

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02105

研究課題名（和文）指先の感覚・動作を妨げない指輪型指先力計測技術の確立

研究課題名（英文）Construction of ring-type fingertip force measurement technology without preventing fingertip sensation and movement

研究代表者

奥山 武志（Takeshi, Okuyama）

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40451538

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,300,000円

研究成果の概要（和文）：指先の感覚や動作へ影響を与えずに指先にかかる力を計測するために、指先にセンサを配置せずに指輪形状のセンサで、指の屈曲を担う腱の張力を計測する手法を開発した。まず、得られる計測値と指先にかかる力の関係に関する力学モデルを構築し、必要なパラメータを同定するとともに力学モデルに基づく関係式を導出し、指先力を推定できることを明らかにした。また、2つの指輪型センサを導入したうえで機械学習モデルを用いれば、センサで得られる計測値のみから指先力を推定できることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

開発した腱張力に着目した指輪型指先力センサは、指先にセンサを配置しないことが特徴であり、医療やリハビリテーション、スポーツ、芸術など様々な分野での手指動作の評価に有用な手法である。医療分野における手技の効果的なトレーニングや評価に活用することで、より安全で安心な医療環境の整備などに役に立つことが期待される。このセンサの計測原理に関する力学モデルが構築できたことは、センサの精度向上や設計のために不可欠な成果である。

研究成果の概要（英文）：To measure the force applied to the fingertip without affecting the sensation or movement of the fingertip, we developed a method to measure the tension of the tendon responsible for finger flexion using a ring-shaped sensor without placing a sensor on the fingertip. First, a mechanical model of the relationship between the measured values and the force applied to the fingertip was constructed. A relational equation based on the mechanical model was derived and some parameters in the equation were identified. And estimation experiments were conducted, and it was found that the fingertip force could be estimated by using the relational equation. Using a machine-learning model, we also showed that the fingertip force can be estimated from only the measured values obtained from the two ring-shaped sensors.

研究分野：生体医工学

キーワード：動作計測 力計測 指 腱 力学モデル センサ

1. 研究開始当初の背景

リハビリテーションやスポーツ工学の分野では、身体的負担の推定やトレーニング効果の評価など様々な場面でヒトの動作の定量的な評価が求められている。また、工業分野やエンターテインメント分野においても、ロボットとの協調作業における意図推定やジェスチャーによる直感的なユーザーインターフェイスなどのために動作計測が不可欠である。さらに、医療現場でも触診などの様々な手技においてヒトの手指の動作が重要な役割を担っており、医療従事者の手技の向上や技術認定のために、動作計測技術の進展が期待されている。これらの動作計測で注意すべき事項の1つが計測システムによる動作への影響を最小限にすることであり、さりげなく計測できることが求められている。従来の計測技術でも、視覚的に観察が可能な身体部位の位置情報については、非接触に拘束もほとんどなく計測できる技術が確立されてきている。一方で、力加減については、ひずみゲージ式のロードセルを物体に埋め込む方式や感圧インクなどの薄型センサを指先に取り付ける方式などが一般的であり、物体と指との間にセンサを配置することで手指の動作や感覚を阻害する手法しかないのが現状で、動作計測において最重要課題であり、革新的な計測手法が求められている。

そこで、指先の感覚を阻害しないように、指先から離れた位置で指先にかかる力(指先力)を計測するために、腱にかかる張力に着目し、指輪型センサを考案し、これまでにセンサ出力から指先力を推定することに成功している。この計測技術が確立できれば、手指の感覚を阻害せずに指先力を評価でき、リハビリテーションや精密な手技のトレーニングにおいて、感覚のフィードバックと力加減の定量化を両立できるだけでなく、力加減を入力信号として利用するウェアラブルな入力デバイスなどへも応用できる革新的な技術である。しかしながら、この計測技術はまだ確立されていない。例えば、指の姿勢の変化によってもセンサ出力が変化することが確認されているが、その影響については、実験値に合わせた関数で補正することでしか対応できていない。また、センサの突起を指にどれくらい押し込んだらよいのかを設計する理論的な根拠はなく、試行錯誤によって決定されている。これらの課題の根本は、本計測技術によって生じる力学現象を説明する力学モデルが構築できていないことである。本計測過程は腱と皮下組織から成る不均質な物体を押し込む現象であり単純な押し込み現象としてモデル化できない上、押し込み過程における皮下組織と腱の状態を観察することができていないことが問題点である。

2. 研究の目的

本研究では、腱張力から指先にかかる力を推定する指輪型センサについて、計測原理に基づく力学モデルを構築し、指先力を推定するための関係式を導出し、計測手法を確立することを目的とする。

3. 研究の方法

指輪型センサを用いて指先にかかる力を計測する時の力学現象を表す力学モデルとして、その力学現象を、センサ部、突起部、指部の3つに分けて、モデル化し、それらを融合して、センサ出力と指先力との関係式を導出した。また、指に対する押し込み試験を行うシステムを開発し、力学モデルに必要なパラメータを同定した。

また、指を伸展させた状態と屈曲させた姿勢での指先にかかる力の計測実験を行い、力学モデルを基に導出した関係式を用いてセンサ出力から推定した力と計測した力を比較した。

さらに、実用上を考慮して、力学モデルを用いずに、指輪型センサによって指先力を推定する方法として、中節骨上と基節骨上の2か所にセンサを配置し、それらの出力をリカレントニューラルネットワークのひとつである Bidirectional Long Short Term Memories(BiLSTM)モデルを用いて学習させ、指先力を推定する方法を考案した。考案した方法で推定した値を計測した値と比較した。

4. 研究成果

(1) 指に対する押し込み試験装置の開発[文献]

指輪型センサによって生じる力学現象を系統的に解析するために、指先にかかる力を計測しつつ、様々な屈曲・伸展状態の指に対して、センサ突起部と同様の形状の圧子で押し込み試験を行うことができるシステム(図1)を開発した。このシステムで計測した結果の一例を図2に示す。押し込み力と押し込み量の関係が得られることで、突起部で押し込まれた部位の弾性特性を同定することができた。これは、力学モデルに必要なパラメータである。また、この押し込み試験装置は、治具を変えることで、指輪型センサ自体の特性値の評価にも利用できる。突起部にかかる力とその時の押し込み量を得ることでセンサの弾性特性を同定することもできた。

指先へ圧子を押し込んだ状態で、指先にかかる力を変化させた時の圧子にかかる反力を計測することで、指輪型センサの突起部の指に対する初期押し込み量の設計指針を得るための重要なデータを得ることも可能である。

この成果は、指輪型センサによって生じる力学現象を系統的に解析する上で重要である。

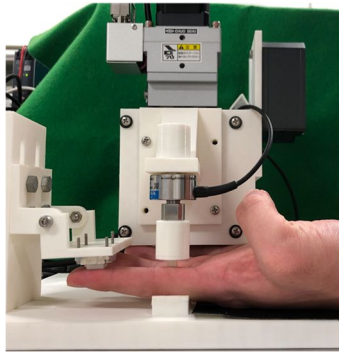


図1 指に対する押し込み試験の様子

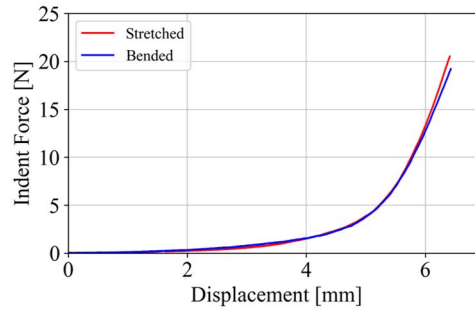
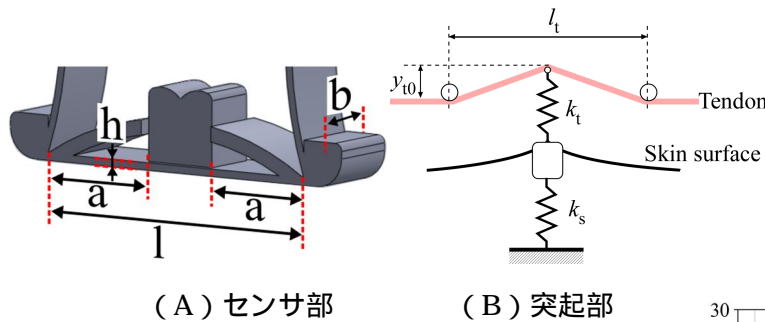
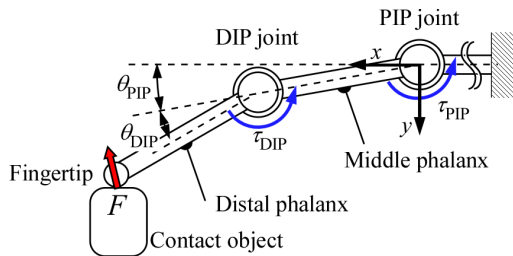


図2 押し込み試験結果の一例



(A) センサ部

(B) 突起部



(C) 指部

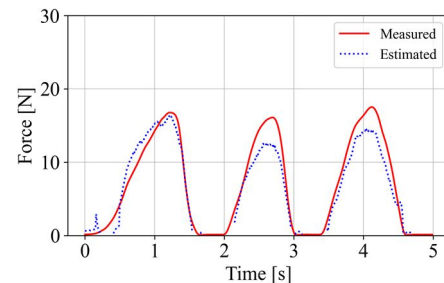


図4 力学モデルによる指先力の推定結果の一例[文献]

図3 指輪型センサに関する力学モデル[文献]

(2) 力学モデルの構築[文献]

指輪型センサによって生じる力学現象を表現する力学モデルをセンサ部、突起部、指部の3つに分けて構築した。まず、センサ部は指輪型センサの底面部(図3(A))に着目した力学モデルであり、突起にかかる力によりセンサ底面がたわむ現象を、両端固定梁に集中荷重が加わるとしてモデル化し、梁のひずみと突起にかかる力の関係を定式化した。次に、突起部では図3(B)に示すように皮膚表面から突起を押し込み、それにより腱が変位し、腱からの反力が突起部にかかるとして、腱を含めた皮下組織の弾性要素とセンサの両端固定梁部の弾性要素を導入し、変位と力のつり合いから、腱張力と突起にかかる力の関係を定式化した。最後に、指部については、図3(C)に示すように指を末節骨、中節骨、基節骨とその間の各関節から成る多関節リンク機構のマニピュレータとしてモデル化し、第1関節と第2関節の回転トルクをそれぞれ深指屈筋腱と浅指屈筋腱の張力によって決定すると仮定し、マニピュレータの運動学から指先にかかる力と各腱張力の関係を定式化した。さらに、基節骨上のセンサで計測される腱張力は深指屈筋腱と浅指屈筋腱の張力の合計であり、それぞれの割合は関節角度の関数とした。

これらを融合することで、指先にかかる力と指輪型センサ出力の関係式を導出できた。この関係式で必要となるパラメータを指に対する押し込み試験および指のMRI断層画像、深指屈筋と浅指屈筋の筋活動を参考に決定し、この導出した関係式の有効性を確認する検証実験を行った結果、伸展状態と屈曲状態のどちらの場合でも同じ関係式を用いて、指先力を推定できることが確認できた。

この成果は、指輪型センサの計測原理を理解する上で重要な成果であるとともに、センサの設計指針を確立する上でも重要な基盤となる成果である。

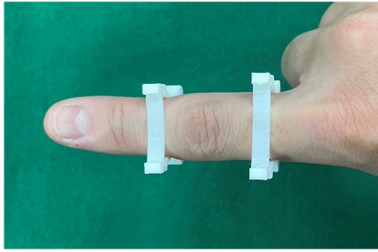


図5 中節骨および基節骨に装着する指輪型センサ

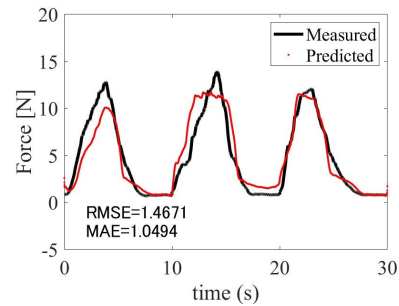


図6 BiLSTM モデルを用いた指先力の推定結果の一例（伸展姿勢）

（3）2つの指輪型センサから成る計測システム

従来方法では、深指屈筋と浅指屈筋の腱張力を独立に計測することができず、あらかじめ同定した関節角度に応じた割合でセンサ出力を分割する必要がある。そのため、指先力の推定にはセンサ出力以外に関節角度を取得する必要もある。この課題点に対して、これまでの基節骨上に装着するセンサに加えて、中節骨にも同様のセンサを装着する方法を考案した。センサを増やすことで、腱張力の変化挙動に関する情報を増やし、関節角度の取得なしでも指先力の推定ができる可能性があり、中節骨上のセンサでは主に末節骨の屈曲を担う深指屈筋腱の張力を反映した計測値が得られることを想定した。実験によって、中節骨上のセンサにおいても指先にかかる力に応じて計測値が得られ、指の姿勢によって出力挙動が変化することも確認された。

また、センサの装着位置によるセンサの機能性の評価を行った結果、中節骨上、基節骨上のセンサはどちらも第2関節に近い位置において、指先力に対する感度が高いことがわかり、これは適切な装着位置の指標を示す重要な成果である。

さらに、2つの指輪型センサから得られる計測値を用いた指先力の推定実験を行った結果、リカレントニューラルネットワークのひとつである BiLSTM モデルを用いて学習させることで、力学モデルに基づく関係式よりも小さな誤差で推定できることが確認された。この方法には関節角度を用いておらず、センサ出力のみを入力する方法であり、実用上の利便性が高く、今後の自然な動作計測に本手法を適用する上で重要な成果である。

<引用文献>

杉本 智基, 奥山 武志, 三田 正彬, 田中 真美, 指先力計測のための指屈筋腱への突起の押し込み現象の計測に関する研究, 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集, SEAD33-19, 53-54, (2021).

Takeshi. Okuyama, Tomoki Sugimoto and Mami Tanaka, Mechanical modeling of a ring-type fingertip force sensor, 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), 1710-1715, (2022).

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Okuyama Takeshi, Sugimoto Tomoki, Tanaka Mami	4. 巻 -
2. 論文標題 Mechanical modeling of a ring-type fingertip force sensor	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 2022 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/SMC53654.2022.9945291	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 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 杉本智基, 奥山武志, 田中 真美
2. 発表標題 指先力発揮時の表面筋電図を用いた浅指屈筋および深指屈筋の筋活動計測に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会IIP2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 杉本智基, 奥山武志, 三田正彬, 田中真美
2. 発表標題 指先力計測のための指屈筋への突起の押し込み現象の計測に関する研究
3. 学会等名 第33回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 奥山 武志, 三田正彬, 田中 真美
2. 発表標題 指先力計測用指輪型センサによる腱の押し込み現象の計測に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会2020年度年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 郷 初瑠, 林崎 俊賢, 奥山武志, 田中真美,
2. 発表標題 指輪型指先力センサの母指への適用に関する研究
3. 学会等名 第34回「電磁力関連のダイナミクス」シンポジウム講演論文集
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 千葉 祐輝, 鶴岡典子, 庄島正明, 奥山 武志, 田中 真美, 芳賀 洋一
2. 発表標題 血管モデルとセンサを用いた血管内検査・治療手技の定量化
3. 学会等名 生体医工学シンポジウム2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 郷 初瑠, 奥山 武志, 田中 真美
2. 発表標題 複数の指輪型センサを用いた指先力システムの開発に関する研究
3. 学会等名 第43回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 倉持 颯, 奥山 武志, 田中 真美
2. 発表標題 指輪型センサの装着位置変化による出力特性の評価に関する研究
3. 学会等名 日本機械学会第35回バイオエンジニアリング講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Okuyama Takeshi、Sugimoto Tomoki、Tanaka Mami
2. 発表標題 Mechanical modeling of a ring-type fingertip force sensor
3. 学会等名 IEEE SMC2022 (国際学会)
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
---------	---------