

令和 4 年 5 月 23 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2021

課題番号：18K13724

研究課題名（和文）腱構造を用いた内骨格型力覚提示システムに関する研究

研究課題名（英文）Endoskeletal Force Feedback System Using Tendon Structure

研究代表者

白藤 翔平（Shirafuji, Shouhei）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・助教

研究者番号：80779330

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人の指の上に腱状の構造を配置し、これを駆動することで装着者の骨格をリンク系として直接駆動し、力覚を提示する手法を開発をおこなった。はじめに、指上に複数の腱を重ねて配置し、その上下面での相対的な位置変化を計測することで、ユーザの骨格形状に依存せず、正確な関節角度を取得する方法について提案した。次に、複数の腱状のベルトを異なる位置で左右に分岐させた構造を用いることで、関節それぞれに独立した力を提示することが可能になるよう、解析を通して構造を提案した。上記の技術の提案により、従来のリンク機構を用いた装置に比べ、非常にコンパクトな装置の実現するための基礎技術が完成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、近年応用の進んでいるVRに関する技術として、VR内で物を触った感覚を与えるのに重要な力覚提示を、装着が容易なグローブ型のウェアラブルデバイスとして実現するための基礎技術の開発をおこなった。ここで提案した腱状の構造の力覚提示装置とその制御に必要な技術の開発は、将来的によりVRシステムを現実近づけるための基礎技術として応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：In this study, we proposed a method of presenting a force perception by directly driving the user's skeleton as a link system by placing a tendon-like structure on the human finger and driving it. First, we proposed a method to measure the relative position changes of multiple tendons on the upper and lower surfaces of a finger to estimate accurate joint angles regardless of the shape of the user's skeleton. Next, we proposed a structure through analysis to make it possible to independently apply a force to each joint by using multiple tendon-like belts branched to the left and right at different positions. By proposing the above techniques, we have completed the basic technology to realize a device that is much more compact than the conventional device using a link mechanism.

研究分野：機構学

キーワード：力覚提示 関節角度計測 腱駆動機構 VR 内骨格システム

1. 研究開始当初の背景

ゲーム市場などをターゲットとしたヘッドマウントディスプレイ等が開発されたことにより、ヒトに VR を提示する技術が広く普及しつつある。この技術はゲームといった娯楽のみでなく、医療における遠隔での手術、仮想の身体の提示によるリハビリテーション、宇宙空間での遠隔マニピュレーションといった、幅広い分野に応用が期待されている。しかし、視覚に対するフィードバックの技術は格段に進歩した一方で、物の材質等を感じるための触覚、自身の身体に加わる力を感じるため力覚のフィードバックに関しては、未だ技術が追いついていない。触覚に関しては振動等を用いた比較的小型で実用的な装置が開発されつつあるが、力覚に関しては、リンク機構を用いて手先に力を加える装置が広く研究、開発されている。リンク機構を用いた装置はその性質上、大掛かりになり、装置が普及する障壁となっており、よりコンパクトで取り扱いやすい装置の開発が求められている。

2. 研究の目的

前述のような既存のリンク機構を用いた力覚フィードバック機構に対して、ヒトの手の構造を見てみると、各関節に力を伝達しているのは、筋肉につながった腱構造である。ヒトの手は大きな力を発生させることができる一方で、この腱構造は、全てが指の中に収まるほどコンパクトである。この機構を応用することで、コンパクトでありながら、複雑な力を各関節に伝達可能なヒトの腱構造を、力覚提示装置に応用できる可能性がある。

つまり、本研究の目的は、ヒトの腱に似た構造を用いて、装着者の手の関節を牽引することで指の各関節に力覚を提示する、非常にコンパクトな装置を実現することである。そのために必要なシステムと手順を明らかにするとともに、これに必要な技術の開発をおこなう。これによって、VR 空間上の物体を掴む、握る、操作する際に手のうける力覚が再現でき、かつ装着者の運動を阻害しない装置の実現を目指す。

3. 研究の方法

本研究で提案するような力覚提示装置を実現するには、下記のような問題を解決する必要がある。ここでの問題とは、(A) 手の各関節に力を提示するには、腱をどのように手の表面に配置すべきか、(B) 個人ごとに異なる手のパラメータをどのように同定するか、(C) 同定されたパラメータをもとにどのように制御をおこなうかである。特に (B) の問題は剛体リンク系を介さず、装着者の骨格に人工的な腱を通して直接働きかける提案手法特有の問題であり、この問題を解決することが本研究のポイントである。

(A) に関しては、手の各関節に力を提示するために有効な腱駆動機構の設計を考えることで解決する。本研究で提案する機構は、ロボット工学における腱（ワイヤ）駆動機構として考えることができる。ワイヤを通してロボットの各関節の力を独立に制御する場合には、関節と腱の変位の関係を表すヤコビ行列（腱ヤコビ行列）がランク落ちしないように設計する必要がある。しかし、ワイヤが同じ経路を通ってしまうと、このランク落ちが生じてしまう。そこで、複数の腱状のベルトを異なる位置で左右に分岐させた構造を用いることで、関節それぞれに独立した力を提示することが可能になる。

(B) に関しては、独自の装着者の関節角度の推定手法を提案し、関節と腱の間のモーメントアームの同定手法を提案する。関節と腱の変位との間の関係を記述するヤコビ行列は、腱（ワイヤ）と関節軸の間の距離（モーメントアーム）によって構成され、後述のように任意の力を関節に作用させるための逆運動学を解く際には必要不可欠である。通常のワイヤ駆動機構では、モーメントアームの大きさは一定であるが、提案機構では、これが関節角に依存して変化し、さらには、その大きさは個人に依存する。モーメントアームを同定するには、装着者の手が動いた際の関節角変化と腱の移動を同時に計測すればよいが、関節角は、装着者の関節軸の位置が不明な状況で推定しなければならない。しかし、従来の方法では正確な関節角を計測するのは困難である。そこで、同じ位置で重なった 2 枚の腱が、その厚みによって、関節角に比例して相対的な位置の変化を生じさせることを利用した、関節角の正確な計測方法を提案する。これを用いて、力覚を提示する前に、関節角度と腱の移動距離との間の関係を同定することで、装着者に特有の腱ヤコビ行列が導出できる。この情報が正確に取得できれば、事前に装着者の情報が無くとも、十分にシステムをモデル化することが可能である。最後に (C) に関しては、本研究では扱わないが、前述の方法で提案した腱駆動機構と、個人ごとに同定された非線形な腱ヤコビ行列の情報があれば、あとは純粋な制御の問題となる。既存の力覚フィードバックの手法を応用することで、本研究で提案する機構を制御することが可能であると考えられる。

4. 研究成果

本研究では、まず (B) の装着者の関節角度の推定手法の開発について取り組んだ。一般的な関節角度の計測装置は、モーションキャプチャなどの使用者の周りの環境にカメラ等を設置す

る手法と、曲げセンサなどを直接手指の周りを取り付ける手法に大きく分けられる。前者は、取り付けの煩雑さや、計測できる領域が限定されるなどの問題があり、後者は、センサの性質上、関節角度とセンサの出力を対応付けるキャリブレーションに伴う準備の煩雑さや、センサのズレに対する計測の不安定性、正確さの欠如といった問題があった。これに対して、本研究では、指の上に沿って配置した複数枚のシートの相対的な動きから関節角度を推定する手法を提案した。理論上、これらのシートの相対的な動きは、シート間の距離と関節角度のみに依存する。また、シート間の距離が一定であると仮定すると、関節角度とシートの相対的な移動との間には線形の関係がある、つまり、図1のようにシート間の距離が一定になるようにシートの厚みを調整することで、シート間の相対的な移動から関節角度を推定することができる。かつ、この関係はシートの厚みのみに依存するため、対象となる使用者の指の形状、つまり、関節の曲率等に依存せず、従来の手法のように個人ごとのキャリブレーションが不要である。そのため、前述のように腱駆動機構を用いた力覚提示装置の腱ヤコビ行列を計測により求める上で、非常に有効な手法である。また、手指上にはシートを配置するだけで良いので、本研究で提案するような腱駆動で力覚を提示する機構と相性が良く、手指に力覚を提示する腱の一つの上に直接、関節角度の計測装置を配置できることになる。この計測手法に関しては、実際に図2のように計測機構を指のモデル上に配置し、実際の関節角度と装置で推定された角度との間の比較をおこない、誤差が平均で1.7度程度であることを確かめた。これは、IMU等を用いた既存のキャリブレーションフリーな関節角度計測のウェアラブルデバイスと同等の精度である。また、シートの移動の計測精度を向上させる、またはシート素材の開発等により、さらなる精度の向上も期待できる。

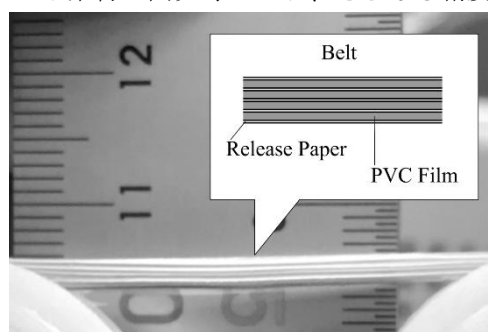


図1. 複数のシートを重ねて配置することで一定の間隔を持たせたシートのレイヤー構造

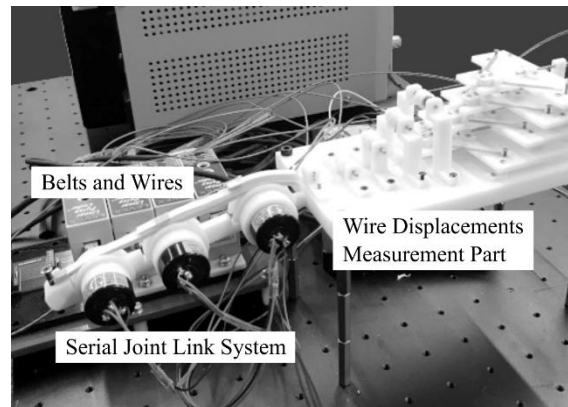


図2. 指のモデル上に配置した提案手法を用いた間接角度センサ

また、前述の関節角度の計測手法の開発のあと、(A)の手の各関節に力を提示するために有効な腱駆動機構の設計についても研究、開発をおこなった。前述のように、腱を通して指の各関節の力を独立に制御する場合には、関節と腱の変位の関係を表すヤコビ行列(腱ヤコビ行列)がリンク落ちしないように、腱の経路を注意深く設計する必要がある。ここでは、装置が簡易になるように3本の腱の駆動で指先に力覚をフィードバックするための機構を提案、開発した。運動を平面内に限定し、腱(ワイヤ)で関節を独立して駆動する場合には、腱が一方向にしか力を発揮できないことを考慮し、4本の腱を用意する必要がある。ただし、物を把持した際に押し返す力を再現することを想定し、指の運動を3本の腱でこの方向のみに力を提示できる設計を提案した。まず、指の屈曲伸展方向に力を伝えるため、腱は指先に固定し、その腱が途中で分岐させ、左右方向から同一のモータで駆動することで左右に均等に力をかける構造を採用した。また、この分岐により、腱が指の横を通ることで、3本の腱それぞれのモーメントアームの大きさを変化させることができ、結果として腱ヤコビ行列が指先に力を提示するのに適したものに設計をおこなうことができる。解析と実験を通して、最終的には、DIP関節より遠位で分岐する腱、PIP関節とDIP関節の間で分岐する腱、分岐せず指の上を沿ってモータまで到達する腱の3種類の腱からなる構造を提案した。図3に示すように実際にこの腱の構造をシリコンで作成した上で、

それぞれの腱の末端にモータをつなげた装置を試作した。そのうえで、この装置を指モデルに装着させ、指のモデルを動かした際の関節角を計測すると同時に、装置の腱の変位を計測することで、前述の腱ヤコビ行列を計測により求めた。この計測により求めた腱ヤコビ行列を用いて、実際にモデルの指先に一定の力をフィードバックするモータ制御をおこない、このときにかかる指先の力を指先に別に取り付けられたセンサを用いて計測することで、提案した装置で指先に目標の力をフィードバックできることを確かめた。



図 3. 指のモデル上に配置された腱を用いた力覚提示装置

このように本研究では、人の筋腱と骨格の関係のように腱を通して人の骨格に直接力をフィードバックすることを目指した。その実現に必要な、腱構造を提案するとともに、その腱にかかる力と関節トルクの間関係を表す装着者ごとに異なる腱ヤコビ行列を実際の計測により算出するためのセンサーシステムの提案、開発をおこなった。実際に人に取り付け、力覚フィードバック装置として使用できる装置の開発、検証までには至らなかったが、それに必要な基礎技術の提案と検証をおこなうことで、このような新しい技術の基盤を確立した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Shirafuji Shouhei, Ota Jun	4. 巻 129
2. 論文標題 Development of a robotic finger with a branching tendon mechanism and sensing based on the moment-equivalent point	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Robotics and Autonomous Systems	6. 最初と最後の頁 103538 ~ 103538
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.robot.2020.103538	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shirafuji Shouhei, Ota Jun	4. 巻 35
2. 論文標題 Kinematic Synthesis of a Serial Robotic Manipulator by Using Generalized Differential Inverse Kinematics	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Robotics	6. 最初と最後の頁 1047 ~ 1054
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TR0.2019.2907810	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小林 雅史, 白藤 翔平, 太田 順
2. 発表標題 糸の相対変位に基づく手指の3関節角度推定
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shouhei Shirafuji and Jun Ota
2. 発表標題 Force Sensing for Multi-Point Contact using a Constrained, Passive Joint Based on the Moment-Equivalent Point
3. 学会等名 The 15th International Conference on Intelligent Autonomous Systems (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今村 知美, 白藤 翔平, 太田 順
2. 発表標題 指先への力覚提示を目標とした腱駆動機構の提案
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関