

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 22 日現在

機関番号：27101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26420392

研究課題名(和文) ナノオーダー微小径穴・微細形状精度測定用極小径ファイバプロービングシステムの開発

研究課題名(英文) Development of a System for 3-D Micro Metrology Using a Nano Order Diameter Optical Fiber Probe

研究代表者

村上 洋 (Murakami, Hiroshi)

北九州市立大学・国際環境工学部・准教授

研究者番号：00416512

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：CO<sub>2</sub>レーザーを用いることでスタイラス接触子直径約1.2～300 μmの微細形状測定用スタイラスが製作可能であることを確認した。また、表面間力によるスタイラスの付着対策として、膜厚数nmの撥水コーティングを行い、表面間力の影響を約3割低減可能であることを確認した。FDTD法による光学解析の解析結果より、波長375 nmのレーザーを使用することで、0.2 μm程度のスタイラスシャフトでも使用できる可能性があることが解析の結果確認できた。また、基礎実験の結果、波長375 nmのレーザー光を用いることで、直径約0.4 μmの極小径のスタイラスシャフトでも約5 nmの測定分解能が得られることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The stylus tip with a diameter within the range of 1.2 and 300 μm have been fabricated with high yield by using the CO<sub>2</sub> laser. We conducted the performance test of the water repellent coating on the stylus tip for the purpose of preventing adhesion to the measured surface by the surface force, and the durability test. As a result, the separation distance of the stylus tip was reduced by 30% by employing the coated stylus tip. The minimum diameter of the available stylus shaft is examined using FDTD method. As a result, it is shown that the minimum diameter of the available stylus shaft is about 0.2 μm for the laser diode with 375 nm wavelength. Also, the resolution of the measurement system using the stylus with a diameter of 1 μm is approximately 5 nm.

研究分野：微細形状測定、加工計測

キーワード：小径穴測定 微細形状測定 光ファイバプローブ

## 1. 研究開始当初の背景

従来の微細形状測定の要求は、半導体の加工に代表される二次元形状が主たる対象であったが、近年の精密微細加工技術の進歩に伴い、各種ノズルの微小径穴（直径数  $\mu\text{m}$ ～数  $100 \mu\text{m}$ ）、非球面レンズなどの微細金型、マイクロマシンや MEMS 用マイクロ部品などの立体的で微細な三次元形状が増加しており、これらの計測技術の進展なしでは微細加工技術の高度化は実現できないことから、これらを精密に測定する重要性・ニーズは増加している。例えば、MEMS 分野の技術ロードマップでは 3 次元構造を有する MEMS センサ、アクチュエータ共通技術として、2025 年度までに  $1 \mu\text{m}$  幅で数  $100 \mu\text{m}$  深さの溝形状および側壁粗さの測定が要求されている。しかし、この要求に対応可能な測定器は現状存在しない。

微細形状の測定法に関しては国内外で様々な方法が提案されているが（バイブロスキヤニング方式、振動プローブ、光ファイバ+画像応用プローブ、45 度カットファイバによる非接触プローブなど）、現状では、上記要求を満たす直径が  $1 \mu\text{m}$  以下の微小径穴や溝、側壁粗さの測定に対応可能な微細三次元形状の計測技術は確立されておらず、特に深穴や深溝を有する形状になると測定は極めて困難となる。マイクロ部品の形状・寸法精度の三次元的評価では、微小なプローブをいかにして得るかということが、最も重要な要素技術として挙げられる。（この他にも測定対象物を走査する位置決めステージなどが要素技術として挙げられるが、開発が進み現状では十分な精度を達成しつつある。）上記測定要求に対応するためには直径が  $1 \mu\text{m}$  以下の極小径のプローブの製造技術およびプローブと測定対象面との接触を検知するセンシング技術が必要となる。

## 2. 研究の目的

上記の背景より、本研究では、直径  $1 \mu\text{m}$  以下の極小径の光ファイバを用いた接触式プローブを用いることにより、低測定力・検出機構が簡便で  $1 \mu\text{m}$  以下の溝や穴を有する微細形状を数  $\text{nm}$  の分解能で測定可能なプロービングシステムの開発を目的とする。これにより、マイクロ部品の精度保証・各機器の高機能化が可能になり超精密加工技術の基盤技術となることが期待できる。

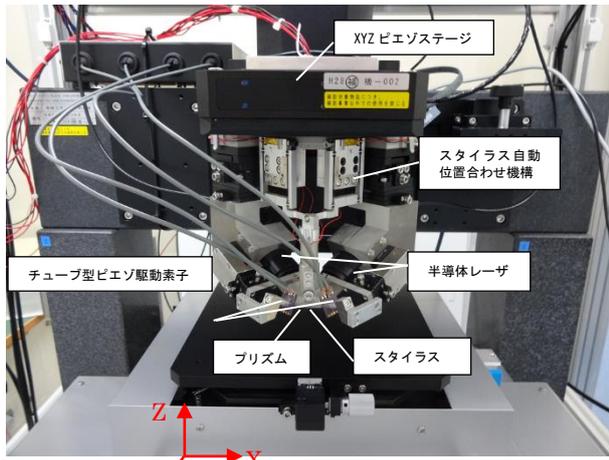
## 3. 研究の方法

図 1 (a), (b) に、測定装置の概略図およびスタイラスレーザー照射部の概略図を示す。図 2 に図 1 の XY 平面のスタイラスレーザー照射部断面図を示し、光ファイバプローブの測定原理を示す。光ファイバの先端を熔融させて製作した接触子が固定されたものをスタイラスとして用いる。スタイラスシャフトは姿勢調整用のチューブ型ピエゾ駆動素子に

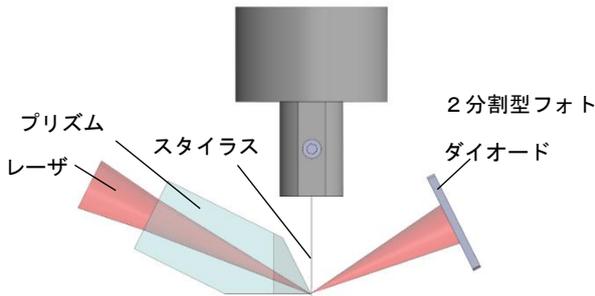
固定されている。また、スタイラスに対して約  $60$  度傾いた位置に波長  $405 \text{ nm}$  の半導体レーザーが設置されており、スタイラスシャフトに向かって XY 方向から集束レーザー光を照射する。レーザー光はプリズム内を通り上方へと反射され、スタイラスシャフトに照射される。スタイラスシャフトを透過した光は、スタイラスを間にして反対側に設置された 2 組の 2 分割型フォトダイオードで受光する。図 1(b) に示すように集束レーザー光を斜め上方より照射後、プリズムで反射させレーザー光をスタイラスの斜め下方向から照射することで、レーザー光および 2 分割型フォトダイオードをスタイラスのレーザー照射部よりも上方に設置することが可能になり、測定対象物との干渉を回避できる。ここで、スタイラスシャフトはロッドレンズとして利用することで、スタイラスの変位を拡大している。ここで、各フォトダイオードで検出する光強度値は電圧値に変換され、図 2 (a) に示すようにそれぞれ  $I_{PX1}, I_{PX2}, I_{PY1}, I_{PY2}$  (V) とする。接触子が測定対象面に接触していない状態では、 $I_{PX1}, I_{PX2}$  および  $I_{PY1}, I_{PY2}$  は同一強度に保たれているが、接触子が測定対象面に接触し、スタイラスシャフトがたわみ、スタイラスシャフトのレーザー照射位置が変位すると  $I_{PX1}, I_{PX2}$  および  $I_{PY1}, I_{PY2}$  の光強度に差が生じ、接触方向を検出できる。例えば、図 2 (a) の初期状態では、 $I_{PX1} = I_{PX2}$  および  $I_{PY1} = I_{PY2}$  であるが、図 2 (b) に示すように X 方向にプローブ用ファイバが変位すると、光ファイバ内部を透過するレーザーの屈折方向が変わるため  $I_{PX1} = I_{PX2}$  および  $I_{PY1} > I_{PY2}$  となる。ここで、 $I_{PY1}$  および  $I_{PY2}$  を用いた X 方向変位の出力  $I_X$  (V)、 $I_{PX1}$  および  $I_{PX2}$  を用いた Y 方向変位の出力  $I_Y$  (V) を式 (1), (2) で定義する。出力  $I_X$ 、出力  $I_Y$  は、半導体レーザーを変調するファンクションジェネレータの信号を参照信号とし、ロックインアンプを用いて同期検波することで各種ノイズを取り除いている。測定対象物表面を XYZ ピエゾステージを用いてスタイラスで順次走査することにより測定する。一般的にはスタイラス接触子の測定対象面への接触を検知するセンサ機構に力を伝えるためにスタイラスシャフトの剛性を高くする必要があるが、本測定原理ではスタイラスシャフトのたわみをレーザーを用いて非接触で間接的に検出する方式であるため、剛性が低く小径で長いスタイラスを使用可能であり、高アスペクト比の穴や溝などの測定に対応可能である。

$$I_X = I_{PY1} - I_{PY2} \quad (1)$$

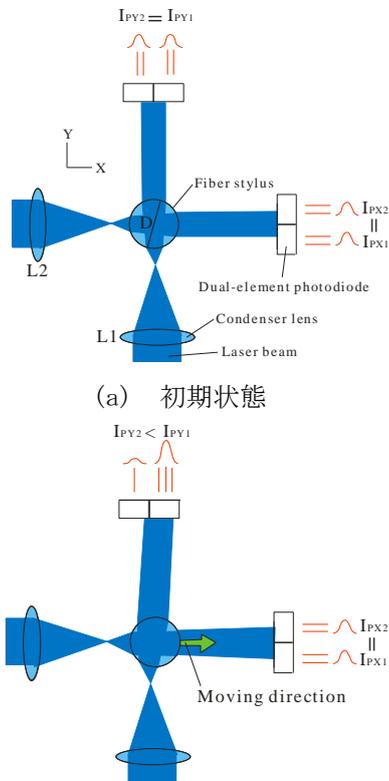
$$I_Y = I_{PX1} - I_{PX2} \quad (2)$$



(a) 測定装置



(b) スタイラスレーザ照射部概略図  
図1 光ファイバプローブ光学系



(a) 初期状態  
(b) X方向への変位  
図2 測定原理

スタイラスシャフトは各種酸を用いたウェットエッチングにより直径 125  $\mu\text{m}$  の光ファイバを小径化し製作している。図3に示す

ように温調器にエッチング液が入って容器を設置し、光ファイバスタイラスの先端を浸漬してエッチングを行った。

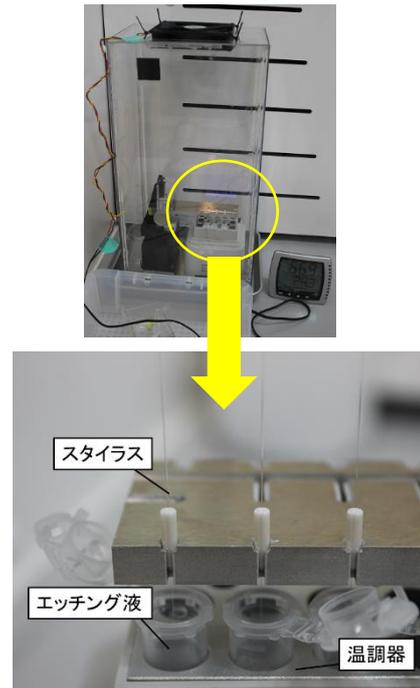


図3 エッチング装置

図4にエッチング温度とエッチング速度の関係を示す。エッチング液の温度と平均のエッチング速度は図4のように指数関数による近似が可能となる。つまり、温度に対して指数関数的に反応速度が上昇しており、アレニウスの式ともよく一致していることが分かる。

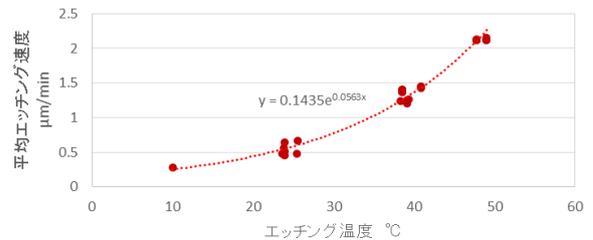
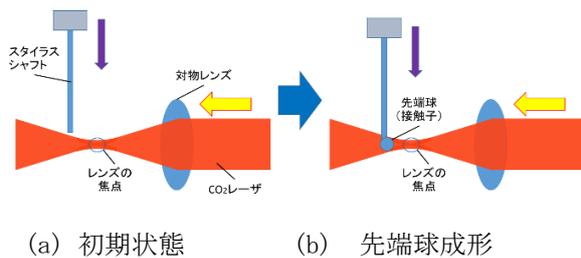


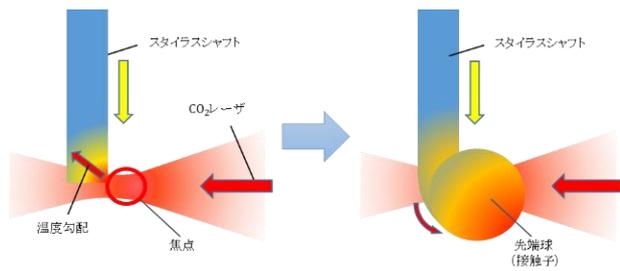
図4 エッチング温度と速度の関係

次に、CO<sub>2</sub>レーザを用いたスタイラス接触子の製作方法について紹介する。図5にCO<sub>2</sub>レーザによる接触子製作装置の概略図を示す。前項記載のエッチング方法で製作したスタイラス先端部に対物レンズによって集光したCO<sub>2</sub>レーザを照射し熔融させ、表面張力により接触子を成形する。図6に接触子先端球成形状況の概略図を示す。図6に示すようにスタイラスに対して水平方向からレーザを照射した際、スタイラス内部で温度勾配が発生し、温度の高い方に向かって接触子のずれ(シャフト中心軸と球中心のずれ)が発生する。そこで、スタイラスの鉛直下方向からCO<sub>2</sub>レーザを照射して接触子を形成する方

法を検討した。図7にミラーを用いてスタイラスの鉛直下方向からレーザを照射できるように改良した光学系の概略図を示す。この結果、接触子のスタイラス軸中心からのずれは大幅に軽減できることが確認できた。図8に製作したスタイラスの写真を示す。図8(a)はスタイラスシャフト直径約0.4 μm、接触子直径約1.2 μm、図8(b)はスタイラスシャフト直径約1 μm、接触子直径約3 μm、図8(c)はスタイラスシャフト直径約2.5 μm、接触子直径約5 μm、である。直径約0.4 μmの極小径のスタイラスシャフトでもCO<sub>2</sub>レーザを用いることで球形状に成形可能であることを確認した。



(a) 初期状態 (b) 先端球成形  
図5 CO<sub>2</sub>レーザによる先端球製作方法



(a) 温度勾配発生 (b) 先端球成形  
図6 先端球成形概略図

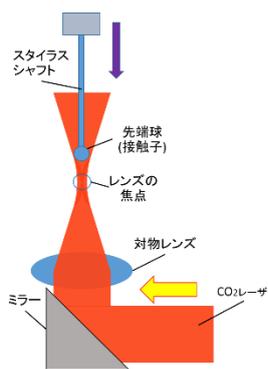


図7 改良したレーザ加工用光学系

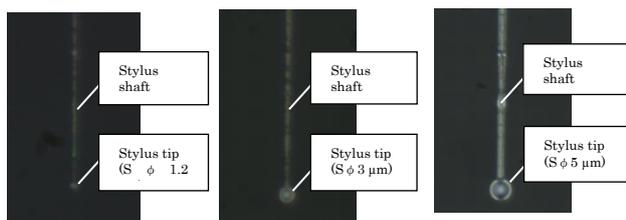


図8 製作したスタイラス

使用するスタイラス接触子は直径数十〜数 μm であり、測定対象物に接触させた際に液架橋力やファン・デル・ワールス力(vdW 力)、静電気力などの表面間力の影響を大きく受ける。接触子直径が約1 mm 以下の場合、表面間力の合力が重力より大きくなるため接触子が測定対象面に付着する。vdW 力は表面粗さが存在すると急激に低下し、静電気力もイオナイザ等を用いて静電気除去を行うことで低減可能であることから、実際には液架橋力の影響が一番大きくなるものと思われる。そこで、液架橋力を低減させる方法として接触子表面への撥水コーティングを検討した。図9に撥水コーティングの模式図及びコーティング後の接触子のSEM写真を示す。接触子をコーティング剤に浸漬させることで表面に図のような疎水性のジメチルポリシロキサン単分子層が形成され撥水性が向上する。撥水コーティング性能試験として、オブティカルフラット壁面とスタイラス接触子の剥離試験を行った。付着後に接触子が壁面から剥離するまでの距離を剥離距離とする。撥水コーティング有無の2本のスタイラス(接触子直径20 μm、シャフト直径10 μm、シャフト長さ5 mm)を使用して、湿度20%の条件での剥離距離を各10回計測した。また、静電気力軽減のためにイオナイザーを使用して接触子の静電気除去も同時に行った。その結果を図10に示す。撥水コーティングなしの接触子の場合、10回計測した平均剥離距離は約23.4 μm、標準偏差1.43 μmであったのに対し、撥水コーティングありの接触子の場合の10回計測した平均の剥離距離は約15.2 μmで標準偏差1.33 μmと、約3割剥離距離が低減できた。このことから撥水コーティングが液架橋力の低減に有効であることを確認できる。

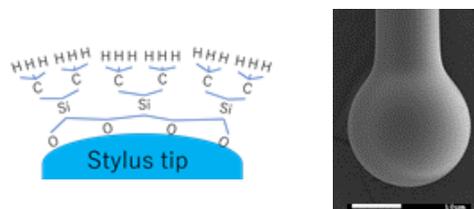


図9 撥水コーティング後のスタイラス

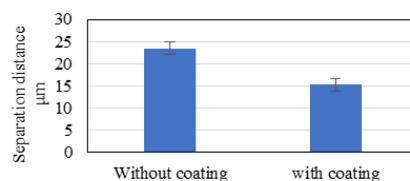


図10 剥離距離の比較

さらに、スタイラスの耐摩耗試験（押しつけ量  $5\mu\text{m}$ 、摺動振幅  $10\mu\text{m}$ ）を実施した結果、10 万回までは摩耗せず高精度に使用可能であることを確認した。座屈の耐久試験の場合、70 万回以上の使用にも耐えられることが分かった。また、直径  $100\mu\text{m}$  の軸受用の精密鋼球およびルビー球を用いて接触子形状が校正可能であることを確認した。

スタイラスシャフトの直径がスタイラスシャフトレーザ照射部のレーザスポット直径よりも小さくなると、スタイラス内部を透過し屈折する光量が減少すると同時に回折の影響により、測定対称面への接触検出感度が低下する。そこで、FDTD 法による光学シミュレーションを用いることで、本システムで使用可能なスタイラス最小径について検討した。FDTD 法とは、マクスウェルの微分方程式を差分化し、時間領域で電磁界強度を求める方法である。断面の放射強度分布がガウス分布のレーザ光を対物レンズにより集光しスタイラスシャフトに照射する。スタイラスシャフトを透過、屈折、回折した光の 2 分割型フォトダイオード上での光強度値を解析し、出力  $I_x$  を算出する。以前の研究成果では、波長が  $650\text{nm}$  のレーザを用いた場合は、直径が  $0.5\mu\text{m}$  以下のスタイラスシャフトを用いると出力  $I_x$  はほとんど変化がなく使用不可能である。直径  $0.5\mu\text{m}$  以下の極小径スタイラスシャフトを用いる場合は、レーザ光源の短波長化やレンズの高 NA 化が必要になると考えられる。そこで、本研究では波長が  $375\text{nm}$  および  $650\text{nm}$  のレーザを用いた際の出力  $I_x$  の変化を FDTD 法により調べた。FDTD 法による光学シミュレーションの解析結果を図 11 に示す。横軸はスタイラスシャフト直径、縦軸はスタイラスシャフトを X 方向に  $0.1\mu\text{m}$  変位させた際の出力  $I_x$  の変化量を示す。基礎実験の結果、波長  $375\text{nm}$  のレーザを用いた場合、直径  $0.4\mu\text{m}$  のスタイラスシャフトで約  $5\text{nm}$  の分解能が得られることを確認している。解析の結果、直径  $0.2\mu\text{m}$  のスタイラスシャフトは  $0.5\mu\text{m}$  のスタイラスシャフトと同程度の感度が得られている。これより、波長  $375\text{nm}$  のレーザを使用することで、図 11 に示すように  $0.2\mu\text{m}$  程度のスタイラスシャフトでも使用できる可能性があることが解析の結果確認できた。

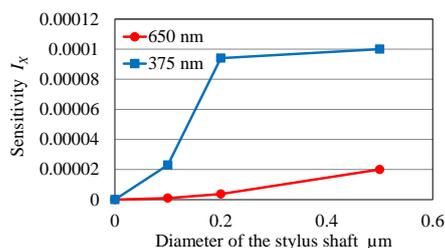


図 11 FDTD シミュレーション結果

#### 4. 研究成果

ウェットエッチングおよび  $\text{CO}_2$  レーザを用いたスタイラス接触子の製作方法について検討した。その結果、 $\text{CO}_2$  レーザを用いることでスタイラスシャフト直径約  $0.4\mu\text{m}$ 、スタイラス接触子直径約  $1.2\mu\text{m}$  のスタイラスが製作可能であることを確認した。また、微細な表面粗さ測定用のスタイラス先端部先鋭化技術（先端半径  $0.025\mu\text{m}$ ）および L 字曲げ加工技術を開発した。先端球の製作に関してはスタイラスの鉛直下方から  $\text{CO}_2$  レーザを照射可能なように光学系を改良することにより、スタイラス軸と球中心のずれが少ないスタイラスの製作が可能になった。また、表面間力によるスタイラスの付着対策として、膜厚数 nm の撥水コーティングを行い、表面間力の影響を約 3 割低減可能であることを確認した。さらに、スタイラスの耐摩耗試験（押しつけ量  $5\mu\text{m}$ 、摺動振幅  $10\mu\text{m}$ ）を実施した結果、10 万回までは摩耗せず高精度に使用可能であることを確認した。座屈の耐久試験の場合、70 万回以上の使用にも耐えられることが分かった。また、直径  $100\mu\text{m}$  の軸受用の精密鋼球およびルビー球を用いた接触子形状の校正方法を確立した。この他、微細金型や小径穴等様々な測定実験を通じた測定用プログラムの改良および信号処理プログラムの開発を行った。FDTD 法による光学シミュレーションの解析結果より、波長  $375\text{nm}$  のレーザを使用することで、 $0.2\mu\text{m}$  程度のスタイラスシャフトでも使用できる可能性があることが解析の結果確認できた。また、基礎実験の結果、波長  $375\text{nm}$  のレーザ光を用いることで、直径約  $0.4\mu\text{m}$  の極小径のスタイラスシャフトでも約  $5\text{nm}$  の測定分解能が得られることを確認した。

#### 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 4 件）

(1) Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Takao SAJIMA, Kosuke Uchiyama, Fabrication of an ultra-small-diameter optical fiber probe using an acid-etch technique and a  $\text{CO}_2$  laser for 3D micro metrology, International Journal of Automation Technology, 査読有, Vol. 11, No. 5, pp. 699 ~ 706, (2017).

(2) Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Development of Touch Probing System Using a Fiber Stylus, Fibers, 査読有, 4, 24; doi:10.3390/fib4030024, pp. 1 ~ 13, (2016).

(3) Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Mitsuyoshi Fukuda, Reduction of Liquid Bridge Force for 3D Microstructure Measurements, Applied Science, 査読有, 6, 153; doi:10.3390/app6050153, pp. 1 ~ 11,

(2016).

(4) Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Takao SAJIMA, Takuya SUEMATSU, Study of a Vibrating Fiber Probing System for 3-D Microstructure: Performance Improvement, Measurement Science and Technology, 査読有, 25, p.094010(7pp), (2014).

〔学会発表〕(計4件)

(1) Kosuke Uchiyama, Hiroshi MURAKAMI, Akio KATSUKI, Takao SAJIMA, Takahiko YAMAMOTO, Ryosuke NAGATA, Kunitaka FUJIYOSHI, Fabrication of Probe Tips for Nanoscale 3D Metrology, Proceedings of the 32nd Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, USB(full paper in flush memory), 2017.10.31, シャーロット(アメリカ).

(2) Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Mitsuyoshi Fukuda, Development of a System for 3-D Micro Metrology Using an Optical Fiber Probe: Reduction of Surface Force Effect, Proceedings of the European Optical Society Annual Meeting (EOSAM) 2016, USB(full paper in flush memory), 2016.9.28, ベルリン(ドイツ).

(3) Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Mitsuyoshi Fukuda, Masaki Okada, Megumu Nagaura, FABRICATION OF AN ULTRA-SMALL-DIAMETER OPTICAL FIBER PROBE FOR 3D MICRO METROLOGY, Proceedings of the XXI IMEKO World Congress, USB(full paper in flush memory), 2015.9.1, プラハ(チェコ).

(4) Hiroshi Murakami, Akio Katsuki, Takao Sajima, Narumi Tokuoh, Mitsuyoshi Fukuda, Development of a System for 3-D Micro Metrology Using an Ultra-Small-Diameter Optical Fiber Probe- Optical Analysis and Evaluative Experiment Using the 0.4 μm Diameter Stylus Shaft -, Proceedings of the 29th Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering, Vol. 59, pp. 63~66, 2014.11.12, ボストン(アメリカ).

〔産業財産権〕

○出願状況(計1件)

名称:形状測定装置

発明者:吉田一朗,村上洋,浜野康雄,本田裕,青陰雅昭

権利者:小坂研究所,北九州市立大学

種類:特許

番号:特願2017-040562

出願年月日:2017年3月3日

国内外の別:国内

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.env.kitakyu-u.ac.jp/~muraka16/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

村上 洋

北九州市立大学・国際環境工学部・機械シ

ステム工学科・准教授

(093) 695-3201

研究者番号:00416512