

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 20 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560524

研究課題名(和文) ヒトの筋協調に着目した筋骨格5指ロボットハンドのシナジー制御

研究課題名(英文) Synergy control of a five-fingered musculoskeletal robot hand based on coordination of agonist-antagonist muscle

研究代表者

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)

信州大学・繊維学部・教授

研究者番号：20283731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：近年、医療・介護の分野でヒトと同じ環境で活動するロボットの駆動源として、高い安全性と柔軟性を兼ね備えた「空気圧アクチュエータ」が注目されている。本研究では、「ヒトの筋協調の仕方や生物の環境適応メカニズムをヒントに、ヒトの筋骨格構造を模倣した空気圧駆動5指ロボットハンドを制御する新しい手法(シナジー制御法)を確立すること」を目指し、4つの要素研究を実施した。(1)ヒトの筋骨格系の解剖学的構造に示唆を得た関節モデルの開発、(2)ヒトの物体把持における手指の姿勢と把持力の解析、(3)空気圧駆動ロボットハンド指先の角度・力センサレス化、(4)ゆらぎを用いたロボットハンド指先位置制御アルゴリズムの構築。

研究成果の概要(英文)：Robots that can coexist with people in medical and aging care industries must be safe and flexible because they work directly with humans. Pneumatic actuators are useful for achieving this goal because they are lightweight units with natural compliance. Our research focuses on human-like robotic joints fitted with pneumatic actuators to mimic the mechanism of the human musculoskeletal structure and bio-inspired control for a pneumatically driven five-fingered musculoskeletal robot hand, which has an antagonistic muscle pair for each joint. (1) We have investigated the validity of the proposed human-like joint model both theoretically and experimentally, (2) measured and statistically analyzed grasping posture and force distribution of the human hand, (3) developed a sensor-less joint angle / contact force estimation system, and finally (4) demonstrated a biologically inspired control algorithm by implementing the musculoskeletal robot hand.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学・制御工学

キーワード：筋骨格ロボット ロボットハンド バイオロボティクス バイオミメティクス センサレス化 生体ゆらぎ 筋シナジー 空気圧アクチュエータ

1. 研究開始当初の背景

近年、医療・介護の分野でヒトと同じ環境で活動するヒューマノイドロボットの進出が期待されている。このようなロボットはヒトに接触する作業が多くなるため、ロボットの駆動源として高い安全性と柔軟性を兼ね備えた空気の圧縮性によるコンプライアンスを持つ「空気圧ソフトアクチュエータ」が注目されている。我々は、空気圧ソフトアクチュエータを用いたヒューマノイドとして、低圧駆動マッキベン型空気圧アクチュエータを用いた5指ロボットハンドを取り上げ、各指を目標位置まで移動させるための制御手法の研究を進めてきた。特に、ヒトが拮抗筋群を協調させて運動することに着目し、屈筋と伸筋の「圧力比」を意味する「筋拮抗比」と、屈筋と伸筋の「圧力和」を意味する「筋活性度」という2つのパラメータを用いた筋骨格ロボットハンドの新しい関節角度制御法を2010年度までの研究において提案・実装・評価している[1][2]。

- [1] Y. Honda, F. Miyazaki, and A. Nishikawa. Angle control of pneumatically driven musculoskeletal model using antagonistic muscle ratio and antagonistic muscle activity. In Proc. of the 2010 IEEE Int. Conf. Robotics and Biomimetics, pp. 1722-1727.
- [2] Y. Honda, F. Miyazaki, and A. Nishikawa. Control of pneumatic five-fingered robot hand using antagonistic muscle ratio and antagonistic muscle activity. In Proc. of the third IEEE/RAS-EMBS Int. Conf. Biomedical Robotics and Biomechatronics, pp. 337-342.

2. 研究の目的

2010年度までに実施した研究成果・蓄積をベースにして、「ヒトの筋骨格構造（特に関節構造やアクチュエータ配置）を模倣したロボットハンドやロボットフィンガーを具体的な制御対象とし、ヒトの筋シナジーの生成の仕方や脳神経系の情報処理・情報伝達の仕組みなどをヒトに、複雑でモデル化が難しい多自由度筋骨格ロボットを制御する新しい手法（シナジー制御法）を確立すること」が本研究の最終目的である。

3. 研究の方法

本研究を短期間で効率良く実施するため、(1)~(4)に示す4つの要素研究に分けて、パラレルに実施する方式を採った。

- (1)【制御対象の設計とモデリング】ヒトの筋骨格系の解剖学的構造に示唆を得たロボットフィンガー（関節モデル）の開発ならびにそれを用いた筋協調の力学モデリング
- (2)【ヒト手指動作の計測と解析】データグローブ、磁気センサならびに面圧シートセンサを用いたヒトの物体把持における手指の

姿勢と把持力の解析

- (3)【制御入力生成のためのセンサ系構築】磁気センサを用いた空気圧駆動ロボットハンド指先の角度・力センサレス化
- (4)【シナジー制御アルゴリズムの開発】ゆらぎ（ノイズ）の数理解析ならびにゆらぎを用いた多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御アルゴリズムの構築

4. 研究成果

(1) 制御対象の設計とモデリング

転動関節モデルの構築

2011年度より、ヒトの筋協調に着目したシナジー制御法を考察するためのハードウェア基盤として、新たな筋骨格ロボットフィンガー（転動関節モデル）の構築を開始した。「転動関節モデル」は、ヒトの中手指節関節の構造を模倣して考案した関節モデルであり、主として、ヒトと同様、骨（中手骨リンクと基節骨リンク）、筋（屈筋アクチュエータと伸筋アクチュエータ）、腱（ワイヤ）から構成され、中手骨リンク頭が掌側に長軸をとる4分の1楕円形であり、半径一定の円である基節骨リンク底が中手骨リンク頭上を「滑らずに転がる」ように設計した関節モデルである。この新規設計・製作した転動関節モデルを用いて、筋協調と関節角度の関係を導く基礎実験を行った。その結果、転動関節モデルは、構造上、伸展側・屈曲側ともにヒトの中手指節関節の可動範囲に極めて近い挙動を示すこと、従来の回転対偶を有する回転関節モデルに比べ、アクチュエータの疲労や制御特性の点で優位性があることが示唆された。

転動関節改良型モデルの構築

2012年度より、関節部に「滑り」「転がり」の両方の要素を取り入れ、前年度までの屈曲・伸張の1自由度に加え「外転・内転」が可能で計2自由度を有する示指MP関節モデル（転動関節改良型モデル）の提案・構築を行った。新規設計・製作した転動関節モデルを用いて、筋協調と関節角度の関係を導く基礎実験を行った結果、屈曲・伸張運動のパフォーマンスは低下せず、ヒトと同程度の可動範囲の外転・内転運動を実現することに成功した。

筋協調の力学モデリング

2012-2013年度の2年間にわたって、初年度に構築した2本の空気圧アクチュエータで拮抗駆動する「転動関節モデル」の理論解析（筋協調の力学モデリング）を行い、実機の挙動との比較・評価を行った。転動関節モデルにおける筋拮抗比と関節角度の関係を理論的に導出し、その結果、転がり運動の本質的な挙動がシグモイド曲線で表現できることが明らかになった。一方、実機を用いた実験でも、両者の関係はS字曲線型として得られ、提案したモデル化手法により実機の本質的な挙動が説明可能であることを確認した。

(2) ヒト手指動作の計測と解析

手指の物体把持時の姿勢と把持力の解析

径の異なる数種類の円柱物体を対象とした複数の被験者の手指の物体把持時の「把持姿勢」と「把持力」を、前者についてはデータグローブと磁気センサ、後者については物体に巻きつけた面圧シートセンサを用いてそれぞれ計測し、計測結果に「主成分分析」を適用することによって、把持姿勢と把持力の構成要素を見出した。

把持物体上の異なる点の外力に対するヒトの適応メカニズムの考察

左右に質量の異なるおもりののせた1種類の（おもりのパターンとしては数種類の）円柱物体を複数の被験者に把持してもらい、上記と同様に面圧シートセンサを用いて各指が物体に作用する力の測定を行うことで、異なる重心物体の把持制御戦略の解析を行った。

これら2つの研究は2012年度より開始したが、いずれにおいても、2013年度末時点では、ヒトの把持の一般的な表現には至っておらず、今後は「独立成分分析」を利用し、被験者同士やロボットハンドとの差異に依存しないパラメータを見出す予定である。

(3) 磁気センサを用いた空気圧駆動ロボットハンド指先の角度・カセンサレス化（制御入力生成のためのセンサ系構築）

本研究も2012年度より開始した。従来多くのロボットハンドでは、手掌に配置した力・角度センサなどを用いて、物体との接触情報を取得してきた。しかし、センサそのものが非常に高価であり、物体との接触部にセンサが存在すると、接触や把持の衝撃でセンサが破損・断線する可能性がある。日常的・継続的に使用可能なロボットハンドを実現するためには、物体との接触部の「センサレス」化が必要である。

本研究では、空気圧アクチュエータが磁性を持たないことに着目し、ハンドの不動点（掌・手の甲）に取り付けた磁気センサと指先に配置した永久磁石を用いてロボットハンド「指先」の姿勢ならびに触覚のセンサレス化を実現し、関節角度・指先接触力をセンサレスで推定することに成功した。

ただし、2013年度末時点では、5指のうちの示指のみを模倣した空気圧駆動筋骨格3自由度関節モデルでの検証に留まっており、今後は5指ロボットハンドへの適用を進める。

(4) シナジー制御アルゴリズムの開発

生物が柔軟な動作を行うために利用している生体ゆらぎ（ノイズ）を模倣し、多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御を行うことを念頭に、以下の2つの研究を2013年度より並行実施した。

ノイズ項を含むFitzHugh-Nagumoモデルを線形化した神経伝達（ノイズの数理解析）

本研究では、単一のニューロンに含まれているノイズにどのような役割があるかを、すでにモデル化されているFitzHugh-Nagumoモデルを用いてノイズのない系とノイズを与えた系を不動点近傍において局所的に解析した。

ゆらぎを用いた多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御アルゴリズムの構築

ヒトの筋骨格構造を模倣して拮抗配置した4本の空気圧アクチュエータを備える3自由度ロボットフィンガー（示指モデル）を制御対象として、生体ゆらぎを模倣した新しいシナジー制御系を構築した。生物の持つ生体ゆらぎを反映した数理モデルとして「ゆらぎ方程式」が提案されているが、本研究では、オリジナルのゆらぎ方程式にいくつかの改良を加え制御系を設計した。さらに、解の忘却方法に特徴を持つ環境適応型アルゴリズムを構築した。提案手法を用いて、実際にロボットフィンガーの指先位置制御実験を行い、制御特性を確認した。

本研究においても、(3)と同様、2013年度末時点では、5指のうちの示指のみを用いた検証に留まっており、今後は5指ロボットハンドへの適用を早急に進める。

(5) 研究成果の総括と今後の展開

4つの要素研究毎には一定の成果が得られたが、今後はこれらをシステムとして統合する必要がある。すなわち、(1)の制御対象に(3)のセンサ系を組み込んだハードウェア基盤を再構築し、(2)で得られたヒトの把持制御戦略の知見を元に高次のコマンドを発行し、(4)で提案したソフトウェア基盤（シナジー制御法）を通して、「超多自由度筋骨格ロボットをゆらぎ制御する環境適応型システム」の構築を2014年度以降の研究で推進していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

Yuki Honda, Fumio Miyazaki, and Atsushi Nishikawa. Angle Control of a Pneumatically Driven Musculoskeletal Model based on Coordination of Agonist-Antagonist Muscle. 査読有. Journal of Mechanics Engineering and Automation, Vol. 2, No. 12, pp.709-719, 2012.

<http://www.davidpublishing.com/davidpublishing/Upfile/3/14/2013/2013031410576679.pdf>

〔学会発表〕(計13件)

井出翔一郎, 西川敦. ゆらぎを用いた多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御 適応的忘却システムを有するアトラクタ分布更新アルゴリズムの提案と評価. 日本機械学会ロボティク

ス・メカトロニクス講演会 2014, 2A1-J04, 2014年5月25日~29日, 富山市総合体育館.

井出翔一郎, 西川敦. ゆらぎを用いた多自由度5指ロボットハンドの指先位置制御. 2014年電子情報通信学会総合大会, ISS-SP-345, 2014年3月18日~21日, 新潟大学五十嵐キャンパス.

田村優典, 西川敦. ノイズ項を含むFitzHugh-Nagumoモデルを線形化した神経伝達に関する研究. 電子情報通信学会ニューロコンピューティング研究会, 信学技報, vol. 113, no. 500, NC2013-90, pp. 17-20, 2014年3月17日~18日, 玉川大学.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの中手指節関節の筋骨格構造に示唆を得た転動関節モデル. 第19回ロボティクスシンポジウム, 3A1, 2014年3月13日~14日, 有馬グランドホテル(兵庫県有馬市).

西澤恭平, 西川敦. 磁気センサを用いた空気圧駆動ロボットハンドの角度・力センサレス化. 日本機械学会北陸信越支部第51期総会・講演会, 706, 2014年3月8日, 富山県立大学.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの筋骨格系の解剖学的構造に示唆を得たフィンガロボットの開発 真円型転動関節モデルを用いた転がり運動の分析. 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2013, PR-3, 2013年9月20日, 信州大学工学部.

大谷勇太, パタキートッド, 西川敦. ヒトの物体把持を模倣した空気圧駆動5指ロボットハンドの制御 ヒトの物体把持の姿勢と把持力の解析. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2A2-F03, 2013年5月22日~25日, つくば国際会議場.

西村祥一郎, 西川敦. 人間の筋骨格構造を模倣した外転・内転機能を有する示指MP関節モデルの提案. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2A2-F02, 2013年5月22日~25日, つくば国際会議場.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの筋骨格系の解剖学的構造に示唆を得たフィンガロボットの開発 転動関節モデルにおける筋協調の力学と実機の評価. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2013, 2A2-F01, 2013年5月22日~25日, つくば国際会議場.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの中手指節関節の筋骨格構造に示唆を得た転動関節モデル 筋協調の力学モデリング. 電子情報通信学会ヒューマン情報処理研究会, 信学技報, vol. 112, no. 483, HIP2012-102, pp. 143-148, 2013年3月13日~14日, 沖縄産業支援センター. Keisuke Okuda, Todd Colin Pataky, and

Atsushi Nishikawa. Hand Pressure Changes Associated with Grasped Object Center of Gravity Changes. The 5th International Symposium on High-Tech Fiber Engineering for Young Researchers, March 3-9, 2013, Suzhou, China.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの筋骨格系の解剖学的構造に示唆を得たロボットフィンガーの開発 ヒトの中手指節関節を模倣した転動関節モデルの提案・評価. 計測自動制御学会中部支部シンポジウム 2012, PR-1, 2012年9月25日, 信州大学工学部.

遠藤有紗, 西川敦. ヒトの中手指節関節を模倣した関節モデルの提案. 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, IP1-T09, 2012年5月27日~29日, アクトシティ浜松.

〔その他〕

一般科学雑誌への掲載

生体ゆらぎを制御に活かす 人から学び、人と共存するロボットを作る(信州大学・西川敦教授), Newton 2012年6月号, 2012年4月26日発行.

Webサイトへの掲載

積水化学工業株式会社, 自然に学ぶ研究事例 第96回「生体に学ぶロボット開発」(信州大学・西川敦教授), 2012年7月17日. http://www.sekisui.co.jp/csr/contribution/bio_mimetics/1227709_1621.html

広報誌への掲載

なんとこちらもロボットの手!! / ロボットの動きを変える、人間と同じ動き方の医療・産業ロボット. 信大NOW 82号 スマートテキスタイルがもたらす快適な未来 pp. 5-8, 2013年7月29日発行.

http://www.shinshu-u.ac.jp/guidance/publication/summary/2013/shindaiNOW_vol82/index.html#page=7&rect=0_0_848_600&color=3394713&scaleIndex=0

ホームページ等

信州大学繊維学部 西川研究室ホームページ <http://bs.shinshu-u.ac.jp/nishikawa/>

スマートテキスタイルがもたらす快適な未来

<http://www.shinshu-u.ac.jp/special/research/2014/02/54477.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)

信州大学・繊維学部・教授

研究者番号: 20283731