

平成21年 6月10日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078214

研究課題名（和文） アザラシ型位置決め機構を用いた
メゾ/マイクロ/ナノマニピュレータの開発研究課題名（英文） Development of Meso/Micro/Nano Manipulators
Employing AZARASHI (Seal) Mechanism

研究代表者

古谷 克司 (FURUTANI KATSUSHI)

豊田工業大学・工学部・教授

研究者番号：00238685

研究成果の概要：

マイクロマシン技術の実用化にあたっては従来の寸法の機械とのギャップを埋める必要がある。本研究では、アザラシ型機構を用いて物体を操作・観察するシステムを開発した。ビジュアルフィードバックにより操作対象物を位置決めした。要素技術として、真空中で移動するアザラシ型機構、電流パルスを用いた圧電アクチュエータの変位制御法、ナノメートル精度の位置決め機構、力覚デバイスのためのブレーキ機構についても検討した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	13,700,000	0	13,700,000
2005年度	11,500,000	0	11,500,000
2006年度	9,500,000	0	9,500,000
2007年度	10,900,000	0	10,900,000
2008年度	5,800,000	0	5,800,000
総計	51,400,000	0	51,400,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学，設計工学・機械機能要素・トライボロジー

キーワード：圧電アクチュエータ，位置決め，移動機構，パルス密度変調，ヒステリシス，摩擦，振動，真空

1. 研究開始当初の背景

ナノテクノロジー，微小電気機械システム (MEMS) 技術の実用化にあたっては従来の寸法の機械とのギャップが存在する。それを埋めるため，中間のメゾスケール機械にも注目が集まっている。

これまでに発表されている圧電アクチュエータを用いた平面内3自由度移動機構には，インチワーム機構，衝撃的な慣性力の利用，圧電素子の先端で楕円軌道などを描かせ駆動するなどの方法がある。

研究代表者が提案したアザラシ型機構は，

制御するアクチュエータの数がインチワームより少ないが，xy方向の並進だけでなく θ 方向の回転もできる。本機構は一定摩擦力を与える素子を用いることで，制御が必要な素子数を減らしたところに特徴がある。後ろ足をすりながら移動するアザラシと同様の移動原理のため，アザラシ型機構と呼んでいる。本機構はインチワーム機構に基づく機構より優れている。これを用いることにより，微細作業の容易化，装置および周辺環境の低コスト化に貢献できると期待できる。

2. 研究の目的

本研究では、平成 21 年 3 月までにナノメータからミリメートルオーダーまでの領域で物体を操作・観察するシステムのための位置決め機構を開発することを目的とする。そのために、粗動と微動を一つの小型の機構で実現するアザラシ型機構を用いる。

3. 研究の方法

マイクロコンピュータは、クリーンルームだけでなく、電子顕微鏡内や宇宙環境などの通常環境以外でも動作できる機構とすることが求められる。そのための要素技術として、真空中で移動するアザラシ型機構を開発した。ナノメータオーダーの位置決め精度を実現するためには、圧電アクチュエータ自体の変位制御法も検討する必要がある。そこで、電流パルスを用いた駆動法を提案した。そして、これを応用してナノメータ精度の位置決め機構を試作した。あわせて、力覚デバイスのためのブレーキ機構のプロトタイプも製作した。

4. 研究成果

(1)電流パルスを用いた圧電アクチュエータの変位制御法

電流パルスを用いた圧電アクチュエータの駆動回路の構成を図 1 に示す。n 個の供給用電流源（カレント・ソース）と m 個の吸い込み用電流源（カレント・シンク）をそれぞれ並列に接続する。それらを切り替えスイッチを介して接続する。コンピュータからデジタル出力ボードによりデジタル量として電流値選択信号を出力する。それに基づき、駆動アンプはパルス状の電流で圧電アクチュエータを駆動する。目標値に対して偏差が大きい場合には、電流値の大きい電流源で駆動し、高速な伸縮を得る。偏差が小さい場合には電流地の小さいもので駆動する。偏差が分解能以下の場合には、アンプは切り離れた状態のままである。これにより、分解能の高い伸縮量を得ることができる。パルス状の電流が圧電アクチュエータに流れるため、電流値とスイッチのオン時間を調整することで、精密な値の電荷量を与えることができる。また、電流値にノイズが含まれる場合にも電流が積分された電荷により圧電アクチュエータが制御されるため、ノイズによる伸縮量の誤差は電圧源で駆動するより小さくなる。本方法は、パルス値の段階的な切り替えとパルス密度変調を組み合わせた駆動法であると言える。そのため、通常の D/A 変換器を用いるより段階数が少ないにもかかわらず、高い分解能を得ることができる。また、電荷制御となるため、変位センサで測定した変位をフィードバックしないオープンループ制御にしても、ヒステリシス

の少ない変位を得ることが期待でき、パルス数を数数することで変位を推定することができる。

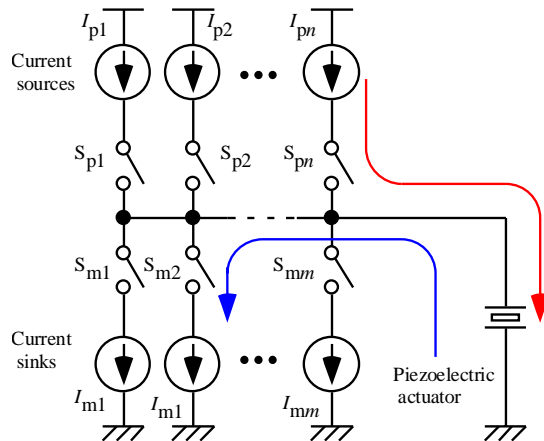


図 1 電流パルス駆動回路の構成

変位拡大率が 10 倍程度の拡大機構の出力で、1 パルスあたりの変位量が 7nm、全ストロークが 70 μm となった。駆動例を図 2 に示す。電流パルス駆動時のヒステリシスは数%であった。ストロークと分解能の比は 10000 倍であり、13 ビット相当のダイナミックレンジが得られた。また、ひずみ率はリニアアンプ駆動と同等であった。実質的には電荷制御となるため、ヒステリシスはリニアアンプ駆動で 7.3%となる条件で、0.3%であった。

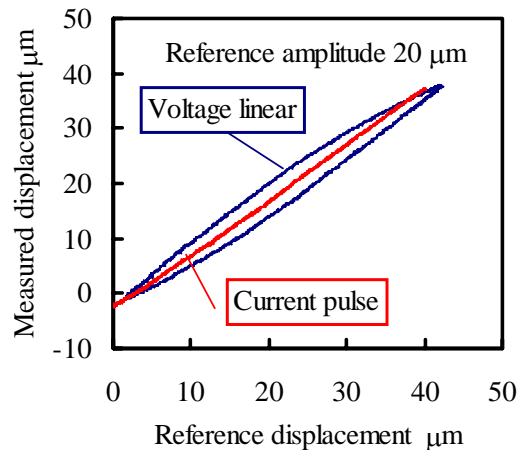


図 2 電流パルス駆動と電圧駆動の比較

Martin のモデルを用いたシミュレーションにより、リニアアンプ方式および電圧駆動と比較した。系の固有振動数より十分に高いパルス周波数で駆動すれば、パルスによる振動は発生しなかった。そのため、リニア駆動とは差がなかった。電圧パルス駆動では、目標値に到達しても常にパルスを与えるため、電流が流れ損失が発生する。電流パルス方式

ではそれが無い。したがって、電流パルス方式が優れていると考えられる。

(2) 高分解能化のための機構の設計と試作

試作した1自由度アザラシ型位置決め機構の構造を図3に示す。伸縮機構とオン・オフ制御する摩擦機構、そして一定摩擦力を与える一定用摩擦機構から構成される。伸縮機構と制御用摩擦機構には、積層型圧電アクチュエータ(静電容量 $1.2\mu\text{F}$)を用いた。機構の外側にはクランプ用のVガイドを設け、そのガイドを押し付けることで摩擦力を発生させた。有限要素解析で固有振動数を解析した。圧電アクチュエータを弾性体として扱い、その両端が機構の枠に固定された状態とした。解析結果より機構の固有振動数は 5kHz 台となった。これらは実験結果とも一致した。電流源は 0.5mA 、 20mA 、 1A の3種類を並列に接続した。すべてのパルスの1周期を $100\mu\text{s}$ で一致させた。微動モードでは1パルスあたり 2.5nm の伸縮となった。アザラシ型位置決め機構の粗動モードにおける伸縮素子の駆動にも電流パルスを用いた。制御用摩擦機構は通常の電圧源のアンプでオン・オフ制御した。コントローラにはパーソナルコンピュータを用いた。変位はリニアスケール(分解能 0.07nm)で測定した。

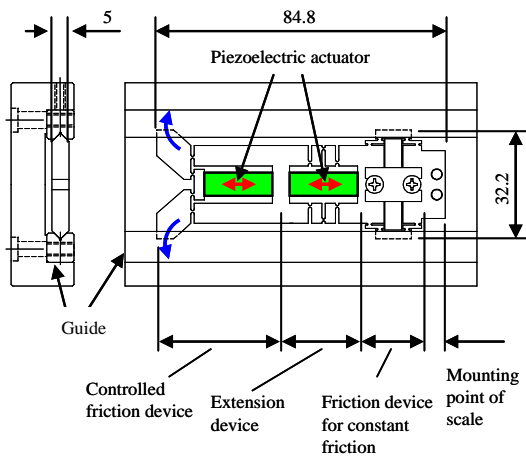


図3 高精度対応1自由度アザラシ型機構

粗動モードでは、電流値を切り替えながら駆動することで伸縮素子を 5ms で放物線状に変位させた。伸縮素子および摩擦機構の動作後の待ち時間はそれぞれ 2ms とした。そのため、粗動モードの1周期は 18ms である。摩擦力は、制御用摩擦機構のオン時は 19.2N 、オフ時は 0.4N 、一定摩擦力は 5.1N であった。微動モードでは、電流パルスをパルス密度変調することで高分解能で送った。目標位置を $+100\mu\text{m}$ として位置決めした例を図4に示す。偏差が各電流値の伸縮量に入ったときに、1段階細かい伸縮量の駆動に切り替えた。微動モードでは、制御用摩擦機構をクランプし、

一定用摩擦機構を変位させた。そのため、摩擦による減衰があるが十分ではなく、振動的になったと考えられる。誤差の範囲が狭いほど整定時間のばらつきが大きくなった。 $100\mu\text{m}$ のストロークで1000回位置決めした結果、 5nm に整定する時間は 376ms であった。

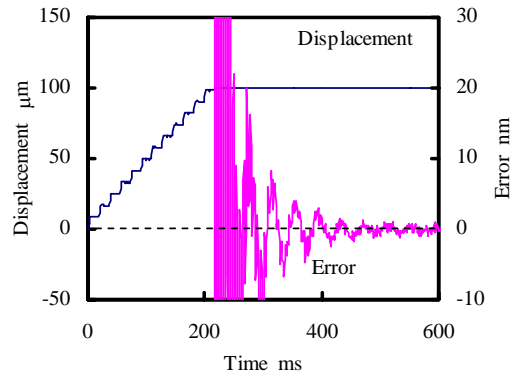


図4 ナノメータ精度位置決め結果

(3) 真空対応アザラシ型機構

アザラシ型機構は摩擦力の差を利用して動作する。一般に、真空における摩擦は大気中と大きく異なる性質を有する。したがって、本機構を真空中で用いる場合にはしゅう動部の材質を検討する必要があると考えられる。摩擦力の制御に磁力を使用する場合には、しゅう動部の材料が磁性体に限られる。研究代表者らは、インパクト駆動機構を高速化するために、移動方向と垂直な方向に慣性力を発生させることで摩擦力を制御した。そこで、しゅう動部の材料に制限がないように、摩擦力の制御に慣性力を用いたアザラシ型機構を提案した。

しゅう動面の材料を選定するために、真空チャンバ内で摩擦摩耗試験を行うための試験機を設計、製作した。微小な摩擦力の検出のために、平行ばね機構を利用した検出器とした。設計には有限要素法ソフトを用いた。ピン・オン・プレート法により往復しゅう動試験を行った。ボールには軸受鋼を用いた。特に面圧が大きい場合には、凝着により表面の磨耗が観察される傾向が強かった。

慣性力による摩擦力制御を利用したアザラシ型機構の駆動原理を図5に示す。摩擦機構AとBが移動に用いるための圧電アクチュエータ(伸縮素子)でつながれている。摩擦機構Aは自重による一定摩擦力を発生する。摩擦機構Bには先端におもりを取り付けた圧電アクチュエータ(摩擦発生素子)が移動方向と垂直な方向に取り付けられている。同図左のように摩擦発生素子が伸長すると、おもりを押すことで下向きの慣性力を発生する。それにより垂直が増加し摩擦力が大きくなる。また同図右のように摩擦発生素子が収縮す

ると、おもりを引きつけることで上向きの慣性力を発生する。それにより垂直抗力が減少し、摩擦力が小さくなる。本機構では、摩擦発生素子の立上り・立下りを正弦波状にした変形台形波を印加し、慣性力を発生させた。

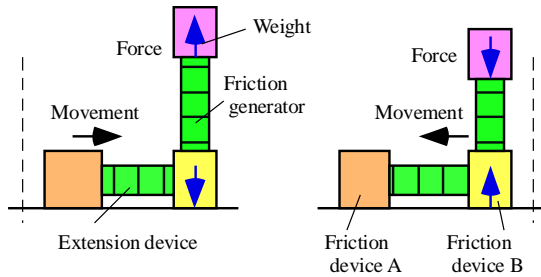


図5 慣性力により摩擦力を制御する機構

実験に用いたアザラシ型機構は、全体の寸法が $50 \times 20 \times 34\text{mm}$ 、質量が 62g である。走行面の材質には、アザラシ型機構のしゅう動部と同じ SUS304 に加え、真空中でしゅう動する部分に用いられている4種類の材質 (TiN, MoS_2 , TiO_2 , A5052) を用いた。摩擦係数は $0.73 \sim 0.12$ と大きく異なった。高真空槽を用いて真空中 ($3.1 \sim 7.3 \times 10^{-5}\text{Pa}$) と大気中で動作試験を行った。

摩擦制御用圧電アクチュエータは、機構全体が跳躍しない範囲で伸縮させた。基本周波数は 115.0Hz とした。1周期ごとの階段状変位になり、アザラシ型機構の原理にしたがって動作した。大気中では駆動用印加電圧に比例した変位が得られた。この2つのことから慣性力による摩擦制御が有効であったと言える。一方、真空中では印加電圧が小さいときに移動できないことが明らかとなった。これは凝着が原因であると考えられる。大気中および真空中における変位の駆動電圧に対する変化率を図6に走行面の材質ごとに示す。真空中で摩擦係数が小さい MoS_2 や TiO_2 を用いると、向きにより変位が大きく異なった。特に摩擦係数の小さい MoS_2 は大気中でも同様の傾向があった、また大気中における摩擦係数が大きい TiN でも起こった。A5052 は真空における変位が大きく、向きによる変位の差も小さかった。したがって真空中の動作に最も適していると考えられる。

(4) マイクロマニピュレータの試作

試作したマイクロマニピュレータの構成を図7に示す。本マニピュレータは、L字形3自由度アザラシ型機構と、高さ方向に移動させる1軸のアザラシ型機構で構成される。3自由度機構上に微小物操作用のステージ (S50C製、 $10 \times 10 \times 1\text{mm}$) を設置した。マイクロピンセットを図8に示す。マイクロピンセットは、フレームと2つのバイモルフ圧電素子と微小物を挟むためのつまみから構成される。バイモルフ圧電素子は、加振側と振動測

定側の2種類ある。ビーズを挟むと加振側から振動が微小物を介して測定側へ伝わる。この振動を測定し、微小物の保持認識を行った。このマイクロピンセットをz軸アザラシ型機構に取り付けた。CCDカメラ(40万画素)の映像を画像キャプチャボードを用いて、 640×480 ピクセルの画像として取り込んだ。

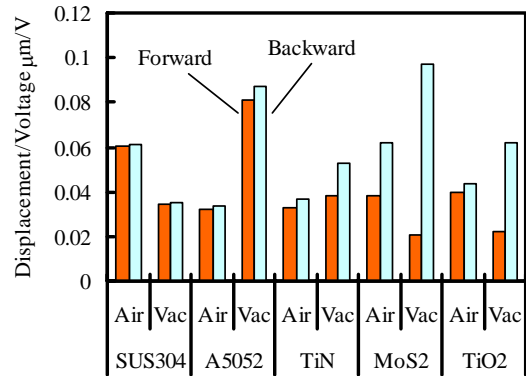


図6 走行面材料の真空中移動量への影響

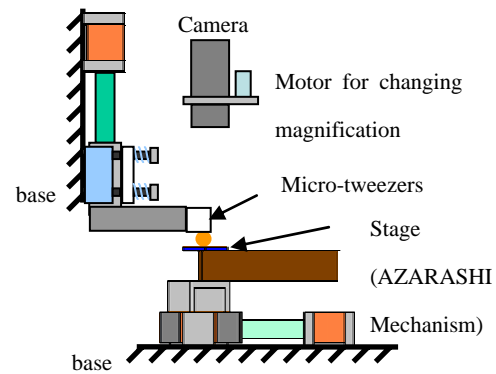


図7 マイクロマニピュレータの構成

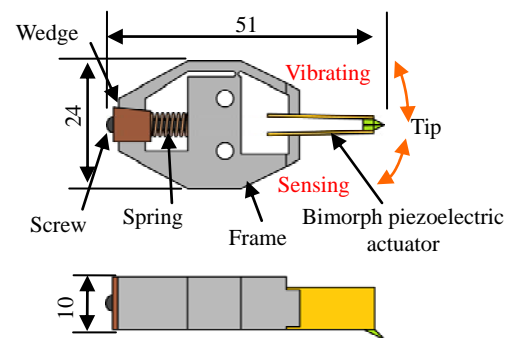


図8 ピンセットの構造

実験で扱う微小物体は、直径が $60 \sim 70 \mu\text{m}$ のガラスビーズとした。レンズ倍率を変化させることで位置決め精度を向上させる場合には、操作可能な範囲が狭くなる。そこで、研究代表者らが提案しているローカル・マシ

ニング・ステーション(LMS)方式を適用した。LMS方式では、全体の座標系の中に作業領域のための座標系を設定し、その局所座標系に基づいて実際の作業を行う。これにより、局所的な作業領域の範囲では高精度な位置決めができるようになる。

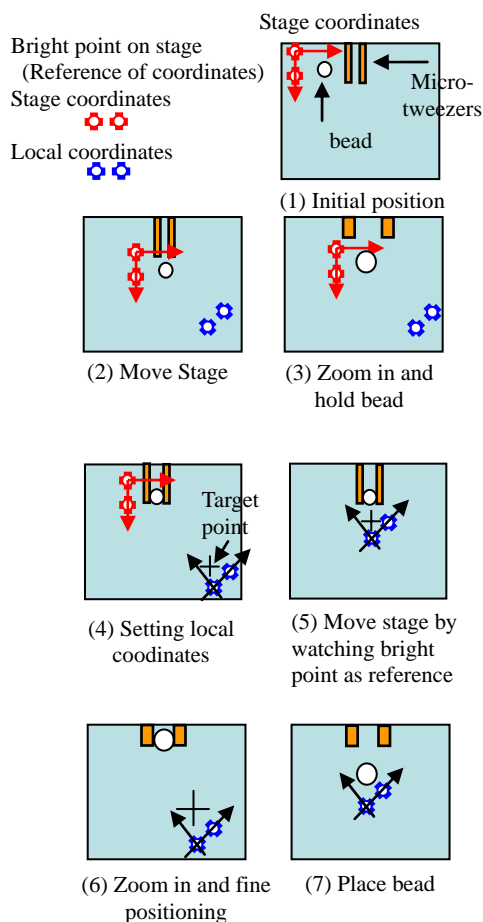


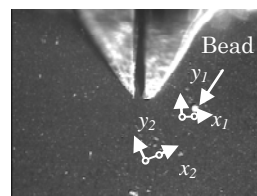
図9 マイクロマニピュレーションの手順

LMS方式に基づくビーズの操作方法を図9に示す。図は、カメラで撮影したときの様子であり、ビーズ、ステージの凹凸による輝点、マイクロピンセットを示す。ステージの2つの輝点を基にローカル座標、ステージ座標を定義する。LMS方式に基づくビーズの移動は以下の7ステップを繰り返す。①ステージ座標系を輝点を基に設定し、ビーズの位置を測定する。②ステージ座標系を基にステージを移動させ、ビーズをピンセット先端に移動させる。③レンズの倍率を上げ、ビーズを保持する。④目標点近傍の輝点をローカル座標として設定する。⑤ローカル座標を基にステージを移動させる。⑥倍率を上げ、精密位置決めする。⑦位置決め後、ビーズを配置する。いったん局所座標系を設定すれば、その近傍で高精度な操作を継続できる。局所座標系によりステージを移動するため、ステージ座標

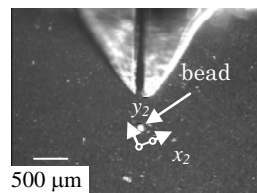
系のみには比べ可動範囲が4倍となる。LMS方式に基づき右上のビーズを画面中央に移動させた例を図10に示す。

レンズ倍率を最低の $5.9\mu\text{m}/\text{ピクセル}$ に固定して実験した。湿度による吸着力の影響を抑えるために、低湿度下での実験が望まれる。ビーズ、輝点の位置は、カメラの画像を二値化し、白色画素の重心計算から求めた。ピンセットの先端位置も画像から求めた。2つの輝点を選びステージ座標系を設定した。ステージ座標を基にステージを移動した。配置後の位置は、高倍率にして撮影した画像から測定した。自動配置成功回数が10回となるまで繰り返した。配置精度を表1に示す。x方向、y方向ともに同じ程度の誤差となった。誤差は、低倍率での位置測定精度が低いためであると考えられる。ビーズのピックは100%成功したが、リリースの成功率は83%であった。次にLMS方式により10回自動配置を繰り返した。配置精度を比較するため、固定倍率で使用した輝点をLMS方式のローカル座標の基準点とした。LMS方式に基づく移動の結果を表1に示す。配置精度は、固定倍率に比べ改善が見られた。

- 1: Stage coordinates
- 2: Local coordinates



(a) Before manipulation



(b) After manipulation

図10 ビーズの操作例

表1 ビーズの配置精度

方法	カメラ倍率	標準偏差 μm	
		x	y
通常	2	21.3	16.8
LMS方式	2~12	9.5	8.4

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13件)

- ① 古谷克司, 太田徳幸, 古田淳: 電流パル

ス駆動によるアザラシ型位置決め機構の高分解能化, 精密工学会誌, 74, 4, pp. 411-415, 2008, 査読有

- ② 古谷克司: 非鉛圧電アクチュエータの技術動向と応用, 日本 AEM 学会誌, 15, 4, pp. 391-398, 2007, 査読無[解説]
- ③ 古谷克司: 圧電効果を用いたセンサ, 計測と制御, 45, 4, pp. 296-301, 2006, 査読有[解説]
- ④ K. Furutani, K. Iida: Driving method of piezoelectric actuator by using current pulse, Meas. Sci. Technol., 17, 9, pp. 2387-2394, 2006, 査読有
- ⑤ 古谷克司: はじめての精密工学: 圧電アクチュエータ - 精密位置決めへの応用, 精密工学会誌, 72, 4, pp. 449-452, 2006, 査読有[解説]
- ⑥ 古谷克司, 河越克己: 3 自由度アザラシ型位置決め機構の移動特性の改善, 電気学会論文誌, E 編, 126, 4, pp. 131-136, 2006, 査読有
- ⑦ 古谷克司, 波多野 誠, 金山尚樹: 圧電アクチュエータを用いた一方向ブレーキ機構, 精密工学会誌, 72, 3, pp. 377-381, 2006, 査読有

ほかに査読有原著論文 3 件, 査読無解説記事 3 件

[学会発表] (計 3 8 件)

- ① 古谷克司: 圧電アクチュエータとその応用デバイス, 2009 年度精密春季予稿, pp. 941-942, 2009[キーンノートスピーチ], 東京都文京区
- ② 古谷克司ほか: 電流パルスを用いた圧電アクチュエータ駆動における変位に対する外力の影響のシミュレーション, 第 17 回 MAGDA 予稿, pp. 235-238, 2008, 茨城県日立市
- ③ K. Furutani et al.: Evaluation of Driving Performance of Piezoelectric Actuator with Current Pulse, Proc. 10th Int. Workshop Adv. Motion Cont., pp. 387-392, 2008, Trento, Italy
- ④ K. Furutani et al.: Performance of AZARASHI (Seal) Positioning Mechanism with Friction Control by Inertial Force, Proc. 11th Int. Conf. New Actuators, pp. 997-1000, 2008, Bremen, Germany
- ⑤ K. Furutani et al.: Improvement of Positioning Resolution and Velocity of AZARASHI (SEAL) Mechanism, Proc. 10th Int. Conf. New Actuators, pp. 648-651, 2006, Bremen, Germany
- ⑥ K. Furutani et al.: Performance of Driving Method of Piezoelectric Actuator by Using Current Pulse, Proc.

9th IEEE Int. Workshop Adv. Motion Cont., pp. 506-511, 2006, Istanbul, Turkey

- ⑦ K. Furutani et al.: Application of AZARASHI (Seal) Mechanism to Fine Motion Stage of Atomic Force Microscope, Proc. 3rd Int. Conf. Leading Edge Manuf. in 21st Century, pp. 975-980, 2005, Nagoya, Japan
 - ⑧ K. Furutani et al.: One-way Brake Mechanism Using Piezoelectric Actuator, Proc. IEEE Int. Conf. Mechatron. Autom., pp. 1235-1240, 2005, Niagara Falls, ON, Canada
 - ⑨ K. Furutani et al.: Machining Characteristics with Nanometer-cutting Machine Equipped Parallel Mechanism, Proc. 19th Ann. Meet. Am. Soc. Precis. Eng., pp. 590-593, 2004, Orlando, FL, USA
- ほかに国際会議プロシーディング 4 件, 国内講演会 1 9 件, 招待講演 6 件

[図書] (計 3 件)

- ① 超精密位置決め技術専門委員会監修; 古谷克司(分担): 実用精密位置決め技術事典, 産業技術サービスセンター, 2008, pp. 182-183, pp. 206-212, pp. 682-687, pp. 687-692
- ② 日本 AEM 学会編, 谷順二, 高橋弘文, 永田肇, 柿本健一, 和田智志, 野口祐二, 道川貞弘, 古谷克司: 無鉛圧電セラミックス・デバイス, 養賢堂, 2008, pp. 154-196 [日本 AEM 学会著作賞]
- ③ 吉川昌範ほか編; 古谷克司(分担)ほか: 最新 機械機器要素技術, エヌジーティー, 2008, pp. 179-182

[産業財産権]

○出願状況 (計 1 件)

- ① 古谷克司, 宗片睦夫: 圧電素子駆動装置および駆動方法, 特願 2004-349474, 2004 年 12 月 2 日

○取得状況 (計 1 件)

- ① 古谷克司, 松野晋: 移動機構, 特許第 4162351 号, 2008 年 8 月 1 日

研究組織

(1) 研究代表者

古谷克司
豊田工業大学・工学部・教授
研究者番号: 0 0 2 3 8 6 8 5

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし