) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_N \end{pmatrix} \quad (\text{式 2.18})$$

y' のベクトルを \mathbf{b} 、 ϕ' の行列を \mathbf{A} 、 a のベクトルを \mathbf{x} とすると

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (\text{式 2.19})$$

本測定法では $M>N$ となるようにデータ数とモデル関数の次数を決定するため、過剰適合の連立一次方程式となり、 \mathbf{x} を求めることができない。そこで、式 2.19 の左辺と右辺のベクトル差のノルムが最小になるように未知数 \mathbf{x} を求める。これは最小二乗法に帰結する。この問題は以下のように表される。

$$\min_{\mathbf{x}} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\| \quad (\text{式 2.20})$$

この問題は次のように整理していくことができる。

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \|\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}\|^2 &= 0 \\ \Leftrightarrow \frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b})^T (\mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{b}) &= 2(\mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{x} - \mathbf{A}^T \mathbf{b}) = 0 \end{aligned} \quad (\text{式 2.21})$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{A}^T \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{A}^T \mathbf{b}$$

したがって、未知数 \mathbf{x} は

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (\text{式 2.22})$$

以上より、式 2.16 の a_n が求まったので $y(x)$ を求めることができる。

三次元について同様の手順でモデル関数のフィッティングをする。形状 $z(x, y)$ を以下のような関数の線形結合で示す。

$$z(x, y) = \sum_{n=1}^N a_{n0}\phi_n(x) + \sum_{i=1}^N a_{0i}\phi_i(y) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N a_{ni}\phi_{ni}(x, y) \quad (\text{式 2.23})$$

x 方向の微分 $f(x, y)$ と y 方向の微分 $g(x, y)$ は以下の式 2.24 と式 2.25 のようになる。

$$f(x, y) = \sum_{n=1}^N a_{n0}\phi'_n(x) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N a_{ni} \frac{\partial}{\partial x} \phi_{ni}(x, y) \quad (\text{式 2.24})$$

$$g(x, y) = \sum_{i=1}^N a_{0i}\phi'_i(y) + \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^N a_{ni} \frac{\partial}{\partial y} \phi_{ni}(x, y) \quad (\text{式 2.25})$$

ここでM個のデータ (x_j, y_j, f_j, g_j) があるとする

$$\begin{pmatrix} f_1 \\ \vdots \\ f_M \\ g_1 \\ \vdots \\ g_M \end{pmatrix} = \mathbf{A} \begin{pmatrix} a_{10} \\ \vdots \\ a_{N0} \\ a_{01} \\ \vdots \\ a_{0N} \\ a_{11} \\ \vdots \\ a_{NN} \end{pmatrix} \quad (\text{式 2.26})$$

ここでの \mathbf{A} は以下のような行列である

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \phi'_1(x_1) & \dots & \phi'_N(x_1) & & 0 & \frac{\partial}{\partial x} \phi_{11}(x_1, y_1) & \dots & \frac{\partial}{\partial x} \phi_{NN}(x_1, y_1) \\ \vdots & & \ddots & & & \vdots & & \ddots & \vdots \\ \phi'_1(x_M) & \dots & \phi'_N(x_M) & & & \frac{\partial}{\partial x} \phi_{11}(x_M, y_M) & \dots & \frac{\partial}{\partial x} \phi_{NN}(x_M, y_M) \\ & & & & & \frac{\partial}{\partial y} \phi_{11}(x_1, y_1) & \dots & \frac{\partial}{\partial y} \phi_{NN}(x_1, y_1) \\ & & & \phi'_1(y_1) & \dots & \phi'_N(y_1) & & & \vdots \\ & & & \vdots & & \ddots & & & \vdots \\ & & & \phi'_1(y_M) & \dots & \phi'_N(y_M) & & & \frac{\partial}{\partial y} \phi_{11}(x_M, y_M) & \dots & \frac{\partial}{\partial y} \phi_{NN}(x_M, y_M) \end{pmatrix} \quad (\text{式 2.27})$$

式 2.26 は左辺のベクトルを \mathbf{b} 、右辺のベクトルを \mathbf{x} として

$$\mathbf{b} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (\text{式 2.28})$$

となり、式 2.19 と同様の式になる。したがって、 $M > N$ の時の \mathbf{x} は

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b} \quad (\text{式 2.29})$$

である。式 2.29 を解くことにより形状算出が可能となる。

2.8 結言

本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について説明した。法線ベクトルから形状を算出する方法やその利点について説明した。さらに必要な法線ベクトルを算出する為に設計面形状、5軸数値制御、QPDを含む光学系により法線ベクトルを測定する手順について記し、最後に形状算出アルゴリズムを説明した。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 法線ベクトルから被測定面形状を算出する法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法について説明した。一般的な高さ分布から形状を算出するCMMとは異なり、角度分布から形状を算出する測定方法であることを示し、高さ方向の誤差が直接的に形状不確かさに依存しないという特長について言及した。
2. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法がレーザー光の直進性を基準として法線ベ

クトルを測定する測定原理について説明するとともに、回転駆動軸を主体とする回転4軸と並進1軸の5軸装置構成を例示し、各軸の駆動量から法線ベクトル算出に至る具体的な形状算出式についても詳細を示した。

3. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法に用いられるレーザー光の直進性を利用して法線ベクトルを高精度に測定する光学系について説明した。本光学系は通常の方法測定用のオートコリメータとは異なり曲率を持つ測定面に対しても高精度な角度測定が可能である。
4. 形状をモデル関数で表現することにより、法線ベクトルから形状を導出する方法を示した。具体的にはモデル関数を微分した関数を基底関数として最小二乗法で法線ベクトルデータにフィッティングし、求められた係数を基にモデル関数を計算することで形状を算出していることを数式により示した。

第3章 法線ベクトル追跡型ナノ形状測定装置

3.1 緒言

法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現させる装置として nano-profiler を開発した。本章では nano-profiler の装置構成について説明する。全体の装置構成と仕様を述べ、光学系と試料系の構成、測定環境について説明する。またこれまで開発してきた nano-profiler に対して第4章で詳述するスパイラルスキャンが可能な spiral-nano-profiler についても装置構成を説明する。

3.2 Nano-profiler の装置仕様

法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現する nano-profiler は前章でも示した通り図 3.1 に示す装置構成を持つ。また実際の写真を図 3.2 に示す。本装置は光学系側に回転 2 軸 (AF、CF) 並進 1 軸 (YF)、試料系側に回転 2 軸 (AW、CW)、並進 1 軸 (YW) の 6 軸構成となっている。¹⁾⁻²⁾

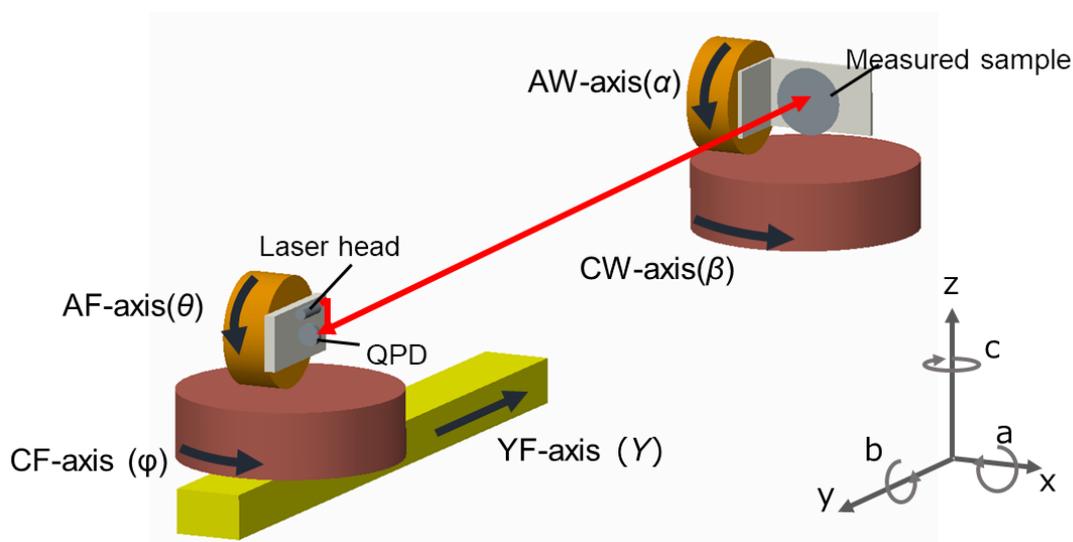


図 3.1 Nano-profiler の概略構成図

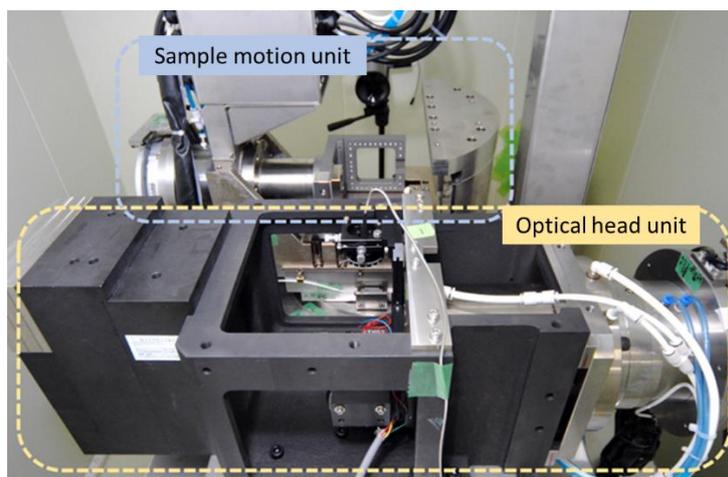


図 3.2 Nano-profiler の写真

以下に詳細な仕様を示す。³⁾⁻⁵⁾

・ 本体重量	約 1400kg
・ 取り付け試料重量	5kg 以下
・ 移動量	
光学系走査用水平主軸 (AF 軸)	± 10 degree
光学系走査用旋回台 (CF 軸)	± 10 degree
試料系走査用水平主軸 (AW 軸)	± 90 degree
試料系走査用旋回台 (CW 軸)	- 30 degree ~ + 180 degree
光学系用水平直線軸 (YF 軸)	40 mm
試料系用水平直線軸 (YW 軸)	24 mm
・ 最大速度	
光学系走査用水平主軸 (AF 軸)	300 degree / min
光学系走査用旋回台 (CF 軸)	300 degree / min
試料系走査用水平主軸 (AW 軸)	800 degree / min
試料系走査用旋回台 (CW 軸)	300 degree / min
光学系用水平直線軸 (YF 軸)	250 mm / min
試料系用水平直線軸 (YW 軸)	250 mm / min
・ 最小分解能	
光学系走査用水平主軸 (AF 軸)	2×10^{-6} degree
光学系走査用旋回台 (CF 軸)	2×10^{-6} degree
試料系走査用水平主軸 (AW 軸)	2×10^{-6} degree
試料系走査用旋回台 (CW 軸)	2×10^{-6} degree

光学系用水平直線軸 (YF 軸)	0.001 μm
試料系用水平直線軸 (YW 軸)	0.001 μm
・最小指令単位	
光学系走査用水平主軸(AF 軸)	1×10^{-5} degree
光学系走査用旋回台(CF 軸)	1×10^{-5} degree
試料系走査用水平主軸(AW 軸)	1×10^{-5} degree
試料系走査用旋回台(CW 軸)	1×10^{-5} degree
光学系用水平直線軸(YF 軸)	0.001 μm
試料系用水平直線軸(XW 軸)	0.001 μm

電機品の詳細を以下に示す。

・水平軸用 AC サーボモーター (ABC-80MP, ABC-50MP)	2 台
・旋回軸用 AC サーボモーター (ABT-240M)	1 台
・旋回軸用 AC サーボモーター (ABT-240MP)	1 台
・テーブル送り用リニアモーター (600D/4 : FANUC)	1 台
・試料シフト用リニアモーター (300D/4 : FANUC)	1 台
・案内面潤滑ポンプ用モーター	1 台
・水平軸用 AC サーボモーター用制御盤	1 台

ロータリーエンコーダおよびリニアスケールは以下を用いている。

・回転軸 : HEIDENHAIN RPN886	4 個
・直線軸 : HEIDENHAIN LIP281R	2 個

機械精度の詳細を以下に示す

・水平主軸端面の振れ (SPAM)	0.05 μm
・水平主軸外面の振れ (SPAM)	0.05 μm
・旋回台上面の振れ (SPAM)	0.05 μm
・旋回台外面の振れ (SPAM)	0.05 μm
・直線軸 (YF) の移動真直度 (水平・垂直面内)	0.10 $\mu\text{m} / 40 \text{ mm}$
・直線軸 (YW) の移動真直度 (水平・垂直面内)	0.20 $\mu\text{m} / 24 \text{ mm}$
・水平主軸の位置決め精度	± 3.0 秒
・水平主軸の繰り返し位置決め精度	± 0.3 秒
・旋回台の位置決め精度	± 3.0 秒
・旋回台の繰り返し位置決め精度	± 0.3 秒
・直線軸の位置決め精度 (40 mm)	$\pm 0.3 \mu\text{m}$

・直線軸の位置決め精度 (24 mm)	$\pm 0.3 \mu\text{m}$
・直線軸の繰り返し位置決め精度	$\pm 0.05 \mu\text{m}$
・直線軸の微小うねり (40 mm)	$0.03 \mu\text{m}$
・直線軸の微小うねり (24 mm)	$0.05 \mu\text{m}$

※SPAM : Single Point Asynchronous Error Motion

空気圧源の詳細を以下に示す。

・空気圧 (東芝機械推奨)		0.7 MPa 以上
・必要流量		1000 L / min(ANR)
・空気温度		(20~25 °C) ± 0.1 °C
・湿度	圧力下降点	10 °C
・空気質	油含有量	0.01 mg/m ³ 以下
	固形物	0.01 μm 以下

冷却水の水温および流量は

水温 15 °C のとき	8 L/min 以上
水温 25 °C のとき	13 L/min 以上
水温 35 °C のとき	30 L/min 以上
・水質	軟水

数値制御機は図 3.3 に示す FANUC Series 30i-modelA を使用している。



図 3.3 FANUC Series 30i-modelA

3.3 Nano-profiler の光学系と試料系の構成

Nano-profiler に用いる光学ヘッドを図 3.4、光学素子の配置図を図 3.5、QPD の概要を図 3.6、レーザー光源および光学素子の仕様を表 3.1 に示す。レーザー光源には波長 670 nm の赤色半導体レーザーを用いている。レーザー光は直線偏光でファイバー端のコリメータレンズにより平行光の状態で射出する。射出したレーザー光は焦点距離 35.0 mm の集光レンズ 1 により集光され、その後ミラーと偏光ビームスプリッタ 1 により試料側へ光路を曲げられ 1/4 波長板により円偏光状態になる。そして焦点距離 80.9 mm の集光レンズ 2 により再度集光された後、試料に入射する。試料で反射したレーザー光は集光レンズ 2 を通過し、1/4 波長板で射出時と直角な直線偏光になり偏光ビームスプリッタ 1、ND フィルタ、偏光ビームスプリッタ 2 を通過して QPD に入射する。

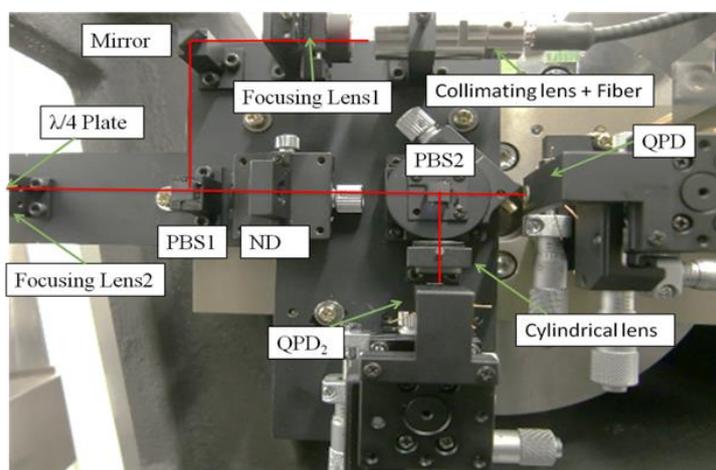


図 3.4 Nano-profiler に取り付けられている光学ヘッド

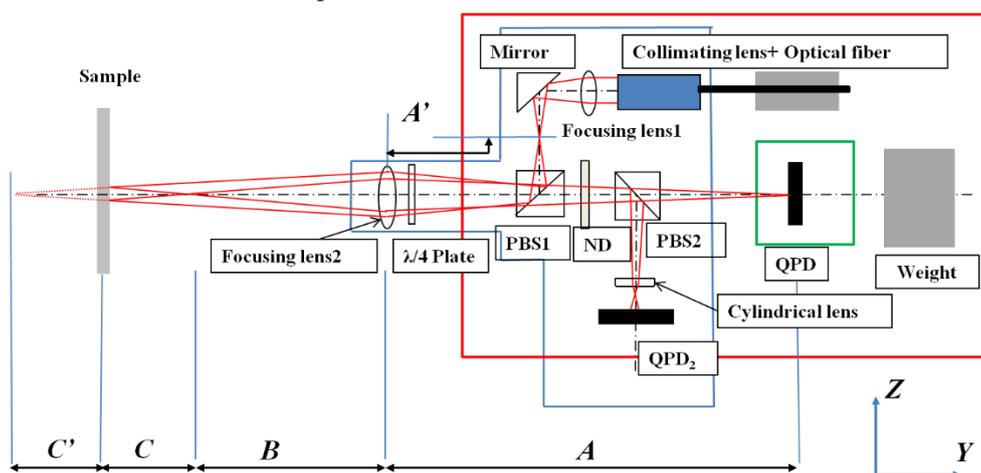


図 3.5 Nano-profiler の光学素子配置概略図

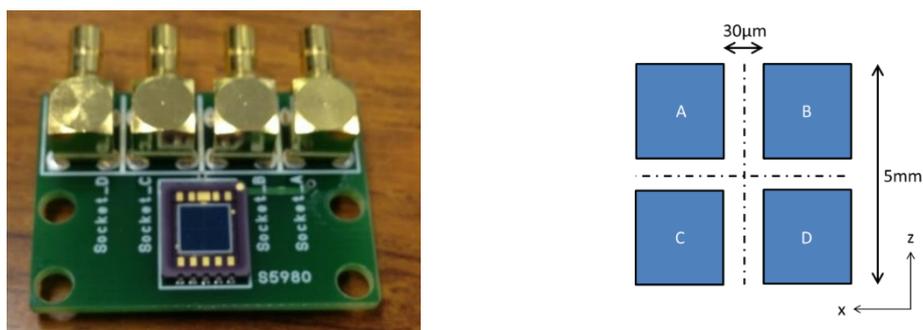


図 3.6 QPD の外観と概要図

表 3.1 Nano-profiler の光学部品

Optical elements	Specification
Laser light	QIOPTIQ iFLEX2000 Wavelength: 670 ± 5 nm Power: 4 mW Power stability: < 2 % Beam diameter : 0.7 mm
Lens1	BK-7, $f = 35.0$ mm
Lens2	BK-7, $f = 80.9$ mm
Polarizing beam splitter1	BK-7, $5 \times 5 \times 5$ mm ³
Polarizing beam splitter2	BK-7, $5 \times 5 \times 5$ mm ³
$\lambda/4$ plate	BSL-7
ND filter	10 %, BSL-7
QPD	Hamamatsu photonics S1557 Size: $\phi 1$ mm

また図 3.7 に試料系に取り付けた曲率半径 10.1 m 凹非球面ミラーを示す。試料ホルダーにはマイクロメーターヘッド付き並進ステージが取り付けられている。マイクロメーター付き並進ステージによって Z 方向の、装置の YB 軸によって X 方向の位置調整が可能である。

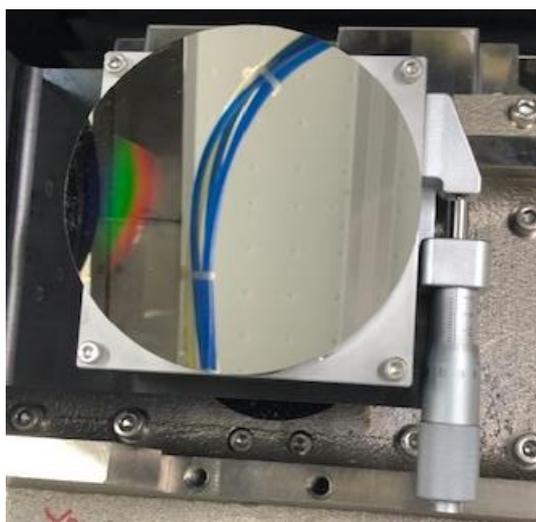


図 3.7 曲率半径 10.1 m 凹非球面ミラーの設置例

3.4 データアキュイジションシステム

本装置で得られるデータは回転 4 軸のロータリーエンコーダ出力、並進 2 軸のリニアエンコーダ出力および QPD のシグナルである。ロータリーエンコーダは 1 つ当たり 6 つの検出ヘッドで構成されており、それぞれからの出力を得ることができる。各軸のエンコーダとデータ収録機器(計測システム)、数値制御装置(サーボアンプ)の接続を図 3.8 と図 3.9 に示す。エンコーダの検出ヘッドからの正弦波電圧をインターポレータ(マグネスケール BD96 シリーズ)でバイナリ出力に変換してデータ収集している。データ収録機器上の LabVIEW にて全てのデータを同期取得する。測定トリガーは数値制御装置から発信される M80 信号のデジタルシグナルを使用する。

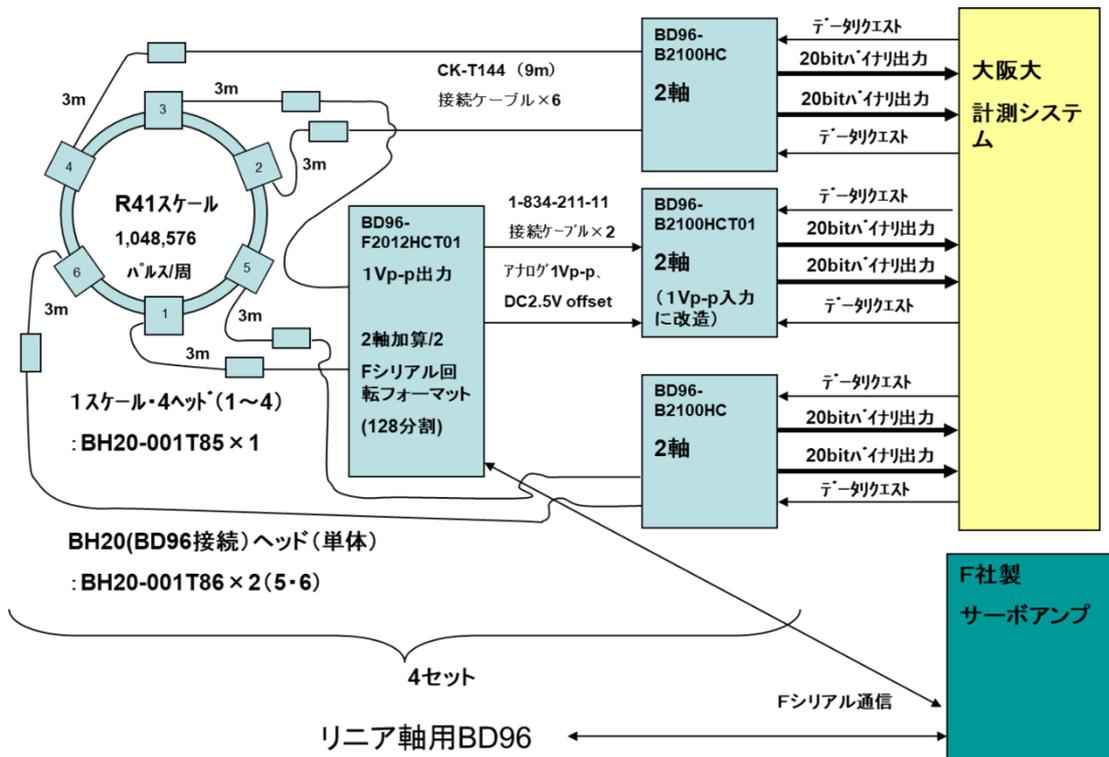


図 3.8 回転軸のデータアキュイジション概要図

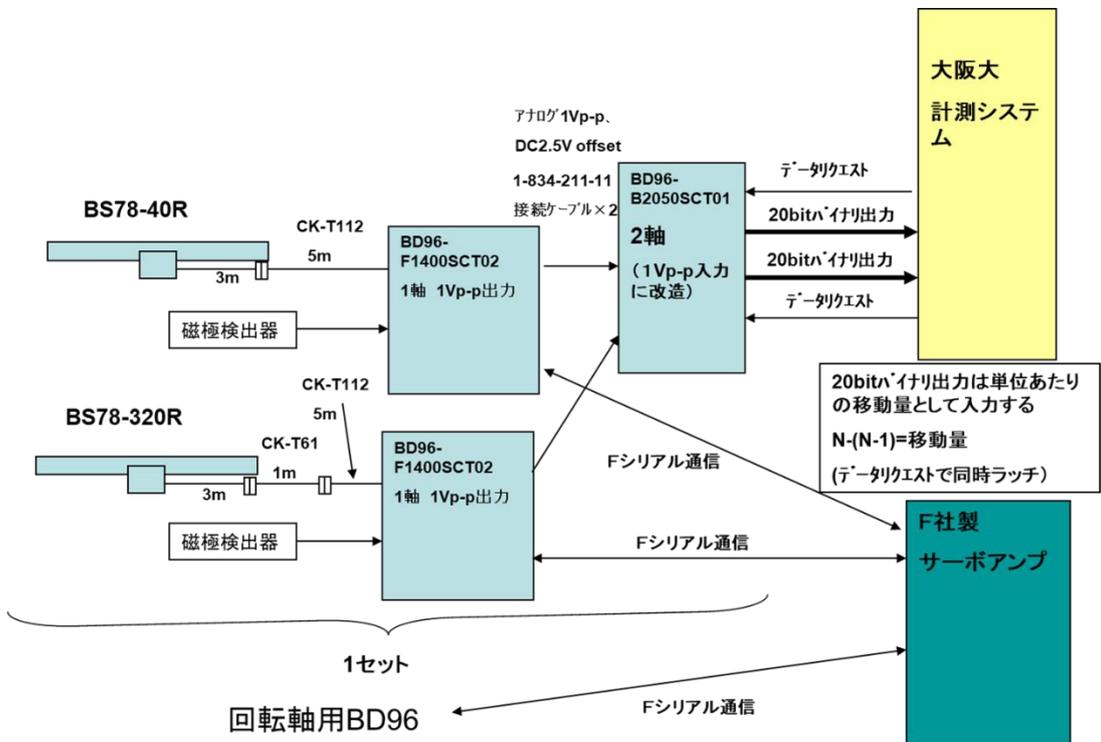


図 3.9 並進軸のデータアキュイジション概要図

3.5 測定環境

Nano-profiler は大阪大学ウルトラクリーンファシリティ (Ultra Clean Facility; UCF) の地下にある恒温室内に設置されている。恒温室の外観を図 3.10 に示す。恒温室内は図 3.11 に示すような水冷壁面に囲まれており、室温は 23 ± 0.02 °C に制御されている。



図 3.10 恒温室の外観



図 3.11 恒温室の水冷壁面

3.6 Spiral-nano-profiler の装置仕様

前出の装置とは異なり新たにスパイラル測定を実現する spiral-nano-profiler の装置仕様について説明する。Spiral-nano-profiler は測定時間を短縮させる為に図 3.12 に示す装置構成を持つ。⁶⁾ また実際の装置写真を図 3.13 に示す。本装置は光学系に回転軸(AF、CF)、試料系に回転軸(BW、CW)と直進軸(YF、YW) の全6軸構成である。これにより、非球面を含むあらゆる形状の測定が可能となる。Nano-profiler とは装置構成と光学系が異なり各仕様を説明する。

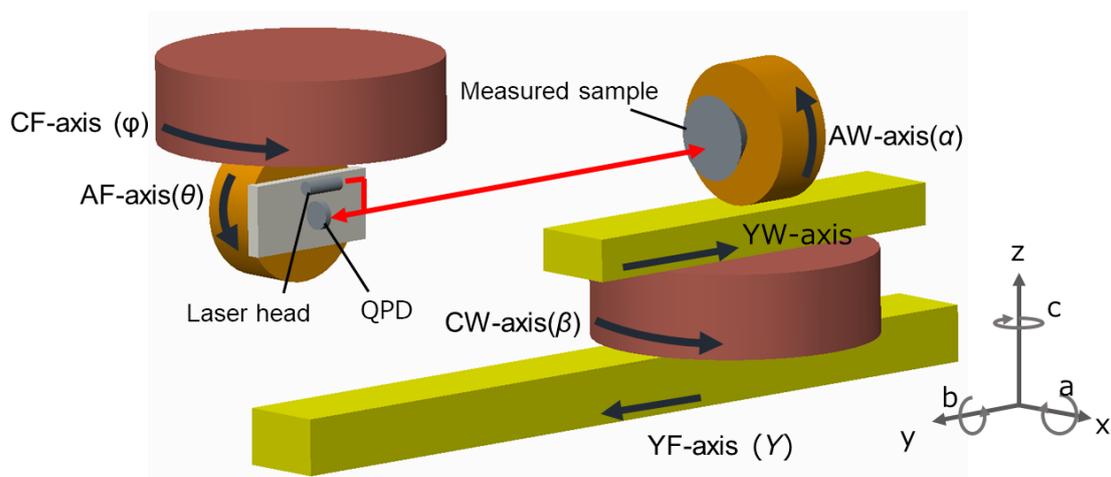


図 3.12 装置概略構成図

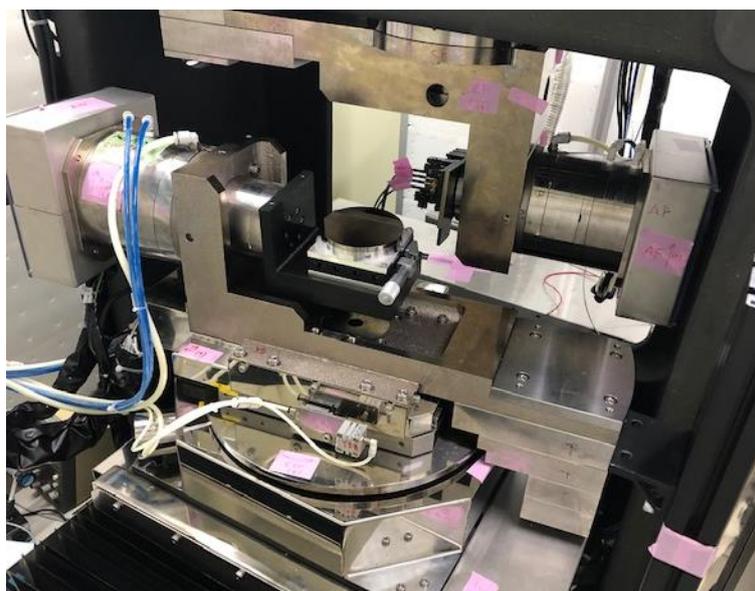


図 3.13 Spiral-nano-profiler の装置写真

本装置の詳細な仕様を以下に示す。

・ 本体重量	約 1200 kg
・ 取り付け試料重量	1 kg 以下
・ 移動量	
光学系走査用水平主軸(AF 軸)	± 10 degree
光学系走査用旋回台(CF 軸)	± 10 degree
試料系走査用水平主軸(AW 軸)	制限無し
試料系走査用旋回台(CW 軸)	-60 degree~+120 degree
光学系用水平直線軸(YF 軸)	300 mm
試料系用水平直線軸(YW 軸)	± 12 mm
・ 最大速度	
光学系走査用水平主軸(AF 軸)	1800 degree/min
光学系走査用旋回台(CF 軸)	1800 degree/min
試料系走査用水平主軸(AW 軸)	6400 degree/min
試料系走査用旋回台(CW 軸)	6400 degree/min
光学系用水平直線軸(YF 軸)	500 mm/min
試料系用水平直線軸(YW 軸)	250 mm/min
・ 最小分解能	
光学系走査用水平主軸(AF 軸)	5×10^{-6} degree
光学系走査用旋回台(CF 軸)	5×10^{-6} degree
試料系走査用水平主軸(AW 軸)	5×10^{-6} degree
試料系走査用旋回台(CW 軸)	5×10^{-6} degree
光学系用水平直線軸(YF 軸)	0.001 μ m
試料系用水平直線軸(YW 軸)	0.001 μ m
・ 最小指令単位	
光学系走査用水平主軸(AF 軸)	1×10^{-5} degree
光学系走査用旋回台(CF 軸)	1×10^{-5} degree
試料系走査用水平主軸(AW 軸)	1×10^{-5} degree
試料系走査用旋回台(CW 軸)	1×10^{-5} degree
光学系用水平直線軸(YF 軸)	0.001 μ m
試料系用水平直線軸(YW 軸)	0.001 μ m

の精度が保証されている。

光学系の回転軸に関しては、空気静圧軸受け、直線軸は V-V コロ案内方式を採用している。次に電動機に関しては、

・ 水平軸用 AC サーボモーター(ABC-50MP)	2 台
-----------------------------	-----

- ・ 旋回軸用 AC サーボモーター (ABT-240M) 2 台
- ・ テーブル送り用リニアモーター (600D/4 : FANUC)
- ・ 試料シフト用リニアモーター (300D/4 : FANUC)
- ・ 暗内面潤滑ポンプ用モーター
- ・ 水平軸用 AC サーボモーター用制御盤

を用いている。

機械精度としては、

- ・ 水平主軸端面の振れ (SPAM) 0.05 μm
- ・ 水平主軸外面の振れ (SPAM) 0.05 μm
- ・ 旋回台上面の振れ (SPAM) 0.05 μm
- ・ 旋回台外面の振れ (SPAM) 0.05 μm
- ・ 直線軸 (YF) の移動真直度 (水平・垂直面内) 0.10 $\mu\text{m}/40\text{mm}$
- ・ 直線軸 (YW) の移動真直度 (水平・垂直面内) 0.20 $\mu\text{m}/24\text{mm}$
- ・ 水平主軸の位置決め精度 ± 3.0 秒
- ・ 水平主軸の繰り返し位置決め精度 ± 0.3 秒
- ・ 旋回台の位置決め精度 ± 3.0 秒
- ・ 旋回台の繰り返し位置決め精度 ± 0.3 秒
- ・ 直線軸の位置決め精度 (40 mm) $\pm 0.3 \mu\text{m}$
- ・ 直線軸の位置決め精度 (24 mm) $\pm 0.3 \mu\text{m}$
- ・ 直線軸の繰り返し位置決め精度 $\pm 0.05 \mu\text{m}$
- ・ 直線軸の微小うねり (40 mm) 0.03 μm
- ・ 直線軸の微小うねり (24 mm) 0.05 μm

の精度が保証されている。

※SPAM : Single Point Asynchronous Error Motion

空気圧は 0.4 MPa 以上が推奨され、

- ・ 必要流量 1000 L/min (ANR)
- ・ 空気温度 (20~25 $^{\circ}\text{C}$) ± 0.1 $^{\circ}\text{C}$
- ・ 湿度 圧力下降点 10 $^{\circ}\text{C}$
- ・ 空気質 油含有量 0.01 mg/m^3 以下
- 固形物 0.01 μm 以下

冷却水の水温および流量は、

- 水温 15 $^{\circ}\text{C}$ のとき 8 L/min 以上
- 水温 25 $^{\circ}\text{C}$ のとき 13 L/min 以上
- 水温 35 $^{\circ}\text{C}$ のとき 30 L/min 以上
- 水質 軟水

数値制御機は、図 3.14 に示す FANUC Series 30i-modelB を使用している。



図 3.14 FANUC Series 30i-modelB

また spiral-nano-profiler に搭載する光学ヘッドを図 3.15 に、光学素子の配置図を図 3.16 に示す。光学系の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た。使用するレーザー、および各光学素子の仕様を表 3.2 に示す。レーザー光は、長さ 8 m の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、焦点距離 35.0 mm の集光レンズ 1 を通過後、ミラーによって 90° 曲げられたのち集光する。集光後再び広がった光は、偏光ビームスプリッター 1 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、焦点距離 20.0 mm の集光レンズ 2 を通過後、試料表面上に $\phi = 0.1$ mm のスポットとして入射する。入射した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、直線偏光となり、偏光ビームスプリッター 1、偏光ビームスプリッター 2 を直進し、4 分割フォトダイオード(QPD)に入る。また、光量調節、フレア防止のために ND フィルタを設置することが出来る。レンズ 1、レンズ 2 は X, Z 軸方向、QPD は X, Y, Z 軸方向にそれぞれ調整できる。偏光ビームスプリッター 2 は X 軸周り、ND フィルタは Z 軸周りにおりの調整ができる。

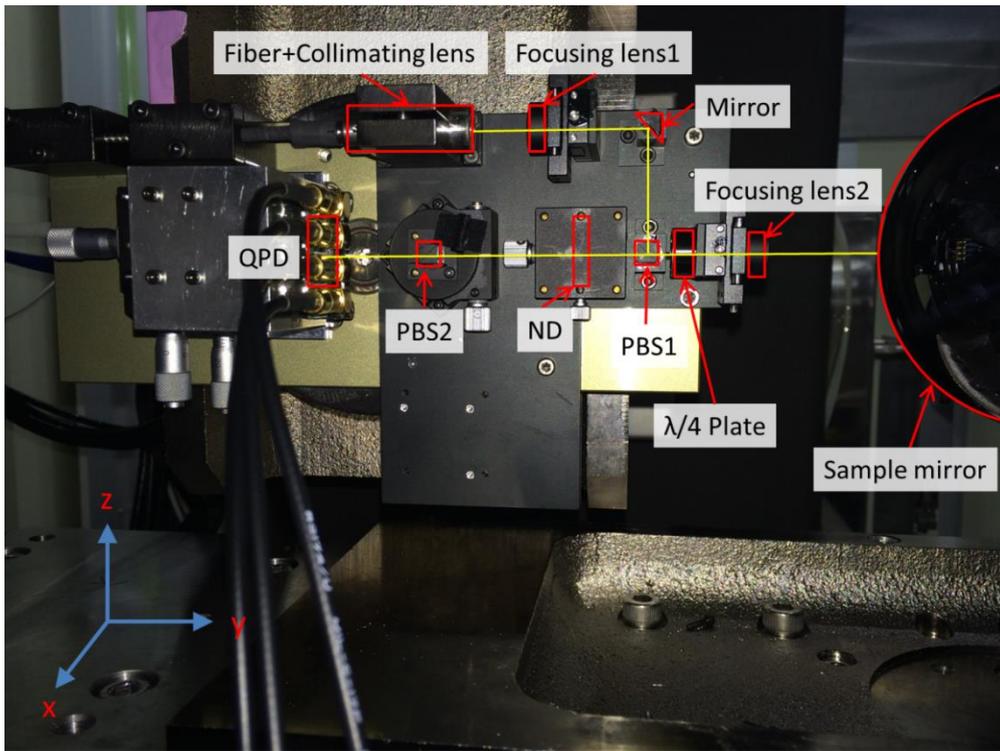


図 3.15 Spiral-nano-profiler の光学ヘッド

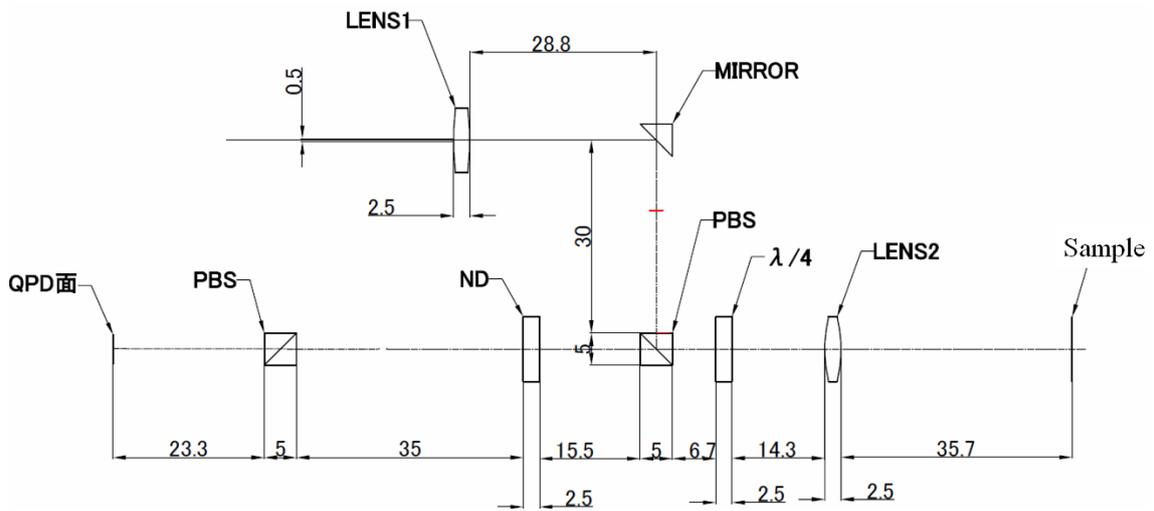


図 3.16 光学配置図

表 3.2 光学ヘッドに用いた光学部品

Optical elements	Specification
Laser light	QIOPTIQ iFLEX2000 Wavelength: 670 ± 5 nm Power: 4 mW Power stability: < 2 % Beam diameter : 0.7 mm
Lens1	BK-7, $f = 35.0$ mm
Lens2	BK-7, $f = 80.9$ mm
Polarizing beam splitter1	BK-7, $5 \times 5 \times 5$ mm ³
Polarizing beam splitter2	BK-7, $5 \times 5 \times 5$ mm ³
$\lambda/4$ plate	BSL-7
ND filter	10 %, BSL-7
QPD	Hamamatsu photonics S5980 Size: 5mm \times 5mm

3.7 結言

本章では法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現する nano-profiler の装置構成について説明した。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現する nano-profiler の装置構成、光学系、試料系、測定環境に関する仕様を詳述した。
2. 通常のラスタースキャンを実現する nano-profiler とは異なり、スパイラルスキャンが可能となる spiral-nano-profiler に関して通常の nano-profiler とは異なる装置構成と光学系に関して仕様を詳述した。

第 4 章 誤差の低減

4.1 緒言

目標の不確かさを達成するためには nano-profiler の誤差を低減する必要がある。誤差の中でも最も影響が大きい要素がステージの回転量を測定しているロータリーエンコーダの角度出力値と形状算出時のパラメータである測定光学系の光路長であり、この 2 つの誤差量低減について論じる。また新たな測定手法として駆動軸を削減し誤差低減を図る新たな測定手法と大面積・短時間測定を目的としたスパイラル測定について本章で論じる。

4.2 ロータリーエンコーダの校正

4.2.1 等分割平均法によるロータリーエンコーダの校正

前章までに述べた通り角度精度の保証は nano-profiler の不確かさに直結する要素であり、中でも 4 つの回転駆動軸は最も重要となる。¹⁾ 高精度に回転軸を制御するためにはロータリーエンコーダが使用される。ロータリーエンコーダは国家標準器で校正することが可能であり、高精度に角度を保証することができる。²⁾⁻³⁾ しかしロータリーエンコーダを使用する際には装置への組付けが必要であり、組み立て誤差が発生する。⁴⁾ 本研究では 30 nm の不確かさを目標としており、 $\pm 0.2 \mu\text{rad}$ の正確さで角度を保証する必要がある。そこでこの組み立て誤差を低減させる方法の提案と実証、そして精度評価を本章で実施する。

ロータリーエンコーダは、複数のエンコーダの読み取りヘッドから取得した値に基づいて校正が可能である。⁵⁾⁻⁷⁾ 図 4.1 に示すように、読み取りヘッドはスケールに沿って等間隔に配置されている。

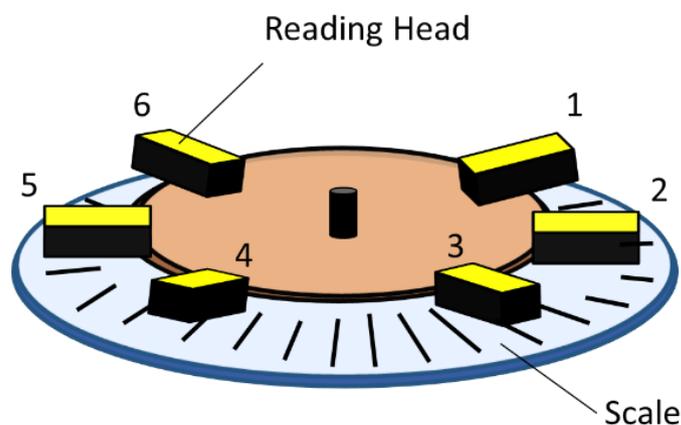


図 4.1 ロータリーエンコーダ上の読み取りヘッド配置

等分割平均法によるロータリーエンコーダの校正について述べる。ロータリーエンコーダの目盛には合計 N 本のマーキングラインがあり、個別に i ($i = 1, 2, \dots, N$) で示されている。また、理想スケール位置と実際のスケール位置の角度差を θ_i とした。合計 n 個の読み取りヘッドを j ($j = 1, 2, \dots, n$) とし、 j 番目の読み取りヘッドの i 番目の目盛番号から出力される角度信号を ϕ_{ij} とすると、このときの真の角度 β_i は次式で表すことができる。

$$\beta_i = \phi_{ij} - \theta_{i+(N^*j-1)/n} \quad (\text{式 4.1})$$

各読み取りヘッドが出力する角度の平均値 σ_i は次のように表される。

$$\sigma_i = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \phi_{ij} = \beta_i + \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \theta_{i+N^*j/n} \quad (\text{式 4.2})$$

ここで θ_i は次のようにフーリエ級数を使用して表すことができる。

$$\theta_i = \sum_{m=1}^N E_m \sin\left(m \frac{2\pi}{N} i + \alpha_m\right) \quad (\text{式 4.3})$$

ここで E_m と α_m は、それぞれ m 次フーリエ成分の振幅と位相角を表す。そして式 4.3 を式 4.2 に代入すると、次のフーリエ級数法則を適用できる。

$$\sigma_i = \beta_i - \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} \sum_{m=1}^N E_m \sin\left\{\frac{2\pi n}{N} \left(i + N^* \frac{j}{n}\right) + \alpha_m\right\} \quad (\text{式 4.4})$$

$$= \beta_i - \sum_{k=1}^N E_{kn} \sin\left(kn \frac{2\pi}{N} i + \alpha_{kn}\right) \quad (\text{式 4.5})$$

ここで、式 4.5 の第 1 項は角度の真の値を表し、式 4.5 の第 2 項はエンコーダの誤差総量を表し、スケール偏差の n 次フーリエ成分の整数倍で表される。真の角度 β_i は、出力角度 ϕ_{ij} の平均値 σ_i から n 次フーリエ成分の整数倍を減算することによって決定される。式 4.5 から、 n はフーリエ成分の次数を決定する。したがって n が大きいほどフーリエ次数が大きくなり、より正確なキャリブレーションが保証される。ただしエンコーダヘッドの配置には物理的な制限がある。実際のキャリブレーションでは、 n 個のエンコーダヘッドの出力をエンコーダの角度座標ごとに平均化した。ただし式 4.5 に示すように、 n 個のエンコーダ出力データを平均化した後でも、 n 次フーリエ成分エラーが残る。実際の校正角度データは角度座標に従ってエンコーダ出力から平均値を差し引くことで算出する。⁸⁾⁻¹¹⁾

4.2.2 国家標準器によるロータリーエンコーダの校正方法

ロータリーエンコーダの絶対校正に使用した国家標準器の装置構成について説明する。図 4.2 に装置の全体写真、図 4.3 に装置の概略図を示す。この装置は、大きく等速回転機構と割出し機構の 2 つの部分から構成される。¹²⁾

等速回転機構は図 4.3 のように、精密回転形空気軸受②(回転精度 $0.1 \mu\text{m}$ 以下の Canon

製 AB150)に2つのエンコーダ③、④(Canon 製のレーザーロータリーエンコーダ X-1M,225000P/R)の目盛板が取り付けられており、回転制御用エンコーダの信号をフィードバックし、DC ブラシレスモータ①で等速回転制御されている。上部に校正するエンコーダを設置できる場所がある。速度制御範囲は0.1 rpm から10 rpm である。5 rpm 時の回転速度の正確さは $\pm 0.01\%$ 、基準エンコーダの1目盛間内の回転むらは $\pm 0.1\%$ 以内である。

割出し機構部は基準エンコーダ④の検出ユニットを任意の回転角に割り出す機構である。回転形空気軸受⑤(回転精度 $0.1\mu\text{m}$ 以下の Canon 製 AB100)に基準エンコーダの検出ユニットが固定され、DC ブラシレスモータ⑥によって割り出される。割出し角の検出はエンコーダ⑦(Canon 製 X-1M,225000P/R)で行われ、後段に2048倍の内挿器を用い、検出角度分解能は $0.014\mu\text{rad}$ である。このエンコーダの正確さが $\pm 2.5\mu\text{rad}$ のため、割出しの正確さも同程度になる。固定はサーボクランプで行われ、その正確さは ± 4 パルス($\pm 0.56\mu\text{rad}$)である。

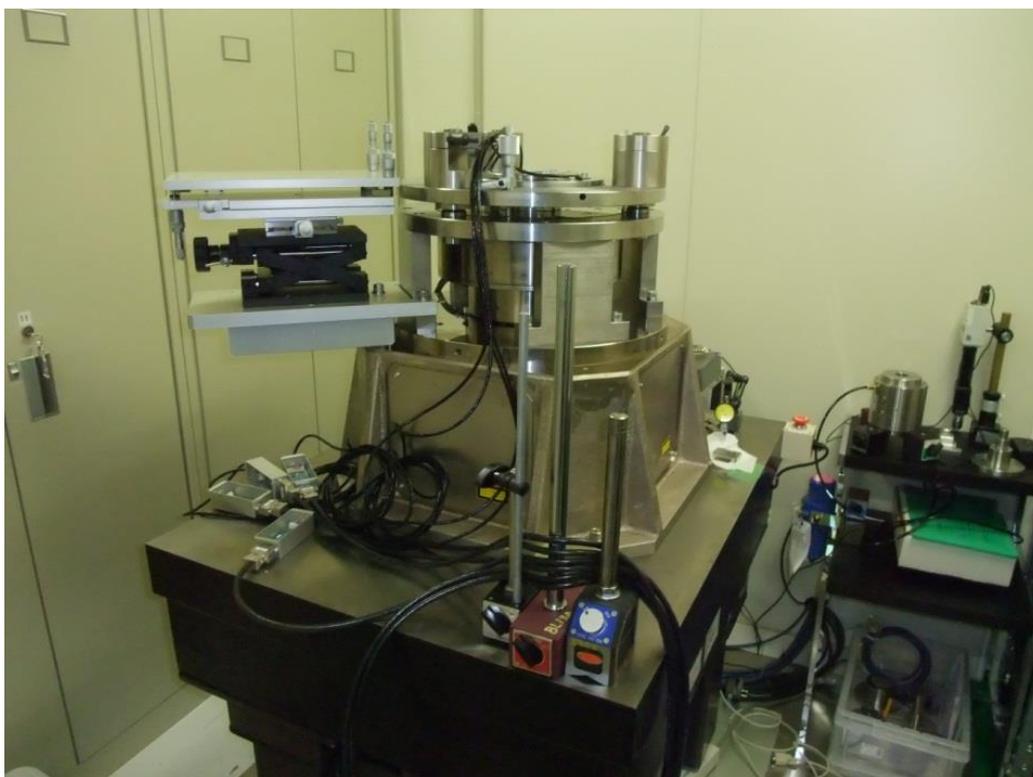


図 4.2 国家標準器の全体写真

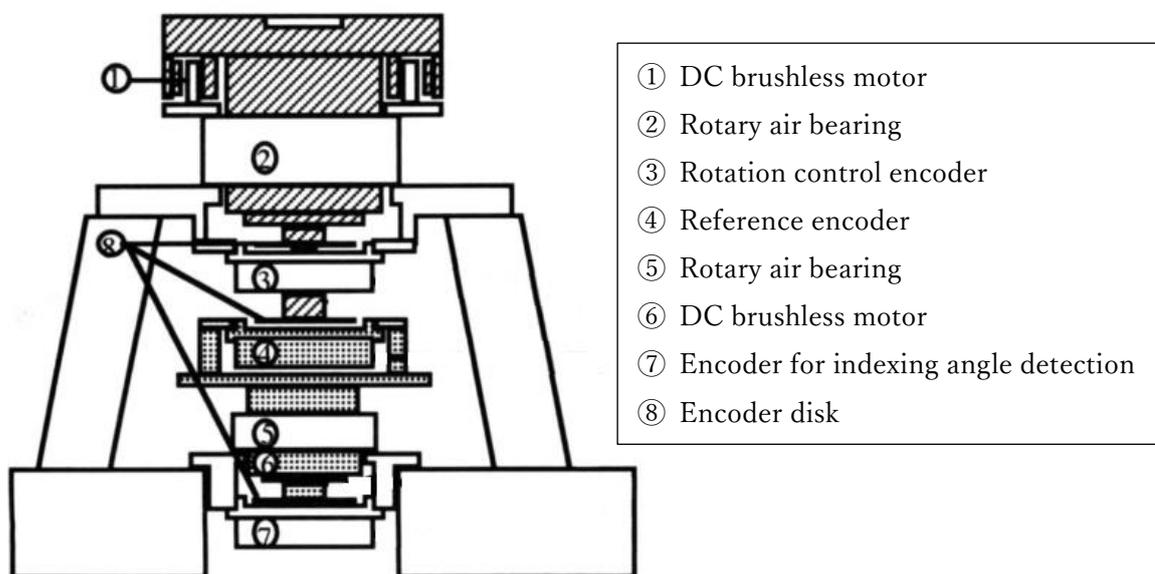


図 4.3 国家標準器の概念図

本校正実験によって本ロータリーエンコーダを装置に搭載した際に、真の角度を求めるために必要となる校正曲線の 6 の整数倍次フーリエ成分を求める。まず、エンコーダの自律校正のための絶対校正実験手順を示す。

- (1) 基準軸を回転テーブルに取り付ける。
- (2) 基準軸を回転させ、ストレス無く回転する位置にてブラケットを固定する。固定後、基準軸を抜き取る。(図 4.4)
- (3) ブラケットの高さ及び面振れを調整。ブラケット高さはブロックゲージを使用して、基準高さに対して $\pm 5 \mu\text{m}$ 以内に合せ、面振れを $5 \mu\text{m}$ 以内に調整する。(図 4.5 上)
- (4) スケールブラケットを取り付ける。(図 4.5)

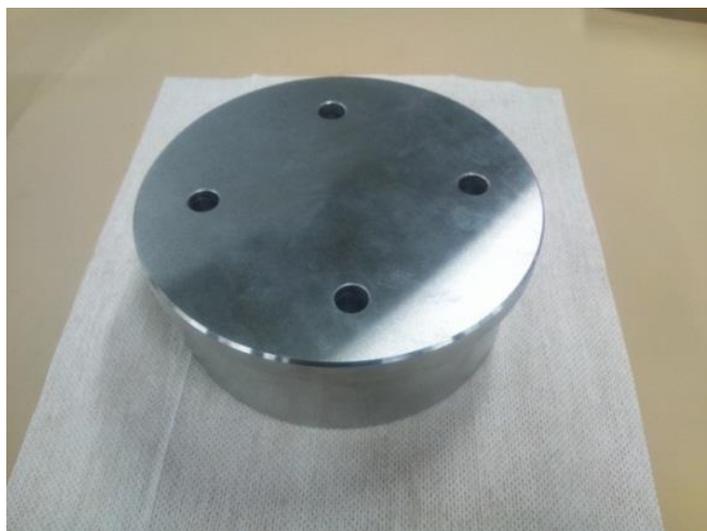


図 4.4 ブラケットの固定の様子(上)と使用した基準軸 (下)

- (1)~(4)の手順でブラケットを国家標準器に取り付けた。次にロータリーエンコーダを取り付けて測定する。
- (5) ロータリーエンコーダのスケールを国家標準器の回転軸に取り付ける。(図 4.6 上) この時ロータリーエンコーダのスケールの中心と国家標準器の回転軸の軸中心のずれを約 $1 \mu\text{m}$ になるようにマイクロセンスを使用して調整しながら固定する。
- (6) ヘッドユニットを取り付け、4箇所固定する。(図 4.6 下)
- (7) 国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。国家標準器内の基準エンコーダを割り出し角用エンコーダで5等分割、7等分割、11等分割の位置に移動させ、基準エンコーダBの信号をフィードバックし、DC ブラシレスモータで等速回転させロータリーエンコーダを校正する。なお、国家標準器の操作には Labview を用いた。



図 4.5 ブラケットの調整の様子（上）とスケールブラケット設置後の様子（下）

- (8) ヘッドユニットを一度はずし、最初のヘッドユニットの取付けを（条件 1-1）とすると上から見て時計回りに 90° ヘッドユニットを回転させヘッドユニットを取り付ける。これを（条件 1-2）とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。
- (9) ヘッドユニットを再びはずし、（条件 1-1）より上から見て時計回りに 180° ヘッドユニットを回転させヘッドユニットを取り付ける。これを（条件 1-3）とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。

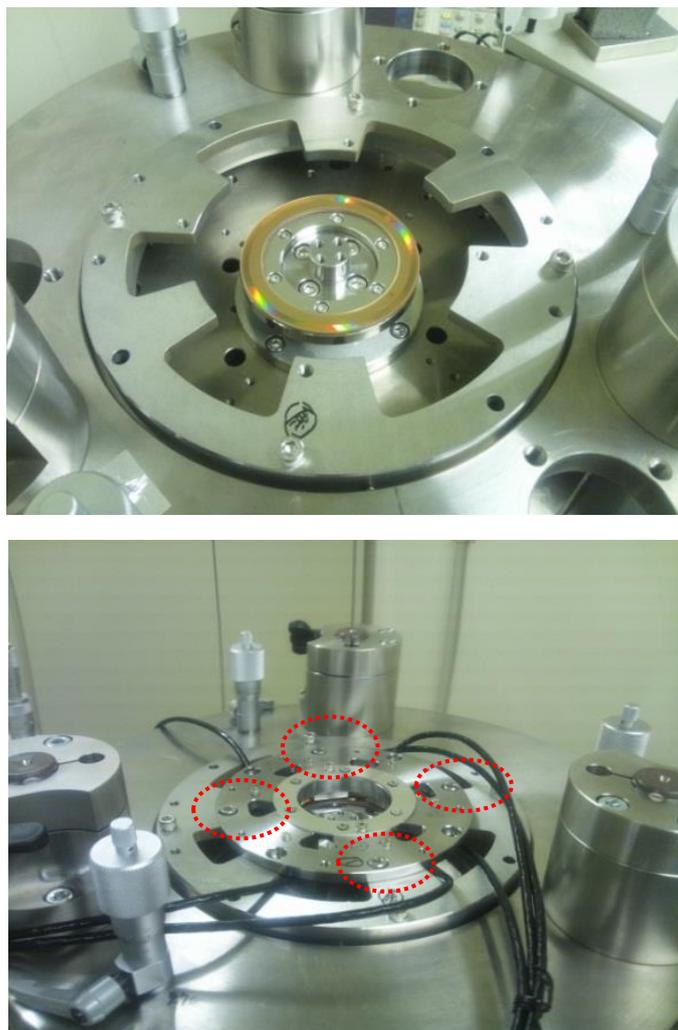


図 4.6 スケール設置後（上）とヘッドユニット設置後(下)

- (10)ヘッドユニットを一度はずし、最初のヘッドユニットの取付けを（条件 1-1）とすると上から見て時計回りに 90° ヘッドユニットを回転させヘッドユニットを取り付ける。これを（条件 1-2）とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。
- (11)ヘッドユニットを再びはずし、（条件 1-1）より上から見て時計回りに 180° ヘッドユニットを回転させヘッドユニットを取り付ける。これを（条件 1-3）とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。
- (12)ヘッドユニットを再びはずし、（条件 1-1）より上から見て時計回りに 270° ヘッドユニットを回転させヘッドユニットを取り付ける。これを（条件 1-4）とする。
- (13)偏荷重をかけた場合の影響を見るため、（条件 1-4）の状態です約 500 g の重りを図 4.8 のように回転台の上に乗せる。これを（条件 1-5）とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。
- (14)スケールの取付けの変化による影響を見るため、前述した校正実験手順(1)～(6)をもう

一度やり直した。ただし、この時(2)においてブラケットを上から見て時計回りに 90° 回転させて取り付けた。これを(条件2)とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。

(15)再び前述の校正実験手順(1)~(6)をやり直した。ただし、この時(2)において(条件1-1)から見てブラケットを時計回りに 180° 回転させて取り付けた。これを(条件3)とし、国家標準器でロータリーエンコーダを校正する。

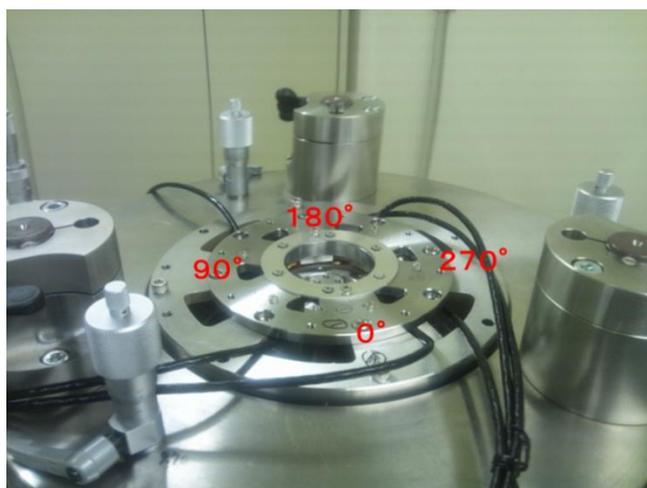


図 4.7 ヘッドユニット取り付けの様子

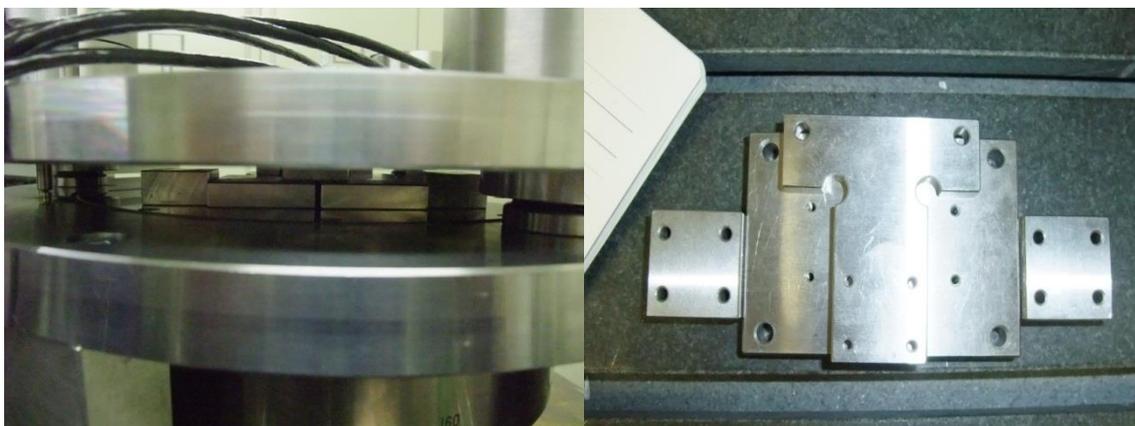


図 4.8 ロータリーエンコーダへの偏荷重の与え方(左)と使用した重り(右)

4.2.3 国家標準器による校正結果

図4.9はヘッド0において各条件での校正曲線を示している。図4.9の(条件1)に関しては(条件1-1~4)ほとんど同じであり、(条件1-5)の偏荷重がかかっている場合のみ変化が見られる。しかしながら(条件1)~(条件3)の間で比較すると偏荷重による変化は比較的小さく、校正曲線の変化の大きな原因は取り付けによる変化であるということが分かる。このことから、ロータリーエンコーダを国家標準器により絶対校正したとしても、実機に搭載するとその校正曲線は大きく変化してしまい、絶対校正した校正曲線によりロータリーエンコーダを校正することは困難であると考えられる。¹³⁾ よってこの結果からも、角度誤差 $\pm 0.1 \mu\text{rad}$ が必要とされているので自律校正は必要不可欠であることが分かる。

つぎに、各条件の校正曲線からその6の整数倍次のフーリエ成分の総和を抜き出したものを図4.10に示した。そして、各条件での校正曲線の6の整数倍次フーリエ成分の平均を求め、各条件での校正曲線の6の整数倍次フーリエ成分から引き、取り付けによる校正曲線の6の整数倍次フーリエ成分の誤差を求める。(図4.11)

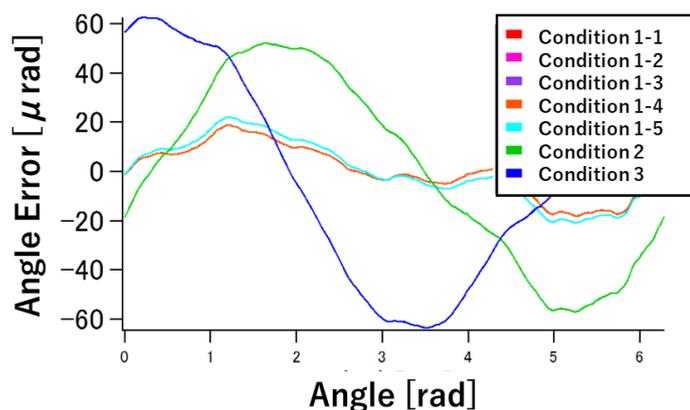


図4.9 各条件における校正曲線

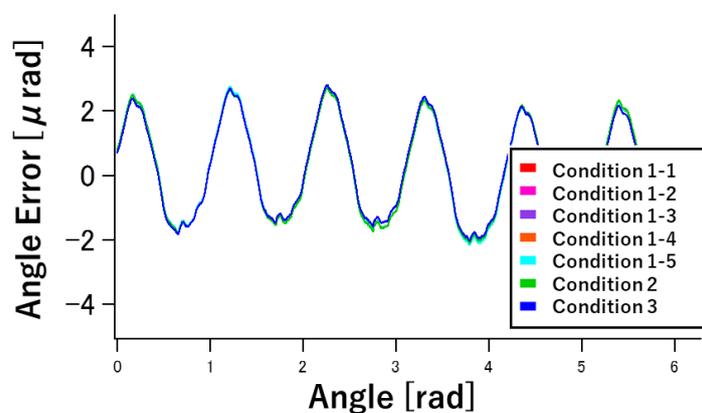


図4.10 各条件での校正曲線の6の整数倍次フーリエ成分

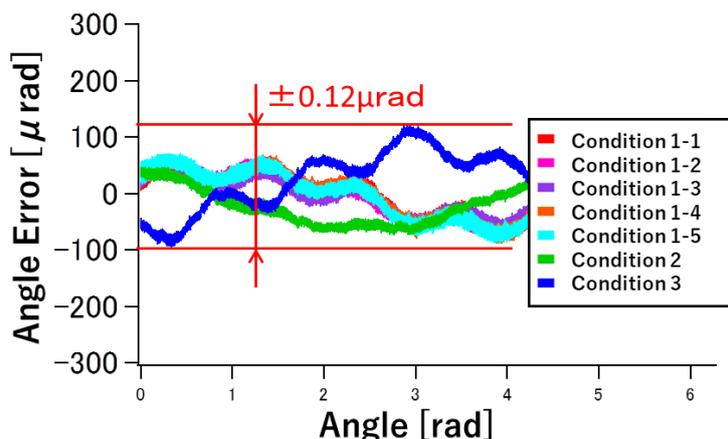


図 4.11 各条件での校正曲線の 6 の整数倍次フーリエ成分の変化量

図 4.10 を見ると取り付け条件を変えてもほとんど 6 の整数倍次フーリエ成分の総和に変化がないことがわかる。またその変化量は、図 4.11 より $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ となっている。つまり、ヘッドユニット・ブラケットの取り付けを変えてしまうと角度誤差の 6 の整数倍次フーリエ成分は $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ の範囲で変化してしまう。この変動幅がロータリーエンコーダの取り付け誤差に相当する。

4.2.4 国家標準器による校正量の低減

ロータリーエンコーダは、国家標準器を使用して $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ の精度で校正した後、ナノプロファイラーに取り付けられ、nano-profiler のロータリーエンコーダは等間隔に配置された 6 個のエンコーダヘッドで構成されている。等分割平均法によりロータリーエンコーダの組立誤差を想定した自律校正を実施した。一方、国家標準器による校正量にはエンコーダの取り付け誤差は含まれていないので、取り付け誤差を含めてロータリーエンコーダをより正確に校正するには、国家標準器の校正曲線よりも 6 個のエンコーダヘッドによる等分割平均法を使用する方が適切となる。しかし 6 個のエンコーダヘッドを使用した校正では、スケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍の誤差が残る。そのためスケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍以外の成分を 6 個のエンコーダヘッドで校正し、スケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍のみの成分を校正した。

図 4.12 (a) は国家標準器の校正曲線を示し、図 4.12 (b) は曲線から抽出されたスケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍のみを示している。それぞれの成分はフーリエ展開の結果から抽出され。図 4.12 (a) と図 4.12 (b) を比較すると、校正量が低減している。さらに、6 個のエンコーダヘッドを使用した自律校正には、組立誤差も含まれている。この 2 点から国家標準器自体の校正量を減らし、より正確な校正ができると結論を下した。

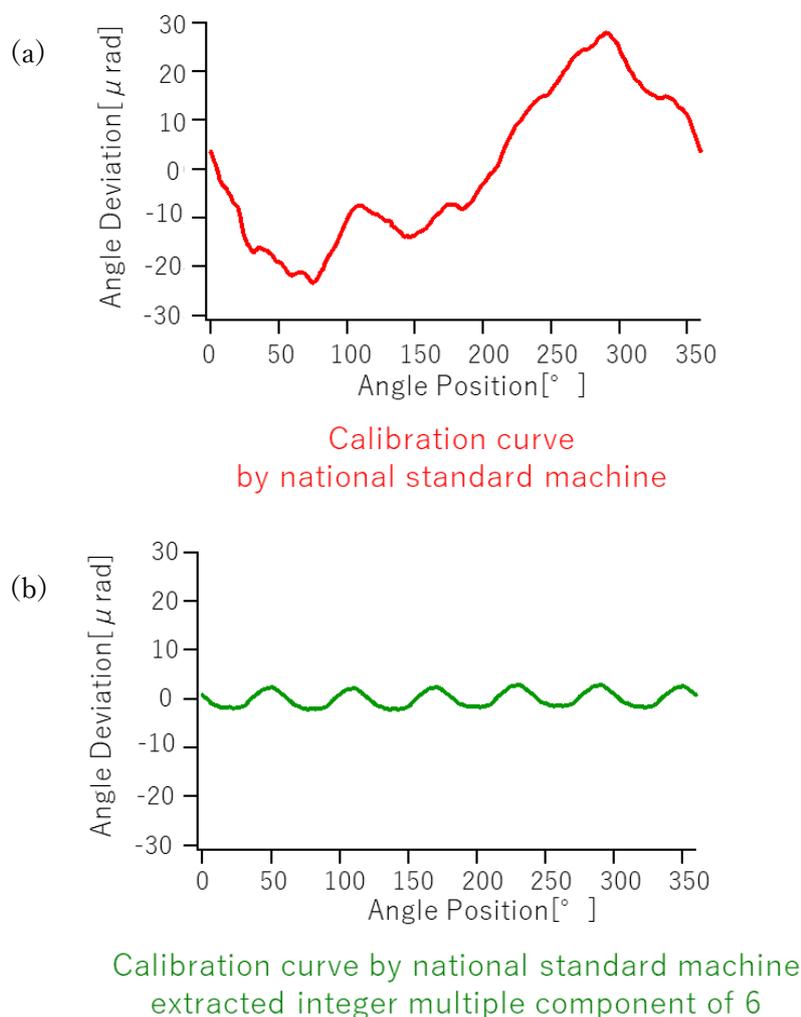


図 4.12 国家標準器の校正量と 6 の整数倍成分を抽出した後の校正量

4.2.5 校正量の評価

前述のように、nano-profiler の 6 個のエンコーダヘッドを用いて自律校正を行い、スケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍以外の成分を校正した。他の成分は国家標準器から導出された校正量を基に校正した。ただしこの校正量には nano-profiler の組立誤差は含まれていない。したがってスケール偏差の 6 次フーリエ成分の整数倍に含まれるエンコーダ取り付け誤差の検証が必要である。このため nano-profiler の 6 個のエンコーダヘッドに加えて、検証用の新しいオンマシン評価用エンコーダを nano-profiler に新たに取り付けた。駆動軸に取り付けられた机上評価用エンコーダには、図 4.13 に示すように 10 個のエンコーダヘッドが搭載されている。エンコーダヘッドは円周を 3 分割および 8 分割した場所に配置されている。スケール偏差の 3 次フーリエ成分の整数倍以外の成分は 3 分割されたエンコーダヘ

ッドで、スケール偏差の8次フーリエ成分の整数倍以外の成分は8個分割されたエンコーダヘッドで校正する。この2つの校正結果を組み合わせることで、最小公倍数であるスケール偏差の24次フーリエ成分の整数倍を除いて、図4.13のようにエンコーダヘッドを配置することで自律校正を行うことができる。

図4.14はフーリエ次数成分ごとの国家標準器とオンマシン評価用エンコーダの校正量を示しており、表1は図4.12(b)に示すように6の整数倍成分を抽出した後、国家標準器から導出された校正量のフーリエ変換の結果をまとめた結果である。オンマシン評価用エンコーダで評価できないスケール偏差の24次フーリエ成分の整数倍以外を比較することで、6次成分の誤差が最大で $0.023\ \mu\text{rad}$ であることを確認した。また表4.1にまとめた全成分の2乗和の平均は $0.027\ \mu\text{rad}$ であり、目標の $\pm 0.2\ \mu\text{rad}$ に対して十分小さいことが確認できた。これらの校正精度は形状の測定不確かさ $30\ \text{nm}$ を達成するのに十分であり、本校正の適用により目標精度を達成できると結論付けた。

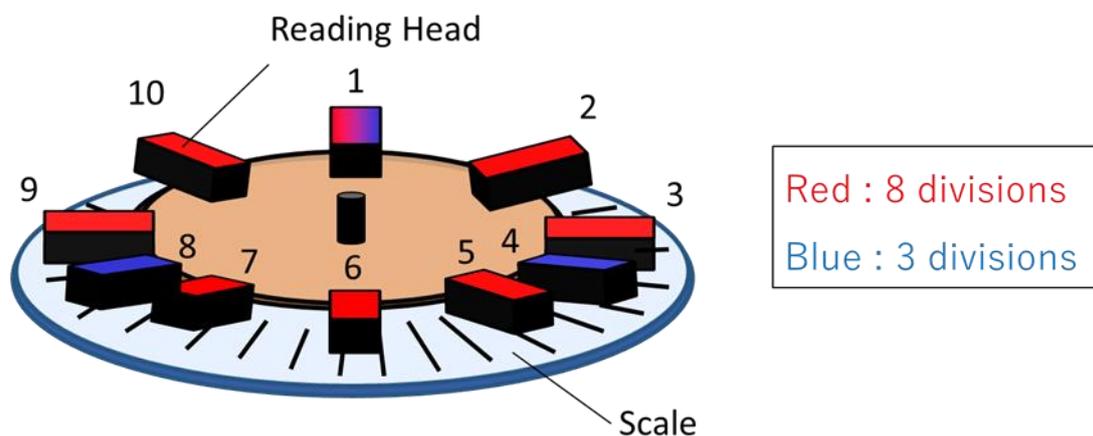


図4.13 オンマシン評価用エンコーダ

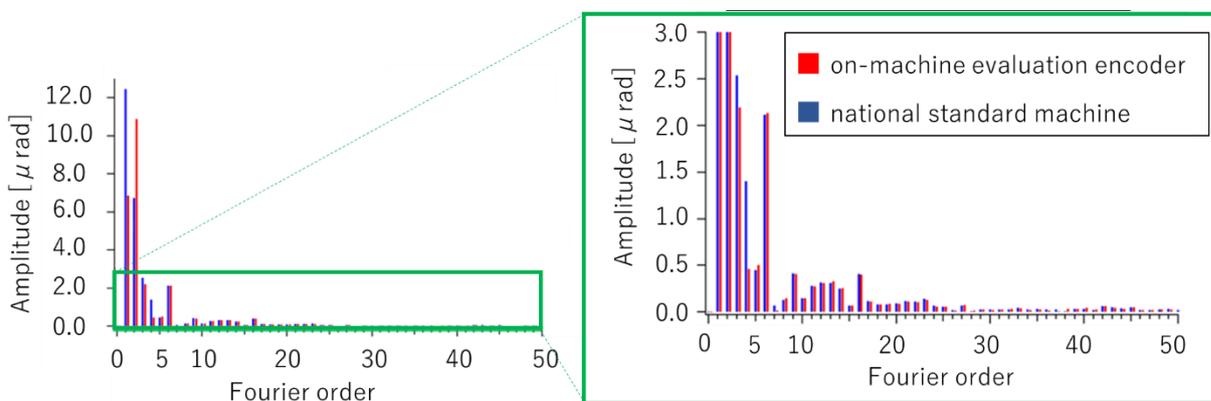


図4.14 オンマシン評価エンコーダと国家標準マシンを使用して導出された校正量

表 4.1 校正量の比較

Fourier order	Amplitude [μrad]		Difference [μrad]
	National standard machine	On-machine evaluation encoder	
6	2.133	2.110	0.023
12	0.310	0.315	-0.005
18	0.079	0.078	0.001
30	0.018	0.024	-0.006
36	0.016	0.027	-0.011
42	0.064	0.060	0.003

4.3 光路長の校正

4.3.1 マルチステップセルフキャリブレーション法

Nano-profiler では測定対象面の傾き分布から形状分布を算出するが、形状分布算出で重要なパラメータが光路長である。¹⁴⁾ 前節で評価されたロータリーエンコーダにより回転4軸の回転角度が正確に測定され、また光学系により反射レーザー光の角度が測定される。¹⁵⁾ 角度分布から形状分布を正確に算出するためには光路長の長さを保証することが必要となる。¹⁶⁾ 光路長はおよそ 400 mm となる様に装置設計がされているが、形状測定の不確かさ 30 nm を達成するためには 12 μm の不確かさで光路長を測定しなければならない。光路長は被測定面と光学系の中の QPD の間の距離となるが、物理的に測長することは難しい。そこで新たに測定時の光路長を変化させながら形状を測定することで光路長を推定するマルチステップセルフキャリブレーション法を提案する。

光路長を校正するためのマルチステップセルフキャリブレーションでは被測定面の形状を測定する際に光路長を変化させながら測定を行い、光路長の長さの違いによる形状測定結果の違いから光路長を求める。¹⁾⁻⁵⁾

最初にマルチステップセルフキャリブレーション法の具体的な手順について2つの光路長条件での測定例に基づいて説明する。この方法は3つのステップで構成される。第1ステップとして光路長を任意の L に設定する。第2ステップとして被測定面を測定し光路長 L を用いて形状を計算する。第3ステップとして Y 軸を既知の量 ΔL だけ変化させ形状を $L + \Delta L$ の光路長を基に計算する。

このように算出された2つの形状は L に正しい値が設定されていれば、光路長変化 ΔL が有る場合でも一致する。ただし L が正しい値に設定されていない場合、2つの算出された形状は一致しない。マルチステップセルフキャリブレーション法では、この時に入力される L の値を変化させて光路長を推定する。ただし L の値を変化させるというのは物理的な光路長を変化させるのではなく、形状算出をする際に使用する L の数値を変化させることを示している。

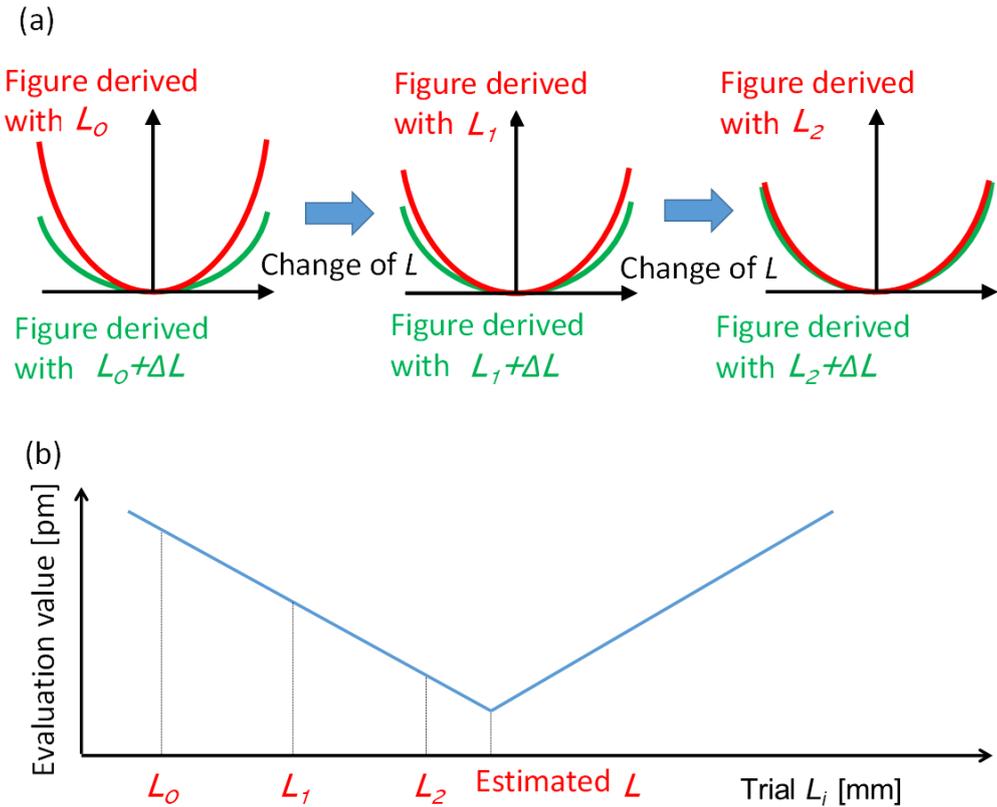


図 4.15 マルチステップセルフキャリブレーション法の測定例

図 4.15 を用いて前述の 3 ステップを説明すると第 1、第 2 ステップでは光路長を L_0 として測定を行い、光路長 L_0 を用いて形状算出を行う。そして第 3 ステップで光路長が $L_0 + \Delta L$ となるように Y 軸を駆動させ測定を行い $L_0 + \Delta L$ の光路長を用いて形状算出する。この 2 つの形状算出結果が図 4.15(a) の左側の赤と緑の形状算出結果となる。次に実際の測定を行うのではなく、形状算出の時に使用する光路長を L_0 から L_1 に変更して形状算出のみを再度行った結果が図 4.15(a) の真ん中の結果、更に L_2 に変更した際の形状算出結果が図 4.15(a) の右側の結果となる。図 4.15(a) の例では L_2 が最適な光路長 L に近い値となっていることが分かる。図 4.15(b) に示す様に形状算出に使用する L の値を変化させることで最適な L の値を推定することが可能となる。

またこのマルチステップセルフキャリブレーション法を実施する際に必要な nano-profiler の精度について事前に検証した。主な誤差要因として考えられるのは Y 軸の位置読み取り精度、Y 軸のピッチングとヨーイング誤差、回転 4 軸の回転精度の 3 つである。Y 軸の位置読み取り精度に関しては Y 軸のリニアスケールで保証する。リニアスケールは分解能 1 nm であり、ステージストローク全長 20 mm の範囲内で 1 μ m の精度が仕様として保証されている。Y 軸のピッチングとヨーイングは実測値から 0.25 μ rad であることを検証しており、 ΔL に対する傾きの影響は約 1 nm と非常に小さいことを確認した。また回転 4

軸のロータリーエンコーダに関しては第3章で示したように $0.02 \mu\text{rad}$ 以下の精度が保証されている。これらの結果より nano-profiler によるマルチステップセルフキャリブレーション法が精度的にも成立することが確認された。

4.3.2 シミュレーションによる測定パラメータの最適化

測定誤差が無い理想状態ではマルチステップセルフキャリブレーション法により誤差なく光路長を推定することが可能であるが、実際の測定では形状測定時に測定環境の影響や駆動誤差等によりランダムな誤差が生じる。したがってマルチステップセルフキャリブレーション法を効果的に実現するには、最適な測定パラメータを設定する必要がある。そこで事前のシミュレーションにより最適な測定パラメータを選定することを試みた。⁶⁾⁻⁸⁾

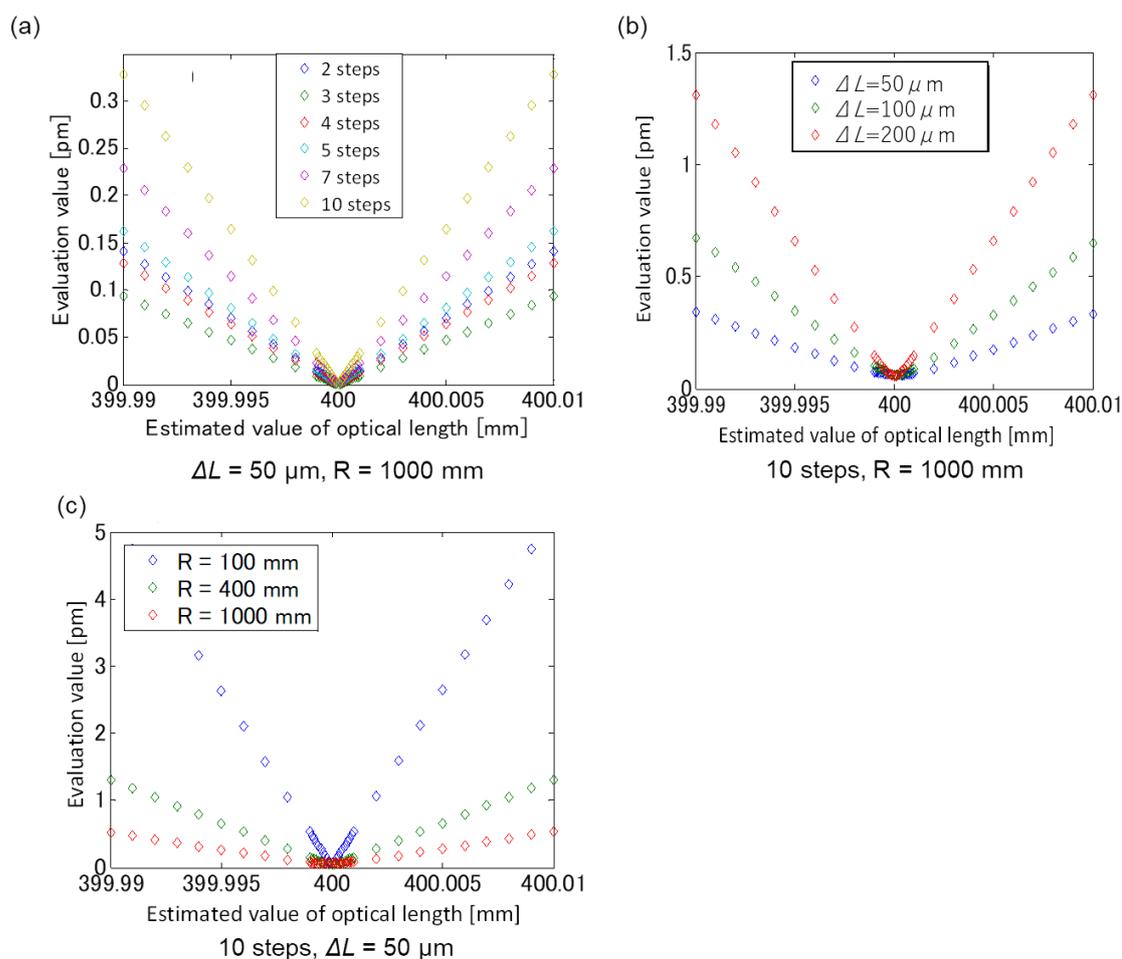


図 4.16 各パラメータにおける推定精度のシミュレーション結果

マルチステップセルフキャリブレーション法の推定精度は、被測定物を測定する面積により支配的な影響を受ける。測定面積が大きいほど推定精度は向上するが、一方測定誤差が大きくなる。具体的には、「ステージ駆動量」と「測定時間の増加に伴う温度変化」が主な誤差要因となり、測定時の誤差が大きくなると想定した。そこで、先行研究で再現性 1 mm 以下を達成している 20 mm×20 mm の領域を測定面積として採用した。¹⁵⁾⁻¹⁸⁾ また推定精度に影響を与える条件として ΔL の数、 ΔL の大きさ、曲率半径 R の 3 つの条件を設定した。

図 4.16 は 3 つの条件を変更したシミュレーションの結果を示している。グラフの縦軸は L で計算した数値と $L + \Delta L$ で計算した数値の差の PV 値を示しており、数値の差が小さいほど L の真の値に近い。図 4.16(a) は、 ΔL の数を 2 から 10 まで変化させた結果を示しており、 ΔL の数が大きくなるほど、勾配が急になることが確認された。この時グラフの傾きが大きいほど、 L の推定精度が高くなるので、 ΔL の数値が大きくなるほど推定精度が向上することが検証された。また図 4.16(b) は ΔL を 50、100、200 μm と変化させた結果を示している。このとき、Y ステージの駆動範囲を 2 mm と設定しており、 ΔL の最大値を 200 μm とした。その結果、 ΔL が大きいほどグラフの傾きが急になり、 L の推定精度が高くなることが検証された。図 4.16(c) は測定面の曲率半径を変化させた結果であり、曲率半径が 100、400、1000 mm の場合、曲率半径が小さい測定面の方が L の推定精度が高くなることが検証された。シミュレーションから、 ΔL の数を増やす、 ΔL を長くする、曲率半径を小さくすることで推定精度が向上することが検証された。またシミュレーション上では目標とする 12 μm に比べて非常に高い推定精度が確認されているが、実際の計測ではシミュレーションでは加味できない複雑な誤差が発生することが予測される。

4.3.3 実験のための光学調整

ミラー測定を行う際の光学調整の方法を以下に示す。測定に必要な光学ヘッドの満たすべき設置条件を図 4.17 に示す。光学ヘッドが満たすべき条件は大きく 4 つあり ① QPD と本装置光学系の回転中心が一致、② レーザーから試料への入射光が試料系の回転中心を通る、③ 入射経路が一致かつ YF 軸に平行、④ 反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通るである。

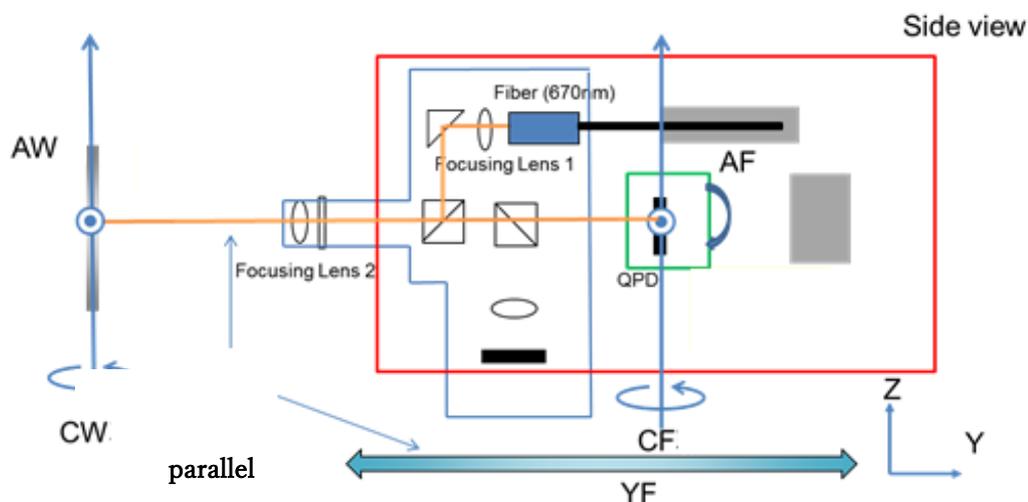


図 4.17 光学ヘッドの満たすべき設置条件

上述した 4 つの条件を満たすために以下の手順で調整を行う。まず図 4.18 に示すように AF 軸を 90° 回転させ顕微鏡を Z 軸方向から QPD を観察できるように設置する。このとき CF 軸を走査した時の QPD の目印となる不感帯の挙動を顕微鏡で観察する。図 4.3.5 のように、QPD が CF 軸の回転中心から離れていればその距離に相当する半径の円周上を移動する。移動する円の半径が最小になるように、QPD の X、Z 方向のマイクロメーターヘッドを用いて CF 軸の回転中心に QPD が来るように調整する。次に AF 軸を走査した時の QPD の不感帯の挙動を観察する。図 4.19 のように、QPD が AF 軸の回転中心から離れていれば同等の角度を走査した際に QPD の移動量は変化する。そのため QPD の移動量が最小になるように、QPD の Y 方向のマイクロメーターヘッドを用いて QPD が AF 軸の回転中心に来るように調整を行う。以上より条件①である、「QPD と本装置光学系の回転中心が一致」を満たすことができる。

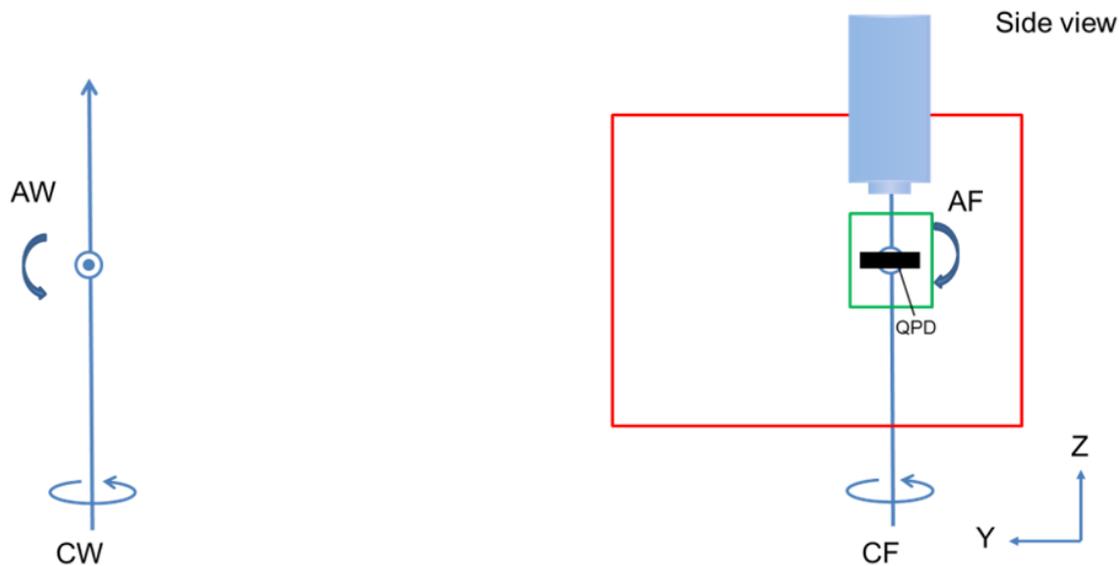


図 4.18 QPD を光学系の回転中心に調整するためのセットアップ

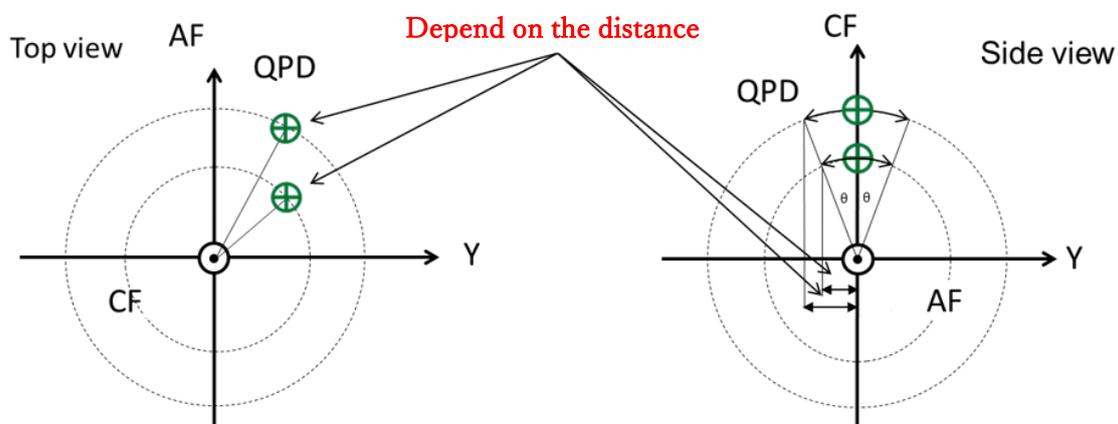


図 4.19 QPD のアライメント調整

レーザー光は試料系の回転中心を通る必要があるため、新たな QPD を用いて試料系の回転中心を求める。図 4.20 に示すように光学系の回転中心に QPD を調整する手順と同じ方法で QPD を試料系の回転中心に調整する。

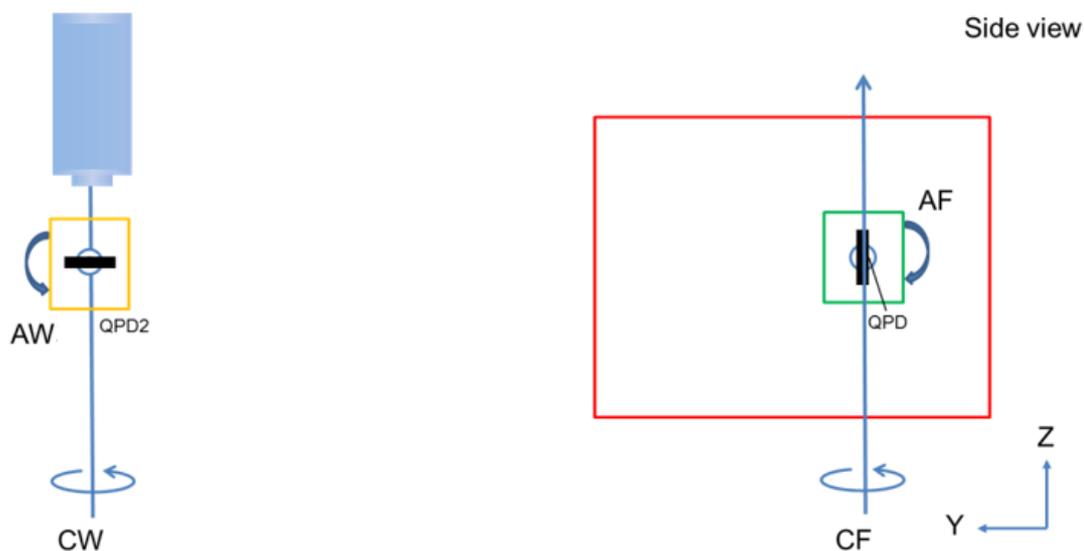


図 4.20 QPD を光学系の回転中心に調整するためのセットアップ

次に図 4.21 のように光学ヘッドを基板となるインターフェースプレートに取り付け、レーザー光を試料系の QPD に出射する。ここで試料系の QPD にレーザー光が入射するように、集光レンズ 1、2 を用いて微調整する。装置を並進(YF 軸)方向に動かした時、試料系の差動アンプでの水平、垂直方向の出力が常に 0 になるように集光レンズ 1、2 を用いてさらに微調整する。この時、レーザーの入射光の光軸と YF 軸が平行、かつレーザーの入射光は試料系の回転中心を通っていると言える。したがって、条件②である「レーザーから試料への入射光が試料系の回転中心を通る」を満たすことができる。

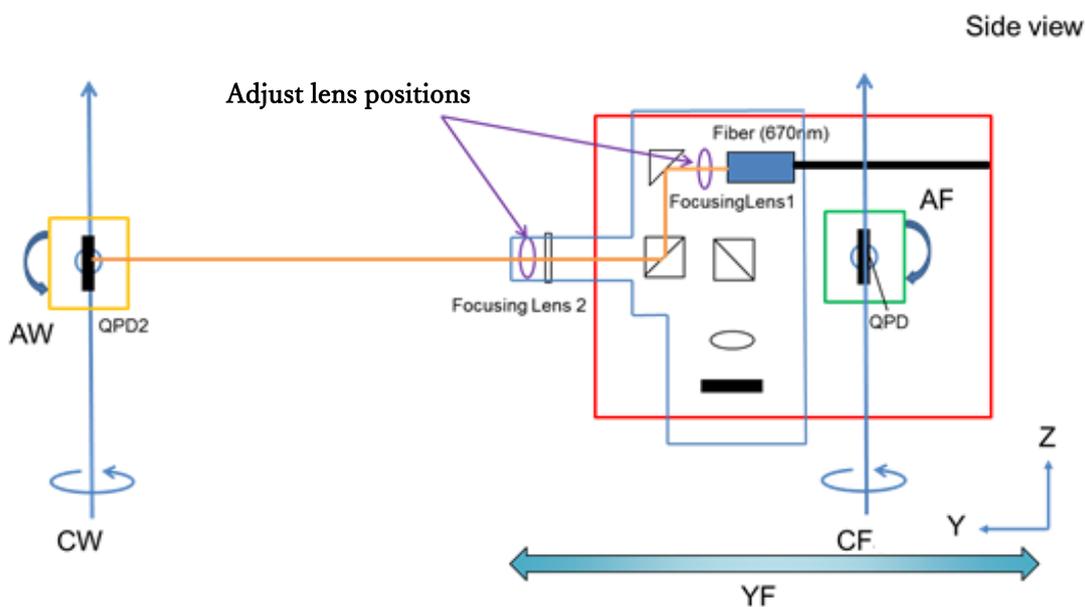


図 4.21 レーザーの入射光の光軸と YF 軸が平行

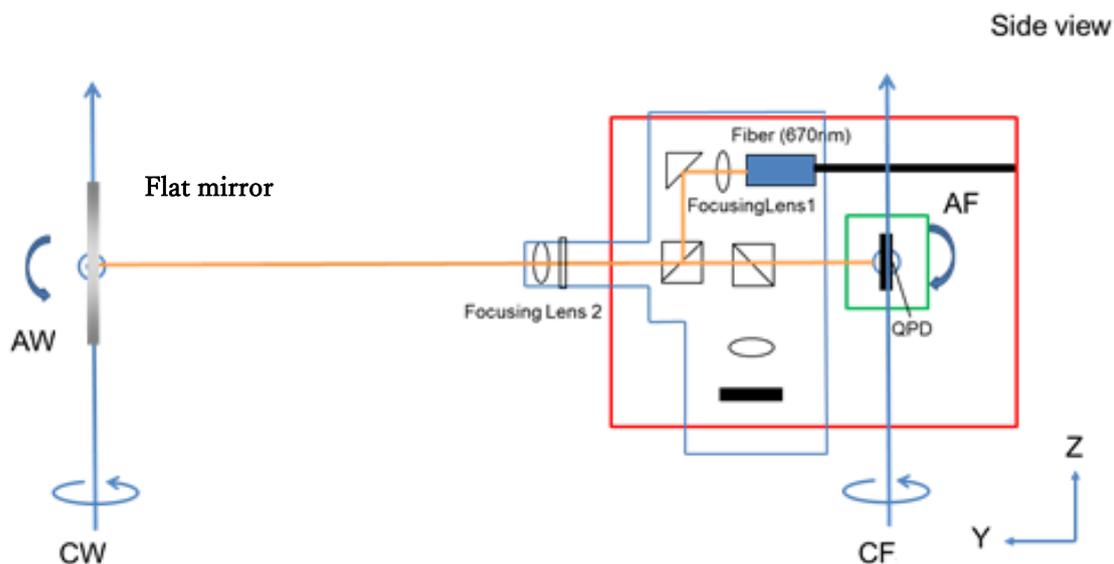


図 4.22 レーザーの入射光が一致、かつ光軸と YF 軸が平行

レーザーの入射光は試料系の回転中心を通過し次に試料系の QPD を取り外し、平面ミラーを取り付ける。ここで図 4.22 のようにレーザーの入射光が一致するように平面ミラーを調整する。上述した通りレーザーの入射光と YF 軸は平行であるため、レーザーの入射光と一致した反射光は YF 軸と平行であると言える。したがって条件③である「③入射経路が一致かつ YF 軸に平行」を満たすことができる。

この時理想条件であればレーザーの入射光が一致するように平面ミラーを調整すれば、光学系の QPD の中心にレーザー光は入射し差動アンプからの水平、垂直方向の出力が 0 になるはずである。しかし実際は各光学素子の取り付け誤差やレーザーの入射光の微小な不一致、各軸の幾何的誤差などの調整誤差がある。そのため光学系の QPD の出力は一定のオフセットを有する。そこで図 4.23 のように PBS に回転調整機構(θ , ϕ)を付加し、光路を平行移動させることで QPD のオフセットをなくすように調整する。したがって条件④である「反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通る」を満たすことができる。

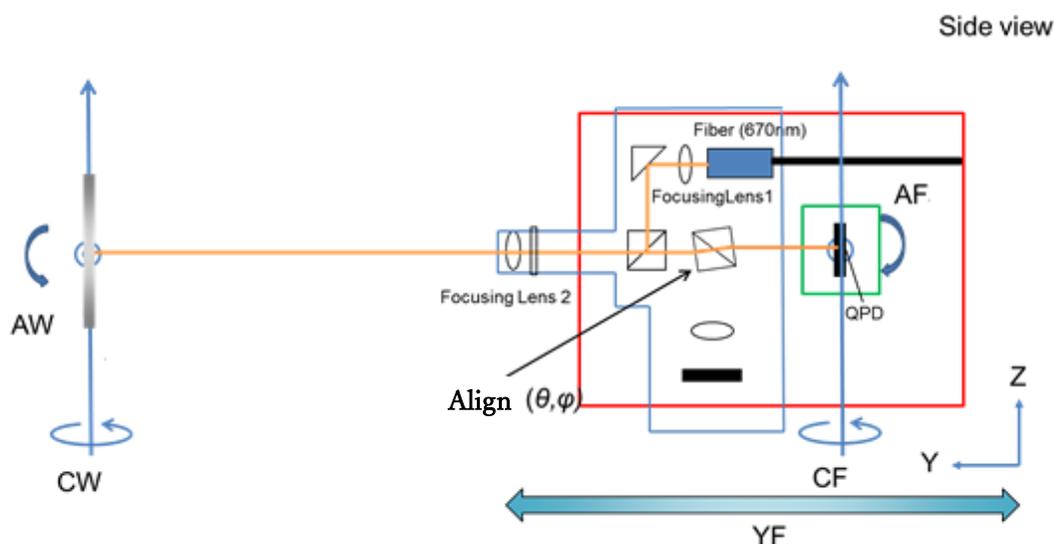


図 4.23 レーザーの反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通る

以上より上述した手順で光学調整を行えば光学ヘッドが満たすべき 4 つの条件である
 ①QPD と本装置光学系の回転中心が一致、②レーザーから試料への入射光が試料系の回転中心を通る、③入射経路が一致かつ YF 軸に平行、④反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通るすべてを満たすことができる。

その後、光学ヘッドを適切に調整した後に実際の試料の測定準備を行う。曲率のある試料を測定するに当たり、試料を動かす NC プログラムは光路長 = 400 mm (装置設計値)とし、サンプルホルダーの設計値(R_y)を考慮した上で、試料の理想形状から逆算して求められる。装置と光学ヘッドは YF 軸座標が -20.0000 mm の時に光路長 400mm となるように設計されているが、実際には装置には組立誤差があり、またサンプルホルダーにも組立誤差が含まれている。以上のことを考えると、光路長は 400 mm から最大で数 mm 程度ずれていると考えられる。また、実際に測定する試料は形状誤差を有している。これらの要因によって作成した NC プログラムを用いて測定を行った際、測定中に光路長が変化しその結果反射光が QPD の中心からずれ QPD の出力が線形的にずれてしまう。図 4.24 に光路長変化による QPD 出力の線形的な変化の様子を示す。QPD 出力において線形的な成分が支配的である時、反射光は QPD のダイナミックレンジを外れてしまうため微小な形状誤差の測定を行うことができない。そこで測定可能な状態に調整するために NC プログラムを元に測定時と同じく装置を走査させた状態で QPD 出力をモニターしながら適切な位置に YF 座標を合わせ、測定光路長 L を調整することで実験的に測定光路長を決定する。この際決められた測定光路長の値は不明であり、自律校正法を用いて算出する必要がある。

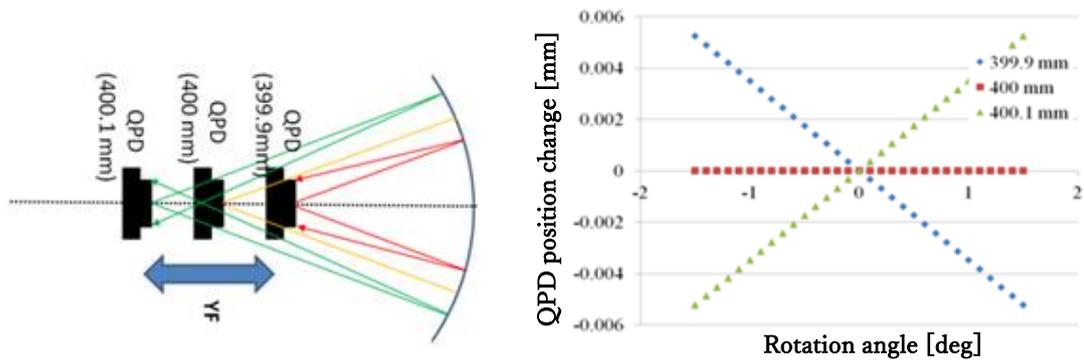


図 4.3.24 QPD 上の線形的なシグナル変化

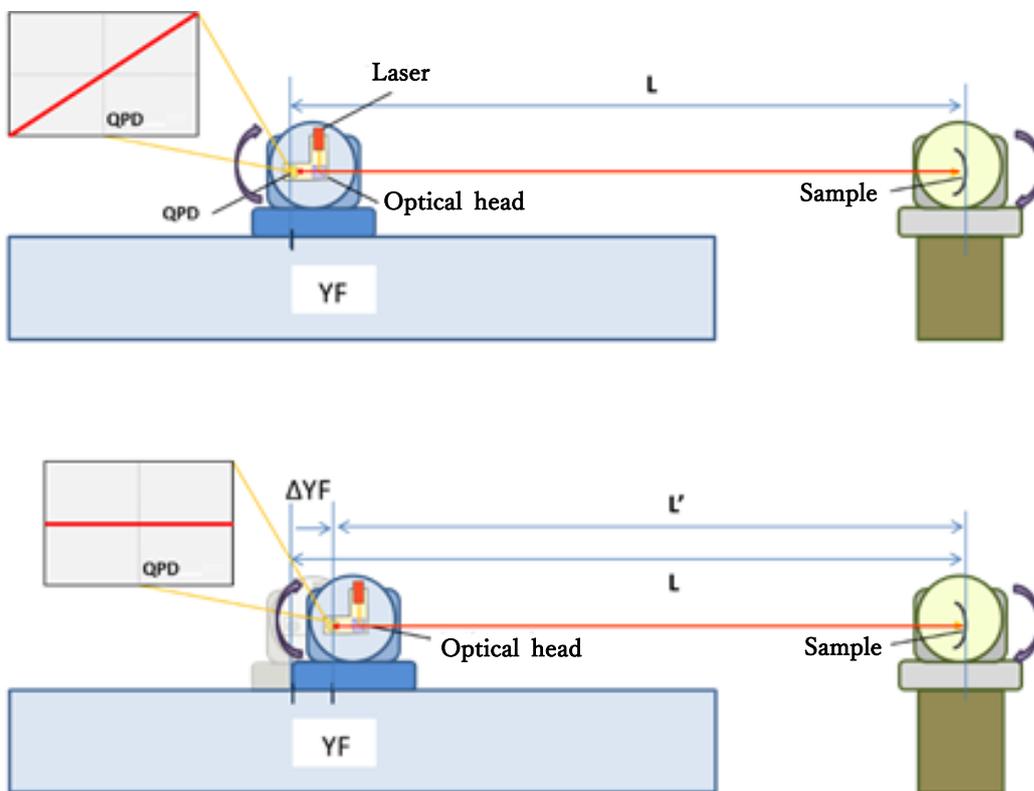


図 4.25 測定光路長の調整

QPD 上で集光しない原因として測定時の光路長が設計値の 400 mm から外れていること
 の他、試料の形状誤差の一つである曲率半径誤差が影響している。以下に曲率半径 $R =$
 400mm 、 $R = 100\text{ mm}$ の凹球面ミラーについて、光路長を装置設計値である 400 mm とし、
 理想形状を元に作成した NC プログラムを用いて曲率半径誤差を持った試料を測定した際
 に上記のような調整を行った時の試料の曲率半径誤差と調整後の光路長 L' の関係をシミュ
 レーションによって求めた結果を示す。

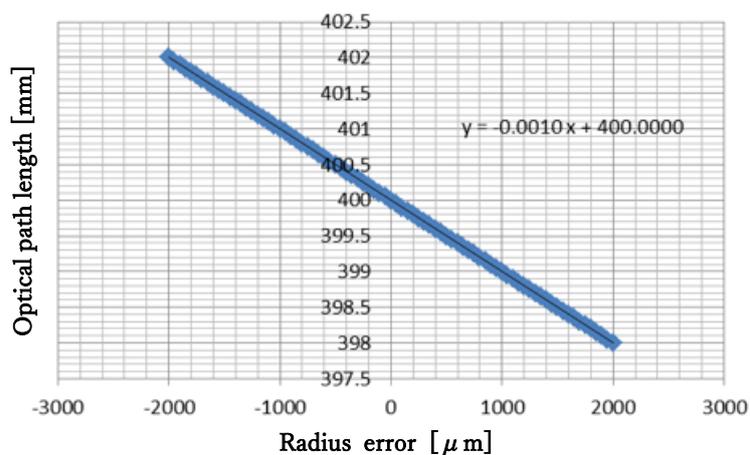


図 4.26 $R400$ ミラーにおける曲率誤差と測定光路長の関係

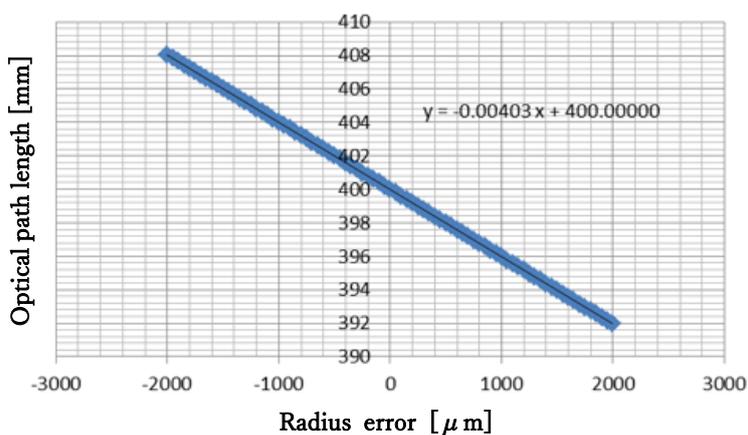


図 4.27 $R=100$ mm 凹球面ミラーにおける曲率誤差と測定光路長の関係

図 4.26、図 4.27 より試料の曲率半径誤差と調整後の光路長の関係は線形で表され、測定時の調整の際に $R=400$ mm 凹球面ミラー測定時は曲率半径誤差分だけ、 $R=100$ mm 凹球面ミラー測定時は曲率半径の約 4 倍だけ測定光路長を 400 mm からずらす必要があることが示された。実際の試料は $100 \mu\text{m}$ オーダーの曲率半径誤差があると考えられ、その値に応じて測定光路長は設計値である 400 mm から外れていると考えられる。

4.3.4 マルチステップセルフキャリブレーション法による実測評価

シミュレーション結果に基づき、測定条件は ΔL の数：10、 ΔL ：200 μm 、被測定面曲率半径：100 mm と設定し、またその他の基本的な測定条件と誤差を表 4.2 にまとめた。実測結果からマルチステップセルフキャリブレーション法により L を推定した結果を図 4.28 に示す。10 点の平均値から、光路長 L は 399.698 mm、その測定標準偏差 σ は 5.3 μm であることが確認された。

表 4.2 マルチステップセルフキャリブレーション法における測定条件

Optical path length	400 mm
Measurement range	20 mm \times 20 mm
Temperature	23 \pm 0.02 $^{\circ}\text{C}$
Rotational speed	210 deg/min
Measured surface	Polished mirror
Measuring time	10 min
Rotational reading error	0.1 nrad (σ)
Translational reading error	1 nm (σ)
QPD reading error	1 nm (σ)

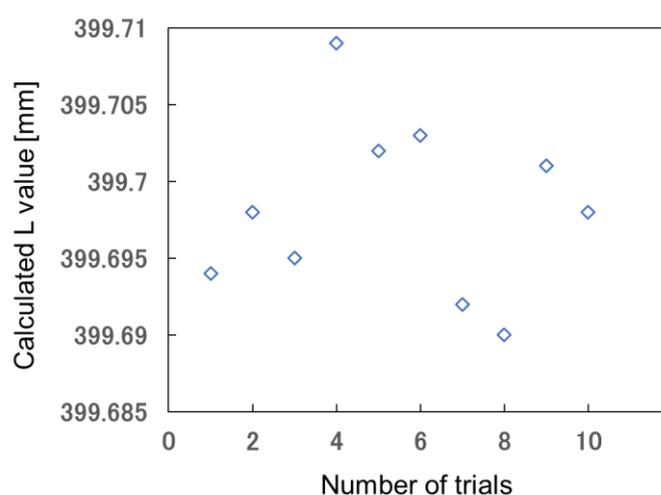


図 4.28 マルチステップセルフキャリブレーション法による推定結果

光路長に $5.3 \mu\text{m}$ のバラツキがある場合、形状測定結果においては二次曲面形状として影響を及ぼし、 13.3 nmPV の形状バラツキとなる。本研究では nano-profiler において 30 nm の不確かさを達成することを目標としており十分な再現性であることを確認した。

今後更にマルチステップセルフキャリブレーション法の推定精度を向上させるためには形状不確かさ自体を向上させる必要があり、その他の研究項目の発展に伴い光路長の推定精度が改善していくと考えている。また本章記載の方法とは別に将来的には光路長を低コヒーレントの干渉計により直接測長する手法についても研究を進めており、 $0.1 \mu\text{m}$ の精度で光路長を測定することも可能であると考えている。¹⁷⁾⁻²⁰⁾

4.4 駆動軸数の削減による誤差低減

4.4.1 並進駆動軸削減による系統誤差削減効果

駆動時の誤差低減のために測定時の駆動軸数の削減を試みる。nano-profiler では回転駆動 4 軸と並進駆動 1 軸の計 5 軸の駆動により測定するが、運動誤差が大きい並進軸を動かさずに測定を実現させる。²¹⁾ Nano-profiler では QPD で得られた角度と各回転軸の回転角から表面の傾斜角度分布を計算することで被測定物の形状を求める。図 4.29 に平面試料測定時の入射光と各軸の駆動量を示す。サンプルモーションユニットの座標中心 O を測定するときの全 5 軸の位置を原点として設定する。別の任意の測定点 P を測定すると、 θ 、 ϕ 、 α 、 β 、 y のすべての軸が駆動される。測定中に光路長の値が常に一定になるように、測定面の設計形状から計算した値だけ並進駆動の y 軸を光軸に沿って移動させる。

ただし、この y 軸駆動は、他の 4 つの回転軸駆動よりも角度誤差が大きい。^{22) -24)} 回転軸は角度分解能 $0.02 \mu\text{rad}$ の高精度ロータリーエンコーダによって制御されるが、並進軸にはピッチングとヨーイングの誤差がある。これらのピッチングとヨーイングの誤差は、 y 軸駆動に依存するが、装置製造時にこれらの誤差は最大 $1 \mu\text{rad}$ であることが確認されている。測定する面の面積が小さい場合、 y 軸の駆動量は小さく、ピッチングとヨーイングの誤差は小さくなるが、駆動量が多いほど測定誤差は大きくなってしまふ。

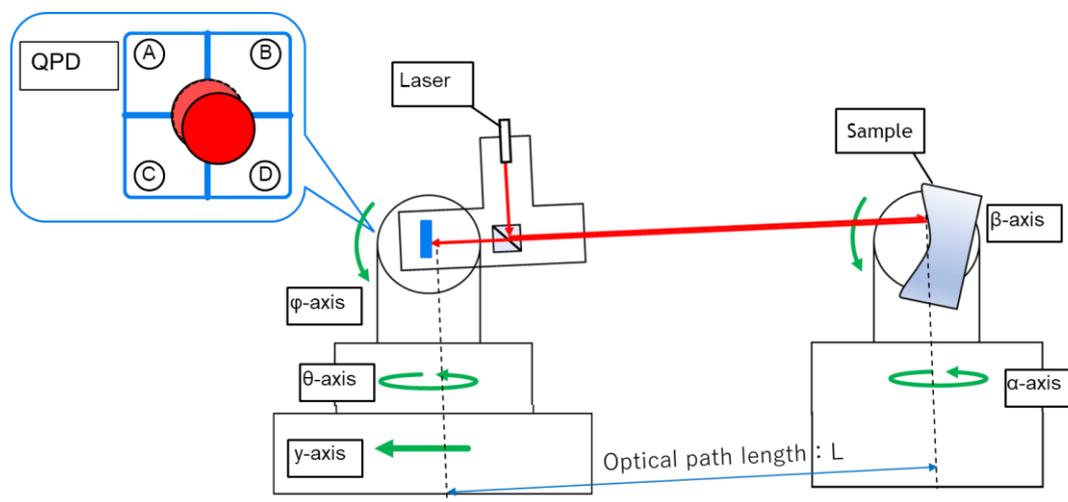


図 4.29 測定時の光路長調整

具体的な系統誤差を 100 mm の凹面ミラーを測定対象としてシミュレーションした結果を表 4.3 と表 4.4 に示す。系統誤差は組み立て誤差、回転軸運動誤差、並進軸運動誤差、ロータリーエンコーダの読み取り誤差、リニアエンコーダの読み取り誤差の 5 つの要素で構成されており、この内並進軸駆動を削減できれば並進軸運動誤差とリニアエンコーダの読み取り誤差の 2 つが削減可能となる。²⁵⁾ 2 つの表の結果から並進軸駆動を削減することで 3.99 nm を低減することが可能となる。

表 4.3 並進駆動を含む系統誤差

Assembly error	2.59 nm
Rotary axis motion error	1.27 nm
Translational axis motion error	6.40 nm
Rotary encoder reading error	1.26 nm
Linear encoder reading error	0.01 nm
Total systematic error	7.13 nm

表 4.4 並進駆動を含まない系統誤差

Assembly error	2.59 nm
Rotary axis motion error	1.27 nm
Translational axis motion error	0.00 nm
Rotary encoder reading error	1.26 nm
Linear encoder reading error	0.00 nm
Total systematic error	3.14 nm

4.4.2 QPD 感度補正による駆動軸の削減

ピッチングとヨーイングの誤差を減らす最も効果的な方法は、並進の y 軸を使用せずに測定を実行することである。しかし光路長が一定でない場合、QPD 測定の感度に変化してしまう。そこで光路長に応じて QPD の感度を定量化し測定結果を補正する新しい測定手法を提案する。QPD 感度を次の 4 ステップで校正する。ステップ 1 では、前述の図 4.29 に示したように、光路長を特定の値 L に設定する。ステップ 2 では、 α 軸を $1 \mu\text{rad}$ 回転させ、QPD 電圧の変化を記録する。これにより光路長を L とすると、 $1 \mu\text{rad}$ あたりの回転に対応する QPD の電圧変化を定量化することができる。ステップ 3 では、図 4.30 に示すように y 軸を駆動し、光路長を $L + \Delta L$ に設定する。ステップ 4 では、 α 軸を $1 \mu\text{rad}$ 回転させ、QPD 電圧の変化を記録する。 ΔL の値を変化させながらステップ 3、4 を繰り返すことにより、 ΔL の値と $1 \mu\text{rad}$ 回転分の電圧変化との関係を複数求めることができる。

図 4.31 に QPD と ΔL の相関を示す。 ΔL の値は実効的なステージストロークを考慮し $\pm 0.4 \text{ mm}$ の範囲で変化させた。各データポイントは、10 個の値の平均を取ることによって取得された。プロットされた曲線は 2 次関数でフィッティングされており、光路長が指定された範囲内で任意に変化しても QPD 感度補正が可能となる。

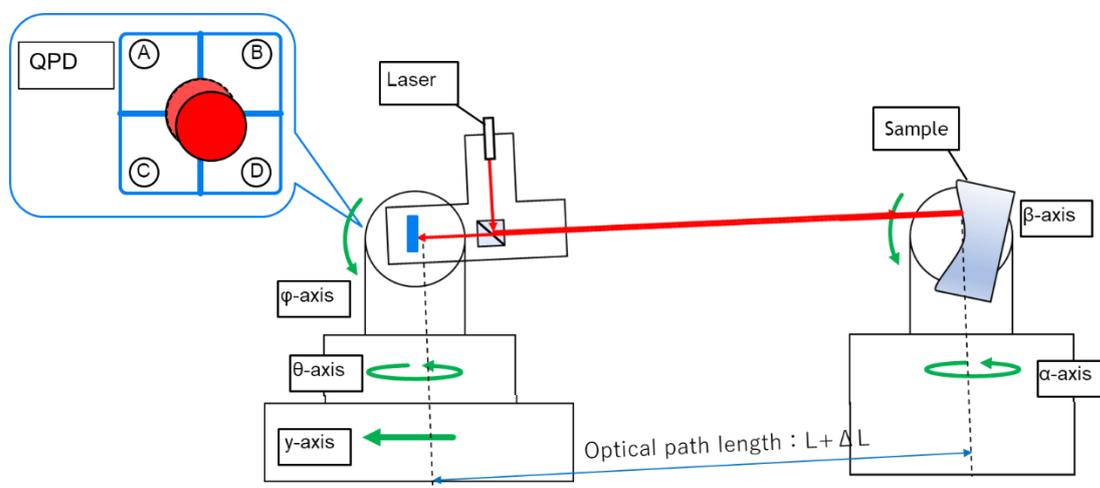


図 4.30 光路長変化 ΔL 発生時の軸構成

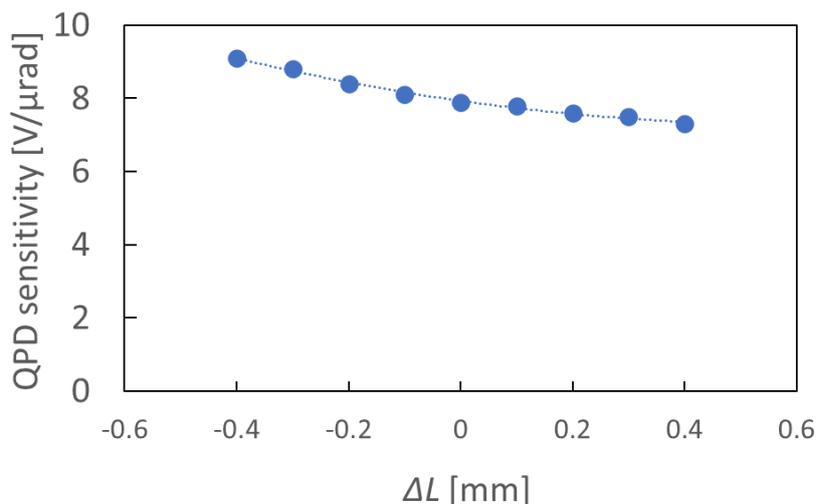
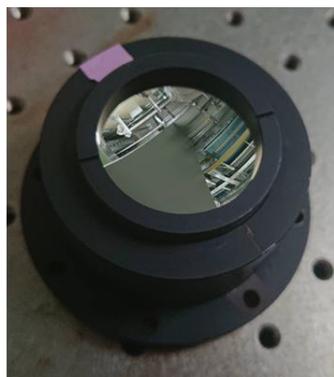


図 4.31 QPD 感度と光路長誤差の関係

4.4.3 提案手法と通常測定と比較

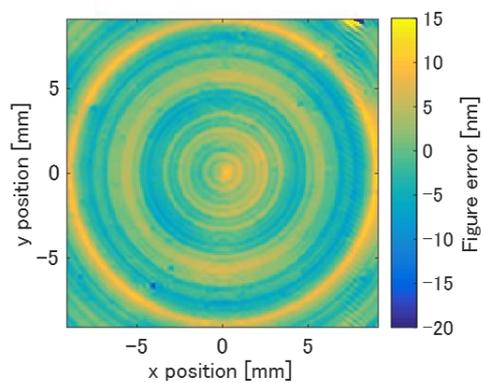
QPD 感度補正の検証を行うために、提案された測定方法と従来の測定方法の両方で異なる曲率半径を持つ 3つのサンプルを比較測定した。3つのサンプルは、曲率半径が 100 mm、1000 mm、10000 mm の球面形状とした。現在 nano-profiler が想定している形状は、曲率半径換算で 100 mm から無限平面までであり、この範囲をカバーするサンプルを選定した。また、曲率半径 100 mm の球面を測定した場合、 ΔL は 0.4 mm であり、y 軸の駆動量は 0.4 mm となり図 4.31 の ΔL の変化量の範囲内である。提案手法では y 軸を駆動せずに QPD の感度を補正して計測を行った。図 4.32(a) に曲率半径 100 mm の測定サンプル、図 4.32(b) に提案および従来の測定方法の測定結果を示す。形状測定結果の PV 値は、提案した測定方法では 34.6 nm、従来の測定方法では 31.7 nm であった。同様に、曲率半径 1000 mm のサンプルの結果を図 4.33 に、曲率半径 10000 mm のサンプルの結果を図 4.34 に示す。図 4.33 の PV 値の比較は、提案測定法で 58.4 nm、従来測定法で 64.6 nm であり、図 4.34 の PV 値は提案測定法で 28.6 nm、従来測定法で 23.4 nm であった。3 サンプルの測定比較では PV 値の最大差は 6.2 nm であり、正確さの目標である 30 nm よりも小さい値となっている。

(a)

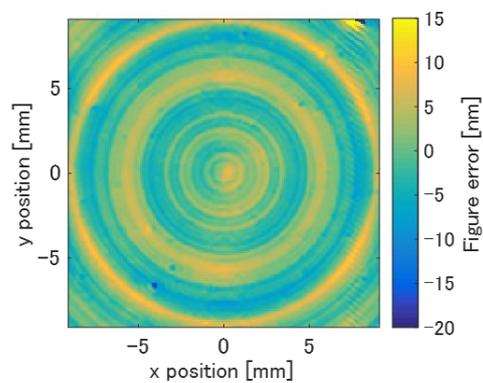


- Radius of curvature : 100 mm
- Diameter : ϕ 36 mm
- Material : Ni-P electroless plating

(b)



Conventional measurement
PV = 31.7 nm



Proposed measurement
PV = 34.6 nm

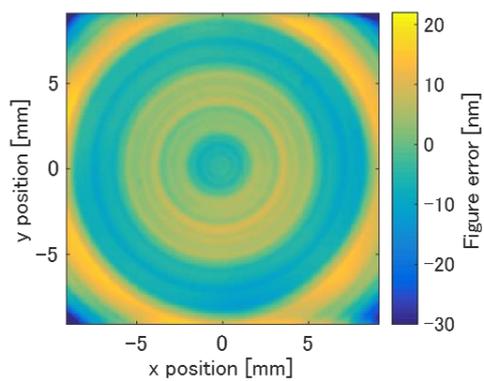
図 4.32 曲率半径 100 mm 球面での測定比較

(a)

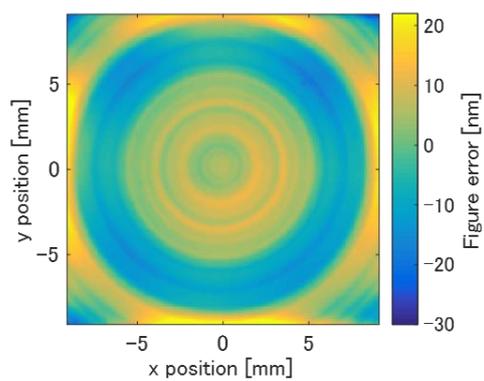


- Radius of curvature : 1000 mm
- Diameter : ϕ 36 mm
- Material : Ni-P electroless plating

(b)



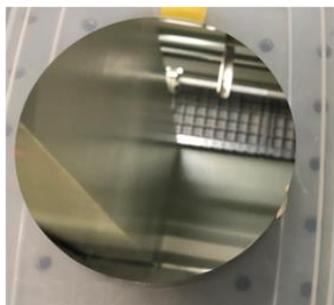
Conventional measurement
PV = 64.6 nm



Proposed measurement
PV = 58.4 nm

図 4.33 曲率半径 1000 mm 球面での測定比較

(a)



- Radius of curvature : 10000 mm
- Diameter : ϕ 100 mm
- Material : Ni-P electroless plating

(b)

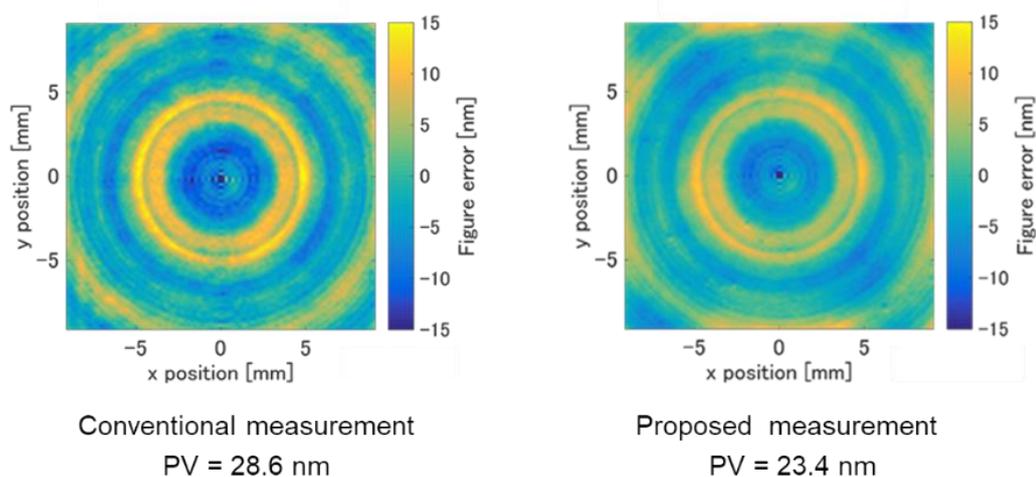


図 4.34 曲率半径 10000 mm 球面での測定比較

更に詳細に評価を行うため、断面プロファイルの比較を行った。図 4.35 は曲率半径 100 mm のサンプル、図 4.36 は曲率半径 1000 mm のサンプル、図 4.37 は曲率半径 10000mm のサンプルの結果を示す。断面は形状誤差 MAP の左上端から右下端までの対角線状に抽出した。それぞれの断面プロファイルにおいて曲率半径 100 mm のサンプルではランダムで均一にプロファイルに差が有り最大 2 nm の差となっていた。一方曲率半径 1000 mm のサンプルでは両端部に差が有り最大 9 nm の差があり、曲率半径 100 mm のサンプルでは周期的な差がプロファイルに見られ最大 3 nm の差が見られた。サンプルごとに誤差の出方が異なっていることから我々が想定できていない誤差が発生していると思われる。曲率半径には依存しておらず、傾向もないことから測定サンプルの取り付けや設計値と実形状の差などより詳細な検証が今後の更なる高精度化には必要であると考えている。

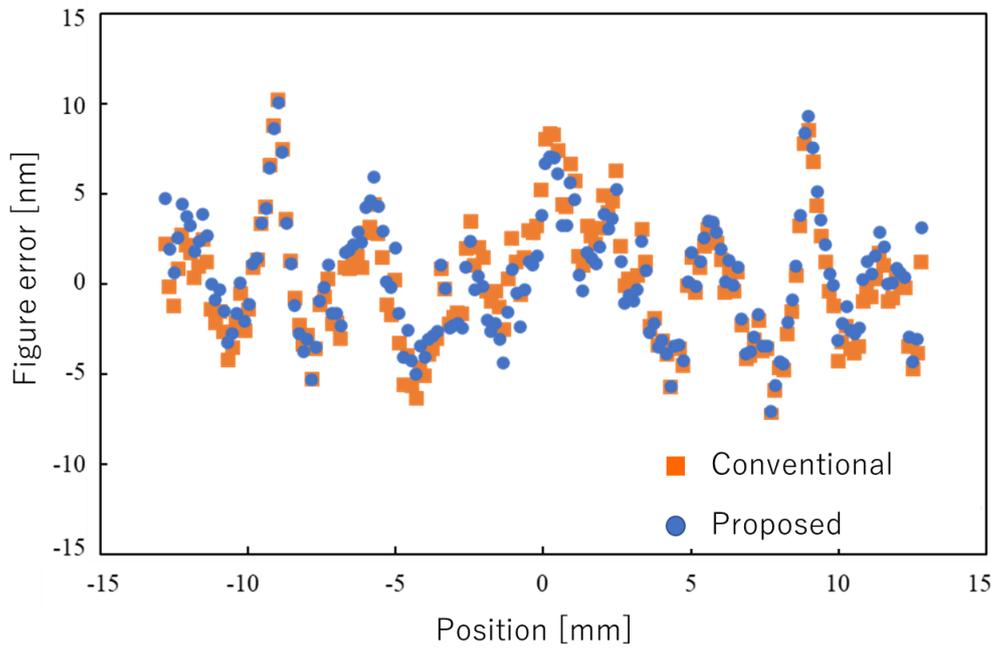


図 4.35 曲率半径 100 mm 球面で断面プロファイル比較

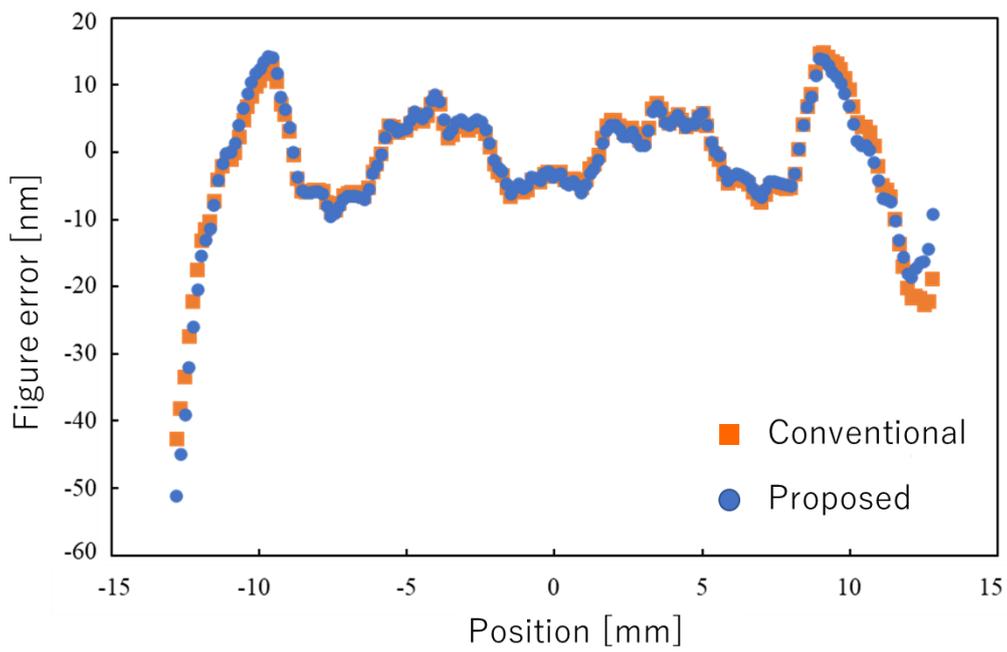


図 4.36 曲率半径 1000 mm 球面で断面プロファイル比較

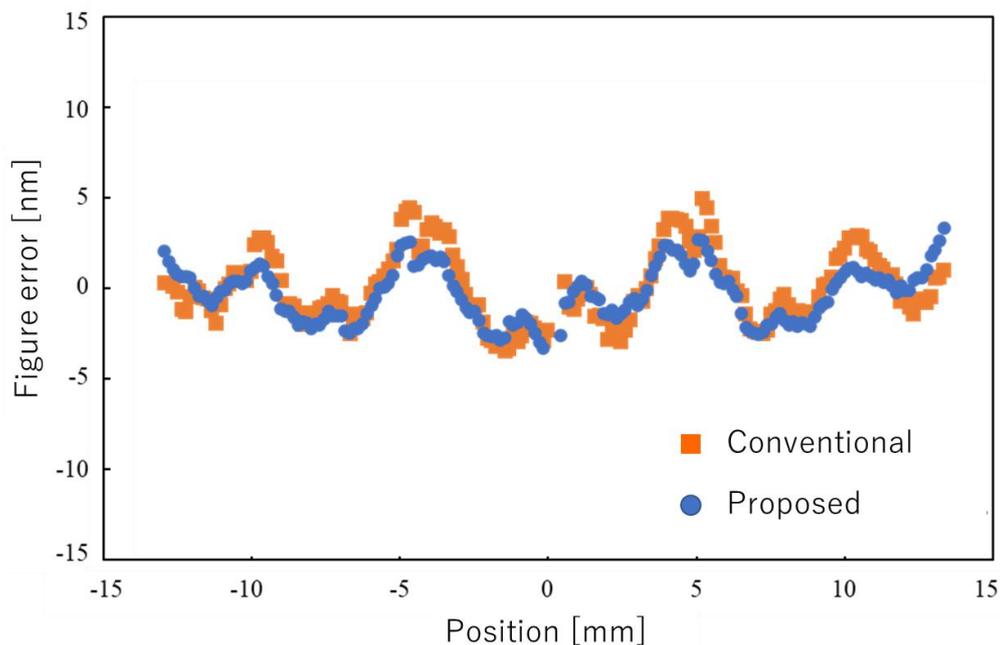


図 4.37 曲率半径 10000 mm 球面で断面プロファイル比較

このように提案する QPD 感度補正を行うことで、y 軸を駆動しない回転 4 軸の計測においても高精度な計測が実現できることが実証された。提案された手法は nano-profiler 以外にも駆動軸数を増やせば光路長を一定にできるデバイスに応用できると考えられる。校正方法自体は装置に依存するが、同様のキャリブレーションを行うことで、測定装置の駆動軸数を減らし正確さを向上できる可能性があると考えている。

4.5 スパイラルスキャンによる大面積・短時間形状測定

4.5.1 スパイラルスキャンとラスタースキャンの比較

Nano-profiler のさらなる誤差低減へのアプローチとして測定時間の短縮が挙げられる。測定時間が短縮されれば、測定の効率が向上すると同時に偶然誤差の影響を低減することができる。²⁶⁾ これまでは測定経路をラスター状に作成し測定していたが、回転軸の構成を変更しスパイラル状の測定を実現することで測定時間を短縮させる。²⁷⁾⁻²⁸⁾ ラスタースキャンとスパイラルスキャンの測定経路の違いを図 4.38 に示す。ラスタースキャンは自由曲面等のような形状でも測定が可能であるが、駆動誤差を考慮し同一方向に等速でスキャンする場合に加減速と折り返し動作が必要となる。加減速が伴う動作は各駆動軸の誤差が発生しやすいというデメリットがある。一方スパイラルスキャンでは回転対称な形状の測定に特化した測定手法ではあるが、余分な駆動動作が無く効率的に面形状の測定が可能である。また 1 軸が連続的に回転することで、他の 3 軸は駆動量を低減することが可能となる。これらの特長により測定時間を短縮することが可能である。ただし連続回転を続ける 1 軸の回転量はラスタースキャンにくらべて大きくなるので、この回転軸の誤差補正が重要となる。

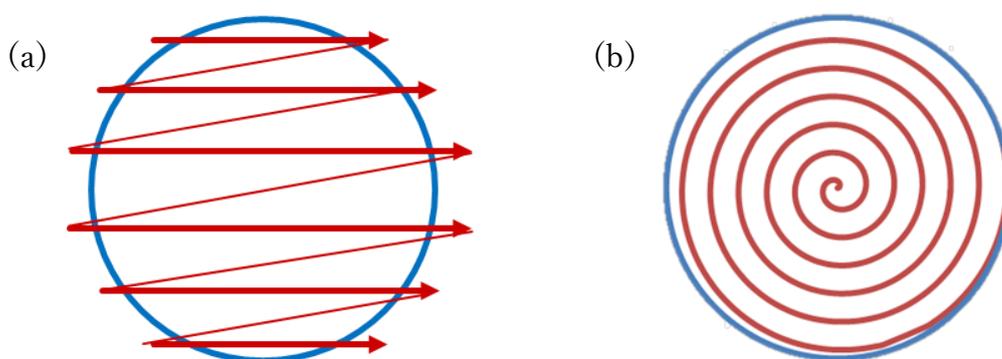
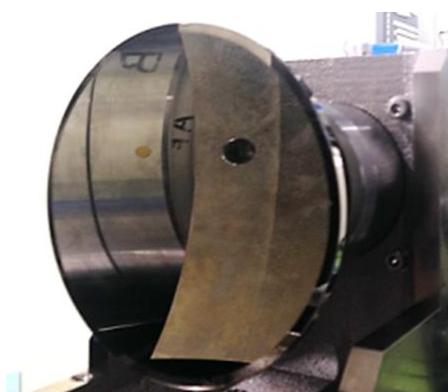


図 4.38 測定経路の違い

(a) ラスタースキャン (b)スパイラルスキャン

4.5.2 大型非球面の実測評価と干渉計比較測定

第3章に示した通り新たに spiral-nano-profiler を開発し図 4.39 に示す非球面ミラーの実測評価を行った。図 4.39 に示した条件に基づいた測定結果を図 4.40(a) に示す。これまで $20 \times 20 \text{ mm}$ 程度であった測定領域に対して $\phi 150 \text{ mm}$ の測定領域を測定し、形状誤差は 61 nm PV であった。形状誤差は図 4.39 に示す設計式を理想形状とした場合の形状差を表している。図 4.41(a)の測定結果にはリング状の分布が見られる。この形状分布は、被測定物が切削加工により形成する回転対称な加工痕であると考えられる。さらに、10 回測定した各測定点の高さの標準偏差を算出し、その平均値を再現性の値とした。



Measuring area	$\phi 150 \text{ mm}$
Measuring times	10 times
Focused beam diameter	0.3 mm
Optical path length	150 mm
Spiral interval	0.5 mm
Rotational speed	6400 deg/min
Measuring time	17 min/1time
Temperature	$23 \pm 0.02 \text{ }^\circ\text{C}$

図 4.39 測定された非球面ミラーと測定条件

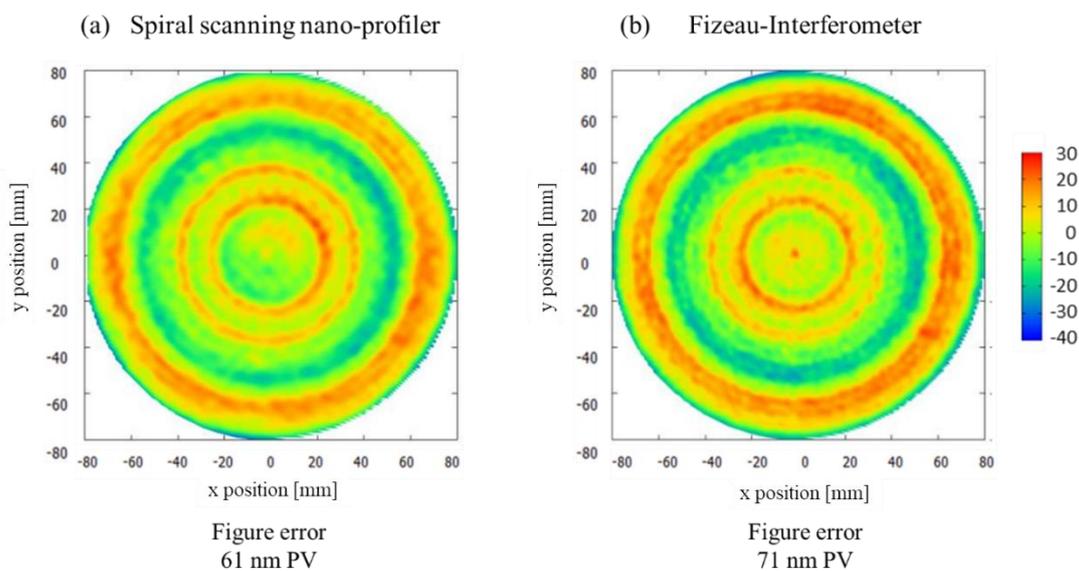


図 4.40 非球面ミラーの測定結果比較

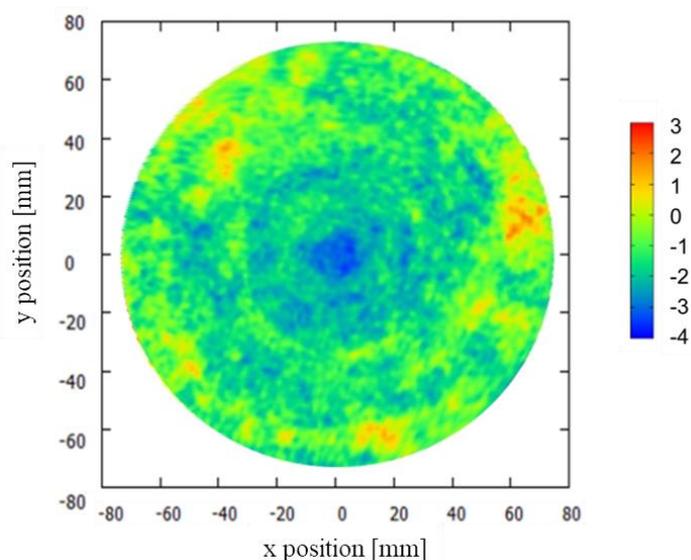


図 4.41 測定繰り返し性評価

図 4.41 に示すように、再現性は 2.8nm (σ :標準偏差)であり、高い再現性が得られていることが確認できた。また同じサンプルを干渉計で測定した結果を図 4.40 (b) に示す。

²⁹⁾ PV 値は 71 nm であり、両装置の測定結果の差が 10 nm PV であることが確認された。

さらに形状誤差の中央縦断面プロファイルを抽出して比較したところ、図 4.42 に示すように断面プロファイルが ± 20 nm 以内で一致することが確認された。角度測定とスパイラルスキャンを組み合わせた spiral-nano-profiler により測定面積が大きくても短い測定時間で高精度測定が実現できることを示すことができた。

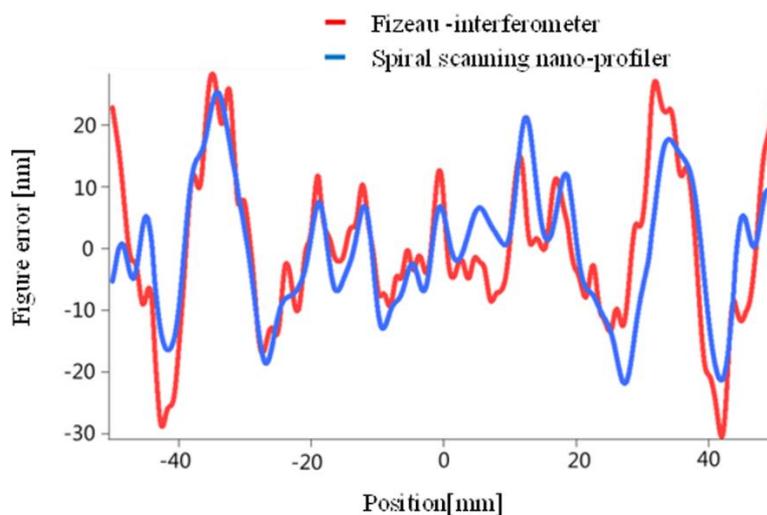


図 4.42 断面プロファイルの比較

4.5.3 スパイラル測定時の回転軸による誤差

図 4.43 に高さと角度の分布を測定する際の回転軸の方向に対する軸の駆動誤差の影響を示す。軸方向の誤差により試験片がずれた場合の高さと角度の測定値の違いを図 4.43 (a) に示す。高さプローブ等により形状測定する場合、測定高さ誤差として軸方向の誤差が直接加算されるが、角度測定ではその影響を原理上受けないことが分かる。いっぽう、図 4.43 (b) に示したラジアル方向の誤差が発生した場合は、高さ測定でも角度測定でも同様に測定値に対して誤差が発生する。ラジアル誤差は誤差の再現性が高くまた数値としても小さいので、アキシャル誤差に比べて影響が小さいと推測される。図 4.40 での干渉計との形状計測比較と図 4.41 に示した再現性評価結果の両結果において共に放射方向に誤差が発生していないことからラジアル方向に誤差が生じていないことが検証できる。また将来的には 360° 回転軸のエンコーダのセンサ出力から、ラジアル方向の駆動誤差を直接計測しリアルタイムに補正することも可能と想定している。この測定はエンコーダを使用するため、基準面のように事前に校正する必要がなく非常に有効であると考えている。

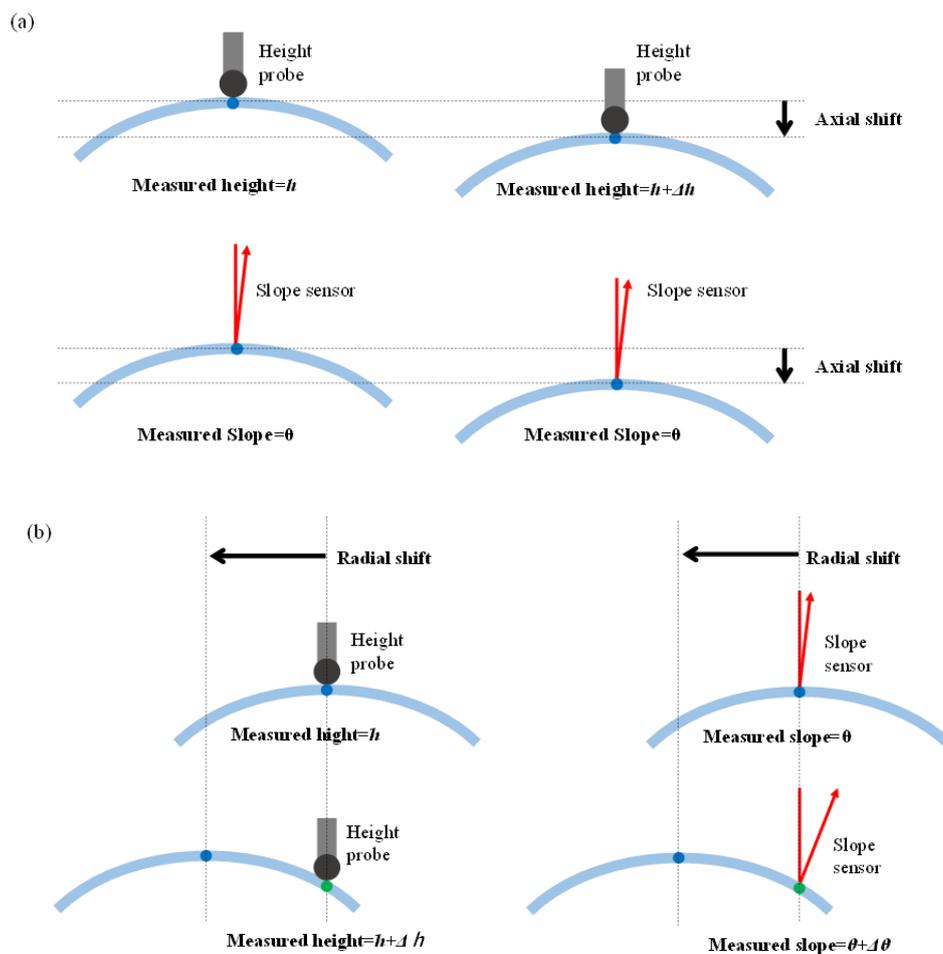


図 4.43 アキシャル誤差とラジアル誤差の影響

4.6 結言

本章では目標の不確かさ 30 nm を達成するために nano-profiler の誤差低減を試みた。誤差の中でも最も影響が大きい要素であるステージの回転量を測定しているロータリーエンコーダと形状算出時のパラメータである測定光学系の光路長の校正手法を提案し評価した。また新たな測定手法として並進軸駆動の削減とスパイラル測定を提案し測定結果の検証を完了させた。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 複数のエンコーダヘッドを等間隔にロータリーエンコーダ上に配置して校正を行う等分割平均法について一般的な説明を示した。また国家標準器によるロータリーエンコーダの校正について具体的な装置構成を示し、校正手法についても説明した。
2. ロータリーエンコーダの取り付け条件を変更しながら国家標準器で校正を行うことで取り付け誤差が校正曲線に与える影響を観察し、 $0.1 \mu\text{rad}$ 以上の高精度を達成するためには取り付け誤差への配慮が必須であることを確認した。また複数の校正曲線を取得した結果を解析し校正誤差が $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ 存在することをあきらかにした。
3. 国家標準器によりロータリーエンコーダの校正曲線を取得し、さらにロータリーエンコーダに6つのエンコーダヘッドを取り付け、6の整数倍成分のみを抽出することで $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ に校正誤差を低減させた。これにより6の整数倍成分以外のロータリーエンコーダ取り付け誤差を大幅に削減できることが確認できた。
4. 低減したロータリーエンコーダ取り付け誤差を評価するために新たに別の評価用エンコーダを nano-profiler に搭載し評価した。評価用エンコーダには円周3等分と8等分の位置にエンコーダヘッドを取り付けることで24の整数倍成分までを保証し、国家標準器の校正曲線が持つ校正誤差を検証した。結果、 $0.027 \mu\text{rad}$ の精度で校正ができていることがわかった。
5. Nano-profiler にて目標の不確かさ 30 nm を達成するためには光路長を $12 \mu\text{m}$ の精度で推定することが必須であり、そのために新たな光路長推定方法としてマルチステップセルフキャリブレーション法を提案した。
6. マルチステップキャリブレーション法の具体的な手順を説明するために、光路長を変更した2つの状態での測定形状について説明した。実際に光路長を変化させるのではなく算出に使う光路長の値を変化させ、算出された2つの形状が一致する際に L の値が正しくなることを説明した。

7. マルチステップキャリブレーション法では「ステージ駆動量」と「測定時間の増加に伴う温度変化」が主な誤差要因となるため、測定領域をこれまでの実績から 20 mm×20 mm と定めた。また推定精度に影響を与える条件として ΔL の数、 ΔL の大きさ、曲率半径 R の 3 つのパラメータを最適化するために事前シミュレーションを行った。結果、 ΔL の数を増やす、 ΔL を長くする、曲率半径を小さくすることで推定精度が向上することをあきらかにした。
8. シミュレーション結果を基に実測評価を行うために必要な装置の光学調整手順について詳細を説明した。光学系の調整には「QPD と本装置光学系の回転中心が一致すること」、「レーザーから試料への入射光が試料系の回転中心を通ること」、「入反射経路が一致かつ YF 軸に平行であること」、「反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通ること」の 4 つの条件が必要であり、それを満足する調整手順を説明した。
9. シミュレーション結果に基づき、 ΔL の数 : 10、 ΔL : 200 μm 、被測定物曲率半径 : 100 mm を測定時のパラメータとして設定し実測評価を行った。測定の結果、 L は 399.698 mm、標準偏差 σ は 5.3 μm であることが確認された。目標とする不確かさ 30 nm に必要な光路長の推定精度 12 μm に対しての再現性としては十分な値であることを実証できた。
10. 目標とする 30 nm の正確さを更に低減させるために誤差の多い並進駆動軸を動作させずに測定する新たな測定方法を提案した。
11. 駆動軸を削減して測定するためには事前に QPD の感度を補正する必要がある。実際に感度補正を行う手順を 4 つのステップで説明し、実測データを収集し、感度補正曲線の数値化・数式化を試みた。結果、実効的に使用する 0.4 mm のストロークで補正式を生成することができた。
12. 既存の測定方法と新たに提案した測定方法の両方で曲率半径 100 mm、1000 mm、10000 mm のサンプルを比較測定した。結果 PV 値の違いでは最大 6.2 nm と目標とする 30 nm に対して十分小さな値となっていることが確認できた。
13. 更に断面プロファイルについても評価した所、曲率半径に依存しない測定誤差が残存していることが確認された。装置改善につながるヒントとなるデータであると考えており、更にデータ取得を進め今後検証していきたいと考えている。
14. これまでの 20×20 mm の領域に比べて大きな ϕ 150 mm の非球面ミラーを測定し更

にフィゾー干渉計と比較した所、P V値で 10 nm の差になっていること、断面プロファイルの比較でも ± 20 nm 以内であることを確認した。更に 10 回の連続測定から 2.8 nm の測定繰り返し性が達成できていることを確認した。

15. 回転軸により発生するアキシャル方向とラジアル方向の誤差についても考察を行い、角度測定とスパイラルスキャンを組み合わせることで誤差の大きいアキシャル誤差の影響を受けにくい測定方法であることを確認した。更に実測の結果に放射状の誤差が出ていないことからこの推測が正しいことも確認ができた。

第 5 章 自由曲面の形状測定

5.1 緒言

前章までに nano-profiler の不確かさを保証するためにロータリーエンコーダと光路長の校正を行った。これらの結果を基に本章では自由曲面形状としてシリンドリカルミラーとパターン付き平面ミラーの形状を測定する。

5.2 シリンドリカルミラーの形状測定

5.2.1 シリンドリカルミラーの測定条件

前章までに nano-profiler の不確かさを保証するためにロータリーエンコーダと光路長を校正した。これらの結果を基に本章と次章では自由曲面形状の不確かさを評価する。本節では自由曲面形状としてシリンドリカルミラーを形状測定する。¹⁾

被測定面は曲率半径 100.6 mm の高精度凹面シリンドリカルミラー面形状である。シリンドリカル形状は自由曲面形状の中でも CGH を用いた位相シフトフィゾー干渉計においては出射波面を形成しやすく測定しやすい形状であるため比較対象とした。²⁾⁻⁴⁾ 図 5.1(a) にシリンドリカル形状の被測定サンプルを示す。図に赤の破線で示した 22×22 mm の領域に 3つのフィデューシャルマークを配置し、nano-profiler と CGH を用いた位相シフトフィゾー干渉計の 2つの装置で比較測定を行った。Nano-profiler では図 5.1(b)に示すように、フィデューシャルマークを含む領域を 0.1 mm ピッチでラスタースキャンした。各スキャンの測定時間は約 50 分/回で、10 回のスキャンを連続して行いその結果を平均した値を測定結果とした。詳細な測定条件を表 5.1 に示す。

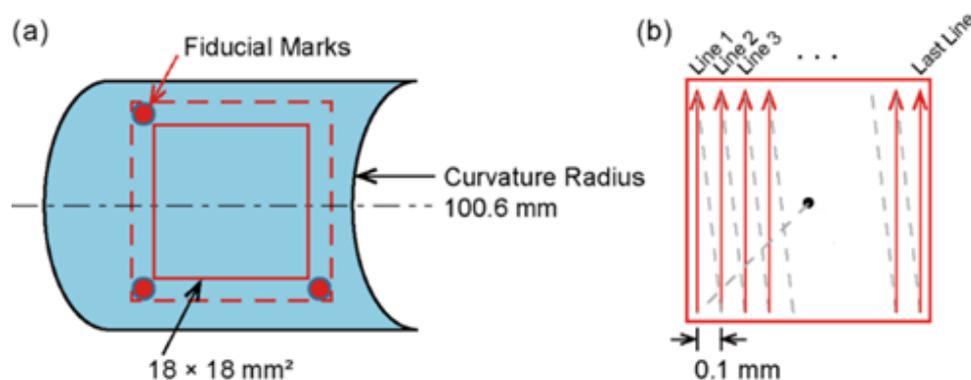


図 5.1 (a) 被測定サンプル概略図 (b) ラスタースキャンの測定経路

表 5.1 シリンドリカルミラー測定条件

Measured sample	Radius of curvature: 100.6 mm Cylindrical mirror
Scan direction	Vertical raster scan
Measured area	18 mm × 18 mm
Raster scan pitch	0.1 mm
Rotate speed	240 deg/min
Measuring time	45 min
Sampling rate	50 kHz
Measuring Average	10 data are averaged to 1 data

5.2.2 フィデュージャルマークによる測定位置の特定

Nano-profiler で測定を行う際は設計式に従い各駆動軸の駆動量を算出して測定する。そのときに被測定物の中心位置とサンプルモーションユニットの中心位置を一致させる必要がある。球面形状、非球面形状では図 5.2 の通りレーザー光を被測定面に入射させることで中心位置を定めることが可能である⁵⁾。一方、回転対称な形状である球面形状、非球面形状とは異なり、シリンドリカルミラーは回転非対称な形状であり、被測定物の中心が定まっていない。具体的な測定手順は次のとおりである。最初に試料移動部のほぼ中央に測定対象物を置き、測定面にレーザー光を入射させ、その反射光を QPD で受光する。次に光学ヘッドユニットの θ 軸と ϕ 軸を用いてレーザー光の照射位置を上下にずらし、角度の変化を読み取る。垂直方向と水平方向の角度変化が同じであれば、測定対象がサンプルモーションユニットの中心に設置されていることを意味する。ただしシリンドリカルミラーの場合は回転非対称な形状であるので回転中心軸がないため位置決めができない。原理的には一方向に曲率があるが、シリンドリカルミラーをサンプルモーションユニットの中心に持ってくる指標が無い。そこでシリンドリカルミラーの測定領域外にフィデュージャルマークとして凹形状を加工し位置の基準とした。加工はシリンドリカルミラーが形成された後に凹型の形状を NC 制御で表面上に追加加工して生成した。⁶⁾フィデュージャルマークは 3 か所に加工することで 2 次元平面的な位置だけではなく回転方向の位置も特定することを目標としている。図 5.2 の様なアライメント時に基準マークの位置にレーザーが入射すると、反射光の角度が大きく変化する。このようにしてシリンドリカルミラー上のフィデュージャルマークの位置が特定可能となることにより、シリンドリカルミラーの位置を設計式に合わせることができる。図 5.3 は nano-profiler の測定領域を意図的に広げてフィデュージャルマークを含む領域を参考データとして測定した結果である。フィデュージャルマークによる位置指定は、円筒面だけでなく、一般の自由曲面に対しても有効な方法となる。

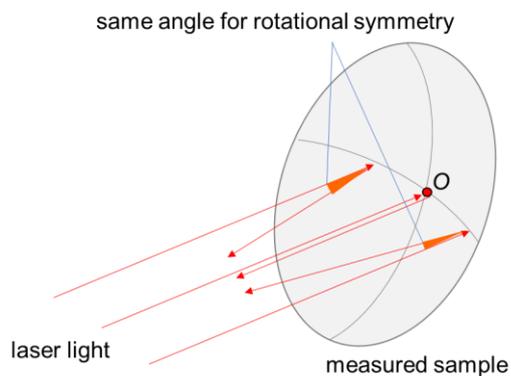


図 5.2 回転対称形状における測定中心位置の特定

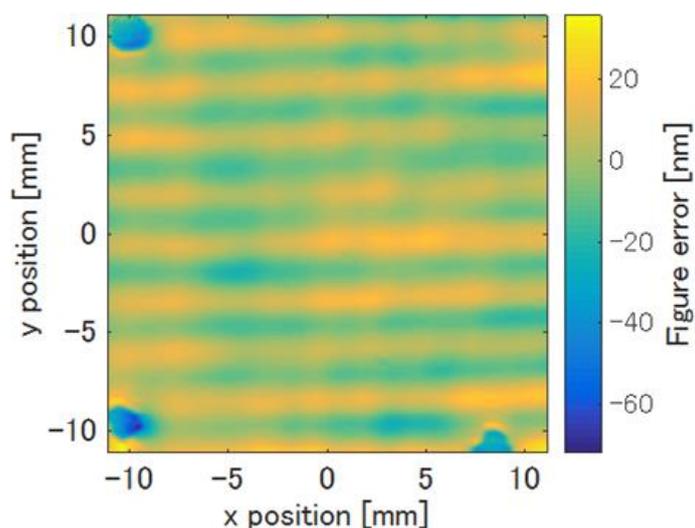


図 5.3 フィデューシャルマークを含む測定結果例

5.2.3 シリンドリカルミラーの形状測定結果と干渉計との比較

2つの測定装置での測定結果を図 5.4 に示す。図 5.4(a)は nano-profiler の測定結果であり、 18×18 mm のグリッド領域にプロットされた形状誤差であり、 43.7 nmPV であった。また図 5.4(a)に示す列の縞模様は、サンプル表面の研磨プロセスに起因すると推定される。一方図 5.4(b)に CGH を用いたフィゾー干渉計での測定結果を示す。⁷⁾ 同様に形状誤差を表しており 60.9 nmPV であった。縞模様は図 5.4(b)にも観察されるので測定誤差ではなくサンプル表面の形状を示していると結論付けた。

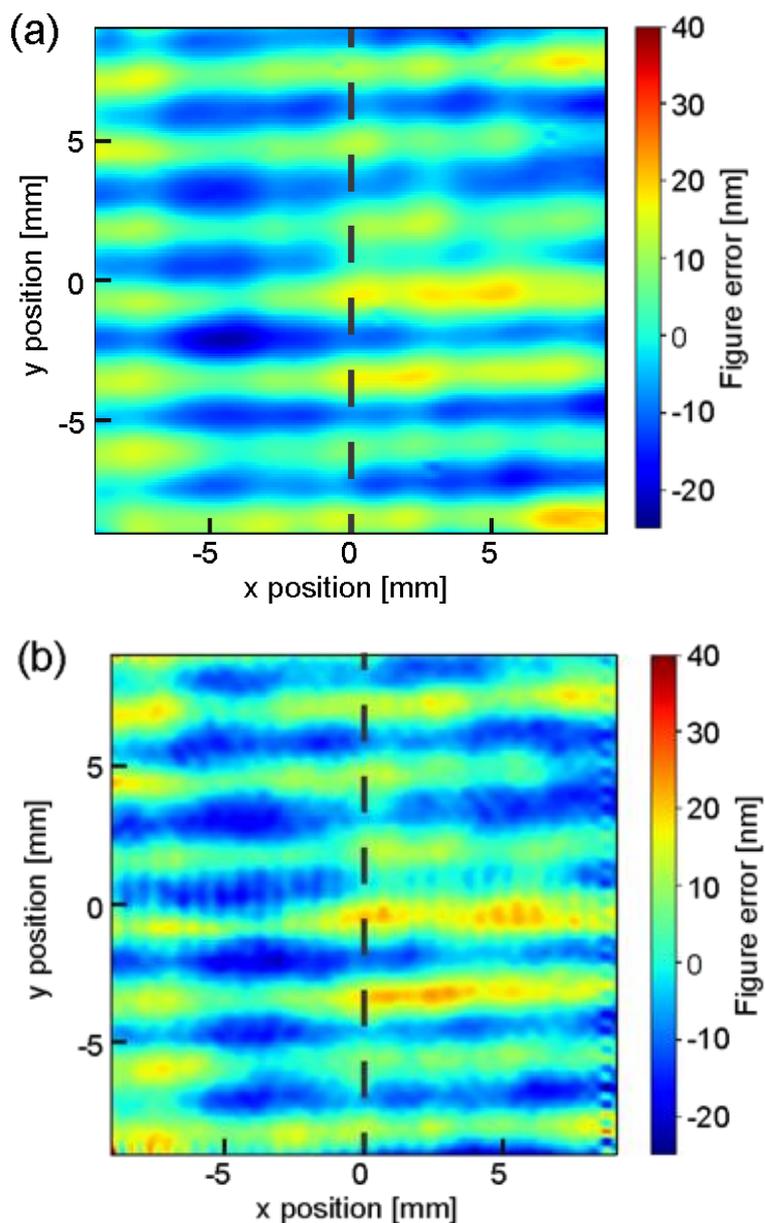


図 5.4 (a) Nano-profiler 測定結果 (b) CGH を用いた干渉計測定結果

図 5.5 は 図 5.4 の(a)と(b)の中心線 ($x = 0$ mm) の断面プロファイルと比較したものである。両方のプロファイルの周期的な高低の形状は 10 nm 以下で一致していたが、断面形状の両端では 20 nm 程度の差となっていることが確認された。図 5.6 は図 5.5 の断面プロファイルの差分をプロットした結果である。全領域で $-18.6 \sim 12.0$ nm の範囲で分布しており、断面形状の違いが ± 15 nm PV と系統誤差の範囲内で一致していることが確認できた。この結果から両測定装置が共に 30 nmPV の精度で測定ができていることを示していると推定される。ただし図 5.5 の 2 つのプロファイルの変曲点位置に着目すると中心部は二つの装置の結果が一致しているが、端部になるほど変曲点の位置がずれているように見られる。

これは測定的位置に倍率的な誤差があることをしめしていると推測した。Nano-profiler に誤差がある場合、このような誤差は光路長の長さが正しくない場合に発生する。一方干渉計に誤差がある場合はCGHの間隔に誤差があることが考えられる。いずれの測定結果がより真値に近いかは今後検証が必要な課題であると考ええる。

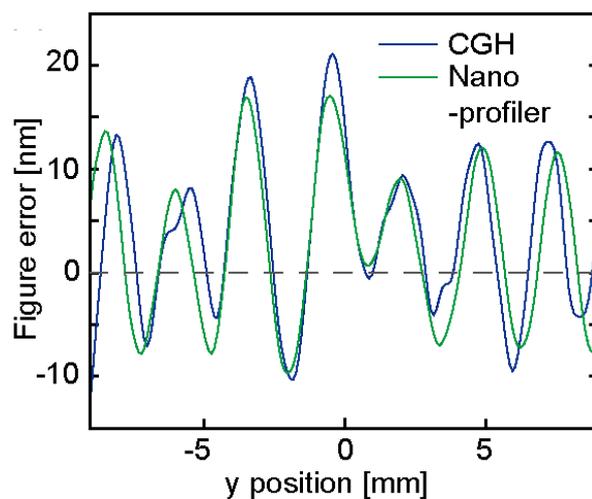


図 5.5 Nano-profiler と CGH を用いた干渉計の断面プロファイル

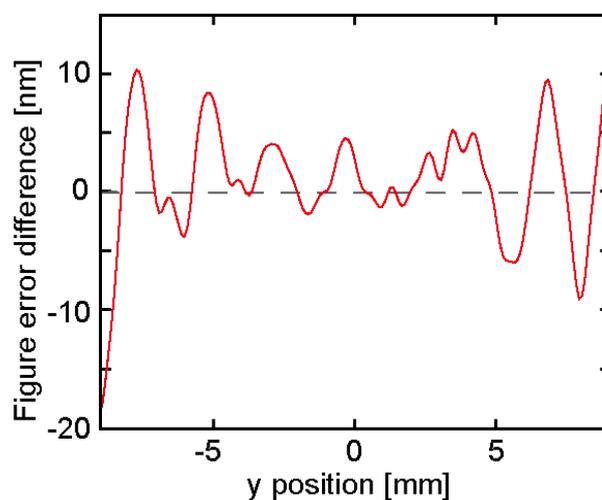


図 5.6 断面プロファイル差分

5.2.4 繰り返し性の評価

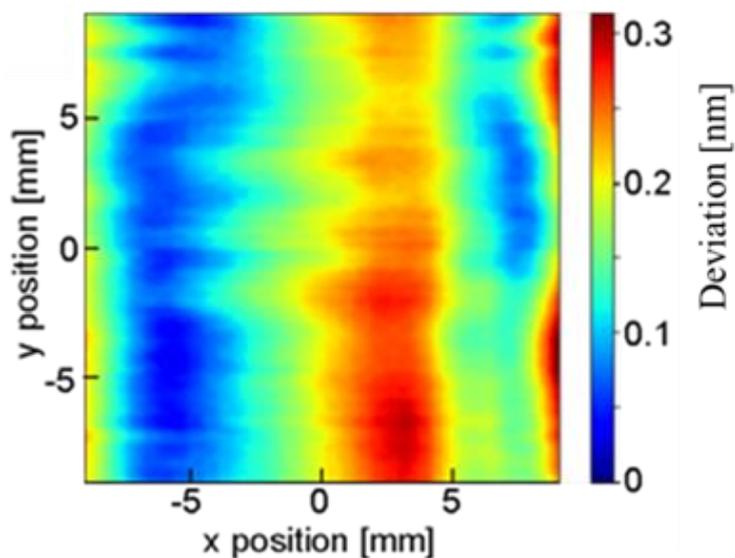


図 5.7 シリンドリカルミラーでの測定繰り返し性 (標準偏差)

図 5.7 に nano-profiler の測定繰り返し性を示す。10 回の測定から得られる測定繰り返し性は 0.562 nmPV (標準偏差) であった。プロットは縦縞の分布を示しており、スキャン方法が測定結果に影響を与えた可能性があるとして推測される。目標とする 0.1 nm には至っておらず測定繰り返し性の改善が必要であることが確認された。

5.2.5 不確かさの算出

不確かさを算出する為に nano-profiler が持つ 9 要素 6 自由度の合計 54 自由度に誤差が発生した時の形状への影響を算出する。⁸⁾ 図 5.8 に nano-profiler の誤差モデルを示し、表 5.2 は 54 自由度が単位量当たりの誤差を持つときの形状誤差量を示した。表 5.2 の各数値の色が誤差形状の形状を示している。⁹⁾ 誤差形状は図 5.9 に示した 1 次から 4 次関数でフィッティングされる誤差形状を持っており、表 5.2 の赤は 1 次成分、青は 2 次成分、緑は 3 次成分、紫は 4 次成分を示している。

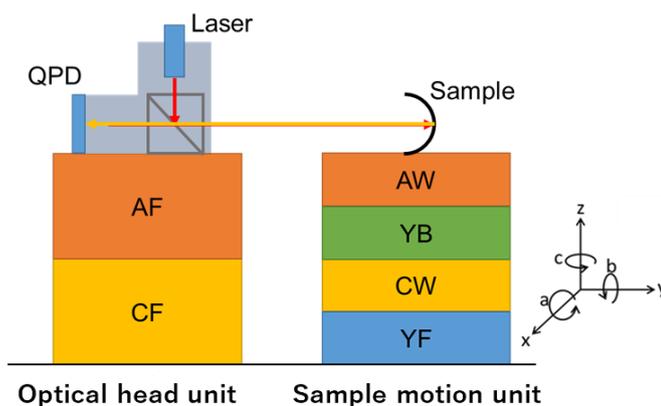


図 5.8 シリンドリカルミラーでの測定繰り返し

表 5.2 54 自由度の誤差感度表

	a [nm/μrad]	b [nm/μrad]	c [nm/μrad]	x [nm/μm]	y [nm/μm]	z [nm/μm]
AF	10.861	0.12285	10.860	18.102	0.10238	18.100
CF	10.860	0.028403	10.860	18.100	0.20474	18.100
AW	18.101	0.12284	18.100	18.101	0.14332	18.100
CW	18.100	0.028403	18.100	18.100	0.20474	18.100
YB	10.861	0.028403	10.861	18.100	0.20474	18.100
YF	18.101	0.12284	18.100	18.101	0.14332	18.100
SAMPLE	18.101	NA	18.101	18.101	0.081906	18.101
LASER	NA	NA	NA	22.627	NA	22.626
OPD	10.861	NA	10.861	4.5254	NA	4.5253

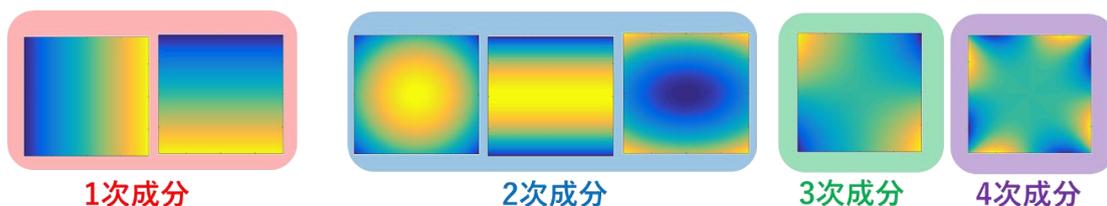


図 5.9 各次数成分の誤差形状

表 5.3 シリンドリカルミラーの測定不確かさ

Error Factor			Uncertainty	Unit	Error sensitivity	Figure error [nm]		
Random error			0.562	nm	1.00	0.5620	0.562	
Optical length	All axis		5.3	μm	1.02	5.4060	22.19	
	AW				4.06	21.5180		
Twist in optical direction	AF		1.44	μrad	0.21	0.2966	3.02	
	CF,CW,YF				0.82	1.1765		
	AW,YW				1.02	1.4688		
	Sample				1.63	2.3472		
Axis shift	AF x	Rotation [deg]	0.00108	μm	0.00	0.0000	0.37	
		y	2.88		0.00170	1.02		0.0017
		z			0.00170	180.00		0.3060
	CF x	0.00042			0.02	0.0000		
	CF y	2.88			0.00042	1.02		0.0004
			z		0.00014	180.00		0.0250
			AW x		0.00367	0.00		0.0000
	AW y	8.58			0.00067	1.02		0.0007
			z		0.00067	180.00		0.1201
			CW x		0.00045	0.02		0.0000
	CW y	2.88			0.00045	1.02		0.0005
			z		0.00093	180.00		0.1671
Pitching			0.0386	μrad	54.00	2.0844	3.13	
Yawing		0.1290	18.10		2.3349			
Rotary encoder	AF		0.0202	μrad	54.00	0.6298	3.75	
	CF		0.182		18.10	1.9019		
	AW		0.303		18.10	3.1664		
	CW		0.002		18.10	0.0443		
Linear encoder			0.200	μm	1.02	0.1178	0.12	
Synthetic standard uncertainty σ						22.90		
Extended uncertainty 2σ (=U) for coverage factor k=2						45.80		

前章で校正したロータリーエンコーダと光路長の値やステージの性能を基に 54 自由度の誤差量を定め、測定不確かさを表 5.3 にまとめた。不確かさは 2σ で 45.80 nm を示しており、目標とする 30 nm には達していない。しかし主要な誤差は光路長の誤差が 1σ で 22.19 nm を占めている。これは図 5.9 の 2 次成分の誤差となるので曲率半径に対応する誤差となっている。通常ミラーやレンズなどの光学素子の仕様では曲率半径は形状誤差とは別に規定されている値であり、他の形状成分に比べて数値的な要求精度は低い。実際 2 次成分以外の不確かさを計算すると 5.61 nm (2σ) となる。目標数値の定義にも依存するが曲率半径を除けば目標とする測定不確かさを達成していると結論付けた。

5.3 パターン付き平面ミラーの形状測定

5.3.1 パターン形状の加工

前節では自由曲面形状としてシリンダリカルミラーの測定を試みたが、自由曲面形状にはマイクロレンズアレイの様に複雑な凹凸形状も含まれている。¹⁰⁾そこで本節ではさらに複雑な形状としてパターン形状の測定を試みる。¹¹⁾パターン形状は一般的には顕微干涉計等で測定されるが、一部分を拡大した測定となるため全体の形状を測定することができない。一方 Nano-profiler では空間波長の短い形状と長い形状の両方を同時に測定することが可能である。¹²⁾そこで本節では全体形状を測定可能なフィゾー干涉計と顕微干涉計のそれぞれと比較を行い nano-profiler の不確かさを検証する。¹³⁾

高精度なパターン形状を測定するために、図 5.10 に示した平面ミラーに数値制御加工により正弦波パターン形状を加工した。また前節でも利用したフィデューシャルマークを測定位置の特定用に加工した。想定通りの形状が正しく加工できているかどうかを確認するため、顕微干涉計で測定を行った。¹⁴⁾測定の結果、図 5.11 に示すような周期 5 mm 深さ 60 nm の形状が想定通りに加工されていることが確認できた。

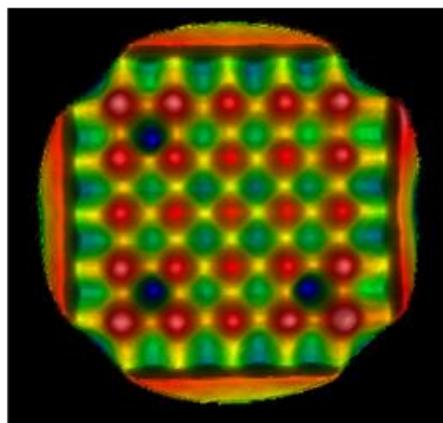


図 5.10 パターン形状サンプル

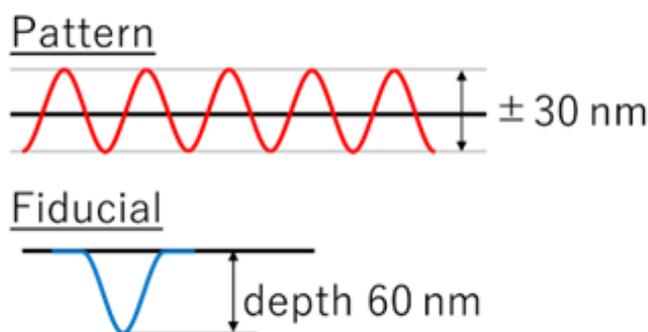


図 5.11 正弦波のパターン形状

5.3.2 パターン形状の測定

前章の通りフィデューシャルマークを基準にしてパターン形状サンプルの中心位置をサンプルモーションユニットの中心に設置し、表 5.4 の条件にて nano-profiler により形状測定した。本測定ではパターン形状を高分解能で測定するために連続スキヤンのデータ取得間隔を通常の 100 Hz から 1 kHz に変更した。その結果、微細なパターン形状の測定が可能になったがデータ取得数は増加した。これまでは測定ポイントごとにデータ取得をトリガーしていたが、今回の測定では 1 時間あたりのデータ取得回数を定め、時間制御によりデータ取得を行うことで、1 kHz のデータ取得を可能とした。¹⁵⁾

Nano-profiler の測定に加えて、同一のサンプルを顕微干渉計とフィゾー干渉計を用いてパターン形状を測定した。¹⁶⁾ 顕微干渉計は一般的に高精度な段差測定が可能であるとされており、パターン形状の深さを正確に測定することが可能である。一方フィゾー干渉計は全体の形状を高精度に測定することが可能である。図 5.12 に nano-profiler と顕微干渉計の測定結果の比較を示す。図 5.12(a)において、nano-profiler の測定結果は 18×18 mm の領域に対応し、深さ 30 nm に加工された 13 個の凹部の平均深さは 29.1 nm であった。一方、図 5.12(b)は顕微干渉計の測定結果であり、この場合の 13 個の凹部の平均深さは 31.2 nm であった。

表 5.4 パターン形状サンプル測定条件

Measured area	18×18 mm
Data acquisition frequency	1 kHz
Measuring pitch	0.1 mm
Number of measurements	10
Measurement time	7 min/measurement
Temperature	23±0.02 ° C

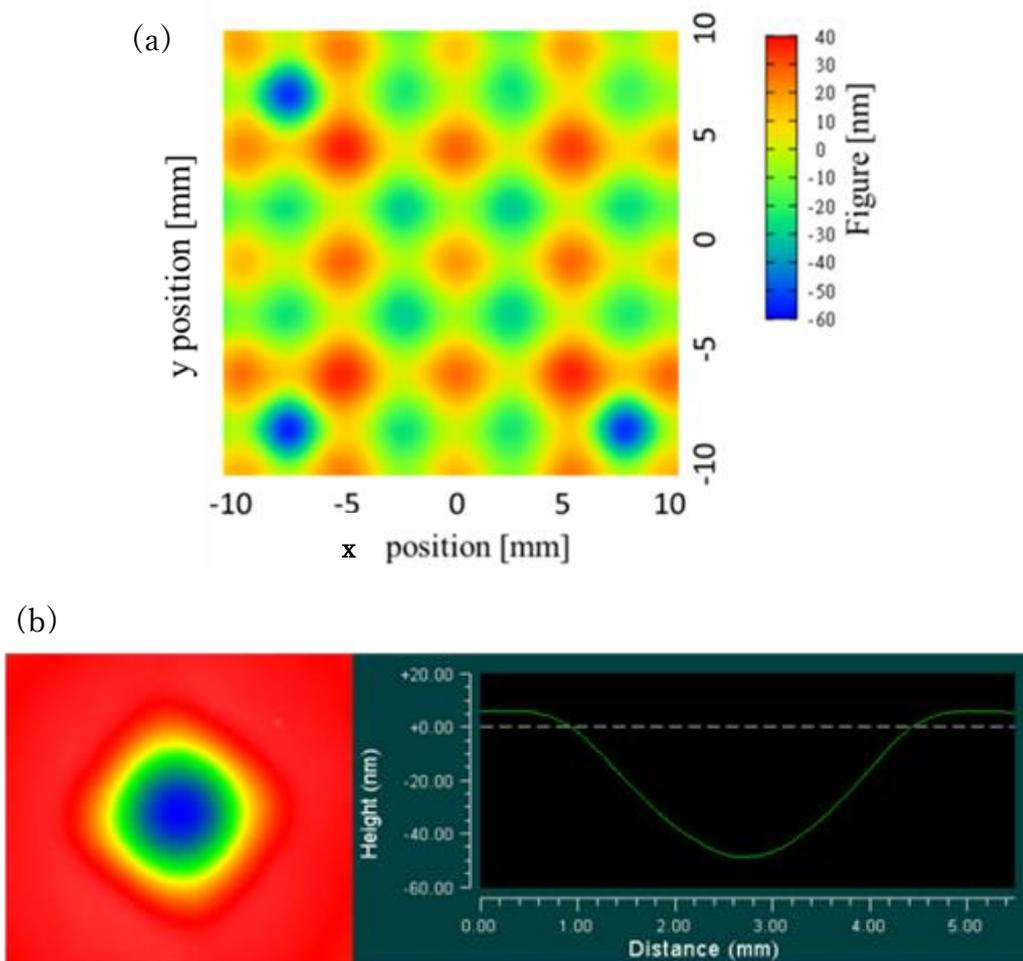


図 5.12 パターン深さの測定比較

2つの測定装置間の深さの差は平均で2 nmとなっている。顕微干涉計は0.1 nmの不確かさで深さ計測ができるように校正されており、この結果から nano-profiler はナノメートルオーダーのパターン形状を計測できることが検証された。実用的に考えても現時点でマイクロレンズアレイのパターン形状を測定するには、十分な精度であると考えられる。

また nano-profiler とフィゾー干涉計の測定結果の比較を図 5.13 に示す。図 5.13(a)は nano-profiler の測定結果であり 60.4 nmPV を示している。一方図 5.13(b)はフィゾー干涉計の測定結果を示しており、57.5 nm PV であった。

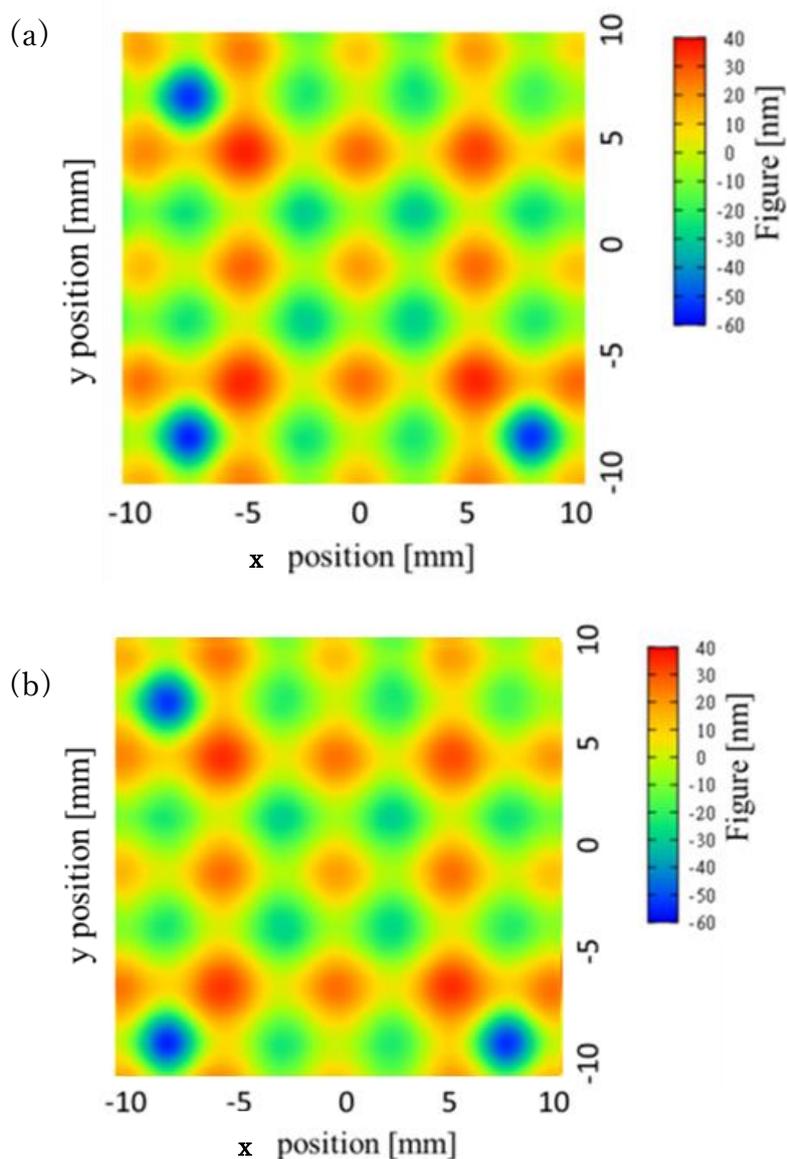


図 5.13 Nano-profiler と位相シフトフィゾー干渉計との比較

図 5.13 の結果から nano-profiler と位相シフトフィゾー干渉計によって得られた全体的な深さは、等高線図から明らかのようにパターン深さ $\pm 30 \text{ nm}$ と非常によく一致し、全体の PV 値の差は 2.9 nm となっている。両測定結果の違いは空間分解能による違いであると想定している。Nano-profiler と顕微干渉計との比較では PV 値が大きいのは空間分解能が高い顕微干渉計である。また nano-profiler とフィゾー干渉計との比較でも PV 値が大きいのは空間分解能が細かい nano-profiler となっている。これは空間分解能が高い方がより細かな凹凸情報まで測定できるため、PV 値が大きくなる現象を示していると推定される。

5.3.3 干渉計との測定比較結果の考察

フィゾー干渉結果との更に詳細な評価を行うためにフィデューシャルマークを基準としてMAP 状の形状を直接差分して差の形状分布を算出したのが図 5.14 である。図 5.14 からフィデューシャルマークの影響を取り除くために 10×10 mm 領域を抽出したのが図 5.15 であり、3.8 nmPV を示している。

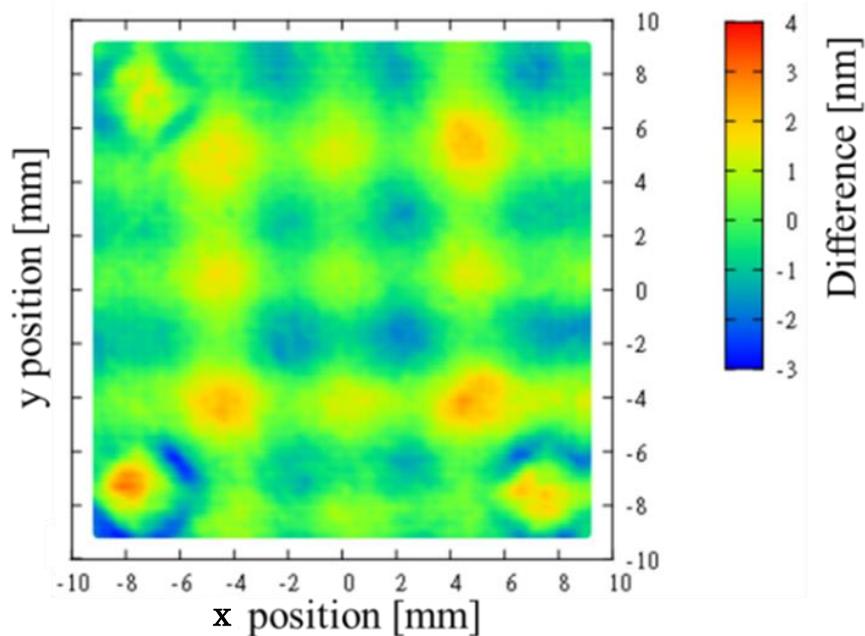


図 5.14 Nano-profiler と干渉計の差分形状

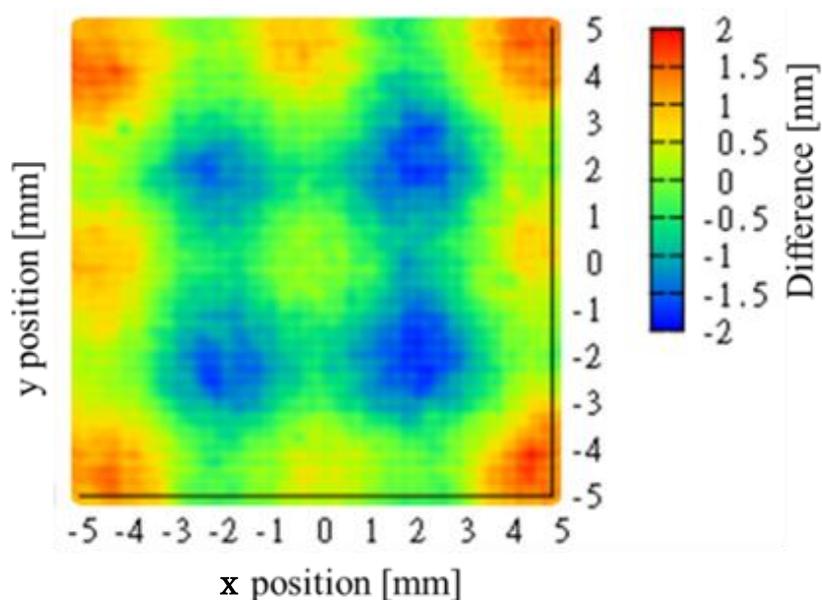


図 5.15 10×10 mm の差分形状抽出結果

図 5.15 より差分形状にパターン形状に由来する差が確認できる。これはいずれかの装置もしくは両装置に高さ方向にスケール誤差があると推測される。

干渉計の場合、位相シフトの際に用いるピエゾ素子のシフト誤差等がある。スケールを校正した干渉計においても高さ方向の測定結果の確かさが 2 %程度は存在する。今回のパターン形状は ± 30 nm となっているので、干渉計では ± 0.6 nm 程度はスケール誤差が存在していることになる。

一方 nano-profiler においては角度に対する QPD 出力の感度に誤差が存在することが考えられる。QPD の感度は形状測定前にそれぞれの試料を水平方向と鉛直方向に ± 750 μ deg ずつ 100 回傾け、その時の QPD 出力の変化とエンコーダの値を用いて試料の傾きと QPD 出力の相関関係を算出することにより算出できる。図 5.16 にパターン面形状サンプルで事前に測定した QPD 感度の結果を、図 5.17 に別の平面サンプルで同様に QPD 感度を測定した結果を示す。

QPD 角度変化に対する感度はパターン面では水平方向 6.25×10^{-6} rad/V、鉛直方向 6.29×10^{-6} rad/V となり、平面サンプルでは水平方向 6.31×10^{-6} rad/V、鉛直方向 6.26×10^{-6} rad/V となった。水平方向では約 1 %のの違いが存在していることが確認できた。1 %のスケール誤差がある場合、 ± 30 nm のパターン形状では ± 0.3 nm のスケール誤差となる。

これらの結果から nano-profiler と位相シフトフィゾー干渉計のスケール誤差は最大で 1.8 nm は存在することになり、図 5.15 の 3.8 nm の誤差の約半分を説明する誤差量となることが分かった。ただしまだ 2 nm の誤差量は残存しており、今後改善が求められる。

さらなる誤差要因としては前節の図 5.5 にて考察した x y 方向の倍率誤差についても検討したが、図 5.14 では中心部分と周辺部分で差分形状に高さの差が見られないことから同様の誤差が発生していないと考えた。シリンドリカル面は 30 nmPV 程度の形状であるのに対して、平面ミラーは 60 nmPV の形状となっているので、倍率誤差がある場合は図 5.14 の方がより誤差量が大きくなることを併せて考えても同様の倍率誤差が発生していないと判断した。Nano-profiler に倍率誤差が無いのであれば前節の図 5.5 で見られた倍率誤差は CGH が原因と考えられるが今後さらなる検証が必要である。

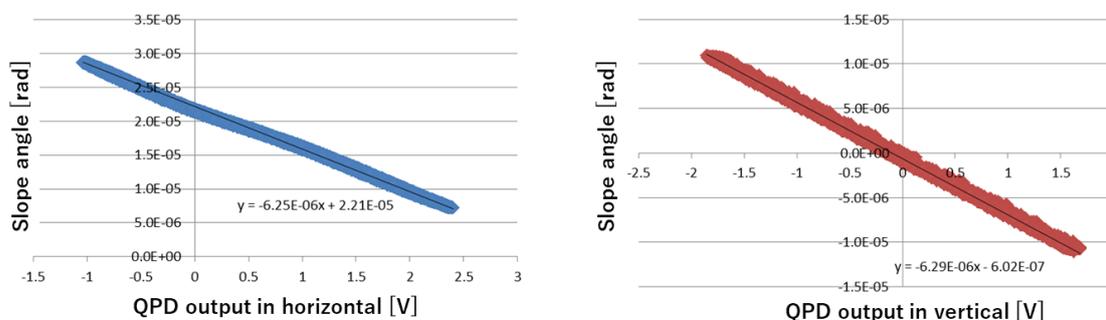


図 5.16 パターン面での QPD 感度測定結果

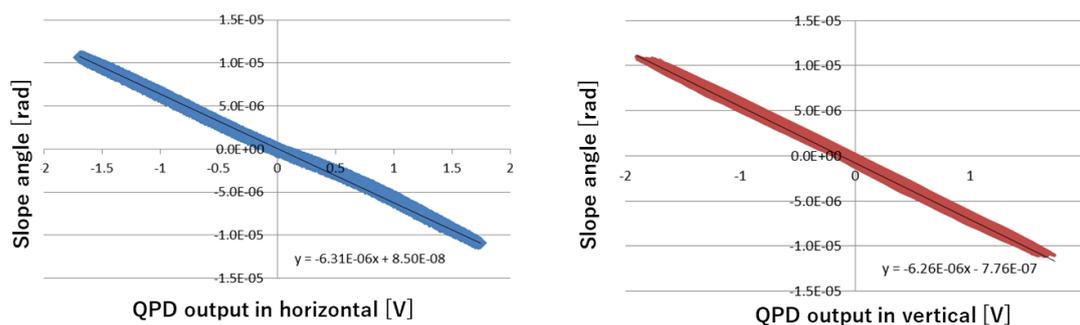


図 5.17 別の平面サンプルでの QPD 感度測定結果

5.3.4 繰り返し性の評価

図 5.18 に nano-profiler の測定繰り返し性（標準偏差）を示す。10 回の測定から得られる測定繰り返し性は 0.378 nmPV であった。前節のシリンドリカルミラーと同様に縦縞の形状分布が観察されており、スキャン方法が測定結果に影響を与えた可能性があると推測される。目標とする 0.1 nm には至っておらず同様に測定繰り返し性の改善が必要であることが確認された。

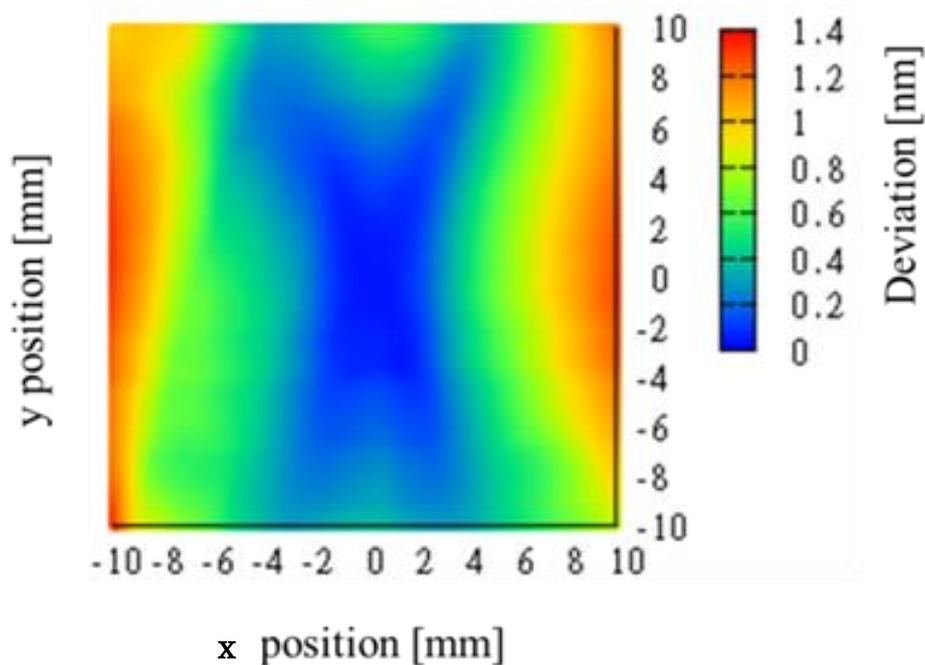


図 5.18 パターン付き平面形状での測定繰り返し性（標準偏差）

5.3.5 不確かさの算出

前節と同様に校正したロータリーエンコーダと光路長の値やステージの性能を基に 54 自由度の誤差量を定め、測定不確かさを表 5.5 にまとめた。不確かさは 2σ で 8.93 nm を示しており、目標とする 30 nm の達成を確認した。前節のシリンドリカルミラーでは光路長に起因する 2 次成分誤差が誤差量の大部分を占めていたが、パターン付き平面ミラーでは被測定面が平面なので光路長誤差の影響を受けない。一方それ以外の誤差は平面ミラーの方が大きくなっていることも検証できた。前述の通り曲率半径を測定目標にどの様に組み込むかが問題であるが、当初目標である不確かさ 30 nm を達成したと結論付けた。

Error Factor			Uncertainty	Unit	Error sensitivity	Figure error [nm]			
Random error			0.378	nm	1.000	0.3780	0.378		
Optical length	All axis		5.3	μm	0.000	0.0000	0.00		
	AW				0.000	0.0000			
Twist in optical direction	AF		1.44	μrad	0.205	0.2948	0.42		
	CF,CW,YF				0.047	0.0682			
	AW,YW				0.205	0.2948			
	Sample				0.000	0.0000			
Axis shift	AF	x	Rotation [deg]	2.88	μm	0.00108	0.0000	0.00	
						y	0.00170		0.0000
						z	0.00170		0.0000
	CF	x	2.88	0.00042	0.0000				
				y	0.00042	0.0000			
				z	0.00014	0.0000			
	AW	x	8.58	0.00367	0.0000				
				y	0.00067	0.0000			
				z	0.00067	0.0000			
	CW	x	2.88	0.00045	0.0000				
				y	0.00045	0.0000			
				z	0.00093	0.0000			
Stage error	Pitching		0.0386	μrad	18.1	0.6986	2.44		
	Yawing		0.1290		18.1	2.3347			
Rotary encoder	AF		0.0202	μrad	18.1	0.2111	3.70		
	CF		0.182		18.1	1.9018			
	AW		0.303		18.1	3.1664			
	CW		0.00245		18.1	0.0443			
Linear encoder			0.200	μm	0.000	0.0000	0.00		
Synthetic standard uncertainty σ						4.47			
Extended uncertainty 2σ (=U) for coverage factor k=2						8.93			

5.4 結言

本章では自由曲面形状としてシリンドリカルミラーとパターン付き平面ミラーの形状を測定し、目標とする不確かさ 30 nm について干渉計との比較測定を行った。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 新たに自由曲面形状の一種であるシリンドリカルミラーの測定を試みた。シリンドリカルミラーの測定条件について詳細を記した。
2. 回転非対称な形状であるシリンドリカルミラーの測定では測定位置の特定が困難であり、新たにフィデューシャルマークによる位置の特定を試みた。測定範囲外にフィデューシャルマークを加工することで被測定物をサンプルモーションユニットの中心に設置することが可能となり、測定時に測定領域を広げて測定することでさらに装置間の測定結果比較を行う際にも指標とすることができた。
3. シリンドリカルミラーの形状測定を nano-profiler と CGH を用いた位相シフトフィゾー干渉計で行った結果、nano-profiler では 43.7 nmPV、フィゾー干渉計では 60.9 nmPV となった。断面形状の比較においては ± 15 nm の範囲に入っていることも確認できた。ただし断面の測定においては xy 座標の倍率誤差が発生していると思われるが、どちらの装置に誤差が存在するかは現時点では不明であり今後検証が必要である。
4. Nano-profiler の全 54 自由度の誤差に関して誤差感度表を作成し、シリンドリカルミラー測定時の測定不確かさが 45.80 nm (2σ) であることを確認した。さらに曲率に相当する 2 次成分を除くと 5.61 nm (2σ) であることを確認した。
5. 自由曲面形状としてパターン形状の測定を試みた。パターン形状が測定できるようにデータ取得間隔を 100 Hz から 1 kHz に向上させ測定分解能を上げて測定した。また前章のフィデューシャルマークでの位置決めを利用し nano-profiler の測定結果と他装置との比較が行えるようにした。
6. 顕微干渉計との比較では深さ 30 nm に加工された 13 個の凹部の平均深さを基準に比較した。Nano-profiler では 29.1 nm、顕微干渉計では 31.2 nm であり差は 2.1 nm となった。この測定結果の違いは空間分解能によるものではないかと推測できる。
7. フィゾー干渉計との比較では全体の形状を比較した。Nano-profiler では 60.4 nmPV、フィゾー干渉計では 57.5 nm PV となった。差は 2.9 nm であり、顕微干渉計と同等

の差となった。

8. 両測定装置との比較の結果、目標とする不確かさ 30 nm に対して測定装置間の差は 3 nm 以下となっていることが検証できた。
9. フィデューシャルマークを活用して nano-profiler と位相シフトフィゾー干渉計の測定位置を合わせて差分することで差分形状面分布を算出した。差分形状がパターン形状と同様のパターンを示していることから z スケール誤差について検証を行い、最大で 1.8 nm の z スケール誤差が発生している可能性を示した。
10. x y スケールに関してはパターン付き平面ミラーではシリンドリカルミラーと同様の誤差が見られないことを確認した。量結果を併せて考えると CGH に倍率誤差が存在すると推定できるが今後さらに詳細な評価が必要である。
11. パターン付き平面ミラーにおいても測定不確かさを算出した。目標の不確かさ 30 nm に対して 8.93 nm (2σ) であることが分かった。
12. Nano-profiler の測定繰り返し性をシリンドリカルミラーとパターン付き平面ミラーで評価した。10 回の測定繰り返し性（標準偏差）が 0.562 nm と 0.378 nm を示しており、目標とする 0.1 nm の達成には至っていないことを確認した。

第6章 形状測定のリターン性向上

6.1 緒言

Nano-profiler の測定リターン性をさらに向上させるため、測定環境の改善を試みる。測定リターン性に影響する環境として空気中の屈折率変化に着目し、測定環境中に一定の空気の流れを作ることによってレーザー光の安定性を向上させられると考えた。最初に最適な空気の流れを作るために風速を変化させながらレーザーの安定性評価を行い、次にその条件下で形状測定リターン性が向上するかを検証する。

6.2 測定環境における空気中の屈折率影響

Nano-profiler の測定ではレーザーの直進性を利用して被測定面の傾斜角度を測定しているので、測定環境中でレーザー光の直進性が失われると角度の誤差が生じてしまう。レーザー光の直進性が失われる原因として空気の屈折率の分布が挙げられる。¹⁾ Nano-profiler の光路長は 400 mm あり、レーザー光の光路中における空気の屈折率が均一であればレーザー光の直進性は保証される。しかし図 6.1 に示す様にレーザー光路内の空気に屈折率の分布があるとレーザー光は屈折して直進性が維持できない。空気の屈折率はエドレンの式からも温度、湿度、気圧によって影響を受けるので屈折率の分布は即ち温度、湿度、気圧の分布が有る状態であると考えられる。²⁾⁻⁴⁾ 400 mm の光路中にこれらの分布が僅かではあるが存在することは明らかであり、この分布を均一化することがレーザー光の直進性を維持するために重要であると考えた。空気中の温度、湿度、気圧分布はクラスター化された状態で滞留しているので、空気がクラスター化された状態を無くすために一定の風速の空気の流れを発生させることが有効であると推測した。

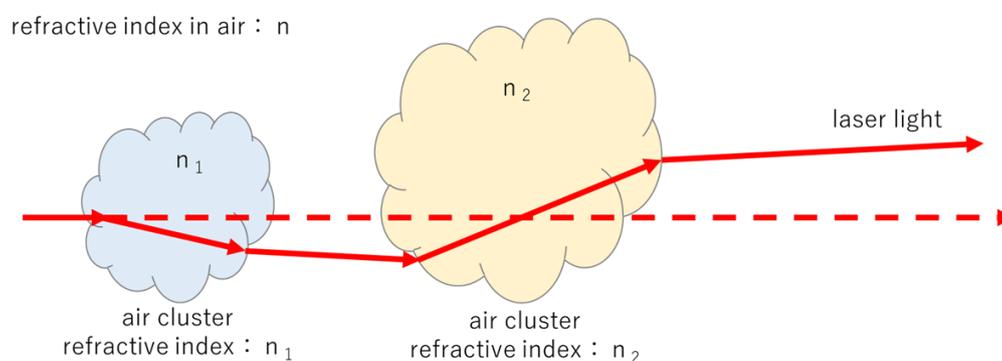


図 6.1 光路中における空気の屈折率分布によるレーザー光への影響の概念図

ただし空気の流れを発生させる条件は様々にあり、送風機の配置、風速などのパラメータを変化させて最適な条件を調べた。評価方法については次節で詳述するが、光路全体に上方から空気の流れを起こすことにより屈折率分布を分散できることが確認できた。また風速が重要なパラメータとなっていることも初期実験で確認できたので風速をパラメータにして最適な条件を探索することとした。

6.3 屈折率分布を最小化する風速条件の探索

空気中の屈折率分布を最小化するために光路中に一定の風速の空気の流れを作ることが有効であることが初期実験で確認できたので、さらに最適な風速についても評価を行った。実際に空気の流れを作るための送風ユニットを図 6.2 に示す。図 6.2 に示す様に装置の周辺にエアブローユニット（三菱電機株式会社製 BFS-30SC）を配置しダクトを介して空気を装置に送る。

そして図 6.3 に示す様にレーザー光路の上方からレーザー光路全体にエアフローが発生するように一定風速で下方向に層流の空気を流す。この際にエアブローユニットの各所で風速の違いが発生させないことでより均一な屈折率分布が実現できると推測される。⁵⁾

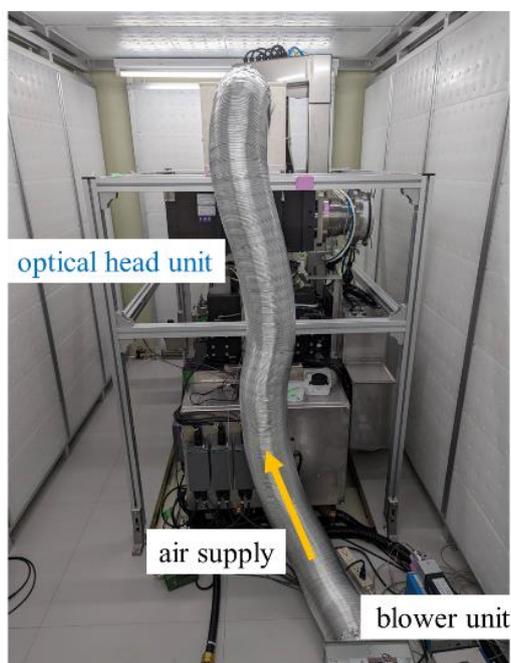


図 6.2 送風ユニットの構成

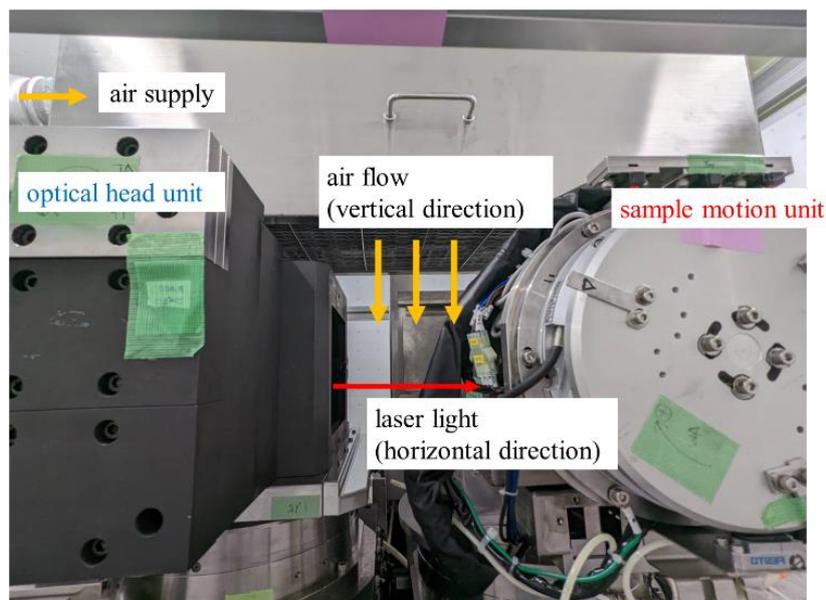


図 6.3 エアフローの配置

屈折率分布を最小化できる条件を調べるために次の手順で評価する。最初の設定として平面ミラーを装置に搭載し、レーザー光を入射させ測定光学系の中の QPD で受光できる状態とする。次に QPD の出力を確認してエアフローを開始し 30 分間放置する。30 分間放置後から 30 分間の QPD の出力データを取得し角度の値として換算する。この手順を条件とする風速毎に繰り返すことで風速とレーザー光の安定性、即ち屈折率分布が最小化された条件を調べることが可能となる。

図 6.4 は測定時間毎の QPD による角度変化をプロットした結果であり、風速 0 m/s (エアフロー無し) でのレーザー光における安定性を示している。一方、図 6.5 は風速 0.2 m/s でエアフローを発生させたときのレーザー光の安定性を示している。2 つの図から約 1 桁の安定性向上が確認できる。そして QPD 上での角度のバラツキを標準偏差としてまとめた結果が図 6.6 である。

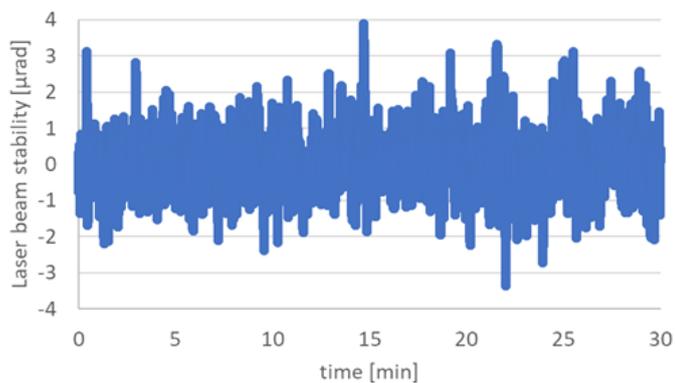


図 6.4 0 m/s エアフローにおける角度安定性

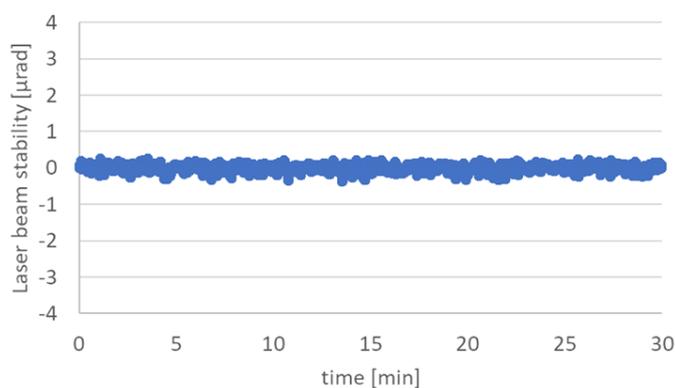


図 6.5 0.2 m/s エアフローにおける角度安定性

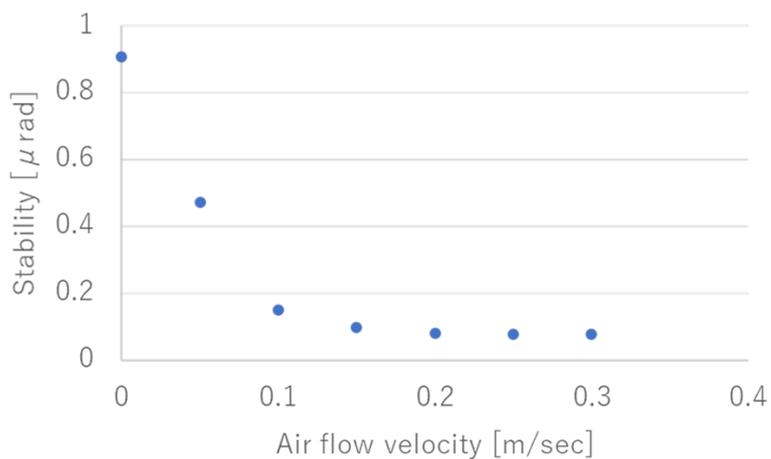


図 6.6 風速毎の安定性評価

風速を 0 m/s から上げると安定性が改善していくが、0.2 m/s 以上の風速では安定性に大きな違いが無いことが検証できた。この結果から風速を 0.2 m/s 以上に設定することで

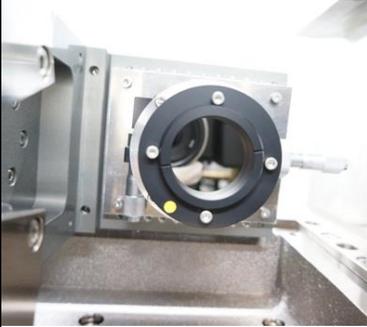
空気中の屈折率分布を低減し、レーザー光の安定性を向上させることが可能であると結論付けた。

6.4 測定繰り返し性の評価

これまでに得られた送風ユニットの配置と風速の条件で測定環境を制御し nano-profiler の測定繰り返し性を評価する。⁶⁻⁷ 測定サンプルは表面に NiP 無電解メッキを施した $\phi 36$ mm、曲率半径 100 mm の凹面ミラーで 20 mm \times 20 mm の範囲で表 6.1 の条件を用いて形状測定した。

形状測定はレーザー光をラスタ方向に 0.1 mm 間隔で 11 分間走査し、連続 10 回測定を繰り返して標準偏差を測定繰り返し性として評価した。比較のため、風速 0 m/s、0.2 m/s の 2 条件で測定を行った結果が図 6.7 と図 6.8 である。図 6.7 は風速 0 m/s の結果であり、測定繰り返し性は 302 μm となっており、一方図 6.8 は風速 0.2 m/s の結果であり、測定繰り返し性は 14.4 μm を示した。エアフローを制御することで、繰り返し性が約 21.5 倍向上していることが確認できた。測定繰り返し性 14.4 μm は一般的な干渉計に比べても非常に高い繰り返し性となっている。このように屈折率分布をエアフローにより制御することで nano-profiler による高繰り返し性の形状測定を実現することができた。

表 10.1 繰り返し性評価における形状測定条件

Measured sample	
Measured sample material	Electroless nickel plating
Diameter (ϕ)	36 mm
Measured area	20 \times 20 mm
Scan direction	Raster scan
Measuring time	11 min
Radius of curvature	100 mm
Measuring pitch	0.1 mm
Measurement repeatability	10 times
Temperature	23 \pm 0.02 $^{\circ}\text{C}$

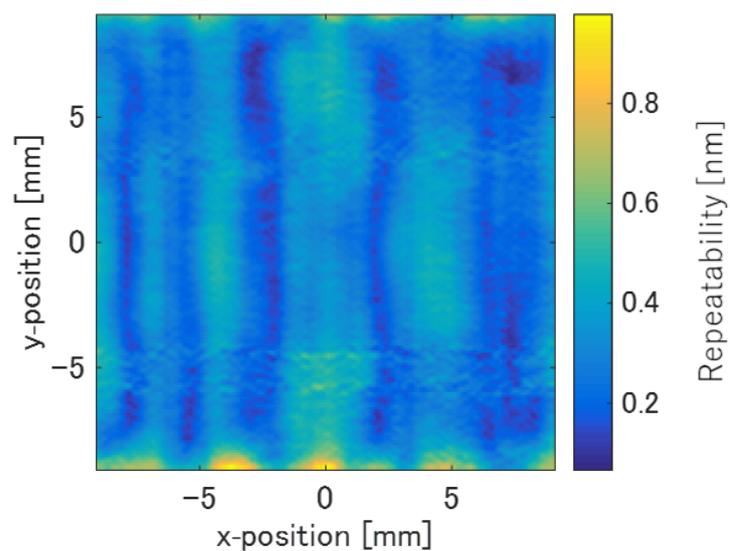


図 6.7 測定繰り返し性評価 風速 0 m/s

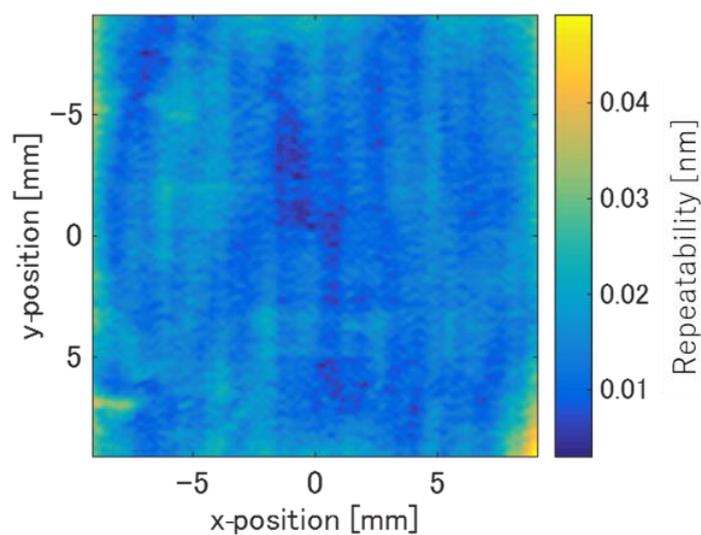


図 6.8 測定繰り返し性評価 風速 0.2 m/s

これらの評価結果は nano-profiler における特異的な結果ではなく、幅広くレーザー光を使う装置や環境影響を受けやすい装置など様々な分野で応用可能な内容であると考えられる。特にエアフローの方向や風速については空気のクラスターを分散させるための条件としても捉えられるので、様々な用途の初期条件としても活用できると思われる。

6.5 結言

本章では測定環境における屈折率分布に着目し nano-profiler の測定繰り返し性をさらに向上させることを試みた。最初に屈折率分布とレーザー光の安定性について論じ、空気の流れを制御することでレーザー光が安定することを検証した。次にエアフローの風速条件を最適化し、その条件を基に測定繰り返し性の評価を行った。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. Nano-profiler の測定繰り返し性がレーザー光の安定性に影響を受けることを示し、空気中の屈折率分布がレーザー光の直進性に影響を与えていると推測した。屈折率が温度、湿度、気圧の影響を受けて空間中に空気がクラスターとして分布していることを考慮し、エアフローによる均一化を対応策とした。
2. 各所に送風機を設置し最適なエアフロー条件を探索し、レーザー光路上方の複数個所から均一な層流を流すことにより屈折率分布を低減できることが判明した。さらに風速を変化させて 0.2 m/s 以上の風速でレーザー光が安定することを確認した。
3. 最適な風速条件を用いて繰り返し性の実測評価を行い、0 m/s の状態に比べて 0.2 m/s の風速条件では再現性が 14.4 pm と 21.5 倍改善し目標とする 0.1 nm の繰り返し性を達成した。
4. Nano-profiler により一般的な干渉計に比べても非常に高い繰り返し性が実現できることを実証した。これらの評価結果は nano-profiler に限らず測定環境を安定化させたい様々な分野において、エアフローの方向や風速などは有効な知見になると考えている。

第 7 章 総括

本論文は様々な分野で要望されている高精度な光学素子の自由曲面形状測定において 0.1 nm の測定繰り返し性と 30 nm の正確さを両立させる法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を用いた nano-profiler の開発に関する一連の研究結果をまとめたものである。最初に研究の背景と概要をまとめ、測定原理と装置構成について説明した。次に正確さを達成するために必要な要素技術開発について説明し、さらに自由曲面形状の実測評価結果から目標とした繰り返し性と正確さの達成を確認した。以下に本論文によって得られた成果を総括する。

第 1 章では本論文の背景となる光学素子の形状測定についてその概要を述べ、現行測定手法の課題と今後の技術的な要望について論じ、本研究の目標を定めた。

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について説明した。法線ベクトルから形状を算出する方法やその利点について説明した。さらに必要な法線ベクトルを算出するために設計面形状、5 軸数値制御、QPD を含む光学系により法線ベクトルを測定する手順について記し、最後に形状算出アルゴリズムを説明した。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 法線ベクトルから被測定面形状を算出する法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法について説明した。一般的な高さ分布から形状を算出する CMM とは異なり、角度（傾斜角）分布から形状を算出する測定方法であることを示し、高さ方向の誤差が直接的に形状正確さに依存しないという特長について言及した。
2. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法がレーザー光の直進性を基準として法線ベクトルを測定する測定原理について説明した。回転駆動軸を主体とする回転 4 軸と並進 1 軸の 5 軸装置構成を例示し、各軸の駆動量から法線ベクトル算出に至る具体的な形状算出式について詳細に示した。
3. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法に用いられるレーザー光の直進性を利用して法線ベクトルを高精度に測定する光学系について説明した。本光学系は通常の高角度測定用のオートコリメータとは異なり曲率を持つ測定面に対しても高精度な角度測定が可能である。

4. 形状をモデル関数で表現することにより、法線ベクトルから形状を導出する方法を示した。具体的にはモデル関数を微分した関数を基底関数として最小二乗法で法線ベクトルデータにフィッティングし、求められた係数を基にモデル関数を計算することで形状を算出することを数式により示した。

第3章では法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現する nano-profiler の装置構成について説明した。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を実現する nano-profiler の装置構成、光学系、試料系、測定環境に関する仕様を詳述した。
2. 通常のラスタースキャンを実現する nano-profiler とは異なり、スパイラルスキャンが可能となる spiral-nano-profiler に関して通常の nano-profiler とは異なる装置構成と光学系に関して仕様を詳述した。

第4章では目標の不確かさ 30 nm を達成するために nano-profiler の誤差低減を試みた。誤差の中でも最も影響が大きい要素であるステージの回転量を測定しているロータリーエンコーダと形状算出時のパラメータである測定光学系の光路長の校正手法を提案し評価した。また新たな測定手法として並進軸駆動の削減とスパイラル測定を提案し測定結果の検証を完了させた。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 複数のエンコーダヘッドを等間隔にロータリーエンコーダ上に配置して校正を行う等分割平均法について一般的な説明を示した。また国家標準器によるロータリーエンコーダの校正について具体的な装置構成を示し、校正手法についても説明した。
2. ロータリーエンコーダの取り付け条件を変更しながら国家標準器で校正を行うことで取り付け誤差が校正曲線に与える影響を観察し、 $0.1 \mu\text{rad}$ 以上の高精度を達成するためには取り付け誤差への配慮が必須であることを確認した。また複数の校正曲線を取得した結果を解析し校正誤差が $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ 存在することを明らかにした。
3. 国家標準器によりロータリーエンコーダの校正曲線を取得し、さらにロータリーエンコーダに6つのエンコーダヘッドを取り付け、6の整数倍成分のみを抽出することで $\pm 0.12 \mu\text{rad}$ に校正誤差を低減させた。これにより6の整数倍成分以外のロータリー

エンコーダ取り付け誤差を大幅に削減できることが確認できた。

4. 低減したロータリーエンコーダ取り付け誤差を評価するために新たに別の評価用エンコーダを nano-profiler に搭載し評価した。評価用エンコーダには円周 3 等分と 8 等分の位置にエンコーダヘッドを取り付けることで 24 の整数倍成分までを保証し、国家標準器の校正曲線が持つ校正誤差を検証した。結果、 $0.027 \mu\text{rad}$ の精度で校正ができていることがわかった。
5. Nano-profiler にて目標の不確かさ 30 nm を達成するためには光路長を $12 \mu\text{m}$ の精度で推定することが必須であり、そのために新たな光路長推定方法としてマルチステップセルフキャリブレーション法を提案した。
6. マルチステップキャリブレーション法の具体的な手順を説明するために、光路長を変更した 2 つの状態での測定形状について説明した。実際に光路長を変化させるのではなく算出に使う光路長の値を変化させ、算出された 2 つの形状が一致する際に L の値が正しくなることを説明した。
7. マルチステップキャリブレーション法では「ステージ駆動量」と「測定時間の増加に伴う温度変化」が主な誤差要因となるため、測定領域をこれまでの実績から $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ と定めた。また推定精度に影響を与える条件として ΔL の数、 ΔL の大きさ、曲率半径 R の 3 つのパラメータを最適化するために事前シミュレーションを行った。結果、 ΔL の数を増やす、 ΔL を長くする、曲率半径を小さくすることで推定精度が向上することをあきらかにした。
8. シミュレーション結果を基に実測評価を行うために必要な装置の光学調整手順について詳細を説明した。光学系の調整には「QPD と本装置光学系の回転中心が一致すること」、「レーザーから試料への入射光が試料系の回転中心を通ること」、「入射経路が一致かつ YF 軸に平行であること」、「反射光が QPD の中心(光学系の回転中心)を通ること」の 4 つの条件が必要であり、それを満足する調整手順を説明した。
9. シミュレーション結果に基づき、 ΔL の数 : 10、 ΔL : $200 \mu\text{m}$ 、被測定物曲率半径 : 100 mm を測定時のパラメータとして設定し実測評価を行った。測定の結果、 L は 399.698 mm 、標準偏差 σ は $5.3 \mu\text{m}$ であることが確認された。目標とする不確かさ 30 nm に必要な光路長の推定精度 $12 \mu\text{m}$ に対しての再現性としては十分な値であることを実証できた。

10. 目標とする 30 nm の正確さをさらに低減させるために誤差の多い並進駆動軸を動作させずに測定する新たな測定方法を提案した。
11. 駆動軸を削減して測定するためには事前に QPD の感度を補正する必要がある。実際に感度補正を行う手順を4つのステップで説明し、実測データを収集し、感度補正曲線の数値化・数式化を試みた。結果、実効的に使用する 0.4 mm のストロークで補正式を生成することができた。
12. 既存の測定方法と新たに提案した測定方法の両方で曲率半径 100 mm、1000 mm、10000 mm のサンプルを比較測定した。結果 PV 値の違いでは最大 6.2 nm と目標とする 30 nm に対して十分小さな値となっていることが確認できた。
13. さらに断面プロファイルについても評価した所、曲率半径に依存しない測定誤差が残存していることが確認された。装置改善につながるヒントとなるデータであると考えており、さらにデータ取得を進め今後検証していきたいと考えている。
14. これまでの 20×20 mm の領域に比べて大きな ϕ 150 mm の非球面ミラーを測定しさらにフィゾー干渉計と比較した所、P V 値で 10 nm の差になっていること、断面プロファイルの比較でも ± 20 nm 以内であることを確認した。さらに 10 回の連続測定から 2.8 nm の測定繰り返し性が達成できていることを確認した。
15. 回転軸により発生するアキシャル方向とラジアル方向の誤差についても考察を行い、角度測定とスパイラルスキャンを組み合わせることで誤差の大きいアキシャル誤差の影響を受けにくい測定方法であることを確認した。さらに実測の結果に放射状の誤差が出ていないことからこの推測が正しいことも確認ができた。

第5章では自由曲面形状としてシリンDRICALミラーとパターン付き平面ミラーの形状を測定し、目標とする不確かさ 30 nm について干渉計との比較測定を行った。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. 新たに自由曲面形状の一種であるシリンDRICALミラーの測定を試みた。シリンDRICALミラーの測定条件について詳細を記した。
2. 回転非対称な形状であるシリンDRICALミラーの測定では測定位置の特定が困難であり、新たにフィデューシャルマークによる位置の特定を試みた。測定範囲外にフィ

フェューシャルマークを加工することで被測定物をサンプルモーションユニットの中心に設置することが可能となり、測定時に測定領域を広げて測定することでさらに装置間の測定結果比較を行う際にも指標とすることができた。

3. シリンドリカルミラーの形状測定を nano-profiler と CGH を用いた位相シフトフィゾー干渉計で行った結果、nano-profiler では 43.7 nmPV、フィゾー干渉計では 60.9 nmPV となった。断面形状の比較においては ± 15 nm の範囲に入っていることも確認できた。ただし断面の測定においては xy 座標の倍率誤差が発生していると見られるが、どちらの装置に誤差が存在するかは現時点では不明であり今後検証が必要である。
4. Nano-profiler の全 54 自由度の誤差に関して誤差感度表を作成し、シリンドリカルミラー測定時の測定不確かさが 45.80 nm (2σ) であることを確認した。さらに曲率に相当する 2 次成分を除くと 5.61 nm (2σ) であることを確認した。
5. 自由曲面形状としてパターン形状の測定を試みた。パターン形状が測定できるようにデータ取得間隔を 100 Hz から 1 kHz に向上させ測定分解能を上げて測定した。また前章のフェューシャルマークでの位置決めを利用し nano-profiler の測定結果と他装置との比較が行えるようにした。
6. 顕微干渉計との比較では深さ 30 nm に加工された 13 個の凹部の平均深さを基準に比較した。Nano-profiler では 29.1 nm、顕微干渉計では 31.2 nm であり差は 2.1 nm となった。この測定結果の違いは空間分解能によるものではないかと推測できる。
7. フィゾー干渉計との比較では全体の形状を比較した。Nano-profiler では 60.4 nmPV、フィゾー干渉計では 57.5 nm PV となった。差は 2.9 nm であり、顕微干渉計と同等の差となった。
8. 両測定装置との比較の結果、目標とする不確かさ 30 nm に対して測定装置間の差は 3 nm 以下となっていることが検証できた。
9. フェューシャルマークを活用して nano-profiler と位相シフトフィゾー干渉計の測定位置を合わせて差分することで差分形状面分布を算出した。差分形状がパターン形状と同様のパターンを示していることから z スケール誤差について検証を行い、最大で 1.8 nm の z スケール誤差が発生している可能性を示した。
10. x y スケールに関してはパターン付き平面ミラーではシリンドリカルミラーと同様

の誤差が見られないことを確認した。量結果を併せて考えるとCGHに倍率誤差が存在すると推定できるが今後さらに詳細な評価が必要である。

11. パターン付き平面ミラーにおいても測定不確かさを算出した。目標の不確かさ 30 nm に対して 8.93 nm (2σ) であることが分かった。
12. Nano-profiler の測定繰り返し性をシリンドリカルミラーとパターン付き平面ミラーで評価した。10回の測定繰り返し性（標準偏差）が 0.562 nm と 0.378 nm を示しており、目標とする 0.1 nm の達成には至っていないことを確認した。

第6章では測定環境における屈折率分布に着目し nano-profiler の測定繰り返し性をさらに向上させることを試みた。最初に屈折率分布とレーザー光の安定性について論じ、空気の流れを制御することでレーザー光の直進性が安定することを検証した。次にエアフローの風速条件を最適化し、その条件を基に測定繰り返し性を評価した。以下に本章で得られた成果および知見についてまとめる。

1. Nano-profiler の測定繰り返し性がレーザー光の安定性に影響を受けることを示し、空気中の屈折率分布がレーザー光の直進性に影響を与えていると推測した。屈折率が温度、湿度、気圧の影響を受けて空間中に空気がクラスターとして分布していることを考慮し、エアフローによる均一化を対応策とした。
2. 各所に送風機を設置し最適なエアフロー条件を探索し、レーザー光路上方の複数個所から均一な層流を流すことにより屈折率分布を低減できることが判明した。さらに風速を変化させて 0.2 m/s 以上の風速でレーザー光が安定することを確認した。
3. 最適な風速条件を用いて繰り返し性の実測評価を行い、0 m/s の状態に比べて 0.2 m/s の風速条件では再現性が 14.4 pm と 21.5 倍改善し目標とする 0.1 nm の繰り返し性を達成した。
4. Nano-profiler により一般的な干渉計に比べても非常に高い繰り返し性が実現できることを実証した。これらの評価結果は nano-profiler に限らず測定環境を安定化させたい様々な分野において、エアフローの方向や風速などは有効な知見になると考えている。

本研究では法線ベクトル追跡型ナノ精度形状測定法を用いた nano-profiler を開発した。自由曲面形状の測定に対する要望が大きくなる中で、繰り返し性 0.1 nm、正確さ 30 nm を目標とするために特に重要となるロータリーエンコーダの校正とその検証技術の開発と光路長の自律校正方法を確立に着手して十分な精度が得られていることを検証した。これらの校正技術を基にシリンドリカルミラーとパターン付き平面ミラーの 2 種類の自由曲面形状を測定し、干渉計との比較で共に 30nm 以内の一致を確認したが、測定繰り返し性は目標とする 0.1nm に到達しなかった。そこでさらに測定繰り返し性を向上させるために、エアフローによる測定環境改善して目標値 0.1nm 以下を達成した。正確さに関しては今後の更なる研究やラウンドロビン評価により証明していくことが次の目標であると考えている。またこれらの研究が nano-profiler 以外の他の測定装置や光学技術全般の発展に繋がることを望む。

参考文献

第 1 章

- 1) K. Yamauchi H. Mimura, T. Kimura, H. Yumoto, S. Handa, S. Matsuyama, K. Arima, Y. Sano, K. Yamamura, K. Inagaki, H. Nakamori, J. Kim, K. Tamasaku, Y. Nishino, M. Yabashi, and T. Ishikawa, *J. Phys. Condens. Matter* 23(39), 394206 (2011).
- 2) S. Matsuyama, T. Inoue, J. Yamada, J. Kim, H. Yumoto, Y. Inubushi, T. Osaka, I. Inoue, T. Koyama, K. Tono, H. Ohashi, M. Yabashi, T. Ishikawa, and K. Yamauchi, *Sci. Rep.* 8(1), 17440 (2018).
- 3) F. Duerr, Y. Meuret, and H. Thienpont, *Opt. Express* 21(25), 31072–31081 (2013).
- 4) F. Z. Fang, X. D. Zhang, A. Weckenmann, G. X. Zhang, and C. Evans, *CIRP Annals* 62(2), 823–846 (2013).
- 5) B. Wu and A. Kumar, *Appl. Phys. Rev.* 1(1), 011104 (2014).
- 6) L. Li Xuan Liu, S. Pal, S. Wang, C. K. Ober, and E. P. Giannelis, *Chem. Soc. Rev.* 46(16), 4855–4866 (2017).
- 7) V. Ayvazyan, N. Baboi, J. Bähr, V. Balandin, and B. Beutner, *Eur. Phys. J. D.* 37(2), 297–303 (2006).
- 8) A. J. MacGovern and J. C. Wyant, *Appl. Opt.* 10(3), 619–624 (1971).
- 9) S. M. Arnold, L. C. Maxey, J. Rogers, and R. C. Yoder, *Proceedings of SPIE'S International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, Vol. 2536 (1995) .
- 10) J. H. Burge, *Proceedings of SPIE International Conferences On Optical Fabrication and Testing and Applications of Optical Holography*, Vol. 2576 (1995).
- 11) S. Reichelt, C. Pruss, and H. J. Tiziani, *Appl. Opt.* 42(22), 4468–4479 (2003).
- 12) C. Pruss and S. Reichelt, *Opt. Eng.* 43(11), 2534–2540 (2004).
- 13) P. Zhou and J. H. Burge, *Appl. Opt.* 46(5), 657–663 (2007).
- 14) A.G. Poleshchuk, R. K. Nasyrov, and J. M. Asfour, *Opt. Express* 17(7), 5420–5425 (2009).
- 15) C. Pruss, *Opt. Eng.* 50(5), 055801 (2011).
- 16) J. Peng, D. Ge, Y. Yu, K. Wang, and M. Chen, *Appl. Opt.* 52(30), 7311–7323 (2013).
- 17) W. Cai, P. Zhou, C. Zhao, and J. H. Burge, *Appl. Opt.* 52(34), 8324–8331 (2013).
- 18) S. Peterhänsel, C. Pruss, and W. Osten, *Opt. Express* 21(10), 11638–11651 (2013).
- 19) J. Peng, D. Chen, H. Guo, J. Zhong, and Y. Yu, *Opt. Express* 26(16), 20306–20318

- (2018).
- 20) J. Li, H. Shen, J. Wang, and R. Zhu, *Appl. Opt.* 58(8), 1991–1997 (2019).
 - 21) C. Pruss, G. B. Baer, J. Schindler, and W. Osten, *Opt. Eng.* 56(11), 111713 (2017).
 - 22) G. Berger and J. Petter, *Proceedings of SPIE Optifab*, Vol. 8884, 170 (2013).
 - 23) R. Henselmans, G. P. H. Gubbels, C. van Drunen, B. van Venrooy, and J.A.P. Leijtens, *Proceedings of SPIE International Conference on Space Optics 2010*, Vol. 10565 (2017).
 - 24) “EMPIR project 15SIB01: FreeFORM,” <https://www.ptb.de/emrp/> (2016).
 - 25) I. Fortmeier, et al, “Round robin comparison study on the form measurement of optical freeform surfaces,” *J. Eur. Opt. Soc.-Rapid Publ.* 16(1), 2 (2020).
 - 26) Y. Higashi, Y. Takaie, K. Endo, T. Kume, K. Enami, K. Yamauchi, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, and Y. Mori, *Proc. SPIE (San Diego, CA.)* 6317, 6317B–6311 (2016).
 - 27) Y. Higashi, Y. Takaie, K. Endo, T. Kume, K. Enami, K. Yamauchi, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, and Y. Mori, *Proc. SPIE San Diego, CA* 6704, 6704D–6701 (2007).
 - 28) T. Kitayama, H. Matsumura, K. Usuki, T. Kojima, J. Uchikoshi, Y. Higashi and K. Endo, *Proc. SPIE Optics+photonics. San Diego* (2012).
 - 29) H. Matsumura, K. Usuki, T. Kitayama, T. Kojima, J. Uchikoshi, Y. Higashi et al. High-speed surface slope measuring profiler for an aspheric shapes, *SPIE Optical System Design. Barcelona, Spain* (2012).
 - 30) R. Kudo, K. Okita, T. Kitayama, M. Nakano, K. Yamamura, and K. Endo, *Measurement* 73, 473–479 (2015).
 - 31) H. Shiraji, Y. Tokuta, T. Kitayama, M. Nakano, R. Kudo, K. Yamamura, and K. Endo, *Proceedings of international conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2016*, p. 37–38 (2016).
 - 32) K. Hashimoto, K. Endo, Uncertainty of figure error measurement by non-contact three dimensional nano-profiler using normal vector tracing method, *SPIE Optical Metrology, refereed, San Diego, USA, Virtual Meeting* (2020).

第 2 章

- 1) T. Miyawaki, K. Endo, “Optical path length self-calibration method based on form measured surface data”, *Precision Engineering*, 77, pp.360-364 (2022).
- 2) T. Miyawaki, and K. Endo, “Spiral scanning nano-profiler using normal vector tracing method”, *Review of Scientific Instruments*, 93, 125108 (2022).
- 3) T. Miyawaki, T. Watanabe, and K. Endo, “On-machine self-calibration of rotary

- encoders in the normal vector tracing method”, *Review of Scientific Instruments*, 93, pp.103702-103707 (2022).
- 4) H. Matsumura, K. Usuki, T. Kitayama, T. Kojima, J. Uchikoshi, Y. Higashi and K. Endo, High-speed surface slope measuring profiler for an aspheric shapes, *SPIE Optical System Design*. Barcelona, Spain (2012).
 - 5) R. Kudo, K. Okuda, K. Okita, Y. Tokuta, M. Nakano, K. Yamamura and K. Endo, *ASPE/ASPEN Summer Topical Meeting*, 126-131 (2014).
 - 6) H. Shiraji, Y. Tokuta, T. Kitayama, M. Nakano, R. Kudo, K. Yamamura, and K. Endo, *Proceedings of international conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications 2016*, p. 37–38 (2016).
 - 7) R. Kudo, K. Okuda, K. Okita, Y. Tokuta, M. Nakano, K. Yamamura and K. Endo, *Measurement*. 73:473–9 (2015).

第3章

- 1) R. Kudo, K. Okuda, K. Usuki, M. Nakano, K. Yamamura, K. Endo. *Rev Sci Instrum*.85 (2014).
- 2) T. Kitayama, H. Matsumura, K. Usuki, T. Kojima, J. Uchikoshi, Y. Higashi and K. Endo, *Proc. SPIE Optics+photonics*. San Diego (2012).
- 3) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ検査表 SMS-1(H)」2012年.
- 4) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ仕様書 SMS-1(H)」2012年.
- 5) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ仕様書 STG-5」2010年.
- 6) T. Miyawaki, and K. Endo, “Spiral scanning nano-profiler using normal vector tracing method”, *Review of Scientific Instruments*, 93, 125108 (2022).

第4章

- 1) T. Miyawaki, T. Watanabe, and K. Endo, “On-machine self-calibration of rotary encoders in the normal vector tracing method”, *Review of Scientific Instruments*, 93, pp.103702-103707 (2022).
- 2) 豊山晃「角度の標準機とその校正方法」*精密機械* 44、539-544 (1978)
- 3) 益田正, 梶谷誠「角度検出器の精密自動構成システムの開発」*精密工学会誌* 521732-1738 (1986).
- 4) 松永輝雄「高精度測定用光学式エンコーダ」*精密機械* 51,722-729 (1985).

- 5) T. Watanabe, *Synthesiology* 1/4, 296–304 (2008).
- 6) T. Watanabe, *Oyo Buturi*. 84/3, 224 (2015).
- 7) T. Watanabe, A. P. Drijarkara, W. Samit, K. Vacharanukul, and A. Tonmueanwai, *Proc. ISMTII-2011*, Vol. D3–1 (2011).
- 8) J. A. Kim, J. W. Kim, C. S. Kang, J. Jin, and T. B. Eom, *Proc. MacroScale*, Q5 (2011).
- 9) M. N. Burnashev, P. A. Pavlov, and Y. V. Filatov, *Quantum Electron*. 43/2, 130–138 (2013).
- 10) T. Watanabe, Y. Kondo, and H. Fujimoto, *Proc. LMPMI 2014*, Vol. P06 (2014).
- 11) Y. Yu, L. Dai, M. S. Chen, L. B. Kong, C. Q. Wang, and Z. P. Xue, *Sensors (Basel)* 20/5, 1458 (2020).
- 12) 渡辺司, 益田正, 梶谷誠, 藤本弘之, 中山貫 「ロータリーエンコーダの高精度校正装置の開発 (第一報) -校正システムと基礎実験-」 67, 1091-1095 (1988) .
- 13) T. Watanabe, *Proc. 20th IMEKO world Congr* (2012).
- 14) R. Kudo, K. Okuda, K. Okita, Y. Tokuta, M. Nakano, K. Yamamura and K. Endo, *Measurement*. 73:473–9 (2015).
- 15) R. Kudo, T. Kitayama, Y. Tokuta, H. Shiraji, M. Nakano, K. Yamamura and K. Endo, *Optics and Lasers Eng.* 98:159–62, (2017).
- 16) T. Miyawaki, K. Endo, “Optical path length self-calibration method based on form measured surface data”, *Precision Engineering*, 77, pp.360-364 (2022).
- 17) A. Hirai and H. Matsumoto, *Optics Communications*, 215, 25-30 (2002).
- 18) A. Hirai and H. Matsumoto, *Optics Letters*, 28, 2112-2114 (2003).
- 19) A. Winarno, S Masuda, S. Takahashi, H. Matsumoto and K. Takamasu, *Measurement Science and Technology*, 29, 025006 (2018).
- 20) A. Winarno, S. Takahashi, H. Matsumoto and K. Takamasu, *Precision Engineering*, 55, 254-259 (2019).
- 21) T. Miyawaki, M. Ikuchi and K. Endo, “Reduction of motion axis by sensitivity calibration of sensor in shape measurement instrument using normal vector tracing”, *Review of Scientific Instruments* 94, 015114 (2023) .
- 22) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ検査表 SMS-1(H)」2012年.
- 23) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ仕様書 SMS-1(H)」2012年.
- 24) 東芝機械株式会社「超精密測定ステージ仕様書 STG-5」2010年.
- 25) 木崎嶺, 豊吉結衣, 橋本航汰, 北山貴雄, 姜正敏, 宮脇崇, 山村和也, 遠藤勝義, “非接触ナノ形状測定装置の不確かさの評価”, 2018年度精密工学会秋季学術講演会論文集.
- 26) T. Miyawaki, and K. Endo, “Spiral scanning nano-profiler using normal vector tracing method”, *Review of Scientific Instruments*, 93, 125108 (2022).
- 27) G. Berger and J. Petter, *Proceedings of SPIE Optifab*, Vol. 8884, 170 (2017).

- 28) G. Berger and J. Petter, *TM Techn. Mess.* 81(1), 2–7 (2014).
- 29) Zygo, 「verifire™ HD Reference manual」.

第5章

- 1) T. Miyawaki, and K. Endo, “Cylindrical surface shape measurement method and measurement comparison”, *Optical Engineering*, Vol. 61, Issue 12, 124106 (2022).
- 2) A. J. MacGovern and J. C. Wyant, *Appl. Opt.* 10(3), 619–624 (1971).
- 2) S. M. Arnold, L. C. Maxey, J. Rogers, and R. C. Yoder, *Proceedings of SPIE'S International Symposium on Optical Science, Engineering, and Instrumentation*, Vol. 2536 (1995).
- 3) J. H. Burge, *Proceedings of SPIE International Conferences On Optical Fabrication and Testing and Applications of Optical Holography*, Vol. 2576 (1995).
- 4) S. Reichelt, C. Pruss, and H. J. Tiziani, *Appl. Opt.* 42(22), 4468–4479 (2003).
- 5) H. Shiraji, Y. Tokuta, T. Kitayama, M. Nakano M, R. Kudo, K. Yamamura and K. Endo, *Proceedings of international conference on X-ray optics, detectors, sources, and their applications*, p. 37–8 (2016).
- 6) 白地央樹, 木崎嶺, 豊吉結衣, 北山貴雄, 山村和也, 宮脇崇, 遠藤勝義, “非接触ナノ形状測定法によるシリンドリカルミラーの三次元形状測定”, 2017年度精密工学会秋季学術講演会論文集.
- 7) Zygo, 「verifire™ HD Reference manual」
- 8) 木崎嶺, 豊吉結衣, 橋本航汰, 北山貴雄, 姜正敏, 宮脇崇, 山村和也, 遠藤勝義, “非接触ナノ形状測定装置の不確かさの評価”, 2018年度精密工学会秋季学術講演会論文集.
- 9) 橋本航汰, 豊吉結衣, 生口幹也, 倉地智春, 北山貴雄, 姜正敏, 宮脇崇, 遠藤勝義, “法線ベクトル追跡型非接触三次元形状測定における不確かさ”, 2019年度精密工学会秋季学術講演会論文集.
- 10) W. Wang, Z. Zhang, P. Yao, X. Wang, Z. Zhang, and Y. Liu, *J. Mater. Process. Technol.* 289, 116927 (2021).
- 11) Takashi Miyawaki, and Katsuyoshi Endo, “Simultaneous measurement of fine pattern Shape and overall shape by a nano-profiler”, *Review of Scientific Instruments*, 93, 125113 (2022).
- 12) L. Deck and P. de Groot, *Int. J. Mach. Tool. Manuf.* 35/2, 147–150 (1995).
- 13) L. Deck, *Optifab* Vol. 10316 (2007).
- 14) Zygo, 「Nexview™ NX2 Reference manual」
- 15) 木崎嶺, 白地央樹, 豊吉結衣, 北山貴雄, 山村和也, 宮脇崇, 遠藤勝義, “法線ベクトル

追跡型非接触ナノ形状測定法によるパターン付き平面ミラーの形状測定”, 2017 年度精密工学会秋季学術講演会論文集.

16) Zygo, 「verifire™ HD Reference manual」

第 6 章

- 1) 河合 滋.光学設計のための基礎知識.オプトロニクス社.115-116 (2006).
- 2) Edltn B., Metrologia, 2, 71-80 (1966).
- 3) Owen J. C., Appl. Opt. 6, 51-59 (1967).
- 4) K P Birch and M J Downs Metrologia 30 155 (1993).
- 5) C,Lei, Z.HengkaiZ.G.Guoxin,Journal of Shanghai UniversityNatural Science Edition Vol.23,501-509 (2017).

謝辞

本研究を遂行するにあたり終始ご指導並びにご鞭撻を賜りました大阪大学大学院工学研究科附属精密工学研究センター 遠藤勝義教授に深甚の謝意を表します。また本論文をまとめるにあたり、その内容についてご検討頂くと共に懇篤なるご高閲並びに適切なるご教示を賜りました、大阪大学大学院工学研究科物理学系専攻 山内和人教授、山村和也教授、高エネルギー加速器研究機構 東保男氏に厚く感謝の意を表します。

本研究を遂行する過程において、終始適切なお指導、ご助言を頂きました産業技術総合研究所光学計測標準研究部門幾何標準研究グループ 渡部司グループ長、東京大学 先端科学技術研究センター光製造科学分野 高橋哲教授に心から感謝の意を表しますとともに、多くのご指導を賜りました物理学系専攻 荻博次教授、桑原裕司教授、森川良忠教授、渡部平司教授の諸先生方に深く感謝いたします。

また本研究を共同研究という形で遂行するにあたりご指導ご鞭撻頂きました株式会社ニコン 秋山貴之部長、野村和司氏、近藤洋行氏、小林輝紀氏に深く感謝をするとともに、測定原理の検証にご尽力いただいた株式会社ニコン 山本貴広氏、澤谷栄治氏に深く感謝の意を表します。

また nano-profiler の装置製造並びに研究内容において多大なるご協力を頂きました、芝浦機械株式会社 田中克敏技術顧問、nano-profiler の光学系設計においてご協力を頂いた OptiWorks 株式会社土肥寿秀社長、に深く感謝の意を表します。

また本研究の実施に当たりご協力をいただきました研究室の修了生並びに在籍中の北山貴雄氏、戸成大祐氏、小嶋拓也氏、薄木宏治氏、徳田有亮氏、奥田晃平氏、沖田賢哉氏、木崎嶺氏、白地央樹氏、豊吉結衣氏、生口幹也氏、橋本航汰氏、高橋匡彬氏、神田知輝氏に心から感謝いたします。

最後に本研究の遂行に当たっては家族の終始変わらぬ温かい励ましが有ったことを記し、感謝いたします。