

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 23 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26630004

研究課題名(和文)筋腱張力推定による指先力計測手法の創出

研究課題名(英文)Fingertip force measurement by estimation of finger tendon tension

研究代表者

奥山 武志 (OKUYAMA, Takeshi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：40451538

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：手指のリハビリテーションにおいて状態を把握するための情報として、指の姿勢や動作の滑らかさだけでなく、指先の力も重要である。しかしながら、指先力を計測するために、指先にセンサを配置するとリハビリテーションにおいて重要な指先の感覚に影響を与えてしまう。そこで、本研究では指先の感覚を阻害することなく、指先力を推定する手法を構築することを目的とし、指先力と筋腱張力の関連性に着目し、腱に押し込み変位を与え、腱にかかる張力を計測する指輪型指先力センサを開発した。このセンサを用いて指先力を推定する手法を創出した。

研究成果の概要(英文)：In order to perform the rehabilitation of a finger effectively, it is important to measure finger force of patients without inhibiting the grip sensation and to give appropriate advice using the force data. Therefore, in this project, we focused on the relationship between the tension of tendon and finger force, and proposed a ring type sensor that can estimate the finger force from tension of tendon. Availability of the ring type sensor to estimate finger force was verified experimentally. In experiments, strain output of the ring type sensor was measured during finger force applying to load cell increased. As a result, it was found that strain output increase with increase of finger force. From the results of the experiment, it was confirmed that it is possible to estimate the finger force by using the proposed sensor.

研究分野：機械工学

キーワード：指 力計測 センサ 腱張力

1. 研究開始当初の背景

物体の把持動作、持ち上げ動作を行う際には、手指の姿勢、筋力、指先感覚の3つの要素が重要であり、どれかが失われるだけで精密な作業ができなくなってしまう。そのため、脳卒中などの疾患や事故によって手指が麻痺すると、麻痺の程度によっては自分で食事を取ることができなくなり、少しでも機能を回復させるためにリハビリテーションが行われる。近年、リハビリテーションにおいて、単純反復型トレーニングよりも課題指向型トレーニングの方が回復効果が高いことが報告されており、例えば水を飲むためにコップを把持し持ち上げ、口へ運ぶ動作をトレーニングとして行っている。ここで問題となるのが、トレーニング中の患者の動作の評価である。単純な反復動作と異なり動作が複雑なため、患者の能力を的確に捉え、適切なアドバイスをを行うためには、姿勢だけでなく、筋力も評価する必要がある。姿勢に関しては、目視やカメラによる評価が可能であるが、筋力に関しては、従来の筋力計では、把持中の発揮筋力を計測することはできない。また、グローブ式の力センサや爪に装着する力センサも開発されているが、手指の感覚を阻害してしまい、せっかく得られる把持感覚の患者へのフィードバックを弱めてしまう。効果的なリハビリテーションを行うために、患者の把持感覚を妨げずに指先の力を計測できる手法の開発が求められている。

2. 研究の目的

本研究では指先の感覚を阻害することなく、指先力を推定する手法を創出することを目的とし、指先力と筋腱張力の関連性に着目し、筋腱張力を計測することで指先力を推定するセンサを開発する。

3. 研究の方法

本研究では指先の感覚を阻害することなく、指先力を推定するために、指の筋腱張力を計測する原理を考案し、この計測原理の有効性を基礎実験により確認するとともに、計測原理を基に指輪センサ構造をセンサ出力特性から選定する。

センサ出力と指先力の関係を実験的に明らかにし、その関係を用いて指先力推定手法を考案し、その有効性を検証する。

指の姿勢によるセンサ出力への影響を評価するため、指の関節角度を計測するための関節角度センサを導入し、関節角度とセンサ出力の関係を明らかにし、関節角度の指先力推定への影響を評価し、補正する手法を考案し、その有効性を検証する。

4. 研究成果

(1) 筋腱張力の計測原理

指先に力を加えるためには、主に指を屈曲させるための浅指屈筋と深指屈筋が収縮し、それにつながる腱の張力が増加することが

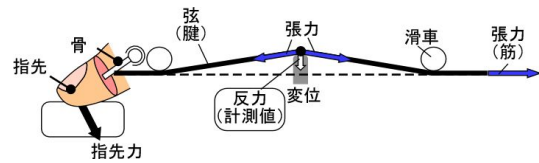


図1 筋腱張力の計測原理

ら、この腱の張力と指先力が関連することに着目する。この腱張力を計測する方法として、図1に示すように、腱を突起で押し込んだ状態で、その突起に加わる腱からの反力を計測する手法を考案した。この反力は筋腱張力の押し込み方向成分であると考えられる。

この計測原理では、腱に押し込み変位を負荷できる場所であれば、指の付け根であっても筋腱張力を推定できる。そこで、この計測原理を基に、指輪に突起を設けたセンサ構造を考案した。そのセンサ構造の設計項目として、筋腱張力の計測に適した突起の押し込み量を選定する必要がある。

そこで、図2に示す実験装置を製作し、指先力と突起にかかる力の関係性を評価した。実験では、指を実験装置に固定し、指先に配置したロードセルに対して、5N程度の力を負荷し、その時の突起にかかる力を計測した。突起の指への押し込み量は、1mm、2mm、3mm、4mm、5mmの5条件で計測を行った。

図3に突起の指への押し込み量を3mmにした時の指先力と突起にかかる反力の時間変化を示している。ここで、指先力の変化に応じて、突起にかかる反力も変化していることが分かる。押し込み量が3mmより小さい

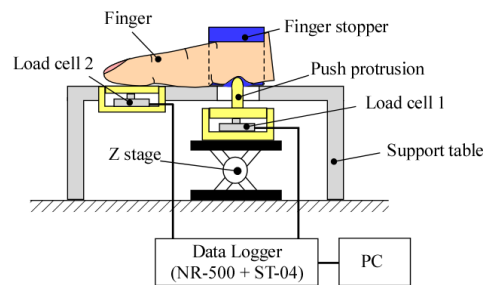


図2 押し込み量の影響評価実験装置

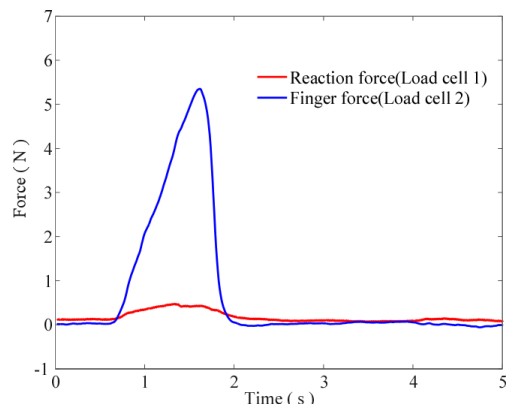


図3 突起の押し込み量3mmの結果

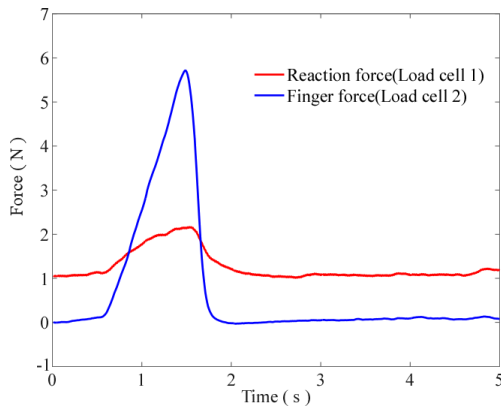
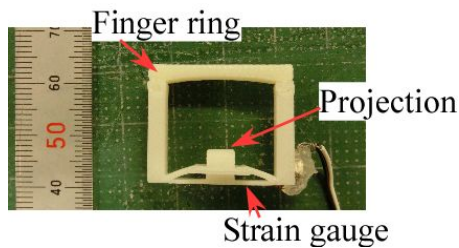


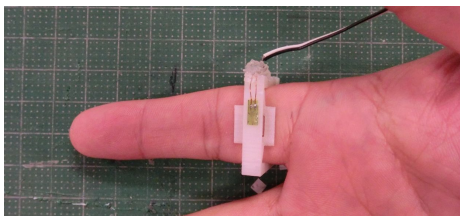
図4 突起の押し込み量 5mm の結果

場合には、突起にかかる反力の変化が非常に小さいことも分かった。一方、図4に示す押し込み量が 5mm の結果を見ると、指先力に対する突起にかかる反力の変化が押し込み量が 3mm の時よりも大きいことがわかる。計測原理からも分かるように、押し込み量が大きくなると、筋腱張力のうちの突起への反力成分が大きくなるためであると考えられ、突起の押し込み量が大きいほど、敏感に指先力を計測できると考えられる。しかしながら、実際には、5mm の押し込み量では、若干突起による押し込み部で痛みを感じることもあり、改良が必要であることがわかった。

そこで、突起による押し込みに加えて、指全体を押し込むことで、より大きく筋腱を押し込めるのではないかと考え、図5に示す構造を考案した。このセンサを指輪型指先力センサと呼ぶ。このセンサは、指腹側に突起と湾曲した曲面部が配置されるように指の付け根に装着する。湾曲した曲面で指を 2.5mm 押し込み、さらに突起で筋腱部を 3mm 押し込む構造となっている。突起にかかる反力は、突起を支える梁部の変形を取り付けたはず



(a) センサ構造



(b) 指に装着したセンサ

図5 指輪型指先力計測センサ

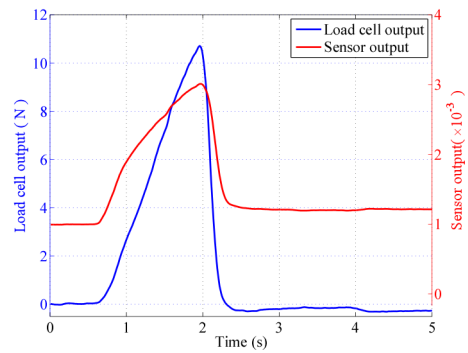


図6 指先力とセンサ出力の時間変化

みゲージで計測することで求めることができる。また湾曲部の中央には、穴が開いており、突起部と湾曲部は接触せず、突起部にかかる反力はすべて梁部で支える構造である。

指先力とセンサ出力（突起部にかかる反力）の関係を計測した。実験では、この指輪型指先力センサを人差し指に装着し、センサを装着した手の指を伸ばした状態で、指先でロードセルを 10N 程度まで押し込み、その時のロードセル出力とセンサ出力を計測した。

図6にロードセル出力（指先力）と指輪型指先力センサの出力（突起にかかる反力）の時間変化を示す。ただし、センサ出力は装着前にゼロとなるように調整した。この結果を図5の結果と同様の結果が得られており、指先力の変化に応じたセンサ出力が得られていることが確認できた。また、このセンサでは、装着による痛みは感じることはなかった。

これらの結果から、湾曲部と突起部を組み合わせたセンサ構造が指先力推定のための筋腱張力の計測に有効であることを明らかにすることができた。

(2) 指先力とセンサ出力の関係の定式化

次に、指輪型指先力センサの出力から、指先力を推定するために、指先力とセンサ出力の関係を定式化した。

図6の実験と同様にセンサを装着し、指を伸ばした状態で、10N まで指先力を増加させる実験を 5 回行い、図7に示す指先力とセンサ出力（梁部のひずみ）の関係を得た。

指先力の増加に伴ってセンサ出力（ひずみ）も増加することがわかり、指先力が大き

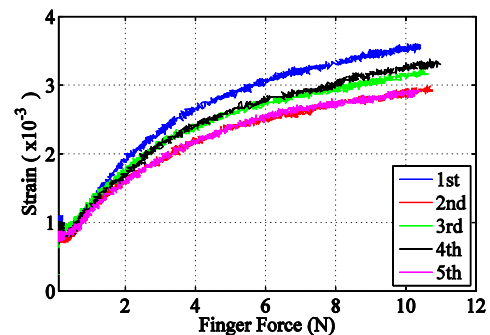


図7 指先力とセンサ出力の関係

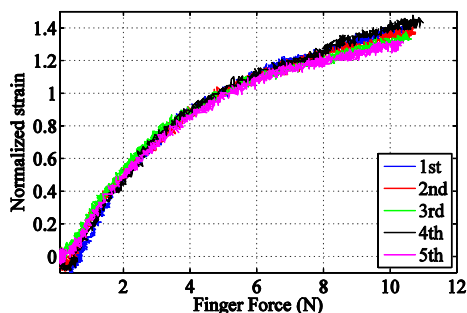


図8 正規化したセンサ出力と指先力の関係

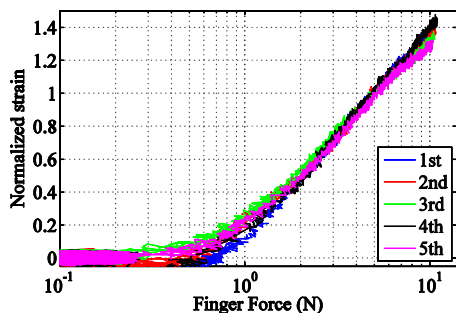


図9 片対数表示したセンサ出力と指先力の関係

くなると、センサ出力の変化が小さくなる傾向がすべての試行で確認された。これは指先力が大きくなり筋腱張力が増加することで、センサの突起部が押し返され、結果的に押し押し込み量が減少したのではないかと考えられる。

また、5試行の結果を比較すると、同一の指先力に対しても試行間でセンサ出力に差異が確認された。これは、試行ごとにセンサの着脱を行っており、センサの装着状態が異なることによる影響が大きいと考えられる。

そこで、試行毎にセンサを装着した状態のセンサ出力がゼロになるようにオフセットし、さらに、指先力5Nのときのセンサ出力で全体を除いて正規化を行った結果を図8に示す。これらの結果から、試行ごとの差異がなくなり、よく一致したセンサ出力と指先力の関係を得ることができた。また、この結果を見ると、指先力の変化に対してセンサ出力は対数的な変化を示していることから、指先力を片対数で表した結果を図9に示す。

この結果を見ると、指先力が1.0N以上では、指先力の対数とセンサ出力が比例関係にあることが分かる。また、図8の結果から指先力が1.0N以下では、指先力とセンサ出力が比例関係であることがわかり、それぞれの区間に分けて定式化することを考えた。

1.0N以下を線形区間、1.0N以上を対数区間として、それぞれの区間でセンサ出力と指先力の関係を次式のように定式化した。

$$S_N = aF \quad (F < 1.0) \quad (1)$$

$$S_N = b \log F + a \quad (F > 1.0) \quad (2)$$

$$S_N = \frac{s}{s_5} \quad (3)$$

ここで、 S_N は正規化した後のひずみ、 F は指先力、 s はセンサ出力、 s_5 は指先力が5Nの時のセンサ出力である。ただし、センサ出力は指先力0Nでのセンサ出力がゼロとなるようにオフセットした値である。 a, b はセンサの装着状態に依存しないセンサの特性パラメータである。この式は、区間の境界である $F=1.0N$ で連続となるように定式化されている。

以上のように、実験で得られた関係を定式化することができ、この関係を用いて指先力推定を行うことができる。

(3) 指先力の推定

定式化された指先力とセンサ出力の関係を用いて指先力を推定する手順は、まず、センサ出力を計測しながら、指先力を5Nまで増加させ、 s_5 および a, b を得る。次に、式(1)~(3)を用いて、導出された次式により、指先力を推定する。

$$F = \frac{s}{s_5 a} \quad (F < 1.0) \quad (4)$$

$$F = e^{\frac{s - s_5 a}{s_5 b}} \quad (F > 1.0) \quad (5)$$

これらの手順の有効性を確認するために、開発した指輪型指先力センサによる指先力推定実験を行った結果を図10に示す。指先力の推定値と実測値の2乗平均平方根誤差は0.51Nであり、10Nまでの広い荷重範囲で、指先力を推定できていることが確認できた。

(4) 指の関節角度とセンサ出力の関係

腱の張力は、指先力だけでなく、指の姿勢の影響を受け、変化すると考えられ、その影響がセンサ出力にも及ぶ可能性がある。そこで、指の関節角度とセンサ出力の関係を実験で求めた。関節角度の計測には、貼り付けた対象物の平均曲率に応じた電圧を出力する柔軟なポリマーセンサ(関節角度計測センサ)を用い、ここでは、第二関節の関節角度を計測した。

まず、指先力を加えない状態で、センサを

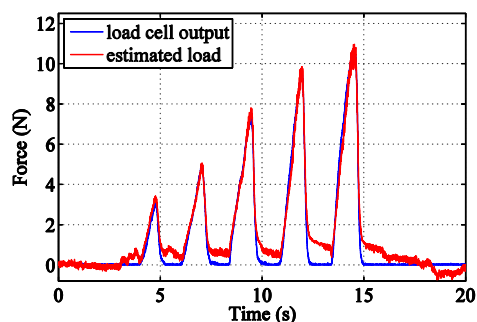


図10 センサによる指先力の推定結果

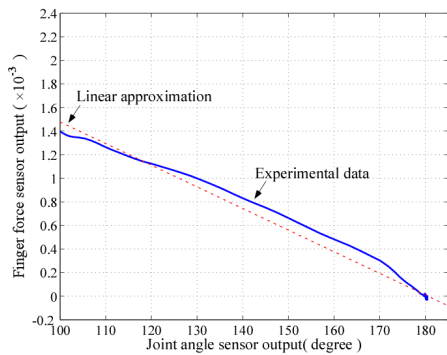
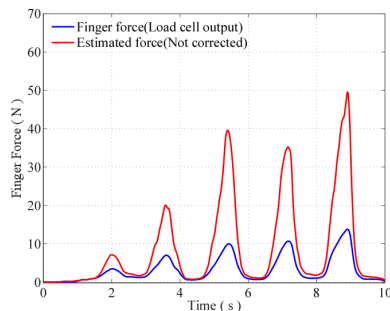
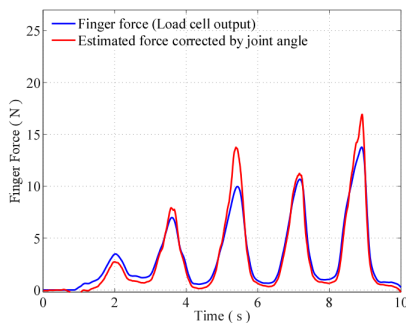


図 1 1 関節角度とセンサ出力の関係
(指先力なしの状態)



(a) 関節角度による補正なし



(b) 関節角度による補正あり

図 1 2 ウェアラブル指先力計測センサシステムによる指先力推定実験結果

装着した人差し指をまっすぐに伸ばした状態(関節角度 180 度)から屈曲させた状態(関節角度 100 度)まで変化させ、センサ出力と関節角度を計測した。図 1 1 に計測結果の一例を示す。実験結果から、指先力センサの出力は関節角度による影響を受け、関節角度に比例して、センサ出力が変化することが示された。また、試行ごとにその傾きも変化することが分かった。そこで、関節角度による影響を補正する方法として、図 1 1 で得られた関係を利用して、関節角度変化によるセンサ出力をオフセットし、オフセットしたセンサ出力に対して、これまでと同様の推定手法を適用することを考えた。そのためには、関節角度を同時に計測する必要があり、上記実験にも用いた関節角度計測センサと指輪型指先力センサを組み合わせたウェアラブル指先力計測用センサシステムを開発した。

開発したセンサシステムによる指先力推定実験を行った結果の 1 例を図 1 2 に示す。この実験では、指を伸ばした状態から関節角度を 100 度程度まで曲げ、その状態で指先をロードセルに接触させ、力を加えた。図 1 2 (a)は関節角度を基にした補正を行わずに指先力を推定した場合の結果であり、同図(b)は関節角度補正を施し、指先力を推定した場合の結果である。両者を比較すると、明らかに関節角度を基にした補正により、指先力の推定誤差が小さくなっていることが分かり、関節角度計測センサと指輪型指先力センサを組み合わせることで、指の関節角度によらず、指先力推定が可能となった。

以上のように、本研究によって、指先の感覚を阻害することなく、指先にかかる力を推定する新しい手法を創出することができた。

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 1 件)

Takeshi Okuyama, Kohei Kobayashi, Manabu Otsuki, Mami Tanaka, Measurement of Finger Joint Angle using Flexible Sensor, International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 査読有, 2016, 印刷中

〔学会発表〕(計 3 件)

Takeshi Okuyama, Kohei Kobayashi, Manabu Otsuki, Mami Tanaka, Measurement of Finger Joint Angle using Flexible Sensor, 17th edition of the International symposium on Applied Electromagnetics and Mechanics, 2015 年 9 月 17 日, 淡路夢舞台国際会議場(兵庫県・淡路市)

小林晃平, 奥山武志, 田中真美, 指先力計測用ウェアラブルセンサの開発に関する研究, 2015 年精密工学会秋季大会学術講演会, 2015 年 9 月 5 日, 東北大学川内キャンパス(宮城県・仙台市)

小林晃平, 大槻学, 奥山武志, 田中真美, 柔軟ポリマーセンサによる指関節角度計測, 第 27 回電磁力関連ダイナミクスシンポジウム, 2015 年 5 月 14 日, ハウステンボス(長崎県・佐世保市)

〔その他〕

ホームページ等

<http://rose.mech.tohoku.ac.jp>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

奥山 武志 (OKUYAMA, Takeshi)

東北大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 40451538