

自由曲面形状測定技術とその標準確立に関する調査研究

川嶋なつみ*

(2022年2月28日受理)

A survey on profile measurement for freeform surfaces

KAWASHIMA Natsumi

Abstract

The demand for high-accurate surface profile measurements of free-form better than several tens of nanometer is increasing with growth of free-form optical elements to aim high performance. Absolute surface profile is important for the performance of such elements with free-form surface profile. Micro-Coordinate Measuring Machine (μ -CMM) is promising for high-accurate absolute surface profile measurement of free-form; however, its measurement uncertainty is currently limited to about 100 nm. In this paper, uncertainty factors of μ -CMM are investigated and approaches of other institutes to reduce the uncertainty are reviewed. Then our approaches to reduce the major uncertainty factors are proposed. (98 words)

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイやX線集光ミラー、スマートフォンに搭載の組み合わせレンズ等の光学素子において、小型・軽量化、高性能化を狙った形状の複雑化が進んでいる。精密加工技術の発展に伴い、非球面・自由曲面形状を有する光学素子等の高精度三次元形状測定技術の確立が求められている¹⁾⁻⁷⁾。測定対象としては、ヘッドマウントディスプレイ⁸⁾⁻¹¹⁾やスマートフォンの組み合わせレンズ^{12),13)}のように、複雑形状でありながら数ミリメートルから十数ミリメートル角程度の小さなものから、X線集光ミラー¹⁴⁾⁻¹⁷⁾のような100 mmから1 m程度の大型の光学部品まで、幅広いスケールにおいて測定需要が存在している。そのため、数ミリメートルから数百ミリメートル程度の範囲を測定可能で、かつ数十ナノメートルより良い測定精度を有している測定技術が求められている。

また、これらの超精密光学素子が所望の性能を発揮するためには、設計通り加工されているか、絶対形状を測定して確認する必要がある。例えば、光学素子の一つで

ある非球面レンズ¹⁸⁾⁻²⁰⁾では、 s を光軸からの半径方向の距離とするとその表面形状 $Z(s)$ は、一般に、式(1)で表すことができる。

$$Z(s) = \frac{Cs^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)C^2s^2}} + \sum A_n s^n. \quad (1)$$

ここで、 C は曲率半径の逆数、 k は円錐定数、 A_n は非球面係数を示す。非球面レンズの光学特性を評価するためには、球面成分を表す曲率半径の逆数 C と、非球面成分を表す円錐定数 k 及び非球面係数 A_n を分けて評価する必要があると言われている²⁰⁾ことから、これらの値の絶対値、すなわち絶対形状測定が求められている。

高精度な表面形状測定が可能な代表的な三次元形状測定技術として干渉計²¹⁾⁻²⁴⁾が挙げられる。例えばフィゾー干渉計²⁵⁾⁻²⁸⁾は測定領域全面を一括して非接触で測定でき、かつ数十ナノメートル程度の測定精度を有している。しかし干渉計は、基準となる参照面と被測定面との間の光路差を測定する装置であるため、基準器参照面の形状から大きく逸脱しない単純偏差形状しか測定することができず、また、比較測定であるため基準器の絶対形状精度以上の測定精度は出ない。

* 工学計測標準研究部門 長さ標準研究グループ

そこで、非球面や自由曲面といった複雑形状に対して絶対測定が可能な接触式の三次元測定機 μ -CMM (micro-Coordinate Measuring Machine)^{29)–33)} が用いられるようになってきた。 μ -CMM はプローブを測定対象物に接触させ、被測定面上を走査させることで形状を測定する。接触測定であるため測定対象への侵襲性が懸念されることがあるが、実用的には問題ない程度の低接触力 (0.3 mN 程度) を実現している。これは、製造業において機械部品などの寸法、形状の直接測定に使用されている三次元測定機 CMM (Coordinate Measuring Machine) の一般的な 0.3 N 程度の接触力に対して非常に小さく、例えばジルコニアブロックゲージを μ -CMM で測定した時の変形量は 2 nm 程度と測定対象への影響は小さい。走査型であるため測定時間が長いことがデメリットであるが、数 nm の繰り返し性で器物形状の絶対測定が可能な技術である。

自由曲面形状の測定不確かさは、産業界において 50 nm 程度 ($\lambda/10=633/10$ nm) が求められているが、 μ -CMM を用いた測定の不確かさが現状 100 nm 以上に留まっている主要因を調べた。測定不確かさ低減に向けた他機関の取り組みを調査し、自由曲面形状測定の標準の確立を目指した研究開発方針を立てたので報告する。

2. μ -CMM を用いた表面形状測定

2.1 測定原理

産業技術総合研究所 計量標準総合センター (NMIJ: National Metrology Institute of Japan) で保有する μ -CMM (Panasonic 製 UA3P-4000)³⁴⁾ の機構の模式図を

図 1 に示し、表面形状測定方法について説明する。被測定物がステージによって直交する X, Y 軸方向に移動し、プローブ³⁵⁾ は、接触力が一定になるように被測定物表面に沿って Z 軸方向に移動する。ステージの X, Y 移動量とプローブの Z 移動量はそれぞれ、XY ステージ上に配置されたバーミラー、プローブ機構上面に配置されたミラーを介して干渉計で測定している。X, Y レーザ干渉測長計の光軸は、アッペの原理を満たすように、測定物表面をなぞるプローブ中心と一致させている。また、XY ステージは移動の際、わずかに Z 軸方向に上下するが、この上下変動は XY ステージ裏面に配置したミラーを用いた干渉計で測長し、補正している。

NMIJ が保有する μ -CMM の主要な不確かさ要因とそれぞれの標準不確かさ見積りの一例を表 1 に挙げた。現状の拡張不確かさは 100 nm から 150 nm で、主要な不確かさ要因は A のプローブ半径校正と B の XYZ 座標測定の 2 点挙げられる。C に記載する通り、その他の不確かさ要因として器物の熱膨張や測定の繰り返し性なども存在するが、数 nm の不確かさであるため、詳細は割愛する。現状 A, B それぞれの標準不確かさは 50 nm 程度と 30 nm 程度であると見積もられている。プローブ半径校正においては、校正に用いる基準球の直径校正值、基準球の形状偏差、プローブの形状偏差とたわみ、そしてプローブ校正時の XYZ 座標の測定不確かさが要因として挙げられる。XYZ 座標測定の不確かさにはレーザ測長の不確かさ等も存在するが主要因としては、ミラーの形状偏差、アッペエラー、直交誤差が挙げられる。この XYZ 座標測定の不確かさは、器物測定時にも発生す

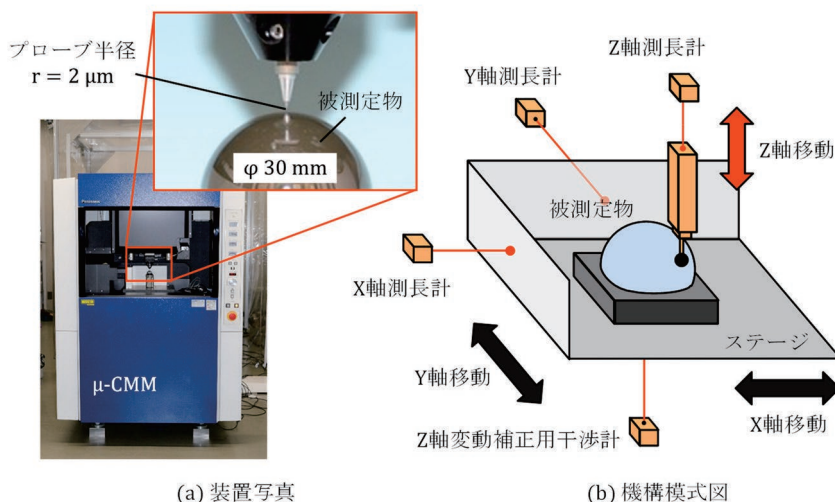


図 1 μ -CMM の装置写真と機構模式図

るため、Bでも計上する。以上を合成すると、 μ -CMMによる形状測定の拡張不確かさは100 nm以上となる。産業界で求められている50 nm程度の測定不確かさを達成するため各々の不確かさの原因を調査した。まず、プローブ半径校正について説明する。

2.2 プローブ半径校正

まず、 μ -CMMにおける測定値と測定対象形状の関係について説明する。図2に示すように、得られる測定値はプローブ中心座標の時系列であり、赤線で示す測定軌跡を意味する。したがって、測定対象の形状を得るには、得られた測定軌跡からプローブ半径 r_p を差し引かねばならない。

現在、プローブ半径 r_p は、予め大きさが分かっている基準球を用いて校正している。図3に示すように、直径 D_c が校正されている基準球を測定したとき、プローブの半径 r_p 分大きな球形状 M_{xyz}^c が得られる。(測定軌跡 M_{xyz}^c の添え字cは「(プローブ半径)校正時」の「calibration」を意味している。)測定値 M_{xyz}^c から最小二乗法によって求めた球半径(以降、最小二乗球半径) R_m を算出し、校正された基準球直径 D_c の半分である半径 $D_c/2$ を差し引くことでプローブ半径 r_p が求められる。つまり、式(2)に示すようにプローブ半径を一定値として校正し使用している。

$$r_p = R_m - \frac{D_c}{2} \tag{2}$$

表1 μ -CMMの主要な不確かさ要因

不確かさ要因	標準不確かさ
A プローブ半径校正	51 nm
A.1 基準球直径校正値	30 nm
A.2 基準球形状偏差	15 nm
A.3 プローブ形状偏差プローブたわみ	20 nm
A.4 XYZ座標測定(プローブ校正時)	33 nm
A.4.1 ミラー形状偏差	10 nm
A.4.2 アッペエラー	10 nm
A.4.3 直交誤差	30 nm
B XYZ座標測定(器物測定時)	33 nm
C その他(器物の熱膨張, 測定の繰り返し性など)	数 nm
合成標準不確かさ	61 nm
拡張不確かさ	122 nm

現在は、基準球を真球として見なしてプローブ半径校正を行っているが、実際は図4に示すように、基準球に形状偏差が存在している。また、プローブ球も真球であるとして半径を算出しているが、プローブ球にも図4のように形状偏差が存在する。さらに基準球に対するプローブの接触角度に応じたスタイラスのたわみによる位置誤差が存在する。傾斜部の測定では、図4のaのようにスタイラスに傾きとたわみが生じる。 μ -CMMは、スタイラスの傾きは補正するが、たわみは検出できず、プローブがbの位置にあると認識するため位置誤差が生じ、実際よりも凹んだ形状で出力される。実際のプローブ半径は、基準球直径の校正値 D_c 、基準球の形状偏差 $\Delta D(\theta, \varphi)$ 、プローブの形状偏差とたわみ $\Delta r_p(\theta_p, \varphi_p)$ を用いて、式(3)で表せる。

$$r_p + \Delta r_p(\theta_p, \varphi_p) = R_m - \left\{ \frac{1}{2} D_c + \frac{1}{2} \Delta D(\theta, \varphi) \right\} \tag{3}$$

ここで、 θ と φ は基準球におけるプローブとの接触点

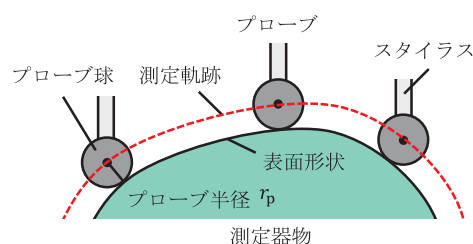


図2 測定値と測定対象形状の関係

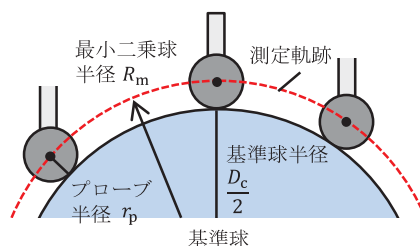


図3 基準球によるプローブ半径校正

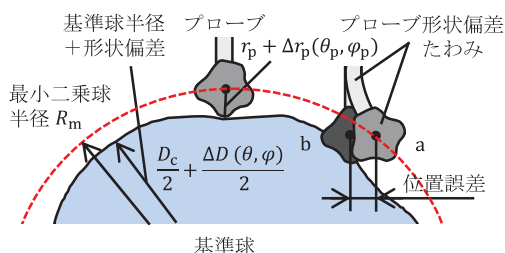


図4 プローブ半径校正における不確かさ要因

の緯度、経度（接触角）であり、 θ_p と φ_p は、プローブにおける基準球との接触点の緯度、経度である。式 (3) においてプローブの接触角と基準球の接触角は一対一対応している。また、プローブの形状偏差とたわみは分離せず接触角ごとに発生する誤差要因としてまとめて扱った方がプローブ形状マップ（第5章参照）による補正が簡便であるため、1つの変数で表している。現在は補正されていないこれらの偏差や誤差が表1のA.2, A.3で示したプローブ半径校正における不確かさとなっている。

2.3 XYZ 座標測定

プローブ半径校正時及び器物測定時に存在するXYZ座標測定における不確かさ（表1のA.4とB）には3つの主たる要因が存在する。X, Y 軸干渉測長計の参照ミラーの形状偏差とアップエラー、そして直交誤差による不確かさである。

まず参照ミラーに関しては、ミラーの表面に凹凸、すなわち形状偏差があると、それが変位として認識され誤差となる。例えばX軸方向のみにステージが移動する場合、Y軸干渉測長計のレーザが照射する位置がY軸用バーミラーの上を移動していくため、ミラーに形状偏差があるとそれがY軸方向の変位として検出され誤差となる。ミラーの面精度がPV値で $\lambda/20$ の時、矩形分布と見積もると、約10 nmの標準不確かさが存在することになる。

次に、アップエラーによる不確かさについて説明する。測定物と測長軸が一直線上にあることで測定誤差が小さくなることをアップの原理といい、測定機がアップの原理を満たしていることをアップフリーという。NMIJが有している μ -CMMのレーザ干渉測長システムは、アップの原理を満たすよう、X, Yレーザ干渉測長計の光軸がプローブ中心を通るように設計されている。しかし、被測定器物がX, Y軸方向に移動したとき、器物形状に沿ってプローブがZ軸方向に移動すると、図5のようにX, Y軸測長用のレーザ光軸とプローブ中心とのZ軸方向の差 z_h がアップオフセットとなり、例えばX方向移動時、ステージのピッチング等によりステージに角度 α だけ傾きが生じた場合、測定されたX軸方向変位には、以下の式(4)に示すアップエラー δx_{abbe} が発生する。

$$\delta x_{abbe} = z_h \tan \alpha. \quad (4)$$

NMIJが保有している μ -CMMステージのピッチング誤差は実験により2 μ radと評価されており、アップエ

ラーによる標準不確かさは、器物の形状に依存するが、 $z_h = 5$ mmの場合、約10 nmとなる。

XYZ座標測定における不確かさ要因の中で最も寄与が大きな直交誤差は、ステージ運動軸が直交していない時に発生する³⁶⁾⁻³⁸⁾。X, Y, Z軸が互いに直交している状態が理想だが、実際の装置にはわずかなずれが含まれている。図6のように、ステージのX軸運動軸が、Z軸に対して90度から角度 β ($\beta \cong 0$) だけずれたX'軸であるとする。干渉測長計は運動軸に対して平行に調整されており、ステージがX'軸方向にLだけ動くと、L移動したと測長するが、装置はZ軸と直交しているX軸方向にL移動したと認識するため、移動後のプローブ位置が、図6のように誤って認識される。X軸方向移動量の誤差は $L(1-\cos\beta)$ であり、コサイン誤差であるためほとんど無視できるが、Z軸方向には $L \sin\beta$ だけ形状に誤差が発生する。例えば形状誤差のない真球を測定した際、直交誤差がない場合は測定軌跡が円弧となるが、直交誤差がある場合は楕円となる³⁴⁾。これは器物のサイズや形状にもよるが、基本的にはステージの移動量Lに比例する誤差である。

現在、直交誤差は真球と見なした基準球を用いて校正している。具体的には、測定された楕円が円となるよう

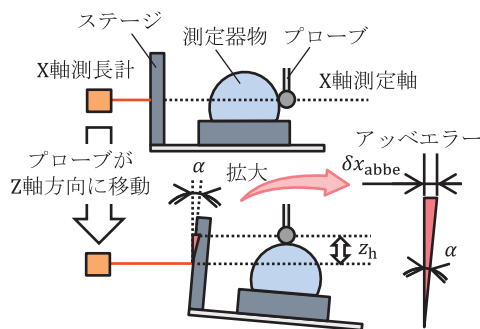


図5 アップエラーによる不確かさ

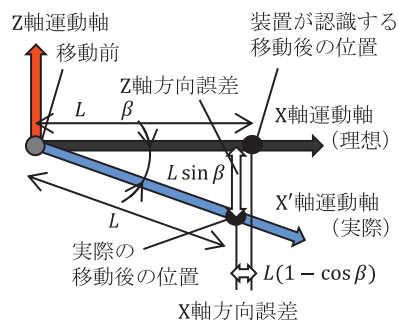


図6 直交誤差による不確かさ

な角度 β を求めて補正している。しかし、測定された楕円成分が直交誤差によるものか、基準球形状もしくはプローブ形状によるものか区別できないために測定の不確かさとなっている。現状、3軸間の直交誤差の補正後の不確かさがそれぞれ $1\ \mu\text{rad}$ と評価しており、測定範囲が30 mm角である時、標準不確かさは約30 nmとなる。

3. 他機関の取り組み

超精密三次元測定機による自由曲面形状測定技術に対する他国の国家計量標準研究所 (National Metrology Institute, 以降 NMI) 及び企業の取り組みを紹介する。

3.1 イギリス国立物理学研究所

イギリス国立物理学研究所 (NPL: National Physical Laboratory) は1990年代から「Small volume CMM (SCMM)」として、マイクロプローブ (図7) と干渉測長計が載っているメトロロジーフレームを従来型のCMMに取り付けた $\mu\text{-CMM}$ (図8)を開発^{39),40)}していた。3軸アップフリーとなるように配置されたレーザ干渉計によって被測定物にプローブが接触した時のステージの変位量を測定する。測定面に対して均等に力を与える三脚巴機構を有するマイクロプローブ^{41),42)}は、6つの圧電アクチュエータにより振動させて使用する。測定面との相互作用による振幅の変化をピエゾセンサーによって検知することで接触状態を判断しており、0.1 mN以下の

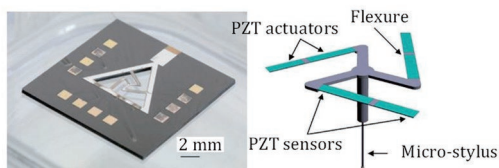


図7 NPLのプローブ写真と機構図⁴¹⁾
(文献⁴¹⁾より引用、文字を拡大)

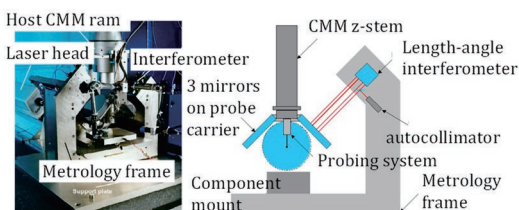


図8 NPLのSCMMの装置写真と機構図³⁹⁾
(文献³⁹⁾より引用、文字を拡大)

低接触力を実現している。

NPLが初期の頃に提案していたプローブ⁴⁰⁾を元に開発された三脚巴機構のプローブがIBS Precision Engineering社の3軸アップフリーの三次元形状測定機⁴³⁾に搭載されている。図9に示すように、この $\mu\text{-CMM}$ は茶色で示すフレームにプローブとレーザ測長計が取り付けられており、器物は橙色で示すステージによってX, Y軸方向に動き、プローブがZ軸方向に動くが、メトロロジーフレーム全体がZ軸方向に動くことで、プローブの接触位置、すなわち測定点が必ずレーザ測長計上に存在し、アッペの原理が常に満たされている。

しかし、3軸アップフリーによる機構であるため装置が大型であり、プローブ接触圧を低く抑えるために測定時間が長くなる点がデメリットとして挙げられる。また、本測定機もプローブ半径の校正を必要としており、現状プローブ半径校正に基準球を使用している。我々NMIJの状況と同様に、プローブ及び基準球に存在する形状偏差を補正できていないことから、現状の形状測定の拡張不確かさは100 nm程度⁴³⁾となっている。

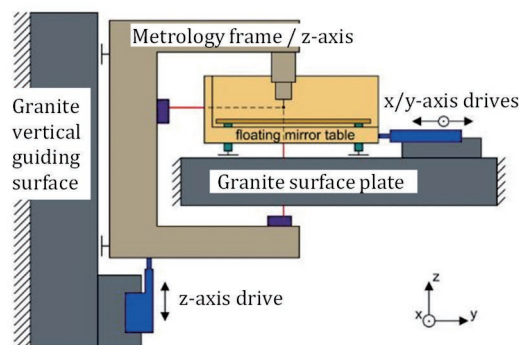


図9 3軸アップフリーの $\mu\text{-CMM}$ ⁴³⁾
(文献⁴³⁾より引用、文字を拡大)

3.2 スイス連邦計量・認定局

スイス連邦計量・認定局 (METAS: The Federal Institute of Metrology) も、図10のような3軸アップフリーの独自の $\mu\text{-CMM}$ ^{44),45)}を有している。この $\mu\text{-CMM}$ ではプローブを固定し、被測定物をステージでX, Y, Zの3軸方向に移動させることによって表面を走査し測定する。ステージには各軸に対してミラーが取り付けられており、プローブに被測定物が接触したときのステージ変位量を、アッペオフセットが0となるように設置されたレーザ干渉計で測定する。また、Swiss Federal Institute of TechnologyとMecartex社と共に3Dプロ-

ブ(図11)も開発された。60 μmの厚さのフレクシャヒンジを有する単一のアルミニウムで製造された線細工構造のプローブであるため、移動質量は最小限に抑えられ、プローブの正確な3軸並進運動を可能にしている。XYZ軸全てが同等に重力の影響を受けることで測定対象に等方的に接触力が与えられ、0.5 mN未滿の接触力で測定可能である。

さらに、METASではμ-CMMの高精度化に寄与するプローブの形状校正法を提案している^{46),47)}。図12に示すように、プローブを3本用意し、プローブ1を測定器物として見立て、プローブ2によって形状を測定する。次に、プローブ3でプローブ1を同様に測定する。最後に、最初に用いたプローブ2を上下反転させて測定器物として見立ててプローブ3で測定する。

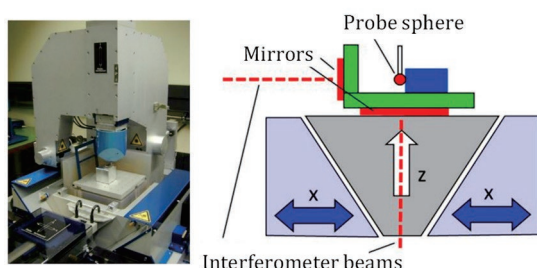


図10 METASのμ-CMMの装置写真と機構図^{44),47)}
(文献^{44),47)}より引用及び作成、文字を拡大)

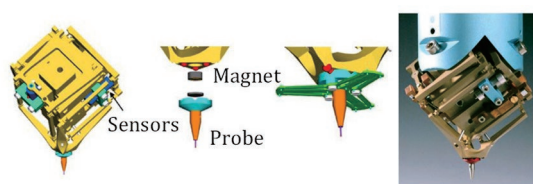


図11 METASのプローブ構造図と写真⁴⁶⁾
(文献⁴⁶⁾より引用及び作成、文字を拡大)

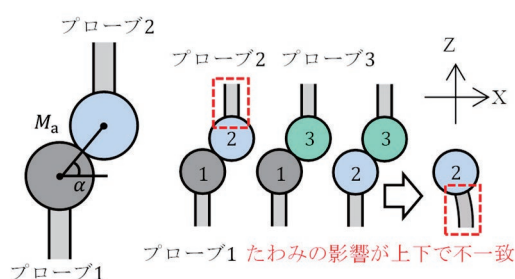


図12 3球面法

例えばプローブ1をプローブ2で測定した場合、式(5)が成り立つ。

$$M_a = R_1(\alpha) + R_2(\alpha). \quad (5)$$

M_a はプローブ1とプローブ2の中心間距離を、 $R_1(\alpha)$ と $R_2(\alpha)$ は、プローブ赤道から角度 α の接触点におけるプローブ1とプローブ2の未知の半径を示している。式(6)に示す3つの方程式を解くことで、3つのプローブの角度 α 方向の半径が得られる。

$$\begin{aligned} M_a(\alpha) &= R_1(\alpha) + R_2(\alpha), \\ M_b(\alpha) &= R_1(\alpha) + R_3(\alpha), \\ M_c(\alpha) &= R_2(\alpha) + R_3(\alpha). \end{aligned} \quad (6)$$

異なる α に対して同様に測定し、各 α における半径を求めることにより3つのプローブそれぞれの3D形状マップの作成が可能となる。この形状マップを用いて、当該プローブを使用して器物の形状を測定したときの測定値に対してプローブ形状を補正することによって不確かさの低減に成功した。この手法を3球面法と呼称する。基準球を用いない自己校正であるため、現状の形状測定の拡張不確かさは50 nmから100 nm^{48),49)}である。ただし、原理上、どうしても1本はプローブ2のようにプローブを上下反転させて使用しなければならず、固定法の違いによってたわみが上下で一致せず、プローブ形状マップに未知の誤差が入る可能性に留意する必要がある。

3.3 アメテック株式会社テーラーホブソン事業部

非接触三次元形状測定機であるアメテック株式会社のLUPHOScan⁵⁰⁾⁻⁵⁶⁾を図13に示す。プローブは、波長1,530 nmから1,610 nmの間の4種類の波長を使用したマルチ波長干渉計が両端にあり、プローブから測定器物までの距離と、プローブから基準円筒ミラーまでの距離の両方を測長する。プローブはステージにより水平方向(R軸)及び鉛直方向(Z軸)に移動し、プローブ中心を通る紙面に垂直な軸(T軸)回りに回転する。測定器物を回転テーブルに設置し回転(回転軸:C軸)させながら、入力した設計データを元に、プローブ測長軸と測定表面の法線方向が一致するようにプローブを移動・回転させることで測定器物表面を走査し測定する。極座標系の三次元形状測定装置で、4軸を移動及び回転させながら測定器物の表面全体をスパイラル状に走査する。3軸アップリーの構造をしており、非接触かつ高精度測定が可能で、また、器物を回転させて表面をスキャンするため、

測定時間が短いことも利点として挙げられる。

パンケーキやガルウイングと呼ばれる急峻な斜面を持つ特殊形状の光学部品も測定可能であるが、回転対称ではない複雑な自由曲面の測定は難しい。また、本装置も基準球による空間座標校正が必要である。現状、測定性能としては繰り返し性のみが 50 nm と公表されているが、校正用基準球の形状も考慮した絶対形状測定の拡張不確かさは 100 nm から 200 nm 程度になると思われる。

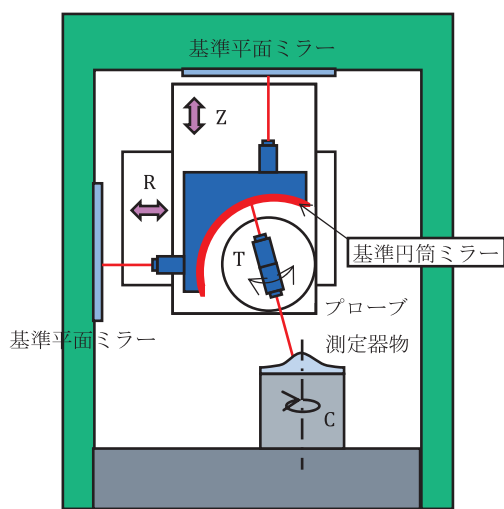


図 13 LUPHOScan の機構の模式図⁵²⁾
 「光アライアンス」日本工業出版発行
 2016年12月号41ページから転載。
 (文献⁵²⁾を参考に作図。図の色を変更，一部改変)

4. 球の直径測定技術

μ -CMMの主要な測定不確かさ要因である基準球の直径及び形状偏差の測定に関連する技術として、現在の球直径測定技術とその課題について紹介する。

4.1 2点直径分布と球面形状の違い

まず、2点直径分布と球面形状の違いについて説明する。図14に示すように、 μ -CMMのプローブ半径校正に使用するのは、プローブ測定可能な接触角範囲である基準球の一部であるため、校正時にスキャンする部分的な領域での球面形状から決まる部分曲率半径 R_p である。しかし、現在は高精度に球面形状を測定する技術が確立されていない。4.2と4.3で紹介するように、現在の高精度球直径測定法はいずれも2点直径やその分布を測定しているのであって、球面形状は測定していない。

球が完全な真球であるならば、部分曲率半径は2点直

径の平均値(平均直径)の2分の1($=\frac{1}{2}\bar{D}_c$)に等しくなるが、実際は形状偏差を持っているため、等しくならない。球面形状は球の中心からの距離分布であるが、2点直径分布は、直径という一次元長さの分布であり、それぞれについて球の中心位置は不明であり、相互の位置関係が分からない。

現在は、高精度に球面形状を測定する技術が確立されていないため、式(7)のように、校正値である平均直径から求めた平均半径を部分曲率半径と見なして使用している。

$$R_p = \frac{1}{2}\bar{D}_c \quad (7)$$

実際は式(8)のように補正できない不可知の偏差 δR_{t-p} が存在しており、これが基準球半径の不確かさとして存在している。

$$R_p = \frac{1}{2}\bar{D}_c + \delta R_{t-p} \quad (8)$$

たとえ測定領域の部分球面が理想的な真球の一部、すなわち形状偏差がゼロであっても、球全体が真球でない限りこの不確かさは存在する。そのため、 μ -CMMの高精度化のためにはこの不確かさを低減するプローブ校正法が必要となる。

4.2と4.3では、現在の高精度球直径測定法として、2点直径の高精度測定手法について紹介する。

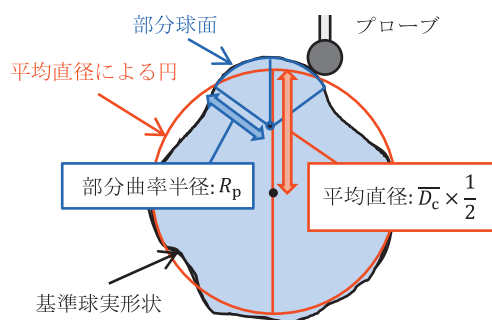


図 14 2点直径と曲率半径の違い

4.2 万能測長機

通常、球直径は万能測長機(アッペの測長器⁵⁷⁾を用いて校正されている。球の2点直径(対向する平行な2平面で球を挟んだときの距離)を複数箇所測定し、その平均値から球の平均直径が校正される。(株)ミットヨでは、真空レーザー光路型干渉計を搭載した同じ原理

の超精密直径測定機⁵⁸⁾を開発し、球の平均直径に対する JCSS (Japan Calibration Service System) 校正サービスを実施している。

アメリカ国立標準技術研究所 (NIST: National Institute of Standards and Technology) では、図 15 のように垂直に設置した円柱に対し、スライダで球を挟み込むことで球の 2 点直径を測定するアッペの測長器を開発している⁵⁹⁾。レーザ光軸、スライダ測定子中心、被測定物 (球中心)、測定力の発生機構を一直線上に配置することでアッペの原理を満たしている。従来機の主な誤差要因となっていたレーザ光源や実験室の人間由来の熱から測定領域を隔離するため囲いを設け、測定器物の位置調整は囲いの外から行うことが可能な機構を導入している。また、測定器物がスライダの中央 (レーザ測長軸上) に接触するよう位置を維持しつつ弾性変形量が小さくなるよう接触力を調整 (0.1 N から 1.0 N) することも可能である。直径 25 mm の球の測定結果を、後述する NIST が有する最も高精度な球直径測定機 (フィゾー干渉計) の結果と 5 年間に渡って比較しており、アッペの測長器の再現性が 10 nm、干渉計の再現性が 8 nm であるところ、平均直径の差が 12 nm で一致している。

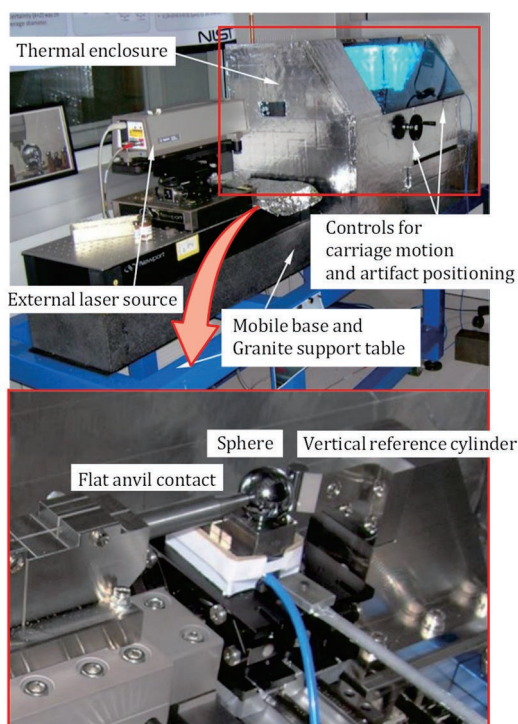


図 15 NIST のアッペ測長器の装置写真⁵⁹⁾
(文献⁵⁹⁾より引用、一部改変、文字を拡大)

4.3 干渉計

NIST は図 16 に示すようなフィゾー干渉計を使った球直径測定技術も開発している⁶⁰⁾。測定対象付近のみを説明する図を図 17 に示す。平面基板 A の上に球をのせ、平面基板 B で上から挟み込み、上面から光を照射することで干渉縞を取得する。平面基板 A と B はわずかに平行からずらし、球部分の周囲に平行の干渉縞を発生させる。ブロックゲージ長さの測定法⁶¹⁾と同じく、式 (9) に示すように球の中央と周囲の空間部分の基準干渉縞との間隔 a と、空間部分の干渉縞の間隔 b から、球中央位置における干渉縞の位相を計算し、式 (9) を用いて干渉信号の整数部 N と端数部 f から球の直径 D を算出する。

$$D = \frac{\lambda}{2}(N + f), \quad f = \frac{b}{a}. \quad (9)$$

平面基板で球を挟むが、接触力を抑えて測定器物の弾性変形量を小さくする工夫がされており、不確かさを小さくしている。 $\lambda/50$ の平面基板の中央 10% を使っており、平面基板の平面度による測定不確かさは測定の再現

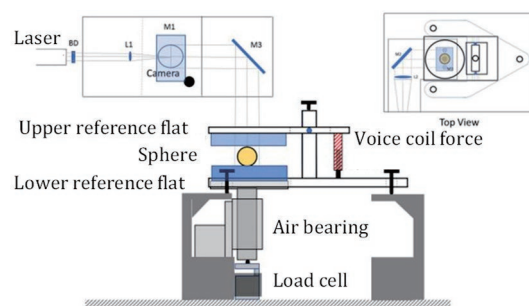


図 16 NIST のフィゾー干渉計の模式図⁶⁰⁾
(文献⁶⁰⁾より引用、文字を拡大)

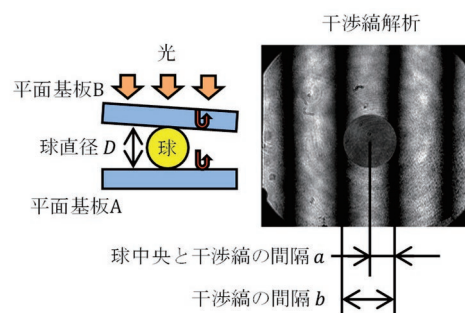


図 17 NIST の直径測定技術の模式図⁶⁰⁾
(文献⁶⁰⁾より一部引用)

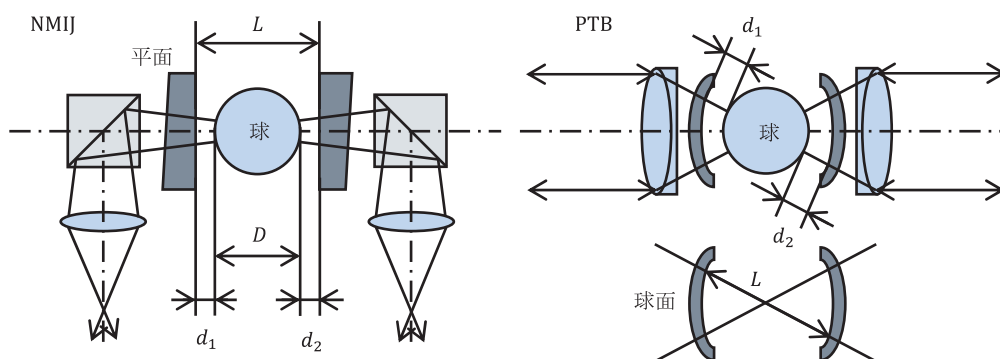


図 18 NMIJ と PTB の直径測定技術の模式図⁶⁴⁾(文献⁶⁴⁾を参考に作図，一部改変)

性に含まれるとしている。球直径測定拡張不確かさは 10 nm 以下である。また、NMIJ とドイツ国立計量研究所 (PTB: Physikalisch-Technische Bundesanstalt) では、キログラム定義改定に向けたアボガドロプロジェクトにおいて、シリコン球の直径を測定するため、弾性変形を伴わない非接触超高精度球直径測定干渉計を開発している。図 18 に示すように、NMIJ はエタロンが平面⁶²⁾⁻⁶⁵⁾、PTB は球面^{66),67)}である違いはあるが、同じ原理の干渉計を開発している。レーザ干渉計によってエタロン間の距離 L および球とエタロン間の距離 d_1 と d_2 を測定し、式 (10) によって球の直径 D を求める技術である。

$$D = L - (d_1 + d_2). \quad (10)$$

球を回転させて多方向から二点直径を測定しており、それらから求めた平均直径の測定の拡張不確かさは 1 nm 以下と、非常に高精度に測定することが可能である。

5. 将来展望

以上の調査から明らかになった不確かさ要因及び現状の技術を踏まえて、 μ -CMM の高精度化に向けた今後の方針を説明する。

プローブ半径校正の課題に対しては、プローブ形状校正に取り組む。具体的にはランダムボール法によってプローブ形状偏差マップを作成し、補正することにより不確かさ低減を試みる。また、XYZ 座標測定の課題に対しては、現在一番不確かさの大きい直交誤差補正において、角度ゲージと直角ブロックを用いた各直交度補正パラメータの決定に取り組む予定である。これらにより、最終的には 50 nm 以下の測定の拡張不確かさを実現する計画である。

5.1 ランダムボール法によるプローブ形状補正マップの作成

プローブ形状校正においては、ランダムボール法により疑似理想球を実現して、基準球の形状偏差による誤差の低減に取り組む。図 19 に示すように、まず通常と同様、基準球の一部分をプローブで測定する。通常はこの測定だけで、測定値から基準球 2 直径の校正値の 1/2 を引き、プローブ半径を算出していた。しかし、ここで基準球を何度かランダムに回転させ、その都度基準球の同じ角度範囲を測定し、得られた測定値を平均すると式 (3) は式 (11) になる。 $M_i(\theta_p, \varphi_p)$ は i 番目の基準球姿勢の時にプローブで基準球を測定した際に得られた、プローブの接触角 (θ_p, φ_p) に対応する測定値である。また、 $\Delta R_i(\theta, \varphi)$ は i 番目の基準球姿勢時におけるプローブとの接触角 (θ, φ) に対応する基準球部分球面からの形状偏差、 $\delta R_{t-p,i}$ は、基準球平均直径の 1/2 と i 番目の基準球姿勢時に測定した領域の部分曲率半径との差である。

$$r_p + \Delta r_p(\theta_p, \varphi_p) = \frac{1}{n} \sum M_i(\theta_p, \varphi_p) - \frac{1}{n} \sum \frac{\bar{D}_c}{2} - \frac{1}{n} \sum \delta R_{t-p,i} - \frac{1}{n} \sum \Delta R_i(\theta, \varphi). \quad (11)$$

平均数を増やすに従い、右辺第 3 項の基準球平均直径の 1/2 と部分曲率半径との差 $(\frac{1}{n} \sum \delta R_{t-p,i})$ と右辺第 4 項の部分球面からの形状偏差 $(\frac{1}{n} \sum \Delta R_i(\theta, \varphi))$ をゼロと見なせるようになる。これにより、高精度に測定された基準球平均直径 (\bar{D}_c) を使用した右辺第 2 項を利用してプローブ形状が補正できる。式 (11) の左辺はプローブの同じ接触角における半径やたわみ、形状偏差を含んだ測定結果の平均値を示しているため、プローブ形状補正マップが得られることとなる。

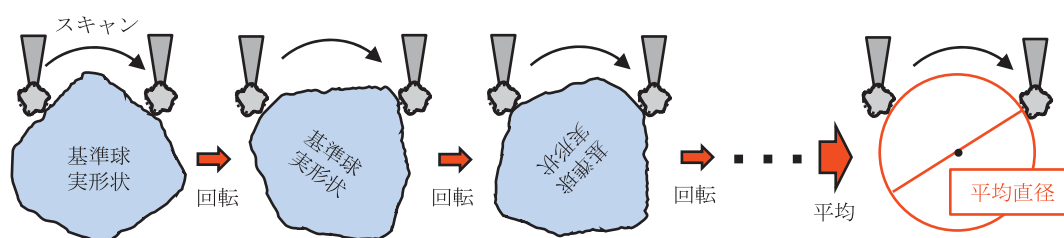


図19 ランダムボール法による疑似理想球の実現

5.2 校正用ゲージを用いた直交誤差補正

XYZ座標測定における直交誤差の補正に関しては、基準球を用いた場合、測定された楕円成分が、直交誤差によるものか、それとも基準球やプローブの形状によるものか、区別できない点が課題であった。そこで、基準球を用いず、NMIJが有している高精度な角度標準⁶⁸⁾と平面度標準⁶⁹⁾⁻⁷¹⁾を利用した校正用ゲージを使用する方針である。図20に示すように、X軸とZ軸の直交度は角度と平面度が校正されたA面とB面を測定することによって、直交誤差のみを評価し補正することが可能となる。Y軸とZ軸、X軸とY軸についても同様に、校正用ゲージを測定することで直交誤差の補正が可能となる。これによって、純粋に直交誤差のみを評価できるためXYZ座標測定における不確かさの低減が可能となる。

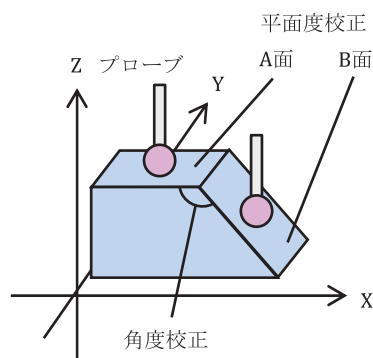


図20 校正ゲージによる直交誤差補正

6 まとめ

自由曲面形状測定技術とその標準確立に向けた μ -CMMの高精度化手法やその先行研究について文献調査を行った。まず、NMIJにおける μ -CMMの誤差要因について測定手順や手法に基づいて解説した。次に、他国の国家計量標準研究所及び製品版の三次元形状測定機

の測定原理および測定不確かさ低減に向けた取り組みの調査結果を報告した。最後に、NMIJにおける μ -CMMの高精度化に向けた今後の方針として、プローブ形状校正法と直交誤差補正法を提案した。これらにより自由曲面形状測定技術を確立し、高精度光学部品産業に貢献する予定である。

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いただきました。深くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) F. Z. Fang, X. D. Zhang, A. Weckenmann, G. X. Zhang, and C. Evans. CIRP Ann. - Manuf. Technol., 62, 823 (2013)
- 2) S. Carmignato, L. D. Chiffre, H. Boose, R. K. Leach, A. Balsamo, and W. T. Estler. CIRP Ann. - Manuf. Technol., 69, 693 (2020)
- 3) H. N. Hansen, K. Carneiro, H. Haitjema, and L. D. Chiffre. CIRP Ann., 55, 2 (2006)
- 4) M. Vermeulen, P. Rosielle, and P. Schellekens. CIRP Ann., 47, 1 (1998)
- 5) E. Savio, L. D. Chiffre, and R. Schmitt. CIRP Ann., 56, 2 (2007)
- 6) 佐藤敦. 精密工学会誌, 81, 10 (2015)
- 7) 森田晋也. 精密工学会誌, 85, 7 (2019)
- 8) J. Xiong, E. Hsiang, Z. He, and T. Zhan. Light Sci. Appl., 10, 1 (2021)
- 9) X. Hu, and H. Hua. Opt. Express, 22, 11 (2014)
- 10) J. Rolland, and H. Hua. Encyclopedia of Optical

- Engineering, pp. 1-14 (2005)
- 11) 清川清 . 映像情報メディア学会誌 , 69, 8 (2015)
 - 12) 岩隈志文, 本道昇宏 . 光技術コンタクト , 75, 5 (2019)
 - 13) 中條博則 . 光技術コンタクト , 57, 5 (2019)
 - 14) T. Salditt, and M. Osterhoff. *Nanoscale Photonic Imaging*, 134, 71 (2020)
 - 15) 大橋治彦 . 精密工学会誌 , 76, 11 (2010)
 - 16) 岡田浩巳, 津村尚史, 山内和人 . 精密工学会誌 , 84, 6 (2018)
 - 17) 山内和人 . 光学 , 42, 6 (2013)
 - 18) 鈴木浩文, 木下孝彦, 大西孝, 三浦勝弘, 沖野正 . 2008 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集 , N45 (2008)
 - 19) Edmund Optics Inc. <https://www.edmundoptics.jp/ViewDocument/all-about-aspheric-lenses-JP.pdf>
 - 20) 高井雅明 . 日本写真学会誌 , 57, 4 (1994)
 - 21) 横関俊介, 応用物理 , 57, 3 (1988)
 - 22) 横関俊介, 応用物理 , 58, 8 (1991)
 - 23) 中野智允 . 応用物理 , 40, 9 (1971)
 - 24) 玄間隆志 . 精密光学会誌 , 56 10 (1990)
 - 25) G. Shultz, and J. Schweider. *Appl. Opt.*, 6, 6 (1967)
 - 26) 高辻利之, 尾藤洋一, 大澤尊光, 古谷涼秋 . 精密工学会誌 , 72, 11 (2006)
 - 27) A. Jensen. *JOSA*, 63, 1313A (1973)
 - 28) K. Hibino, M. Itoh, and R. Hanayama. *Opt. Rev.* 21, 2 (2014)
 - 29) H. Noura, R. H. Bergmans, A. KÜng, H. Piree, R. Henselmans, and H. A. M. Spaan. *Int. J. Metrol. Qual. Eng.*, 5, 204 (2014)
 - 30) J. D. Claverley and R. K. Leach. *Precis. Eng.*, 39, 1 (2015)
 - 31) 根岸真人 . 精密工学会誌 , 80, 6 (2014)
 - 32) 佐藤理 . 産総研計量標準報告 , 3, 4 (2005)
 - 33) 近藤余範 . 産総研計量標準報告 , 8, 3 (2011)
 - 34) 近藤余範 . 精密工学会誌 , 87, 12 (2021)
 - 35) 吉田一郎 . 精密工学会誌 , 82, 2 (2016)
 - 36) 大澤尊光, 高辻利之, 黒澤富蔵, 梅津健太 . 産総研計量標準モノグラフ , 第 8 号 (2005)
 - 37) 根岸真人 . 精密工学会誌 , 67, 10 (2001)
 - 38) 吉住恵一 . 光学 , 20, 10 (1991)
 - 39) G. Peggs, A. Lewis, and R. Leach. *2003 Winter Topical Meeting of American Society for Precision Engineering*, 28, 53 (2003)
 - 40) A. Lewis, S. Oldfield, and G. N. Peggs. *WIT Trans. Eng. Sci.*, 34 (2001)
 - 41) J. D. Claverley, and R. K. Leach. *Precis. Eng.* 37, 491 (2013)
 - 42) J. D. Claverley, and R. K. Leach. *Microsyst. Technol.*, 16, 1507 (2010)
 - 43) I. Widdershoven, R. L. Donker, and H.A. M. Spaan, *J. Phys. Conf. Ser.* 311, 012002 (2011)
 - 44) R. Thalmann, F. Meli, and A. KÜng. *Appl. Sci.*, 6, 150 (2016)
 - 45) A. KÜng, and F. Meli. *Proc. of 7th euspen International Conference*, 230 (2007)
 - 46) A. KÜng, F. Meli, and R. Thalmann. *Meas. Sci. Technol.*, 18, 319 (2007)
 - 47) A. KÜng, and F. Meli. *Proc. Of 5th euspen International Conference*, 193 (2005)
 - 48) A. KÜng, F. Meli, A. Nicolet, and R. Thalmann. *Meas. Sci. Technol.*, 25, 094011 (2014)
 - 49) F. Meli, and A. KÜng. *Proc. of 10th euspen International Conference*, 91 (2010)
 - 50) E. Stover, G. Berger, M. Wendel, and J. Peter. *Proc. SPIE/APOMA*, 9633, 96331O-1 (2015)
 - 51) G. Berger, and J. Peter. *Proc. SPIE*, 8884, 88840V-1 (2013)
 - 52) J. Peter, and G. Berger. *Proc. SPIE*, 8788, 878819-1 (2013)
 - 53) 田中真一 . 光アライアンス , 27, 12 (2016)
 - 54) 田中真一 . 精密工学会誌 , 85, 8 (2019)
 - 55) 田中真一 . 型技術 , 30, 8 (2015)
 - 56) 田中真一 . 光技術コンタクト , 57, 9 (2019)
 - 57) 谷口修, 堀込泰雄 . 最新機械工学シリーズ 16 計測工学, 森北出版株式会社 (1977)
 - 58) 萩原誠一, 眞分幸雄, 境久嘉, 茂呂澤孝浩, 山本英樹, 神永哲也 . 精密工学会誌 , 72, 9 (2006)
 - 59) J. Stoup, and T. Doiron. *Metrologia*, 58, 025002 (2021)
 - 60) E. Stanfield, J. Stoup, M. Braine, and T. Doiron. *Metrologia*, 57, 025003 (2020)
 - 61) 尾藤洋一 . 産総研計量標準報告 , 4, 1 (2005)
 - 62) N. Kuramoto, K. Fujii, and K. Yamazawa. *Metrologia*, 48, S83-95 (2011)
 - 63) N. Kuramoto, L. Zhang, S. Mizushima, A. Waseda, S. Okubo, H. Inaba, A. Kurokawa, and K. Fujii. *Metrologia*, 57, 025006 (2020)
 - 64) 倉本直樹 . 計測と制御 , 58, 5 (2019)
 - 65) 倉本直樹 . 光学 , 39, 3 (2010)
 - 66) G. Bartl, M. Krystek, A. Nicolaus, and W. Giardini. *Meas. Sci. Technol.*, 21, 115101 (2010)

- 67) G. Bartl, M. Krystek, and A. Nicolaus. *Meas. Sci. Technol.*, 25, 064002 (2014)
- 68) T. Watanabe and H. Fujimoto. *Proc. of XIVIII IMEKO World Congress* (2006)
- 69) T. Takatsuji, N. Ueki, K. Hibino, S. Osawa and T. Kurosawa. *Proc. of SPIE*, 4401 (2001)
- 70) Y. Kondo and Y. Bitou. *Meas. Sci. Technol.*, 18, 1 (2007)
- 71) Y. Kondo and Y. Bitou. *Proc. of SPIE*, 11492, 1149203 (2020)