

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月25日現在

機関番号：12701

研究種目：若手研究（S）

研究期間：2007～2011

課題番号：19676003

研究課題名（和文） 可逆性を有するスパイラルモータを人工筋肉として用いた柔軟で高出力な人間型ロボット

研究課題名（英文） A High-power and Flexible Humanoid Robot Driven by Artificial Muscles of Back-drivable Spiral Motors

研究代表者

藤本 康孝 (FUJIMOTO YASUTAKA)

横浜国立大学・工学研究院・准教授

研究者番号：60313475

研究成果の概要（和文）：推力が大きく、ギアが不要なダイレクトドライブ式スパイラルモータを動力とした筋骨格型ロボットを開発した。スパイラルモータはギアを用いないため、運動制御に悪影響を及ぼすバックラッシュやロストモーション、摩擦などが少ない。この特長を活かし、高精度・広帯域・高ダイナミックレンジの力制御・位置制御を実現した。また、環境外力に対して柔軟な運動制御システムを実現した。

研究成果の概要（英文）：We developed a musculoskeletal biped robot equipped with high-thrust, gearless direct-drive spiral motors. Since the spiral motor system does not utilize reduction gears, it is free from drawbacks such as backrush, lost motion, and friction. In this research, these advantages were enhanced and the control system with high precision, high bandwidth, and high dynamic range was realized. In addition, flexible motion control against environmental external force was achieved.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	12,800,000	3,840,000	16,640,000
2008年度	22,500,000	6,750,000	29,250,000
2009年度	26,500,000	7,950,000	34,450,000
2010年度	16,600,000	4,980,000	21,580,000
2011年度	11,200,000	3,360,000	14,560,000
総計	89,600,000	26,880,000	116,480,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：制御システム

1. 研究開始当初の背景

一般に、大きな負荷のかかるロボットやサーボシステムでは、高減速比のギアが用いられる。ギアを含む位置／力の運動制御系では、位置制御の精度を高めるために機構の剛性を高めると、高い帯域での力制御が困難になり、逆に、力制御の精度を高めるために柔軟機構を導入すると、高い帯域での位置制御が困難になるという問題がある。これに対してギアを用いずに直接、電磁力により負荷を支えるダイレクトドライブ(DD)ロボットでは、

電流制御系の応答がそのまま力制御系の応答となるため、広帯域でダイナミックレンジの広い力制御が実現できる。しかし、従来のDDロボットで大きな力を出すためには装置が大型化するという欠点があった。

2. 研究の目的

研究代表者が考案した、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用いて、筋骨格型のヒューマノイドロボットを開発する。このロ

ボットにより力制御系の広帯域化、力の高ダイナミックレンジ化、位置制御系の広帯域化を実現し、高性能な全身運動制御を実現する。

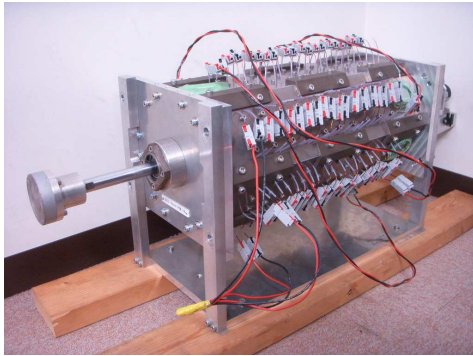
3. 研究の方法

まず、スパイラルモータの諸特性説明および理論モデル検証を行った。次にヒューマノイドロボットに搭載するためにスパイラルモータの小型化について検討を行った。検討に基づいて、小型スパイラルモータを開発し、これを筋肉に見立てた筋骨格型ヒューマノイドロボットの下肢の設計・開発を行った。

4. 研究成果

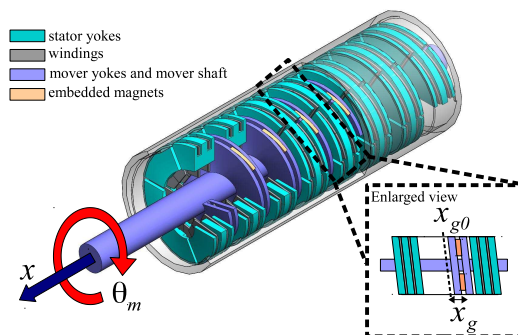
①スパイラルモータ 1号機の推力特性の解明

直径 $\phi 200\text{mm} \times 420\text{mm}$ のスパイラルモータの推力を測定し、特性を明らかにした。また、世界最高レベルの単位体積あたりの発生推力を実現した。



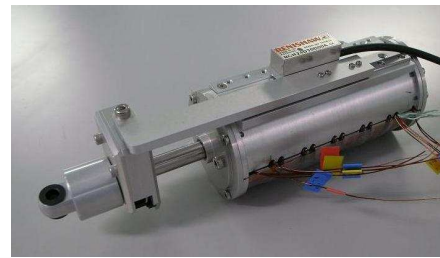
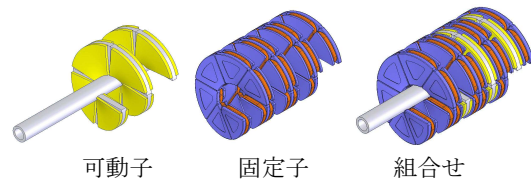
②埋込磁石型小型スパイラルモータの開発

直径 $\phi 60\text{mm} \times 170\text{mm}$ の小型スパイラルモータの設計、理論解析、および、製作を行った。可動子表面部の鉄心の磁気飽和を考慮したモデルを考案し、推力特性が FEM 解析結果および実験結果と良く一致することを示した。さらに、埋込磁石型スパイラルモータの理論モデルの検討を行った。モータパラメータの同定試験を行い、諸特性を明らかにした。

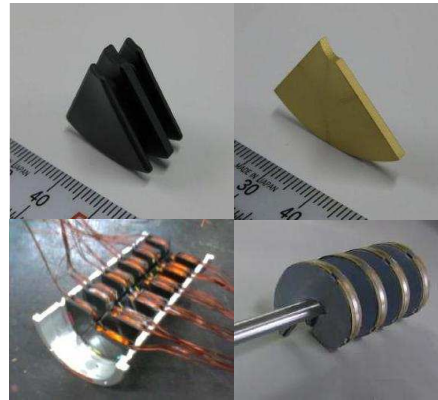


③表面磁石型小型スパイラルモータの開発

直径 $\phi 55\text{mm} \times 120 \sim 240\text{mm}$ の小型スパイラルモータの開発を行った。固定子ブロックを圧粉成形法により製作し、ネオジウム磁石を専用装置により螺旋形状に加工、製作した。これにより、埋込磁石型スパイラルモータの問題点(加工性、巻線占積率、磁石磁束利用率、鉄損)を解決した。



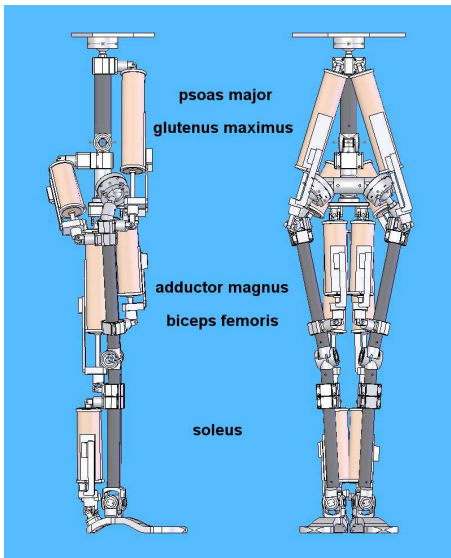
開発したスパイラルモータ



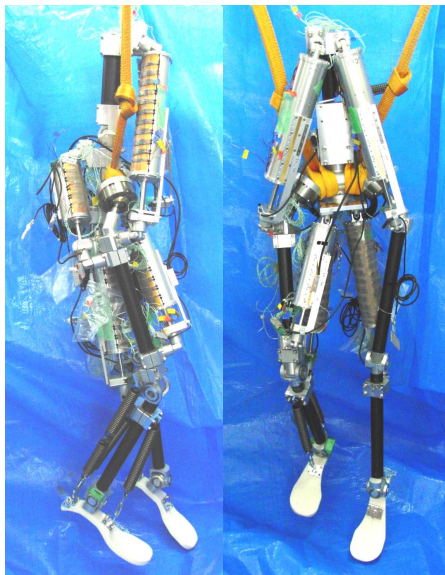
圧粉コアと永久磁石

④筋骨格型ヒューマノイドロボットの開発

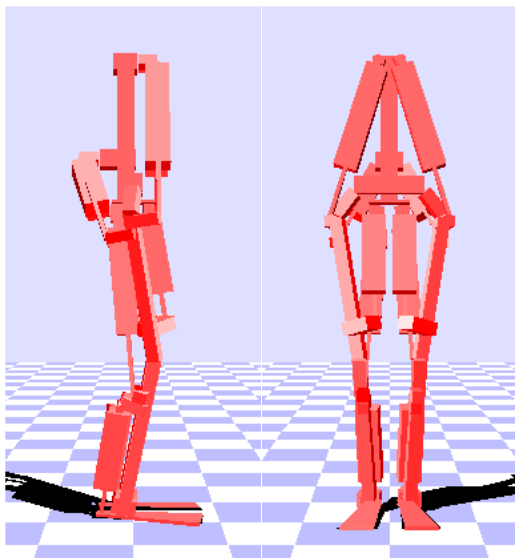
上記③で開発したスパイラルモータを用いた筋骨格型ヒューマノイドロボットの設計・開発を行った。設計にあたり人体の骨格の寸法、相対位置、および、筋肉の起始・停止位置を可能な限り模倣した。また、閉リンクを含む筋骨格型ロボットのシミュレータを開発した。



CAD モデル



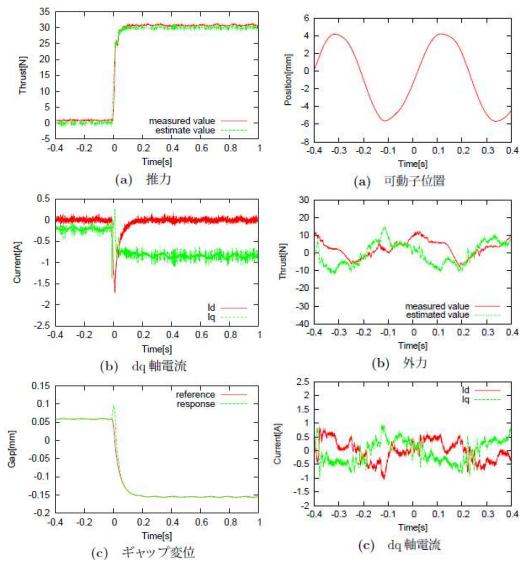
開発した筋骨格ロボット



シミュレーションモデル

⑤制御実験

スパイラルモータにより実現される位置/力制御を開発し、その精度・周波数応答特性、力のダイナミックレンジ（最大発生推力/最小発生推力比）等の性能を明らかにした。スパイラルモータは螺旋曲面の製作精度を完全に均一にすることは難しく、ギャップの不安定平衡点が可動子位置によりわずかに変動する。これにより、可動子を固定子の中央に制御したときに浮上電流が残留する。そこで、ギャップ変位を自動的に不安定平衡点に移動させるゼロパワー制御を提案した。そのロバスト性・安定性の向上を図り、実験により長時間連続して安定に駆動可能なダイレクトドライブ制御を実現した。また、センサレス力制御を提案し、実験により環境外力に柔軟に応答するバックドライブ制御を実現した。さらに、位置制御系では時定数 10msec の応答特性を、センサレス力フィードバック制御系では時定数 4msec の応答特性を、オープンループ力制御系では時定数 1msec の応答特性を実現した。力センサを用いた力フィードバック制御系では、最小推力 0.5N から最大推力 200N の力制御を実現し、力のダイナミックレンジ 52dB を実現した。



ゼロパワー力制御(左) バックドライブ制御(右)

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)

- ① 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

- ② Ahmad Zaki Shukor and Yasutaka Fujimoto, "Force Control of Musculoskeletal Manipulator", Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), Paper ID. 74, 2012.3 査読有
DOI: 10.1109/AMC.2012.6197105
- ③ Yasutaka Fujimoto, Tsubasa Suenaga, Yuuki Wakayama, Kengo Sawai, and Ahmad Zaki Shukor, "Force Control of a Spiral Motor and Its Application to Musculoskeletal Biped Robot", Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control (AMC), Paper ID. 115, 2012.3 査読有
DOI: 10.1109/AMC.2012.6197143
- ④ Ahmad Zaki Shukor, Issam Abed Smadi, and Yasutaka Fujimoto, "Development of a Biarticular Manipulator using Spiral Motors", Proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON), pp. 92-97, 2011.11 査読有
DOI: 10.1109/IECON.2011.6119294
- ⑤ Tsubasa Suenaga and Yasutaka Fujimoto, "Parameter Identification and Passive Direct Drive Control with Magnetic Levitation for IPM-type Spiral Motor", Proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON), pp. 2147-2151, 2011.11 査読有
DOI: 10.1109/IECON.2011.6119640
- ⑥ Ahmad Zaki Shukor, Yasutaka Fujimoto, "Workspace Control of Biarticular Manipulator", Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), pp. 415-420, 2011.4 査読有
DOI: 10.1109/ICMECH.2011.5971322
- ⑦ Yasutaka Fujimoto, Issam A. Smadi, and Yuki Wakayama, "Development of Musculoskeletal Biped Robot Driven by Direct-Drive Actuators", Proc. IEEE International Conference on Mechatronics (ICM), pp. 821-826, 2011.4 査読有
DOI: 10.1109/ICMECH.2011.5971227
- ⑧ 鈴木宏一郎, 藤本康孝, "IPM 型スパイラルモータのモデル化・特性解析および基礎駆動試験", 日本ロボット学会誌, vol. 28, no. 7, pp. 897-904, 2010.9 査読有
- ⑨ Yuki Wakayama and Yasutaka Fujimoto, "Direct-Drive Musculoskeletal Robot Using Spiral Motors and Dynamics Simulation of Closed Link Mechanism", Proc. France-Japan Congress on Mechatronics, pp. 47-52, 2010.11 査読有
- ⑩ Ahmad Zaki Shukor and Yasutaka Fujimoto, "Modelling and Control of Redundant Robot Manipulator using Spiral Motor", Proc. France-Japan Congress on Mechatronics, pp. 59-64, 2010.11 査読有
- ⑪ Issam A. Smadi, Hiroko Omori, and Yasutaka Fujimoto, "On Direct-drive Motion of a Spiral Motor", Proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON), pp. 927-932, 2010.11 査読有
DOI: 10.1109/IECON.2010.5675163
- ⑫ Yasutaka Fujimoto, Issam A. Smadi, Hiroko Omori, and Yuuki Wakayama, "High Thrust Force Direct-Drive Linear Actuator and Its Application to Musculoskeletal Robots", Proc. International Symposium on Application of Biomechanical Control Systems to Precision Engineering (ISAB), pp. 217-222, 2010.7 査読有
- ⑬ Yasutaka Fujimoto, Issam A. Smadi, Hiroko Omori, Koichiro Suzuki, and Hiroshi Hamada, "Modeling and Control of a High-thrust Direct-drive Spiral Motor", Proc. IEEJ International Power Electronics Conference (IPEC), pp. 2222-2229, 2010.6 査読有
DOI: 10.1109/IPEC.2010.5543481
- ⑭ Yasutaka Fujimoto, Yuuki Wakayama, Hiroko Omori, and Issam A. Smadi, "On a High-Backdrivable Direct-drive Actuator for Musculoskeletal Bipedal Robots", Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 389-395, 2010.3 査読有
DOI: 10.1109/AMC.2010.5464097
- ⑮ Issam A. Smadi, Hiroko Omori, and Yasutaka Fujimoto, "On Independent Position/Gap Control of a Spiral Motor", Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 478-483, 2010.3 査読有
DOI: 10.1109/AMC.2010.5464083
- ⑯ Issam Abed Smadi and Yasutaka Fujimoto, "On Nonlinear Disturbance Observer Based Tracking Control for Euler-Lagrange Systems", JSME Journal of System Design and Dynamics, vol. 3, no. 3, pp. 330-343, 2009.7 査読有
DOI: 10.1299/jsdd.3.330
- ⑰ Yasutaka Fujimoto, Tsutomu Kominami, and Hiroshi Hamada, "Development and Analysis of a High Thrust Force Direct-Drive Linear Actuator", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 56, no. 5, pp. 1383-1392, 2009.5 査読有
DOI: 10.1109/TIE.2009.2012419
- ⑱ 小南 勉, 藤本康孝, "高推力スパイラル

モータの推力特性の検討”, 電気学会論文誌 D, vol. 129-D, no. 2, pp. 130-135, 2009.2 査読有

DOI:10.1541/ieejias.129.130

- ⑬ 小南 勉, 藤本康孝, “2つの負荷に対し振幅・周波数を独立制御可能な9スイッチインバータの提案”, 電気学会論文誌D, vol. 128-D, no. 5, pp. 561-568, 2008.5 査読有

DOI:10.1541/ieejias.128.561

- ⑭ Tianjian Li and Yasutaka Fujimoto, “Control System with High-Speed and Real-Time Communication Links”, IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 55, no. 4, pp. 1548-1557, 2008.4 査読有
DOI:10.1109/TIE.2008.917160

- ⑮ Tianjian Li and Yasutaka Fujimoto, “FPGA-Based Current Controller for High-speed Communication and Real-time Control System”, Proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON), pp. 210-215, 2008.11 査読有
DOI:10.1109/IECON.2008.4757954

- ⑯ Yasutaka Fujimoto, Tsutomu Kominami, and Hiroshi Hamada, “Development of a Spirally-Shaped Linear Actuator”, Proc. IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), pp. 1-5, 2008.10 査読有
DOI:10.1109/08IAS.2008.83

- ⑰ Yasutaka Fujimoto and Tsutomu Kominami, “Development of a High Thrust Linear Actuator with High Backdrivability”, Proc. IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 360-364, 2008.3 査読有
DOI:10.1109/AMC.2008.4516093

- ⑱ Tsutomu Kominami, Yasutaka Fujimoto, “Inverter with Reduced Switching-Device Count for Independent AC Motor Control”, Proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference (IECON), pp. 1559-1564, 2007.11 査読有
DOI:10.1109/IECON.2007.4460118

[学会発表] (計35件)

- ① 鈴木達也, “SPM型スパイラルモータの磁気浮上制御と位置制御”, 電気学会産業計測制御研究会, 2012.3.7, 横浜
- ② 末永 翼, “ゼロパワー磁気浮上制御を用いたIPM型スパイラルモータの運動制御”, 電気学会産業計測制御研究会, 2012.3.7, 横浜
- ③ 三上貴弘, “有限要素解析を用いた高推力密度スパイラルモータの設計”, 電気学会産業計測制御研究会, 2012.3.7, 横浜
- ④ 澤井健吾, “スパイラルモータを用いた筋

骨格型二足歩行ロボットにおける二関節筋の研究”, 電気学会産業計測制御研究会, 2012.3.7, 横浜

- ⑤ 藤本康孝, “ヒトの筋骨格構造を模した2足ロボットのためのダイレクトドライブモータの運動制御”, 日本ロボット学会学術講演会, 2011.9.9, 東京
- ⑥ 末永 翼, “埋め込み磁石型スパイラルモータのダイレクトドライブ実験およびゼロパワー制御の検討”, 日本ロボット学会学術講演会, 2011.9.9, 東京
- ⑦ Shukor Ahmad Zaki, “Development of Biarticular Manipulator using Spiral Motors”, 日本ロボット学会学術講演会, 2011.9.9, 東京
- ⑧ 鈴木達也, “スパイラルモータにおけるセンサレス角度推定法の検討”, 電気学会産業応用部門大会, 2011.9.7, 沖縄
- ⑨ 若山祐樹, “スパイラルモータを用いた筋骨格型二足ロボットの運動制御”, 電気学会産業計測制御研究会, 2011.3.8, 千葉
- ⑩ 大森裕子, “SPM型スパイラルモータの特性解析と磁気浮上制御”, 電気学会産業計測制御研究会, 2011.3.9, 千葉
- ⑪ 末永 翼, “IPM型スパイラルモータのパラメータ同定実験およびギャップ制御実験”, 電気学会産業計測制御研究会, 2011.3.9, 千葉
- ⑫ 藤本康孝, “ヒトの筋骨格構造を模したダイレクトドライブ型2足ロボットの開発”, 日本ロボット学会学術講演会, 2010.9.23, 愛知
- ⑬ 大森裕子, “高バックドライブバリエイを有するスパイラルモータのパラメータ同定との安定解析の検討”, 日本ロボット学会学術講演会, 2010.9.23, 愛知
- ⑭ 若山祐樹, “DD型スパイラルモータを用いた筋骨格型2足ロボットの開発と閉リンク機構の動力学シミュレーションの高精度化”, 日本ロボット学会学術講演会, 2010.9.24, 愛知
- ⑮ 大森裕子, “SPM型スパイラルモータ制御系における磁極位置誤差の影響について”, 電気学会産業応用部門大会, 2010.8.26, 東京
- ⑯ 若山祐樹, “スパイラルモータを用いたダイレクトドライブ筋骨格型二足歩行ロボットの開発と動力学シミュレーション”, 電気学会産業応用部門大会, 2010.8.26, 東京
- ⑰ 鈴木宏一郎, “IPM型スパイラルモータの諸特性解析および磁気浮上制御”, 電気学会産業計測制御研究会, 2010.3.8, 東京
- ⑱ 浜田 浩, “高推力SPM型スパイラルモータの特性検討と力制御実験”, 電気学会産業計測制御研究会, 2010.3.9, 東京
- ⑲ 大森裕子, “SPM型スパイラルモータのdq

- 軸モデルと磁気浮上制御の検討”, 電気学会 産業計測制御研究会, 2010. 3. 9, 東京
- ⑳藤本康孝, “小型高推力ダイレクトドライブ型スパイラルモータを用いた筋骨格モーション制御システム”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9. 17 横浜
- ㉑浜田浩, “高バックドライバビリティを有するスパイラルモータの駆動実験と外乱オブザーバによるセンサレス反力推定について”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9. 17 横浜
- ㉒鈴木宏一郎, “IPM型スパイラルモータのモデル化および磁気浮上制御の検討”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9. 16 横浜
- ㉓大森裕子, “高バックドライバビリティを有するスパイラルモータの開発と dq 軸モデルの検討”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9. 16 横浜
- ㉔若山祐樹, “ダイレクトドライブスパイラルモータを用いた筋骨格型二足歩行ロボットの開発”, 日本ロボット学会学術講演会, 2009. 9. 16 横浜
- ㉕藤本康孝, “スパイラルモータを用いた筋骨格型 2 足歩行ロボットの開発”, 電気学会産業応用部門大会, 2009. 9. 1, 三重
- ㉖鈴木宏一郎, “IPM型スパイラルモータのモデル化および制御法の検討”, 電気学会産業応用部門大会, 2009. 9. 2 三重
- ㉗藤本康孝, “磁束を 3 次元的に利用するスパイラルモータ”, 自動車技術会春期大会, 2009. 5. 20, 三重
- ㉘浜田 浩, “スパイラルモータの駆動実験と拡張誘起電圧法による可動子位置推定”, 電気学会産業計測制御研究会, 2009. 3. 9, 東京
- ㉙李 天健, “ $\Sigma \Delta$ 変調を用いた高速制御用通信システムの研究”, 電気学会産業計測制御研究会, 2009. 3. 9, 東京
- ㉚Pham Hoc, “FPGA コントローラを用いた 3 台の三相負荷を独立制御可能な 12 スイッチインバータの電流制御法”, 電気学会産業計測制御研究会, 2009. 3. 10, 東京
- ㉛若山祐樹, “スパイラルモータを用いた内骨格型ロボットの開発”, 電気学会産業計測制御研究会, 2009. 3. 10, 東京
- ㉜浜田 浩, “高推力スパイラルモータの開発と推力特性および熱特性の検討”, 日本ロボット学会学術講演会, 2008. 9. 11, 神戸
- ㉝李 天健, “制御用通信システムに基づくサーボモータの高速電流制御システムの FPGA 実現”, 電気学会産業応用部門大会, 2008. 8. 29, 高知
- ㉞小南 勉, “スパイラルモータの推力特性の検討”, 電気学会全国大会, 2008. 3. 19, 福岡
- ㉟浜田 浩, “スパイラルモータの電磁界解析による推力特性の検討”, 電気学会マグネ

ティックス研究会, 2008. 3. 27, 金沢

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

名称: 磁気異方性磁石の製造方法
 発明者: 藤本康孝, 平野 信幸, 呂 振
 権利者: 国立大学法人横浜国立大学、上海筭原電装有限公司

種類: 特許
 番号: 特開 2011-109004
 出願年月日: 2009. 11. 20
 国内外の別: 国内

名称: スイッチインバータおよび複数の三相負荷の制御方法

発明者: 藤本康孝, 小南 勉
 権利者: 国立大学法人横浜国立大学

種類: 特許
 番号: 特開 2009-50042
 出願年月日: 2007. 8. 13
 国内外の別: 国内

名称: スパイラルモータおよびスパイラルモータの製造方法

発明者: 藤本康孝, 小南 勉, 伊藤 直義, 遠藤 蒙人
 権利者: よこはまティーエルオー株式会社、有限公司 伊藤工業

種類: 特許
 番号: 特開 2009-17711
 出願年月日: 2007. 7. 6
 国内外の別: 国内

○取得状況 (計 1 件)

名称: 螺旋型直線電動機

発明者: 藤本康孝
 権利者: よこはまティーエルオー株式会社
 種類: 特許 (中華人民共和国特許)
 番号: ZL2003 8 0102689.9
 取得年月日: 2009. 3. 4
 国内外の別: 国外

[その他]

ホームページ

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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