

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078206

研究課題名（和文） マイクロ繊毛アクチュエータ群の研究

研究課題名（英文） Development of Micro Cilium Actuators in Group

研究代表者 岩附信行

岩附 信行 (IWATSUKI NOBUYUKI)

東京工業大学・大学院理工学研究科・教授

研究者番号：70193753

研究成果の概要：

実用的なマイクロ／ナノマシンに利用可能な人工のマイクロ繊毛アクチュエータ群の開発を目的とし、はんだ付け静電植毛法と電気ニッケルめっきによるチタン製内部電極群の配向整列接合、水熱合成法による圧電セラミクス薄膜形成、マスキング利用真空蒸着法による選択的外部電極形成の主要製造プロセスを明らかにしてマイクロ繊毛アクチュエータ群の試作に成功し、駆動実験を行って、アクチュエータの共振駆動ならびにマイクロ搬送機に適用し、6mm四方の微小シートの搬送に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	14,600,000	0	14,600,000
2005年度	9,100,000	0	9,100,000
2006年度	12,300,000	0	12,300,000
2007年度	6,200,000	0	6,200,000
2008年度	6,400,000	0	6,400,000
総計	48,600,000	0	48,600,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学

キーワード：圧電アクチュエータ、マイクロアクチュエータ、マイクロマシン、知能機械、運動制御、群の制御、共振駆動

1. 研究開始当初の背景

(1)人間の体内での移動・作業が可能なマイクロ／ナノマシンの開発が強く求められおり、小型で高い運動性能を得るためには、多数のマイクロアクチュエータの協調制御が望ましい。生物に学ぶと、繊毛の運動により進行波を生じさせ水中を移動するゾウリムシなどがある。そのような人工のマイクロ繊毛アクチュエータを開発できればマイクロ／ナノマシンのモビリティは飛躍的に向上する

と予想された。

(2)繊毛アクチュエータの基本構造として研究代表者らは図1に示す圧電パイプモルフアクチュエータ[1]を提案しており、さらにその小型化・大量製造の手法として焼結を必要としない圧電セラミクスの水熱合成法[2]、電極の整列・接合を可能にする金属針の静電植毛法[3]が開発され、マイクロ繊毛アクチュエータ群実現の可能性が高まり、その詳細な製造法を確立が求められた。

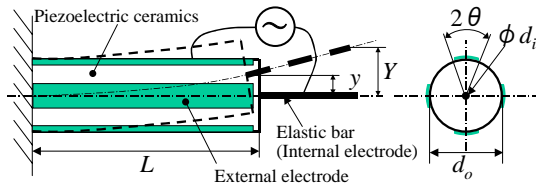


図1 圧電パイプモルフアクチュエータ

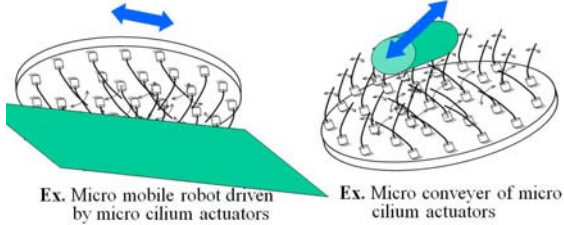


図2 マイクロ繊毛アクチュエータ群による移動ロボットと搬送機

2. 研究の目的

- (1)人工のマイクロ繊毛アクチュエータ群を得るために、多数の微小金属針を高電界下に置くことにより、その電気力線に沿って配向整列させつつ接合して内部電極群を得る「静電植毛法」、錯イオン溶液中で内部電極群表面に圧電セラミクス薄膜を形成する「水熱合成法」、圧電セラミクス薄膜上にマスキングを活用した真空蒸着により外周電極を形成する「外周電極形成法」からなる基本製造プロセスを確立する。
- (2)マイクロ繊毛アクチュエータ群の共振駆動の実験検証を行うとともに、マイクロ繊毛アクチュエータ群の応用例として、図2の概念図に示すマイクロ移動ロボットもしくはマイクロ搬送機を試作してその性能試験を行い、マイクロ繊毛アクチュエータ群の得失を明らかにする。

3. 研究の方法

- (1)マイクロ繊毛アクチュエータ群の内部電極群を作成するために、チタン製微小電極針を真空デシケータ内の矩形平行板電極間におき両極板間に高電界をかけて静電気力により飛翔させて上側電極板に垂直に配向整列させ、同時にはんだコーティングされた電極板を加熱/冷却して電極針をはんだ接合する、はんだ付け静電植毛装置を試作して作成実験を行う。
- (2)オートクレーブ内に圧電材料の錯イオン溶液とともにチタン製内部電極を封入して、高温高圧下で攪拌させつつ化学反応させPZT（チタン-ジルコン酸鉛）圧電セラミクス薄膜を形成する水熱合成装置を試作、作成実験を行う。
- (3)水熱合成におけるPZT圧電セラミクス形成のマスキングならびにはんだ付け性が低いチタン材の接合に用いるために、部分電気ニッケルめっき[4]実験を行う。

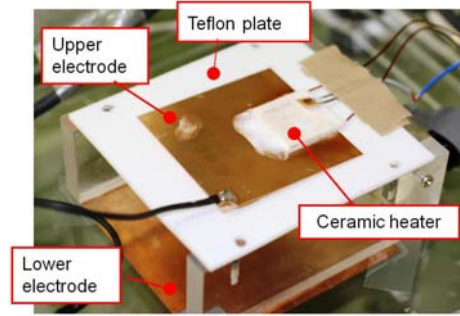


図3 はんだ付け静電植毛装置

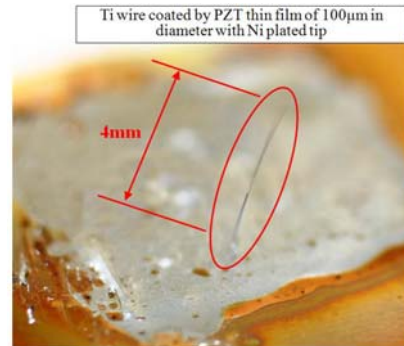


図4 PZT被覆チタン線の静電植毛結果

- (4)マイクロ繊毛アクチュエータ群の外周電極を形成するために、PZT圧電セラミクス薄膜被覆チタン線に物理的なマスキングを施して、真空蒸着装置内で選択的に電極作成する実験を行う。
- (5)マイクロ繊毛アクチュエータの基板との接合強度の測定実験を行い、部分ニッケルめっき、水熱合成、はんだ付けなどが接合強度に及ぼす影響を明らかにする。
- (6)得られたマイクロ繊毛アクチュエータの駆動性能を明らかにするため、3重円筒片持ちはりの固有振動モード解析を行うとともに、得られた固有振動数の交流電圧を印加してアクチュエータの共振駆動実験を行い、駆動性能を明らかにする。
- (7)マイクロ繊毛アクチュエータ群を持つマイクロ搬送機を試作し、微小シートの搬送実験を行い、マイクロ繊毛アクチュエータ群の駆動性能を明らかにする。

4. 研究成果

- (1)図3に示すはんだ付け静電植毛装置を試作し、直径 $50\mu\text{m}$ ~ $200\mu\text{m}$ 、長さ~ 10mm の各種金属線の静電飛翔、はんだ付け植毛実験を行った結果、直径 $100\mu\text{m}$ 、長さ 4mm のすずめっき銅線、チタン線、PZT圧電セラミクス被覆チタン線の飛翔に成功した。静電飛翔のためには、金属針の重量ならびに表面の導電性が重要であることがわかった。また、チタン線は酸化被膜が強固でぬれ性も低いために、はんだ付けがきわめて難しいことが

明らかになった。そのため、先端を部分ニッケルめっきした後、PZT 圧電セラミクス被覆したチタン線を作成してはんだ付け静電植毛実験を行った結果、図4のように少数の接合に成功したが、高い接合強度は得られなかった。

(2)図5に示す、テフロン製オートクレーブ内可動治具を提案・試作し、チタン線材が常に溶液に浸かるようにした結果、水熱合成の効率が向上することが明らかになり、図6に示すような5 μm 立方の明瞭な結晶粒子をもつ膜厚10 μm 程度のPZT 圧電セラミクス膜を得ることができた。

(3)スルファミン酸浴による電気ニッケルめっきの最適条件を求めた結果、図7に示す強固な部分ニッケルめっき層が得られ、その後の水熱合成実験では、ニッケルめっき部にはPZT 結晶は析出せず、マスキング効果があることがわかった。さらに、チタン線とニッケル基板を電気ニッケルめっきにより直接接

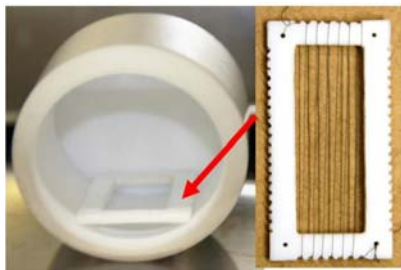


図5 水熱合成用治具

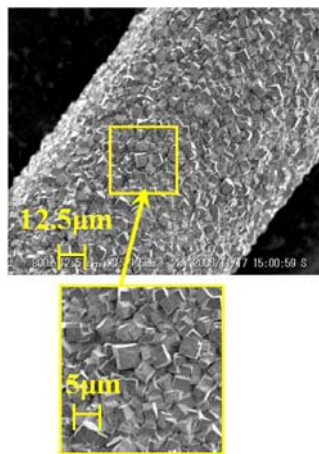


図6 得られたPZT 圧電薄膜

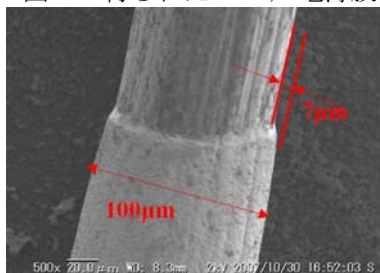


図7 部分ニッケルめっきの結果

合することを試み、図8のように接合に成功した。

(4)レーザー加工により物理マスクを作成して、PZT 圧電セラミクス被覆チタン線材を巻きつけた治具にかぶせ、真空蒸着装置内で適宜回転することにより、その外周両面に電極を形成することに成功した。

(5)はんだ付け静電植毛ならびに単純なはんだ付けで接合されたチタン線を事前の水熱合成の有無、はんだ付け時の温度管理の状況ごとに分けて引張強度試験を行った。さらに、破断面の電子顕微鏡観察を行った。その結果、図9に示すようにニッケル膜の剥離はなく、接合強度には影響を与えないこと、はんだ付け時の酸化により、はんだのぬれ性が低下して図10に示すように接触角が小さくなるために、はんだ接合面積が減少して接合強度が低下することがわかった。さらに、水熱合成の結果、ニッケル膜表面に酸化被膜が生じてぬれ性が低下するために、水熱合成後に希硫酸洗浄することにより、ぬれ性が向上することもわかった。

(6)図11に示すように、マイクロ繊維アクチュエータの根元を固定し、他端をレーザードップラー振動計により測定を行った結果、図12の周波数特性に示すような振動変位特性

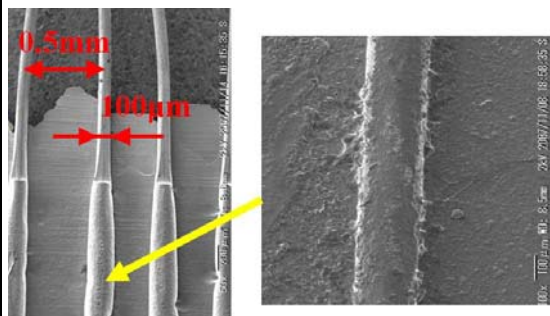


図8 電気ニッケルめっきによる接合

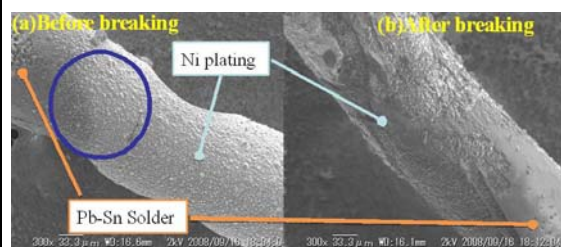


図9 ニッケルめっき剥離の有無

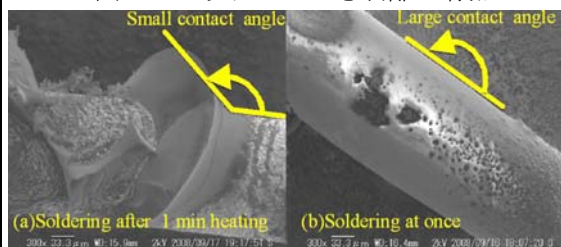


図10 はんだ接合部の接触角

が得られ、3重円筒はりモデルから計算される固有振動数と一致することが明らかになった。

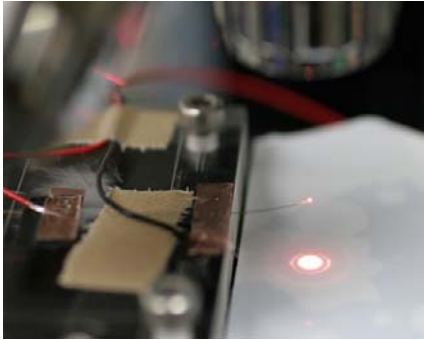


図 1.1 マイクロ絨毛アクチュエータの共振駆動実験

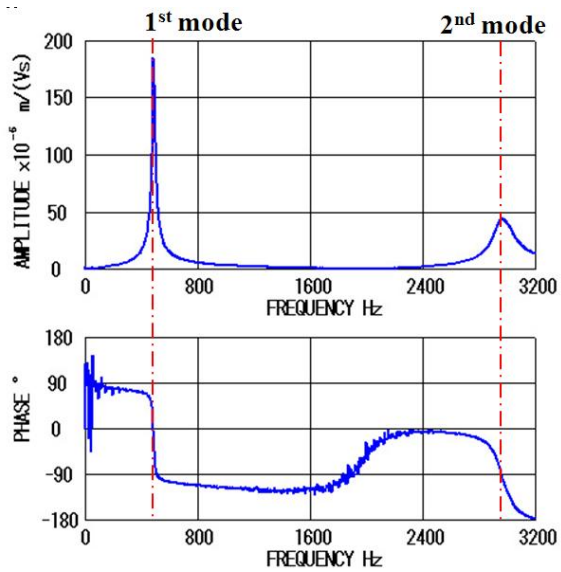


図 1.2 マイクロ絨毛アクチュエータの共振駆動実験結果

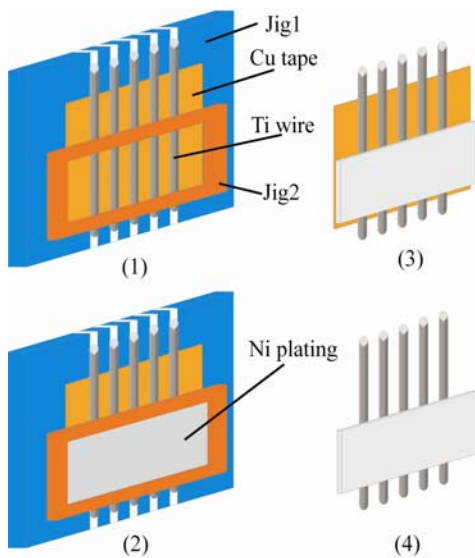


図 1.3 電気ニッケルめっきによる内部電極形成

(7)内部電極群の大きな接合強度が得られる電気ニッケルめっきを用いて、チタン線材の直接接合して内部電極アレイを作成するプロセス(図1.3)を確立し、その内部電極アレイを水熱合成して得られるマイクロ絨毛アクチュエータアレイを作成した。さらに得られたマイクロ絨毛アクチュエータアレイを絶縁層を介しつつ積層して2次元的なマイクロ絨毛アクチュエータ群を得る製造プロセス(図1.4)を確立した。

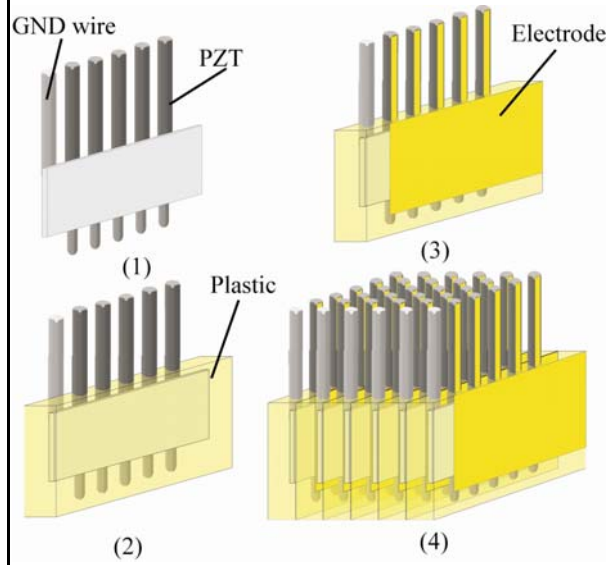
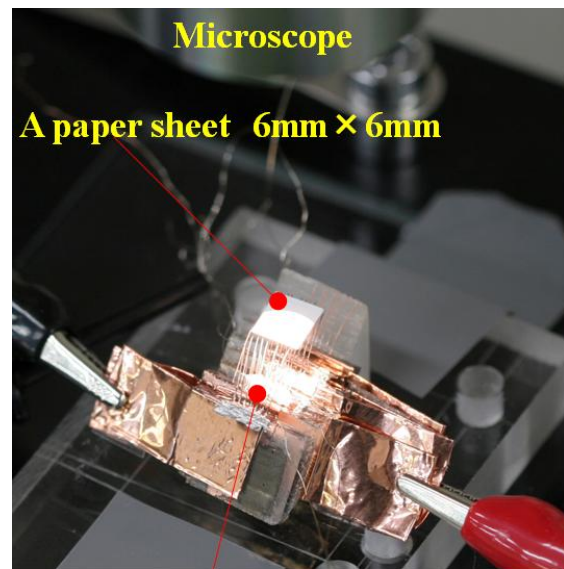


図 1.4 マイクロ絨毛アクチュエータアレイの積層によるアクチュエータ群の作成



Micro cilium actuators in group

図 1.5 試作した斜毛型マイクロ絨毛アクチュエータ群

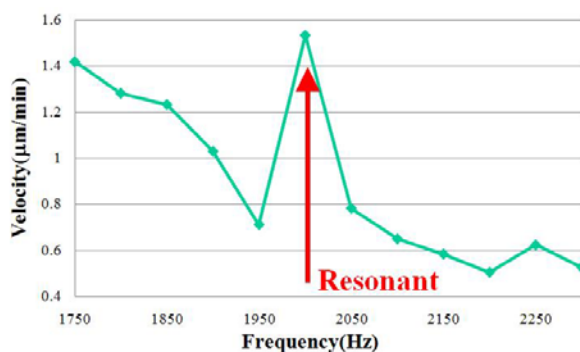


図 1 6 マイクロ繊毛アクチュエータ群の搬送速度の周波数特性

提案したプロセスにより、図 1 5 に示すマイクロ繊毛アクチュエータ群を試作し、斜毛型マイクロ搬送機として、各種の微小シートの搬送実験を行った。その結果、質量 2mg、一辺 6mm の正方形紙片を最高速度 1.53 μ m/min での搬送に成功した。このときの印加電圧の周波数と搬送速度の関係は図 1 6 のように得られ、マイクロ繊毛アクチュエータの共振駆動により、微小シートを搬送できることが明らかになった。

以上のことから、提案した圧電パイプモルフアクチュエータを基板上に多数林立させたマイクロ繊毛アクチュエータ群について、はんだ付け静電植毛法、電気ニッケルめっき法、水熱合成法、選択的外周電極形成法らに基づく基本的な製造プロセスならびに、その駆動性能を明らかにすることができた。

[文献]

- [1] 岩附, 林, 林, 電歪セラミックス-高分子複合材料による多自由度アクチュエータについて, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会論文集, pp.1021-1022, 1989.
- [2] K. Shimoura, T. Tsurumi, Y. Ohba, and M. Daimon, Preparation of Lead Zirconate Titanate Thin Film by Hydrothermal Method, *Japanese Journal of Physics*, pp.2174-2177, 1991.
- [3] 野口, 西田, 中川, 植毛金属板の製造, 1989 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, pp.1029-1030, 1989.
- [4] Y. Utsumi, T. Kitadani and T. Hattori, Optimization of Nickel Electroplating for High Aspect Ratio LIGA Mold Inserts Fabricated by Synchrotron Radiation from "NewSUBARU", Proc. of JMSE/AMSE International Conference on Materials and Processing 2002, pp.245-250, 2002

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 8 件)

- ①西田吉人, 岩附 信行, 森川広一, マイクロ繊毛アクチュエータ群の開発 ~ニッケルめっき電極接合による繊毛アクチュエータアレイ・群の作成と駆動実験~, 日本 AEM 学会誌, 17-1, (2009), pp.2-7, 査読あり
- ②岩附信行, マイクロ繊毛アクチュエータ, *トライボロジスト*, 53-2, (2008), pp.88-93, 査読あり
- ③Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Yoshito Nishida, Fabrication of Micro Cilium Actuators in Group with Nickel Plating and Sheet Conveyance Experiments, CD-ROM Proc. of The 12th International Conference on Mechatronics Technology, (2008), pp.1-6, 査読あり
- ④Nobuyuki Iwatsuki, Yoshito Nishida, Koichi Morikawa, Fabrication of Micro Cilium Actuators in Group and Driving Experiments, Proc. of The 11th International Conference on New Actuators, (2008), pp.342-345, 査読あり
- ⑤Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Micro Cilium Actuators in Group, The 2nd International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, (2008), pp.93-96, 査読なし
- ⑥Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Yoshito Nishida and Ryota Tanabe, Fabrication of a Micro Cilium Actuator and Its Driving Experiments, CD-ROM Proc. of 11th International Conference on Mechatronics Technology, (2007), pp.1-6, 査読あり
- ⑦Nobuyuki Iwatsuki, Kenjiro Morita, Koichi Morikawa, Development of Micro Ciliary Actuators in Group, Proc. of The 10th International Conference on New Actuators, (2006), pp.752-755
- ⑧Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morita, Kenjiro Morita, Development of Micro Ciliary Actuators in Group, Proc. of the 1st International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthrough, (2006), pp. 85-88

[学会発表] (計 19 件)

- ①前田全啓, 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊毛アクチュエータ群の静電植毛, 2009 年度精密工学会春季大会学術講演会, 2009 年 3 月 11 日, 中央大学後楽園キャンパス
- ②岩附信行, マイクロ繊毛アクチュエータ群, (社)日本工業技術振興協会スマート・アクチュエータセンサ委員会講演会, 2009 年 2 月 6 日, 東京工業大学田町キャンパスイノベーションセンター
- ③岩附信行, マイクロ繊毛アクチュエータ群の研究, 文部科学省科学研究費補助金特定領

域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」第5回公開シンポジウム, 2008年12月9日, 東京大学武田先端知ビル

④ Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Yoshito Nishida, Fabrication of Micro Cilium Actuators in Group with Nickel Plating and Sheet Conveyance Experiments, The 12th International Conference on Mechatronics Technology, 2008年10月14日, Radisson Hotel Sudbury

⑤ 尾上知道, 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊維毛アクチュエータの外周電極の分割形成と先端楕円軌道生成への試み, 2008年度精密工学会秋季大会学術講演会, 2008年9月18日, 東北大学川内キャンパス

⑥ Nobuyuki Iwatsuki, Yoshito Nishida, Koichi Morikawa, Fabrication of Micro Cilium Actuators in Group and Driving Experiments, The 11th International Conference on New Actuators, 2008年6月11日, Bremen Convention Center

⑦ 西田吉人, 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊維毛アクチュエータ群の開発～ニッケルめっきに電極接合による繊維毛アクチュエータアレイ・群の作成と駆動実験～, 第20回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2008年5月21日, 別府国際コンベンションセンター

⑧ Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Micro Cilium Actuators in Group, The 2nd International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, 2008年4月17日, APA hotel Tokyo-bay

⑨ Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Micro Cilium Actuators in Group, Proc. of The 4th Public Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthroughs, 2007年11月19日, Okinawa International Convention Center

⑩ Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morikawa, Yoshito Nishida and Ryota Tanabe: Fabrication of a Micro Cilium Actuator and Its Driving Experiment, 11th International Conference on Mechatronics Technology, 2007年11月8日, Lotte Hotel Ulsan

⑪ 岩附信行, 森川広一, 西田吉人, 田辺龍太, マイクロ繊維毛アクチュエータの作成と駆動実験, 第13回日本IFTtoMM会議シンポジウム, 2007年7月12日, 東京工業大学

⑫ 岩附信行, 森川広一, 田辺龍太, 西田吉人, 圧電マイクロ繊維毛アクチュエータの内部電極の接合, 第19回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム, 2007年5月17日, 早稲田大学国際会議場

⑬ 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊維毛アクチュエータ群の研究, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」第3回公開シンポジウム, 2006年12月18日, 仙台国際セン

ター

⑭ 森田堅次郎, 岩附信行, 岡田昌史, 水熱合成法によるマイクロ繊維毛アクチュエータの圧電薄膜の形成, 第12回日本IFTtoMM会議シンポジウム, 2006年6月30日, 東京工業大学大岡山キャンパス

⑮ Nobuyuki Iwatsuki, Kenjiro Morita, Koichi Morikawa, Development of Micro Ciliary Actuators in Group, The 10th International Conference on New Actuators, 2006年6月15日, Bremen Convention Center

⑯ 岩附信行, 森川広一, 森田堅次郎, マイクロ繊維毛アクチュエータの研究, 第18回電磁力関連のダイナミクスシンポジウム, 2006年5月19日, 神戸国際会館

⑰ Nobuyuki Iwatsuki, Koichi Morita, Kenjiro Morita, Development of Micro Ciliary Actuators in Group, 1st International Symposium on Next-Generation Actuators Leading Breakthrough, 2006年4月20日, 幕張プリンスホテル

⑱ 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊維毛アクチュエータ群の研究, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」第2回公開シンポジウム, 2005年12月2日, 岡山大学創立50周年記念館

⑲ 岩附信行, 森川広一, マイクロ繊維毛アクチュエータ群の研究, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「ブレイクスルーを生み出す次世代アクチュエータ研究」第1回公開シンポジウム, 2005年1月25日, 東京工業大学

〔その他〕

ホームページ

<http://www.dynamics.mep.titech.ac.jp/japanese/index.html>

<http://yokota-www.pi.titech.ac.jp/index-A.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩附 信行 (IWATSUKI NOBUYUKI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・教授
研究者番号: 70193753

(2) 研究分担者

森川 広一 (MORIKAWA KOICHI)
東京工業大学・大学院理工学研究科・助教
研究者番号: 00282830

(3) 連携研究者

なし