

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2014～2016

課題番号：26700025

研究課題名(和文) 筋骨格ロボットアームにおけるヒト型反射回路の実現と機能解明

研究課題名(英文) Constructive Approach for Developing a Musculoskeletal Robot Arm with Spinal Reflexes

研究代表者

池本 周平 (Shuhei, Ikemoto)

大阪大学・基礎工学研究科・助教

研究者番号：00588353

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、自己受容器に相当するセンサを備えた筋骨格ロボットアームによるヒトの運動の適応性の構成論的解明と応用を目標とした。そのため、ヒトの肩複合体の機能を高い耐久性・信頼性を持って再現できる剛体リンク機構を提案したほか、ロボットを駆動する多数の空気圧人工筋に取り付け可能な小型の固有受容器センサを開発し、ヒトの上肢の筋骨格構造、および特徴的な受容器の応答の両方を再現した筋骨格ロボットアームを新たに開発した。それをを用い、機械的拘束下における柔軟な筋骨格ロボットアームの利点を確認したほか、そのようなロボットの運動生成に有用な直接教示手法の提案などを行った。

研究成果の概要(英文)：This study aimed to constructively investigate and exploit adaptability of human motor control by using a musculoskeletal robot arm with embedded sensors corresponding to proprioceptive organs. To this end, we proposed the shoulder complex linkage mechanism, which can provide the same mechanical constraints with that of a scapula, and developed a compact sensor system, which can generate the same responses with a muscle spindle and a tendon spindle, for the new musculoskeletal robot arm driven by pneumatic artificial muscles. By using the new musculoskeletal robot arm, we confirmed that the flexibility of the musculoskeletal system has advantages for tasks under mechanical constraints of the environment. In addition, we proposed a direct teaching method specialized for robots driven by pneumatic artificial muscles that is applicable even for the very complex musculoskeletal robot arm.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：筋骨格ロボット 空気圧人工筋 固有受容器 生物規範

1. 研究開始当初の背景

ヒトは、非常に複雑で冗長な筋骨格系を持ち、その複雑性や冗長性を上手く管理・利用することで高度に洗練された運動を実現している。これまで、ヒトが非常に複雑な筋骨格系を持つ理由、その複雑性を上手く制御して利点へと変える方法を解明するため、ヒトの筋骨格を模したロボットを開発するアプローチが採られてきた。

研究開始当初、筋骨格系における筋の柔軟性や多関節筋の存在については、その工学的な利点が構成論的に明らかになりつつあった。しかし、非常に複雑で冗長な筋骨格系を、ヒトはいかに管理・利用しているのかという重大な問いについては、現在も十分な工学的説明が存在しない。ヒトに見られる様々な反射は、それを説明するメカニズムの一つと考えられているが、反射として観察される振る舞い自体は、ヒトの複雑な筋骨格系と、脊髄を中枢とする神経回路の相互作用によって生み出された結果にすぎない。すなわち、反射として観察される振る舞いではなく、その相互作用そのものに注目しなければ、複雑な筋骨格系の中で働く反射の本質的なメカニズムを解明することはできない。そのため、筋に存在する自己受容器、脊髄を中枢とする神経回路、筋骨格系の機械的構造の全てを模した筋骨格ロボットアームを開発し、反射の振る舞いではなく、その生成に関わる相互作用そのものに注目することこそ、当該研究分野が進むべき次のステップであると考えた。

2. 研究の目的

本研究では、筋骨格系の機械的構造、筋紡錘やゴルジ腱器官といった自己受容器の応答特性、脊髄を中枢とする神経回路を模した信号処理のそれぞれを工学的に実現することで、反射を生み出す相互作用そのものを模倣した筋骨格ロボットアームを開発し、ヒト上肢の筋骨格系が有する適応性の構成論的解明とロボティクスへの応用を目指す。

この目標を達成するためには、ヒトの筋骨格を模した構造を持ち、実験に供するに十分な耐久性・信頼性を備えた筋骨格ロボットアームを実現する必要がある。具体的には、ヒトの上肢の筋骨格構造の中で特に複雑な肩・肩甲骨周りの構造の実現が難しい。そこで、筋骨格ロボットアームの機械的構造に関する課題として、ヒトの肩複合体の持つ機能を再現できる機構の開発を行う。

脊髄を中枢とする神経回路を模した信号処理による制御を実現するためには、ヒトの固有受容器の特性を模したセンサを開発する必要がある。特に筋紡錘は、伸張反射などの代表的な反射を筋骨格ロボットアームに持たせる上で、非常に重要な役割を持つ。そこで、センサに関する課題として、人工筋紡錘センサの開発を行う。また、人工ゴルジ腱器官センサとして利用可能な小型のロードセルの開発も行う。

上記の機械的構造に関する課題、およびセンサに関する課題の両方を達成することで、初めに挙げた「筋骨格系の機械的構造、筋紡錘やゴルジ腱器官といった自己受容器の応答特性、脊髄を中枢とする神経回路を模した信号処理のそれぞれを工学的に実現することで、反射を生み出す相互作用そのものを模倣した筋骨格ロボットアーム」を開発することが可能になる。開発した筋骨格ロボットアームにヒトの脊髄を中枢とする神経回路を模した制御系を実装し、様々なタスクを行わせる中で、ヒトの筋骨格系と制御がもつ機能を構成論的に理解すると同時に、筋骨格ロボットの設計論を提案することを最終的な目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、自己受容器に相当するセンサを備えた筋骨格ロボットアームを開発することで、ヒト上肢の筋骨格系が有する適応性の構成論的解明とロボティクスへの応用を行う。前述の3つの課題について、以下のような方法で達成を目指した。

ヒトの肩複合体の持つ機能を再現するためには、複雑な肩甲骨の運動を再現することが求められる。ヒトの肩甲骨は、腕の骨格の基盤である一方、鎖骨で胸骨と繋がっている。また、肩甲骨は体幹に存在する筋肉に接触しながら動く。そのような拘束の結果、肩甲骨は3自由度に拘束されることが知られている。これまでも複数の研究で肩複合体を再現する機構が提案されてきたが、特に肩甲骨が体幹の筋肉の上を滑走する部分の工学的実現が難しく、筋骨格ロボットアームに用いるには、耐久性・安定性に乏しい。そこで、本研究では、体幹の筋肉の上を滑走するという実現方法を模倣するのではなく、代わりに剛体リンク機構によってそのような機能を再現することで耐久性・安定性に優れた筋骨格ロボットアームのための肩複合体を実現する方法を採った。

筋紡錘、ゴルジ腱器官に相当する人工受容器センサには、筋骨格ロボットアームを駆動する多数の空気圧人工筋のそれぞれに装着できるように、十分に小型であることが求められる。そこで、人工筋紡錘センサについては、空気圧人工筋の一端に取り付けることができる小型のボードに実装された磁気センサによって長さに関する情報を得て、同小型ボードに搭載されたMCUで筋紡錘が持つ動特性を数値計算で模擬するシステムを採用した。また、人工ゴルジ腱器官センサについては、耐久性に優れた簡便で小型のロードセルを開発した。

上記の方法によって開発された機構、センサを用い、空気圧人工筋で駆動される筋骨格ロボットアームを開発することで、本研究の中心的課題である筋骨格、および脊髄を中枢とする神経回路によって生まれる適応性の解明に取り組むアプローチを採った。

4. 研究成果

図1に本研究において開発した肩複合体リンク機構を示す。肩甲骨が体幹の筋肉の上を滑走する動きを再現するため、肩甲骨に相当するリンクを鎖骨に相当するリンクに加え、体幹の形状を楕円柱で近似し、2つの楕円コンパス(2つのスライダ上に回転軸で接続されたリンク:アルキメデスの楕円コンパス)を球体関節とスライダを介して体幹に相当するリンクに拘束する機構を提案した。これにより、肩甲骨に相当するリンクは、ヒトの肩甲骨が持つ、挙上・下制、内転・外転、上方・下方回旋の3自由度に相当する運動に拘束される。これにより、耐久性・安定性に優れた肩複合体を実現できた。また、ヒトの肩関節(上腕骨と肩甲骨の間の関節:GH関節)は、機構部品として一般的な球面関節に比べ、広い可動域を持つことから、回転自由な複数の爪によって球体を保持する広可動域の球面関節を新たに提案し、採用した。

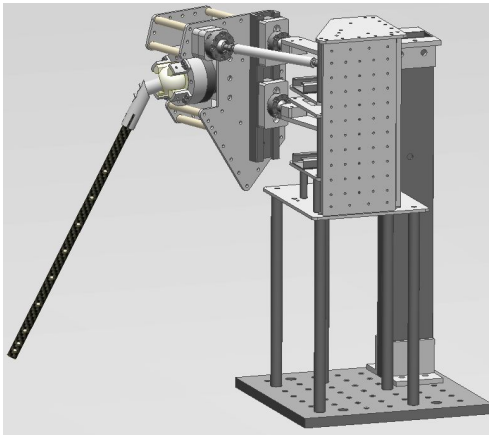


図1 肩複合体リンク機構

図2に本研究において開発した人工筋紡錘センサを示す。図の通り、空気圧人工筋を駆動するために必要になる空気配管を囲うように設置できる小型の磁気センサ読み取り・数値計算ボードを開発した。空気圧人工筋の端部には、非常に小さい磁石が貼り付けられており、長さが変化した際の端部の変形を計測し、MCUにおける数値計算により、筋紡錘の特徴的な時系列信号を生成できる。小型ロードセルについても、同ボードと同等の大きさのものを開発し、同ボードによって値を読み取ることができる。同ボードは中央の制御装置と高速に通信しており、リアルタイム制御において、その信号を利用できる。



図2 人工筋紡錘センサ

図3に、開発した機構、センサを利用して

開発した筋骨格ロボットアームを示す。各空気圧人工筋は、それぞれ流量制御弁によって空気の流入量を調節できる。各空気圧人工筋は、圧力センサも備えているため、中央の制御装置では、外部PCから送信された圧力目標値に応じて内圧を制御する圧力フィードバック制御が実行される。このロボットを用い、クランクを回すなどの柔軟性を活かした運動を実現し、その身体構造の利点を示した。また、このロボットに目標の動作を実行させるために有用な直接教示手法の提案も併せて行った。

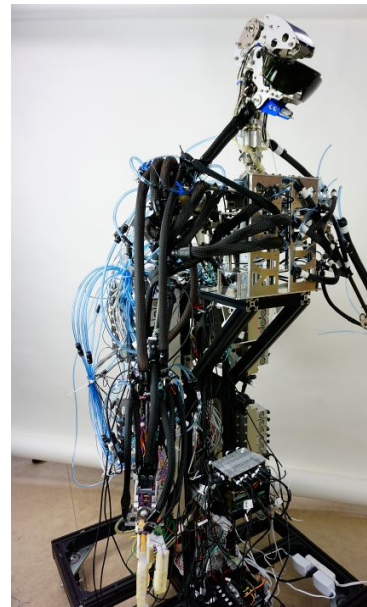


図3 筋骨格ロボットアーム

その他、生物を規範としてロボットの開発を行うことから、生物に特徴的なノイズの利用に関する研究も併せて行い、当該専門分野への成果報告を行った。

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 3 件)

[1] Shuhei Ikemoto, Fabio DallaLibera, and Koh Hosoda, "Noise-modulated Neural Networks as an Application of Stochastic Resonance", *Neurocomputing*, Accepted, 2017.

[2] Hirofumi Shin, Hajime Saito, Takahiko Kawakami, Satoshi Yamanishi, Shuhei Ikemoto, and Koh Hosoda, "Development of an embedded sensor system as pneumatic artificial muscle proprioceptors", *Artificial Life & Robotics*, Vol. 21(4), pp. 486-492, 2016.

[3] Shuhei Ikemoto, Yuya Kimoto, and Koh Hosoda, "Shoulder complex linkage mechanism for humanlike musculoskeletal

robot arms", Bioinspiration & Biomimetics, Vol. 10, pp. 066009, 2015.

〔学会発表〕(計 10 件)

[1] Shuhei Ikemoto, Fabio DallaLibera and Koh Hosoda, "Stochastic Resonance induced Continuous Activation Functions in a Neural Network consisting of Threshold Elements", International Joint Conference on Neural Networks, 2016.

[2] 河上貴彦, 進寛史, 山西賢, 池本周平, 細田耕, "生体の神経回路を模した空気圧人工筋用制御システムの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016年.

[3] 池本周平, 細田耕, "ヒトの指の構造を模した高把持力ロボットハンドの開発", 由良和也, ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016年.

[4] 池本周平, 森晋太郎, 細田耕, "ニューラルネットワークの解析的表現を用いたモデル予測制御", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2016年.

[5] Takuya Urino, Shuhei Ikemoto and Koh Hosoda, "Development of a Master-Slave Finger Exoskeleton driven by Pneumatic Artificial Muscles", Proceedings of International Conference on Intelligent Autonomous Systems, 2016.

[6] Shuhei Ikemoto, Yuya Kimoto and Koh Hosoda, "sEMG-based Posture Control of Shoulder Complex Linkage Mechanism", IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2015.

[7] 齋藤朔, 池本周平, 細田耕, "ヒトの指と手首の運動性を有する筋骨格ロボットアームの開発", 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年.

[8] 池本周平, 木本雄也, 細田耕, "ヒトの肩複合体の機能を再現するリンク構造", ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2015年.

[9] 瓜野琢也, 池本周平, 細田耕, "空気圧人工筋で駆動されるマスタ・スレーブ型手指外骨格の開発", 第59回システム制御情報学会研究発表講演会, 2015年

[10] Shuhei Ikemoto, Yuya Kimoto, Hajime Saito and Koh Hosoda, "Development of an Upper-Limb Linkage Mechanism for an Advanced Musculoskeletal Robot Arm", International Symposium on Adaptive Motion in Animals and Machines, 2015.

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
取得年月日:
国内外の別:

〔その他〕

ホームページ:

<http://www-arl.sys.es.osaka-u.ac.jp/ikemoto/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

池本 周平 (IKEMOTO, Shuhei)
大阪大学・大学院基礎工学研究科・助教
研究者番号: 00588353

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号:

(4) 研究協力者

()