

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24246047

研究課題名(和文)スパイラルモータを用いた人に優しい運動支援システムの基盤技術開発

研究課題名(英文)Human-friendly human-support motion systems based on helical motors

研究代表者

藤本 康孝 (Fujimoto, Yasutaka)

横浜国立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：60313475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人との接触動作において高速応答性と安全性を実現するため、小型スパイラルモータによるコンプライアンス制御と衝突力制御を提案した。ロボットの手先が環境に接触した際に発生する衝撃力に対して、ギャップ仕事率を用いた衝突検知法および衝突時の運動量からブレーキ時間を算出する衝突力緩和法を提案し、高い安定性と衝突力の低減を実現した。また、モータの加工精度に起因するギャップ変動の問題に対してゼロパワー制御を提案し、200Nのセンサレス力制御およびフルストロークの位置制御に成功した。この制御により極めて小さい電流で制御帯域以下の負荷力に拮抗させることができ、高精度かつ省エネルギーな制御が実現できた。

研究成果の概要(英文)：We have developed a human-friendly system based on helical motors, which have been proposed by the principal investigator. In order to realize safe and quick response in the contact situation with humans, we have proposed compliant control and impact control. The air-gap control system for the helical motor can detect and absorb the impact force thanks to its mechanical structure. We have proposed a collision detection and control based on power on the gap and estimation of braking duration using linear momentum of the mover. We have experimentally proved that our method is accurate and robust against observation noise. We have also proposed a zero-power control to suppress effect of fluctuation of the gap distance caused by fabrication process, and have achieved 200N sensorless force control and full-stroke position control. This control stabilizes the mover at the natural equilibrium without applying additional current and realizes highly precise and energy-efficient motion.

研究分野：モーションコントロール

キーワード：アクチュエータ 電気機器 モーションコントロール スパイラルモータ

1. 研究開始当初の背景

近年、先進国では少子高齢化が進み、労働人口の減少と高齢者の増加が社会的な課題となっている。生産現場においては、作業の効率化・省力化のため、重量物の搬送作業を力学的に支援するパワーアシストクレーンの導入が進められている。また、介護現場においては、介助者の作業を支援する介護リフトの導入が進められている。これらの支援システムは装置が大型であり、また、支援作業が限定的であるため、より小型で汎用性のある支援システムが望まれており、たとえば、作業員や高齢者・障害者の運動を支援するパワーアシストスーツや、小型軽量の作業支援マニピュレータの開発が進められている。これらの支援システムでは、力を発生させる装置(アクチュエータ)は小型で力が強く、かつ、人と直接接触するため安全であることが要求される。従来、小型で力の強いアクチュエータは、高回転型モータと減速比 100:1 程度のハーモニックギヤから構成されていた。この構成では、出力軸の等価慣性、摩擦、剛性が大きくなるため、出力リンクが人と衝突した際に非常に大きな力積を生じ、危険である。この問題に対し、ドイツ航空宇宙センター(DLR)と KUKA 社は、システムを小型・軽量に設計することで慣性を減らし、かつ、減速機に直接歪ゲージセンサを取り付けて力を検知・制御できるアクチュエータを開発している。一方、出力リンクと減速機の間にはバネを挿入することで、減速機によって増大したモータ回転子慣性と出力リンク慣性を分離し、出力軸の等価慣性を低減する直列弾性アクチュエータが米国 MIT、Stanford 大学、NASA と GM、イタリア Pisa 大学、IIT、ベルギー Vrije 大学などで研究・開発されている。しかし、これらのアクチュエータは制御帯域が狭い点が課題である。DLR アクチュエータではセンサの帯域が 600Hz である。また、直列弾性アクチュエータではバネ系の共振周波数が 100Hz 前後であり、力の制御帯域は数十 Hz にとどまる。衝突時に生じる力の周波数帯域は 10kHz 程度であるため、これらのアクチュエータの性能は十分とはいえない。

一方、本来、モータ単体の力の制御帯域は数 kHz であるため、慣性増大の要因である減速機を廃し、モータ単体で直接駆動(ダイレクトドライブ(DD))を実現できれば十分な性能が得られる。しかし、支援システムで必要とされる力を従来のモータ単体で発生させるためには、モータ重量が数十 kg と大型になってしまう。英国 Sheffield 大学では、磁石配置の工夫により高推力化を目指したモータの研究が進められているが、構造的に限界に近いと考えられる。

以上のように、これまでのメカニズムでは制御性能とサイズにトレードオフが存在し、性能と小型化を両立することが難しいという問題がある。これに対し、研究代表者らは、

ねじ機構による推力増幅を電磁的に実現するスパイラル構造の直動アクチュエータを考案し、研究を進めてきた。本モータは力の制御帯域が数 kHz である DD 方式であるにも関わらず小型で高推力を発生できる。この性能は従来の一般的な DD 方式のリニアモータと比較して、定格で 3 倍以上の推力である。本研究では、これまでの研究を発展させ、スパイラルモータの小型軽量・DD 特性という特長を活かした安全な運動支援システムを実現する。具体的には、人との接触動作において、数 kHz の応答性と安全性を実現する。この制御性能は、従来の支援用アクチュエータの約十倍である。さらに、スパイラルモータの設計論を深化させ、3次元磁気回路トポロジーの最適化による高推力密度・高磁束密度・低機械損・低鉄損・低銅損のモータ設計論の確立を目指す。

2. 研究の目的

本研究では、将来の少子高齢化社会における作業支援および介護支援を可能にする、小型高推力スパイラルモータを用いた安全な運動支援システムの開発を目的とする。スパイラルモータは、広帯域で広いダイナミックレンジの力制御が可能であるため、従来のアクチュエータでは実現の難しい高性能で安全な運動支援システムを実現することが可能である。人との接触を伴う機械システムにおける人との衝突時の衝撃力の低減、および、パワーアシスト制御に必要な微小力制御を実現する。衝突力の低減は、スパイラルモータの広帯域な力制御によって実現する。

3. 研究の方法

(1)まず、運動支援システムに必要な小型高出力スパイラルモータの設計・製作を行った。スパイラルモータをより高推力密度化するためには、3次元高磁束密度設計、および、損失の低減とその熱設計が重要である。まず、リード長 22mm、コア直径 60mm、長さ 168mm (有効長 110mm、ストローク 44mm) の実機 A、および、リード長 20mm、コア直径 50mm、長さ 122.5 (有効長 60mm、ストローク 60mm) の実機 B において、パラメータ同定実験を行い、推力定数、トルク定数、磁気吸引力定数を求め、FEA による同定結果と誤差数%以内で一致することを確認した。次に、ヨークおよびティースの磁気飽和と電機子電流による銅損を考慮しつつ推力を最大にするモータ設計を行い、リード長 3mm、コア直径 42mm、長さ 129.5mm (有効長 84mm、ストローク 45mm) の超多層薄型ヨークのスパイラルモータについて FEA によりモータ特性を明らかにした。

(2)さらに、推力密度・損失のモデル化およびパラメータ化について、検証および精緻化を行った。また、スパイラルモータの機械損を低減し、高精度運動制御を実現するために必要不可欠な磁気浮上制御の実装と改良を

行った。本モータは、機械的な接触をなくすために、電磁力によって可動子を固定子のギャップ間に浮上させる。理論上はギャップ中心に磁石吸引力の不安定平衡点が存在するのだが、製作精度などの問題から、実際の平衡点は中心からずれており、かつ、その平衡点の位置は容易には知ることができない。そこで、製作精度向上と併せて、新しい制御則を開発することで、この目標を達成した。

(3)スパイラルモータの特性を活かした人との接触を前提とした機械 - 人間系の制御システムとして、スパイラルモータを用いたマニピュレータの試作を行い、安全な接触制御の提案と検証を行った。

4. 研究成果

(1)FEA 解析の結果、従来モデル B と比べて体積当たりの推力で約 3.8 倍（有効体積当たりの推力で 2.2 倍）の性能が得られることが分かった。また、実機 B において、寸法精度が十分でないためギャップ長が変動する問題に対してゼロパワー制御を提案し、200N のセンサレス力制御およびフルストロークの位置制御に成功した。また、短リード長スパイラルモータの開発を行い、基礎特性の測定を行った。測定したインダクタンスは解析値とほぼ一致することが確かめられた。また、推力密度向上のためクローポール型スパイラルモータを提案し、電流密度・巻線占積率の条件が等しい場合、従来スパイラルモータと比較して 40%の推力向上が可能であることを有限要素解析により明らかにした。

(2)ギャップ制御に関して、ギャップ変位を自動的に力学的平衡点に移動させるゼロパワー制御の改良を行った。この制御により力学的平衡点を移動させ、極めて小さい電流で制御帯域以下の負荷力に拮抗させることができ、高精度かつ省エネルギーな制御が実現できた。

(3)また、スパイラルモータの特性を活かした人との接触を前提とした機械 - 人間系の制御システムとして、スパイラルモータを用いたマニピュレータの試作を行った（図 1）。この装置を用いてセンサレス力制御系を構築し、外力に対するバックドライブ実験に成功した。また、スパイラルモータの制御の要となるギャップ制御系において、応答を改善する新しいゼロパワー制御を提案し、シミュレーションと実験により有効性を示した。

さらに、人との接触を前提とした機械 - 人間系の制御システムの研究開発を行った。スパイラルモータを用いたコンプライアンス制御と、スパイラルモータの広帯域力制御による能動的な衝撃力緩和制御の改良を行った。具体的には、ロボットの手先が環境に接触した際に発生する衝撃力を抑制する手法について新しい制御法の提案と検証を行った。従来の反力推定オブザーバを用いた衝突検知法は、推定誤差やフィルタの遅れの影響で誤検知や未検知が生じる恐れがある。そこ

で、本研究では、ギャップ仕事率を用いた衝突検知法を提案し、ノイズに強く正確な検出が可能であることを実験により示した。さらに、衝突時の運動量からブレーキ時間を算出する衝突力緩和法を提案し、実験により高い安定性と衝突力ピークの低減を実現した（図 2）。

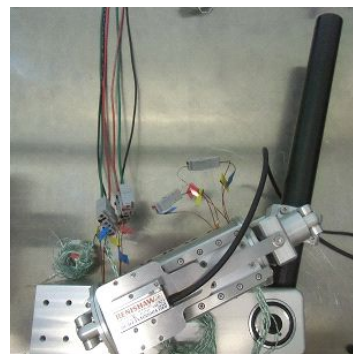


図 1: スパイラルモータ駆動マニピュレータ

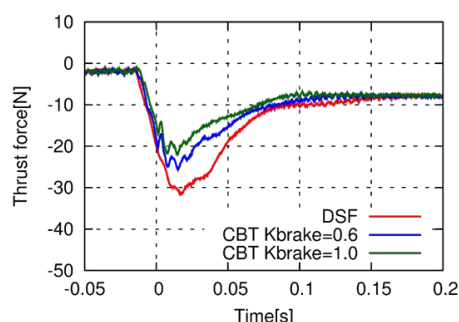


図 2: 衝突力制御の実験結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 28 件)

1. Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Zero Power Control Based on External Force Feedback for Helical Motor,`` IEEJ Trans. of Industry Applications, vol. 5, 2016. 査読有 (accepted)
2. Ryoji Arai and Yasutaka Fujimoto, ``Verification of Estimation of Gap Displacement for Helical Motor,`` IEEJ Trans. of Industry Applications, vol. 5, no. 2, pp. 148-153, 2016.03 査読有 DOI:10.1541/ieejjia.5.148
3. Shunsuke Sasaki and Yasutaka Fujimoto, ``Impact Force Control by Helical Motor,`` proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, TT1-3, 2016.03 査読有
4. CYUSA S. Christophe and Yasutaka Fujimoto, ``Inherent Back-EMF Measurement of a Novel Radial-Gap Helical ROTLIN Machine,`` proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization,

- TT2-1, 2016.03 査読有
5. Huy Nhien Nguyen and Yasutaka Fujimoto, ``Modeling of Claw Pole Helical Motor'', proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 004358 - 004363, Yokohama, 2015.11 査読有
DOI:10.1109/IECON.2015.7392777
 6. Christophe Cyusa and Yasutaka Fujimoto, ``Modeling and Implementation based Control of a Novel Radial-Gap Helical ROTLIN Machine'', proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 1803-1809, Montreal, 2015.9 査読有 DOI:10.1109/ECCE.2015.7309914,
 7. Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``External Force Feedback with Velocity Reference Zero Power Controller for Helical Motor'', proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, TT2-3, Nagoya, 2015.3 査読有
 8. Yusuke Furuya and Yasutaka Fujimoto, ``Development of a High Thrust Force Helical Motor for Prosthetic Knee Joint'', proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, TT2-6, Nagoya, 2015.3 査読有
 9. Huy Nhien Nguyen and Yasutaka Fujimoto, ``Design and Analysis of New Structure of Helical Motor - Claw Pole Helical Motor'', proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, TT2-1, Nagoya, 2015.3 査読有
 10. Shunsuke Sasaki and Yasutaka Fujimoto, ``Development of Two-Link Manipulator Using Helical Motors'', proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, TT5-3-5, Nagoya, 2015.3 査読有
 11. Ryoji Arai and Yasutaka Fujimoto, ``Verification of Estimation of Gap Displacement for Helical Motor'', proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, and Motion Control, TT2-5, Nagoya, 2015.3 査読有
 12. Shunsuke Sasaki, Kengo Sawai, and Yasutaka Fujimoto, ``Evaluation of a Surface Permanent Magnet Helical Motor With High Precision Teeth'', proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 575-580, Dallas, 2014.10 査読有 DOI:10.1109/IECON.2014.7048558
 13. Yasutaka Fujimoto, Tsubasa Suenaga, and Masato Koyama, ``Control of an Interior Permanent Magnets Screw Motor with Power-saving Axial-gap Displacement Adjustment'', IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 7, pp. 3610-3619, 2014.7 (IF6.498) 査読有 DOI:10.1109/TIE.2013.2270215
 14. 小山昌人, 三上貴弘, 藤本康孝, ``スパイラルモータにおける力制御応答を用いたパラメータ同定法'', 電気学会論文誌 D, vol. 134-D, no. 3, pp. 325-331, 2014.3 査読有
DOI:10.1541/ieejias.134.325
 15. Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Proposal of Current Integral Zero Power Control with Force Feedforward for Helical Motor'', proc. IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, pp. 663-668, Yokohama, 2014.3 査読有 DOI:10.1109/AMC.2014.6823360
 16. 藤本康孝, ``最新ロボット事情 40 スパイラルモータのロボット応用'', ロボコンマガジン, no. 92, pp. 104-107, 2014.3 査読無(解説)
 17. Ahmad Zaki Bin Hj Shukor and Yasutaka Fujimoto, ``Direct Drive Position Control of a Spiral Motor as a Monoarticular Actuator'', IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 61, no. 2, pp. 1063-1071, 2014.2 査読有 (IF6.498)
DOI:10.1109/TIE.2013.2262757
 18. 藤本康孝, ``小型高推力スパイラルモータの開発'', 機械の研究, vol. 66, no. 1, pp. 13-19, 2014.1 査読無(解説)
 19. Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Comparison between Zero power Control Methods of Spiral Motor'', proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 5876-5881, Vienna, 2013.11 査読有
DOI:10.1109/IECON.2013.6700098
 20. Yusuke Furuya, Takahiro Mikami, Tatsuya Suzuki, and Yasutaka Fujimoto, ``On an Active Prosthetic Knee Joint Driven by a High Thrust Force Helical Motor'', proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 5894-5899, Vienna, 2013.11 査読有
DOI:10.1109/IECON.2013.6700101
 21. Yasutaka Fujimoto, Takahiro Mikami, and Tatsuya Suzuki, ``Position and Force Control of SPM-type High-thrust-force Linear Motor for Assistive Devices'', proc. IEEE Region10 Humanitarian Technology Conference, pp. 23-28, Sendai, 2013.8 査読有
DOI:10.1109/R10-HTC.2013.6669008
 22. Masato Koyama, Takahiro Mikami, and Yasutaka Fujimoto, ``Validation of Spiral Motor Parameters by FEA and Experimental Identification'', proc. IEEE Int. Symposium on Industrial

- Electronics, pp. 1-6, Taipei, 2013.5
査読有
DOI:10.1109/ISIE.2013.6563856
23. Ahmad Zaki Bin Hj Shukor and Yasutaka Fujimoto, ``Force Control of Musculoskeletal Manipulator Driven By Spiral Motors'', Automatika - Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications, vol. 54, no. 1, pp. 74-88, 2013.4 査読有
DOI:10.7305/automatika.54-1.307
 24. Ahmad Zaki Hj Shukor and Yasutaka Fujimoto, ``Load Disturbance and Environment Effect on Biarticular Manipulator driven by Spiral Motors'', proc. IEEE Int. Conference on Mechatronics, pp. 483-488, Vicenza, 2013.3 査読有
DOI:10.1109/ICMECH.2013.6518584
 25. Tatsuya Suzuki and Yasutaka Fujimoto, ``Long Stroke Continuous-path Position Control of SPM-type Helical Motor'', proc. IEEE Int. Conference on Mechatronics, pp. 489-494, Vicenza, 2013.3 査読有
DOI:10.1109/ICMECH.2013.6518585
 26. Ahmad Zaki bin Hj Shukor and Yasutaka Fujimoto, ``Planar Task Space Control of a Biarticular Manipulator Driven by Spiral Motors'', Int. Journal of Advanced Robotic Systems, vol. 9, pp. 1-14, 2012.10 査読有
DOI:10.5772/51742
 27. Takahiro Mikami and Yasutaka Fujimoto, ``Design of a High-thrust Density Spiral Motor using Finite Element Analysis'', proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 5416-5421, Montreal, 2012.10 査読有
DOI:10.1109/IECON.2012.6388956
 28. Issam A. Smadi, Hiroko Omori, and Yasutaka Fujimoto, ``Development, Analysis and Experimental Realization of a Direct-Drive Helical Motor'', IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 59, no. 5, pp. 2208-2216, 2012.5 査読有 DOI:10.1109/TIE.2011.2148687 (IF5.165)
- [学会発表](計 24 件)
1. Yasutaka Fujimoto, ``Challenges in Human-friendly Mechatronics'', International Conference on Engineering and ICT, Malacca, 2016.04. (Keynote Speech)
 2. 小山昌人, 藤本康孝, ``スパイラルモータによるコンプライアンス制御'', 日本ロボット学会学術講演会, 3J2-06, 東京, 2015.9
 3. 佐々木駿輔, 藤本康孝, ``SPM スパイラルモータによる衝突力緩和制御の基礎検討'', 電気学会産業応用部門大会, 2-33, 大分, 2015.9
 4. 古谷裕介, 藤本康孝, ``能動膝継手のための高推力スパイラルモータの設計および制御シミュレーションの検討'', 電気学会メカトロニクス制御研究会, MEC-14-159, 横浜, 2014.10
 5. 新井涼司, 藤本康孝, ``スパイラルモータのセンサレス化に向けたインダクタンス推定法の検証'', 電気学会メカトロニクス制御研究会, MEC-14-163, 横浜, 2014.10
 6. 小山昌人, 藤本康孝, ``スパイラルモータにおける磁気吸引力係数マップを用いた反力推定'', 日本ロボット学会学術講演会, 202-01, 福岡, 2014.9
 7. 佐々木駿輔, 藤本康孝, ``SPM 型スパイラルモータを用いたマニピュレータ制御の基礎実験'', 電気学会産業応用部門大会, 2-2, 東京, 2014.8
 8. 藤本康孝, ``ラジアルギャップ形ヘリカルモータの提案'', 電気学会産業応用部門大会, 2-1, 東京, 2014.8
 9. 藤本康孝, ``筋骨格運動制御のためのスパイラルモータの開発'', 電気学会産業応用部門大会, 2-S10-2, 東京, 2014.8
 10. 小山昌人, 藤本康孝, ``スパイラルモータのセンサレス力制御応答に関する検討'', 電気学会メカトロニクス制御研究会, 長岡, 2014.7
 11. 藤本康孝, ``ラジアルギャップ形ヘリカルモータのダイレクトドライブ特性について'', 電気学会メカトロニクス制御研究会, 長岡, 2014.7
 12. 古谷裕介, 藤本康孝, ``能動膝継手のための新型スパイラルモータの製作および応力解析'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC-14-107/MEC-14-095, 東京, 2014.3
 13. 佐々木駿輔, 藤本康孝, ``SPM 型スパイラルモータの精密モデルと制振制御'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC-14-132/MEC-14-120, 東京, 2014.3
 14. 澤井健吾, 藤本康孝, ``高精度ティースを用いた SPM 型スパイラルモータの開発'', 電気学会産業計測制御研究会, IIC-14-005, 横浜, 2014.2
 15. 小山昌人, 藤本康孝, ``スパイラルモータにおける限定極配置を用いたゼロパワー制御系設計'', 日本ロボット学会学術講演会, 2E1-06, 東京, 2013.9
 16. 澤井健吾, 藤本康孝, ``SPM 型スパイラルモータにおけるティース切削による影響'', 電気学会産業応用部門大会, 3-33, 山口, 2013.8

17. 古谷裕介, 三上貴弘, 藤本康孝, ``能動膝継手のための高推力リニアアクチュエータの研究'', 電気学会産業応用部門大会, 2-29, 山口, 2013.8
18. 鈴木達也, 藤本康孝, ``SPM 型スパイラルモータの位置制御と力制御'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-024, 2013.3
19. 古谷裕介, 藤本康孝, ``スパイラルモータを利用した能動型義足膝継手の研究'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-070, 2013.3
20. 松崎亮佑, 藤本康孝, ``コントロールモーメントジャイロを用いた歩行支援'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-071, 2013.3
21. 小山昌人, 三上貴弘, 藤本康孝, ``スパイラルモータにおけるパラメータ同定法の検証'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-079, 2013.3
22. 三上貴弘, 鈴木達也, 藤本康孝, ``可動子位置の影響を考慮したスパイラルモータの有限要素解析'', 電気学会産業計測制御/メカトロニクス制御研究会, IIC/MEC-13-092, 2013.3
23. 藤本康孝, 三上貴之, ``スパイラルモータの小型化の検討'', 日本ロボット学会学術講演会, 1L2-5, 2012.9
24. 鈴木達也, 藤本康孝, ``SPM 型スパイラルモータにおける離散時間外乱オブザーバの設計'', 電気学会産業応用部門大会, 3-74, 2012.8

藤本康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)
 横浜国立大学・工学研究院・教授
 研究者番号: 60313475

(2)研究分担者

河村篤男 (KAWAMURA Atsuo)
 横浜国立大学・工学研究院・教授
 研究者番号: 80186139

(3)研究分担者

下野誠通 (SHIMONO Tomoyuki)
 横浜国立大学・工学研究院・准教授
 研究者番号: 90513292

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: スパイラルモータの駆動軸の位置保持方法

発明者: 藤本康孝, 小山昌人, 平野峻之

権利者: 株式会社日本製綱所, よこはまティールオー株式会社

種類: 特許

番号: 特開 2014-217207

出願年月日: 2013.4.26

国内外の別: 国際特許分類 H02K 41/03

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.fujilab.dnj.ynu.ac.jp/spiral/>

6. 研究組織

(1)研究代表者