

令和 2 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2017～2019

課題番号：17H04698

研究課題名(和文) ロボットの能動的接触による表面分布インピーダンスの可視化とその利用

研究課題名(英文) Development of a visualization system of the distributed impedance on a surface using a robot that can actively contact to environments and its use

研究代表者

仲田 佳弘 (Nakata, Yoshihiro)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：80720664

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,300,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットが周囲の人や物体と安全に接触するためには、接触対象の変形方向や硬さの認識が不可欠である。そのために、人が未知対象に対して行う触探索のような機能の実現が重要であると考えられる。本研究課題では、ロボティックアームの先端に広い範囲で緻密に力を制御可能な一体構造空電ハイブリッド直動アクチュエータを搭載し、ロボットが本アクチュエータを介して能動的接触を行うことで、接触対象の表面の分布インピーダンスを計測・可視化できるスキャンシステムの開発と評価を行う。システムが対象をスキャンする際、接触力を一定に保つことを目的として、実際に環境と接触した際の接触力の変化を計測し、システムの性能を評価した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ロボットの社会実装にとって環境への接触は避けては通れない重要課題である。近年、人と協働する人共存型ロボットが開発されているが、産業用ロボットをベースとして、モータの出力を制限し、トルクセンサによるフィードバックによって関節を柔軟に動かすため、可搬重量や制御周波数が小さくなる。申請者の開発したアクチュエータおよびシステムは、先端の接触力を0から物体の可搬に必要な力まで自由に、高速に調整できる。このようにロボットによる高度な力加減の調整が実現されれば、研磨など状況に応じた繊細な力の調整が必要な熟練者による作業の代替などの応用が考えられる。

研究成果の概要(英文)：In order for a robot to make safe contact with people and objects around it, it is essential to recognize the deformation direction and hardness of the contact object. For this reason, it is crucial to realize a function such as a human tactile exploration for unknown objects. In this research, I develop and evaluate a distributed impedance scan system on a surface by a robotic arm mounted a pneumatic-electromagnetic hybrid linear actuator with an integrated structure. The robotic arm actively contacts to a surface via the actuator. The actuator can precisely adjust the force over a wide range. In order to keep the contact force constant when the system scans an object, the performance of the system was evaluated by measuring the change in the contact force in actual contact with the environment.

研究分野：ロボティクス, アクチュエータ

キーワード：能動的接触 一体構造空電ハイブリッドアクチュエータ インピーダンス 物理的インタラクション

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、ロボットの研究は、工場で行われる作業のような人と隔離された空間での高速高精度の作業の実現から、日常生活空間での家事や介護など接触を伴う直接的な人の活動支援に目的が変化してきている。ロボットが人や物体と接触を伴う物理的インタラクションを安全に行うためには、ロボット自身が対象の変形方向や硬さを認識し、力加減を調整しなければならない。しかし、これらの情報はカメラを用いた形態の観察だけでは得ることができず、実際に対象に触れ変化を起こすことで初めて知覚できる。そのため、対象に安全に触れるための柔軟なアクチュエータと変化を知覚するためのセンサを統合したロボットシステムの実現が重要である。

研究代表者は、これまでに、効率の高い磁気回路構造により高出力化したダイレクトドライブリニア電磁アクチュエータの研究開発に取り組んできた。また、電磁アクチュエータの出力/質量比が小さいという課題を、空気圧シリンダと組み合わせることで克服した、一体構造空電ハイブリッドアクチュエータ (Integrated Pneumatic Electromagnetic Hybrid Linear Actuator: iPEHLA) を提案し、研究開発を行っている^①。iPEHLA では、流体圧力と電磁相互作用を出力軸へ伝達する要素 (可動部とピストン) および空間 (可動域と空気室) を一体化した独自の構造 (国内特許取得済, PCT 出願済) により小型化を達成し、堅牢性と生産性を高めることにも成功した。空気圧力の高出力と電磁気力の高応答性を組み合わせることで、大きな力を出しつつも緻密な力の制御が可能である。また、空気圧シリンダとリニア電磁アクチュエータの2つのダイレクトドライブアクチュエータを組み合わせることで、バックドライバビリティが損なわれることが無く、外力に対して柔軟性があり、接触に対して本質的に安全な構造となっている。

環境に対し能動的に接触することで対象の認識を行うことを Interactive Perception (相互作用による知覚) と呼び、これまでに、ロボットによる能動的接触によって起きた変化を視覚的に認識し対象の動作の回転軸を発見するという研究が行われている^②。人への積極的な接触を扱う研究としては、マッサージを行うロボットが多数開発されている^③。しかし、接触対象に対する柔軟な駆動に着目した研究が多く、接触対象の状態の認識はほとんど行われていない。

本研究では、ロボットによる能動的接触により、対象の分布インピーダンスの計測を行うことを目指す。対象のインピーダンスを計測するためには、ロボット側のインピーダンスを0に近づけ、接触対象のダイナミクスを阻害しないことが必要である。すなわち、出力が0の状態では、外力に対して反力を発生しない、「力覚的に透明」な状態を作り出す必要がある。このような特性は、高速な外力の変化に対応する必要があるため、トルクセンサのフィードバックにより減速機付回転モータを制御する能動的システムでは実現が難しい^④。リニア電磁アクチュエータは高速な外力の変化にも対応可能であるが出力が小さいことが課題であった。研究代表者の開発した iPEHLA は、空気圧制御によって生じる力制御の誤差を、出力は小さいが応答性が高い電磁力によって補償することで、広い出力範囲におけるゼロインピーダンス制御を可能にする特性を持てる可能性があり、本アクチュエータを用いることでロボットによる能動的接触と接触による硬さの知覚の実現が期待される。

2. 研究の目的

ロボットと人・物体との安全な物理的インタラクションには、接触対象の変形方向や硬さの認識が不可欠であり、人が未知対象に行う触探索のような機能の実現が重要である。本研究では、エンドエフェクタに搭載した力制御可能な iPEHLA を介し、ロボティックアームが能動的接触を行うことで、接触対象の表面分布インピーダンスを計測・可視化するインピーダンススキャンシステムを開発する。これまでに研究代表者が開発した、空気圧シリンダとリニアモータの要素と空間を一体化した小型ハイブリッドアクチュエータをシステムに用いることにより、広い出力範囲で、高いバックドライバビリティに基づく安全な接触が可能となる。開発したシステムにおいて、アクチュエータをゼロインピーダンス制御することで、安全な接触を実現する。そして、可動部位置と速度から接触対象のインピーダンス特性を推定し、その結果を利用したマニピュレーションの実現を目指す。

3. 研究の方法

iPEHLA を搭載したロボティックアームを開発する。アクチュエータを介したロボティックアームによる能動的接触の実現により、接触対象の表面分布インピーダンスを計測・可視化と、安全なマニピュレーションの実現を目指す。

(1) 一体構造空電ハイブリッド直動アクチュエータの開発

これまでに提案した iPEHLA^①について、ロボティックアーム先端への取り付けが可能な設計を行い、製作する。

(2) アクチュエータを搭載したロボティックアームによる表面分布インピーダンススキャンシステムの開発

アクチュエータを介して環境に対し能動的に接触できるシステムを開発する。ロボティックアーム自体は、ギアードモータによって駆動するものを用いる。ロボティックアームでは、アクチュエータの位置決めを行い、アクチュエータは力を制御することによって、接触力を調整しつつ、環境への能動的接触を実現する。

(3) アクチュエータと開発したシステムの評価

アクチュエータの評価として、アクチュエータに対して強制的に外乱を加える場合において、接触力が一定となることを確認する。また、空気圧のみで動作させた場合と性能を比較する。システムの評価として、実際にロボティックアームを駆動させ、アクチュエータ先端を物体と接触させた際に接触力を計測し、ロボティックアーム先端の駆動速度に対する接触力の変化を評価する。

4. 研究成果

(1) 一体構造空電ハイブリッド直動アクチュエータの開発

iPEHLA は、高出力の空気圧アクチュエータと高応答のリニアモータを組み合わせることで、従来技術では実現困難であった高出力と高応答性を両立する駆動装置である。図 1(a)に設計したアクチュエータの 3 次元 CAD モデル、図(2)にモータドライバを搭載した状態の試作機の写真を示す。設計に当たり、電磁アクチュエータ要素について、電磁界シミュレーションによる出力特性の計算を行い、空気の圧力によって生じる力に対して、電磁力が適切な配分となるように構造を決定した。空気圧アクチュエータ要素については、システム全体の小型化を目的に、ピストン、シリンダの封止部、空気の入出力ポート、およびアクチュエータの構造部品を独自に設計した。ピストンには摩擦抵抗の小さいパッキンを採用し、構造部材には繊維強化した樹脂を採用することで軽量化を達成した。試作アクチュエータは、空気圧力 0.7MPaG において空気漏れが無いことを確認した。

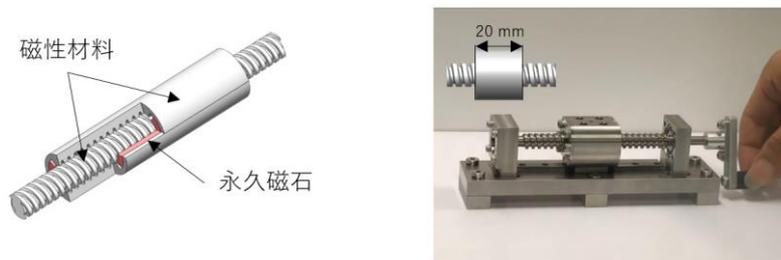


(a) 3次元 CAD モデル

(b) 試作機 (モータドライバ基板搭載)

図 1 一体構造空電ハイブリッド直動アクチュエータ

ハイブリッドアクチュエータの電磁アクチュエータ要素の高推力密度化を目的に、磁気で力を伝達する磁気送りねじ (磁気ねじ) の検討も実施した。非接触に力の伝達が可能なため、リニアモータ同様にバックドライバビリティが高くハイブリッドアクチュエータの要素として使用できる可能性がある。磁気構造が簡易な磁気送りねじを提案 (図 2(a)), 設計を行った。また、図 2(b)に示す試作機を製作し、伝達力特性、力制御性について調べた。



(a) 内部構造

(b) 試作機

図 2 コンシクエントポール型磁気ねじ

(2) アクチュエータを搭載したロボティックアームによる表面分布インピーダンススキャンシステムの開発

図 3 に開発したシステムの概要を示す。iPEHLA をロボティックアーム先端に搭載した。ロボティックアームによって、アクチュエータの位置を変化させることが可能である。

アクチュエータは、接触力を一定に保つように制御を行う。空気による力の制御については、圧力制御バルブを用い、出力可能な力の範囲で、任意の力が発生できるようにした。電磁力の制御では、本アクチュエータ用に開発したモータドライバ基板を用いて、コイルへの印加電圧を調整することで、指定の力を発生させた。電磁力は、空気圧力による力と目標の力との偏差を補償する。各アクチュエータ要素の制御基板は、Ethernet によってリアルタイム OS をインストール

したコンピュータと通信できる。発生力の指令，アクチュエータの状態のモニタリングができるようにシステムを構築した。

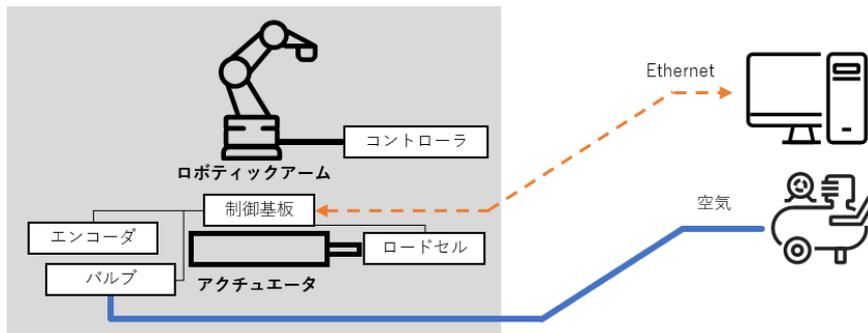
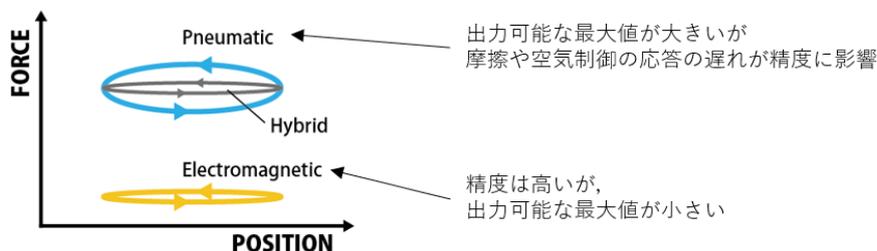


図3 表面分布インピーダンススキャンシステムの概要

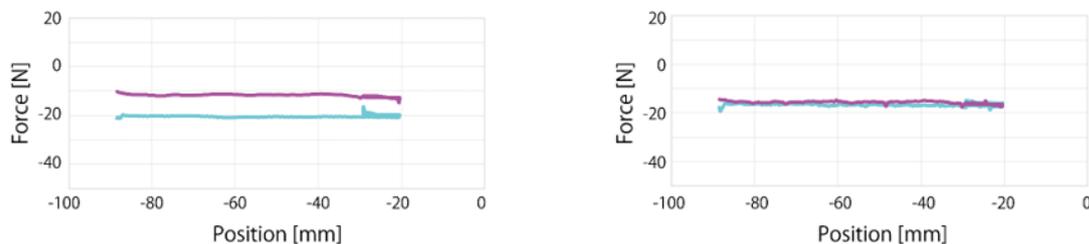
(3) アクチュエータと開発したシステムの評価

ハイブリッドアクチュエータは図 4(a)に示すような特性を実現できると想定される。このことを確認する実験を行った。可動部に対して、強制外乱を加え、その時に、可動部の位置に寄らず、一定の接触力が実現されるかどうか確認した。図 4(b)は実験結果の一例である。空気圧一定条件では、圧力制御バルブが一定の圧力を保つようにした。ハイブリッド駆動では、可動部の移動方向の情報を基に、空気圧力による力と目標の力との偏差を補償するように電磁力を制御した。実験中、接触力は可動部先端に取り付けたロードセルで計測した。図 4(b) (ii)の通り、ハイブリッド駆動によって、可動部位置に寄らず一定の力を維持することが可能であることを確認した。本研究成果をまとめた論文の投稿を準備中である。

開発したシステムの評価では、アクチュエータは一定の接触力を保つように制御し、ロボット先端に搭載したアクチュエータが、鉛直下向きになるようにロボティックアームの姿勢を調整した。ここでアクチュエータを降下させると、可動部先端が床に接触する。この状態でアクチュエータの固定部をロボティックアームで上下に振動させた。その結果、最大速度 20mm/s までは、一定の接触力が維持できた。今回は、動摩擦のみを考慮したが、電気的な特性もモデルとして制御に取り入れることで、高速度条件でも接触力を一定に保つことが期待される。



(a) 想定されるハイブリッドアクチュエータの特性



(i) 空気圧一定 (圧力制御バルブによる)

(ii) ハイブリッド駆動

(b) 実験結果の一例

図4 システムの評価

<引用文献>

- ① Y. Nakata, T. Noda, J. Morimoto, and H. Ishiguro, Development of a Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator with an Integrated Structure, In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2015, Oct. 2015, 6238-6243.

- ② D. Katz, A. Orthey, and O. Brock, Interactive perception of articulated objects, In *Experimental Robotics*, 2014, 301-315.
- ③ R. C. Luo, C. W. Hsu, and S. Y. Chen, Electroencephalogram signal analysis as basis for effective evaluation of robotic therapeutic massage, In *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems 2016*, Oct. 2016 Oct 9. 2940-2945.
- ④ S. Haddadin, A. Albu-Schaffer, A. De Luca, and G. Hirzinger, Collision detection and reaction: A contribution to safe physical human-robot interaction, n *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System 2008*, Sept. 2008, 3356-3363.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Akira Heya, Yoshihiro Nakata, Masahiko Sakai, Hiroshi Ishiguro, Katsuhiro Hirata	4. 巻 54
2. 論文標題 Force Estimation Method for a Magnetic Lead-Screw-Driven Linear Actuator	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMAG.2018.2845455	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Akira Heya, Yoshihiro Nakata, Masahiko Sakai, Hiroshi Ishiguro, Katsuhiro Hirata
2. 発表標題 Force Estimation Method for a Magnetic Lead-Screw-Driven Linear Actuator
3. 学会等名 IEEE Intermag 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 部矢 明, 仲田 佳弘, 酒井 昌彦, 石黒 浩, 平田 勝弘
2. 発表標題 磁気ねじ駆動リニアアクチュエータのセンサレス力制御の提案
3. 学会等名 電気学会 リニアドライブ研究会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Akira Heya, Yoshihiro Nakata, Masahiko Sakai, Tetsuya Abe, Hiroshi Ishiguro, Katsuhiro Hirata
2. 発表標題 Analysis of a Consequent-Pole Magnetic Lead Screw
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference 2018（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 阿部哲也, 部矢明, 仲田佳弘, 平田勝弘, 石黒浩
2. 発表標題 コンシークエント型磁気ねじの開発
3. 学会等名 電気学会リニアドライブ研究会
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計2件

産業財産権の名称 磁気式動力伝達構造体	発明者 仲田佳弘, 石黒浩, 平田勝弘, 酒井昌彦, 部矢明, 阿部哲也	権利者 国立大学法人大 阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、特願2018-202245	出願年 2018年	国内・外国の別 国内

産業財産権の名称 磁気式動力伝達構造体	発明者 仲田佳弘, 石黒浩, 平田勝弘, 酒井昌彦, 部矢明, 阿部哲也	権利者 国立大学法人大 阪大学
産業財産権の種類、番号 特許、PCT/JP2019/040626	出願年 2019年	国内・外国の別 外国

〔取得〕 計0件

〔その他〕

仲田佳弘のホームページ http://yoshihi-ro-nakata.net/
--

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	野田 智之 (Noda Tomoyuki) (30588661)	株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報通信総合研究所・主任研究員 (94301)	