

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420196

研究課題名(和文) 楕円型転がり接触関節を有する多自由度筋骨格ロボットフィンガー

研究課題名(英文) A multiple-degrees-of-freedom musculoskeletal robotic finger with elliptical rolling contact joints

研究代表者

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)

信州大学・学術研究院繊維学系・教授

研究者番号：20283731

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、ヒトの中手指節関節の形状と機構を模倣した「楕円型転がり接触関節を有する多自由度筋骨格ロボットフィンガー」を開発し、その制御手法を確立することにより、ヒトの身体運動メカニズムを理解することである。この目的を達成するため、本研究では次の4つの要素研究を段階的に実施した。(1) モーションキャプチャ・表面筋電図解析・機能的電気刺激を用いたヒト手指の運動解析、(2) アトラクタ選択(生体ゆらぎ)を用いた非対称拮抗駆動ロボットフィンガーの筋協調制御、(3) 絹糸による人工靭帯用筒編地の編成、(4) ナイロン繊維アクチュエータを用いた角度増幅型関節機構の設計。

研究成果の概要(英文)：The aim of this study is to develop a multiple-degrees-of-freedom musculoskeletal robotic finger with elliptical rolling contact joints imitating the shape and mechanism of the human metacarpophalangeal joints, to establish its control method, and then to understand human body motion mechanism. To accomplish this, we conducted the following four elemental studies: (1) human finger movement analysis using motion capture system/surface electromyography/functional electrical stimulation, (2) a muscle coordination control for an asymmetrically antagonistic-driven musculoskeletal robotic finger using attractor selection (biological fluctuation), (3) tubular knitted silk fiber fabric as ligaments for artificial finger joints, and (4) the design of a joint mechanism increasing the rotation angle for super-coiled polymer actuators.

研究分野：知能機械学・機械システム

キーワード：筋骨格ロボット ロボットハンド 生体ゆらぎ 筋拮抗比 筋シナジー 空気圧アクチュエータ ナイロン繊維アクチュエータ 角度増幅型関節機構

1. 研究開始当初の背景

ロボティクスは「ロボットを実現し利用するための方法論」であるが、同時に、我々人間や生体システムを理解するためのツールにもなり得る。人間の日常生活を可能にしている身体(特に手指)の機能は未だにその全体像がつかめていないが、ヒトのシミュレータとしてのロボットを通してその全体像に迫ることができる可能性がある。このような観点から、研究代表者は、2011年度～2013年度の3年間にわたって、ヒトの筋骨格構造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(生体ゆらぎ)などをヒントに、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ための新しい手法を確立することを旨とした研究を推進してきた(基盤研究(C): 課題番号 23560524, 「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」)。その結果、ソフトウェアならびにハードウェアの両面で以下の基盤的な研究成果が得られると同時に、特に、多自由度化という観点において、いくつかの本質的な課題も明らかになった。

(1) ソフトウェア面の成果[1]と課題: 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、実機を用いた指先位置制御実験を行い、制御特性を確認した。その結果、ヒトのような多自由度非対称拮抗駆動系においては、制御器の有する各パラメータ値のシステムティックな調整方法や目標状態に収束するまでの時間に課題が残る結果となった。

(2) ハードウェア面の成果[2]と課題: ヒトの中手指節関節の構造を模倣した「転動関節モデル」を考案、設計・製作し、筋協調と関節角度の関係を導く基礎実験を行った結果、同モデルは、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面で優位性があることがわかった。しかしながら、多自由度化の際には、アクチュエータ配置やその骨リンクへの取り付け方法(アクチュエータ自身の見直しを含む)や、転動する骨リンクを滑らかに接続する“靱帯”の実現方法などに課題があることも明らかになった。

[1] 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25～29日, 富山市総合体育館。

[2] 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13～14日, 有馬グランドホテル。

2. 研究の目的

2013年度までに実施した上述の研究成果・蓄積をベースにして、(1)ヒトの中手指節関節の形状と機構を模倣した「楕円型転がり接触関節を有する多自由度筋骨格ロボットフィンガー」を開発し、その制御手法を確立すること、ならびに、(2)その実現過程を通して、ヒトの身体運動メカニズムを構成論的に理解すること、が本研究の最終目的である。

3. 研究の方法

本研究を効率よく推進するために、2つのアプローチ: ヒト手指の運動解析の強化(ソフトウェア面の課題解決手段として)、ロボティクスと繊維・ファイバー工学技術の融合(ハードウェア面の課題解決手段として)を導入し、以下の3つの要素研究を段階的に実施した。

(1) ヒト手指の運動解析(2014～): モーションキャプチャシステム、筋電図解析、機能的電気刺激を用いて、様々な観点から、ヒト手指の運動解析実験を行い、ヒト手指の運動制御モデル(仮説)を総合的に構築する。

(2) 多自由度筋骨格ロボットフィンガーの筋協調制御(2015～): (1)の結果を踏まえ、「ヒト手指の筋協調に着目したゆらぎ制御器」を新たに設計・実装することで、ヒト手指の筋骨格構造を模倣した多自由度ロボットフィンガーのゆらぎ制御手法を確立する。

(3) ロボティクスと繊維・ファイバー工学技術を融合した筋骨格ロボットフィンガー用ハードウェア要素の設計・製作(2016～): 絹糸による人工靱帯用筒編地の編成、ならびに、ナイロン繊維アクチュエータを用いた角度増幅型転動関節機構を設計・製作、評価する。さらに、最終年度に、本研究の継続研究として科研費を新規申請することで、今後の展開を図る。

4. 研究成果

(1) ヒト手指の運動解析

楽器演奏におけるヒト手指の運動解析: 示指・中指・環指の三本指の屈伸運動が基本となるトランペット演奏に焦点を当て、楽器未経験者、アマチュアトランペット奏者、プロトランペット奏者各3名の計9名を対象に、モーションキャプチャシステムにより屈曲と伸展の繰り返し運動課題における手指の独立性を計測・評価した。その結果、プロトランペット奏者群にのみ運動周期による主効果が見られ、運動周期が速くなると指の独立性が低下することがわかった。すなわち、熟練度の高い演奏者はあえて手指を連動させる運動戦略を取ることを示唆する結果と

なった。本成果を 2015 年電子情報通信学会総合大会で発表した(学会発表)。

表面筋電図を用いた平衡点仮説に基づくヒト手指の運動解析: 拮抗駆動系の平衡点と剛性が中枢神経系によって制御されているとする「平衡点仮説」に基づいた表面筋電図解析がヒト肘・膝関節運動に対して実施されている。一方、手指の運動に貢献する筋群は前腕に密集しており、表面筋電図から対象筋の筋収縮(運動指令値)だけを適切に抽出することは困難であることから、ヒト手指関節運動の平衡点仮説に基づく解析は充分になされていない。本研究では、新生児用小型表面電極を駆使して、浅指屈筋と総指伸筋を対象筋とする表面筋電図解析を実施し、環指の運動解析に成功した。具体的には、一定周期の環指屈伸課題において筋拮抗比(拮抗筋ペアへの運動指令値の比)が関節角度にほぼ対応していること、屈曲・伸展の切り替え時に筋活性度(同運動指令値の和)が高くなることなどが明らかになった。本成果を国際会議 IEEE EMBC2016 で発表した(学会発表)。

機能的電気刺激による等尺性環境下でのヒト手指関節の平衡点制御: と同様に、ヒト手指の関節運動を司る拮抗筋群の協調性に着目し、拮抗筋群を電氣的に同時刺激した時のシステム(神経-筋系)の周波数特性を計測し、手指関節の制御モデルの同定を行った。具体的には、対象筋(拮抗筋ペア)を浅指屈筋と総指伸筋とし、示指の第3関節を拘束した等尺性環境下で、正弦波の電氣的筋拮抗比(拮抗筋ペアへの刺激電流値の比)を入力として機能的電気刺激を行い、出力される手先力を正弦波で近似することで、振幅、位相遅れ、中心値を求め、ボード線図を作成し、伝達関数の導出を行った。その結果、手指関節の制御モデルがむだ時間を含む二次遅れ系の伝達関数で表現できるという結果が得られた。本研究の初期の取り組みを 2015 年に発表し(学会発表)、最新の成果については、国際会議 IFESS2017 に採択され、2017 年7月の発表が確定している(学会発表)。

(2)多自由度筋骨格ロボットフィンガーの筋協調制御: (1)の成果を踏まえ、ヒト手指を模倣した「多関節筋を有する非対称拮抗駆動ロボットフィンガー」に対し、生体ゆらぎを模倣したゆらぎ制御手法を適用し、指先位置制御実験によりその制御特性を示すとともに、ロボットフィンガーの有する特徴に着目した2つのゆらぎ制御手法を新たに提案し、制御性能の向上を図った。具体的には、まず、座標探索シミュレーションを介してゆらぎ制御器の基礎設計を行い、制御器の有するパラメータ値の違いによる状態のさまざまな挙動を示した。次に、設計したゆらぎ制御器をロボットフィンガーの有する複数の空気圧アクチュエータに与える各圧力を探索対象とした「圧力探索型ゆらぎ制御器」として適用し、実装実験を行った。その際、指を伸

展させた状態から屈曲させる屈曲タスクと指を屈曲させた状態から伸展させる伸展タスクの2つのタスクを行った。その結果、各タスクで達成度に大きく違いがあることを示した。最後に、ロボットフィンガーの非対称なアクチュエータ配置を仮想的に対称配置にした「仮想拮抗筋構造」を提案するとともに、ロボットフィンガーの拮抗したアクチュエータの協調に着目し、「筋協調に着目したゆらぎ制御器」を設計し実装実験を行った。屈曲タスクと伸展タスクの2つのタスクを行った結果、それぞれのタスクを達成することができ、筋協調に着目したゆらぎ制御器とすることで様々なタスクへの適応性が向上することを示した。以上の研究成果は、1件の解説記事(雑誌論文)、2件の国内学会(学会発表)、1件の著書(図書)に部分的に公開されている。また、現在、原著論文を1件投稿中である。なお、本研究で開発したロボットハンドが Elsevier から出版された図書の表紙の写真に採用されていることを特筆すべき事項として付記する。

(3)ロボティクスと繊維・ファイバー工学技術を融合した筋骨格ロボットフィンガー用ハードウェア要素の設計・製作

絹糸による人工靭帯用縦スリット入り筒編地の編成: 接触部が楕円形状を有する示指の3自由度人工骨モデルを3Dプリンタで作成し、信州大学繊維学部にも所属する技術職員の協力のもと、人工骨同士をその可動部を阻害せず接続するための縦スリット入り筒編地を絹糸で作成した。本研究を通して、自動横編機(ホールガメント機)を用いた絹糸による人工靭帯用筒編地の設計・作製法を確立することができ、本成果を国際会議 ICBSB2016 で発表した(学会発表)。

ナイロン繊維アクチュエータのための角度増幅型関節機構: ナイロン繊維をコイル状にツイストした SCP(Super Coiled Polymer)アクチュエータを筋骨格ロボットフィンガー用のアクチュエータとして採用し、収縮率が低くかつ長さが短いナイロン繊維アクチュエータでも充分に関節を駆動させることが可能な新しい転がり接触関節機構を提案・実装した。具体的には、遊星歯車機構に示唆を得た角度増幅型関節機構を設計・作製し、短いナイロン繊維アクチュエータ(実験では4.7cm)でも大きな関節角度(平均85.5deg)が得られることを実証した。本成果を第22回ロボティクスシンポジウムで発表した(学会発表)。また、「能動マニピュレータ装置」と題して、特許出願も行った(後述の出願状況を参照)。さらに、本成果をもとに新規申請した科研費(2017-2019年度基盤研究(C): ナイロン繊維アクチュエータで駆動する転動関節機構に基づく多自由度マニピュレータ)が採択された。今後も継続して本研究を推進していく。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計1件)

西川敦, 生物と同じ動き方をするロボットの実現に貢献するスマートテキスタイル, MATERIAL STAGE, 15 巻 3 号, 68-72, 2015, 査読無

〔学会発表〕(計8件)

Kento Takemura, Mami Kurosawa, Keita Atsumi, Kazuhiro Matsui, Fumio Miyazaki, Atsushi Nishikawa, Frequency Domain System Identification of Human Finger Dynamics Using Functional Electrical Stimulation based on an Agonist-Antagonist Concept, IFESS 2017 (REHABWEEK 2017), 2017 Annual Conference of the International Functional Electrical Stimulation Society, July 17-21, 2017, London, UK.
井出翔一郎, 西川敦, ナイロン繊維アクチュエータのための角度増幅型関節機構の提案, 第 22 回ロボティクスシンポジウム, 1B1, 2017 年 3 月 15~16 日, 群馬県安中市磯部温泉「舌切雀のお宿」磯部ガーデン.

Hanaa Naouma, Atsushi Nishikawa, Akio Sakaguchi, Tubular Knitted Silk Fiber Fabric For Artificial Index Finger Joints, ICBSB2016, 2016 International Conference on Biomedical Signal and Bioinformatics, November 21-24, 2016, Auckland, New Zealand.

Mami Kurosawa, Atsushi Nishikawa, Analyzing Surface Electromyogram from Flexor Digitorum Superficialis and Extensor Digitorum Communis, EMBC2016, 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, August 16-20, 2016, Orlando, Florida, USA.

井出翔一郎, 西川敦, ゆらぎを用いた多関節筋を有する非対称拮抗駆動ロボットフィンガーの指先位置制御, 第 21 回ロボティクスシンポジウム, 4B3, 2016 年 3 月 17~18 日, 長崎県長崎市伊王島町やすらぎ伊王島.

Mami Kurosawa, Atsushi Nishikawa, The Control of Human Fingers by Using Functional Electrical Stimulation, The 7th International Symposium on High-Tech Fiber Engineering for Young Researcher, November, 2015, Suzhou, China.

田村優典, 西川敦, ゆらぎを用いたモデルベースアトラクタ選択アルゴリズムの提案, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, 2A1-N01, 2015 年 5 月 17~19 日, 京都市

勸業館「みやこめっせ」.

水越真梨, 西川敦, 楽器演奏におけるヒト手指の運動解析, 2015 年電子情報通信学会総合大会, ISS-SP-170, 2015 年 3 月 10~13 日, 立命館大学びわこ・くさつキャンパス.

〔図書〕(計1件)

Shoichiro Ide, Atsushi Nishikawa, Bio-inspired Control of a Multi-fingered Robot Hand with Musculoskeletal System, Elsevier, Smart Textiles and Their Applications, 1st Edition, 2016, pp185-195.

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 能動マニピュレータ装置
発明者: 井出翔一郎, 西川敦
権利者: 信州大学
種類: 特許
番号: 特願 2017-036078
出願年月日: 2017 年 2 月 28 日
国内外の別: 国内

〔その他〕

ホームページ等
信州大学繊維学部西川・岩本研究室(ヒューマンメディカルロボティクス)ホームページ
<http://nishika-iwamolab.whitesnow.jp/>

セミナーでの研究紹介

西川敦, ヒトに優しいロボットを支えるフルードアクチュエータ 水圧リニアアクチュエータから空気圧ソフトアクチュエータまで, 日本フルードパワーシステム学会平成 26 年度オータムセミナー「医療・福祉・介護分野でのフルードパワーを利用したロボティクス」, 2014 年 11 月 14 日, 機械振興会館, 東京.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

西川 敦 (NISHIKAWA, Atsushi)
信州大学・学術研究院繊維学系・教授
研究者番号: 20283731