

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14401

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540134

研究課題名(和文) 一体化構造を有する空電ハイブリッドダイレクトドライブ直動アクチュエータの開発

研究課題名(英文) Development of a Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator with an Integrated Structure

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) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、空気圧による高出力と電磁気力による高応答性を両立する一体化構造を有する空電ハイブリッド直動アクチュエータの開発と制御を行った。流体圧力と電磁気力を出力軸へ伝達する要素(ピストンと可動子)および空間(空気室と可動域)を一体化する独自の構造を提案した。従来型ハイブリッドアクチュエータが、2つの異なるアクチュエータの出力を機械要素により合成していたのに対し、一体化構造とすることで小型軽量・高堅牢化を達成した。本アクチュエータは、バックドライバブルであり、力制御が可能である。開発した試作機を用いて力制御性に関する評価を実施した。今後、柔軟性可変のロボット関節等への適用が期待できる。

研究成果の概要(英文)：Conventional hybrid actuators can achieve a better force/torque bandwidth than a single principle actuator without losing back-drivability. However, hybrid actuators occupy space at least equal to the sum of the volumes of two or more actuators and multiple transmissions. In this research, we developed, and controlled an integrated pneumatic-electromagnetic hybrid linear actuator (iPEHLA). In the integrated design, hybrid components of an air cylinder and a linear motor were arranged around a single shaft, and the pneumatic and electromagnetic actuators shared the same moving parts (i.e., piston and moving part) and internal cylindrical spaces (i.e., cylinder and stator). Consequently, space required was less than the sum of the volumes of the two actuators. The force control performances of the iPEHLA under pneumatic and hybrid actuation were compared by using a prototype. The experimental results demonstrated that the novel design maintained its hybrid properties.

研究分野：ロボット工学、アクチュエータ

キーワード：空電ハイブリッドアクチュエータ ダイレクトドライブ 力制御

### 1. 研究開始当初の背景

従来の産業用ロボットでは、駆動関節にギアードモータを用い、高い剛性を利用して、高精度の作業を行ってきた。今後、開発が期待される人と安全に協働するロボットや外骨格型アシストロボットには、外力に対する柔軟性を持つ駆動関節の実現が必要不可欠である。

研究代表者(仲田)はこれまでに、高出力化のための効率の良い磁気回路構造を提案することで、高応答性を有し制御性に優れたダイレクトドライブリニア電磁アクチュエータを開発した。さらに、本アクチュエータを複数搭載した筋骨格上・下肢ロボットを開発し、可変粘弾性を利用したリーチング動作や連続跳躍を実現している。本アクチュエータは小型・高出力・高応答性を有し、電流無励磁時には脱力できる高いバックドライバビリティを持つ。このような卓越視した性能を有する反面、運動の可逆性が高いため、重力補償など静的な力制御にも電流励磁を必要とし、長時間の駆動ではコイルの発熱の問題があった。

この課題は、リニア電磁アクチュエータを作動流体とハイブリッド化することで解決できる。従来研究では、O. Khatib らの Distributed Macro-Mini (DM<sup>2</sup>) を始めとして、いずれのハイブリッド構造においても複数のアクチュエータを、機械要素を用いて接続する構造としており、小型化・高堅牢化が課題となっていた。

研究分担者(野田)は、空電ハイブリッドアクチュエータによって、上・下肢外骨格型ロボットを開発しており、アクチュエータの小型化・高堅牢化が達成できれば、このようなプロジェクトにも応用が可能である。

### 2. 研究の目的

本研究では、作動流体として圧縮空気を利用する空電ハイブリッドアクチュエータに注目し、流体圧力と電磁気力を出力軸へ伝達する要素(ピストンと可動子)および空間(空気室と可動域)を一体化することで、バックドライバブルでありながらも、小型・高出力・高応答で力制御が可能で新しいアクチュエータを開発する。ハイブリッドアクチュエータの小型化・高堅牢化を達成するため、一体化構造を提案し、試作と基本性能の評価を行う。1年目には、シミュレーションにより基本特性を明らかにし、提案構造の設計及び試作を行う。2年目には、制御システム開発と試作品評価を行う。実験を通じて、提案構造によってハイブリッド駆動が可能であることを確認する。

### 3. 研究の方法

本研究では、以下の2つのテーマに取り組む。

- (1) 一体化構造を有する空電ハイブリッドダイレクトドライブ直動アクチュエータ

の開発

- (2) 高出力の空気圧と高応答性を実現する電磁気力のハイブリッド制御システムの開発と評価

高出力の電磁アクチュエータ要素実現のカギとなる、磁気回路構造の最適化と空気圧シリンダとの統合を研究代表者が行き、研究分担者がこれまでの研究に基づき空電ハイブリッドアクチュエータの制御モデルを提案する。

有限要素法を用いた電磁気のシミュレーションにより、磁気回路構造の最適化を行う。その結果に基づき、シリンダ外周にコイルを配置し、可動部にピストンと磁石ブロックを有する一体化構造を設計する。試作を行い、実機実験による試作機の評価を実施する。実験ではロードセルを用いて推力を計測し、提案するアクチュエータのハイブリッド駆動の原理検証を行う。また、電磁アクチュエータ要素による機械摩擦補償時の力制御の正確さを、ハイブリッド駆動と空圧駆動で比較することで、ハイブリッドアクチュエータの優位性を確認する。

### 4. 研究成果

- (1) 一体化構造を有する空電ハイブリッドダイレクトドライブ直動アクチュエータの開発

「空電ハイブリッドの要素と空間を一体化する」というコンセプトの構造(図1)について検証するため、研究分担者と協力して設計・試作および検証実験を実施した。この試作機(図2)により、実験的に動作原理の実現性と検証に成功しただけでなく、有限要素法を用いた電磁気のシミュレーションによって磁気回路構造を最適化するなど、シミュレーションと連動した最適化を行った。さらに、試作においては、市販の空気圧シリンダの部品を活かした設計を行った。この試作の成功により、空圧メーカーの既存の部品製造ラインが利用できることが示唆され、短期的な実用化に近づいたと言える。

アクチュエータの発生力を計測するため、小型のロードセルとリニアールを用いた計測装置を製作した(図3)。力の計測の結果、空圧・電磁アクチュエータの各要素がともに

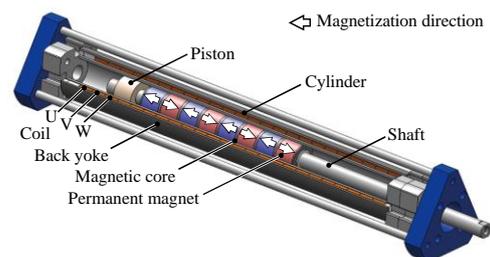


図1 一体化構造を有する空電ハイブリッド直動アクチュエータ



図2 試作機

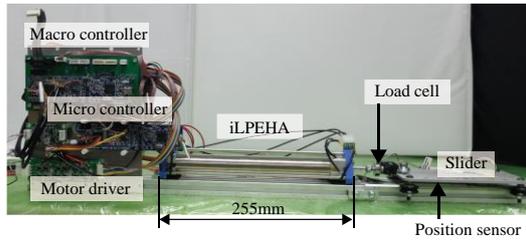


図3 実験装置

駆動に十分な特性を有していることを確認した。

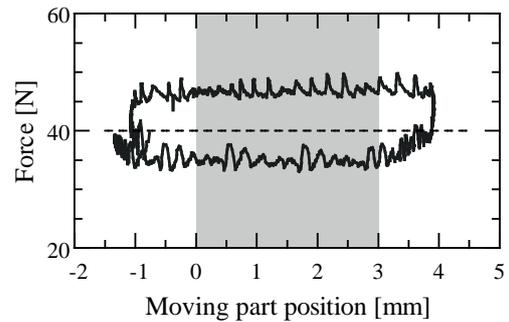
上記の試作を、初年度に行うことができ、動作の確認を行えたことで、得られた成果を国際会議のワークショップで発表することができた（〔学会発表〕①）。発表後に、同分野の研究者からメールで問い合わせがあるなど、大きな反響があった。また、一体構造空電ハイブリッドアクチュエータの構造に関する特許を出願した（〔産業財産権〕①）。試作の過程で明らかとなった加工や組み立てにおける課題と解決策を検討することができ、これらの知見によって提案構造の特許を補強することができた（〔産業財産権〕②）。

(2) 高出力の空気圧と高応答性を実現する電磁気力のハイブリッド制御システムの開発と評価

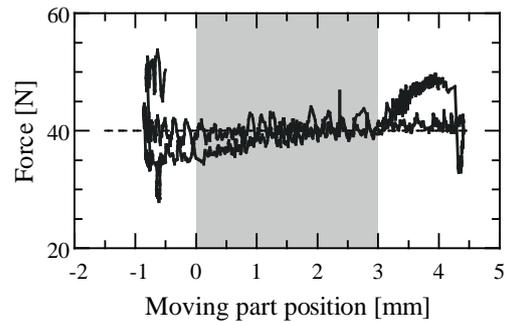
開発した試作機の力制御性を評価する実験を研究分担者と協力して実施した。高応答での制御が可能な電磁気力により、アクチュエータの機械摩擦を補償することで、空気圧駆動のみの場合と比較して、ハイブリッド駆動では、力の制御性能が向上することを実験によって示し、得られた成果を国際会議にて発表した（〔学会発表〕②）。具体的には、一定の推力を発生させる条件において、摩擦補償を行うことで、目標推力との偏差を小さくできることを確認した（図4）。発表後の質疑の時間外に、会場にて同分野の研究者から追加質問を受けるなどの反響があり、また、議論を通じて研究開発にとって重要な知見を得ることができた。

電磁アクチュエータ要素を駆動するモータドライバの小型化にも取り組んだ。開発した基板によって試作機を駆動する性能評価実験を行い、素子の発熱などの問題が発生し無いことを確認した。

研究成果の産業界での応用を期待し、一体化構造を有する空電ハイブリッド直動アク



(i) 空気圧駆動



(ii) 空電ハイブリッド駆動

図4 摩擦補償実験結果

発生力を一定値 40N に設定。可動子に外力を加えた場合、空気圧駆動だけでは、摩擦の影響で推力の計測値が 40N とならないが、空電ハイブリッド駆動では目標値 40N との誤差が空気圧駆動の場合と比較して小さくなる（可動子位置 0 から 3mm）

チュエータの技術を紹介する解説論文を執筆した（〔雑誌論文〕①）。

## 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1件）

- ① 仲田 佳弘、人共存型ロボットのためのアクチュエータ技術、査読無、ケミカルエンジニアリング、61 巻、2016、38—46

〔学会発表〕（計2件）

- ① Yoshihiro Nakata, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto, and Hiroshi Ishiguro, Design of an Integrated Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS 2014), Workshop: From Active Impedance to Intrinsically Compliant and Variable Impedance Actuators: Pros, Cons and Trade-offs,

2014年9月14日, Chicago, IL, USA

- ② Yoshihiro Nakata, Tomoyuki Noda, Jun Morimoto, and Hiroshi Ishiguro, Development of a Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator with and Integrated Structure, IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems (IROS 2015), 2015年10月1日, Hamburg, Germany

[産業財産権]

○出願状況 (計3件)

①

名称: アクチュエータ装置、ヒューマノイド型ロボットおよびパワーアシスト装置  
発明者: 野田智之、仲田佳弘、石黒浩、森本淳  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許願 2014-109213 号  
出願年月日: 2014年5月27日  
国内外の別: 国内

②

名称: アクチュエータ装置、ヒューマノイド型ロボットおよびパワーアシスト装置  
発明者: 野田智之、仲田佳弘、石黒浩、森本淳  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: 特許願 2014-266466 号  
出願年月日: 2014年12月26日  
国内外の別: 国内

③

名称: アクチュエータ装置、ヒューマノイド型ロボットおよびパワーアシスト装置  
発明者: 野田智之、仲田佳弘、石黒浩、森本淳  
権利者: 同上  
種類: 特許  
番号: PCT/JP2015/65173  
出願年月日: 2015年5月27日  
国内外の別: 外国

[その他]

ホームページ等

<http://yoshihiro-nakata.sakura.ne.jp/?research=integrated-pneumatic-electromagnetic-hybrid-linear-actuator>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

仲田 佳弘 (NAKATA, Yoshihiro)  
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教  
研究者番号: 80720664

### (2) 研究分担者

野田 智之 (NODA, Tomoyuki)  
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・脳情報研究所・主任研究員  
研究者番号: 30588661