

自由曲面光学素子の非接触高精度形状計測技術に関する調査研究

増田秀征*

(2024年2月29日受理)

Research on High-Precision Measurement Techniques for Freeform Optical Surfaces

MASUDA Shusei

Abstract

The advancement of various optical systems has made high-precision profile measurement technology for freeform optical surfaces increasingly important. However, in the field where uncertainty of 100 nm or less is required, no established standard method currently exists, which limits the adoption of high-precision freeform optical elements. Therefore, in this survey, we aim to establish a standard method for non-contact profile measurement of freeform surfaces as a future goal and the current state of the field is investigated. Based on the findings, we outline the future direction of National Metrology Institute of Japan.

1. 序論

光学的な機能性を持った表面、いわゆる光学表面を積極的に利用することで、人類は現代文明を築き上げてきた。水鏡等の自然物に始まり、大量生産された金属鏡やガラスレンズは今ではありふれたものとなり、高度な光学表面は産業製品の生産に欠かせない要素となっている。特に平面や球面などの幾何学的に単純な光学表面は設計・生産において扱いやすく、最も広く利用されてきた。一方で昨今では、より複雑で非球面式により表される“非球面 (aspherical surface)”や、さらに一般的な形状を表す“自由曲面 (freeform surface)”と呼ばれる光学表面が積極的に用いられるようになってきている。

非球面及び自由曲面光学素子の利点には以下が挙げられる¹⁾⁻³⁾。

- ① 優れた収差補正能力
- ② 光学システムの省部品、小型化
- ③ 新たな機能性の発現

例えば、①と②のような利点により、球面レンズにおいて生じるザイデルの収差⁴⁾に代表される各収差を、少

* 工学計測標準研究部門 長さ標準研究グループ

数の光学素子で補正することが可能であり、省スペースで優れた能力を発揮するレンズを設計することができる。

上記に挙げたような利点を活かして、様々な応用が図られている。特に自由曲面に限定し、その応用を非画像用途と画像用途の二つに整理すると以下ようになる。

非画像用途としては、ビームの集光・整形や照明の高機能化等が挙げられる。特に屈折型光学素子による集光が材料的に難しいX線^{5),6)}やExtreme UltraViolet lithography (EUV)⁷⁾等の短波長光源が用いられる領域では、自由曲面反射型光学素子による集光が行われる。また、集光型太陽光発電では、放物面を用いた集光器が利用されている⁸⁾。道路照明や自動車ヘッドライトにおいても、高効率化のために自由曲面を用いた照明整形技術が用いられている⁹⁾。

画像用途としては、自動車フロントガラスに投影する際の収差補正機能を持ったヘッドアップディスプレイ¹⁰⁾や、反射型望遠鏡のオフ軸分割鏡¹¹⁾、オフ軸反射型短焦点プロジェクタ¹²⁾、個人に合わせた収差補正を持つ眼内レンズ¹³⁾、ヘッドマウントディスプレイ等へ利用される回転や平行移動により省スペースで可変焦点距離を実現する Alvarez lens¹⁴⁾など、広範な領域で用いられている。

このような光学素子の自由曲面形状は下記のような工程によりつくられる。

まず、設計においては、Zernike 多項式などの関数表現や離散表現を通して、ソフトウェア的な解析を行うことで、機能性の探索及び最適化が行われる²⁾。

製造においては、高精度な自由曲面はシングルポイントダイヤモンドターニング¹⁵⁾や磁性流体研磨¹⁶⁾、イオンビーム研磨¹⁷⁾等により加工が実現される。いずれもいわゆる deterministic な加工であり、加工レートと加工時間を重畳計算し、最終的な形状に近づけていく。この製造工程においては、加工された対象の形状を測定し設計形状との差を削っていく、修正研磨が行われる。つまり、このプロセスは測定と加工によるクローズドループからなり、最終的な形状の実現精度は測定精度に依存する。加工については昨今の技術的進歩により原子レベルの加工量制御が可能になってきているが、測定をこのレベルで行うことは難しいために、自由曲面形状の製造において形状計測技術はキーになる。

自由曲面形状計測の難しさは以下のような事情に依る。

球面や平面と比べて複雑な形状であり、頻繁に用いられるものとして非球面がある。これは下式で表せる。

$$z(r) = \frac{\rho r^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)(\rho r)^2}} + \sum_{i=2}^n A_{2i} r^{2i} \quad (1)$$

ただし、 z はサグ量、 r は中心軸からの距離、 ρ は近軸曲率、 A_n は非球面高次係数である。この式で $k = A_n = 0$ とすればパラメータが一つとなり球面となる。自由曲面でもこれと同様に複数のパラメータで設計形状が構成される。ここで、光学系による結像を行う場合を考える。球面による光学系を用いるときには、ただ一つのパラメータである曲率半径の設計形状からのずれによる影響は、アライメントにより調整できるため実用上問題となく、よって、球面成分を除いた表面の凹凸成分が主な測定対象となり、これは後述する干渉計等により比較的容易に測定可能である。一方で自由曲面の場合、上記の非球面と同様にパラメータが複数存在し、所望の光学性能を発揮するためには、曲率半径等のパラメータを含む絶対形状が重要となる。このように自由曲面については、表面の凹凸のみならず絶対形状に着目する必要があるため、要求される高精度計測（以降、特に言及のない場合は絶対形状の精度を本報告では議論の対象とする）は、平面や球面などの単純形状の場合と比べ、はるかに難しくなる。

昨今では、特に EUV や放射光応用、望遠鏡といった

分野で、自由曲面形状計測について数十 nm オーダの精度が要求されている。しかし、後述するような各測定手法の原理に基づく種々の不確かさ要因に依り、これを達成する測定手法は筆者の知る限り確立されていない。各測定手法によって何らかの測定結果が得られるものの、その確からしさについては不明瞭であるのが現状である。

高精度で信頼性の高い自由曲面形状計測技術の未確立は自由曲面光学素子が用いられる産業・学術領域における応用での機能不全・信頼性の低下につながる。このような課題に対して、欧州の国家計量標準機関 (National Metrology Institute :NMI) による連合体である European Association of National Metrology Institutes (EURAMET) では複雑な自由曲面光学素子の測定能力の向上を目標として、測定手法の高精度化や SI トレーサビリティの確保などの取り組みを行っている¹⁸⁾。各測定手法による測定結果を適切に評価する上で SI トレーサビリティの確保は重要である。このように自由曲面形状計測の高度化は世界的にも重要な課題として認識されている。

我が国の NMI たる立場としては、産業競争力及び学術研究の強化のために高精度自由曲面形状計測における信頼性を確保し、標準を供給することが重要であると考える。

よって、本報告ではその足掛かりとして、自由曲面光学素子の高精度計測技術について、その概要と課題、研究動向を提示する。高精度な光学素子に関しては、測定対象の損傷を避けるため接触測定できず、非接触測定が要求されることが多いため、特に非接触計測技術に着目する。一方で参考のために接触計測についても触れる。測定精度、適用可能曲面、トレーサビリティ、スループットといった点に着目し、整理する。自由曲面形状は一般に、フレネルレンズやマイクロレンズアレイなどの非連続的なものも包括するが、ここではより一般的な、なめらかで連続的なものに対象を限定して議論する。

2. 高精度自由曲面形状計測技術

高精度な自由曲面形状計測については、多様な原理に基づきそれぞれ異なる特性を持つ測定手法が提案され、アプリケーションに応じて使い分けがなされている。本節ではこれらの手法の原理及び特性を整理する。

些か恣意的ではあるが、これらは一括面計測と点計測に基づくものに大別される。全般として、前者はスループットに優れ、後者は測定可能な形状についての制約が

厳しくない点で優れるといった傾向が見られる。

2.1 一括面計測に基づくもの

一括面計測で最も代表的なものは干渉計である。これは形状が既知の参照面と測定対象面との差分を、光路長さに基づく干渉縞の位相から測定するものである。

特にフィゾー干渉計と呼ばれる構成では、非共通光路の最小化により外乱を抑制し、高精度な測定を行うことが可能である¹⁹⁾⁻²¹⁾。典型的なフィゾー干渉計を図1に示した。産業技術総合研究所計量標準総合センター (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology/ National Metrology Institute of Japan :AIST/NMIJ) においてもフィゾー干渉計は平面度標準として運用されており、直径 300 mm 以下の光学平面に対して 10 nm の拡張不確かさ ($k = 2$) で平面度の標準供給を行っている²²⁾ (図2)。このように極めて高精度な測定が可能であるフィゾー型干渉計であるが、いくつか制約も存在している。まず、参照面との差分を測定するという原理上、最終的な測定精度が参照面の精度に制限を受けることである。参照面の形状偏差は直接的な誤差となる。また、典型的なフィゾー干渉計によって測定できる自由曲面は単純形状からの差分が波長オーダーであるものに限定される。これは、単純形状以外では高精度な参照面の作成・測定が困難であり、測定対象面との差分が大きい場合には干渉縞の位相測定が不可能になるためである。さらに典型的なフィゾー干渉計では、形状の中で曲率半径に相当するパラメータを測定することが難しい

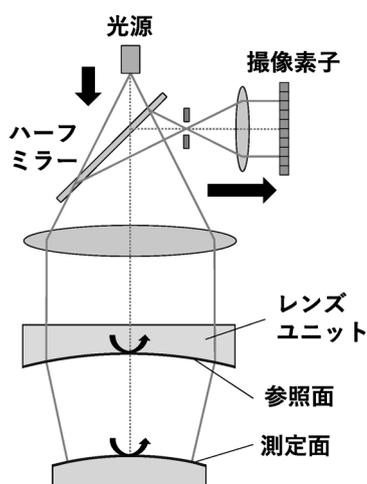


図1 フィゾー干渉計の模式図

参照面と測定面からの反射光により干渉縞画像が得られ、これの位相計測により形状計測を行う。

²⁴⁾ 入射波面が測定対象面と一致するように測定対象物を設置したときの参照面と測定面との距離が分からないためである。この意味で、典型的なフィゾー干渉計では測定対象面の絶対形状を測定することができない。

このようなフィゾー干渉計のデメリットを補う形で、いくつか派生的なものが提案されている。その一つのア



図2 AIST/NMIJ の超高精度大口径平面度干渉計
300 mm の範囲に対して測定不確かさ 10 nm ($k = 2$) の精度で平面度の絶対校正を行う。

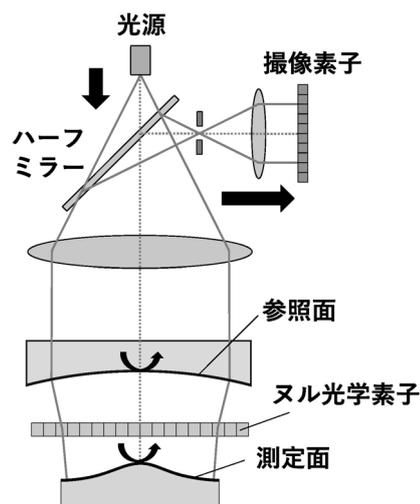


図3 ヌル光学素子を用いたフィゾー干渉計の模式図

CGH などのヌル光学素子により、測定面に合致するように参照面からの波面を修正する。これにより解像可能な干渉縞画像が得られる。

プローチがヌル光学素子の利用である。図3に示すようにフィゾー干渉計の参照面を通った光の波面をヌル光学素子によって測定対象面に合致させることで、複雑な形状に対しても位相測定可能な干渉縞が得られる。このとき用いられるヌル光学素子としては、ヌルレンズ²⁵⁾やComputer Generated Hologram (CGH)²⁶⁾²⁷⁾がある。これらは製造にかかる費用的・時間的コストが大きいこと、複雑なアラインメントが必要であることがデメリットとなる。また、ヌル光学素子の製作精度は測定に直接的な影響を与え、精度低下につながる。プリズムペアや可変ミラー、液晶等による可変なヌル光学素子を用いて費用的・時間的コストを削減する例²⁸⁾⁻³⁰⁾もあるが、測定精度については依然として問題となる。

これとは異なるアプローチとしてステッチング干渉計³¹⁾⁻³³⁾と呼ばれるものがある。特にQED社のASI(Q)³⁴⁾が産業界でよく用いられている。この原理を図4に示した。この手法では、測定対象面全体をいくつかの領域(サブアパーチャ)に分割し、干渉計に対して試料を動かすことで、サブアパーチャ内でそれぞれ干渉計測を行う。このとき、サブアパーチャ内では干渉縞の位相変化が測定可能な範囲に収まるよう、分割を行う。また、各サブアパーチャは共有部分を持つよう設定される。この共有部分を用いて各サブアパーチャを接続するステッチング処理により、測定対象面全体が再構成される。これにより、自由曲面測定可能な干渉計となる。一方で、ステッチング処理による誤差が対象面全体で累積してしまうことにより精度低下が避けられず、その評価も難しい。大阪大学では放射光ミラー用にRADSI (Relative Angle Determinable Stitching

Interferometer) と呼ばれるステッチング干渉計^{35),36)}が開発されている。この手法では、測定対象ミラーの隣に平面参照ミラーを設置し、これらを同時に傾けることで測定試料全域の測定を行う。このとき平面ミラーの傾斜角を用いてステッチング処理を行うことで、ステッチングによる誤差を低減し、測定精度を向上させている。また、Zygo社のVerifire Asphere+³⁷⁾のような、測定対象を光軸方向に走査し同心円状の領域でステッチング処理を行う干渉計³⁸⁾⁻⁴⁰⁾も提案されている。この原理を図5に示した。測定対象面を参照波面と垂直に走査するとき、特定の領域(回転対称性のある形状に対しては環状領域)で参照波面と測定対象面が一致し、この領域では位相測定可能な干渉縞が得られる。これにより得られた複数の領域での干渉縞画像を再構成することで対象面全体が得られる。このとき、光軸方向の試料走査量を測定することで幾何学的な再構成が可能となり、共有領域によるステッチング処理と比較して、誤差の累積を低減できる点で有利である。また、光軸方向の走査量情報の追加により、曲率半径を含めた絶対形状の測定が可能となる。一方で基本的に回転対称性のある対象のみ測定可能であり、自由曲面の測定時には特有のアーティファクトの発生が報告されている⁴¹⁾。

2.2 点計測に基づくもの

点計測に基づくものでは、試料上でプローブをスキャンし、このとき得られる情報から面全体のプロファイル測定する。

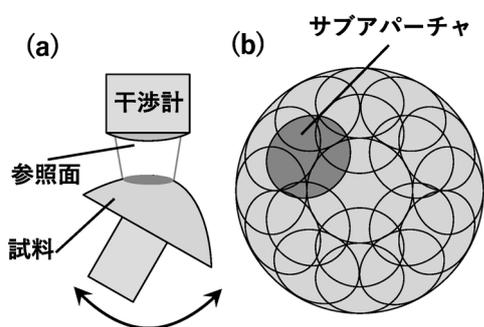


図4 ステッチング干渉計による測定原理
(a) 測定の模式図 (b) サブアパーチャ分割の例
測定領域をサブアパーチャに分割し、それぞれで干渉計測を行い、それらの重複領域を用いてステッチング処理を行う。

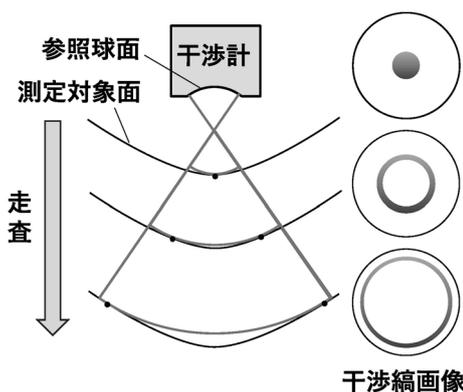


図5 光軸垂直走査によるステッチングの原理図
光軸に対して垂直に測定対象面を走査するとき、特定の領域(回転対称性のある形状に対しては環状領域)で参照球面波と測定対象面が一致し、解像可能な干渉縞が得られる(図右側の干渉縞画像)。これらの干渉縞画像を、走査量の情報を用いて幾何学的にステッチングする。

点計測に基づくものとして、まず接触式の測定機、特に μ -CMM (μ -Coordinate Measuring Machine) と呼ばれるもの^{42)~44)}を挙げる。AIST/NMIJで保有する μ -CMM (パナソニックプロダクションエンジニアリング社, UA3P-4000⁴⁵⁾)の模式図を図6に示した。これは三軸の走査機構を備え、それぞれの軸における走査量はアッペの原理に即した形でレーザ干渉計を用いて測定される。また、低接触力 (0.3 mN 程度) なプローブを備え⁴⁶⁾、これにより接触検出を行う。このような μ -CMM は測定可能な形状や材質に対する制約が緩く、複雑な形状に対しても適用可能なことから産業界において頻繁に

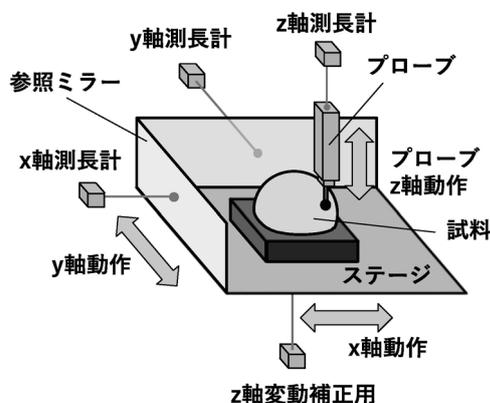


図6 μ -CMMの原理図
文献⁴⁶⁾より引用、一部改変。それぞれの動作軸には測長計が備えられており、参照ミラーを用いて各軸走査量をトラッキングする。低接触力のプローブにより、点計測を行う。

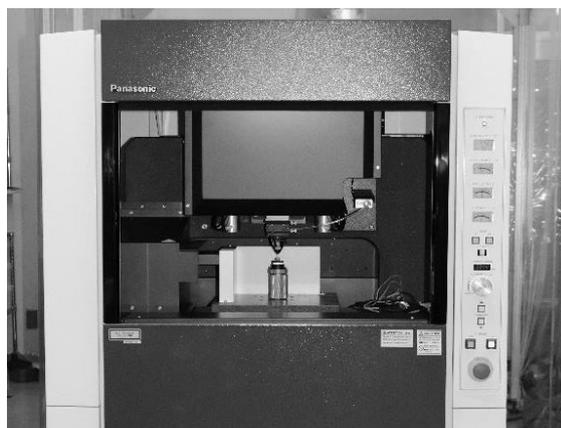


図7 μ -CMM (UA3P-4000)の装置写真
AIST/NMIJで運用されているもの。100 mm × 100 mm × 35 mmの範囲を100 nm程度の拡張不確かさ ($k = 2$)で測定可能。

利用される。AIST/NMIJにおいても複雑な形状にも適用可能な高精度な三次元座標測定機として活用されている (図7)。一方で、微小な接触力とはいえ接触測定であることから、対象面に損傷を与える可能性があり、傷付きやすい対象物には向かない。また、プローブ校正の不確かさの影響が大きく、形状測定の拡張不確かさは100 nm程度に留まる⁴⁷⁾。

次に非接触距離センサによる点計測を行うものについて述べる。これは、変位量を追跡可能な駆動軸と測定対象物との距離を検知するセンサプローブからなっており、センサ方式は干渉方式⁴⁸⁾、コンフォーカル方式⁴⁹⁾、クロマチックコンフォーカル方式^{50),51)}、オートフォーカス方式⁵²⁾など多岐にわたる。高精度な装置として代表的なものにアメテック社のLUPHOScan^{53),54)}やTNO (Netherlands Organisation for Applied Scientific Research)のNanomefos⁴⁹⁾、Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE)が開発した測定機⁵⁵⁾等がある。図8にLUPHOScanの模式図を示した。プローブは多波長干渉計による測距センサであり、プローブからのビームを測定対象面に対して垂直に入射させ面上で走査することで、形状測定を行う。このとき、並進二軸、回転二軸の四軸で走査を行うが、アッペの原理に基づく測長軸を設け各参照ミラーとの間の変位量を測定することで高精度な形状測定が可能となる⁵⁴⁾。このような手法では、自由曲面を非接触測定可能であるものの、形状測

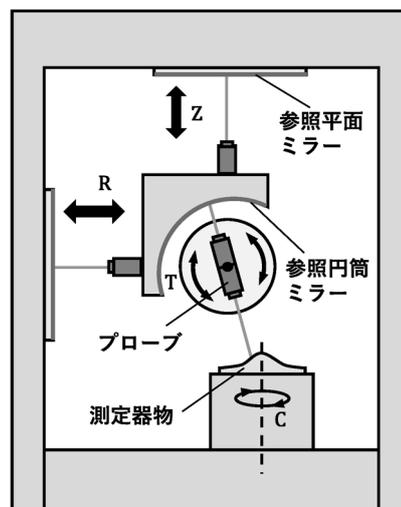


図8 LUPHOScanの模式図
文献⁵⁷⁾より引用、一部改変。測長プローブからのビームを測定器物に垂直に入射するよう駆動軸を走査し、三次元計測を行う。

定の不確かさは、参照ミラーの形状や各軸の直交度などに依存し、100 nm 以上の拡張不確かさとなる⁵⁶⁾。また、センシング方式に応じて測定可能な形状や材質に制限がある。

これらと異なる点計測の原理を持つものとして、Deflectometry と呼ばれる手法が存在する⁵⁷⁾⁻⁵⁹⁾。これは測定対象面の局所角度分布を基に測定を行う手法である。特にオートコリメータと走査機構を用いた高精度なものについて (Phase Measuring Deflectometry (PMD) と呼ばれる縞画像を測定対象面に投影する測定法⁶⁰⁾とは区別する)、その原理を図9に示した。オートコリメータのビームをペンタミラーにより測定対象面に対して入射させる。このときの反射光の角度 (局所角度 θ_i) をオートコリメータによって測定する。次にペンタミラーを走査し、異なる位置で局所角度 θ_{i+1} を測定する。ここでペンタミラーの幾何学的性質を利用することで、局所角度測定に影響を与える、走査時のピッチングエラーを低減することができる。このとき測定対象の形状は下式に従って逐次的に求められる⁶¹⁾。

$$h(x_{i+1}) = h(x_i) + (x_{i+1} - x_i)(\theta_{i+1} + \theta_i)/2 \quad (2)$$

ここで、 $h(x_i)$ は位置 x_i での測定対象面の高さである。ただし、このときの $h(x_i)$ は測定対象面全体の傾きを含むため、直線成分を差し引いて形状とする。この手法では、自由曲面の絶対形状を測定可能である。また、参照面を用いないため、参照面による精度制約が存在せず、精度向上に寄与する。さらに光の直進性に依拠して、シ

ンプルな角度測定と変位測定のみから形状測定を行うため、トレーサビリティを取りやすい。

AIST/NMIJ でも SDP (Scanning Deflectometry Profiler) と呼ばれる測定装置を開発しており^{61),62)}、1050 mm 以下の器物に対して拡張不確かさ 5 nm という極めて高い精度で真直度標準の供給を行っている⁶³⁾ (図10)。一方でオートコリメータの角度ダイナミックレンジに依存して測定角度範囲が実質的に千秒程度に制限されることにより、適用可能な形状は平面に近いものに限定される。また、オートコリメータの光軸方向にペンタミラーを一軸走査し局所角度分布を測定するため、対象面の3次元的な形状を測定するためには試料の複数ラインの形状を取得する必要がある。このためには試料駆動軸の追加、各ラインデータの結合アルゴリズムなどが必要である。このような性質から、Deflectometry は比較的大型で曲率半径の大きい曲面や、光学参照面として用いられる高精度な平面等の計測においての利用が主である。特に放射光の集光用ミラーの測定においては頻繁に用いられ、各国の放射光施設において積極的に研究・開発が行われている⁶⁴⁾⁻⁶⁶⁾。

3. 自由曲面形状計測技術における課題

前節で代表的な高精度自由曲面形状計測技術を紹介したが、ここまで見てきたように、それぞれ課題を抱えている。本節では自由曲面形状計測全般についての課題について述べる。

まず、測定の信頼性についての課題が挙げられる。現

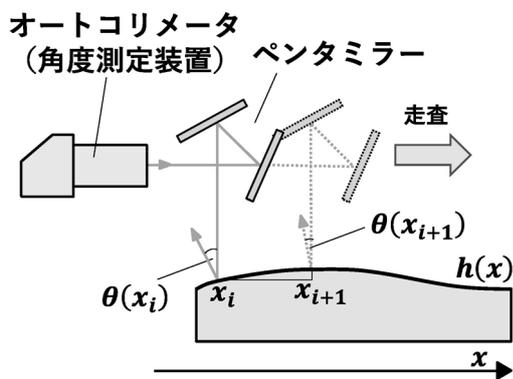


図9 Deflectometry の模式図
オートコリメータにより測定対象面の局所角度分布を取得し、積分処理により形状を再構成する。このときペンタミラーを走査することで、走査ステージのピッチング誤差の影響を低減している。

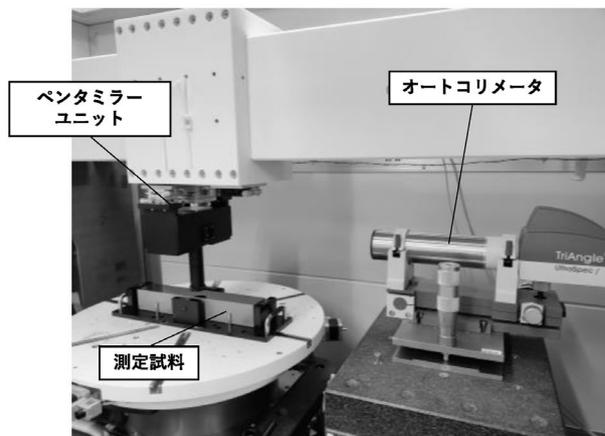


図10 AIST/NMIJ で開発された Deflectometry 装置
50 mm 以上 1050 mm 以下までの範囲で拡張不確かさ ($k = 2$) 5.0 nm で真直度の標準供給を行っている。

状、用途に応じて種々の測定手法が用いられていることは先に述べた。特に自由曲面に対して用いられるような比較的複雑な測定手法に対しては不確かさ評価が難しく、トレーサビリティの確保も容易ではない⁶⁷⁾⁻⁶⁹⁾。このため、複数の測定手法により同一の器物を測定し、測定結果によって合意を取るといったことが行われる。問題はこれらによる測定結果が、特に100 nm以下の領域において、必ずしもよく一致しないことである⁷⁰⁾。このような測定結果の信頼性の不足は高精度な自由曲面光学素子の実現におけるボトルネックとなっている。よって、信頼性の高い高精度自由曲面計測技術を確立することが重要である。

二つ目に、自由曲面形状計測においては、測定精度（特に絶対形状測定精度）と測定可能形状に対する制約、測定のスループットの間トレードオフが存在している。例えば、フィゾー干渉計では、測定精度（ただし球面成分を除く）と測定スループットに優れるが、測定可能形状は限定的である。ヌル光学素子の追加や駆動機構を加えたスティッチング処理を行えば、測定可能形状の制約は改善するが、測定精度及び測定スループットは低下する。点計測に基づくものでは、対象の自由度は高いが、全体としてスループットに劣り、形状測定の精度についても駆動軸やプローブによる影響で拡張不確かさ100 nmを超えるものが多い。局所角度測定に基づくものでは、高精度な測定が可能であるが、測定可能形状の制約が大きい。現状では、このような関係を考慮した測定手法の選択が行われており、技術開発によるトレードオフの緩和が課題である。

三つ目に、多くの手法では参照面を用いた測定を行っているために、最終精度が参照面の精度に依存することである。参照面は、干渉計であれば直接的に、点計測に基づく手法であれば駆動軸の変位計測に用いられ測定結果に影響を及ぼす。このため参照面の絶対形状を十分な精度で保証する必要がある。フィゾー干渉計においては、例えばAIST/NMIJでは、三枚合わせ法²³⁾と呼ばれる自己校正法で参照面の絶対形状を担保することで高精度測定を実現している。一方で三枚合わせ法は重力たわみによる影響を排除できず、また、実施においては高度な手順が要求される。一般的に、いずれの手法においても高精度な測定を実現するにあたっては、設置方法や重力たわみの影響まで踏まえて、参照面による影響を低減する必要がある。

ここで挙げたような三つの課題は自由曲面形状計測におけるハードルとなっている。

4. 自由曲面形状計測の研究動向

本節では、前節で提示した課題に関連して、自由曲面形状計測に関する取り組みと研究動向を紹介する。

4.1 測定手法の信頼性確保

光学表面の自由曲面形状計測においては、決定的な測定システムは存在せず、多様な原理に基づく測定手法が用いられている。この状況下では、それぞれの手法間で比較を行い、洞察を導くことが有効である。このために同一の測定サンプルを複数の手法や複数の実施機関によって測定した結果がいくつか報告されている^{67),70)-75)}。

このような比較を適切に行う際に重要なことは、まず試料の設計・製造である。比較に用いる測定器は一般的にそれぞれ測定可能な対象（サイズ、曲率半径、材料等）が異なるので、これに合わせて適切な設計が行われなければならない。また、比較時のアライメントのために方向を示すマーカーを付与する例もある。材料としては、汎用的なガラス材料やシリコンの他、低熱膨張材料によって作成することは比較において有利に働く。これは温度条件が異なる各機関においての熱膨張の影響が小さくなるためである。また、接触式の測定器を用いる際には接触力に対応した試料の剛性や硬さの確保、非接触式については光学センサの特性に対応する表面性状の選択が重要となる。

次に、データ分析の方法も重要である。一般に測定データの口径の調整、幾何学的なアライメント、外れ値の処理、多項式近似等が行われる。多項式近似は、低次の形状成分の抽出のために用いられ、既存の幾何光学的な収差（ザイデル収差）と親和性が高く、直交性のあるZernike多項式による近似がよく用いられる。また、フィゾー干渉計に代表されるような球面成分についての精度が他の形状成分に対して低いような手法を含む場合には、最適球面の減算などが行われる。最適球面の減算は、最小二乗法等により形状に対してフィットした球面成分を取り除くことで行われる。

具体的な比較についての取り組みとして、特にEMPIR 15SIB01: FreeFORMプロジェクト¹⁸⁾が挙げられる。このプロジェクトでは、ヨーロッパのNMIや研究所、大学、メーカー等を中心として、自由曲面形状計測に関する取り組みが行われ、いくつかのラウンドロビンテストによる比較が行われた。特にこのプロジェクトでは、顕名での比較結果の提示⁷¹⁾が行われているため、参考になる（このような比較ではステークホルダーに配慮して匿名で行うことも多い⁷⁶⁾）。ここでは行われた測

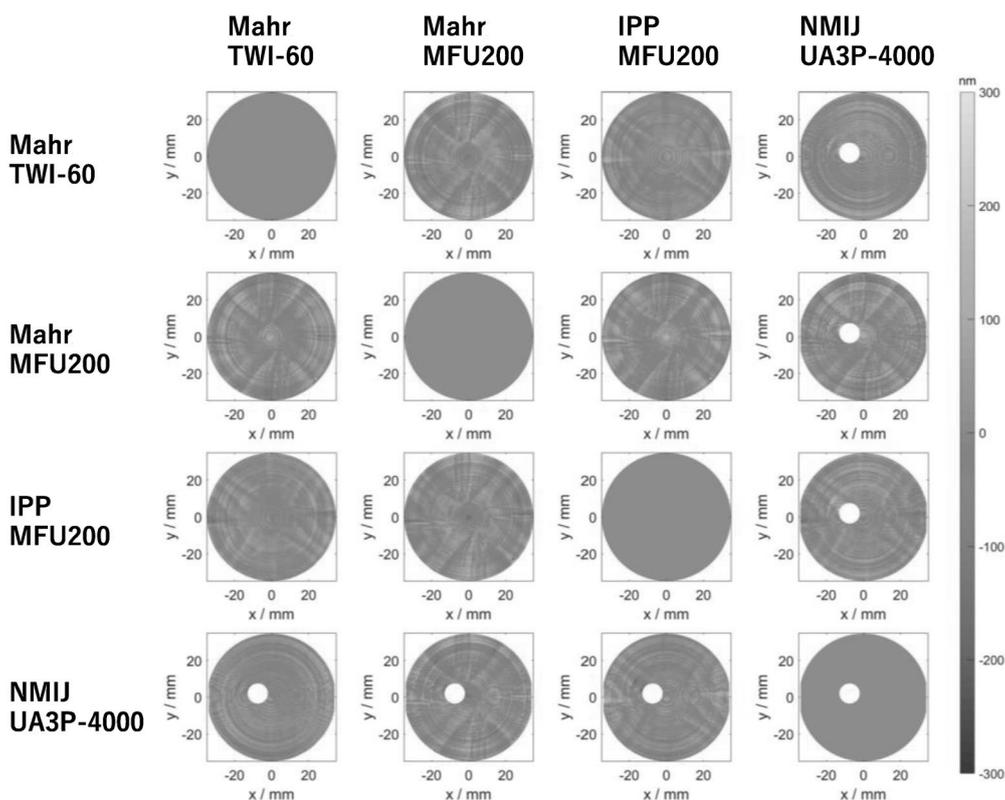


図 11 EMPIR FreeFORM プロジェクトによって行われたラウンドロビンテストの結果
文献¹⁸⁾より引用, 各行列に用いた機器名を追加. それぞれの結果は対応する行・列の測定器による測定結果の差分を示す. NMIJ/UA3P では白丸位置で移送時の損傷と推定される領域があり, マスクされている.

定のうちのひとつを見ていく. 図 11 に示したのは, 下式で表されるようなトロイダル面を測定した結果である.

$$z(x, y) = -\sqrt{(\sqrt{r_v^2 - y^2} + r_h - r_v)^2 - x^2} + r_h \quad (3)$$

ただし, $r_v = 400 \text{ mm}$, $r_h = 400 \text{ mm}$, 有効口径は直径 100 mm である. 測定は表 1 のような実施機関・測定器により行われた. それぞれの機器が持つ測定不確かさについては明示されてない. 図 11 に測定結果を示した.

ただし, データ解析において口径の調整, 設計形状の減算, 外れ値の処理, 最適球面の減算が行われている. これを見ればそれぞれの比較結果で特徴的なアーティファクトが観察され, 球面成分を除いても Peak-to-Valley (P-V) 値で最大 500 nm 程度の差分を示している. 差分の RMS 値は 43 nm から 53 nm となっている. また, 同一の機器 (MFU200) を使用している結果についても, 有意な差異がみられる. これについて著者らは機器の校正に用いられた器物による影響であると推察している. このように同様の測定器でも運用によって差異が生じる. これらの結果が示すように, 数十 nm の領域での自由曲面形状測定は困難であり, どの手法が正しい結果を示しているか判断することは難しい. これでは自由曲面光学素子の高精度化に向けた議論を展開することはできず, 信頼性が高く, 高精度な測定手法を確立することが必要である. また, その他の報告においても, マイクロメートルオーダーの差分を持った比較結果を提示しているものもあり⁷⁰⁾, 高度な技術を持った機関においても, 高精度な自由曲面形状計測は難しいことが窺える.

表 1 ラウンドロビン測定の実施機関及び測定器

	1	2	3	4
実施機関	Mahr	Mahr	IPP	NMIJ
測定器型番	TWI-60	MFU200	MFU200	UA3P-4000
測定器メーカー	Mahr	Mahr	Mahr	PPE※
測定手法	TWI	点計測 (光学センサ)	点計測 (光学センサ)	点計測 (接触プローブ)

※パナソニックプロダクションエンジニアリング

4.2 測定におけるトレードオフの緩和

自由曲面形状計測においては、測定精度・測定可能形状・スループットの間でトレードオフが成立しており、実用にあたっては、このトレードオフを勘案して手法を選択することが重要である。前述したように、ステッチング干渉計は通常のフィゾー干渉計と比較して、測定精度とスループットを下げるものの、測定可能形状が拡大することにより“使いやすい”測定手法となっており、自由曲面形状の計測ではよく用いられる。

このようなトレードオフを緩和しようという試みは多くあり、この中でも比較的新しい例を二つ紹介する。

まず、Tilted Wave Interferometer (TWI) と呼ばれる手法がある。この手法はシュトゥットガルト大学により提案され^{77),78)}、Mahr 社により TWI-60 として商用化され⁷⁹⁾、PTB でもこれが導入されている。特に、PTB では非球面及び自由曲面形状の非接触形状計測のための標準となる測定器としての開発が行われている⁶⁸⁾。この原理を図 12 に示した。マッハツェンダー干渉計がベースとなっており、BS2 によって分岐され、片方の腕が測定腕（直進側）、もう一方が参照腕（反射側）となっている。測定腕では、マイクロレンズアレイ (PSA) を通して、複数の点光源からの球面波がレンズにより平面波となって測定サンプル (SUT) に照射され、その反射光が参照光と合波され、撮像素子により干渉像が得られる。

このとき PSA 上の複数の点光源から SUT に対してそれぞれ異なる入射角で球面波が入射することとなるために、Tilted Wave Interferometer と呼ばれる。異なる入

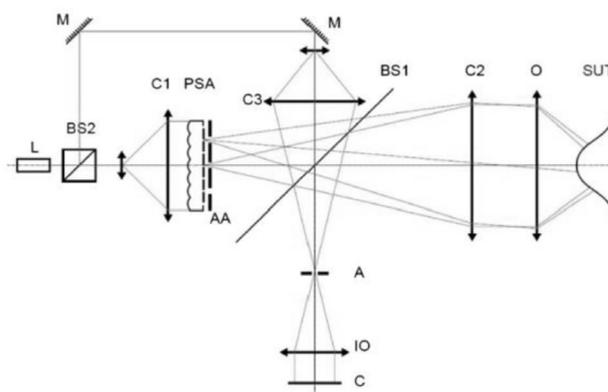


図 12 TWI の模式図

文献⁷⁵⁾より引用。測定光は、PSA によって異なる入射角を持った複数の点光源からのビームとして、試料 (T) に入射する。このときそれぞれのビームによる干渉縞が重ならないように、マスク (AA) によりひとつおきの点光源が用いられる。

CC BY 3.0 DEED Attribution 3.0 Unported License (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.ja>)
[DOI: 10.1117/1.OE.56.11.111713]

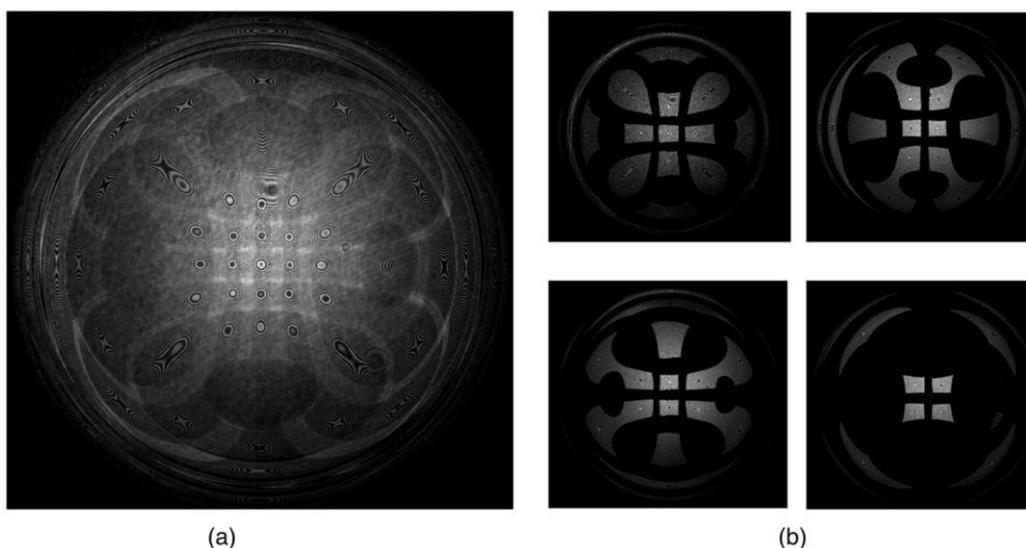


図 13 TWI による得られる干渉縞画像

文献⁷⁵⁾より引用。重なりを避けるために、マスクを四段階に分けてずらしながら撮影する (b)。最終的にこれらを統合した干渉縞画像 (a) を解析する。

CC BY 3.0 DEED Attribution 3.0 Unported License (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/deed.ja>)
[DOI: 10.1117/1.OE.56.11.111713]

射角を持って入射した光波はSUT内の波面が一致する位置で、解像可能な干渉像を生じることとなる。このとき密度の高い（解像不可能な）干渉像はアパーチャ（A）によりストップされる。これにより干渉像がパッチ状となって撮像素子に一括に表示される（図13）。ただし、パッチ同士の重なりを避けるため、PSA後のマスク（AA）でビームを遮断することにより、マイクロレンズアレイからの点光源を一つおきに用いる。そしてマスク全体を光軸に垂直な面内で4ステップの並進動作させることで4枚の画像を取得する。これによりマイクロレンズアレイからのすべての点光源によるパッチを得ることができる。これらを合成することでSUT全体の干渉縞を得ることができる。得られた干渉縞画像は、既知の面の測定により得られたキャリブレーションデータを元に解析され、最終的な形状が得られる。

この手法の利点として、精度に影響を与える走査機構を設けず、自由曲面形状を一括測定可能であることが挙げられる。通常、ステッチング干渉計では走査機構を設け、それぞれの位置で干渉像を取得するが、これは誤差の増大やスループットの低下を招く。一方で、TWIではマスクを動作させる機構があるものの、これは精度に影響を与えるものではない。また、この動作量も小さく比較的高速に駆動できる。これによって、精度・測定可能形状・スループット間のトレードオフを緩和する可能性がある。一方で欠点として、アライメント及び既知の面を利用した干渉計のキャリブレーションが複雑であり、精度保証が容易でないことが挙げられる。この過程では、複雑な逆問題を解く必要があり、複数のアルゴリズムが提案されている⁸⁰⁾。

Deflectometryの分野においても、トレードオフを緩和する取り組みが行われている。Deflectometryにおいて、特に重要なアプリケーションは放射光用ミラーの形状測定である。放射光領域においては、使いやすい屈折性材料がないことから、反射型の光学素子が専ら用いられ、これらの光学素子の形状は、機器の性能に直接的な影響を与える。このため、放射光施設及びNMIでは、極めて高精度（数nmオーダー）なDeflectometry装置の開発が行われてきた^{64),81)}。昨今では、開口数の増大による集光能力向上や洗練された自由曲面光学設計のために、より強く湾曲した表面形状が要求されている（ただし、mradオーダーであり、一般に言われる自由曲面形状に対しては湾曲の度合いは小さいことには留意する必要がある）。Deflectometryにおいては、高精度な角度測定装置であるオートコリメータが用いられるのが一般的であり、角度測定ダイナミックレンジについての制約

から、その測定範囲は数mradに限定される。これは、Deflectometryの測定可能角度範囲を直接的に制限することになる。つまり課題として、精度を維持したまま、角度測定範囲を拡大し測定可能形状を広げる必要があることが挙げられる。

この課題に対する取り組みがブルックヘブン国立研究所で行われている。この研究所は放射光施設を保有し、Deflectometryの初期構想であるLong Trace Profiler (LTP)を提案する⁸²⁾など、この分野で長期的に研究を続けている。新しい提案は測定試料を回転させ自己校正を行うものである^{83),84)}。この概念図を図14に示した。この系ではペンタミラー用いる代わりに二台のオートコリメータを用いて、走査ステージの傾きと試料の局所傾斜角度の測定を同時に行っている。試料はゴニオステージ上に設置されており、試料全体の角度を一走査ごとに少しずつ変更しながら、複数走査の測定を行う。ここで得られたデータは試料の局所角度、測定系の誤差、試料全体の角度変化を内包しているが、試料の局所角度分布は走査ごとに変化しないという前提のもとにそれぞれを分離することが可能である。これにより測定系の誤差の改善と測定角度範囲の改善（試料全体を回転させているので、一走査だけではオートコリメータの測定可能角度範囲外になってしまう局所角度が得られている）を一挙に行うことができるとしている。ただし、この手法では、形状の球面成分については自己校正を行うことができないこと、複数走査を実施する必要があり時間的コストが増大することが挙げられる。また、広がった測定角度範囲における精度検証は行われておらず、課題となっている。さらなる課題として、一定以上の曲率を持つ試料に

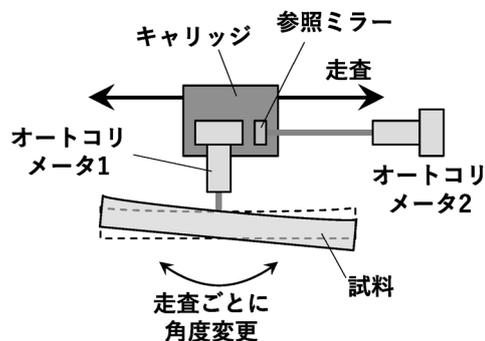


図14 試料回転による自己校正手法の概念図
試料下部のゴニオステージにより、走査ごとに試料全体の角度を変更する。得られた複数のデータから自己校正処理を行う。

対する測定を行う際には、測定対象の局所的な曲率による影響で反射光が収束・発散し、オートコリメータの受光面でのビームプロファイルが変化することで、オートコリメータの読み取りが不安定になることが挙げられている。

4.3 参照面による影響の低減

3章で述べたように、測定に際して参照面を用いるものでは、その影響を直接的に受け、その精度保証は、高精度計測を行う上での大きなハードルになっている。この影響を避けるために、角度計測を積極的に用いる手法が提案されている。この代表的なものが Deflectometry であり、参照面を用いず、ステージの変位と試料の局所角度のみから形状を求めることが可能である。しかし、Deflectometry は高精度ではあるものの、直線走査が基本であり、三次元計測への展開には課題が残る。

角度計測に基づき三次元計測を行うものとして、大阪大学により Nano-profiler が提案されている^{85),86)}。この原理を図 15 に示した。これはレーザーヘッド、ビームスプリッタ、Quadrant Photo Diode (QPD) からなる光学ユニットと測定試料を設置した試料ユニットを、光源と光学的に同等な位置にある QPD の中心に試料からの反射光が照射されるように、二軸二組のゴニオステージにより駆動する。これにより、ゴニオステージのロータリエンコーダによる角度情報から、試料上の測定点の法

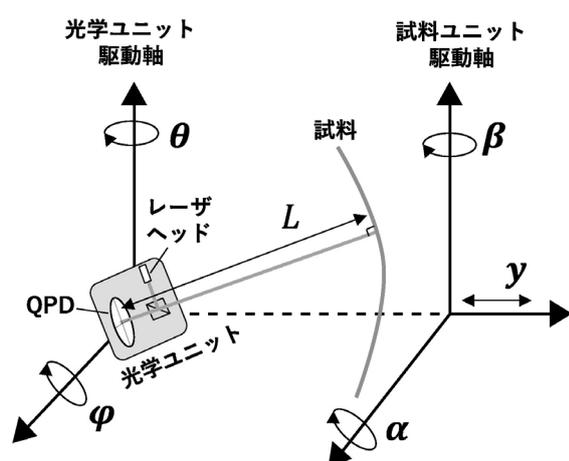


図 15 Nano-profiler の原理図

光学ユニットは θ 及び φ 、試料ユニットは α 、 β 及び y の駆動軸を持つ。これら二軸二組のゴニオと並進ステージを協調動作させ、試料の法線ベクトル分布を得る。

線ベクトルが一意に決まる。さらに試料ユニットの並進ステージにより、図中の L が一定となるよう調整すれば、測定点座標が求められる。このような測定を測定領域全体で行い、幾何学的な解析を行うことで、試料の表面形状が得られる。これにより、サブナノメートルの繰り返し性が得られ、曲率半径 100 mm のシリンダカルミラーに対して形状測定の不確かさを 50 nm 以下としている⁸⁷⁾。一方でこのときの不確かさの支配的要因は、 L の絶対長の決定にあり、課題となっている。

この手法では、角度と長さに基づいた幾何学的な解析のみから三次元計測が可能であり、高精度な参照面を必要としないことが干渉計などの他手法と比較して大きな優位性となっている。

5. 総括と今後の展開

自由曲面形状計測について、数十 nm オーダの精度を持つ測定手法が求められているが、その領域で標準となる手法は存在しておらず、多様な原理に基づく手法がアプリケーションに応じて採用されている。一方で、各測定手法の結果は必ずしも一致せず、信頼性確保は十分ではない。そこで本報告では、自由曲面形状の高精度計測技術について調査を行い、その原理・特性及び研究動向を示した。特に現状の自由曲面形状計測では、信頼性の高い手法の未確立、測定精度・測定可能形状・スループット間のトレードオフ、参照面の利用による影響が大きな課題として挙げられる。

AIST/NMIJ としては、上記の課題を改善できるような測定手法の開発を目指している。特に短期的には、Deflectometry を発展させる形で角度測定に基づく表面形状計測システムの開発することが有望であると考えている。これは当該手法がシンプルな角度・長さ測定に基づくために、トレーサビリティの確保が容易であり、また参照面を用いないことに優位性があるためである。ただし、特に Deflectometry で課題となっている測定可能形状に関する制約（角度測定ダイナミックレンジの制限）については、AIST/NMIJ の保有する長さ標準・角度標準技術を用いてブレイクスルーを目指す。

中長期的には、自由曲面形状計測の標準となるような測定手法の確立を目指す。一方で、すべての応用領域で優れた特性を持つような測定手法を開発することは難しい。そこで、評価用の測定器物を通して開発した手法と他手法との比較を行うことで、他手法の信頼性を確保し、それぞれの特性を活用しながら、あらゆる領域での高信頼性の計測を実現する。このためには適切な測定器物の

設定, 統一的な評価などが重要となり, 4.1. で挙げたような取り組みはこの指針となる。

上記のような自由曲面形状計測の標準の確立を通して, 自由曲面光学素子の高度化に寄与し, 産業界への貢献を目指す。

謝辞

本調査研究を行うにあたり, 尾藤洋一工学計測標準研究部門副部門長ならびに平井亜紀子長さ標準研究グループ長, 近藤余範主任研究員, 長さ標準・幾何標準研究グループの皆様にご助言を頂きました。謹んで御礼申し上げます。

参考文献

- 1) F. Z. Fang, X. D. Zhang, A. Weckenmann, G. X. Zhang and C. Evans. *CIRP Annals*, 62, 823 (2013).
- 2) J. Ye, L. Chen, X. Li, Q. Yuan and Z. Gao. *Optical Engineering*, 56, 1 (2017).
- 3) S. Kumar, Z. Tong and X. Jiang. *International Journal of Extreme Manufacturing*, 4, 1 (2022).
- 4) 高辻利之, 尾藤洋一, 大澤尊光, 古谷涼秋. 精密工学会誌, 72, 1368 (2006).
- 5) R. Kodama, N. Ikeda, Y. Kato, Y. Katori, T. Iwai and K. Takeshi. *Optics Letters*, 21, 1321 (1996).
- 6) R. L. Owen, J. Juanhuix and M. Fuchs. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 602, 21 (2016).
- 7) H. J. Levinson. *Japanese Journal of Applied Physics*, 61, 1 (2022).
- 8) K. H. Kumar, A. M. Daabo, M. K. Karmakar and H. Hirani. *Environmental Science and Pollution Research*, 29, 32335 (2022).
- 9) Z. Feng, Y. Luo and Y. Han. *Optics Express*, 18, 22020 (2010).
- 10) L. Wei, Y. Li, J. Jing, L. Feng and J. Zhou. *Optics Express*, 26, 8550 (2018).
- 11) W. Jahn, M. Ferrari and E. Hugot. *Optica*, 4, 1188 (2017).
- 12) B. Yu, Z. Tian, D. Su, Y. Sui and H. Yang. *Applied Optics*, 58, 3575 (2019).
- 13) A. Speck, B. Zelzer, M. Kannengießer, A. Langenbucher and T. Eppig. *Applied Optics*, 52, 4279 (2013).
- 14) A. Wilson and H. Hua. *Optics Express*, 27, 15627 (2019).
- 15) Z. Shen, J. Yu, Z. Song, L. Chen, Q. Yuan, Z. Gao, S. Pei, B. Liu and J. Ye. *Applied Optics*, 58, 2269 (2019).
- 16) 関口修利, Maloney C., Dumas P. 精密工学会誌, 84, 498 (2018).
- 17) N. I. Chkhalo, I. A. Kaskov, I. V. Malyshev, M. S. Mikhaylenko, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. N. Toropov and I. G. Zabrodin. *Precision Engineering*, 48, 338 (2017).
- 18) EURAMET. Reference algorithms and metrology on aspherical and freeform lenses. https://www.euramet.org/research-innovation/search-research-projects/details/?tx_eurametctcp_project%5bproject%5d=1423, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 19) P. J. De Groot. *Applied Optics*, 53, 4334 (2014).
- 20) J. David Briers. *Optics and Lasers in Engineering*, 32, 111 (1999).
- 21) B. (Bob) F. Oreb, D. I. Farrant, C. J. Walsh, G. Forbes and P. S. Fairman. *Applied Optics*, 39, 5161 (2000).
- 22) 計量標準総合センター長さ標準研究グループ. 長さ標準供給 平面度. <https://unit.aist.go.jp/riem/lgt-std/standard/flatness.html>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 23) 高辻利之, 尾藤洋一, 大澤尊光, 古谷涼秋. 精密工学会誌, 72, 1368 (2006).
- 24) J. Kredba, P. Psota, M. Stašik, V. Lédl, L. Veselý and J. Nečásek. *Optics Express*, 29, 12531 (2021).
- 25) N. I. Chkhalo, I. V. Malyshev, A. E. Pestov, V. N. Polkovnikov, N. N. Salashchenko, M. N. Toropov and A. A. Soloviev. *Applied Optics*, 55, 619 (2016).
- 26) J. C. Wyant. *Applied Optics*, 52, 1 (2013).
- 27) C. Zhao. *Proceedings of SPIE*, 11813, (2021).
- 28) C. Supranowitz, C. McFee and P. Murphy. *Proceedings of SPIE*, 8416, (2012).
- 29) L. Huang, H. Choi, W. Zhao, L. R. Graves and D. W. Kim. *Optics Letters*, 41, 5539 (2016).
- 30) S. Xue, S. Chen, G. Tie, Y. Tian, H. Hu, F. Shi, X. Peng and X. Xiao. *Optics Letters*, 44, 2294 (2019).
- 31) P. Murphy, G. Forbes, J. Fleig, P. Dumas and M. Tricard. *Optics & Photonics News*, 14, 38 (2003).
- 32) S. Chen, S. Li, Y. Dai and Z. Zheng. *Journal of the Optical Society of America A*, 23, 1219 (2006).
- 33) J. Peng, H. Xu, Y. Yu and M. Chen. *Measurement Science and Technology*, 26, 1 (2015).

- 34) QED. SSI METROLOGY ASI(Q). <https://qedmrf.com/ssi-metrology/asiq/>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 35) H. Mimura, H. Yumoto, S. Matsuyama, K. Yamamura, Y. Sano, K. Ueno, K. Endo, Y. Mori, M. Yabashi, K. Tamasaku, Y. Nishino, T. Ishikawa and K. Yamauchi. *Review of Scientific Instruments*, 76, 1 (2005).
- 36) T. Kimura, H. Ohashi, H. Mimura, D. Yamakawa, H. Yumoto, S. Matsuyama, T. Tsumura, H. Okada, T. Masunaga, Y. Senba, S. Goto, T. Ishikawa and K. Yamauchi. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 616, 229 (2010).
- 37) Zygo. Verifire™ Asphere+. <https://www.zygo.com/products/metrology-systems/laser-interferometers/verifire-asphere-plus>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 38) M. Kuechel. *Frontiers in Optics*, OFTuB5, (2006).
- 39) M. F. Küchel. *Proceedings of SPIE*, 738916, (2009).
- 40) Y. Wen, H. Cheng, H.-Y. Tam and D. Zhou. *Applied Optics*, 52, 5686 (2013).
- 41) T. Dresel, K. Khalsa, M. Turzhitsky, M. F. Fay and P. J. De Groot. *Proceedings of SPIE*, 11889, (2021).
- 42) K. Takamasu, S. Ozawa, T. Asano, A. Suzuki, R. Furutani and S. Ozono. *1996 The Japan - China Bilateral Symposium on Advanced Manufacturing Engineering*, 155 (1996).
- 43) 道畑正岐. 精密工学会誌, 88, 657 (2022).
- 44) 近藤余範. 精密工学会誌, 87, 939 (2021).
- 45) パナソニックプロダクションエンジニアリング. UA3P 超高精度三次元測定機. <https://www.panasonic.com/jp/company/ppe/ua3p/specification.html>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 46) 吉住恵一, 久保圭司, 竹内博之, 半田宏治, 葛西孝昭. 68, 361 (2002).
- 47) 川嶋なつみ. 産総研計量標準報告, 11, 97 (2023).
- 48) A. Beutler. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 4, 1 (2016).
- 49) R. Henselmans. Technische Universiteit Eindhoven, Ph.D.thesis (2009).
- 50) OPTIPRO. UltraSurf 5X 400 5-Axis Non-Contact Metrology System. <https://www.optipro.com/optical-measuring/ultrasurf-5x/>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 51) S. DeFisher, M. Bechtold and D. Mohring. *Proceedings of SPIE*, 8016, (2011).
- 52) 三浦勝弘, 松葉正, 塚本貴雄, 広瀬一, 古田島秀夫. 精密工学会誌, 81, 113 (2015).
- 53) TAYLOR HOBSON. LUPHOScan Non-contact Profilometers. <https://www.taylor-hobson.com/products/non-contact-3d-optical-profilers/luphos>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 54) 田中真一. 精密工学会誌, 85, 695 (2019).
- 55) H. Nourira, J.-A. Salgado, N. El-Hayek, S. Ducourtieux, A. Delvallée and N. Anwer. *Measurement Science and Technology*, 25, 1 (2014).
- 56) 工藤良太. 産総研計量標準報告, 10, 99 (2019).
- 57) G. Ehret, M. Schulz, M. Stavridis and C. Elster. *Measurement Science and Technology*, 23, 1 (2012).
- 58) F. Siewert. *AIP Conference Proceedings*, 705, 847 (2004).
- 59) Y. Senba, H. Kishimoto, H. Ohashi, H. Yumoto, T. Zeschke, F. Siewert, S. Goto and T. Ishikawa. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 616, 237 (2010).
- 60) Y. Xu, F. Gao and X. Jiang. *Photonix*, 1, 14 (2020).
- 61) Y. Bitou and Y. Kondo. *Measurement Science and Technology*, 25, 1 (2014).
- 62) Y. Bitou and Y. Kondo. *Applied Optics*, 55, 9282 (2016).
- 63) 計量標準総合センター長さ標準研究グループ. 長さ標準供給 真直度. <https://unit.aist.go.jp/riem/lgtstd/standard/straightness.html>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 64) S. G. Alcock, I. Nistea and K. Sawhney. *Review of Scientific Instruments*, 87, 1 (2016).
- 65) P. Pedreira, J. Nicolas, I. Šics, D. Heinis, A. Fontserè, A. Crisol and J. Campos. *Review of Scientific Instruments*, 90, 1 (2019).
- 66) V. V. Yashchuk, I. Lacey, K. Anderson, J. M. Dickert, B. V. Smith and P. Z. Takacs. *Proceedings of SPIE*, 11492, (2020).
- 67) I. Fortmeier, M. Schulz and R. Meeß. *Optical Engineering*, 58, 1 (2019).
- 68) I. Fortmeier, M. Stavridis, M. Schulz and C. Elster. *Measurement Science and Technology*, 33, 1 (2022).
- 69) J. Spichtinger, M. Schulz, G. Ehret and R. Tutsch. *Optical Engineering*, 61, 1 (2022).

- 70) K. Medicus, S. DeFisher, M. Bauza and P. Dumas. *Proceedings of SPIE*, 8884, (2013).
- 71) I. Fortmeier, R. Schachtschneider, V. Ledl, O. Matousek, J. Siepmann, A. Harsch, R. Beisswanger, Y. Bitou, Y. Kondo, M. Schulz and C. Elster. *Journal of the European Optical Society-Rapid Publications*, 16, 2 (2020).
- 72) R. H. Bergmans, H. J. Nieuwenkamp, G. J. P. Kok, G. Blobel, H. Noura, A. Küng, M. Baas, M. Tevoert, G. Baer and S. Stuerwald. *Measurement Science and Technology*, 26, 1 (2015).
- 73) A. Beutler. *Advanced Optical Technologies*, 5, 211 (2016).
- 74) C. Pruss, G. B. Baer, J. Schindler and W. Osten. *Optical Engineering*, 56, 1 (2017).
- 75) Y. Arezki, R. Su, V. Heikkinen, F. Leprete, P. Posta, Y. Bitou, C. Schober, C. Mehdi-Souzani, B. A. M. Alzahrani, X. Zhang, Y. Kondo, C. Pruss, V. Ledl, N. Anwer, M. L. Bouazizi, R. Leach and H. Noura. *Sensors*, 21, 1103 (2021).
- 76) R. Schachtschneider, I. Fortmeier, M. Stavridis, J. Asfour, G. Berger, R. B. Bergmann, A. Beutler, T. Blümel, H. Klawitter, K. Kubo, J. Liebl, F. Löffler, R. Meeß, C. Pruss, D. Ramm, M. Sandner, G. Schneider, M. Wendel, I. Widdershoven, *et al.* *Measurement Science and Technology*, 29, 1 (2018).
- 77) E. Garbusi, C. Pruss and W. Osten. *Optics Letters*, 33, 2973 (2008).
- 78) C. Schober, R. Beisswanger, A. Gronle, C. Pruss and W. Osten. *Light: Advanced Manufacturing*, 3, 1 (2022).
- 79) Mahr. Interferometric measurement of aspheric form deviation in under 30 seconds. <https://www.mahr.com/en-us/news-events/article-view/interferometric-measurement-of-aspheric-form-deviation-in-under-30-seconds>, Online; accessed 24 Jan. 2024.
- 80) I. Fortmeier, M. Stavridis, A. Wiegmann, M. Schulz, W. Osten and C. Elster. *Optics Express*, 22, 21313 (2014).
- 81) I. Lacey, R. D. Geckler, A. Just, F. Siewert, T. Arnold, H. Paetzelt, B. V. Smith and V. V. Yashchuk. *Review of Scientific Instruments*, 90, 021717 (2019).
- 82) P. Takacs, S. Qian and C. Jeffrey. *Proceedings of SPIE*, 0749, 59 (1987).
- 83) L. Huang, T. Wang, J. Nicolas, F. Polack, C. Zuo, K. Nakhoda and M. Idir. *Optics Express*, 28, 23060 (2020).
- 84) L. Huang, L. Lienhard, T. Wang, F. Polack, J. Nicolas, S. Hulbert and M. Idir. *Optics and Lasers in Engineering*, 162, 1 (2023).
- 85) R. Kudo, K. Okuda, K. Usuki, M. Nakano, K. Yamamura and K. Endo. *Review of Scientific Instruments*, 85, 1 (2014).
- 86) T. Miyawaki and K. Endo. *Review of Scientific Instruments*, 93, 1 (2022).
- 87) 宮脇崇. 大阪大学, 博士論文 (2023).