

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 27 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26420198

研究課題名(和文)人の手の機能理解に基づいた多様な把持を可能とするロボットハンドの開発

研究課題名(英文) Development of robotic hand that can realize various grasps based on the understanding of human hand functions

研究代表者

横小路 泰義 (YOKOKOHJI, Yasuyoshi)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：30202394

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)：本研究は、人の手と同様に多様な把持と操作が可能な多指ハンドの実現を将来目標に据え、安易な人の手の外観の模倣ではなく、人の把持動作の詳細な観察や内在筋と外在筋を有する人の手の筋骨格構造の本質的理解に基づき、様々な形状の物体のピッキングが可能な二指ハンド機構を開発した。人のピッキング動作の観察から、重量物等の「つかみ」と小物の「つまみ」に加え、薄物の「すくい」が必要であることを見出した。開発したハンドは、この3つの把持様式を可能とする5節・4節複合リンク機構を有する2自由度示指と5節1自由度劣駆動の拇指から構成される二指ハンドである。

研究成果の概要(英文)：In this research, we aim at realizing a multi-fingered robotic hand that can realize various grasping and manipulation like a human and have developed a two-fingered robotic hand that can grasp objects with various shapes not from an easy mimicking of human hand appearance but based on the essential understanding of the musculoskeletal configuration of human hand. From the observation of the picking motion by a human, we found that "scooping" is required for thin objects as well as "enveloping grasp" for heavy objects and "pinching" for small objects. The developed hand is composed of a two-degree-of-freedom (DOF) index finger having a combined five- and four-link mechanism and a one-DOF thumb with an under-actuated five-link mechanism, that enable these three gripping modes.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボットハンド 筋骨格モデル ピッキング 劣駆動ハンド

1. 研究開始当初の背景

大脳の体性感覚野と運動野の部位別局在を表すホムンクルスからは、両感覚野において手の占める範囲が圧倒的に広いことは周知の通りであり、「手は外部の脳である」という神経生理学者の久保田競[1]の言葉にも手の機能の複雑さが込められている。

当然のことながら、この人間の手の機能を機械で実現する試みがロボティクスの創成期から始められ、数多くの多指型ロボットハンドが開発されてきた。しかしこれらのハンドは、人の手の外観のみを模倣したものが多く、結果として自由度が多く動作計画や制御が難しいだけで、人間に比肩する器用な動作を実現したものはほとんどない。

そもそも人の筋骨格構造(図1)を見ると、手指を駆動する筋肉には前腕部に存在する外在筋と手の内部に存在する内在筋とがあり、人の手はこれら2種の筋を使い分けることで「ぶら下がり」で自らの体重を支えられる程度の握力と壊れやすい小さな物体をつまんだり操ったりできる器用さとを兼ね備えた発生能力のレンジの広いデバイスであるといえる。

我々が日常生活の様々な場面でこの広い発生力のレンジを有効利用していることから明らかなように、ロボットハンドでも力強さと器用さの両立が必要とされるアプリケーションがある。例えば流通分野では倉庫管理から出庫までがほぼ自動化されているのに、小売店向け商品のピッキング作業は様々な形状の商品を把持する必要があることから人手に頼っており、これを自動化するためには数キログラム程度の重量物から数十グラムの壊れやすい小物までを扱うことが可能なロボットハンドが求められている。

以上のような背景のもと、申請者らは人の手の内部の筋骨格構造に着目し、人の手は外在筋による大きな把持力の発生機構をベースに、内在筋による指先姿勢の調節機構が付加されたものであると解釈するに至り、この原理によれば大きな把持力と器用な把持を同時に実現可能な真に実用的なロボットハンドが必要最小限のアクチュエータで実現可能であるとの着想に至った。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人の手と同様に多様な把持と操作が可能な多指ハンドの実現を将来目標に据え、安易な人の手の外観の模倣ではなく、人の把持動作の詳細な観察や人の手の筋骨格構造の運動学・静力学的解析による内在筋と外在筋および筋腱ネットワークの果たしている役割の本質的理解に基づき、重量物の包み込み把持と様々な形状の小物のピンチング把持を必要最小限のアクチュエータで可能とするような適用可能範囲の広い実用的な二指ハンド機構を開発することである。加えて、開発したハンドで様々な物体の把持を実際に実現することで、提案機構の有効性と人の手

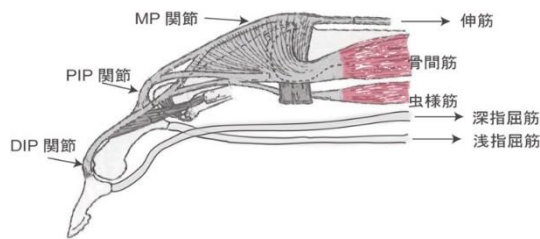


図1. ヒトの示指の筋骨格構造

の筋骨格構造がもつ機能の工学的理解の妥当性を検証し、さらには並列駆動機構や劣駆動機構による多様な把持と操作が可能な多指ハンド機構の設計論を確立することも目的とする。

3. 研究の方法

本研究は上記目的のため、以下のように研究を進める。

(1) 人の手の把持動作の計測と把持戦略の理解

人の手が様々な物体を把持する際の手の動きを現有のデータグループで計測し、様々な物体に対して人がどのような把持戦略を取っているのかを整理・理解する。

(2) 筋骨格モデルに基づく手の機能の運動学的解析

(1)で計測した把持動作を、図2に示すような人の手の筋骨格モデル[2]上で再現し、外在筋と内在筋および腱の分岐を持つ複雑な筋腱ネットワークが包み込み把持やピンチングにおいてどのような本質的役割を担っているのかを運動学的に明らかにする。

(3) 包み込み把持とピンチングが可能なロボットハンドの製作と把持実験

(2)で得られた成果に基づき、その原理を実証できる一番単純な機構として、包み込み把持とピンチングが可能な2本指ハンドを設計・製作する。包み込み把握とピンチング動作を最低限のアクチュエータで実現するための機構案として腱駆動機構が考えられるが、筋骨格構造の機能の理解をより深めてより良い機構案が見出されれば、それに基づき実際にハンドを製作する。流通部門でのピッキング作業を想定し、製作したハンドで実際に様々な物体が把持可能かを検証し、設計の妥当性と人の手の筋骨格構造がもつ機能の工学的理解の妥当性を検証する。

(4) ハンド設計論の確立と多指ハンドへの拡

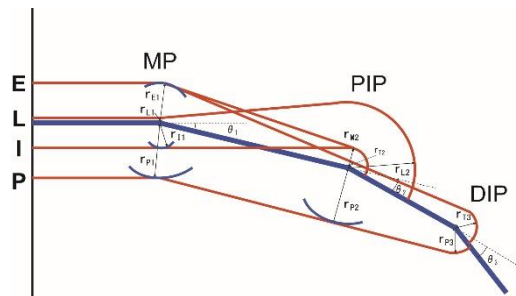


図2. 指の筋骨格モデル[2]



図3. 3つの把持様式

張

製作した2指ハンドで得られた知見から、外在筋による大きな把持力の発生機構をベースに内在筋による指先姿勢の調節機構が付加するという設計論を多指多自由度ハンドに拡張できるように一般化する。

(5) 研究のまとめ

最後に3年間の研究の結果をまとめ、その成果を発表する。

4. 研究成果

(1) 人の手の把持動作の計測と把持戦略の理解

様々な物体に対する人の把持戦略を整理・理解するために、Amazon Picking Challenge[3]で対象としている物体と同様のものを25種類用意し、人の把持戦略を観察するとともにデータグローブで動作を計測した。小さな物体に対する“つまみ”、比較的大きな物体に対する“つかみ”に加え、雑誌などの薄いものを持ち上げる際に、まず物体の一端を持ち上げ、指を物体の下に差し込んでから持ち上げる複合動作を行っていることが明らかとなり、これを“すくい”と呼ぶことにし、以上3つの動作がピッキングに際して必要な基本的な把持様式であることを見出した(図3)。

(2) 筋骨格モデルに基づく手の機能の運動学的解析

(1)で計測した把持動作を、図2に示す手の筋骨格モデル上で再現して手の各筋の伸縮度を計算した。その結果、各筋の伸縮の割合から“つまみ”、“つかみ”はそれぞれ2つのフェーズに、“すくい”は4つのフェーズに分けられ、それらのフェーズは以下の3つの要素動作で表現できることが分かった。図4にこれら3つの要素動作の概要を示す。

(i) 動作A

深指屈筋が最も大きく収縮し、伸長する筋

は変化量の大きいものから順に指伸筋、虫様筋となる動作である。この要素動作は“つまみ”のフェーズ1、“すくい”のフェーズ3に見られる。動作Aによって生じる示指の動きは、PIP 関節を動かさずに MCP 関節を屈曲させる動きである。

(ii) 動作B

深指屈筋が最も大きく収縮し、伸長する筋は変化量の大きいものから順に虫様筋、指伸筋となる動作である。この要素動作は“つまみ”のフェーズ2、“つかみ”のフェーズ1およびフェーズ2、“すくい”のフェーズ1で見られる。動作Bによって生じる示指の動きは、MCP 関節と PIP 関節をとともに屈曲させる動きである。

(iii) 動作C

“すくい”のフェーズ2とフェーズ4に見られる動作で、他の筋の変化に比べて指伸筋の変化が小さく、虫様筋が最も大きく変化する動作である。虫様筋が伸長しているときには骨間筋は伸長し、深指屈筋は収縮しており、虫様筋が収縮しているときには骨間筋は収縮し、深指屈筋は伸長している。指伸筋の変化量が微小であることから、指伸筋が固定されているとみなすと、“すくい”のフェーズ2とフェーズ4における筋長の変化は対称的であると言え、この要素動作にのみ C+と C-というように符号をつけることとする。動作C+によって生じる示指の動きは、MCP 関節が伸展して PIP 関節が屈曲する動きである。反対に、動作C-は、MCP 関節が屈曲して PIP 関節が伸展する動きである。

(3) 包み込み把持とピンチングが可能なロボットハンドの製作と把持実験

(2)で見出した要素動作A, B, C を実現することで、ピッキングに必要な3つの把持様式をロボットハンドで実現できる。すなわち、“つまみ”は、動作A→動作B、“つかみ”は動作B→動作B、“すくい”は、動作B→動作C+→動作A→動作C-へと変化させることにより実現できることが分かった。

筋の働きを再現する手法の1つとして、プーリーとワイヤによる腱駆動方式が挙げられる。腱駆動方式には動力源を指の外に置けるため指を小型化できるといった利点がある反面、蛇管との摩擦やワイヤのバネ特性などで

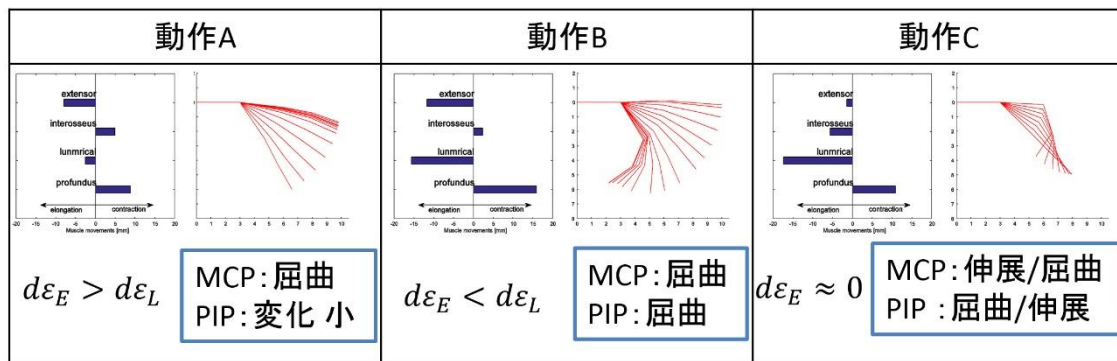


図4. 3つの要素動作と各要素動作における各筋の動き

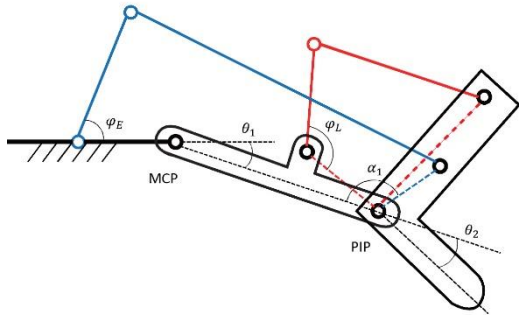
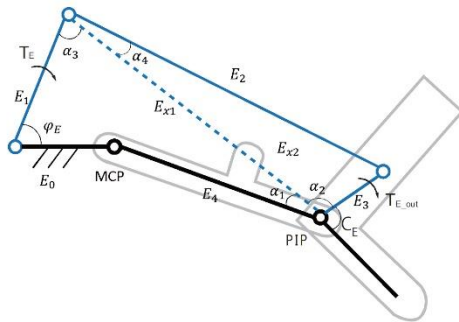
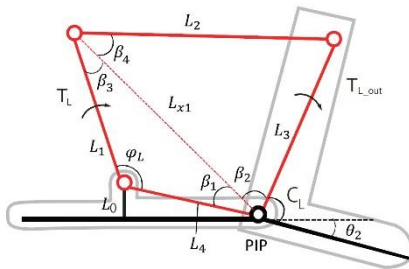


図5. 5節・4節複合リンク機構



(a) 5節リンク機構



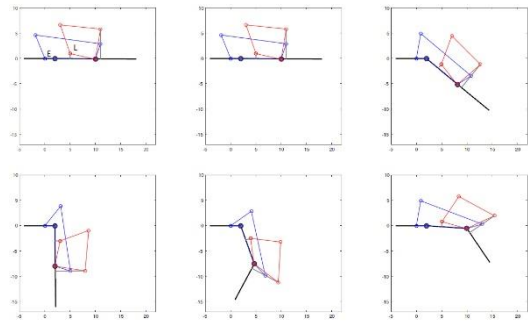
(b) 4節リンク機構

図6. 各リンク機構の詳細

動力伝達系が非線形性を持つといった問題や、ワイヤの力の伝達が単方向性であるためワイヤの取り回しなど構造が複雑になるといった問題がある。一方、リンク機構を用いる場合、機構によって指が大きくなりやすいという欠点があるものの、一般にワイヤに比べ剛性が高いため上述のワイヤ駆動の問題を回避できる。そこで本研究では、リンク機構を用いて上記3つの要素動作を再現することにした。

具体的には、図5に示すような5節リンクと4節リンクを組み合わせた機構により実現させる。すなわち、動作Aは図6(b)の4節リンクの φ_L を固定し、図6(a)の φ_E のみを動作させる動き、動作Bは図6(a)の φ_E と φ_L を連動させる動き、動作Cは図6(a)の φ_E を固定し、図6(b)の φ_L を動作させることでMCPを連動させる動きである。このとき5節リンクが外在筋の役割を、4節リンクが内在筋の役割を果たす。

この機構をモータで駆動させる場合、5節



動作A

動作B

動作C

図7. 要素動作のシミュレーション

リンクの駆動モータはベース部に配置して φ_E 軸を駆動するのが自然であるが、4節リンクを駆動するモータの配置は以下の2通りが考えられる。まず、モータを4節リンク上に配置して φ_L を直接駆動する場合、動作Aのために $d\varphi_L = 0$ とするには、モータを単純に固定すればよく、このときこのモータは虫様筋のような働きとなる。一方、モータをベース部に配置し、新たなリンクを介して φ_L 軸を駆動する場合、 $d\varphi_L = 0$ とするには5節リンクを駆動するモータと連動させる必要がある。しかし、逆にこのモータを固定するだけで動作Bが実現できるようになり、このときこのモータは骨間筋のような役割を持つ。

提案する5節・4節複合リンク機構は2つのモータを必要とするのでいわゆる劣駆動系[4]ではないが、大きな把持力が必要となる“つかみ”では4節リンクを駆動するモータをコンプライアンス制御し、5節リンクを劣駆動機構と同様に対象物になじませるようにすれば、5節リンクを駆動する φ_E 軸のみで対象物を把持することができるので、5節リンク側のモータのみを出力の大きなものにすればよく、虫様筋もしくは骨間筋の役割をする φ_L 軸のモータは出力の小さなもので良い。このように、提案した5節・4節複合リンク機構は、なじみ動作が可能となる従来の劣駆動リンク機構の性質を維持しつつ、付加的に小出力のモータを取り付けることで、“つかみ”だけでなく“つまみ”や“すくい”などの多彩

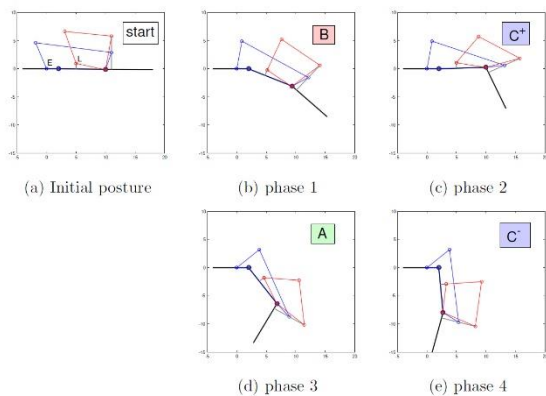


図8. “すくい”のシミュレーション

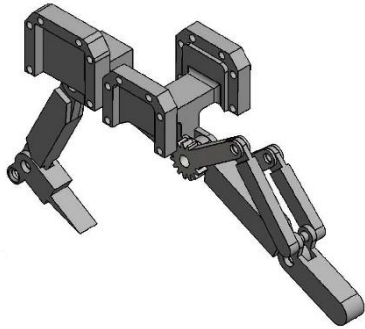


図 9. 試作ハンドの CAD モデル



図 10. 試作ハンドの概観

な把持様式を実現可能としており、人の手の外在筋と内在筋の機能の本質的理解により、リンク機構という腱駆動とは別の機構で実現したものであるといえる。

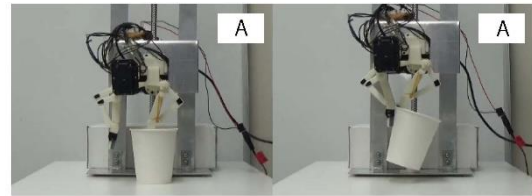
図 7 にこの 5 節・4 節複合リンク機構による 3 つの要素動作のシミュレーション結果を、図 8 に 3 つの把持様式の中でもっとも複雑な“すくい”のシミュレーション結果を示す。提案機構により、これらの動作が実現可能であることが分かる。

提案する 5 節・4 節複合リンク機構の基本的な設計が妥当であることが確かめられたので、この 5 節・4 節複合リンク機構を示指とし、通常の 5 節劣駆動リンク機構の拇指を持つ 2 指ロボットハンドを設計試作した。図 9 に CAD モデルを、図 10 に 3D プリンタで試作したハンドの外観を示す。また、試作したハンドのリンク機構の図 6 中の各パラメータを表 1 に示す。ハンドの指先はクロロプレングムスポンジをポリ塩化ビニルで覆った物とした。各指のモータは、韓国 robotis 社製の Dynamixel シリーズを採用することとし、示指側に RX-28 を、拇指側に MX-64AR を使用した。

試作したハンドによって“つまみ”、“つかみ”、“すくい”の 3 つの把持様式が実現可能かの検証実験を行った。図 11 に実験結果を

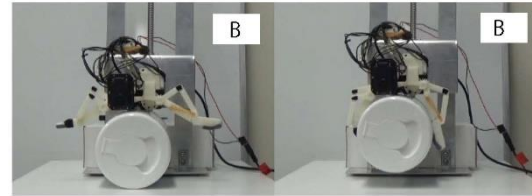
表 1. 各リンク機構のパラメータ

E_0 [mm]	E_1 [mm]	E_2 [mm]	E_3 [mm]	E_4 [mm]	C_E [deg]
0	35	45	10	60	100
L_0 [mm]	L_1 [mm]	L_2 [mm]	L_3 [mm]	L_4 [mm]	C_L [deg]
0	25	35	10	45	100



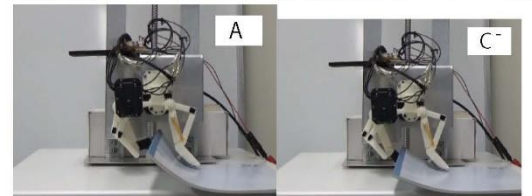
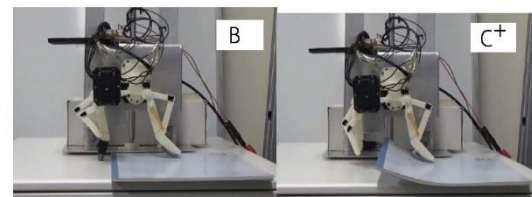
(a) Phase 1 (b) Phase 2

(a) つまみ



(a) Phase 1 (b) Phase 2

(b) つかみ



(c) すくい

図 11. 3 つの把持様式の確認実験

示す。提案した機構を持ったロボットハンドで基本動作 A, B, C を適切に組み合わせることで、3 つの把持様式がすべて可能であることが確認された。

(4) ハンド設計論の確立と多指ハンドへの拡張

製作した 2 指ハンドから、外在筋による大きな把持力の発生機構を基に内在筋による指先姿勢の調節機構を付加する 5 節・4 節複合リンク機構の設計論を確立することができた。この機構は、外在筋に相当する大出力モータ 1 つでなじみ動作により“つかみ”が可能となる従来の劣駆動ハンドの特徴を生かしつつ、内示筋に相当する小出力のモータを付加することで“つまみ”や“すくい”に必要な要素動作を実現可能としたものであり、人の指の筋骨格構造のもつ機能の本質的理解に基づくハンドの設計論として多指多自由度ハンドにも拡張可能な知見であるといえる。

<引用文献>

- ①久保田，“手と脳一脳の働きを高める手”，紀伊国屋書店，1982。
- ②J.N.A.Leijnse and J.J.Kalker，“A Two-

Dimensional Kinematic Model of the Lumbrical in the Human Finger”, J. Biomechanics, vol. 28, no. 3, pp. 237-249, 1995.

③

<https://www.amazonrobotics.com/#/roboticschallenge>

④ Lionel Birglen, Thierry Laliberte, Clement M. Gosselin: “Underactuated Robotic Hands”, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.

(2) 研究分担者
該当なし

(3) 連携研究者
該当なし

(4) 研究協力者
該当なし

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 0 件)

[学会発表] (計 5 件)

① 吉塚 充, 横小路 泰義, 人の手のピッキング動作の筋骨格モデルに基づく解析とロボットハンドによる実現の検討, 第 58 回自動制御連合講演会, 神戸大学六甲台第 2 キャンパス (工学部), 2015 年 11 月 14 日～15 日.

② 友近 圭太, 横小路 泰義, 拇指の関節構造を考慮した筋骨格モデルの構築, 第 60 階システム制御情報学会研究発表講演会, 京都テルサ, 2015 年 5 月 25 日～27 日.

③ 友近 圭太, 横小路 泰義, 指の正確な関節構造に基づく筋骨格モデルによる日常生活での筋長変化の評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2016, パシフィコ横浜展示ホール A, 2016 年 6 月 9 日～10 日.

④ 吉塚 充, 横小路 泰義, 人の手の筋骨格モデルに基づくピッキング用ハンドの設計, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会, 山形大学小白川キャンパス, 2016 年 9 月 7 日～9 日.

⑤ 高松 駿太, 横小路 泰義, 汎用ピッキングハンドに求められる機能を明確化するための既存ロボットハンドによる把持実験, 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, 札幌コンベンションセンター, 2016 年 12 月 15 日～17 日.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

横小路 泰義 (YOKOKOHJI, Yasuyoshi)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 30202394