

令和 6 年 6 月 11 日現在

機関番号：82626

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01232

研究課題名（和文）アボガドロ定数にトレーサブルな超高精度フリーフォーム形状測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of high precision free-form shape measurement system traceable to Avogadro's constant

研究代表者

尾藤 洋一（Bitou, Youichi）

国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・副研究部門長

研究者番号：30357842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、密度測定に基づく基準球直径の超高精度測定及びランダムボール法によるプローブ球校正技術及び、高精度幾何ゲージによる空間座標補正法を用いてマイクロCMMと呼ばれる小型の接触式形状測定装置の革新的高精度化に取り組んだ。まず、直径約30 mmのシリコン単結晶球（基準球）において、超高精度質量測定と組み合わせることにより体積値を決定し、複数個のシリコン基準球に対して、平均直径値を高精度に算出することに成功した。また、マイクロCMMの空間座標補正に必要となる平面基準ミラー、XY直交補正基準器、XZ・YZ直交補正基準器を設計・製作し、空間座標補正技術を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

先端技術から基礎研究に至るまで、ナノスケールの形状精度が担保された様々な素子（特に光学素子）の実現が求められている。現在、非球面レンズを含むフリーフォーム形状の測定装置としてマイクロCMMと呼ばれる小型の形状測定装置が広く利用されている。本研究は、マイクロCMMの絶対精度を担保するために必須となる、空間座標精度、プローブ球形状及び半径の高精度化を実現するものであり、それにより、様々な光学素子の高精度化が期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we worked on the innovative improvement of the accuracy of a contact-type shape measuring device called a micro CMM, using ultra-high-precision measurement of the reference sphere diameter based on density measurement, probe sphere calibration technology using the random ball method, and a spatial coordinate correction method using a high-precision geometric gauge. First, the volume of a silicon single-crystal sphere (reference sphere) with a diameter of approximately 30 mm was determined by combining with ultra-high-precision mass measurement, and the average diameter value was successfully calculated with high precision for multiple silicon reference spheres.

The spatial coordinates of the micro CMM were also determined. We designed and fabricated reference standards, which are necessary for the spatial coordinate correction of micro CMMs, and established spatial coordinate correction technology.

研究分野：精密計測

キーワード：形状計測 CMM トレーサビリティ

1. 研究開始当初の背景

これからの日本の将来を支える産業における先端技術や、自然科学の根源を明らかにするような基礎的な研究において、ナノスケールの形状精度が担保された様々な素子（特に光学素子）の実現が求められている。例えばレンズ関連で言えば、内視鏡の更なる小型化・高機能化を実現するためには、先端に取り付けられた非球面レンズの小型化・性能向上は必須であるし、スマートフォン等に搭載されている小型カメラの性能向上のために、非球面レンズ形状の高精度化は常に求められている。また、基礎科学分野においても、例えば X 線を用いる放射光施設において必要なミラーの形状は球面から非軸・非球面に展開しており、要求される形状精度もナノレベルに到達している。これらの光学素子の設計形状は年々複雑化しており、もはやフリーフォーム（自由曲面）と呼べるレベルに達している。

形状精度としてナノ精度のフリーフォーム素子を実現するためには、研磨・加工技術もさることながら、その素子形状の高精度な計測・評価技術が必須となってくる。当然のことながら、計測は加工よりも高い精度が求められるが、ナノ精度加工に十分な絶対精度（例えば 200 ~ 100 nm 以下）を有するフリーフォーム形状測定法は未だ確立されていない。まさに、「測れないものは造れない」状況を打破できる高精度（絶対精度）形状計測技術の開発が、様々な高精度フリーフォーム素子実現の重要なキーポイントとなっている。

2. 研究の目的

現在、非球面レンズを含むフリーフォーム形状の測定装置として μ CMM (Micro Coordinate Measuring Machine) と呼ばれる小型の形状測定装置が広く利用されている。 μ CMM の測定結果は、通常の CMM と同様、使用しているプローブ球の半径校正值がダイレクトに反映されており、形状測定の絶対精度（不確かさ）は、測定に使用しているプローブ球の校正精度（半径値及び形状偏差）にほぼ依存している。そして、その校正精度は校正に使用する基準球の校正精度に依存している。具体的なプローブ球の校正法としては、校正済みの基準球の上面を測定し、基準球の直径校正值からプローブ球の半径値を算出（校正）するが、現状のプローブ球の校正不確かさは 200 nm 程度に留まっている。

本研究では、20 nm 以下の不確かさでのプローブ球校正を実現し、ナノ精度（絶対精度）のフリーフォーム形状測定に繋げるために、以下の 3 つの手法を提案する。

プローブ球の校正時に基準球をランダムに回転させ、その形状測定結果を平均化することにより（ランダムボール法）、疑似的に形状偏差のない理想球に近い状態の基準球を実現し、そこからプローブ球の形状偏差マップ（誤差補正マップ）を算出する。

基準球の体積値を、高精度な密度測定及び質量測定より算出し、そこから平均直径値を高精度に決定する。この平均直径値は で用いた疑似的な理想球の直径値と一致することから、体積値より求めた平均直径値を標準として、プローブ球の平均半径値を算出する。

独自設計した高精度幾何ゲージによる空間座標補正法

以上の 3 つの手法により、プローブ球の平均半径値及び形状偏差の補正マップを高精度に決定することを可能とし、その結果、高精度（ナノ精度）のフリーフォーム形状計測実現につなげることを目指す。

3. 研究の方法

(1)ランダムボール法では、図 1 に示す様な実際の基準球を用いたプローブ球校正において、基準球を適当に回転させ、球面形状の測定を多数回実施する。そして、その測定結果を平均化することにより、測定結果に含まれる基準球の形状偏差成分を低減させる。その結果、理想的には、平均化された測定結果 = プローブ球の偏差形状となり、プローブ球の偏差形状マップを作成することができる。さらに、実際に算出される形状偏差マップには、 μ CMM の運動誤差などによって発生する誤差成分も含まれており、プローブ球の接触角に対応した誤差補正マップが作成されることになる。

現在、実際に使用されている基準球（サイズ 20 ~ 30 mm 程度）の形状偏差は精度のよいもので 50 ~ 80 nm 程度である。ランダムボール法での測定回数を n 回とすると、原理的には形状偏差は $1/n$ 程度に低減される為、例えば測定回数を 12 回とすると、基準球の形状偏差の影響は、25 ~ 15 nm 程度となる。これは、プローブ球の誤差補正マップを 25 ~ 15 nm 程度の不確かさで算出できることを意味している。

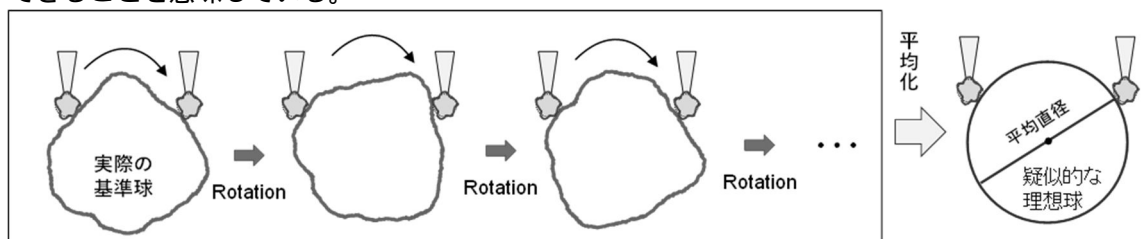


図 1 ランダムボール法によるプローブ球校正

(2)密度測定による手法では、基準球の平均直径を、密度測定と質量測定を介して決定する。基準球の体積を V 、密度を ρ 、質量を m とすると、平均直径 d は、

$$d = 2 \times \left(\frac{3}{4\pi} \times V \right)^{\frac{1}{3}} = 2 \times \left(\frac{3}{4\pi} \times \frac{m}{\rho} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

と与えられ、高精度な密度及び質量測定により、高精度に基準球の平均直径を決定できる。式(1)から分かるように、密度測定及び質量測定の相対不確かさの 1/3 が、基準球の平均直径の相対不確かさに寄与する。

本提案手法のポイントは、長さのディメンジョンを含んでいる密度値の高精度測定にある。ここでは高精度に密度を測定する手法として、圧力浮遊法と液中ひょう量法を用いる。圧力浮遊法は、図 2 に示す様に、固体試料とほぼ等しい密度の液体中に、標準試料と測定試料を浮遊させ、その浮遊高さの差から標準試料とのわずかな密度差を算出するもので、 10^{-7} レベルの相対不確かさで密度差の測定が可能である。そして、超高精度質量測定と組み合わせることにより高精度に体積値を決定する。

(3) μ CMM は、アップの原理に従い、レーザ干渉計を用いた XYZ 直交三軸のプロープ(または被検物)移動量測定とプロープ検出量の合成で形状測定が行われる。ナノ精度フリーフォーム形状測定を実現するためには、レーザ測長の基準として用いるパーミラー(XY 軸)やオプチカルフラット(Z 軸)の形状精度、XYZ 軸の各軸直交精度が無視出来ないレベルとなる。そこで、以下の高精度幾何ゲージを製作し、空間座標補正法の開発に取り組む。

⑦平面基準ミラー：平面度 6.3 nm(/100)

⑧XY 直交補正基準器：自己校正型角度校正装置(産総研保有技術)と形状測定装置を組み合わせることで、0.2 μ rad の不確かさ(通常 5 μ rad 程度の不確かさ)で直角基準器を校正し、 μ CMM の XY 直交補正を実現する。

⑨XZ・YZ 直交補正基準器：2 平面(45 度のなす角)で構成される角度基準器を角度標準により校正し、 μ CMM の XZ・YZ 直交補正を実現する。

4. 研究成果

まず、直径約 30 mm のシリコン単結晶球(基準球)において、圧力浮遊法による高精度な密度値測定に取り組み、超高精度な標準シリコン球(1 kg)を密度測定の標準試料とすることで、 10^{-7} レベルの相対不確かさでの密度値の決定に成功するとともに、超高精度質量測定と組み合わせることにより体積値を決定し、複数個のシリコン基準球に対して、平均直径値を高精度(不確かさ 数 nm)に算出することに成功した。

さらに、算出されたシリコン基準球の平均直径値の妥当性検証に向けて、レーザ干渉計を搭載した横型 μ CMM による高精度球直径測定システムの構築にも取り組んだ。構築システムでは、表面粗さが小さくより高精度に値付けが可能なシリコンを材料とするブロックゲージを作成し、そのシリコン製ブロックゲージの値付けを行うとともに、そのシリコン製のブロックゲージを参照標準として横型 μ CMM のプロープ校正を行うことで、約 8 nm の不確かさで球直径を校正できるシステムを実現した。

さらに、マイクロ CMM の空間座標補正に必要となる平面基準ミラー、XY 直交補正基準器、XZ・YZ 直交補正基準器を設計・製作するとともに、本研究での最終ターゲットであるマイクロ CMM による自由曲面形状測定において、その精度評価の際に比較対象として必要となる球面フィジーク干渉計の高精度化も達成した。

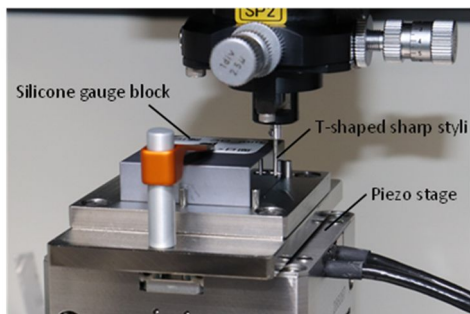


図 3 シリコンゲージによる横型 μ CMM のプロープ校正

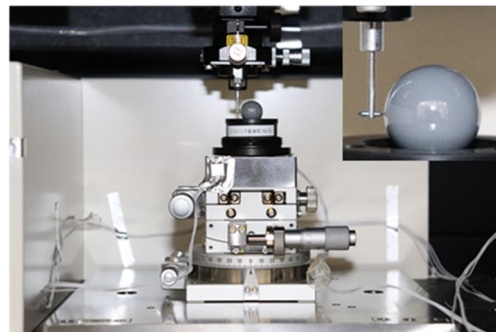


図 4 横型 μ CMM による球直径校正

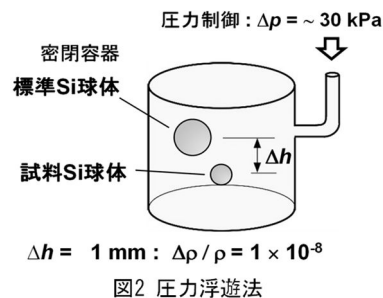


図 2 圧力浮遊法

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yohan Kondo, Akiko Hirai and Bitou Youichi	4. 巻 59
2. 論文標題 Two-point diameter calibration of a sphere using a micro-coordinate measuring machine at NMIJ	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Metrologia	6. 最初と最後の頁 24005
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1088/1681-7575/ac579e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 近藤余範, 川嶋なつみ, 平井亜紀子, 尾藤洋一
2. 発表標題 マイクロCMMを用いた球直径測定に関する研究-T型先鋭スタイラスの開発
3. 学会等名 精密工学会秋季大会講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 近藤余範, 川嶋なつみ, 平井亜紀子, 尾藤洋一
2. 発表標題 マイクロCMMを用いた球直径測定に関する研究-ブロックゲージ表面粗さの影響について-
3. 学会等名 精密工学会春季大会講演論文集
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	近藤 余範 (Yohan Kondo) (10586316)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	早稲田 篤 (Atsushi Waseda) (20272172)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	
研究分担者	倉本 直樹 (Naoki Kuramoto) (60356938)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・首席研究員 (82626)	
研究分担者	水島 茂喜 (Shigeki Mizushima) (60358091)	国立研究開発法人産業技術総合研究所・計量標準総合センター・主任研究員 (82626)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関