

平成30年 5月31日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H05320

研究課題名(和文) 軟体アクチュエータを用いたスポーツ人体ファントムの開発と筋骨格の再建に関する研究

研究課題名(英文) musculoskeletal humanoid robot with soft actuators for biomechanics studies

研究代表者

新山 龍馬(NIIYAMA, Ryuma)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号：00734592

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 18,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間の筋骨格身体を再現するスポーツ人体ファントムを、人工筋肉アクチュエータを用いた生物規範ロボットによって実現することを目指した。生体筋の形状を模倣した軟体アクチュエータを開発した。予備実験として、垂直跳びを行う脚や、高速動作を行うロボットアームを開発した。これらを統合して、多自由度の背骨を備えた等身大の人体ファントムを製作した。全身運動タスクとしては水泳を選択した。競泳で使われるドルフィンキック動作を水中で実行し、各部の姿勢と推力を計測した。シミュレーションが難しい流体中の全身運動のバイオメカニクス実験を、開発した等身大人体ファントムで実行することができた。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is developing an anthropomorphic active dummy of human body with muscle-driven bio-inspired humanoid robot. We developed a thin flexible pneumatic actuator that mimic bionic muscle. In the pilot studies, we conducted vertical jumping experiments with a legged robot and arm swing experiments with high-speed robot arm. We integrated these components into a full body musculoskeletal humanoid robot. We chose swimming movements for the experiments. In a large water tank, the robot performed dolphin kick motions. The orientation and thrust force are measured in the experiment. We verified that the musculoskeletal robot can be a research platform for biomechanics studies.

研究分野：知能ロボット

キーワード：人型ロボット バイオメカニクス 人工筋肉

1. 研究開始当初の背景

ヒト型ロボットの応用のひとつとして、人間シミュレータあるいは人体ファントム（人体を模擬したモデル）としての利用が挙げられる。静的なファントムと異なり、ロボットは身体運動の模擬が可能である。

ロボットを用いることで、ケガの恐れのある介護機器の試験や、同じ動作を繰り返すなど、倫理と安全性の観点から生体では困難な試験が可能になる。また、人間では不可能な、同じ動作の再現や最適化が実行できる。このようなヒト型ロボットの先行例として、転倒や器具の破損が想定される歩行器の試験、危険なガスの中での気密スーツの性能確認、スポーツバイオメカニクスのための人型ロボット、などが開発されている。

これらのロボットは、形状や関節配置という観点で人体を模擬しているが、生体の運動制御原理の解明・実証を行うには、解剖学的構造や生体力学にまで踏み込んだ生体型ロボットが必要である。

ヒトの関節駆動方式は、筋骨格系に基づき、従来のロボット機構と大きく異なる。我々は、特にダイナミックな運動を対象に、モータ駆動系では捉えることのできない解剖学的構造の働きを調べてきた。例えば、走行や跳躍を行う筋骨格ロボットを開発し、検証を行ってきた。その中では、二関節筋や抗重力筋がどのように筋骨格系の出力を特徴付けるのかを明らかにし、拮抗駆動による関節の受動剛性や弾性要素によるエネルギー回生の効果について調べた。また、生体の筋賦活パターンに基づいた運動指令の生成手法を提案してきた。

ロボットを用いた検証と並行して、物理シミュレーションも有効なツールであり、相補的な関係にある。我々は独自の筋骨格シミュレータを有し、スポーツにおける瞬発動作などの検証などを行ってきた。しかし、全身運動のマルチスケール筋骨格シミュレーションでは計算量が膨大になる。このことから、筋骨格シミュレーションだけでなく、実物の筋骨格ファントムを用いた多層的アプローチを考える。ロボティクスと、スポーツバイオメカニクスが融合した学際的アプローチが求められている。

2. 研究の目的

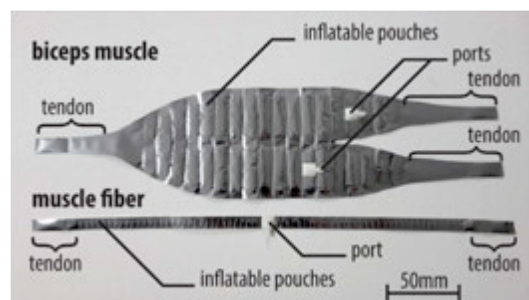
本研究では、これまで取り扱いが難しかった筋腱複合体の形状や相互作用などの生体力学まで考慮した実ロボットとしての筋骨格ファントムを提案する。生体規範ロボットを用いたアプローチによって、筋肉の生体力学的性質が運動に果たす役割、および全身運動の筋シナジーを明らかにする。これまでにない有機的形態を備えた軟体構造ロボットの実現と生体の運動原理の解明、スポーツ・健康分野への新しい貢献が期待される。

3. 研究の方法

生体筋の構造に基づく軟体アクチュエータの開発、人体ファントムの開発、運動中の筋動態計測と身体運動の解析から構成される。生体筋の形状を模倣した軟体アクチュエータを製作するために、様々な形状を実現できるソフトアクチュエータの開発に取り組む。運動計測では、垂直跳びなどの瞬発動作や、スポーツ動作を数種類取り上げる。軟体アクチュエータを用いたロボット筋骨格人体ファントムは、下肢と上肢、体幹を分けて要素技術の開発に取り組む。全身モデルと、生体力学的検証を行う身体部位を分けることで、全身運動を多層的に捉える。

4. 研究成果

(1) 生体筋の形状を模倣した軟体アクチュエータの開発に取り組んだ。ソフトアクチュエータとしてはマッキベン型空気圧人工筋が知られているが、従来のアクチュエータでは有機的形態を実現できない。そのため、生体筋のような複雑形状を実現する新型アクチュエータの開発が本研究の要となっている。この課題を解決するため、パウチモーターと呼ばれる形状自由度の高いシート状の空気圧アクチュエータを採用し、生体筋の形状に成形した。また、外形の模倣のみだけでなく、羽状角（筋繊維の角度）を模倣し、バイオメカニクス分野で知られている羽状筋の特性と類似した長さ張力特性を得た。また、筋腱複合体の弾性要素を模倣が可能であることを示した。



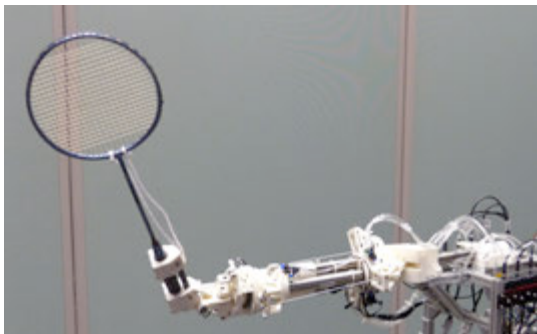
薄型柔軟空気圧人工筋肉

(2) 薄型軟体アクチュエータを用いて、ヒトの腕の解剖学的構造を模倣するロボットアームを試作した。試作機では、機能解剖学に基づき、人工筋肉の起始と停止の部位を考慮してアクチュエータの配置を行なった。上腕二頭筋および上腕三頭筋を人工筋肉アクチュエータで模倣し、肘ジョイントの屈伸ができることを確認した。

(3) 身体部位ごとにスポーツ動作を模倣し、計測を行なった。筋骨格系の動的な特性や非線形特性の影響が顕著な、加減速の激しい運動として、垂直跳びおよびラケット競技における前腕の動きを取り上げた。

垂直跳びは、スポーツバイオメカニクスの分野で筋腱複合体の動態を計測する際によく使われる運動タスクである。これを模擬するために、弾性体を内蔵した直動アクチュエータモジュールを開発した。直列弾性体である筋端部の腱ではなく、主に筋および腱膜の弾性に注目した。そのため、弾性体をアクチュエータと並列に接続した。連続垂直跳びの実験より、空中期であらかじめ並列弾性体を引き延ばす予備動作を行なうことで、接地期に弾性エネルギーを利用できることを示した。また、接地期の衝撃を抑制するためには、直列弾性体が必要であることが示唆された。

ラケット競技における前腕の動きについては、振りとひねりがあり、これが同時に行なわれる。空気圧アクチュエータの並進の動きをワイヤを用いて振りとひねりの動きに変換した。アクチュエータの体積を駆動バルブの流量に合わせて最適化することで高速動作を実現した。開発したロボットアームの最大関節角速度は、人間の競技動作中の関節角速度と同等である。



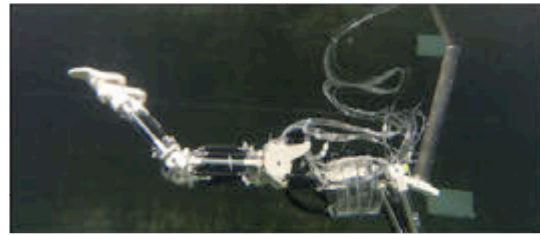
バドミントンラケットを持つ高速ロボットアーム

(4) 開発したコンポーネントを統合して、等身大の人体ファントムの開発を行った。これまで、脚のみの小型試作機による垂直跳びや、腕のみの試作機による素早い腕の振りを実現してきた。全身の統合に向けて、体幹について新規に開発を行った。

ヒトの体幹には、股関節を駆動する筋を多数収納する骨盤や、屈曲動作が可能な脊柱が含まれる。コンパクトな骨盤に、股関節の大きな動きを可能にするだけの人工筋肉を配置する必要がある。一方で、脊柱は短い骨をまたがる形で比較的長い人工筋肉を配置できる。そこで、ストロークの異なる2種類の人工筋肉を開発した。大ストロークの人工筋肉によって股関節を駆動する筋肉を、骨盤長におさめることができた。

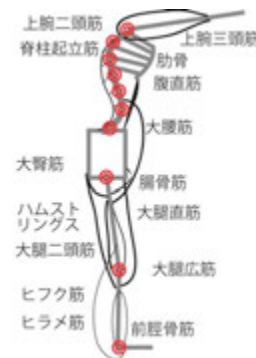
人体ファントムの全身スポーツ運動タスクとしては水泳を選択した。船舶用の試験水槽を用いて、競泳で使われるドルフィンキック動作を水中で実行し、各部の姿勢と推力を計測した。基礎実験より、各関節はヒトに近い関節可動範囲を実現できることが示された。水中実験では、ヒトの水泳中の筋指令に基づく運動指令を用いて、推力を発揮するこ

とができたが、関節運動のプロファイルは人間とは異なっていた。流体力と、筋骨格系に特有のコンプライアンスに起因する偏差と考えられる。



全身筋骨格人体ファントム

(上：水泳運動、下：3D CAD モデル)



全身筋骨格人体ファントムの筋肉配置

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4件)

- ① Shotaro Mori, Kazutoshi Tanaka, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, High-speed and Lightweight Humanoid Robot Arm for a Skillful Badminton Robot”, IEEE Robotics and Automation Letters, Vol.3, No.3, pp.1727-1734, 2018.
- ② Xi Chen, Satoshi Nishikawa, Kazutoshi Tanaka, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, “Bilateral Teleoperation System for a Musculoskeletal Robot Arm using a Musculoskeletal Exoskeleton,” In Proc IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO), pp.2734-2739, Macau, China, Dec. 2017.
- ③ Kenichi Fujita, Syogo Yonekura, Satoshi Nishikawa, Ryuma Niiyama, Yasuo Kuniyoshi, “Environmental and Structural Effects on Physical

Reservoir Computing with Tensegrity,”
In Proc. 5th IIAE International
Conference on Intelligent Systems and
Image Processing (ICISIP), pp.197-204,
Waikiki, Hawaii, USA, Sep. 2017.

- ④ Ryuma Niiyama, Carine Rognon, Yasuo Kuniyoshi, “Printable Pneumatic Arti-cial Muscles for Anatomy-based Humanoid Robots,” In Proc. IEEE-RAS International Conference on Humanoid Robots (Humanoids), pp.401-406, Seoul, Korea, Nov. 2015.

[学会発表] (計 7 件)

- ① 田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 空気圧ヒト型ロボットによる生成モデルを用いた即応的な跳躍打撃動作の生成法, 第 35 回日本ロボット学会学術講演会, 2L1-02, 2017
- ② 藤田健一, 米倉将吾, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 身体構造のダイナミクスを利用した Reservoir Computing に関する研究, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (Robomech2017), 1P2-N11, 福島, 5 月 11 日, 2017.
- ③ 長晴紀, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 回転跳躍ロコモーションを行なうハンドスプリングロボットの制御, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (Robomech2017), 1P1-B11, 福島, 5 月 11 日, 2017.
- ④ 田中一敏, 西川鋭, Xi Chen, 新山龍馬, 國吉康夫: 跳躍打撃動作を行う構造一体型空気圧ケーブルシリンドラロボットの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (Robomech2017), 2A2-E03, 福島, 5 月 12 日, 2017.
- ⑤ 森翔太郎, 田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: バドミントンのための高加速・高速な手首を有する人型ロボットアームの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017 (Robomech2017), 2A2-E04, 福島, 5 月 12 日, 2017.
- ⑥ 陳熙, 田中一敏, 西川鋭, 新山龍馬, 國吉康夫: 筋骨格ロボットの運動学習のための Human-in-the-loop 教師あり学習システム, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), pp. 2433-2438, 2016.
- ⑦ 臼井喜紀, 新山龍馬, 國吉康夫: やわらかい表情ロボットのための変形する口の開発, 第 17 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 (SI2016), pp. 0746-0751, 2016.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

新山龍馬 (NIIYAMA, Ryuma)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・講師

研究者番号 : 00734592