

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：23201
研究種目：基盤研究(C)（一般）
研究期間：2020～2022
課題番号：20K04195
研究課題名（和文）回転基準球を用いたマイクロプローブ三次元形状のナノ精度その場校正に関する研究

研究課題名（英文）In-situ calibration of microprobe with nanometric accuracy using a rotating reference sphere

研究代表者
伊東 聡（Ito, So）

富山県立大学・工学部・准教授

研究者番号：00624818
交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、接触式マイクロプローブ先端測定子の形状誤差をnm精度で計測し、micro-CMMによる三次元計測のnmオーダー測定精度保証への応用を目的としたマイクロプローブ校正法の開発に取り組んだ。プローブ校正用基準球にZ軸周りの角度変化を加えながら取得した測定点座標を演算処理することにより、プローブ球と基準球の形状誤差はプロービング座標から自律的に取得することが可能であった。提案手法の実行可能性はシミュレーションと実験により検証され、nmオーダーの測定の不確かさを達成することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

三次元測定機(CMM)による計測において、現在主流のマスタ球を用いたプローブ球校正では計測結果にマスタ球の形状誤差が含まれるため高精度化に限界が生じる。本研究の提案手法は、プローブ球校正結果からプローブ球形状誤差成分のみを自律的に抽出するためにZ軸周りに回転可能な基準球を用いたプローブ校正法が開発された。本手法はプローブ校正用基準器の精度に依存しないプローブ校正を実現でき、測定点座標に基づくためプローブの原理や種類に依存しない。そのためマイクロプローブを含めた様々な触覚式プローブへの応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this research, a calibration method for the tip ball of the microprobing system utilized for the micro-CMMs has been developed by using a rotating reference sphere. The form error between the probe tip ball and the reference sphere could be obtained autonomously based on the probing coordinates measured while applying posture changes around the Z axis of the reference sphere. The feasibility of the proposed method was verified by simulations and experiments, and a measurement uncertainty of nm order was achieved.

研究分野：計測工学

キーワード：回転基準球 校正 マイクロプローブ 三次元測定 CMM micro-CMM

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

次世代高効率内燃機関の燃料噴射装置や 3D プリンタ等に用いられる微小ノズル開孔は緻密な制御のために sub- μm オーダの形状や寸法の精度が要求されている。 μm スケールの微細精密部品の三次元測定における要求は sub- μm から nm オーダにまで微細化・精密化している。直径 100 μm 未満の球状測定子を有する接触式マイクロプローブを用いた三次元測定機は micro-CMM (micro-Coordinate Measuring Machine) と呼ばれ、高い測定精度と高アスペクト比の深穴や溝構造の内壁や底部に対する優れたアクセス性のため、複雑形状を有する小型部品に有効な三次元計測技術として世界各国の法定計量機関や大学において研究が進められている。

CMM や micro-CMM による測定では、被測定箇所寸法及び形状はプロービング座標とプローブ先端球直径に基づいて算出される。一般的な CMM のプローブ球校正は直径と真円度が校正されたマスタ球上でプロービングし、マスタ球との比較校正によってプローブ球の直径と真球度が校正される。そのため、プローブ球校正の不確かさには、マスタ球の形状誤差に由来する分離不可能な不確かさ要素が含まれ、CMM における測定精度向上を妨げる要因となっている。巨視的な CMM 用接触式プローブでは、スタイラス部分のみプローブから取り外し、プローブ先端測定子部分の寸法や形状、幾何公差等を測定することによりプローブ先端球自体の真球度を測定することは可能である。しかしながら、スタイラスをプロービングシステムならびに CMM に設置する際にプローブの取付誤差や姿勢誤差が生じるため、プローブ先端球の形状誤差データを有効に活用することが困難である。また、micro-CMM に用いるマイクロプロービングシステムは、小型化のためにスタイラスと接触検出用センサが一体化されており、スタイラスをプロービングシステムから取り外して測定することが困難である。本研究課題の遂行にあたり、測定の効率化や精度向上のためにはマイクロプロービングシステムのスタイラス先端測定子を micro-CMM 上において直径及び形状の両方を計測できることが有効と仮定した。

2. 研究の目的

本研究では、micro-CMM により校正用基準器上で取得された測定点座標に基づいてプローブ球の平均直径及び形状誤差の同時測定を行い、プロービング座標をプローブ球形状誤差に基づいて補正を実施することで三次元測定の nm 精度保証の実現を目的とした。マイクロプローブを用いた micro-CMM にも適用可能なプローブ測定子の形状誤差を達成するために、「回転基準器測定法」と名付けた独自のプローブ測定法の開発と測定不確かさに基づいた有効性の検証に取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) 回転基準器を用いたプローブ測定子形状誤差の測定

一般的な CMM 用接触式プローブのスタイラス先端球状測定子の直径と形状誤差(真球度)の評価方法は、JIS B 7440-5 : 2013 や ISO 10360-5 : 2010 で規格化されており、校正済みマスタ球上で 25 点以上プロービングを行うことで測定し、プロービング座標に対する球の最小二乗近似を適用することによりスタイラス測定子の形状誤差を算出する。従来のプローブ校正法ではマスタ球との比較校正によりプローブ球の直径と真球度が算出される。しかしながら、プローブ球の校正結果にはプローブ球の形状誤差のみならずマスタ球の形状誤差もまた含まれる。CMM 上に固定されたマスタ球を用いる従来の校正法では、プロービング座標ごとにプローブ球とマスタ球の接触点が異なるため、校正結果からプローブ球とマスタ球の形状誤差を分離できない(図 1)。そこで本研究では Z 軸周りに回転可能な校正用基準球を CMM 上に設置し、基準球に回転運動を加えて取得したプロービング座標を演算処理することによって、プローブ球と基準球の形状誤差を自律的に分離する方法を開発した。図 2 に示すように、仮想的にプローブ球上の同一箇所が基準球と接触してプロービングすると、プローブ球の形状誤差を含まない基準球の形状誤差を取得できる。しかしながら、実際のプローブは図 1 のように Z 軸周りに回転させながらプロービングを行うことはできないため、本研究では基準球を Z 軸周りに回転させることにより

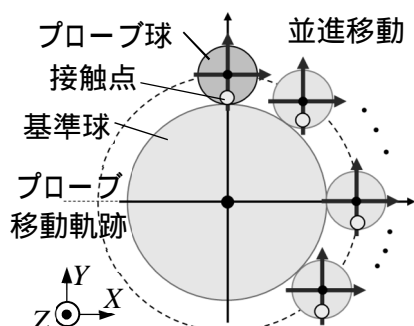


図 1. 一般的なプローブ校正法

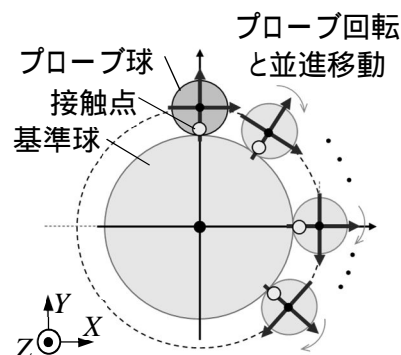


図 2. 回転基準球測定法の概念図

ローブ球の Z 軸周りに回転と同様の測定結果を得ることを試みた。基準球に Z 軸周りに回転角度変化を与えると、プローブと基準球の接触点に変化する。プローブ球上の同一箇所が接触する場合を想定すると、プロービング時におけるプローブ球中心-基準球中心間距離は基準球の回転前後で変化する。この距離変化は基準球の直径変化、すなわち形状誤差に相当する。基準球の回転角度当たりの直径変化を積分することにより、プローブ球形状誤差を含まない基準球の形状誤差を算出することができる。また、プロービング座標から基準球形状誤差成分とプローブ球及び基準球の平均直径を差し引くことによって、プローブ球の形状誤差成分のみを分離可能であり、プローブ球の絶対形状を取得できる。

(2)表面相互作用力検出型マイクロプローブの高精度化

本研究では μm サイズ微小構造物の三次元計測を行うために、独自に開発したマイクロプロービングシステムを用いた micro-CMM を開発した。本研究では、測定対象物表面に対して平行方向に振動させたマイクロプローブ先端が測定対象物表面に nm 領域まで接近した時に局所的にはたらく相互作用力を検出し、プロービングのトリガ信号に用いる表面相互作用力検出型マイクロプローブを開発し、微細構造物の三次元測定における有効性を検証した。表面相互作用力検出型マイクロプローブは、測定対象物表面 nm 領域においてプローブ球に局所的にはたらくファンデルワールス力や静電気力、水膜層による吸着力を高感度に検出可能であることから、接触式マイクロプローブと比較し低測定力と高感度化を実現できる。一方、本研究の取り組みにおいて、測定物表面に対するプローブ接近方向がプロービングの精度や繰り返し性に影響を及ぼすことが明らかになった。前述のプローブ球の形状誤差測定において、プロービング精度の接近方向依存性は形状誤差との判別が困難となり、測定不確かさ向上の妨げとなる事が予想された。そこで本研究では、微細穴内部でプロービングを行うことにより、プローブ接近方向とプロービング繰り返し性の関係を調査した。

4. 研究成果

本研究では、接触式プロービングシステムのスタイラス先端に取り付けられた球状測定子系形状を三次元測定機上で精密に計測するために、Z 軸周りに回転可能な基準球を用いたプローブ先端球形状誤差測定方法の開発に取り組んだ。また、マイクロプローブを用いたプロービング時における測定物表面に対するプローブ接近方向がプロービング精度に与える影響を調査するために、微細穴内でのプロービング特性評価を実施した。これらの取り組みの結果、以下の成果を得た。

(1)Z 軸周りに回転可能な基準器上においてプロービングを行い、取得された測定点座標から基準球回転角度に対するプローブ球中心-基準球中心間距離の変化量を取得し、演算処理することによって、プローブ球及び基準球の形状誤差を分離可能であることが確認された。本手法は三次元測定機以外の外部センサを用いることなく、測定点座標に基づいてプローブ球形状誤差を自律的に計測可能であることから、プロービングシステムのセンサ原理やスタイラス先端球の材質に依存することなく、様々な三次元測定機に応用可能な見込みを得ることができた。また、測定点数と同周期の形状誤差成分が測定不可能な課題に対して、内挿法の適用した手法を開発した。しかしながら、マイクロプロービングシステムを用いた三次元測定機においては、測定物表面に対するプローブ接近方向がプロービングの繰り返し性や精度に影響を及ぼすことが明らかとなり、本研究で提案する回転基準器法を micro-CMM に適用するためにはプロービング特性の更なる調査が必要であることが明らかとなった。

(2)本研究では高感度・低測定力な触覚式マイクロプロービングシステムを実現するために、表面相互作用力検出型マイクロプローブを採用した。本研究で採用したマイクロプロービングシステムでは、測定物表面に対するプローブ接近方向が垂直でない場合、プロービングの繰り返し性が低下することが確認された。測定物表面に対するプローブ接近方向とプロービング繰り返し性の関係を調査するために、直径 100 μm 未満の微細穴内部でのプロービング検出を実施し、繰り返し性及び測定の不確かさの評価を実施した。その結果、微細穴内部でのプロービングにおいて、プロービングの繰り返し性はプローブ接近方向と微細穴法線方向の不一致の増加に伴って低下することが確認された。この結果、マイクロプローブによる適切なプローブ接近方向の指針が明らかになり、micro-CMM による精密三次元測定のためのプロービング方法の知見を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Aruga Masakazu, Ito So, Kato Daichi, Matsumoto Kimihisa, Kamiya Kazuhide	4. 巻 3
2. 論文標題 Investigation of probing repeatability inside a micro-hole by changing probe approach direction for a local surface interaction force detection type microprobe	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Frontiers in Manufacturing Technology	6. 最初と最後の頁 01-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fmtec.2023.1104742	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 ARUGA Masakazu, ITO So, TSUGAWA Fuma, MATSUMOTO Kimihisa, KAMIYA Kazuhide	4. 巻 17
2. 論文標題 Expansion of measurement area of hand-scraped surface using stitching method for oblique-incident interferometer	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing	6. 最初と最後の頁 00209-01-10
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/jamdsm.2023jamdsm0010	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Matsumoto Kimihisa, Kamiya Kazuhide, Ito So, Yasuda Hidehiro	4. 巻 61
2. 論文標題 Preparation of undecanoic acid-terminated Si particles from rice husks	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 SB1009 ~ SB1009
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.35848/1347-4065/ac2e7c	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 -

1. 著者名 Ito So, Kameoka Daiki, Matsumoto Kimihisa, Kamiya Kazuhide	4. 巻 4
2. 論文標題 Design and Development of Oblique-Incident Interferometer for Form Measurement of Hand-Scraped Surfaces	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-020-00089-w	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21件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 6件）

1. 発表者名 Masakazu Aruga, So Ito, Takehiro Tomioka, Kimihisa Matsumoto, Kazuhide Kamiya
2. 発表標題 Three-dimensional measurement of a micro-hole by a microprobing system with method of local surface interaction force detection
3. 学会等名 The 19th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有賀正和, 伊東聡, 富岡剛大, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 マイクロプローブを用いたレーザ加工微細穴内部の三次元計測
3. 学会等名 第14回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 土田昂季, 伊東聡, 豊本菜, 有賀正和, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 反転法の考え方を導入したプローブ先端球の形状誤差測定
3. 学会等名 第14回生産加工・工作機械部門講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 So Ito, Daichi Kato, Kimihisa Matsumoto, Kazuhide Kamiya
2. 発表標題 Evaluation of characteristics of microprobing system using detection of surface interaction force
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Masakazu Aruga, So Ito, Kimihisa Matsumoto, Kazuhide Kamiya
2. 発表標題 The study of wide-range measurement of the hand-scraped surface plate using a stitching method
3. 学会等名 The 10th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kimihiisa Matsumoto, Kazuhide Kamiya, So Ito, Hidehiro Yasuda
2. 発表標題 Preparation of undecenoic-acid-terminated Si nanocrystals from rice husks
3. 学会等名 The 8th International Symposium on Organic and Inorganic Electronic Materials and Related Nanotechnologies (EM-NANO 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東聡, 有賀正和, 津川楓馬
2. 発表標題 斜入射干渉計によるきさげ加工面のマイクロ表面形状の測定
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊東聡
2. 発表標題 小型斜入射干渉計の導入によるきさげ加工面の精密測定に関する研究
3. 学会等名 Optics & Photonics Japan 2021 (OPJ2021) (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東聡
2. 発表標題 きさげ面および微細穴の知的センシング
3. 学会等名 公益社団法人 砥粒加工学会 未来志向形精密加工工具の開発に関する専門委員会 (FT専門委員会) 第38回オンライン研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東聡, 山下大輔, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 回転基準球を用いたCMMプローブ先端球の形状測定 第2報 真円度測定機との比較による算出原理の検証
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有賀正和, 伊東聡, 富岡剛大, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 表面相互作用力検出型マイクロプローブによるレーザ加工微細穴の内径測定 第2報 プローブ接近方向によるプロービング精度変化の検証
3. 学会等名 2022年度精密工学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 有賀正和, 伊東聡, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 表面相互作用力検出型マイクロプローブを用いた微細穴内部の三次元測定に関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊東聡, 加藤大智, 有賀正和, 神谷和秀, 松本公久
2. 発表標題 表面相互作用力検出型マイクロプローブによるレーザ加工微細穴の内径測定
3. 学会等名 2021年度精密工学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 So Ito, Daichi Kato, Daisuke Tsutsumi, Kazuhide Kamiya, Kimihisa Matsumoto
2. 発表標題 Uncertainty evaluation of form error measurement of probe tip ball using a rotating reference sphere
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Daichi Kato, So Ito, Kazuhide Kamiya, Kimihisa Matsumoto
2. 発表標題 Dimensional measurement of micrometer-scale aperture using a surface interaction force detection type microprobe
3. 学会等名 18th International Conference on Precision Engineering (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東聡, 山下大輔, 神谷和秀, 松本公久
2. 発表標題 回転基準球を用いたCMMプローブ先端球の形状測定 -第1報 内挿法の導入による形状復元の検証-
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季大会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 有賀正和, 伊東聡, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 ステッチング処理を用いたきさげ加工面の広範囲測定に関する研究
3. 学会等名 2021年度精密工学会春季学術講演会 第28回「学生会員卒業研究発表講演会」
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 上野貴也, 伊東聡, 加藤大智, 松本公久, 神谷和秀
2. 発表標題 ピンゲージを用いたマイクロプローブ先端形状の測定
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山下大輔, 伊東聡, 神谷和秀, 松本公久
2. 発表標題 回転基準球を用いたCMMプローブ先端形状の精密計測 (第1報) 内挿法を用いた形状誤差分離の高精度化に関する検証
3. 学会等名 2020年度精密工学会北陸信越支部学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東聡, 亀岡大貴, 有賀正和, 神谷和秀, 松本公久
2. 発表標題 きさげ面形状測定のための斜入射干渉計の開発
3. 学会等名 2020年度砥粒加工学会学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊東聡, 加藤大智, 上野貴也, 神谷和秀, 松本公久
2. 発表標題 表面相互作用力検出型マイクロプローブを用いた微小開孔の内径測定に関する研究
3. 学会等名 2020年度精密工学会秋季学術講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

富山県立大学 https://www.pu-toyama.ac.jp/wp-content/uploads/2018/12/ac704fad25b54cbdd820b072d0187e34-1.pdf 富山県立大学 研究室ガイドブック https://www.pu-toyama.ac.jp/wp-content/uploads/2018/12/bf2ebb4d27af4dbdce2b5623451a4da0.pdf 富山県立大学工学部知能ロボット工学科 https://isd.pu-toyama.ac.jp/~ito/

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

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
---------	---------