



【研究課題名】

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

ふじもと やす たか
藤本 康孝

横浜国立大学・大学院工学研究院・准教授

研究分野：工学

キーワード：制御システム

【研究成果概要】

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。

【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。

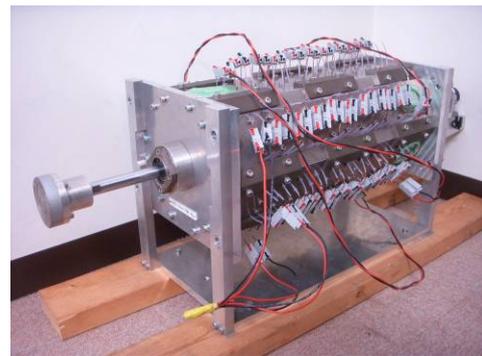
【研究の方法】

まず、スパイラルモータの諸特性解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。

【研究成果】

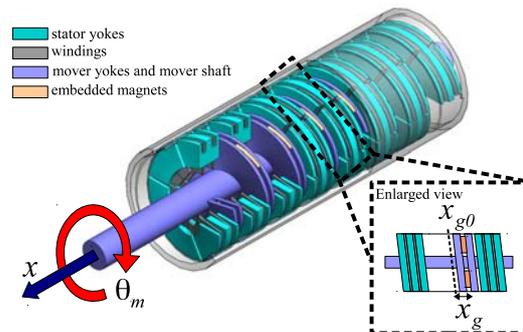
- ①スパイラルモータ 1 号機の推力特性の解明
直径 $\phi 200\text{mm} \times 420\text{mm}$ のスパイラルモータの推

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

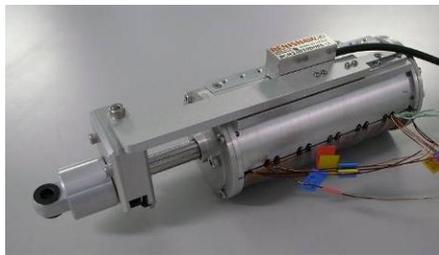
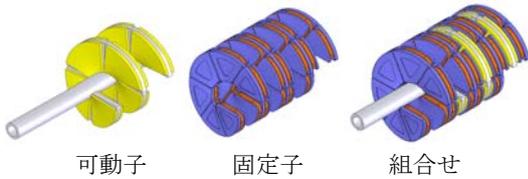
直径 $\phi 60\text{mm} \times 170\text{mm}$ の小型スパイラルモータの設計、理論解析、および、製作を行った。可動子表面部の鉄心の磁気飽和を考慮したモデルを考案し、推力特性が FEM 解析結果および実験結果と良く一致することを示した。さらに、埋込磁石型スパイラルモータの理論モデルの検討を行った。モータパラメータの同定試験を行い、諸特性を明らかにした。



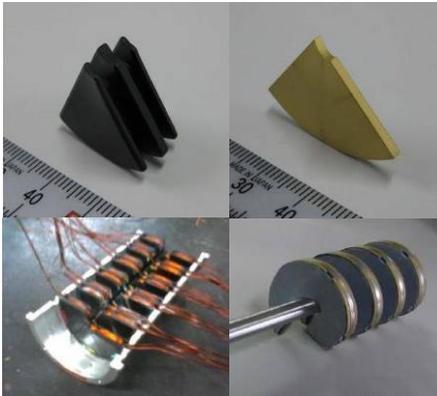


③表面磁石型小型スパイラルモータの開発

直径φ55mm×120～240mm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。



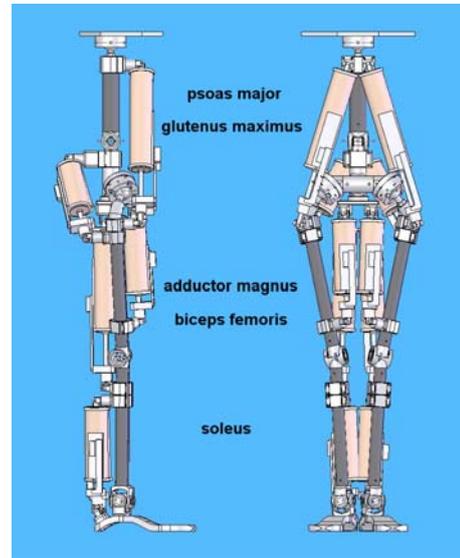
開発したスパイラルモータ



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

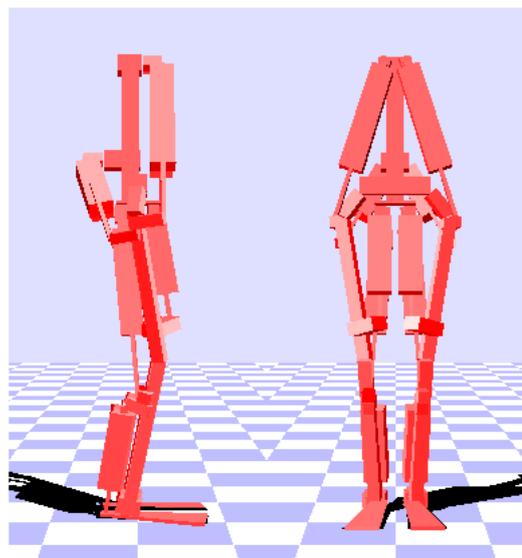
上記③で開発したスパイラルモータを用いた筋骨格型ヒューマノイドロボットの設計・開発を行った。設計にあたり人体の骨格の寸法、相対位置、および、筋肉の起始・停止位置を可能な限り模倣した。また、閉リンクを含む筋骨格型ロボットのシミュレータを開発した。



CADモデル



開発した筋骨格ロボット

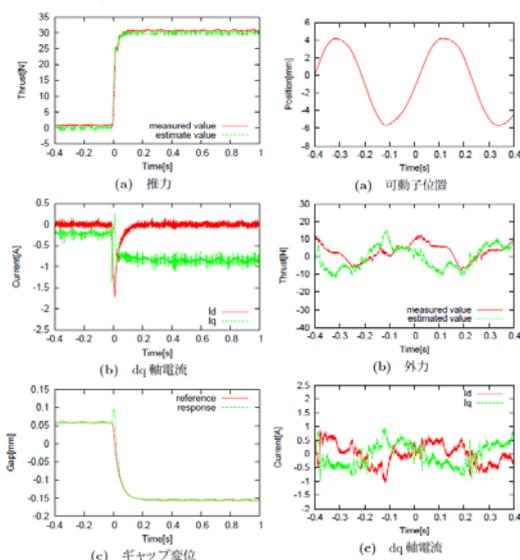


シミュレーションモデル

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)

【主な発表論文等】

〔雑誌論文〕 (抜粋)

- 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 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
- ③ 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
- ④ 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

- ⑮ 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
- ⑯ 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
- ⑰ 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

〔産業財産権〕

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、上海笠原電装有限公司

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 豪人

権利者: よこはまティーエルオー株式会社、有限会社 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

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

【ホームページ】

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

【研究期間】

平成 19 年度～平成 23 年度