

令和元年6月21日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02325

研究課題名(和文) スパイラルモータに基づくゼロ剛性ソフトマニピュレータの基盤技術開発

研究課題名(英文) Development of a zero stiffness soft manipulator based on helical motors

研究代表者

藤本 康孝 (FUJIMOTO, Yasutaka)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：60313475

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,600,000円

研究成果の概要(和文)：ギヤなどの機械要素を介さずに大きな力を発生できるスパイラルモータにより関節を駆動することで、位置と力を精密かつ高速に制御可能なロボットマニピュレータの検討を行った。スパイラルモータを用いた7自由度の閉リンクマニピュレータの制御法を提案し、動力学シミュレーションにより検証を行い、最大手先誤差0.5mm以下、姿勢角誤差3分以下の精度での位置制御を実現した。モータ直径49mm、モータ長200mmのスパイラルモータの試作を行い、熱解析シミュレーションおよび電磁界解析シミュレーションの解析値に対して、温度変化やインダクタンスが精度よく一致することを確認した。実現可能な最大定格推力は545N.mとなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

スパイラルモータは、負荷を直接電磁力で支持するため、高速な応答特性を実現でき、また、ギャップ面積が広く磁束を3次元的に有効利用するため小型で高推力が得られる、という特長がある。これまで申請者らが開発してきたスパイラルモータは従来の円筒型リアモータと比較して約4倍の推力密度(有効体積換算)を実現していたが、そのスパイラルモータと比較して有効体積換算で約2倍、固定子体積換算で約4倍の推力密度をもつスパイラルモータの実現に目途がついた。これにより、高精度広帯域な位置と力の制御が実現でき、ロボットマニピュレータによる高難易度タスクの実現に向けた基盤技術を確立することができた。

研究成果の概要(英文)：We examined a robot manipulator that can control position and force precisely and at high speed by driving joints with helical motors that can generate large force without using mechanical elements such as gears. We proposed a control method of a closed link manipulator with 7 degrees of freedom driven by helical motors, verified it by dynamics simulation, and realized the position control with the accuracy of maximum error of 0.5 mm and attitude angle error 3 minutes.

We fabricated prototypes of the helical motor with a diameter of 49 mm, a length of 200 mm, and a stroke of 36 mm, and confirmed that the temperature change and the inductance match precisely with the analysis values of thermal analysis simulation and electromagnetic field analysis simulation. The maximum rated thrust achievable was 545 N.m.

研究分野：電気電子工学

キーワード：電気機器工学 制御工学 アクチュエータ ロボティクス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

これまで多くの製造業においては、組立工程などの労働集約的な工程は、その拠点をコスト競争力の高い開発途上国に設けることが行われてきた。このことは産業の空洞化をもたらし、また、国内の労働集約的な製造業へのコスト圧力となり、その低賃金化をもたらしてきた。このような社会的背景のもと、製造業の国内への回帰と競争力強化のため、近年、より高度な作業が可能なロボットの研究・開発が活発化している。特に、これまで人が行っていた作業をそのまま代替することを目的とした双腕ロボットの研究・開発が盛んである。たとえば、R. Brooks (MIT 名誉教授)らが開発した BAXTER や Google Willow Garage の PR2 は、直列弾性アクチュエータを各関節に備えており、各関節を低剛性に制御できるため安全である。しかし、位置制御の絶対精度が低いいため、可能な作業は単純なピックアンドプレース作業などに限定される。産総研の HRP シリーズを開発した川田工業の双腕ロボット NEXTAGE はカメラ情報を利用することで高度な組立作業を可能としている。しかし、各関節に一般的な減速機付モータを使用しているため高度な力制御は難しく、すべて位置制御により動作を実現しており、実現可能な作業に限られる。また、各関節のモータに低出力のものをを用いており、消極的安全策を採用している。

以上より、直列弾性アクチュエータを用いると高精度な力制御は容易になるが、高精度な位置制御が難しく、一方、減速機付アクチュエータを用いると高精度な位置制御は容易になるが、高精度な力制御が難しくなることがわかる。より汎用性の高い高度な組立作業では、高精度な位置制御と力制御の両者が必要となるため、両者を両立させるアクチュエータが必要となる。一般にロボットの関節には減速比 100:1 程度の減速機付モータが用いられる。この構成では、減速比の 2 乗に比例した大きな静止摩擦力が出力軸に生じる。出力軸の反力情報はこの静止摩擦力に打ち消されてしまうため、モータ軸でこれを観測・制御することは極めて難しい。この問題に対し、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がドイツ航空宇宙センター(DLR)と KUKA 社、東京大学で研究・開発されている。さらにトヨタ自動車は歪ゲージを梁に直接蒸着することで高感度化したトルクセンサを開発し、これを組み込んだ高精度なトルクサーボアクチュエータを提案している。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静止摩擦力と出力リンクを分離し、出力軸の等価静止摩擦力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、IIT など研究・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。接触を伴う組立作業などのタスクで生じる力の周波数帯域は最大数 kHz 程度となるため、これらのアクチュエータの性能は十分とはいえない。以上のように、減速機を用いた従来のアクチュエータでは、高精度な位置制御と力制御を同時に実現することが難しいという問題がある。

2. 研究の目的

この問題に対し、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螺旋構造の直動アクチュエータ(スパイラルモータ)を考案し、研究を進めてきた。本モータは摩擦力増大の要因である減速機を用いないため、高帯域かつ小型で高推力を発生できる。この性能は従来の一般的なギヤレス方式のリニアモータと比較して約 3 倍の推力である。これまでにモータの基礎特性の解明と 100Hz の位置制御応答特性、250Hz のセンサレスカフィードバック制御応答特性、1kHz のオープンループ力制御応答特性を実現し、モータの高推力密度化と衝撃力安定化制御を実現した。本研究ではその成果を発展させ、多軸ロボットマニピュレータの手先空間での高速かつ高精度な位置と力の制御に拡張し、従来は実現が難しかった組立作業などの複雑なタスクの実行に必要な制御技術を開発する。これは、スパイラルモータの小型、高精度かつ広帯域な位置制御特性と力制御特性によってはじめて実現可能となる。

3. 研究の方法

まず、スパイラルモータを用いた 7 自由度ロボットマニピュレータの全体設計を行った。スパイラルモータは直動アクチュエータであるため、設計するロボットは人の筋骨格構造を模した内骨格構造とし、筋肉に相当する部位にスパイラルモータを配する形態とした。スパイラルモータは、加工の容易さと加工精度を考慮しつつ推力密度を向上させる設計を行った。具体的には、電磁界解析により発生推力を最大化するように設計パラメータの調整を行った。その結果、モータ直径 49mm、モータ長 200mm、固定子層数 16 層、可動子層数 12 層、ストローク 36mm となり、最大定格推力は 545N.m となった。

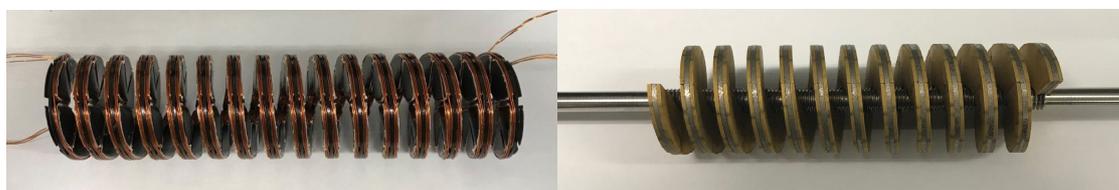
試作においては、固定子と可動子は柱状の軟磁性材から螺旋曲面形状をワイヤーカットにより切り出すことで製作した。固定子の巻線スロットスペースは切削とワイヤーカットにより成形した。そのほか、螺旋形状の永久磁石やフレーム等の製作を行った。巻線加工については、当初ステータの絶縁用電着塗装の膜厚のコントロールがうまくいかず、絶縁被膜が不均一になり想定よりも厚かったため、ターン数が設計値よりも小さくなるという課題が生じた。この問題を解決するために、ステータ絶縁塗装の剥離および再塗装を行った。しかし、これにより局所的な絶縁性の低下が確認された。そこで 80 μ m の絶縁紙をカッティングマシンで螺旋形状に

成形し使用することで改善を図った。しかし、新たに巻線絶縁被膜の損傷による絶縁性低下がみられた。これは巻線をステータに巻く際にステータの内径側および外径側のエッジに接触して生じていることが判明した。エッジをカバーする絶縁紙を新たに設けることで、これを解消した。また、追加した絶縁紙によりコイルスペースが減少したため、ケースの改造を行い、これを改善した。製作したスパイラルモータを図1に示す。

4. 研究成果

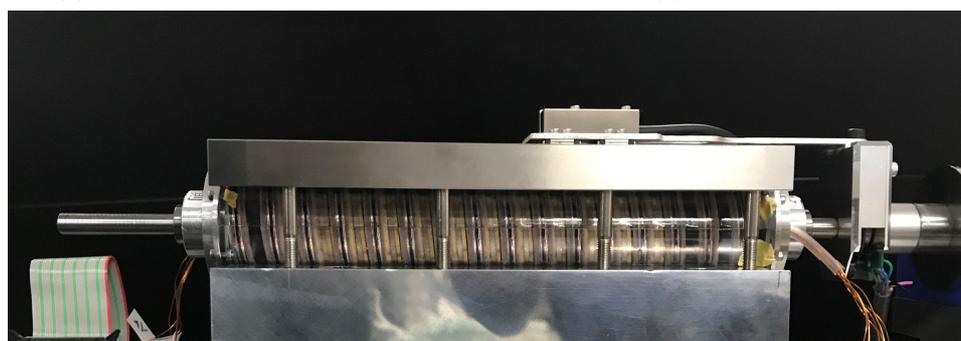
スパイラルモータを用いた7自由度の閉リンクマニピュレータについて制御方式の精緻化を行った。エンコーダセンサの量子化ノイズを考慮した制御系について動力学シミュレーションにより検証を行い、最大手先誤差 0.5mm 以下、姿勢角誤差 3 分以下の精度での位置制御を実現した(図2~5)。

また、スパイラルモータの最大出力を同定するため、固定子巻線を熱源とし、各パーツの熱抵抗を介してステータフレームから自然放熱するとして熱解析および実験を行った。有限要素法による熱解析シミュレーション(図6)およびスパイラルモータを用いた実験の結果、モータ内部の温度が過渡応答も含め高精度に一致することを確認した。さらに、各層のインダクタンスを測定し、有限要素法による解析値と誤差 3%以下で一致することを確認した。研究代表者らがこれまで開発してきたスパイラルモータ3号機は従来の円筒型リニアモータと比較して約4倍の推力密度(有効体積換算)を実現していたが、本研究課題では、そのスパイラルモータ3号機と比較して有効体積換算で約2倍、固定子体積換算で約4倍の推力密度をもつスパイラルモータの実現に目途がついた。また、簡易型スパイラルモータのバックドライバビリティを制御により実現する手法を提案した。提案制御により外力に柔軟に倣い動作することが可能となった。提案手法の有効性を実機実験により示した。



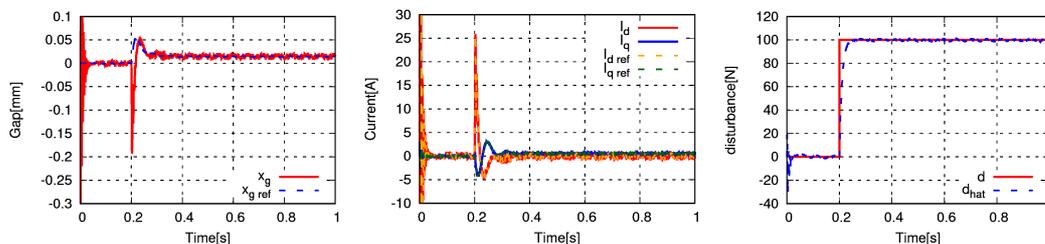
(a) 製作した固定子

(b) 製作した可動子



(c) 製作したスパイラルモータ

図1. スパイラルモータ



(a) ギャップ応答

(b) dq 軸電流応答

(c) 負荷外乱とその推定値

図2. ギャップ制御の応答

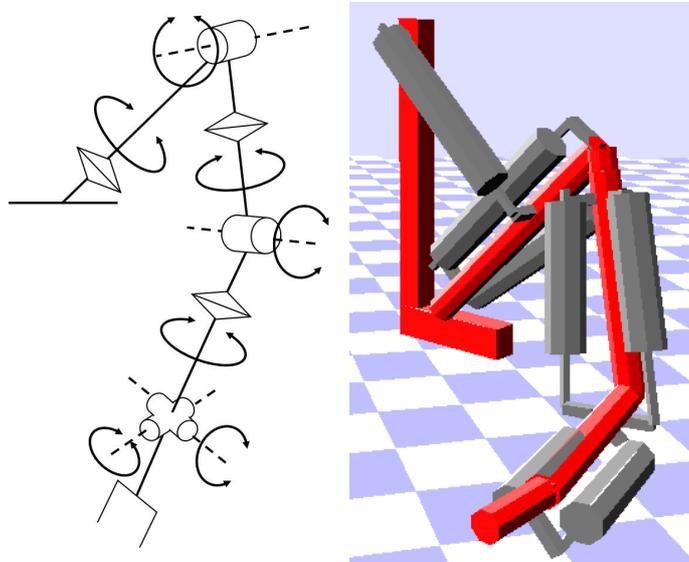


図3 . 7軸ロボットアームのモデル

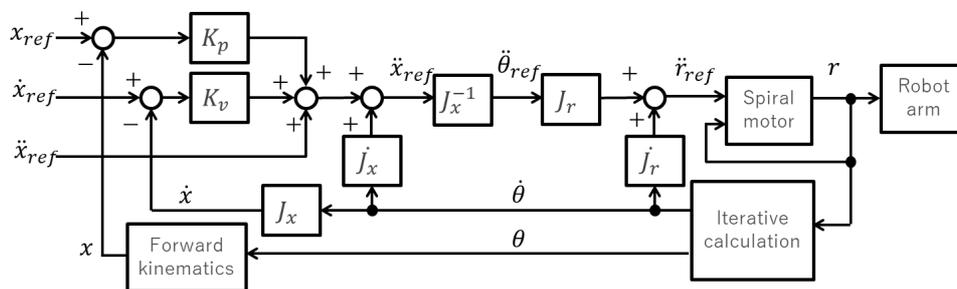
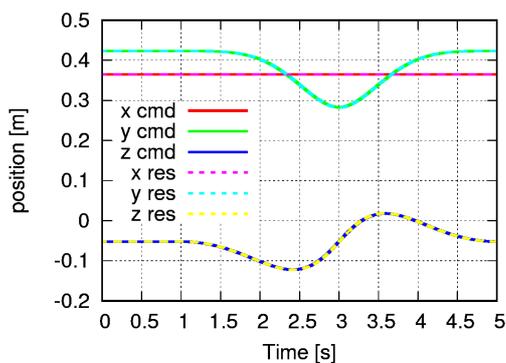
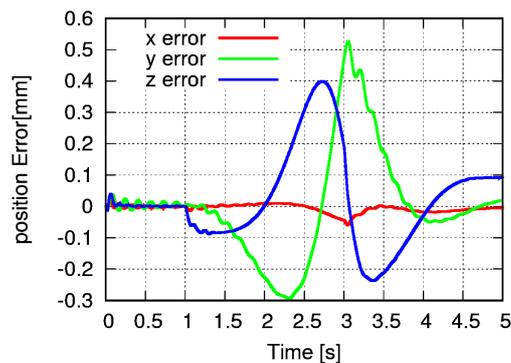


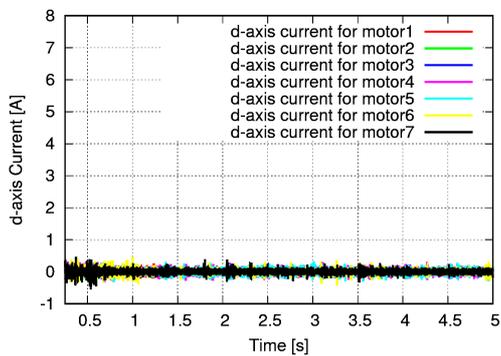
図4 . スパイラルモータ駆動ロボットアームの制御ブロック図



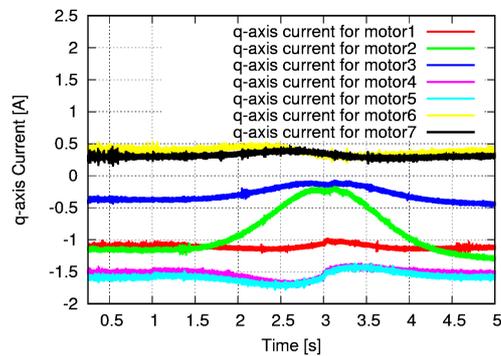
(a) 手先位置



(b) 位置誤差



(c) d軸電流



(d) q軸電流

図5 . スパイラルモータを用いた7軸マニピュレータ制御系の応答

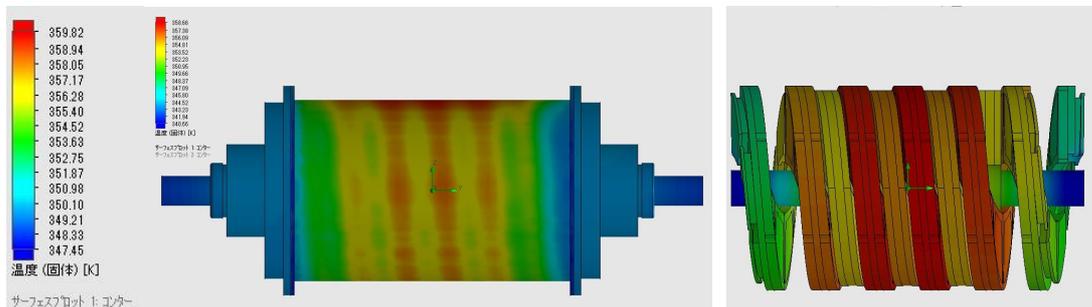


図6 . 温度分布シミュレーション

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計9件)

Christophe S. Cyusa and Yasutaka Fujimoto, ``Controlled Backdrivability of Radial-Gap Magnetic-Screw Type RotLin Actuator,`` proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, pp. 5000-5004, DOI:10.1109/ECCE.2018.8557454, 2018. 査読有

Cyusa S. Christophe and Yasutaka Fujimoto, ``Enactment Based Direct-Drive Test of a Novel Radial-Gap Helical RotLin Machine,`` IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 54, no. 2, pp. 1273-1282, DOI:10.1109/TIA.2017.2766578, 2018. 査読有

Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Simultaneous design of linear motion and power-saving magLev control of helical motor,`` proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, SS2-4, 2018. 査読有

Yoshiaki Naito and Yasutaka Fujimoto, ``Design and Simulation of a 7-DoF Robot Arm Driven by Helical Motors,`` proc. IEEJ Int. Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, TT11-2, 2018. 査読有

CYUSA S. Christophe and Yasutaka Fujimoto, ``Servo Control Feasibility of a Magnetic Screw-Like Radial-Gap RotLin Actuator,`` proc. IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, TT4-1, 2017. 査読有

Yutaro Hagino and Yasutaka Fujimoto, ``Design and Analysis of a Compact and High-Thrust Force Spiral Motor for Active Knee Joint,`` proc. IEEJ International Workshop on Sensing, Actuation, Motion Control, and Optimization, TT9-4, 2017. 査読有

Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Improvement of Position Tracking and Magnetic-Levitation Control Based on Optimal-Control for Helical Motor,`` proc. IEEE Industrial Electronics Society Annual Conference, pp. 5808-5813, DOI:10.1109/IECON.2016.7793024, 2016. 査読有

Masato Koyama and Yasutaka Fujimoto, ``Zero Power Control Based on External Force Feedback for Helical Motor,`` IEEJ Journal of Industry Applications, vol. 5, no. 4, pp. 314-320, DOI:10.1541/ieejjia.5.314, 2016. 査読有

CYUSA S. Christophe and Yasutaka Fujimoto, ``Pre-Drive Test of an Implemented Novel Radial-Gap Helical ROTLIN Machine,`` proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, P1116, DOI: 10.1109/ECCE.2016.7855366, 2016. 査読有

〔学会発表〕(計2件)

内藤義貴, 藤本康孝, ``スパイラルモータ駆動7自由度ロボットアームの動力学シミュレーション,`` 自動制御連合講演会, FrC1-1, https://doi.org/10.11511/jacc.60.0_159, 東京, 2017.

萩野佑太郎, 藤本康孝, ``能動膝継手用小型高推力スパイラルモータの設計と解析,`` 電気学会産業応用部門大会, 3-39, 群馬, 2016.

〔図書〕(計1件)

藤本康孝, 17.2.2章 動歩行制御とモータ制御, ロボット制御学ハンドブック, 松野文俊, 大須賀公一, 松原仁, 野田五十樹, 稲見昌彦 編著, 近代科学社, 2017.

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕
ホームページ等
Direct-Drive High Thrust Spiral (Helical) Motor
<http://www.fujilab.dnj.ynu.ac.jp/spiral/spiral-e.html>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：河村 篤男

ローマ字氏名：(KAWAMURA, Atsuo)

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：工学研究院

職名：教授

研究者番号(8桁)：80186139

研究分担者氏名：下野 誠通

ローマ字氏名：(SHIMONO, Tomoyuki)

所属研究機関名：横浜国立大学

部局名：工学研究院

職名：准教授

研究者番号(8桁)：90513292

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：小山 昌人

ローマ字氏名：(KOYAMA, Masato)

研究協力者氏名：チュサ シンバ クリstoff

ローマ字氏名：(CYUSA, Simba Christophe)

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。