

平成 21 年 5 月 27 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078202

研究課題名(和文) 特殊温度環境下で利用できる革新的アクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of innovative actuator for special temperature environment

研究代表者 樋口 俊郎 (HIGUCHI TOSHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号：10111569

研究成果の概要：

本研究では、特殊温度環境下で利用できるアクチュエータの開発を行った。円筒状バイメタルが平坦な熱源上に置かれると熱伝導の非対称性によりトルクを発生することを発見し、これを基本とする振動子を作製、その自励振動が高温環境下でも発現することを実験的に示した。また鉄 ガリウム磁歪アクチュエータを提案し、小型化の可能性、高温・極低温下の特性を磁歪振動子により評価し、それら実験結果と合わせ、小型リニアアクチュエータ、球面モータの製作により革新的なマイクロメカニズムの実現の可能性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	9,300,000	0	9,300,000
2005年度	11,300,000	0	11,300,000
2006年度	13,000,000	0	13,000,000
2007年度	12,600,000	0	12,600,000
2008年度	9,800,000	0	9,800,000
総計	56,000,000	0	56,000,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：

キーワード：レーザ加熱，バイメタル，磁気浮上，自励振動，磁歪材料，熱駆動アクチュエータ，極低温，超伝導材料

1. 研究開始当初の背景

今後の科学技術と産業の発展には、特殊温度環境下での対象物の精密操作が不可欠であり、これを実現するために、広範な温度範囲で機能するアクチュエータの開発が必要である。キュリー温度以上では、磁性材料や圧電材料の有効な特性が無くなり、最も利用されている電磁モータや圧電アクチュエータがそれらの機能を失うという致命的な問題がある。また極低温下では、摺動面の結露や極度な熱収縮により正常な

動作が行われない問題点がある。当研究室では、これまで圧電素子を用いたインパクト駆動機構に関して研究を行ってきた。この原理を利用し微小金属体にレーザ照射を行うことにより急速な熱膨張を生じさせ、これで発生する慣性力を利用することにより同様なインパクト推進機構が広温度範囲で実現できるのではないかと考えた。また極低温下においては、高温超伝導材料のピン止め効果を用いることにより軟磁性体の磁気浮上が可能であり、これによる搬送機構が

実現できると考えた。

2. 研究の目的

従来の方式のアクチュエータにとってはきわめて厳しい特殊環境である高温・極低温の環境を対象とし、それらの環境においても機能する新機構のアクチュエータ・センサの開発を目指す。固体の熱膨張係数の温度依存性は小さいことから、熱変形を利用する駆動機構は、高温下においても機能すると考えることができる。また極低温では、超伝導材料や磁歪材料を利用すれば、従来のアクチュエータの問題点を解決できる。本研究ではレーザー照射による金属の熱膨張や、機能性材料の優れた特性を活用し、以下に挙げるメカトロニクス技術の開発を具体的な課題とした。

- (1) 熱駆動型アクチュエータ
- (2) 極低温用磁気浮上搬送装置
- (3) 高温用高感度磁気センサ
- (4) 広温度範囲で使用できる磁歪アクチュエータ

3. 研究の方法

(1) 熱駆動型アクチュエータ

熱インパクトアクチュエータの設計、製作を行い、その動作原理を実験により検証し、考案の有効性を確認する。また電気炉を用い、高温雰囲気中の材料挙動について基礎実験を行い、常温で得られたアクチュエータの駆動原理が高温でも適応可能か検証する。バイメタル駆動アクチュエータに関して動作中の変位、温度、歪の時間履歴を詳細に行い、その自励振動発現の原理を明らかにする。また自励振動の高温 (<300)での挙動を検証する。

(2) 極低温環境に適した磁気浮上搬送装置

超伝導材料のピン止め効果を用いた変位保持機構についてその有用性を検証する。超伝導材料を用いた軟磁性材料の磁気浮上に関してヨークの形状、磁気回路により、搬送システムとして実用的な程度までの浮上力特性の向上を試みる。

(3) 高温用高感度磁気センサ

磁歪材料 (Terfenol-D) とニオブ酸リチウム (LiNbO₃) を接合した積層体を用いた磁気センサを試作し、その感度、周波数応答性、温度特性を実用的なシステムで測定する。

(4) 広温度範囲で使用できる磁歪アクチュエータ

鉄ガリウム合金 (Fe_{81.6}Ga_{18.4}) を用いた磁歪アクチュエータに関して変位の温度特性を30K から 500K の間で測定する。また鉄ガリウム合金の機械加工性 (精密切削) および小型化における磁歪特性を詳細に調べ、その磁気・機械特性を有効に利用したマイクロアクチュエータを作製し、性能評価を行う。

4. 研究成果

(1) 熱駆動型アクチュエータ

レーザー照射による急速な熱膨張を利用した駆動機構においては、熱振動子のレーザー照射応答を詳細に測定することで、駆動に適したアクチュエータの材質、形状、レーザー照射方法を検証した。その結果、0.3mm 角 (材質: 真鍮) では、シャッターによる照射の単純なオンオフでは加熱・冷却の速度が同等であること、片側照射では曲げ変形が発生すること、また連続波レーザーの場合、非対称スリットカムの回転でレーザー照射の開閉を制御することで、駆動に適した加熱・冷却の時間応答を生成できることを確認した。また材質の比較により真鍮がレーザーの熱吸収率の点において優れており、形状の比較による熱伝導、温度上昇の寸法効果を確認したことで、駆動を実現可能な形状を考案した。以上、設計方針を基に熱インパクト駆動を実現するアクチュエータの作製を超精密加工により行った。しかしながら、アクチュエータの小型化に伴い摺動部の表面状態が駆動に大きく影響し、一方向の安定した移動を実現するには至らなかった。

この研究過程において、バイメタルを用いた自励振動現象を発見し、これを基本にした振動型、転がり型アクチュエータを考案した (図1)。

これは丸めたバイメタルを平坦な熱源上に配置するのみで駆動でき、将来的に、搬送システム、ディスプレイ等のアクチュエータや温度センサとして利用できる画期的な技術であると考えられる。自励振動現象に関しては、ひずみゲージ、サーモグラフィーによる運動中の詳細な歪、温度分布の測定により、トルクが、バイメタルの温度分布の非対称性、そして進行方向、熱源との接点後方に高温部が存在することで生じる連続的な曲げ変形に起因することを確認した。また図2に示す振動子の衝撃力を利用したインパクト駆動アクチュエータを試作し、低速ではあるが一方向への安定した移動が可能であることが実証した。また高温環境下での動作検証として、図3のように電気炉内に抵抗ヒータを配置することで温度勾配を作り出し、300 の雰囲気中で、プラス100 の熱源で自励振動現象が発生することを確認した。またバイメタルの代わりに単一金属 (ステンレス、真鍮) の帯を振動子に巻いた場合でも自励振動が発現することを発見し、材質による振動特性を詳細に測定した。また振動子を中空にするなど、振動子の形状改善によりバイメタルの冷却効果を増加させ、自励振動発生温度差を劇的に低下できることがわかった。以上の研究成果から、広温度範囲 (室温から超高温) で使用できる実用的 (シンプル、安価) なアクチュエータの駆動機構が提案でき、特殊温度環境下で使用できるアクチュエータ開発において大きな方向性を示した。

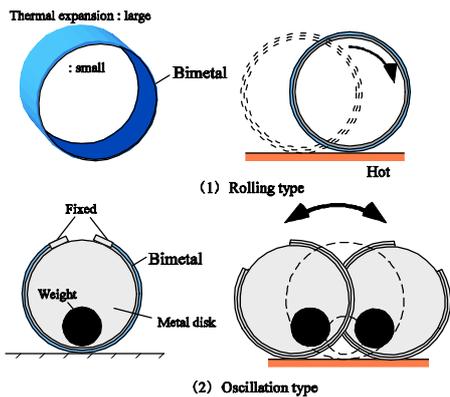


図 1 バイメタルを用いた熱駆動型アクチュエータ

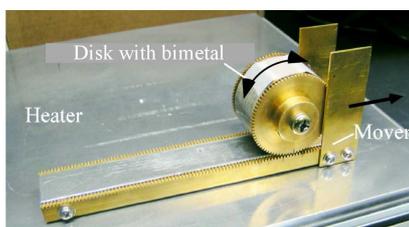


図 2 インパクト駆動アクチュエータ

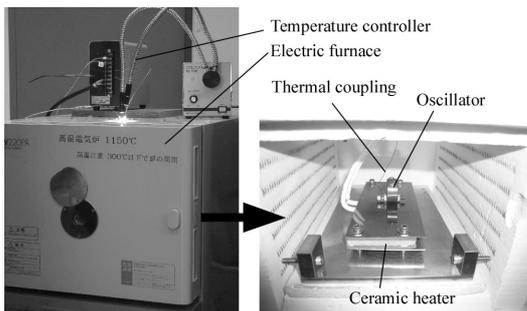


図 3 電気炉内での自励振動の観測

(2)極低温下で使用できる磁気浮上搬送装置
 高温超伝導材料のピン止め効果を用いた軟磁性材料の磁気浮上について、磁性ヨーク、超伝導材料の形状の点から磁気回路の改善を行い、浮上力の最大値、剛性の向上を図った。また吸引力の正の剛性が、ピン止め磁束の分布の固定に起因することを突き止め、これを境界条件とする有限要素法で、浮上力を解析的に計算した。更に超伝導材料、磁性ヨーク、永久磁石からなる8kgの浮上体を、磁性体のレール下に吊り下げる磁気浮上搬送機構を試作し、浮上の動作を確認することで、その実用性を示した。

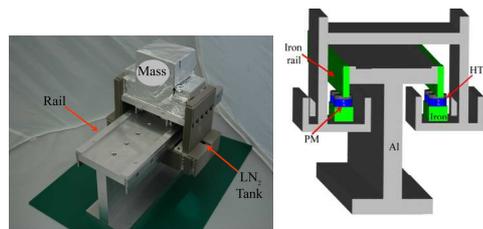


図 4 極低温用磁気浮上搬送機構

(3)高温用高感度磁気センサ
 磁歪材料 (Terfenol-D) とニオブ酸リチウム (LiNbO3, キュリー温度 ~ 1200) を接合した積層体を、永久磁石からなる磁気回路に組み込んだ磁気センサを作製し、その感度と温度特性を詳細に測定した。その結果、ギャップ 0.1mm 付近で 50V/mm の高い感度が得られ、それが 250 の雰囲気下においても室温の 80% 以上で維持できることを確認した。

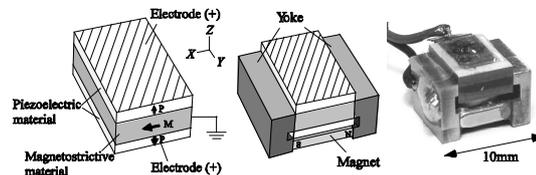


図 5 高温用磁気センサ

(4) 広温度範囲で使用できる磁歪アクチュエータ

図 6 のような直径 2mm 長さ 6mm のマイクロ振動子を作製した。ここで内部に配置される直径 1mm 長さ 5mm の磁歪素子 (鉄ガリウム合金) は超精密加工により切り出した。レーザードップラー振動計を用いた変位観測により 1.2 μm, バンド幅 30kHz とこの振動子が実用上十分利用できる可能性を示した。この結果は、小型化でバルクと同様の優れた変位特性が維持される、渦電流の減少でバンド幅が向上するマイクロ化の特徴、更には鉄ガリウム合金の優れた機械的 (高い引っ張り強度)、磁氣的 (低起磁力駆動) 特徴を実用可能なアクチュエータの形で初めて実証したものである。

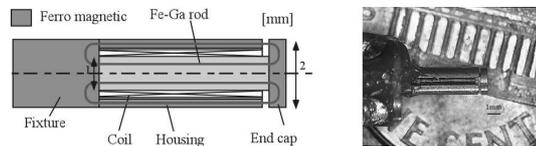


図 6 マイクロ磁歪振動子

またマイクロ磁歪振動子の応用として図 7 のような小型リアアクチュエータを試作した。これは圧電素子で実績があるスムーズインパクト駆動機構をベースにしたもので、ノコギリ派の電流入力により摩擦駆動棒上の移動子が一方へ移動するものである。これに関して、コイルの一時遅れ系に着目した ON/OFF 電圧駆動法の検証を行った。その結果、FET で発生したパ

ルス電圧により移動体の双方向運動が実現でき、駆動条件や回路設計の方針が明らかになった。運動性能に関してはデューティ比や駆動周波数の最適化、もしくはバイアス磁石を併用した方向制御、また共振周波数やインピーダンス特性の向上による改善が可能であり、鉄ガリウム合金の小型化と合わせると将来大きな技術的な飛躍が期待できる。

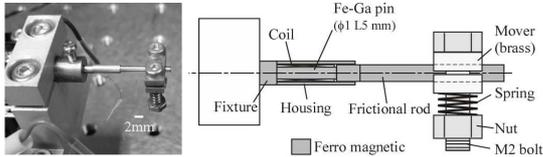


図7 小型リニアアクチュエータ

鉄ガリウム合金を用いた小型磁歪球面モータを提案、試作によりその動作を確認した。これは対になる磁歪ロッドの伸縮を利用し、永久磁石の保持機構を有した単純で小型、低電圧で駆動可能なものである。今回、プリミティブなものではあるが、ロータを2軸で回転させることに成功し、その可能性が示された。

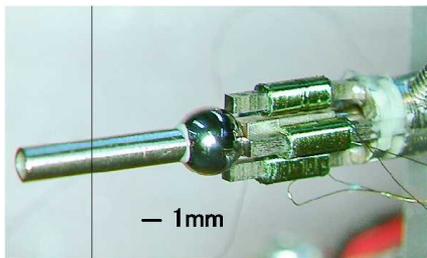


図8 球面モータ

当磁歪アクチュエータに関して、極低温下でも室温と同等の変位特性が維持されることを実験的に確認した。また高温下においては図9のような実験システムにより磁歪の温度特性を測定した。ここで磁歪振動子には絶縁セラミックス治具に固定された1層のコイルが巻かれている。実験により600℃まで変位が発生し、アクチュエータの温度特性がキュリー温度に依存することが確認された。

以上の実験結果から、鉄ガリウム合金磁歪アクチュエータの小型化、広温度範囲での使用の可能性が実験的に実証された。また小型リニアアクチュエータ、球面モータの試作により鉄ガリウム合金による革新的なマイクロメカニズムの実現の可能性が示された。

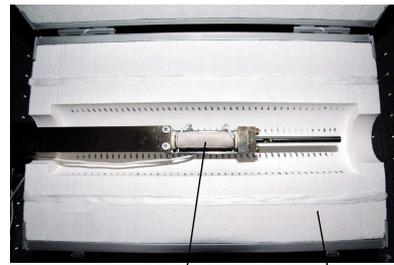


図9 高温雰囲気下での磁歪振動子

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16件)

Toshiyuki Ueno, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Toshiro Higuchi, Miniature spherical motor using iron gallium alloy (Galfenol), *Sensors and Actuators A*, 掲載予定, 2009, 査読有

Toshiyuki Ueno, Eric Summers, Marilyn Wun Fogle and Toshiro Higuchi, Micro magnetostrictive vibrator using iron gallium alloy, *Sensors and Actuators A*, **148**, 280-284, 2008, 査読有
Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Two-DOF Micro Magnetostrictive Bending Actuator for Wobbling Motion, *IEEE Transactions on Magnetics*, **44**, 4078-4080, 2008, 査読有

Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi, Miniature magnetostrictive linear actuator based on smooth impact drive mechanism, *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, **28**, 135-141, 2008, 査読有

Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Marilyn Wun Fogle, Micromagnetostrictive vibrator using a U-shaped core of iron gallium alloy (Galfenol), *Journal of Applied Physics*, **103**, p. 2008, 査読有

Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi, Zero Power Magnetic Levitation Using Composite of Magnetostrictive/Piezoelectric

Materials, *IEEE Transactions on Magnetics*, **43**, 3477-3482, 2007, 査読有

上野敏幸, 樋口俊郎, Fe-Ga合金(Galfenol)と非磁性材料の積層型ユニモルフアクチュエータ, *日本応用磁気学会誌*, **31**, 376-379, 2007, 査読有

上野敏幸, Eric Summers, Marilyn Wun Fogle, 樋口俊郎, Fe-Ga合金

(Galfenol)を用いたマイクロ磁歪振動子, 日本応用磁気学会誌, 31, 372-375, 2007, 査読有

Toshiyuki Ueno, Eric Summers, Toshiro Higuchi, Machining of iron-gallium alloy for microactuator, *Sensors and Actuators A*, 137, 134-140, 2007, 査読有

Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Magnetic Circuit for Stress-Based Magnetic Force Control Using Iron-Gallium Alloy, *IEEE Transactions on Magnetism*, 43, 2594-2596, 2007, 査読有

Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Hidekazu Teshima, Hosei Hirano and Toshiro Higuchi, Numerical Modeling of Iron Yoke Levitation Using the Pinning Effect of High Temperature Superconductor, *IEEE Transactions on Magnetism*, 43, 2001-2008, 2007, 査読有

Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Hidekazu Teshima, Hosei Hirano, Toshiro Higuchi and Eric Summers, Zero Power Positioning Actuator for Cryogenic Environments by Combining Magnetostrictive Bimetal and HTS, *Sensors and Actuators A*, 135, 787-791, 2007, 査読有

Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi, Novel composite of magnetostrictive material and piezoelectric actuator for coil-free magnetic force control, *Sensors and actuators A*, 129, 251-255, 2006, 査読有

Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Hidekazu Teshima, Hosei Hirano and Toshiro Higuchi, The Characteristics of Trapped Magnetic Flux inside Bulk HTS in the Mixed μ Levitation System, *Physica C: Superconductivity and its Applications*, 445-448, 343-346, 2006, 査読有

Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, High sensitive and heat-resistant magnetic sensor using magnetostrictive/piezoelectric laminate composite, *IEEE Transactions on Magnetism*, 41, 3670-3672, 2005, 査読有

Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, and Toshiro Higuchi, Improvement of Magnetic Circuit in Levitation System Using HTS and Soft Magnetic Material, *IEEE Transactions on Magnetism*, 41, 4003-4005, 2005, 査読有

[学会発表](計28件)

(1) Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Micro

Spherical motor using Iron-Gallium Alloy (Galfenol), Actuator 2008, 2008年6月10日, プレーメン

(2) Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Sze Keat Chee, Takeshi Yano and Toshiro Higuchi, Miniature Galfenol Actuator with Displacement Magnifying Mechanism for Cryogenic Environments, Actuator 2008, 2008年6月10日, プレーメン

(3) 上野敏幸, 山崎多聞, 樋口俊郎, FeCo2V(パーメンジュール)を用いたマイクロ磁歪アクチュエータの開発, 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22日, 大分

(4) 上野敏幸, 齊藤千尋, 今泉伸夫, 樋口俊郎, Fe-Ga合金(Galfenol)を用いたマイクロ球面モータ, 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22日, 大分

(5) Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Sze Keat Chee, Takeshi Yano and Toshiro Higuchi, Miniature Iron-Gallium Actuator with Displacement Magnifying Mechanism, IEEE International conference on Magnetism, Intermag2008, 2008年5月5日

(6) Toshiyuki Ueno, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Toshiro Higuchi, Translatory and Wobbling Micro Magnetostrictive Actuator, Smart structures and materials 2008, 2008年3月9日, サンディエゴ

(7) Toshiyuki Ueno, Chihiro Saito, Nobuo Imaizumi, Toshiro Higuchi, Miniature Spherical Motor using Iron-Gallium Alloy (Galfenol), Smart structures and materials 2008, 2008年3月9日, サンディエゴ

(8) 上野敏幸, 齊藤千尋, 今泉伸夫, 樋口俊郎, 磁歪パイメタルを利用した小型球面モータ, 第50回自動制御連合講演会, 2007年11月24日, 慶應義塾大学

(9) 上野敏幸, 齊藤千尋, Marilyn Wun Fogle, 今泉伸夫, 樋口俊郎, 鉄-ガリウム合金のU字コアを用いたマイクロ磁歪振動子, 第16回MAGDAコンファレンス in 京都, 2007年11月22日, 京都

(10) 上野敏幸, 齊藤千尋, 今泉伸夫, 樋口俊郎, 鉄-ガリウム合金(Galfenol)を用いた小型球面モータ, 第16回MAGDAコンファレンス in 京都, 2007年11月22日, 京都

(11) Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Investigation of Micro Bending Actuator using Iron-Gallium Alloy (Galfenol), MHS2007 & Micro-Nano COE, 2007年11月13日, 名古屋

- (12) Toshiyuki Ueno, Chihiro Saito, Marilyn Wun-Fogle, Nobuo Imaizumi, Toshiro Higuchi, Micro Magnetostrictive Vibrator using U Shape Core of Iron-Gallium Alloy (Galferol), 52nd Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials, 2007年11月8日, タンバ
- (13) Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Smooth Impact Drive Mechanism using Iron-Gallium Alloy, 13th International Symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2007年9月12日, ランシング
- (14) 濱田亮, 上野 敏幸, 樋口俊郎, Fe-Ga合金 (Galferol) を用いたマイクロモータの開発, 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
- (15) 上野敏幸, 樋口俊郎, Fe-Ga合金 (Galferol) と非磁性材料のユニモルフをベースにしたマイクロアクチュエータ, 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
- (16) 上野敏幸, Eric Summers, Marilyn Wun-Fogle, 樋口俊郎, 鉄-ガリウム合金 (Galferol) を用いたマイクロ磁歪振動子の性能評価, 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
- (17) Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Magnetostrictive Bending Micro Actuator using Iron Gallium Alloy, Smart structures and materials 2007, 2007年3月9日, サンディエゴ
- (18) Toshiyuki Ueno and Toshiro Higuchi, Magnetic Circuit for Stress-based Magnetic Force Control using Iron-Gallium Alloy, 10th Joint MMM/Intermag Conference, 2007年1月7日, ポルチモア
- (19) Toshiyuki Ueno, Ryou Hamada, Toshiro Higuchi, Eric Summers, and Marilyn Wun-Fogle, Precise Positioning Device using Iron Gallium Micro Magnetostrictive Actuator, International Joint Conference of INAB10 & SMEBA 2006, 2006年9月22日, テジュン
- (20) Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Hidekazu Teshima, Hosei Hirano and Toshiro Higuchi, Shape Dependency in Levitation System Using HTS and Soft Magnetic Material, 10th International Symposium on Magnetic Bearings 2006, 2006年8月22日, スイス
- (21) Toshiyuki Ueno, Eric Summers, and

- Toshiro Higuchi, Micro Magnetostrictive Vibrator Using Iron-Gallium Alloy, 10th international conference on new actuator (ACTUATOR2006), 2006年6月15日
- (22) Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Toshiro Higuchi and Eric Summers, Behavior of Galferol Magnetostrictive Actuator in Cryogenic Environment, 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18日, 神戸
- (23) Mojtaba Ghodsi, Toshiyuki Ueno, Hidekazu Teshima, Hosei Hirano and Toshiro Higuchi, Examination of Shape of Soft Magnetic Material Levitated by Pinning Effect, 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18日, 神戸
- (24) 上野敏幸, Mojtaba Ghodsi, 樋口俊郎, Eric Summers, Fe-Ga合金・非磁性材料の積層体を用いたバイメタルアクチュエータ, 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18日, 神戸
- (25) 上野敏幸, Eric Summers, 樋口俊郎, Fe-Ga合金を用いたマイクロ磁歪振動子, 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18日, 神戸
- (26) 原田優介, 末原卓也, 上野敏幸, 樋口俊郎, 熱変形を利用したアクチュエータの開発, 2006年度精密工学会春季大会, 2006年3月16日, 千葉
- (27) 末原卓也, 原田優介, 上野敏幸, 樋口俊郎, 熱変形を利用した自走機構の開発, 2006年度精密工学会春季大会, 2006年3月16日, 千葉
- (28) Toshiyuki Ueno, Eric Summers, and Toshiro Higuchi, Machining of Iron Gallium for Microactuator, Smart structures and materials 2006, 2006年3月9日, サンディエゴ

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: アクチュエータ

発明者: 樋口俊郎, 原田優介, 上野敏幸

権利者: 樋口俊郎, (株)東海理研

種類: 特許

番号: 2006-53165

出願年月日: 2006年2月28日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

樋口 俊郎 (HIGUCHI TOSHIRO)

東京大学・大学院工学系研究科・教授

研究者番号: 10111569