

機関番号： 1 2 6 1 2
 研究種目： 基盤研究 (B)
 研究期間： 2 0 0 8 年度～2 0 1 0 年度
 課題番号： 2 0 3 6 0 1 1 4
 研究課題名 (和文) 超小型精密自走機構を用いた高速連続ナノ転写加工と局所化学的加工
 研究課題名 (英文) Combination of nano imprint and local mechano-chemical machining by micro robot
 研究代表者
 青山 尚之 (AOYAMA HISAYUKI)
 電気通信大学・情報理工学研究科・教授
 研究者番号： 4 0 1 5 9 3 0 6

研究成果の概要 (和文) : 本研究では超小型自走精密機構を用い、機械的微細転写法と微細化学反応加工を融合させた新しい微細加工法を開発し、その性能を実験的に実証した。ナノメートル移動分解能を有する圧電素子と電磁石で構成された超小型精密自走機構にナノオーダーの凹凸型を精密に転写する新しい微動アクチュエータを搭載した。またピコリットルオーダーの極微小液滴の精密塗布機構を開発し、局所的に化学反応を発生させ、微細機械加工と局所化学反応を融合させたナノカプセルの生成に実験的に成功した。

研究成果の概要 (英文) : In this project, the newly developed micro machining that is combined with nano imprint and local chemical micro reaction was proposed and the performances were experimentally proved. The micro actuator for nano imprint was also developed and implemented onto the micro robot that was composed of the piezo elements and electromagnets so that it could move like an inchworm with the nano stepping resolution. And the unique dispenser that can provide pico-liter resolution was designed and fabricated so that it could make such micro chemical reaction and successfully generate the accurate micro double layers capsule.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2 0 0 8 年度	6,800,000	2,040,000	8,840,000
2 0 0 9 年度	4,500,000	1,350,000	5,850,000
2 0 1 0 年度	3,000,000	900,000	3,900,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目： 機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：超小型機構、ナノインプリント、電磁石、圧電素子、ボイスコイルモータ、局所化学反応、SPM、リニアスケール

1. 研究開始当初の背景

当時、次世代のナノ加工分野において、ナノインプリントは光リソグラフィの解像限界を超える微細成型加工法として大きな期待が持たれていた。ディスプレイなどの比較的大面積のものから、燃料電池電極などの中型およびバイオチップ用の小型のものまでその応用分野が多岐に亘るため、国内外の産学官

で活発な研究開発が実施されていた。ナノインプリントは主に熱可塑性樹脂、光硬化樹脂およびガラスを対象とし、SiC、Ta、石英などに表面微細加工されたモールドを押し付けてナノサイズの型を転写する。そのため、これらの研究分野は大きく分けて、ナノインプリントのための材料開発、ナノサイズの型加工法、それらのナノサイズ型の転写方法および

計測評価方法に大別された。

この中でも極微小なナノサイズの型を転写する機構は、製品の精度や信頼性を左右する重要な要素であり、極めて精密な位置と力の制御が要求されていた。特に圧力の制御とアライメントは機械と対象物の形状寸法比が 10^{-9} を超えているため、極限的な機構制御技術が不可欠となっていた。しかしこのことは装置そのものに膨大なコストがかかることに繋がり、この問題を打破する方法が求められていた。

2. 研究の目的

本研究では微細加工機能を有する1立方インチサイズの超小型自走精密機械を反応性ガスチャンバー内で稼働させ、機械的微細形状転写法(ナノインプリント)と微細化学反応加工を融合させた新しい高速微細表面加工法を提案し、実験的に検証すること。

3. 研究の方法

(1)平成20年度: これまでに得られた基礎的な知見に基づき、超小型自走機械を用いて微細機械化学反応併用式のナノインプリント加工法を実現させるために、図1に示すシステムを構築し、下記の4つの課題を設定し、検討する。

①ナノオーダーの凹凸金型を精密に押し込む機構の設計試作とその押し込み量の精密計測制御(担当 青山・電通大教授)

②微小な型を超小型自走機械で連続転写する場合、自走機械のナノオーダーでの連続的位置決め(担当 白田・産総研室長→H21より大田に変更)

③ナノ転写加工に適した材料とその可塑性(熱または光による)の局所制御(担当 青山・電通大教授)

④SPMによるナノオーダーの転写精度の計測と評価(担当 岩田・静岡大教授)

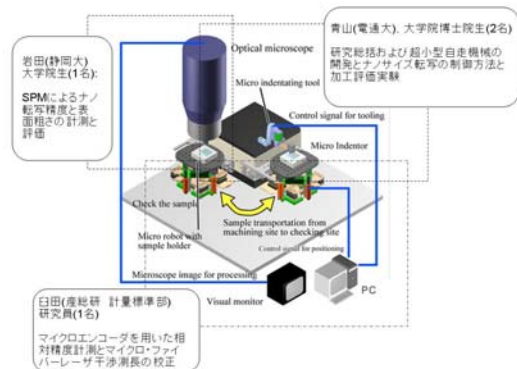


図1 システム構想図

ここでは超小型自走機械がまずナノインプリント用工具アクチュエータの下に誘導され、精密な転写加工を行う。さらにそれらの加工サンプルは SPM などの計測器の下まで誘導され、その精度が検証される。これらの広域の誘導はカメラを用いた PC で制御されるが、それぞれの局所位置での位置決めはナノメートル分解能を有するリニアスケールで行い、自在性と精密性の両方を実現している。

①ナノオーダーの凹凸金型を精密に押し込む機構の設計試作とその押し込み量の精密計測制御:

超小型自走機械に搭載可能でしかも適当なストロークを有する転写機構部として図2に示すような平行板ばねとボイスコイルモータを利用した単純で小型の押し込み機構を開発した。ここでは微小な押し込み量や押し込み力の計測が不可欠であるため、微小力センサーを組み込み、それらの計測値をモニターし再現性の高い微細転写を実現した。

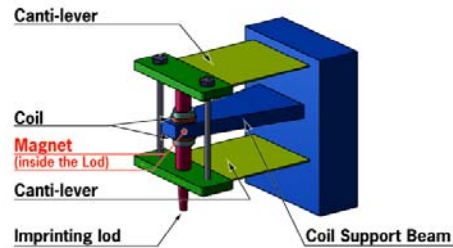


図2 ボイスコイルアクチュエータと平行板ばねを用いたナノ転写機構

②超小型自走機械による微小金型連続転写時のナノオーダーでの連続的位置決め:

このシステムでは微小な金型を転写するがこれを連続的に精密に連続させる必要があるが、重要な検討課題であった。ここではナノメートル分解能を有するマイクロリニアエンコーダ搭載し、さらに外部からファイバレーザ干渉側長システムで絶対位置を同時計測し、これらの測定値から転写位置が精密に連続するようなアルゴリズムを提案し、実験により検証した。超小型自走機械の広域での粗い位置決めは CCD カメラを用い、高速な画像処理により誘導を実現した。

③ナノ転写加工に適した材料とその可塑性(熱または光による)の化学反応促進制御:

生体細胞用に微小かつ大量の型を任意の位置に形成することを想定しており、熱または光可塑性を有する高分子ポリマー樹脂を選定し、ナノ加工に必要な最適な加熱または照射時間などを実験で確認した。この時、これらの加工器も超小型自走機械上に搭載できるように工夫し、局所的なナノ転写を効率的に実現させる方法を提案した。

④SPM によるナノオーダーの転写精度の計測と評価:

ナノサイズの転写精度を計測・評価するために、高速型でしかも測定範囲が大きいSPMが必要となる。そこで前述の転写条件に対する形状転写の精度を検証するために、超深度形状計測顕微鏡を組み合わせた計測システムを構築し、広範囲でしかも高速な計測評価システムを開発した。

(2)平成21年度

①ナノオーダーの凹凸金型転写の高速化

単純な平行板ばねとボイスコイルモータを組み合わせた転写駆動機構では、駆動可能な周波数が100Hz程度に限界があると予想される。そのため長ストローク圧電素子機構を併用し、さらに高速微小押し込み可能な機構を提案し、設計試作の後、実験的に性能を検証しその有効性を明らかにした。

②ナノ分解能位置決め2次元への拡張

前年では1次元に関して、マイクロニアエンコーダを2次元に拡張し、平面内におけるナノ金型の相対的位置決め精度を向上させる。目標値としては2次元平面内で50nmの精度を確保する。また同時に外部からのレーザー干渉型の測長器もそれにあわせて2次元に拡張し、広範囲でナノ精度を実現させることを目標とした。

③機械的微小転写法と微細化学反応との融合実験

本加工法は局所的なナノインプリントをベースに精密に拡張する方法であるが、さらに微細形状の成形には化学的な結晶成長などの方法を取り込む必要がある。そこで微小液滴塗布機構を付加し、機械的な凹凸形状内の表面に化学反応による結晶化させて、ナノレベルの形状生成を試みた。

④電子顕微鏡下における実時間複合計測:

SPMを用いたナノ凹凸計測では局所的単一形状の評価は可能であるが、広い範囲の加工物を計測する場合は測定時間が膨大になる。そのため、電子顕微鏡内に超小型自走機械を組み込み、任意の位置でのSEM観察とSPM観察を同時に行い、巨視微視の計測ができるようにシステムを再構成し、実験により性能確認を行った。

(3)平成22年度:

①微細型加工システムの試作:

超小型自走機械自身のナノ位置決め分解能を有効に機能させるため、超小型自走機械がその搭載工具先端をYAGレーザー加工機や電解研磨を用いて微細加工する方法について検討した。

②電子顕微鏡一体型の超小型自走機械によるナノインプリントシステム:

これまでに得られた知見をベースに図3に示すように超小型自走機械を走査型電子顕微鏡と一体化させ、計測と加工および検査の一連が小型化された新しいナノインプリント工程を提案し、試作した。

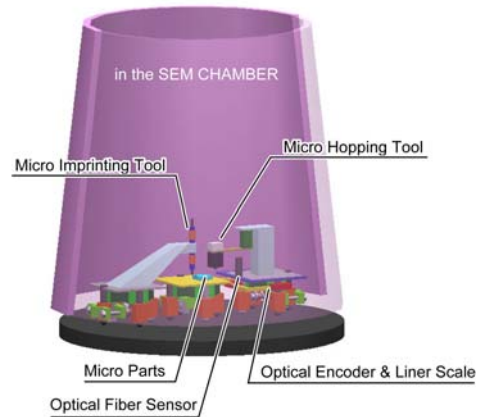


図3 チャンバー内に設置された超小型自走機械によるナノインプリントシステム

4. 研究成果

図4にナノインプリント機構を搭載した超小型自走機械を示す。二段平行板ばねとVCMで構成された機構で微小力の発生を可能にしている。超小型自走機械は転写サンプルを精密に自立位置決めし、任意の位置に精密に転写することに成功した。

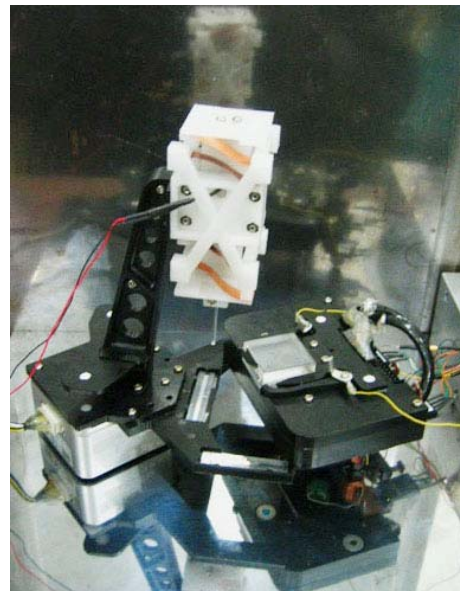


図4 二段平行板ばねとVCMで構成されたナノインプリントヘッドを搭載した超小型自走機械

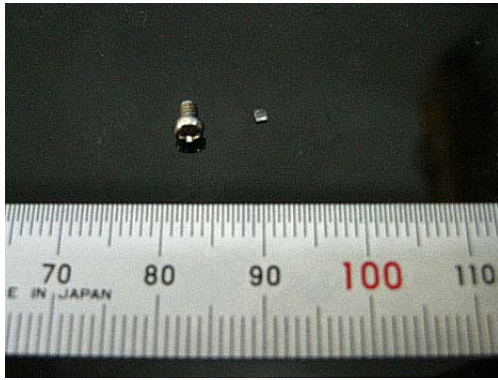


図 5 使用したナノパターンが加工されている微小の金型

図 5 に使用したナノパターンが加工されている微小型を示す。先端部には 50 ナノメートルサイズの凹凸加工が施されており、これを精密に連続転写させる。

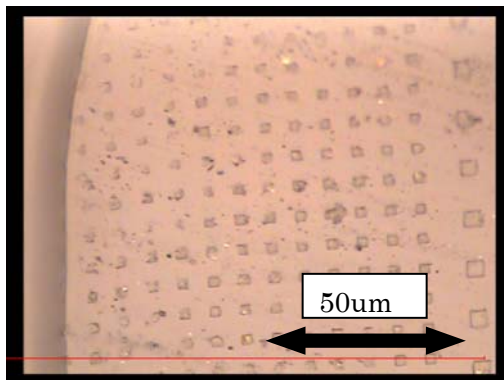


図 6 UV 硬化樹脂にナノパターンを転写し、紫外線硬化させたサンプルの顕微鏡観察

図 6 に紫外線硬化樹脂にナノパターンを精密に転写し、紫外線を照射して、硬化させた結果を示す。精密に微小金型の凹凸形状が転写されていることが確認できた。

次にこれらの機器を走査型電子顕微鏡のチャンバー内に組み込み、図 7 に示すように SEM 観察を行いながら、遠隔で自走機構を制御して、ナノインプリントを実験した。この場合、VCM などのアクチュエータの磁場が SEM の電子線に外乱を与え、観察像が歪むため、この種のアクチュエータが使用できず、図 8 に示すように長ストロークの圧電素子を組み込んだ微動機構を試作し、対象物への力を計測しながら表面の微細形状を精密にトレースすることに成功した。

図 9 にナノインプリントの転写精度を高めるために、押し込み量と押し込み力の両方を精密に制御する機構を設計試作し、超小型自走機械に搭載する機構を示す。この機構では

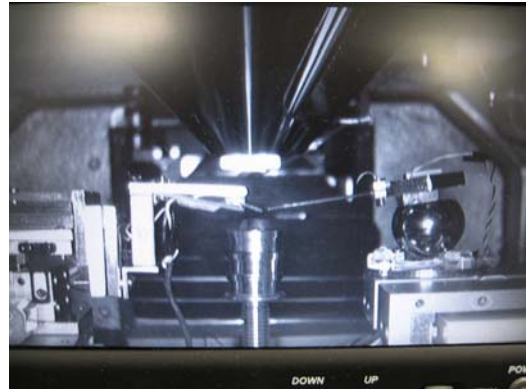


図 7 超小型自走機械を用いたナノインプリントシステムを走査型電子顕微鏡内で動作させた様子

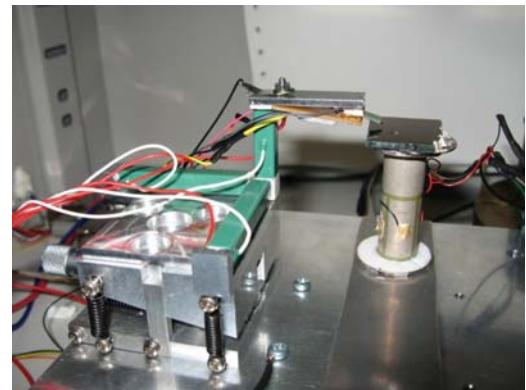


図 8 長ストローク圧電素子を組み込んだ微小力センサー付き走査型スキャニング顕微鏡(STM)

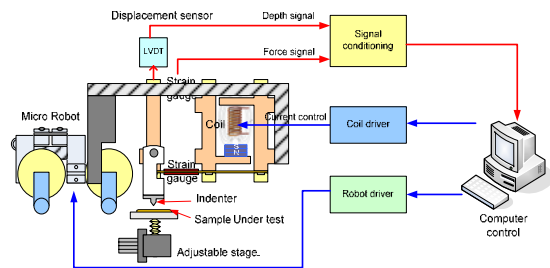


図 9 押し込み量と押し込み力の両方を精密に制御する機構を搭載した超小型自走機械

ナノインデントを 2 段平行バネで支持し、初段の平行バネ機構をボイスコイルアクチュエータで微小量変位させ、2 段目の平行バネ機構で微小な押し込み力を高感度ひずみゲージで検出し、しかも押し込み量を軸上に取り付けた LVDT により精密に検出可能である。超小型自走機械の精密な誘導とインデントの押し込みおよび押し込み力の制御と計測は PC により管理され、遠隔でこれらの動作が実行可能になっている。

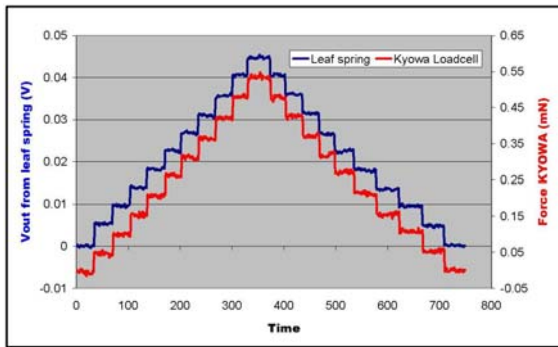


図 11 試作したナノインデンターの押し込み力の校正結果

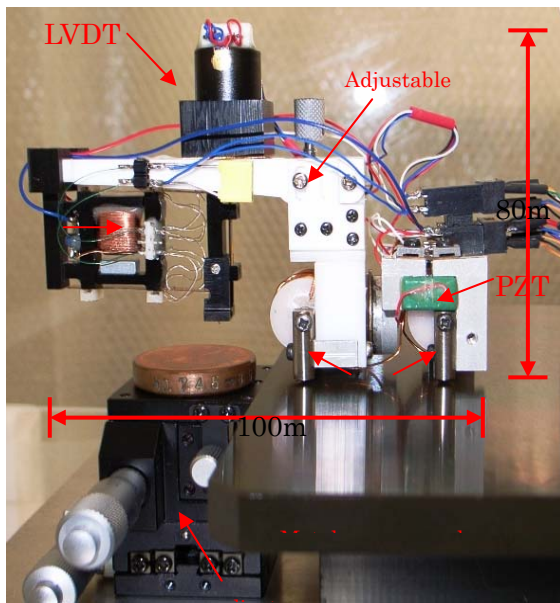


図 11 試作したナノインデンターの押し込み量と押し込み力の両方を精密に制御する機構とこれを搭載した超小型自走機械

図 10 には試作したナノインデンターの押し込み力の校正結果を示す。VCM アクチュエータと平行ばねを組み合わせた微小力発生機構により 0.1mN の分解能で精密に力を制御できることが明らかになった。

図 11 には実際に試作した押し込み量の精密制御が可能なナノインデンターを搭載した超小型自走機械を示す。移動分解能は約 $1\mu\text{m}$ であり、任意の位置まで精密に移動し、対象物の表面にインデンターを押し込み、その時の押し込み量と押し込み力を精密に検出し、精密なナノインプリントが実現できることが検証された。

図 12 には超小型自走機械を $5\mu\text{m}$ ステップで移動させ、インデンターを 2mN の力で精密に押し込む動作を繰り返した結果である。極めて高い再現性でインデンターが精密な間隔で転写されていることがわかる。

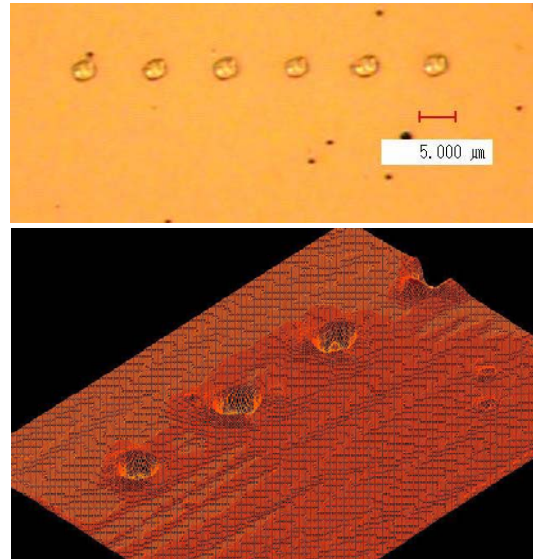


図 12 $5\mu\text{m}$ で超小型自走機械を誘導し、 2mN の押し込み力で精密にナノインデンターを試料に押し込んだ場合の形状の顕微鏡写真(上)と超深度レーザー顕微鏡による形状計測結果(下)

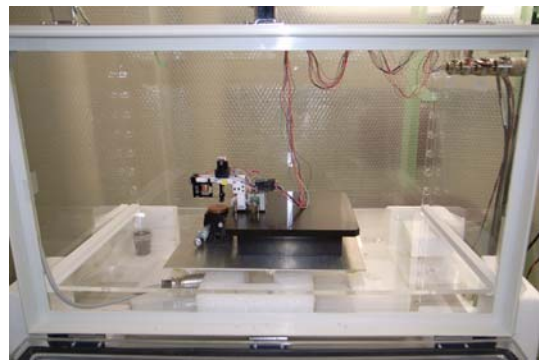


図 13 化学的反応との融合を実現するためにチャンバー内に設置されたナノインプリント機構を搭載した超小型自走機械

図 13 にはナノインプリントの機械的な転写方法に局所的な化学反応を癒合させるためにチャンバー内に設置された超小型自走機械を示す。

5. まとめ

本課題では微細加工機能を有する 1 立方インチサイズの超小型自走精密機械を反応性ガスチャンバー内で稼働させ、機械的の微細形状転写法(ナノインプリント)と微細化学反応加工を融合させた新しい高速微細表面加工法を提案し、実験的に検証することを目的とし、①ナノオーダーの凹凸金型を精密に押し込む機構の設計試作とその押し込み量の精密計測制御、②微小な型を超小型自走機械のナノオーダーでの連続的位置決め、③ナノ転写加工に適した材料、④SPM による転写精度の計測と評価について検討を行った。

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 10 件)

- ① F. Iwata, Y. Mizuguchi, K. Ozawa and T. Ushiki, Operation of Self-Sensitive Cantilever in Liquid for Multiprobe Manipulation, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 08LB14-5p, 2010, 査読有
- ② S. Ito, T. Keino and F. Iwata, Volume Control of Metal-Plating Deposition Using a Nanopipette Probe by Controlling Electric Charge, Jpn. J. Appl. Phys., 49, 08LB16-5, 2010, 査読有
- ③ 伊東聡, 岩田太, 中尾秀信, 七里元晴, マイクロ磁気プローブで操作された磁性体微粒子による生体試料のマニピュレーション, 精密工学会誌, 76, pp. 64-68, 2010, 査読有
- ④ A. Oota, T. Usuda, H. Nozato, Correction and evaluation of the effect due to parasitic motion on primary accelerometer calibration, Measurement, 43, pp. 714-725, 2010, 査読有
- ⑤ A. Oota, T. Usuda, H. Nozato, Calibration of vibration pick-ups with laser interferometry: part IV. Development of a shock acceleration exciter and calibration system, Meas. Sci. Technol., 21, 06107, 2010, 査読有
- ⑥ Futoshi Iwata, Removal method of nano-cut debris for photomask repair using an atomic force microscopy system, Jpn. J. Appl. Phys., 48, pp. 1-4, 2009, 査読有
- ⑦ Ohmi Fuchiwaki and Hisayuki Aoyama, Development of the Orthogonal Micro Robot for Accurate Microscopic Operations, Journal of Micro-Nano Mechatronics, 4, pp. 85-93, 2008, 査読有
- ⑧ Ohmi Fuchiwaki and Hisayuki Aoyama, Development of a Positioning & Compensation Device for a Versatile Micro Robot, Proc. of the 2008 IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1, pp. 83-88, 2008, 査読有

[学会発表] (計 25 件)

- ① Hisayuki Aoyama, Naoya Hata, Yoshiyuki Suzuki, Futoshi Iwata, Akihiro Ota and Takashi Usuda, NANO IMPRINTING SYSTEM OPERATED BY MULTIPLE MICRO ROBOT, 26th Annual Meeting of American Society of Precision Engineering, Monterey, USA, 2009 年 10 月 11 日
- ② Masato Takizawa and Hisayuki Aoyama, Development of hemispherical manipulator and self-walking stage using

piezoelectric actuators, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Kokura, Fukuoka, 2009 年 11 月 12 日

③ Hiroyuki Chiba and Hisayuki Aoyama, Development of Self-walking Small X-Y Stage and Manipulation Tool with Acoustic Force Display, 3rd International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology, Kokura, Fukuoka, 2009 年 11 月 12 日

④ Shunnsuke Kanegae and Hisayuki Aoyama, Development of Micro Walking XY Stage with Piezo Elements, 3rd Int. Conf on Positioning Technology, Hamamatsu, Japan, 2008 年 11 月 26 日

⑤ Hiroyuki Chiba and Hisayuki Aoyama, Development of piezodriven small X-Y stage and micro tool turret with acoustic modulated micro force display for SEM operation, 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, Sapporo, Japan, 2008 年 8 月 26 日

⑥ Satoshi Kawanishi, Hisayuki Aoyama and Futoshi Iwata, Development of nano manipulator based on an atomic force microscope coupled with a haptic device for SEM operation, 3rd Asia International Symposium on Mechatronics, Sapporo, 2008 年 8 月 26 日

⑦ Shunnsuke Kanegae and Hisayuki Aoyama, Piezo Drive XY Stage with Nano-Manipulators for SEM Operation, 23rd Annual Meeting of American Society of Precision Engineering, Portland, USA, 2008 年 10 月 24 日

[その他]

ホームページ等

<http://www.aolab.mce.uec.ac.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

青山 尚之 (AOYAMA HISAYUKI)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：40159306

(2) 研究分担者

岩田 太 (IWATA FUTOSHI)

静岡大学・工学部・教授

研究者番号：30262794

大田 明博 (OOTA AKIHIRO)

産業技術総合研究所・計測標準部門・室長

研究者番号：80356641