

令和元年6月5日現在

機関番号：23201

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05999

研究課題名（和文）ツインマイクロプローブの非接触高速走査と実時空間校正による長尺微小溝幅の絶対計測

研究課題名（英文）Absolute measurement of long micro slit width by non-contact type twin micro-probing systems with high speed scanning of twin micro probe and real time space calibration

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） 3,700,000円

研究成果の概要（和文）：マイクロスリットやマイクロピンホール等の微小開口部寸法は精密塗布工具やインジエクタ等の性能を決定付けるため、開口内部の精密計測が要求されている。本研究では、ナノメートル領域まで接近させた物体間に働く吸着力に着目した表面相互作用力検出型マイクロプローブを開発し、微小溝幅測定法とプローブ直径校正に基づく精度保証に関する研究に取り組んだ。本課題では、せん断方向に加振させたスタイラスによる表面相互作用力検出に基づき全方位ナノ分解能プロービングを達成した。また回転基準球によるプローブ先端球直径の実時空間校正法を考案し、実機による実行可能性を有することを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミクロンオーダーのスリットや開口を有する精密部品は、機能性材料のコーティングや内燃機関、化学・医薬品製造等に幅広く使用されており、マイクロ開口の形状や寸法の精度は機器や製品の性能や品質に影響を及ぼすことからナノメートル精度での測定が要求されている。本研究ではミクロンサイズの開孔内部を高感度かつ精密に直接計測可能なマイクロプローブを開発し、微小溝幅のナノ精度の計測及び精度保証に取り組んだ。本研究成果は複雑な形状を有するマイクロサイズ機械部品や工具の三次元精密計測の高精度化への貢献が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, a micro-probing system based on the detection of local interaction force was developed for precision dimensional measurement of micro-slit gap width. All direction probing detection was achieved by employing the vertical vibrating micro-styli. Furthermore, the developed microprobing system could realize nanometer-scale resolution on the distance detection between the probe tip and the surface of the workpiece. To ensure the accuracy of the dimensional measurement, the measurement method of the probe tip ball using a rotating reference sphere was proposed.

研究分野：計測工学

キーワード：計測工学 超精密計測 精密位置決め マイクロプローブ 実時空間校正 スロットダイ メトロロジ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) スロットダイは超精密研削加工された 2 枚の高精度ステンレス平板で構成された微小スリットを通して液体を基板の上に塗布する高精度薄膜塗布用工具であり、フラットパネルディスプレイや太陽電池、二次電池の製造において機能性材料のコーティングに用いられている。特に G10 と称される次世代大型ディスプレイ製造用途では、長さ 1000 mm 以上、溝幅 70 ~ 80 μm 程度の長尺かつ微小溝幅を有するスロットダイが用いられており、塗布品質管理の観点から 0.1 μm オーダーでの溝幅測定精度の実現が重要な課題となってきた。一般的な微小溝幅の測定には機械式すきまゲージが使用されているが、接触式のすきまゲージではマイクロスリット内面を構成する超精密研削面を接触により傷付ける恐れがあるため非接触状態における計測が要求されている。光学顕微鏡に代表される光学式計測は非接触かつ高速でスリット溝幅を計測できるが、回折限界によりナノメートル分解能での計測は不可能である。また光学顕微鏡に基づく溝幅測定法では、スリット内部の溝幅測定は困難という課題であった。非接触状態かつナノ分解能でのスリット内部溝幅測定を実現するために静電容量式非接触すきまゲージが開発されているが、センサ部分の厚みが 200 μm 以上であるため、前述の微小な溝幅を有するマイクロスリットやスロットダイの計測への適用が困難である。

(2) マイクロ三次元測定機(Micro-Coordinate Measuring Machine, micro-CMM)は高アスペクト比形状マイクロプローブにより、微小溝幅内部寸法測定にも応用されている。しかしながら、従来の Micro-CMM の測定範囲は最大 10 mm \times 10 mm \times 10 mm 程度のため、全長 1000 mm 以上のスロットダイ全長測定への適用は困難である。また多くの Micro-CMM は接触式プローブを使用するため、上述の通り、接触に起因する測定対象表面の損傷が問題となる。さらに物体表面には大気中湿度に由来する厚さ 10 ~ 数 10 nm 程度の水膜層が存在し、マイクロプローブの表面吸着や測定誤差の原因となる。水膜層厚さは測定環境湿度変化や材料表面等により変化する。その結果、Micro-CMM による測定結果には、水膜層厚さによる誤差が含まれるため精度保証が困難となり、市販の Micro-CMM においても数 10 台で製造中止となるなど使用の困難さが課題である。結果として表面水膜層の存在が Micro-CMM のナノメートル測定精度の実現を困難にしている。

2. 研究の目的

本研究では、大気中に置かれた測定対象物の表面に存在する水膜層により生じる吸着力に着目し、水膜層との相互作用力を積極的に検出する水膜層高感度検出型マイクロプローブを開発し、高速かつ高精度なマイクロスリット溝幅の測定とナノメートルオーダーの測定精度保証の達成を目的とした。高速かつ高精度なプロービングを実現するために、測定対象物表面に存在する厚さ数 nm の水膜層に由来する引力型相互作用力検出に基づく非接触プロービングを開発する。また開発したマイクロプローブによる溝幅等の寸法測定精度を保証するために、マイクロプローブ先端球の直径校正と計測を同一空間中で実施する実時空間校正の実証を行う。

3. 研究の方法

(1) ナノメートルオーダーの距離まで接近させた物体間には、ファンデルワールス力や静電気力等の非接触型相互作用力が作用する。本研究ではナノメートル領域でマイクロプローブ先端と測定対象物表面との間で局所的に作用する引力型相互作用力に着目した引力相互作用検出型非接触マイクロプローブの開発に取り組んだ。従来の研究より、マイクロメートル直径の微小先端球を有するマイクロプローブ先端を測定面に対して水平振動させた状態で表面に接近させると、大気中の湿度に由来する厚さ数 nm の水膜層の吸着力に起因する引力が作用し、プローブ振動の振幅や周波数が変化し、相互作用力を検出できることが明らかになっている。水膜層の吸着力に由来する引力型相互作用力の検出に基づくマイクロプローブでは、プローブ先端球と測定物表面との距離をナノメートルオーダーの分解能で検出可能であるが、測定可能方向の制限とプローブの表面吸着による測定時間増加という課題があった。本研究ではこれらの課題を解決するためにマイクロプローブの全方位検出化と高感度検出化に関する開発に取り組んだ。

(2) 図 1 に本研究で開発した全方位検出可能な表面相互作用力検出型マイクロプローブの原理を示す。従来の表面相互作用力の検出を用いたマイクロプローブでは、スロットダイ内壁の測定に関して、スタイラスを非剛性軸方向に振動させることでプローブ先端と試料測定面との間の水平振動を行っていた。その結果、マイクロプローブの検出可能軸はスタイラス振動方向に対して垂直な一方向に限定されていた。本研究課題ではスロットダイ内壁の測定を目的とした全方位検出可能を実現するために、スタイラスの剛性軸方向振動の基づき、スタイラス軸回りの全方位に対して検出感度を有する全方位

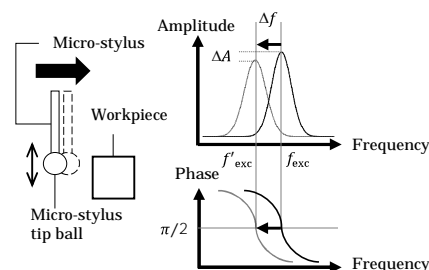


図 1 表面相互作用力検出型マイクロプローブの原理

検出型マイクロプローブを提案した。全方位検出型マイクロプローブはスロットダイ内壁などの垂直壁に対して、プローブ先端は軸回りの全方位で測定面と水平に振動するため、あらゆる方向からの接近に伴い生じる表面相互作用力を検出できる。接触式プローブでは、プローブ先端が測定物表面に完全に接触すると吸着が生じ、測定精度の低下や測定時間の増加の原因となるが、非接触状態で測定物の表面位置を高感度に検出することにより、プローブの表面吸着を減少させることができる。本研究では測定物表面とプローブ先端との間に働く相互作用力の検出により高感度かつ高分解能の表面位置検出を実現した。本研究課題では、表面相互作用力により変化するプローブ振動状態のうち周波数変化に着目した周波数変調 (Frequency modulation: FM) 検出法を採用した相互作用力の高感度検出システムの構築を行った。FM 検出法は相互作用力によるプローブ振動状態変化を高感度かつ応答性良く検出可能であることから、測定物表面検出における低測定力化と高精度化、測定時間短縮化を実現できる。

(3) 図 2 に本研究課題で作成した全方位検出表面相互作用力マイクロプローブの写真を示す。小型で高感度な相互作用力検出センサを構築するために、音叉型水晶振動子を利用したプロービングセンサを製作した。毛細ガラス管より成形されたマイクロシャフトの先端を白金フィラメントにより加熱することで直径 100 μm 未満の球状先端を形成し、微小先端球付きマイクロスタイラスとして使用した。マイクロスタイラスを音叉型水晶振動子の梁部分に接着し、水晶の圧電効果を用いてスタイラス振動を検出した。水晶振動子は振動の Q 値が非常に高いため、微弱な相互作用力を低雑音で高感度に検出でき、ナノメートルオーダーの変位検出への適用が困難であった。図 3 に本研究で開発した FM 検出を採用した高感度表面相互作用力検出型マイクロプローブを用いた精密計測システムの構成を示す。水晶振動子の圧電効果により検出されたマイクロスタイラスの振動は電流-電圧 (I-V) 変換回路により電圧信号への変換と信号増幅された後に自励発信回路へ入力され、マイクロプローブは共振周波数での Z 方向振動が維持される。プローブ振動の周波数変化は位相同期 (Phase-Locked Loop: PLL) 回路を用いて検出し、プロービングのトリガ信号として使用した。開発したマイクロプローブは精密位置決めステージにより X - Y - Z 軸方向に移動され、表面位置を検出したプローブ座標に基づき、測定対象物の寸法計測を行う。測定対象の寸法はプロービング座標とプローブ先端球直径に基づき算出されるため、マイクロプローブ球直径の校正が測定の不確かに影響を及ぼす。そこで本研究では、真円形状の反転法を参考にし、回転基準球を用いたプローブ直径の実時空間校正法を考案し、シミュレーションにより有効性を評価した。測定システム上にてプローブ校正と測定を連続して実施することにより、計測の誤差低減と精度保証を試みた。

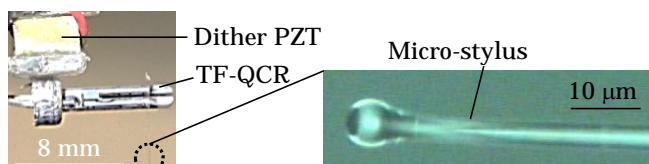


図 2 方位検出表面相互作用力マイクロプローブの構成

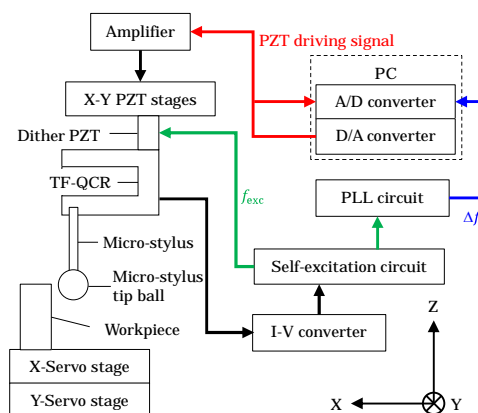


図 3 本研究で開発した三次元計測システムの構成

4. 研究成果

本研究では、測定物表面に対して水平方向に加振された微小先端球付きマイクロスタイラスを用いてプローブ先端-表面間に働く局所的な相互作用力を検出し、ナノメートル分解能で表面位置検出可能なマイクロプローブの開発とマイクロ構造物の精密寸法測定に関する研究に取り組み、以下の成果を得た。

(1) シミュレーションに基づきプローブ先端に作用する引力型表面相互作用力の大きさとプローブ振動状態変化の推定を行った。その結果、 10^{-6} N オーダの相互作用力がプローブ先端に働くことが推定された。また相互作用力の引力/斥力状態によってプローブ振動周波数の変化が異なることが予測された。これらのシミュレーション結果は、試作マイクロプローブによる実験結果と比較され、良い一致が確認された。

(2) 全方位検出マイクロプローブを試作し、分解能の評価と全方位検出実行可能性の検証が行われた。FM 検出法の採用により、ナノメートルオーダーの分解能で測定物の表面位置を検出可能であることが確認された。また円筒形状のピンゲージ周囲でプロービングを行うことにより、全方位プロービング検出の可能性と等方性の調査を行った。開発したマイクロプローブは Z 軸周りの全方位に対して測定物表面検出が可能であることが確認された。しかしながら、プロービング検出の繰り返し性は 1 μm 程度であり、超精密工具の三次元計測に要求される nm オーダ測定精度達成には、プロービングシステムの安定化、低ノイズ化等に取り組み必要があることが明らかになった。

(3) マイクロプローブ先端球の直径を測定機上で自律的に校正するために、回転基準器を用いたプローブ球直径の実時空間校正法を提案し、シミュレーションによって提案手法の有効性を調査した。本校正法では、校正用基準球を Z 軸周りに回転させることにより、基準球とプローブ先端球の直径誤差および基準球回転の運動誤差を演算処理により除去する方法を提案した。その結果、基準球の形状や回転の運動誤差の影響なく、三次元測定機で取得された座標に基づいて nm 精度でプローブ先端球直径校正が実施できる見込みを得た。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1 件)

So Ito, Min-Lei Li, Zhi-Gang Jia, Yuan-Liu Chen, Yuki Shimizu, Wei Gao, Surface Profile Measurement of Micro-Optics by Using a Long Stroke Atomic Force Microscope, 査読有, Applied Mechanics and Materials, Vol. 870, 2017, 102-107
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.870.102>

〔学会発表〕(計 10 件)

伊東聡, 堤大輔, 神谷和秀, 松本公久, 川堰宣隆, “回転基準球を用いた CMM プローブ先端球直径の精密計測に関する研究”, 2019 年度精密工学会春季学術講演会, 3 月 13-15 日, 東京電機大学, 東京, 2019.

So ITO, Yusuke SHIMA, Kimihisa MATSUMOTO and Kazuhide KAMIYA, “Study for multiaxial microprobing system based on the detection a local surface interaction force”, The 8th International Conference on Positioning Technology (ICPT2018), 2018, November 27-30, Kaohsiung, Taiwan.

Yusuke Shima, So Ito, Kazuhide Kamiya, Kimihisa Matsumoto, “Development of a microprobe using a detection of surface interaction force”, 17th International Conference on Precision Engineering (ICPE2018), 2018, November 12-18, Kamakura, Japan.

堤大輔, 島由丞, 伊東聡, 神谷和秀, 松本公久, 川堰宣隆, “回転基準球を用いた CMM プローブの直径の自律的な精密計測に関する研究”, 2018 年度精密工学会北陸信越支部学術講演会, 11 月 10 日, 信州大学, 長野, 2018.

伊東聡, 神谷和秀, 松本公久, 高偉, “せん断力検出型マイクロプローブに働く表面相互作用力に関する研究”, 2018 年度精密工学会秋季大会学術講演会, 3 月 15-17 日, 中央大学, 東京, 2018.

So Ito, Hirotaka Kikuchi, Wei Gao, “Study for the adhesion force of a microprobing system with the shear-mode detection”, 13th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (ISMTII2017), 2017, September 22-25, Xi'an, Shaanxi, China.

So Ito, Yuanliu Chen, Hirotaka Kikuchi, Ryo Kobayashi, Yuki Shimizu, Wei Gao, Kazuhiko Takahashi, Toshihiko Kanayama, Kunmei Arakawa, Atsushi Hayashi, “Development of precision length measurement system using a micro-probe for micro-slit of the slot die coater”, 16th International Conference on Precision

Engineering (ICPE2016), 2016, November, 14-16, Hamamatsu, Japan.

So ITO, Minglei LI, Yuanliu CHEN, Yanhao XU, Zengyuan NIU, Masaya FURUTA, Yuki SHIMIZU, Wei GAO, "A Long Stroke Atomic Force Microscope for Surface Profile Measurement of Micro-optics", The 7th International Conference on Positioning Technology (ICPT2016), 2016, November, 8-11, Seoul, Korea.

So Ito, Yuanliu Chen, Hirotaka Kikuchi, Ryo Kobayashi, Yuki Shimizu, Wei Gao, "On-line qualification of an effective diameter for micro-probing system with method of shear-force detection", The 5th International Conference on Nanomanufacturing (nanoMan2016), 2016, August, 15-17, Macau. China.

So Ito, Hirotaka Kikuchi, YuanLiu Chen, Yuki Shimizu, Gao Wei, " Measurement of the Gap Width of the Slot Die Coater by Using a Shear-mode Detection Micro-probe", The 11th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (IEEE-NEMS 2016), 2016, April, 17-20, Matsushima, Miyagi, Japan.

〔図書〕(計 1件)

So Ito, "Micro-dimensional Measurement by a Micro-probing System", book chapter of "Precision Manufacturing. Metrology", Springer, Singapore, ISBN: 978-981-10-4912-5, 2019, 39 pages.

〔産業財産権〕

出願状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

取得状況(計 0件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
富山県立大学工学部知能ロボット工学科
<https://isd.pu-toyama.ac.jp/~i to/>

6 . 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。