

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560269

研究課題名(和文) ロボットへ搭載可能な高性能多次元アクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of a high performance multi-degree of freedom actuator applied to a robot

研究代表者

平田 勝弘 (HIRATA KATSUHIRO)

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：00403139

研究成果の概要(和文)：

本研究では、小型で高トルク・広角駆動を実現できる新しい三自由度球面関節アクチュエータ及びビメージセンサを用いたフィードバック制御法を開発した。人間型ロボットアームへの搭載に向けて十分な性能を確保すると共に、ホール素子によるゼロ点位置検出法との併用により高い位置決め精度を確保した。更に、三次元有限要素法を用いてアクチュエータの動作特性解析法を構築し、最適設計ツールとして活用し試作機による実験検証を行いその有効性を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：

In this study, a new small-sized 3-DOF joint actuator with high torque and wide-angle and a feedback control method using two image sensors were developed. I secured enough performance for the deployment to a humanoid robot arm and found high positioning precision by the combination with zero point sensing method using the Hall element. Furthermore, I developed the advanced dynamic analysis method for the actuator employing the three-dimensional finite element method and found that it was effective in optimal design through the comparison with the measurement on a prototype.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2009年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・電気機器

キーワード：(1) 多自由度アクチュエータ (2) 電磁アクチュエータ (3) ロボットアーム
(4) 関節アクチュエータ (5) 電磁場解析 (6) 動作解析 (7) 有限要素法

1. 研究開始当初の背景

近年、人間型ロボットの開発が盛んに行なわれるようになり、その性能も著しく向上してきた。そのような人間型ロボットに搭載さ

れるアクチュエータには、ホンダのアシモに見られるように、多くの産業用ロボットと同様にサーボモータとギアが一般に用いられている。このため、多関節を有するロボット

の動作を実現するためには、複数の高トルクのモータユニットが必要となり、ロボットの大型化・消費電力の増大、位置決め精度の悪化をまねく。

これらの課題に対して、リニアモータによるダイレクトドライブ、更には、1つのアクチュエータで、高性能で複雑な動きを実現できる多自由度駆動ドライブが求められている。

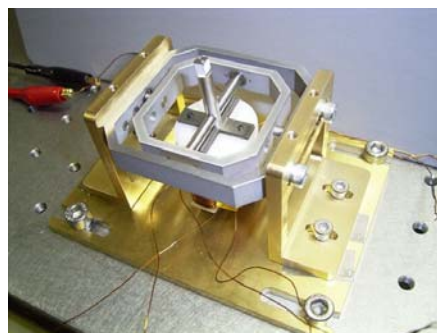
そのため、ロボット関節をターゲットとした多次元（球面）アクチュエータの研究国内外の研究機関で盛んに行われているが、モータの基本駆動原理を3次元に拡張したものが主である。性能として、いずれも比較的大きな回転角度を得ることができるが、トルク/体格比、トルク/重量比が小さく、また構造も複雑であるため実用化レベルには達していない。この他、支持機構、効率など多くの技術的課題を解決する必要がある。

それに対して、研究代表者らは、早い時期から電磁アクチュエータの研究に取組み、独創的なリニアアクチュエータや二次元アクチュエータなどの研究開発を進めてきた。ここ数年は、小型・高速動作を特徴とする球面電磁アクチュエータの開発を進めている。本モデルは、球面部を有する可動部と4つの磁極を有する固定子からなる非常にシンプルな構造で、4つのコイルの電流値・位相を任意に制御することで全方位方向への回転を実現できるアクチュエータを開発し、他機関での研究モデルと比較してその優れた性能を確認している。

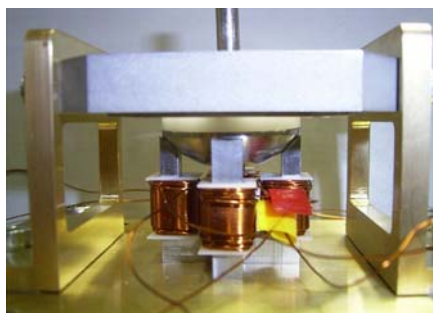
また、この先進的なアクチュエータの研究を進める上で、分担研究者は三次元有限要素法を用いて、トルク性能を改善するために最先端の最適化設計ツールの構築と活用を行い、その有効性を確認してきた。

2. 研究の目的

本研究では、図1に示す開発中の球面電磁アクチュエータの基本構成を元に、可動部構造の複数磁石の最適配置、固定子磁極の多極化による高トルク化（目標 $2\text{N}\cdot\text{m}$ ）、広角回転（目標 $\pm 20^\circ$ ）を実現できる関節アクチュエータを開発する。更に、開発した関節アクチュエータを元に、簡単なロボットアームへ搭載するための機構設計と、運動制御、性能評価を行う。更に、アクチュエータの最適化設計にあたり、応答性能・コンプライアンス性能などの動作性能を評価するために、三次元有限要素法を用いた動作解析プログラムを開発し、プロトタイプによるプログラムの検証を行うと共に、アクチュエータの磁気回路パラメータの最適化設計を行う。



(a)斜めから見た写真



(b)横から見た写真

図1 多次元アクチュエータの試作機

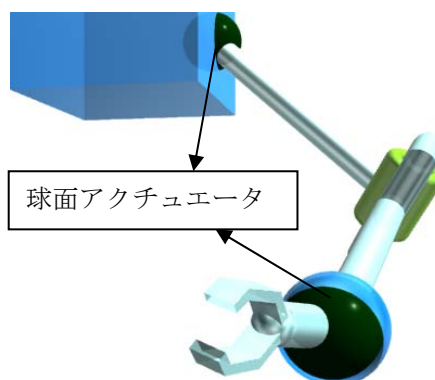


図2 人間型ロボットアームの構想

3. 研究の方法

本研究では、次に示す7つの研究項目について3年間にわたって取組む。主な流れとして、現在研究中の球面電磁アクチュエータの高トルク化・広角化のための構造設計と関節アクチュエータとしての性能評価、人間型ロボットアームへの搭載設計と動作特性評価、アクチュエータ設計のための三次元有限要素法による動作解析シミュレータの開発である。次に各年での研究計画・方法を示す。

●平成20年度

20年度では、これまで提案してきた球面電磁アクチュエータ（特許：特願2006-308240，特願2006-308241，特願2007-044566）を元に、高トルク化・広角化のために、磁気回路及び球面可動部の支持構造を設計し、基本性能を確認するとともに、関節アクチュエータとして搭載する時の課題を抽出する。更に、

球面アクチュエータの最適化設計ツールとして、現状の動作性能予測シミュレータ「K. Hirata, Y. Kawase et al., Dynamic Analysis Method of Two-Dimensional Linear Oscillatory Actuator Employing Finite Element Method, IEEE Trans. on Magnetics, 2007」を元に、可動部の三次元空間移動を考慮できるシミュレータへ拡張する。

①高トルク・広角球面アクチュエータの磁気構造の開発

・広角回転化（目標 $\pm 20^\circ$ ）、高トルク化（目標 $2\text{N}\cdot\text{m}$ ）へ向けて固定子磁極の多段化構造の開発、可動部の最適磁石配置設計を行う。

・コイルの独立励磁による任意軸周りの回転制御方法を開発する。プロトタイプ試作評価により、関節アクチュエータとしての課題を抽出する。

②可動部の支持構想の開発

・磁気浮上構造の設計・試作による性能確認を行い、アクチュエータへの搭載設計を行う。

③球面アクチュエータの動作性能解析シミュレータの開発

三次元有限要素法を用いた、空間運動モデルを考慮した解析アルゴリズムの開発、基本プログラムの開発と簡易モデルによる検証を行う。

④球面アクチュエータ性能計測装置の開発
球面アクチュエータのトルク性能、動作性能を計測するための実験装置を開発する。

●平成21年度

21年度では、20年で検討した球面アクチュエータの基本構造（磁気回路、支持機構）を元に、開発した動作性能解析シミュレータを用いて、最適化設計を行う。更に、人間型ロボットアームへの搭載設計を行う。

⑤磁気回路の最適化設計

三次元有限要素法による動作解析シミュレータを用いて、最適な構造パラメータを決定する。これを元に、プロトタイプ試作実験・性能評価を行う。

⑥人間型ロボットアームへの搭載設計

開発した関節アクチュエータを手首へ搭載したモデルを作成・動作確認を行い、改良点の抽出を行う。

●平成22年度

22年度では、21年で開発した、関節アクチュエータ及び人間型ロボットアームの課題を克服すべく改良設計を行い、最終の性能確認を行う

⑦関節アクチュエータおよびロボットアームの改良設計

目標性能（回転角度 $\pm 20^\circ$ 、トルク $2\text{N}\cdot\text{m}$ ）を実現する関節アクチュエータへ向けて設計改良する。また、ロボットアームとしての基本動作を確認する。

●研究分担

本研究は、2人の研究者と大学院生、及び

企業からの研究協力者からなる体制で取り組む。研究代表者（平田勝弘）は、球面電磁型の関節アクチュエータ及びそれを搭載した人間型ロボットアームの創出へ向けて、基本構造の考案、設計、試作評価の全般を担当する。研究分担者（河瀬順洋）は、球面アクチュエータの最適設計ツールである動作特性解析シミュレータの開発を担当する。研究協力者として（松下電工株式会社/光武義雄）が、球面関節アクチュエータを応用したロボットアームの応用検証を担当する。また、解析・実験の実担当者として3名の大学院学生が修士論文テーマとして課題に取り組む。

4. 研究成果

(1)小型で高トルク・広角駆動可能な関節アクチュエータの開発とロボットアームへの搭載可能性を検討

（目標駆動角度： $\pm 20^\circ$ 、目標トルク： 2Nm ）

(1)研究を進めてきた“二次元球面アクチュエータの原理モデルを元に、高トルク・広角化へ向けてのシミュレーションによる磁気回路パラメータを最適化し、平均トルク定数を約2倍まで改善することができた。この結果に基づき、試作機による実験検証を行い、その有効性を確認したが、関節アクチュエータとしての要求性能を満足しないことが判明した。

(2)上記結果を受けて、図3に示す三次元アクチュエータ及び支持機構を新たに提案した。可動子は、4つの永久磁石と4つの磁性体によって構成されている。また、外周部が固定子であり上下6つずつ、計12個のコイルを有している。各コイルに電流を与えることで可動子周囲の磁界を変化させ、アクチュエータを駆動させる原理となっている。永久磁石が磁性体内部に挿入されているIPM（Interior Permanent Magnet）構造となっており、堅牢性も確保されている。その動作原理を明らかにすると共に、三次元有限要素法解析による最適化の結果、最大トルク 2.1Nm 、X,Y軸周りの駆動角度 $\pm 15^\circ$ 、Z軸周りの回転角度 360° を実現した。また、複数の固定子磁極へ印加するコイル電流を独立励磁して任意方向への駆動するため、各軸のコイル励磁時において、他軸へのトルク干渉がないことを確認した。解析による最適化寸法にもとづいて図4に示す試作機を作成し、その性能を確認した。

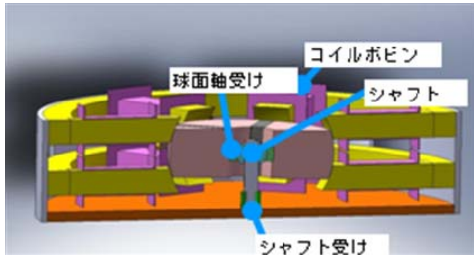
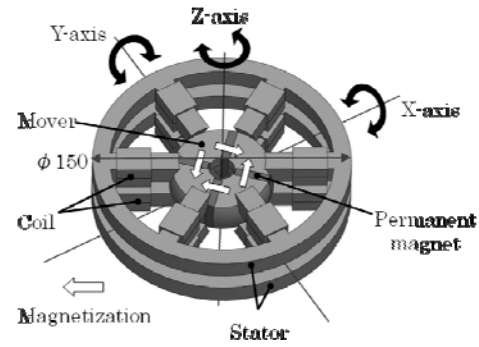


図3 インナーロータ型アクチュエータ

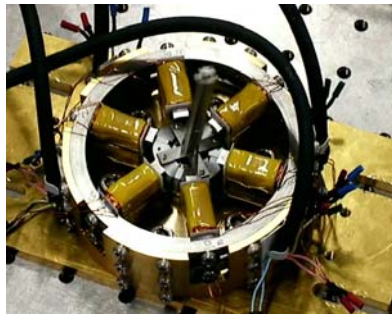
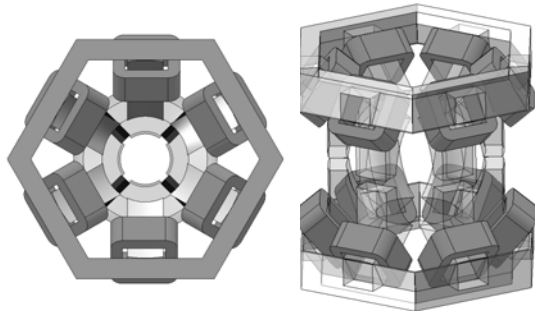
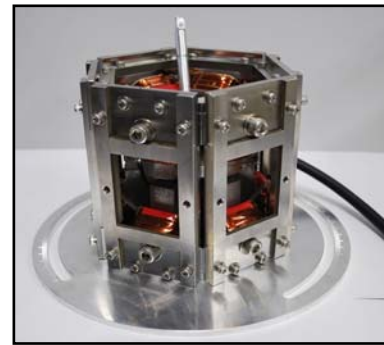


図4 インナーロータ型試作機

(3)目標性能の達成へ向けて、更なる広角化、のための磁気回路の改良行い、三次元有限要素法による動作解析シミュレーション及び実験計画法に基づくシミュレーション実験による最適化を実施し、磁気構造パラメータを決定した。これにより、X軸、Y軸周りに $\pm 25^\circ$ 、Z軸周りに 360° と目標性能を実現できることを確認。また、最大トルクについても $2\text{N}\cdot\text{m}$ を達成できることを確認した。構造図及び試作機を図5、6にそれぞれ示す。



(a)模式図



(b)試作機
図5 広角モデル

(4)人間型ロボットアームへの搭載へ向けて、3軸周りの位置決め駆動するために、光学イメージセンサを用いたセンシング技術の開発を行った。可動子側面部に二つの光学イメージセンサ（光学式マウス等に用いられるセンサ）を図6に位置に設置し、可動子表面二か所の二次元移動量を測定することにより三軸回転角度を算出するものである。センシングシステムの小型化が可能であり、センサ出力が周囲の複雑な磁束変化に影響を受けないといった利点がある。

また、図7に示すように DSP を導入して Matlab によるフィードバック制御法を確立し、イメージセンサからの三軸周りの回転角度信号によるロボット関節としての動作確認を行い、ロボットアーム搭載への有効性を明らかにした。図8に試作アクチュエータと制御装置の全体写真を示す。更に、累積誤差を解消するために、4つのホール素子を用いたゼロ検出法を併用することで高精度な位置決め精度を実現した。

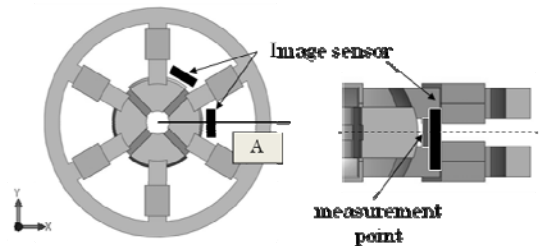


図6 イメージセンサの設置

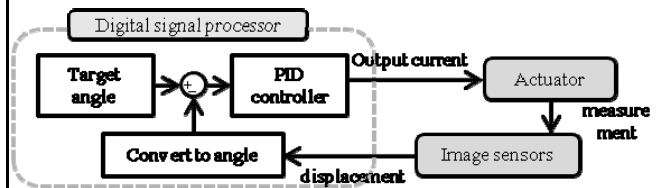


図7 DSP コントロール装置

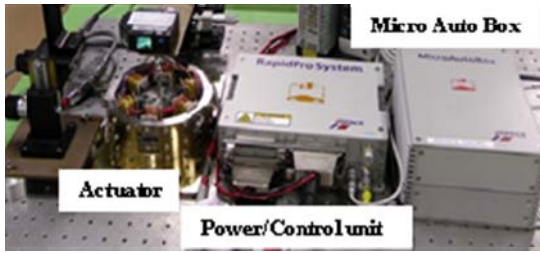


図8 試作アクチュエータと制御装置

(5)更に高トルク・広角化を実現するために、インナーロータ型から OUTERロータ型三自由度アクチュエータを提案した。三次元有限要素法を用いて、ミュレーション実験による最適化を実施し、磁気構造の寸法パラメータを決定した。これにより、可動部はそれぞれ目標である X 軸、Y 軸周りに $\pm 25^\circ$ 、Z 軸周りに 360° を実現できることを確認した。また、可動部外径 $\phi 90$ と小型にも係わらず、最大トルク $5N \cdot m$ と目標値を大きく上回る関節アクチュエータを実現できることを明らかにした。図9に OUTERロータ型アクチュエータの原理モデル及びロボットアームへの搭載した時の構成を示す。

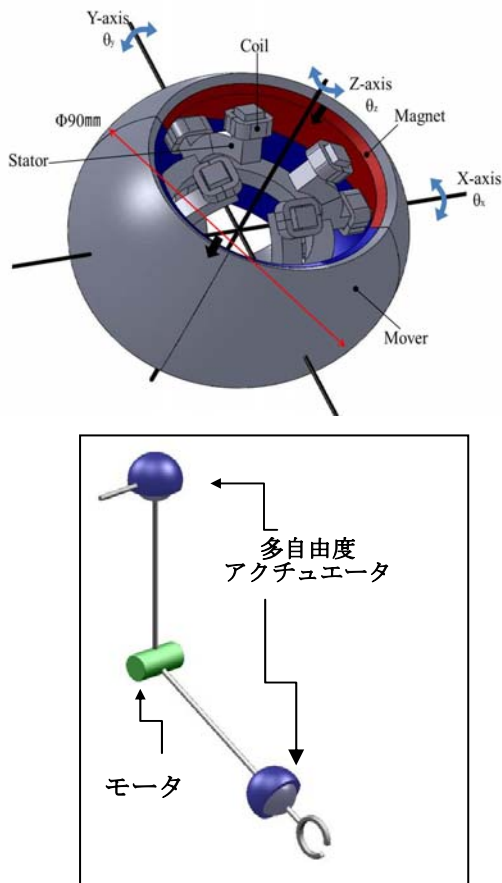
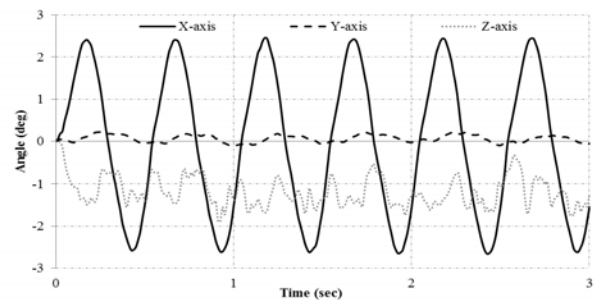


図9 OUTERロータ型アクチュエータの原理モデルとアームへの搭載

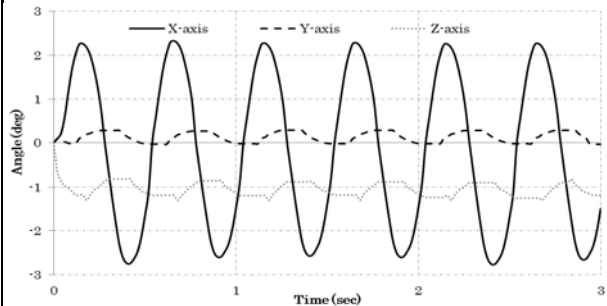
(2)有限要素法による三自由度アクチュエータの最適化設計ツールの開発

アクチュエータの最適化設計にあたり、応答性能・コンプライアンス性能などの動作性能を評価するために、三次元有限要素法を用いて、磁場、可動部の三次元空間運動、駆動回路、制御回路を連成する大規模な動作解析手法を開発した。試作機による実験結果との比較により、その有効性を確認した。図10に動作特性解析及び実験結果の比較例を示すが、両者は非常によく一致していることが分かる。

更に、本解析シミュレータを活用して前述の三次元球面アクチュエータの最適化設計へ活用し、目標性能達成できる構造・寸法を決定した。またこれをもとに試作機を作成し、設計ツールとしての有効性を確認した。



(a)解析結果



(b)実験結果

図10 三次元有限要素法による動作特性解析結果の実験結果との比較検証

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5件)

(1)“Dynamic analysis method of spherical resonant actuator using 3D finite element method”, Satoshi Suzuki, Tadashi Yamaguchi, Yoshihiro Kawase, Koichi Sato, Shuhei Kakami, Katsuhiko Hirata, Tomohiro Ota, Yuya Hasegawa, International Journal of COMPEL, Vol.29, No.5,

- pp.1195-1204(2010) 【査読有】
- (2) ”三自由度球面アクチュエータの動作特性解析に関する研究”, 佟明宇, 平田勝弘, 前田修平, 電気学会論文誌, VOL.130, No.9, pp.1081-1086(2010) 【査読有】
- (3) ”Proposal of electromagnetic spherical actuator with 3-DOF”, Shohei Ikejiri, Katsuhiro Hirata, Shuhei Maeda, International Journal of COMPEL, Vol.29, No.4, pp.994-1003(2010) 【査読有】
- (4) ”New Spherical Resonant Actuator”, Yuya Hasegawa, Tadashi Yamamoto, Katsuhiro Hirata, Y. Mitsutake and T. Ota, Journal of IOS Press, pp.220-227(2008) 【査読有】
- (5) “球面共振型電磁アクチュエータに関する研究”, “長谷川祐也, 平田勝弘, 山本匡史, 光武義雄, 太田智浩, 日本 AEM 学会誌, VOL.16, No.2, pp.162-167(2008)

〔学会発表〕 (計 8 件)

- (1) “Application of Vector Control for Spherical Actuator with 3-DOF”, Guan Wenjiao, Katsuhiro Hirata, Shuhei Maeda, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-11-2, pp.7-11, 名古屋(2011.2.16) 【査読有】
- (2) “Feedback Control of Electromagnetic Spherical Actuator with Three-Degree-of-Freedom”, Shuhei Maeda, Katsuhiro Hirata, Shohei Ikejiri and Mingyu Tong, Proceedings of the 2010 International Conference on Electrical Machines, RF- 008125, pp.1-6, Roma, Italy (2010, 9.7) 【査読有】
- (3) “Dynamic Analysis of 3-DOF Actuator Employing 3-D Finite Element Method”, Mingyu Tong, Katsuhiro Hirata and Syuhei Maeda, Proceedings of the 14th Biennial IEEE CEFC, Chicago IL, USA, 14P8(2010.5.11) 【査読有】
- (4) “イメージセンサを用いた三自由度球面電磁アクチュエータのフィードバック制御に関する研究”, 前田修平, 平田勝弘, 池尻昌平, 佟明宇, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-10-010, pp.55-60, 東京, (2010.12.14) 【査読有】
- (5) “Dynamic Analysis Method of Spiral Resonant Actuator Using 3-D FEM”, Satoshi Suzuki, Yoshihiro Kawase, Tadashi Yamaguchi, Shuhei Kakami, Katsuhiro Hirata and Tomohiro Ota, Proceedings of the 17th Biennial IEEE COMPUMAG, Florianopolis, Brazil, OD1.4, pp.897-898(2009.11.25) 【査読有】
- (6) “Proposal of Electromagnetic Spherical Actuator with Three-Degree-of-Freedom”, Shohei Ikejiri, Katsuhiro Hirata, Byungjin Yoo and Mingyu Tong, Proceedings of the 14th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering, Arras, France, pp.117-118

- (2009.9.11) 【査読有】
- (7) “三自由度球面アクチュエータの動作特性解析に関する研究”, 電気学会リニアドライブ研究会, 佟明宇, 平田勝弘, 池尻昌平, 前田修平, LD-09-050, pp.17-22, 東京 (2009.10.26) 【査読有】
- (8) “有限要素法による三自由度球面電磁アクチュエータの動作特性解析”, 池尻昌平, 平田勝弘, 電気学会リニアドライブ研究会, LD-09-09, pp.47-52, 神戸(2009.1.29) 【査読有】

6. 研究組織

(1) 研究代表者

平田 勝弘 (HIRATA KATSUHIRO)
大阪大学・工学研究科・教授
研究者番号：00403139

(2) 研究分担者

河瀬 順洋 (KAWASE YOSHIHIRO)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号：20144735