

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 20 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2015

課題番号：26820018

研究課題名(和文) マイクロ液柱の自律形成を利用した高感度検出プローブによる3次元形状計測に関する研究

研究課題名(英文) Study of three dimensional measurement by utilizing a high-sensitive microprobe based on the micro liquid pillar

研究代表者

伊東 聡 (Ito, So)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：00624818

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究題目では、測定対象物表面に存在する厚さ10 nm程度の水膜層によってプローブ先端に自律的に形成されるマイクロ液柱に起因する局所的な引力の検出を利用することにより、ナノメートルオーダー分解能かつ非接触状態で計測可能な高感度プローブによるマイクロ寸法計測システムの開発に取り組んだ。ブロックゲージを用いたプローブ先端球有効直径のその場校正法を提案し、環境変化による水膜層厚さの違いによって生じる測定誤差の保証を行った。また寸法測定システムに存在するアライメント誤差の影響について、幾何学モデルを構築して分析し、不確かさ評価に基づいて測定精度が検証された。

研究成果の概要(英文)：In this research, a precision measurement system by using a microprobe has been developed for dimensional measurement of micrometric features. The microprobe can detect local attractive force owing to thin water layer that exists at the measuring surface. Since the thickness of the water layer is several tens nanometer in general, the probe can realize dimensional measurement with nanometric resolution. In order to reduce the influence of the difference of thickness of water layer, on-line qualification of the effective diameter of the probe tip ball has introduced. With respect to the assurance of the measurement results, error analysis was carried out based on the geometrical model of the measurement system. Consequently, nanometric measurement uncertainty could be achieved for the dimensional measurement of micro-features.

研究分野：工学

キーワード：計測工学 超精密計測 表面・界面物性 マイクロCMM 寸法計測 マイクロスリット ナノメトロロジ
- マイクロプローブ

1. 研究開始当初の背景

マイクロレンズアレイなどの光学素子はマイクロスケール微細構造により形成され、素子の性能は寸法や形状の精度に大きく影響する。近年では、広範囲に創成されたマイクロ開口内部や急峻な傾斜形状、とりわけスリット溝内部や深穴などの高アスペクト比形状を有する形状の精密寸法測定への需要がますます高まっている。接触式プローブを用いたマイクロ3次元座標測定機(micro-CMM)や原子間力顕微鏡(AFM)はナノメートル分解能を有する三次元測定機として広く使用されている。しかしながら、プローブ先端と測定表面との接触は測定対象物の損傷やプローブ先端の摩耗を生じるため、ナノメートル級の超精密計測では測定誤差の原因となっている。また従来のmicro-CMMやAFMの測定範囲は位置決めステージの動作範囲により制限されるが、一般的には大きくても数ミリメートル程度である。一方、マイクロ光学素子の製造に用いられる金型や工具には数100mm超の広測定範囲が要求されており、測定範囲の拡大と測定精度保証の両立が課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、測定対象表面に存在するナノメートル水膜層によってプローブ先端との間に自律的に形成されるマイクロ液柱の吸着力による引力を高感度に検出する多軸検出プローブの開発、および高感度プローブを用いたマイクロ構造物の3次元精密寸法計測システムの構築を目的とする。プローブの非剛性軸方向振動を用いた多軸高感度検出法を導入し、高アスペクト比形状を有するマイクロ構造物の内部寸法測定を非接触状態で行うためのマイクロプローブを構築する。さらに、寸法測定結果の不確かさ評価を行って、マイクロ構造物の3次元寸法測定における誤差要素を分析し、測定システムや測定環境の変化、プローブの個体差等に起因する誤差の補正方法について検討する。

3. 研究の方法

(1) マイクロ液柱検出高感度検出プローブ

本研究では、熱引き加工によって先鋭化された毛細ガラス管の先端にマイクロガラス球を接着し、微小球付きマイクロプローブとして使用した。マイクロプローブは振動を検出するために音叉型水晶振動子(TF-QCR)の片方の梁に接着され、水晶の圧電効果を用いて振動が検出される。マイクロスタイラスはTF-QCRと共に加振用圧電素子によって非剛性軸方向に振動され、プローブは振動方向が測定対象表面に対して平行方向となるように設置される(図1)。プローブ先端球が測定対象物表面の水膜層に接触すると、プローブ先端球には吸着力による引力が生じ、プローブ振動周波数に変化が生じる(図2)。このとき、プローブ振動周波数の微小変化を高感度に

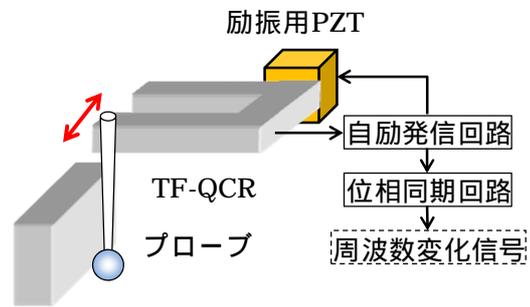


図1. マイクロプローブの構成

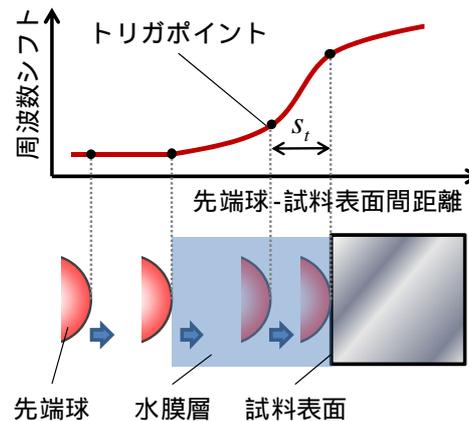


図2. プローブ振動周波数の変化

検出することにより、プローブ先端球と測定対象物表面とのナノスケール接近を非接触状態で検出できる。プローブ振動周波数の変化量の閾値を設定することで、マイクロプローブをタッチトリガプローブとして用いることができる。

(2) 広動作範囲寸法測定システム

マイクロ液柱による引力検出を用いたマイクロプローブでは、一般的なCMMと同様に、プローブ-測定対象のプロービング座標を位置決めセンサにより検出し、測定個所の寸法を算出する。長ストロークステージは測定範囲拡大には有効であるが、プロービング座標の計測精度は位置決め機構の運動誤差や位置決めセンサとのアップ誤差による計測誤差に影響される。本研究では幅100 μm 未満のマイクロスリットを測定対象とした溝幅精密測定システムの構築において、長ストロークリニアスライドと微動精密直動ステージを組み合わせたプローブ広範囲位置決め機構を構築し(図3)、200mm以上の測定範囲を実現した。スリットの長手方向のプローブ位置決めには、超精密加工機や広範囲測定器に用いられるエアベアリング町道スライドを採用した。溝幅測定のためのプロービング方向には、圧電素子駆動の高分解能直動ステージを使用した。プロービング方向のステージ変位はプローブ駆動軸と同一軸上に配置されたレーザ干渉計により測定することでサブナノメートルの分解能を実現した。測定精度を保証するために、各ステージの運動

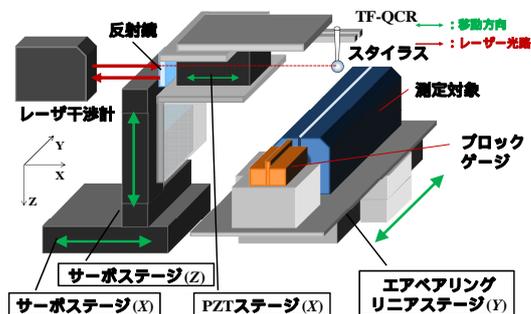


図3. マイクロプローブを用いたマイクロスリット溝幅の精密測定システム

誤差およびステージ間のアライメント誤差が評価された。測定誤差を検証するために、溝幅測定の幾何学モデルが提案され、ステージの運動誤差とアライメント誤差の評価結果に基づいた測定精度の評価を行った。

(3) プローブ有効直径のその場校正

プローブ先端に形成されるマイクロ液柱は先端球および測定対象表面の水膜層厚さに影響され、水膜層厚さは測定環境の温度や湿度によって変化する。またプロービング精度はプローブの感度やプローブアライメントにも影響されるため、先端球の実直径ではなく、プロービング位置における有効直径の評価が有効である。本研究題目では校正済みブロックゲージを測定システムのリニアスライド上に設置し、プローブ先端球有効直径の校正と測定対象物の寸法計測を連続して行うことで、測定環境変化やプローブの個体差に起因する測定誤差の低減を試みた。

4. 研究成果

(1) プローブ先端に自律的に形成されるマイクロ液柱による引力をプローブ振動の周波数変化として検出するマイクロプローブを開発した。プローブは自励発振回路によって共振周波数での振動が維持される。プローブ振動の周波数変化は位相同期回路を用いて検出され、高い Q 値を有する振動プローブにおいて高感度かつ高速な応答が達成された。図4は平面度が保証されたブロックゲージ上で位置を変えながら10回ずつプロービングを行った時の平均値とばらつきを示す。開発したマイクロプローブによるプロービングではナノメートルオーダーの繰り返し性が達成できることが確認された。

(2) マイクロ液柱検出高感度プローブと精密位置決めステージにより構成されたマイクロスリット溝幅の精密測定計測システムを構築し、幅100 μm 未満かつ長さ100mm超の長尺マイクロスリット溝幅全体をプロービング可能とした。構築したマイクロスリット溝幅の精密測定システムにおける各ステージの運動誤差とステージ間のアライメント誤差を測定し、溝幅測定における誤差として

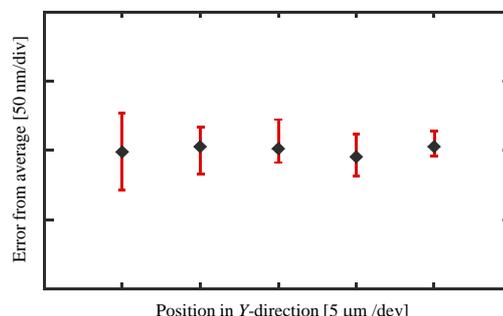


図4. プロービング繰り返し性の評価

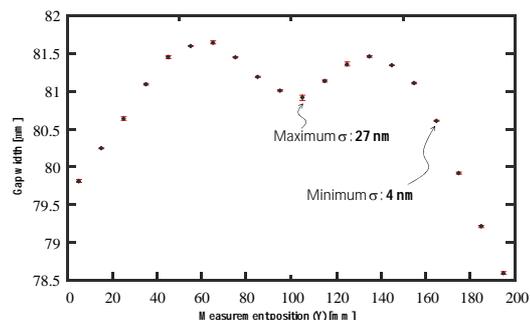


図5. 長さ200mmマイクロスリットの溝幅分布の測定結果

の影響が調査された。図5は幅85mm、長さ200mmのマイクロスリット溝幅の分布測定結果を示す。100mm超の長さを有するマイクロスリットに対して溝幅の精密計測が実現できたことが確認できる。測定結果は溝幅測定システムの幾何学モデルに基づいて位置決めステージに起因するコサイン誤差やレーザー干渉計のアッペ誤差の影響が調査された。その結果、ステージの運動誤差やアライメント誤差に起因するマイクロスリット溝幅の測定誤差は50nm未満であり、ナノメートルオーダーの精密な溝幅測定が実施可能であることが実証された。

(3) マイクロスリットの溝幅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た。プローブのアライメント誤差や個体差、水膜層厚さの変化等によって生じるプロービング誤差を低減するために、マイクロプローブ先端球の有効直径のその場校正を提案した。測定対象物が置かれたリニアステージと同一テーブル上に設置されたブロックゲージによりプローブ球先端球を校正後、直ちに連続して溝幅測定を行うことでプローブ球の精度が保証された高精度な測定を行うことが可能であり、100nm未満の測定不確かさを実現することが可能であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

1. So Ito, Yuan-Liu Chen, Yuki Shimizu, Hirotaka Kikuchi, Wei Gao, Kazuhiko Takahashi, Toshihiko Kanayama, Kunmei Arakawa, and Atsushi Hayashi, Uncertainty analysis of slot die coater gap width measurement by using a shear mode micro-probing system, Precision Engineering, 査読有 Vol. 43, 2016, pp. 525-529. doi:10.1016/j.precisioneng.2015.09.016

〔学会発表〕(計 8 件)

1. 伊東聡, 菊地浩貴, 陳遠流, 清水裕樹, 高偉, 高橋和彦, 金山利彦, 荒川訓明, 林敦, スロットダイコーターの精密計測に関する研究 第 2 報 マイクロプローブによる溝幅分布測定システムの構築", 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2016 年 3 月 15-17 日, 東京理科大学, 千葉.
2. So Ito, Hirotaka Kikuchi, Yuan-Liu Chen, Yuki Shimizu, Wei Gao, Micro-probing system for slit width measurement by using a shear-force detection, The 8th International Conference on Leading Edge Manufacturing in 21st Century (LEM21), 2015, October 18-21, 京都リサーチパーク, Kyoto, Japan.
3. So Ito, Hirotaka Kikuchi, Wei Gao, Kazuhiko Takahashi, Toshihiko Kanayama, Kunmei Arakawa, Atsushi Hayashi, On-line Qualification of Probe Tip Ball Diameter for Gap Width Measurement, 12th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2015), 2015, September 22-25, Taipei, Taiwan.
4. 菊地浩貴, 伊東聡, 高偉, 高橋和彦, 金山利彦, 荒川訓明, 林敦, スロットダイコーターの精密計測に関する研究-第 1 報 測定子の有効直径のオンライン測定-, 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 4-6 日, 東北大学, 宮城.
5. 菊地浩貴, 伊東聡, 高偉, 微小球付きナノピペットプローブを用いた形状計測に関する研究 - 第 4 報 周波数変調プローブの三軸方向の感度評価 -, 2014 年度精密工学会東北支部学術講演会, 2014 年 11 月 29 日, 弘前大学, 青森県弘前市.
6. So Ito, Hirotaka Kikuchi, Issei Kodama and Wei Gao, Dimensional Measurement of Micro Pinhole by Probing System with a Nanopipette Ball Stylus, The 6th International

Conference on Positioning Technology (ICPT2014), 2014, November 18-21, 北九州国際会議場, Kitakyusyu, Japan.

7. 伊東聡, 小玉一成, 菊地浩貴, 高偉, マイクロ構造物寸法計測のための微小球付きナノピペットプローブの開発, 2014 年度砥粒加工学会学術講演会 (ABTEC2014), 2014 年 9 月 12 日, 岩手大学, 岩手県盛岡市.
8. So Ito, Issei Kodama, Hirotaka Kikuchi and Wei Gao, Development of a nanopipette ball probe for Micro-CMM, International Symposium on Micro/Nano Mechanical Machining and Manufacturing (ISMNM2014), 2014, April 21-24, Xi'an, China.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.nano.mech.tohoku.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊東 聡 (ITO, SO)

東北大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号: 00624818