

平成 21 年 6 月 1 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2004～2008

課題番号：16078203

研究課題名（和文）特殊環境下で実施される基礎科学実験に適用可能な静電モータの実現に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Realization of Electrostatic Motors that are Applicable to Experiments for Fundamental Science Performed within Special Environments

研究代表者

山本 晃生（YAMAMOTO AKIO）

東京大学・大学院工学系研究科・准教授

研究者番号：40313035

研究成果の概要：基礎科学実験や先端的な製造プロセスなどでは、強磁場、高温/低温、高真空などの特殊環境がしばしば用いられる。これらの環境では通常のモータの利用が困難になることから、これに代わるモータが求められている。本研究では既存モータとは異なる原理で駆動される静電モータに着目し、特殊環境への適合性の評価、特殊環境用アクチュエータの考案などを行った。特に強磁場を用いる装置の代表例である MRI 周辺での応用に積極的に取り組み、バイオメカニクス分野への応用などを実現した。

交付額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2004年度	3,000,000	0	3,000,000
2005年度	9,600,000	0	9,600,000
2006年度	9,300,000	0	9,300,000
2007年度	7,800,000	0	7,800,000
2008年度	6,300,000	0	6,300,000
総計	36,000,000	0	36,000,000

研究分野：機械工学

科研費の分科・細目：

キーワード：アクチュエータ，モータ，静電気力，強磁場，高真空，低温，液体窒素，MRI

1. 研究開始当初の背景

(1) 特殊環境における問題

基礎科学実験の場合、先端的な製造工程などにおいては、我々が普段生活する環境とは全く異なる特殊な環境（例えば高温、強磁場、真空などの環境）がしばしば必要とされる。現在幅広く利用され、アクチュエータの代名詞ともなっている電磁モータは、上記の特殊環境においては、その原理上、利用が困難もしくは不可能となることが多い。例えば、電磁モータの主要構成部材である永久磁石は、

キュリー点温度を超えた時点でその磁化を失うため、高温下における永久磁石式電磁モータの利用は難しい。あるいは、強磁場環境においては、電磁モータは周囲の磁場の影響により動作を乱されるため、十分な性能を発揮できない。また、逆に電磁モータが発する磁場が、科学実験用の磁場を乱すという問題も存在する。これらの困難のために、現在では、基礎科学実験の実施などに制約が生じる場合がある。

このような問題点を解決するためには、既存の電磁モータとは異なる動作原理にもとづくアクチュエータが必要となる。例えば、

強磁場の場合を例にとると、超音波モータなどの非磁性アクチュエータの利用が検討されている。しかし、多くのアクチュエータは電磁モータと異なり特性が非線形であることなどから、電磁モータのような優れた制御性は期待しづらい。そのため、電磁モータと同様に高い制御性を実現しうる代替アクチュエータが求められている。

(2) 静電アクチュエータへの期待

アクチュエータの駆動に利用しうる物理現象は多々あるが、将来的に優れた制御性能を実現しようと考えた場合、電磁力に十分に匹敵しうるのは、電磁気学において電磁力と並んで扱われる静電気力であろう。電磁気力と静電気力とのアナロジーを考えると、静電気力を用いた静電アクチュエータでは、電磁モータと同等の制御性能が実現できる可能性がある。さらに静電アクチュエータは、

- ・ 永久磁石等の特殊材料を必要としないことからキュリー点などの温度制約がない
- ・ 磁場と比較してシールドが遙かに容易な電場で駆動されることから、電磁場の漏洩が少ない
- ・ 概して高電圧を必要とする反面、低電流駆動のため発熱の問題が少ない

などの特徴が期待できるため、特殊環境への利用に適していると考えられる。

静電アクチュエータは、主としてマイクロアクチュエータの分野において、近年研究が盛んになってきているが、それらマイクロアクチュエータは、実用的な発生力を取り出すことが難しく応用は限られる。その一方で、様々な機器を駆動できるような高出力の静電アクチュエータも提案・実現されており、その動作性能は上述の特殊環境への応用なども期待できるレベルにある。しかし、特殊環境への適合性などは評価が行われておらず、実際の応用には、まだ多くの研究が必要とされている。

2. 研究の目的

前節に述べた状況を鑑み、本研究では、高出力タイプを中心とした複数の静電アクチュエータに関して、特殊環境への適用の可能性を検討する。その上で、特殊環境下での性能評価や具体的な応用研究を実施することを目的とする。

また、そもそも静電アクチュエータ自体の研究が発展途上であることを考えると、静電アクチュエータには多くの新しい可能性が潜んでいることが期待できる。そこで、既存の静電アクチュエータのみならず、新たなタイプの静電アクチュエータの開発研究も合わせて進めていくことをめざす。

3. 研究の方法

本研究は、おおよそ以下のような方針で実施した。

(1) 高出力静電モータの特殊環境での評価
静電アクチュエータには様々な種類があるが、中でも「交流駆動両電極」タイプの静電フィルムモータは、他を圧倒する高出力性能を実現しており、多くの機器への応用が期待できる。そこで、このタイプのモータを様々な特殊環境に持ち込み、その性能を検証する。また、それらの評価を通じて、このモータの応用に特に適した環境・アプリケーションを探索する。

(2) 高出力静電モータを利用した特殊環境アプリケーションの実施

上記静電モータに適したアプリケーションを検討し、実際の研究事例への適用を試みる。後述のように、本研究では MRI (磁気共鳴画像診断) 装置周辺の強磁場環境に着目し、MRI 関連研究に静電モータを適用することを試みた。

(3) 新しい静電アクチュエータの開発と応用

静電アクチュエータの研究は、まだまだ数が少なく多くの可能性が埋もれていると考えられる。そこで、新しい静電アクチュエータについて幅広く検討する。そして、それらアクチュエータについての応用を、特殊環境応用を中心に幅広く検討する。

4. 研究成果

(1) 高出力静電モータの特殊環境での評価
交流駆動両電極形の静電モータを様々な特殊環境で評価した。図 1 にモータの構成図を示す。このモータは、2枚のフィルム状部材から構成され、それぞれのフィルムには 200 μm 程度のピッチで 3 相結線された電極が埋め込まれている。ここに、2~3kV 程度の 3 相正弦波電圧を印加することで、モータが印加周波数に比例した速度で同期運転する。この程度の電圧を大気中で印加すると、大気の絶縁が破壊するため、通常は絶縁液中に浸し

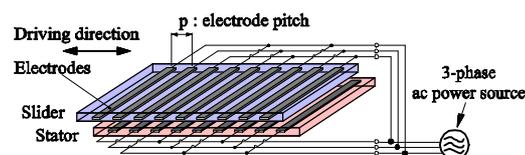


図 1 交流駆動両電極形静電モータ

て駆動を行う。

主な特徴としては、

(a) 電極単位面積あたりの発生力が大きく、 $2\text{kN}/\text{m}^2$ 程度の推力発生が可能。

(b) フィルム1枚当たりで数 cm^2 程度の電極面積が確保でき、また、フィルムを積み重ねていくことで積層数に比例して面積を増大させることができる。モータ単体で数十N(数kgf)オーダの推力が発生可能。

(c) 駆動に必要な電圧が高い反面、駆動電流が少なく磁場発生が小さい。

(d) 同期モータであるため、オープンループでも位置決め、速度制御が可能である。また、電極位置の検出を行うことで、電磁式のブラシレスモータに似たサーボ制御を行うこともできる。

このモータを、高真空、低温(液体窒素内)、強磁場といった特殊環境内に持ち込み、評価した。いずれの環境においても、その環境に適した構成とすることで、モータの動作が可能であることが確認できた。主な知見は以下の通りである。

高真空環境

・高真空環境は良好な絶縁体であり、真空環境内で直接モータの駆動が可能である(前述のように、通常環境では液中に浸して駆動を行う必要がある)。

・通常時は2枚のフィルムを単に重ね合わせて駆動しているが、真空では摩擦が通常より増大するため単に重ね合わせただけでは安定な駆動が難しい。移動子をリニアガイドで案内し、移動子・固定子間のギャップを保つことで安定な駆動が可能となるが、ギャップが広がることで、推力性能は通常より低下する。

・真空では空気を媒介とする放熱ができないことから発熱が問題となることが多いが、本モータでは長時間の連続運転でも目立った発熱は見られない。

液体窒素内

・液体窒素は良好な絶縁体であり、モータの駆動に通常用いている絶縁液の代用として十分に利用できる。

・低温環境では熱収縮による構造変形が問題となるが、静電モータは構成が簡素であることから、熱収縮の問題にも十分に対処可能である。

強磁場環境

・静電モータは非磁性材料のみで構成することが可能であり、強磁場中にも安全に持ち込むことができる。

・1.5T程度までの強磁場環境であれば、通常環境とほぼ同様の特性で駆動が可能である。

これら特殊環境における駆動の様子の一例を図2に示す。

(2) 高出力静電モータを利用した特殊環境

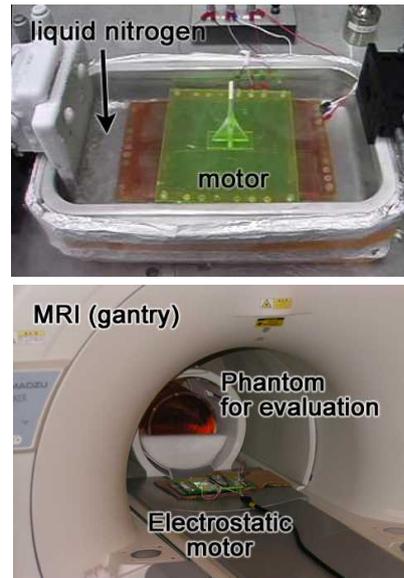


図2 静電モータの特殊環境での評価
上は液体窒素内での駆動。下は磁場強度1.5TのMRI装置内での駆動の様子である。

アプリケーションの実施 = MRI 応用

上記の特殊環境の中でも、特に強磁場環境は、静電モータの利用が比較的容易であり、また、静電モータが応用できそうなアプリケーションが散見されたことから、静電モータの適用先として有望な環境であると考えられた。そこで、強磁場環境、特にMRI周辺環境に焦点を絞り、具体的な静電モータ応用を試みた。

前項で述べたように、静電モータはMRI装置周辺の強磁場内で安全かつ安定に動作することが可能であったが、MRI関連研究に静電モータを応用するためには、静電モータの動作がMRI撮像に与える影響を把握しておく必要がある。そこで、MRI内部で静電モータを駆動しながらMRIで標本の撮像を行い、画像にどの程度のノイズが発生するかを調査した。結果の一例を図3に示す。駆動電圧が大きくなる(=より大きな推力を発揮する)、

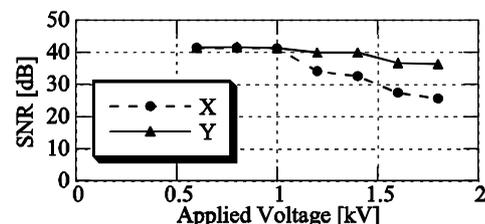


図3 静電モータ駆動によるMRI画像のSN比変化。モータをMRIのRFコイル端から35cmの位置に設置し、磁場と平行(X)および垂直(Y)な方向に向かって駆動した。横軸は駆動電圧振幅を表す。モータが無いときの元々のSN比は約42dB。

あるいは、駆動位置がMRIの撮像中心に近づくほど、MRI画像に与えるノイズは増加する傾向が見られたが、おおよそ、MRIガントリの縁より遠い場所にモータを設置すれば、十分に実用的な画像が取得できることが確認できた。大半のアプリケーションにおいては、モータ設置位置はガントリの外になることから、これにより多くのアプリケーションに静電モータが適用できる可能性を確認することができた。

具体的なアプリケーションとしては、バイオメカニクス分野の測定への適用を試みた。生体等の粘弾性分布などを求めるために、MRI内部で生体に変形を与えて、その変形の様子を動画として撮影することが考えられるが、そのような撮影を行うためには、試料に定量性のある変形を与えるためのモータが必要となる。そこで、静電モータを用いて試料に変形を与えて、その変形の様子をMotion-triggered Cine MRIと呼ぶ手法で撮影した。

撮像の様子の一例を図4に示す。MRI内で固定した試料に対して静電モータで変形を与えて、変形の過程を連続画像として撮影した。撮像結果の一例を図5に示す。この例は評価用のゲル試料を撮像したものであるが、



図4 静電モータによるMRI内部での生体試料変形装置

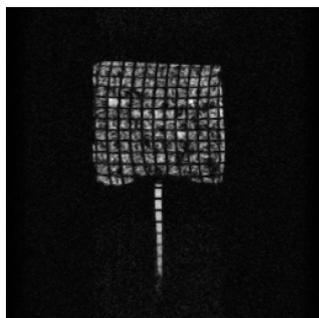


図5 試料変形観察結果の一例

画像下部の棒は静電モータから伸びる試料変形用押し棒。画像中に見える縦横のメッシュは、タグと呼ばれる一種の磁気標識であり、試料とともに変形する。タグの変形を追跡することで試料変形を計測できる

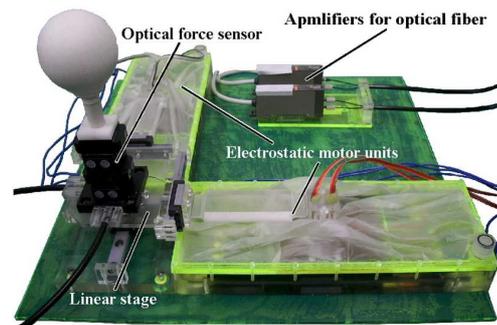


図6 静電モータによる力覚提示装置

変形の様子を動画像として取得することが可能であった。実際の応用としては、人の上腕部の変形測定に本手法を適用し、上腕組織の変形観察を実現した。

もう一つのアプリケーションとして、脳科学分野における感覚運動関連の研究への適用を検討した。機能性MRI (fMRI) 撮像を用いると脳活動の様子を可視化することができる。MRI装置中で様々な運動刺激を被験者に与え、そのときの脳活動を計測することで、感覚運動に関連する脳機能が、より高度に理解できるようになる可能性がある。そこで、MRI内で運動刺激を与えるための力覚提示装置(ハプティックデバイス)を静電モータを用いて試作した。試作の一例を図6に示す。過去に静電モータを用いて力覚提示装置を製作した事例は無いことから、力覚提示のためのモータの制御手法を中心に検討を行い、実際に力覚提示が可能なプロトタイプを実現することができた。本研究の期間内には、実際にfMRI撮像と組み合わせて評価するまでには至っておらず、この点については、今後さらなる取り組みが期待される。

(3) 新しい静電アクチュエータの開発と応用

ここまで述べたタイプの静電モータとは異なるタイプの静電アクチュエータについても様々な検討を行った。いくつかの事例を以下に述べる。

- ・静電アクチュエータは、そのシンプルな構造ゆえに特殊環境に適していると期待できるが、よりシンプルな構造の実現をめざして、DC静電インパクト駆動機構を提案し、その動作を実証した

- ・静電容量結合を介して移動子電極に対して駆動電圧を誘導することで、移動子への配線なしに駆動を行う静電誘導タイプのモータが提案されている。このタイプのモータに関して、動作モデルを提案し、それにもとづく性能最適化手法などを示した。

- ・静電気力による微小物体搬送技術を液体窒素環境に適用することを提案し、液体窒素内で凍結液滴を安定に搬送できることを実証

した。生体関連研究では、生体試料の凍結保存に液体窒素が使われるが、そうした凍結試料のハンドリングへの応用が期待できる。

・静電モータの電極製作手法としてワイヤを編み込む手法が知られている。この手法を用いて平面2自由度駆動が可能な静電アクチュエータを試作し、その動作を実証した。

・静電を用いた壁面への吸着機構を提案し、これを用いた壁面移動機構を試作した。通常の空気圧を用いた壁面吸着機構と異なり真空中でも動作可能なことから、例えば、宇宙空間での宇宙船等の外壁検査などへ応用が期待できる。

(4) 本研究に対する学術的評価

本研究の成果は多くの学会で発表し、以下の賞を受賞した。

IEEE MHS2007, Best Paper Award

計測自動制御学会 SI2005 講演会, ベストセッション賞

IEEE ICRA 2006, Best Automation Paper Award

2006 年度精密工学会春季大会学術講演会, ベストプレゼンテーション賞

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 24件)

M. Hara, G. Matthey, A. Yamamoto, 他4名, "Development of a 2-DOF Electrostatic Haptic Joystick toward MRI/fMRI related Studies", Proc. 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1479-1484 (2009) 【査読有】

M. Rajendra, A. Yamamoto, 他5名, "Motion Generation in MR Environment Using Electrostatic Film Motor for Motion Triggered cine MRI", IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 13-3, pp. 278-285 (2008) 【査読有】

山本晃生, 「静電アクチュエータとその応用 ~ ヒトとの親和性をめざす薄く透明なアクチュエータ ~」, 日本バーチャルリアリティ学会誌, 13-2, pp. 8-12 (2008) 【査読無】

Z-G. Zhang, N. Yamashita, M. Gondo, A. Yamamoto, T. Higuchi, "Electrostatically Actuated Robotics Fish: Design and Control for High-mobility Open-loop Swimming", IEEE Transactions on Robotics, 24-1, pp. 118-129 (2008) 【査読有】

山本晃生, 「静電フィルムアクチュエータ」, トライボロジスト, 53-2, pp. 94-99 (2008) 【査読無】

N. Yamashita, Z-G. Zhang, A. Yamamoto, M. Gondo, T. Higuchi, "Voltage-Induction

Type Electrostatic Film Motor Driven by Two-Four-Phase AC Voltage and Electrostatic Induction", Sensors and Actuators A: Physical, 140-2, pp. 239-250 (2007) 【査読有】

A. Yamamoto, T. Nakashima, T. Higuchi, "Wall Climbing Mechanisms Using Electrostatic Attraction Generated by Flexible Electrodes", Proc. 2007 IEEE International Symposium on Micro-NanoMechatronics and Human Science, pp. 389-394 (2007) 【査読有】

A. Yamamoto, M. Rajendra, Y. Hirano, H. Kataoka, H. Yokota, R. Himeno, T. Higuchi, "Motion Generation in MRI Using an Electrostatic Linear Motor for Visualizing Internal Deformation of Soft Objects by Tagged Cine-MRI", Proc. 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, pp. 2741-2746 (2007) 【査読有】

N. Yamashita, A. Yamamoto, M. Gondo, T. Higuchi, "Evaluation of an Electrostatic Film Motor Driven by Two-Four-Phase AC Voltage and Electrostatic Induction", Proc. 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1572-1577 (2007) 【査読有】

R. Gassert, A. Yamamoto, 他4名, "Actuation methods for applications in MR environments", Concepts in Magnetic Resonance Part B: Magnetic Resonance Engineering, 29B-4, pp. 191-209 (2006) 【査読有】

T. Nishijima, A. Yamamoto, H. Yasui, T. Higuchi, "A Built-in Displacement Sensor for an Electrostatic Film Motor", Measurement Science and Technology, 17-10, pp. 2676-2682 (2006) 【査読有】

A. Yamamoto, H. Katsurai, T. Higuchi, "An Electrostatic Impact Drive Actuator Operated by DC High Voltage", Proc. 10th International Conference on New Actuators, pp. 697-700 (2006) 【査読有】

A. Yamamoto, H. Yoshioka, T. Higuchi, "A 2-DOF Electrostatic Sheet Conveyor Using Wire Mesh for Desktop Automation", Proc. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 2208-2213 (2006) 【査読有】

A. Yamamoto, Y. Hirano, K. Ichiyangi, T. Higuchi, "Development of a 1-DOF Haptic Device Using an Electrostatic Film Motor for fMRI studies", Proc. 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4378-4380 (2006)

山本晃生, 「静電アクチュエータの高出力

化とその応用」, マテリアルステージ, 5-12, pp. 49-54 (2006) 【査読無】

A. Yamamoto, T. Niino, T. Higuchi, "Modeling and Identification of an Electrostatic Motor", Precision Engineering, 30-1, pp. 104-113 (2006) 【査読有】

A. Yamamoto, T. Nakajima, K. Kudoh, T. Higuchi, "Direct Electrostatic Transportation of Frozen Droplets in Liquid Nitrogen for Single Cryopreserved Cell Processing", Technical Digest of 19th IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, pp. 382-385 (2006) 【査読有】

西嶋, 山本晃生, 樋口, 稲葉, 「静電フィルムアクチュエータを用いた2自由度ロボットアームの開発」, 精密工学会誌, 71-12, pp. 1574-1578 (2005) 【査読有】

山本晃生, 西嶋, 樋口, 稲葉, 「高出力両面駆動型積層静電モータ」, 精密工学会誌, 71-10, pp. 1245-1249 (2005) 【査読有】

A. Yamamoto, 他 7 名, "Evaluation of MR-compatibility of Electrostatic Linear Motor", Proc. 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 3669-3674 (2005) 【査読有】

〔学会発表〕(計 37件)

A. Yamamoto, "Wall climbing mechanisms using electrostatic attraction generated by flexible electrodes", IEEE International Symposium on Micro-Nano Mechatronics and Human Science, 2007/11/13, 名古屋

M. Rajendra, "Electrostatic Linear Actuation System for Motion Generation inside MRI to Visualize Internal Deformation of Biological Objects", 2007 16th Annual Meeting of SMRT, 2007/5/19, Berlin, Germany

山本晃生, 「静電モータによるMRI内部での動作生成と試料変形の観察」, 平成18年秋季フルードパワーシステム講演会, 2006/11/9, 静岡

A. Yamamoto, "A 2-DOF Electrostatic Sheet Conveyer Using Wire Mesh for Desktop Automation", 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006/5/17, Orlando, USA

〔図書〕(計 1件)

アクチュエータシステム技術企画委員会著, 「アクチュエータ工学」, 養賢堂 (2004), 第2.1節 (pp. 6-14) ならびに第3章 (pp. 73-82)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 1件)

名称: 駆動アクチュエータ
発明者: 山本晃生, 樋口俊郎
権利者: 東京大学
種類: 特許
番号: 特願 2005-314354
出願年月日: 2005/5/17
国内外の別: 国内

〔その他〕

(1) 研究紹介ホームページ
<http://am.t.u-tokyo.ac.jp/research.html>

(2) 新聞記事
日経産業新聞 2005/1/14 「MRI画像乱さず: 東大手術ロボ用モーター」

(3) インターネットでの関連紹介記事
Impress ロボット Watch, 2008/8/26
<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2008/08/26/1264.html>
Impress ロボット Watch 2008/4/30
<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2008/04/30/1029.html>
Impress ロボット Watch 2008/4/23
<http://robot.watch.impress.co.jp/cda/news/2007/04/23/458.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者
山本 晃生 (YAMAMOTO AKIO)
東京大学・大学院工学系研究科・准教授
研究者番号: 40313035

(2) 研究分担者
無し

(3) 連携研究者
無し