

平成 30 年 6 月 8 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2017

課題番号：26700026

研究課題名(和文) 柔軟な体幹を有するリニア電磁アクチュエータ駆動人型上半身ロボットの身体協調運動

研究課題名(英文) Coordinated body movement of an upper-body humanoid robot with a flexible trunk driven by electromagnetic linear actuators

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) 18,900,000円

研究成果の概要(和文)：ロボットによる人や物体との物理的インタラクションの実現には、実環境に存在する多様な外乱に対する対応だけでなく、状況やタスクに応じたアクチュエータの柔軟性の調整およびアクチュエータ間の協調動作が不可欠である。本研究では、粘弾性を制御可能な小型・高出力のリニア電磁アクチュエータとしてリニアバーニアモータを複数製作し、体幹と双腕に本モータを用いた人型上半身ロボットを開発した。また、ロボットのアクチュエータを互いに協調して動作させることによる運動連鎖に基づく多様な動作の実現について実験を通して検討した。

研究成果の概要(英文)：In the real environment, robots encounter several interferences to them while performing physical interactions with humans and objects. For coping with various disturbances, situations, and tasks, robots should have flexible actuators and realize coordinated motions of each actuator which drive their joints. In this research, we manufactured linear vernier motors as small and high power electromagnetic linear actuator which can control its viscoelasticity and developed an upper body humanoid robot which has a trunk and two arms driven by these linear motors. Furthermore, we investigated the effect of the kinetic chain for robots' motion which is realized by physically connected actuators.

研究分野：ロボティクス, アクチュエータ

キーワード：リニア電磁アクチュエータ リニアバーニアモータ ヒューマノイドロボット 運動連鎖

1. 研究開始当初の背景

近年のロボット研究は、人と隔離された空間でタスクを連続・高精度に行う産業用ロボットから、家庭内や屋外での使用を想定し、家事、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つつある。実環境で人の支援を行うロボットには、人との接触を前提とした安全な駆動源が求められており、特に外力に対する柔軟性の確保は人と関わるロボットの実現に向けた重要課題である。

研究代表者はこれまでに高応答性を有し制御性に優れた新構造の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、ロボットの駆動源としての利用を検討してきた。本アクチュエータは電流制御により力を制御し、外力に対する粘弾性を調整でき脱力することも可能である。さらに、アクチュエータに低速・高推力特性を実現できるバーニア構造を適用することで高出力化する研究開発に取り組んできた。

人は体幹と腕の筋を連携し、身体をしなるように動かすことで手先に大きな力を発生させ、投球やラケットを振るといったダイナミックな動作を効率的に実現している。また、捕球動作では、手先の剛性楕円体により接触時のふるまいを調整し、体幹の柔軟性と連携により球のエネルギーを吸収する。このように、体幹の柔軟性が動作に対して重要な役割を果たしている。これまでも、体幹にアクチュエータを持つロボットが開発されている^{①②}。しかし、粘弾性を高精度に制御することや、高速な外力の変化への対応が難しいなどの問題があった。

体幹と腕を鞭のようにしなませたり、体のひねりを利用して腕を振り回したりするダイナミックな身体協調運動の実現には、粘弾性の制御の他に、必要に応じて脱力して他のアクチュエータに対して受動的に動く必要があり、リニア電磁アクチュエータはこうした用途に適した特性を持つ。

2. 研究の目的

ロボットによる人や物体との物理的インタラクションの実現には、実環境に存在する多様な外乱に対応するだけでなく、タスクに応じたエンドエフェクタの広範囲の力制御・インピーダンス制御、ダイナミックで効率の高い運動を行うためのアクチュエータ間の協調動作が不可欠である。本研究では、これまでに開発した粘弾性を制御可能な小型・高出力のリニア電磁アクチュエータとしてリニアバーニアモータ^③を用い、双腕と体幹部を有する人型上半身ロボットを開発する。エネルギーの伝播に伴う各アクチュエータの粘弾性の調整と二関節筋を用いた物理的な拘束によって、各アクチュエータの順に連携して駆動させ、エンドエフェクタに大出力を発生させるキネティックチェーン（運動連鎖）の効果により、効率的な身体協調運動を実現する。

3. 研究の方法

本研究では、リニア電磁アクチュエータを複数搭載した、人型ロボットを開発する。また、全身のアクチュエータを利用したロボットによる身体協調運動を実現する。

(1) リニア電磁アクチュエータを用いた人型上半身ロボットの開発

リニア電磁アクチュエータとしてこれまでに提案したリニアバーニアモータ^④の磁気回路構造と可動部の支持機構について検討し、モータを設計する。モータを複数製作し、これらを搭載した人型の上半身ロボットを開発する。本ロボットは、リニアバーニアモータで駆動される体幹部と双腕を有する。

(2) 身体協調運動の実現と評価

ロボットの全身に配置されたアクチュエータを互いに協調して動作（運動を連鎖）させることで、多様な動作を実現する。具体的には、外力に対する応答と、投球時の腕を振る動作を想定したエンドエフェクタの運動である。また、ロボットに搭載されたアクチュエータを協調して動作させることの効果について実験を通じて評価・検証する。

4. 研究成果

(1) リニア電磁アクチュエータを用いた人型上半身ロボットの開発

リニア電磁アクチュエータとして、可動部に永久磁石を有するリニアバーニアモータを用いる。

はじめに、可動部と固定部間での磁気的な相互作用および可動部両端からの磁束の漏れの影響で発生する力（ディテント力）による動作時の推力脈動を低減するため、磁気回路構造を電磁気シミュレーションによって検討した（図1）。構造パラメータとして永久磁石の幅を変化させた。平均推力が大きく、推力に対するディテント力の大きさの割合が比較的小さくなる1.4mmを採用した。さら

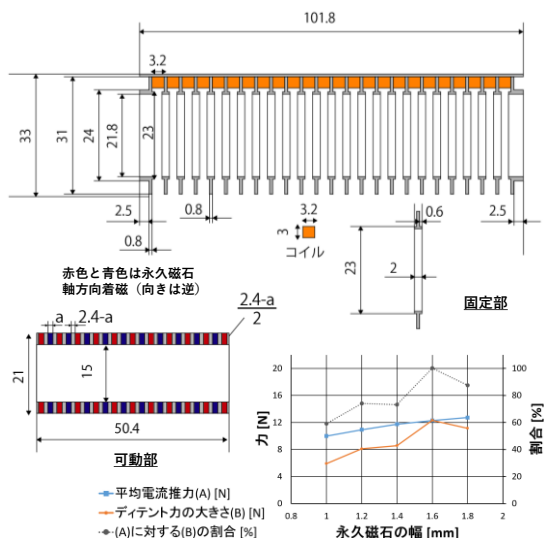


図1 構造パラメータ検討

に、過去の研究^④に基づいて両端部の磁石配置を中央部と異なる配置にすることで、最終的に平均電流推力 11.4N（電流推力は推力値からディテント力を差し引いたもの）、ディテント力の大きさ（最大値と最小値のそれぞれの絶対値の平均値）5.4N、平均電流推力に対するディテント力の大きさの割合 46.9%となった。なお、ディテント力は、一定推力発生を妨げとなる。そこで、実機において位置に対するディテント力を計測しておき、コイル励磁電流を適切に調整することで0に近づけるように制御を行う（学会発表[23]）。

可動部の支持機構については、可動部と固定部間の吸引力による摩擦の影響を低減するため、固定部に取り付けられたステンレスの軸に対して、リニアベアリングを介して可動部が接触する構造とした。設計したリニアバーニアモータの CAD モデルを図 2 に示す。

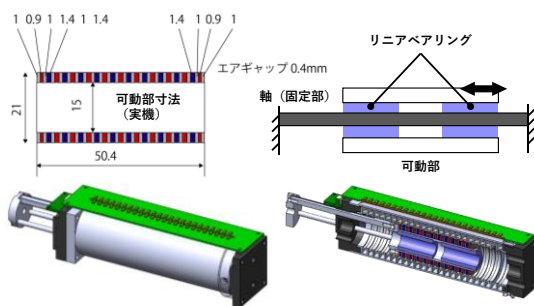


図 2 リニアバーニアモータの構造設計

製作したリニアバーニアモータの各要素の写真を図 3 に示す。可動部と固定部間のギャップが維持できるかどうかは、事前に検証用の試作機を製作することで確認した。コイルには線積率の高い平角線 α 巻コイルを用



図 3 リニアバーニアモータの要素部品



図 4 リニアバーニアモータとロボット

いた。巻線機で 1 個ずつ成形し、磁極と交互に積み重ねることで固定部を製作した。

製作したリニアバーニアモータとリニアバーニアモータを複数搭載した人型上半身ロボットの写真を図 4 に示す。体幹は 1 段の平行リンク構造とした^⑤。本構造は、6 本のアクチュエータによって駆動され、並進・回転についてそれぞれ 3 自由度を有する。腕部については軽量化のためにアクチュエータ自体をロボットのリンクの一部として利用する構造とした。

さらなる他自由度のロボット実現を目指し、リニア電磁アクチュエータの高出力化の検討も行った。リニアバーニアモータと同様に多数の磁極を有する構造を持ち、非接触に動力伝達が可能な磁気式動力伝達機構（磁気ねじ）に着目した。リニアバーニアモータに使用した埋込磁石型の構造を応用することで、従来の磁気ねじに比較して簡易な構造を提案した。試作を行い、回転モータを接続することで実際にアクチュエータとして駆動できることを確認した（雑誌論文[3]、学会発表[1][2][8]、構造についての特許を国内・PCT 出願）。

本研究では、人型上半身ロボットの駆動源としてリニアバーニアモータを複数製作した。構造検討、試作・実験を通じて、最終的にロボットに搭載できる複数のモータの製作に成功した。しかしながら、実用レベルのモータを開発する上で、コイルや磁極などの要素部品の形状や組み立て方法の検討、またこれらの精密部品の製造に時間とコストを要したため、開発したリニアバーニアモータを搭載したロボットでの身体協調運動実現のための検討を行うことはできなかった。しかし、リニアバーニアモータの開発と並行して実施した人型ロボットの構造を検討する過程において、空気圧アクチュエータ利用することでロボットの身体協調運動の検討を行った。

(2) 身体協調運動の実現と評価

ロボットの機構設計および運動連鎖を用いた動作の実現のため、空気圧シリンダをアクチュエータとして用いたロボットを試作

した。アクチュエータを協調して動作させることによる運動連鎖を用いるためのシステムを提案した (ANS: Actuator Network System)。各シリンダの空気室を、チューブを使って物理的に連結することで、シリンダによって駆動される関節同士の動作を物理的に拘束し、一方に加わった力を他方に伝達することで関節が連動する。バルブを用いて連結のパターンを変化させると、異なる振舞いが実現される。

ロボティックアームの肘と肩のシリンダを連結し、エンドエフェクタに対して外力を加える実験を行った。連結する場合としない場合は、エンドエフェクタの初期位置から移動の方向が変化する様子が観察された (図5)。また、その動作は、起始と停止が2つの関節をまたぐ二関節筋を持つ系と同様の傾向があることが分かった (雑誌論文[4])。

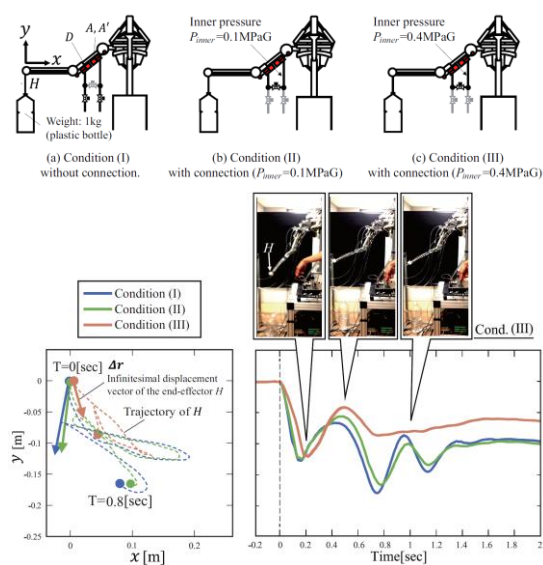


図5 外力に対する応答

投球時の腕を振る動作を想定した実験も行った。肩の関節に入力を与え、腕を前後に振る動作を作成した。この条件において、肘と肩のシリンダを連結する場合、しない場合でエンドエフェクタの軌跡と速度を計測した (図6は使用したロボティックアーム)。実験の結果、連結のパターンによってエンドエフェクタに生じる最大速度が異なることが分かった。また、本実験では肩関節にのみ動力を与えているが、肘と肩のシリンダの空気室を連結することで、空気を介して力が肘関節に伝達され、その結果、連結しない場合よりもエンドエフェクタの最大速度が大きくなることが確認された (学会発表[4])。

ロボットシステム内に分布するアクチュエータ同士をチューブでつなぐことで力を伝達し、関節を連動させるANSの効果を検証する実験も行った。胴体部に取り付けたモータ駆動の振り子の動作で前進するロボットを製作し、脚部にシリンダを取り付け、連結の有り無しで移動距離を比較した。その結果、床の硬さに応じて連結するかしなないかを選

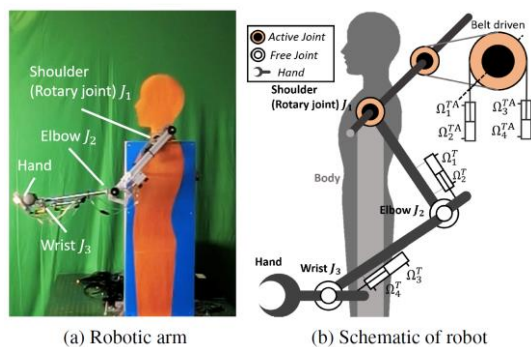


図6 ロボティックアーム

択する方が効率よく移動できる可能性があることが分かった (雑誌論文[6])。

以上のことから、状況やタスクに応じてシリンダの連結パターンを変化させることで、身体協調運動を利用し効率的に動作するロボットが実現できる可能性が示唆された。なお、リニア電磁アクチュエータは流体圧を利用するアクチュエータではないためANSをそのまま利用することはできないが、外力が加わることで生じたエネルギーを他のアクチュエータに回生する、または、リニア電磁アクチュエータを空気圧アクチュエータと組み合わせハイブリッド化 (学会発表[14]) することにより、ANSを応用したロボットの実現が可能になると考えられる。

<引用文献>

- ① T. Kozuki et al., Design Methodology for the Thorax and Shoulder of Human Mimetic Musculoskeletal Humanoid Kenshiro - A Thorax structure with Rib like Surface -,” proc. of IROS, 2012, pp. 3687-3692
- ② L. Sentis et al., Implementation and stability analysis of prioritized whole-body compliant controllers on a wheeled humanoid robot in uneven terrains, Auton. Robot, Vol.35, No.4, 2013, pp. 301-319
- ③ C. H. Lee, “Vernier Motor and Its Design,” Trans. on Power App. and Sys., Vol.82, No.66, 1963, pp. 343-349
- ④ 仲田 佳弘 他、人工筋用小型リニアバーニアモータの提案、日本 AEM 学会誌、Vol.20、No.1、2012、pp.113-118
- ⑤ D. Stewart, A Platform with Six Degrees of Freedom,” Proc. of the Institution of Mechanical Engineers, Vol.180, No.1, 1956, pp. 371-386

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 8 件)

- [1] MAEDA Kenta, NAKATA Yoshihiro et al., Effect of the Cervical Structure on the Operability of Teleoperated Humanoid Head, Artificial Life and Robotics, 査

- 読有, Vol.22, No.4, 2017, pp.497-502
DOI: 10.1007/s10015-017-0387-9
- [2] YU Shiqi, NAKATA Yoshihiro et al., A Design of Robotic Spine Composed of Parallelogram Actuation Module, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol.22, No.4, 2017, pp.477-482
DOI: 10.1007/s10015-017-0383-0
- [3] 松岡 源大, 酒井 昌彦, 仲田 佳弘 他, 螺旋型磁石を用いない磁気ねじアクチュエータの提案, *日本 AEM 学会誌*, 査読有, Vol.25, No.2, 2017, pp.224-229
DOI: 10.14243/jsaem.25.224
- [4] 浦井 健次, 仲田 佳弘 他, 受動的応答性調整機構の上肢筋骨格ロボットへの適用, *日本機械学会論文集*, 査読有, Vol.83, No.845, 2016, pp.1-16
DOI:10.1299/transjsme.16-00247
- [5] 浦井 健次, 仲田 佳弘 他, 物理的に連結された空気圧シリンダの連動駆動を利用したヒト型ロボットの肩関節機構の開発ー連動する二重関節機構による広可動域関節の実現ー, *日本ロボット学会誌*, 査読有, Vol.34, No.9, 2016, pp.623-630
DOI: 10.7210/jrsj.34.623
- [6] RYU Hideyuki, NAKATA Yoshihiro et al., Adaptive Whole-Body Dynamics: An Actuator Network System for Orchestrating Multijoint Movements, *Robotics & Automation Magazine*, 査読有, Vol.23, No.3, 2016, pp.85-92
DOI: 10.1109/MRA.2016.2582725
- [7] RYU Hideyuki, NAKATA Yoshihiro et al., Study on a Pneumatically Actuated Robot for Simulating Evolutionary Developmental Process of Musculoskeletal Structures, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査読有, Vol.28, No.2, 2016, pp.226-233
DOI: 10.7210/jrsj.34.623
- [8] URAI Kenji, OKADOME Yuya, NAKATA Yoshihiro, Estimation of physical interaction between a musculoskeletal robot and its surroundings, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, Vol.19, No.2, 2014, pp.193-200
DOI: 10.1007/s10015-014-0148-y
- [学会発表] (計 23 件)
- [1] 部矢 明, 仲田 佳弘 他, 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, *電気学会リニアドライブ研究会*, 2018
- [2] 松岡 源大, 酒井 昌彦, 仲田 佳弘 他, 螺旋型磁石を用いない磁気ねじアクチュエータの静推力特性, *電気学会リニアドライブ研究会*, 2017
- [3] AHMAD Huthaifa, NAKATA Yoshihiro et al., Switching locomotion of a four-legged robot by changing the connection patterns of an actuator network system, *International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 2017
- [4] HASHIZUME Takuma, NAKATA Yoshihiro et al., Adjustable response of a robotic arm by switching paths of an actuator network system, *International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 2017
- [5] YU Shiqi, NAKATA Yoshihiro et al., A design of robotic spine composed by parallelogram actuation modules, *International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 2017
- [6] MAEDA Kenta, NAKATA Yoshihiro et al., Effect of the cervical structure on the operability of tele-operated humanoid head, *International Symposium on Artificial Life and Robotics*, 2017
- [7] 真栄田 健太, 仲田 佳弘 他, 遠隔操作型アンドロイドヘッドの頸部関節機構とその操作性に関する検討, *HAI シンポジウム*, 2016
- [8] 松岡 源大, 酒井 昌彦, 仲田 佳弘 他, 螺旋型磁石を用いない磁気ねじアクチュエータの提案, *第 25 回 MAGDA コンファレンス*, OS-13-2, 2016, pp.445-450
- [9] RAMALHO Andrei, NAKAMURA Yutaka, NAKATA Yoshihiro, ISHIGURO Hiroshi, Design Strategy for Robotic Spines of Androids with a Natural Postural Appearance, *IEEE-RAS Humanoids*, 2016, pp.312-317
- [10] RYU Hideyuki, NAKATA Yoshihiro et al., Adaptive Locomotion by Two Types of Legged Robots with an Actuator Network System, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2016, pp.2069-2074
- [11] 真栄田 健太, 仲田 佳弘 他, 多段プレート型首機構により支持されたアンドロイドヘッドの遠隔操作性の評価, *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2016
- [12] 橋詰 拓馬, 浦井 健次, 仲田 佳弘 他, 人型上肢筋骨格ロボット HUMA を用いた外力に対する応答性調整の検討, *ロボティクス・メカトロニクス講演会*, 2016
- [13] OKADOME Yuya, NAKAMURA Yutaka, URAI Kenji, NAKATA Yoshihiro, ISHIGURO Hiroshi, HUMA: A Human-like Musculoskeletal Robot Platform for Physical Interaction Studies, *IEEE-RAS Humanoids*, 2015, pp.676-683
- [14] NAKATA Yoshihiro et al., Development of a Pneumatic-Electromagnetic Hybrid Linear Actuator with an Integrated Structure, *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and*

- Systems, 2015, pp.6238-6243
- [15] 岡留 有哉、中村 泰、仲田 佳弘、石黒 浩、バックドライバビリティを持つ多自由度ロボットと柔軟物との接触力予測、ニューロコンピューティング研究会、2015
- [16] 笠 秀行、仲田 佳弘 他、物理的に連結された空気圧シリンダの連動駆動によるロボットアームの応答性調整機構の検討、第59回システム制御情報学会研究発表講演会、2015
- [17] 岡留 有哉、中村 泰、浦井 健次、仲田 佳弘、石黒 浩、人と同様の可動域を持つ空気圧駆動上肢型ロボットのダイナミクス推定、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015
- [18] 橋詰 拓馬、仲田 佳弘 他、二関節筋機構を有する腕ロボットによるエンドエフェクタの応答性調整の検討ロボティクス・メカトロニクス講演会、2015
- [19] 安藤 晃規、平田 勝弘、仲田 佳弘、石黒 浩、埋込磁石二層固定子を有する3種類のリニアアクチュエータの推力およびディテント力の比較、電気学会リニアドライブ研究会、2014
- [20] NAKATA Yoshihiro, High performance linear actuators for physical human-robot interaction, International Workshop on Cognitive Neuroscience Robotics, 2014
- [21] RYU Hideyuki, NAKATA Yoshihiro et al., A Physically Connected Actuator Network: A Self-organizing Mechanism for Robotic Musculoskeletal Systems, 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
- [22] 笠 秀行、仲田 佳弘 他、筋骨格構造の進化的発生過程シミュレーションのための空圧駆動ロボットの開発、ロボティクス・メカトロニクス講演会、2014
- [23] 仲田 佳弘 他、ロボットの柔軟動作を実現する高出力リニアバーニアモータの開発とその制御、第58回システム制御情報学会研究発表講演会、2014

[産業財産権]

○出願状況 (計 2 件)

名称：磁気式動力伝達構造体及びアクチュエータ
発明者：仲田佳弘、石黒浩、平田勝弘、松岡源大
権利者：国立大学法人大阪大学
種類：特許
番号：特願 2017-017704

出願年月日：2016年11月21日
国内外の別：国内

名称：磁気式動力伝達構造体及びアクチュエータ
発明者：仲田佳弘、石黒浩、平田勝弘、松岡源大
権利者：国立大学法人大阪大学
種類：特許
番号：PCT/JP2017/041677
出願年月日：2017年11月20日
国内外の別：外国

[その他]
ホームページ等
<http://yoshihiro-nakata.net/>

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) 研究協力者

浦井 健次 (URAI, Kenji)