

令和 4 年 6 月 9 日現在

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K12029

研究課題名（和文）6軸センサを用いた指先力および指先滑りの高精度な推定

研究課題名（英文）Precise estimation of finger-tip forces and incipient slip using 6-axis sensor

研究代表者

池田 篤俊（Ikeda, Atsutoshi）

近畿大学・理工学部・講師

研究者番号：20609903

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、指先によるアクティブタッチを対象として、機械的要素と情報処理的要素をそれぞれ個別にモデル化し、個人差を考慮した皮膚感覚知覚モデルの構築を目的とする。触知覚に影響する機械要素については、これまでの研究成果である指先変形を伝達関数モデルによってモデル化する手法を応用し、外力に対する指先の機械特性のモデル化を行う。情報処理的要素については、神経系のモデルとして広く利用されている多層NNを用いて、力学的刺激から得られる感性評価のモデル化を行う。また、ゲームコントローラを対象として使用負荷の評価を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、ヒトのトータルな皮膚感覚知覚に関して指先の機械特性を含めた生理学的な知見に基づいたモデル化を提案しており、これまでの感性評価やモデル化の研究で広く行われている統計学的なアプローチとは異なる新しい試みである。また、視覚情報処理（画像処理）においては、多層NNを用いた研究が多く行われているが触覚においてはまだ適用された例が少ないため、これまでに明らかとなっていなかった力学的な特徴量と感性評価の関係が発見されることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aim to construct a skin sensation perception model that takes individual differences into account by modeling mechanical elements and information processing elements for active touch with fingertips. To model the mechanical properties of fingertips in relation to external forces, we made use of the method of modeling fingertip deformation using a transfer function model, which is the result of research so far. A multi-layered NN that is widely used as a model of the nervous system is used to model the sensitivity evaluation obtained from mechanical stimuli. With the integration of these models, a skin sensation perception model can be constructed which can estimate individual differences in sensitivities while considering external force. We will also, the usage load is evaluated for the game controller.

研究分野：生体計測工学

キーワード：触覚 指腹部変形 画像計測 3次元計測

### 1. 研究開始当初の背景

ヒトが物体に触れた時に得られる力学的な感覚である触覚は、皮膚に存在する受容器(センサ)から得られる皮膚感覚と筋肉に存在する受容器から得られる深部感覚に分けて考えることができる。触覚情報は視覚や聴覚では得ることが不可能である「力」の情報を得ることが出来るため、器用な物体操作や対象物の機械的特性の知覚に必要な不可欠な感覚であると言える。ヒトの触覚情報処理がどのように行われているかを解明することによって、よりリアルな触覚ディスプレイの開発や製品の外装設計や評価への利用といった応用が期待される。

ヒトの触覚受容器に関しては、解剖学や生理学、工学の分野において様々な研究が行われており、その研究成果によってヒトの触覚受容器が空間分解能・時間分解能共にすぐれたセンサであることが明らかとなっている。しかし、個人によって力の絶対値や周波数の感度特性が異なっていたり、同じ物体に触れた場合の感性評価が異なっていたりと触覚の知覚には個人差が大きいことが知られている。個人差を生み出す要素を大別すると、手指の形状や皮膚の硬さなどの機械的差異と年齢や性別・嗜好などの情報处理的差異の2種類に分けることが可能である。前者は身体的な機械特性の差異であり、後者は脳における情報処理におけるバイアス的な差異であると言える。ヒトの触覚情報がどのように処理されているかを解明するためには、このような個人差を考慮した解析が必要であると考えられる。

我々はこれまでの研究において、物体把持における接触状態をカメラを用いて計測し、接触面の変形に基づいた人の触覚フィードバックに関する解析を行ってきた。特に物体の持ち上げ初期に発生する"初期滑り"に着目し、簡単な計算によって接触面画像から初期滑り状態を評価することが可能な偏心度を提案している。ここで初期滑りとは、物体を持ち上げる場合に指先で発生する滑り現象のことであり、古くから指先の把持力制御に重要な感覚フィードバックに関係していると指摘されている現象である。偏心度を用いた初期滑りの推定結果は人の直感的な感覚と非常に高い相関が認められており、人の把持力制御システムの解明に有効であることを示している。また、人の初期滑り知覚の特性を逆に利用したハプティックデバイスの開発も行っており、デバイスが偏心度を制御することによって任意の重さと摩擦係数の感覚をユーザに与えることが可能であることを示している。これらの研究成果に基づいて、JSPS 科研費 25870436「指先変形計測に基づく指先力・指先初期滑りの同時計測センサの開発」(H25~H26)において、指先に装着する指腹部変形計測センサを開発し、計測された指先変形から指先の初期滑りを推定するシステムを開発した。指腹部変形計測センサは、外力によって変形した指の形状を指の側部に取付けた歪みゲージによって計測するものである(図1)。センサによって得られた指腹部の変形から指先の接触面で発生している初期滑りと2方向の指先力(押付け力とせん断力)を推定するための伝達関数モデルを構築した。

### 2. 研究の目的

本研究では、指先によるアクティブタッチを対象として、機械的要素と情報处理的要素をそれぞれ個別にモデル化し、個人差を考慮した皮膚感覚知覚モデルの構築を目的とする。触覚に影響する機械要素については、これまでの研究成果である指先変形を伝達関数モデルによってモデル化する手法を応用し、外力に対する指先の機械特性のモデル化を行う。情報处理的要素については、神経系のモデルとして広く利用されている多層 NN を用いて、力学的刺激から得られる感性評価のモデル化を行う。これらのモデルを統合することによって、個人差を考慮しつつ外力から感性評価を推定することが可能な皮膚感覚知覚モデルが構築可能となる。また、個人差がこれらのモデルのどのようなパラメータに表れるかを検証し、ハプティックデバイスの設計や製品外装の設計および評価にフィードバックする方法を検討する。

### 3. 研究の方法

研究目的である個人差を考慮した皮膚感覚知覚モデルの構築にむけて、本研究課題の期間内に以下に示す3つの技術課題を達成する。技術課題には挙げられていないが、本研究においては指先にかかる力と指先変形を高精度に計測するシステムが必要となるため、これまでの計測装置を改良して対応する予定である。

#### ・外力から指先変形を推定する伝達関数モデルの構築：

触覚受容器は外力によって加えられた指先内部の応力に対して反応するため、外力から内部応力への伝達をモデル化することによって個人の指先の機械特性をモデル化することが可能である。本研究では、入力を外力、出力を指腹部の変形とした伝達関数モデルを用いて機械特性をモデル化する。伝達関数モデルは、制御工学において対象システムの時間応答を推定するシステム同定などで主に利用されているモデルであり、対象の機械的な特性を表現することが可能である。

#### ・指先変形から感性評価を推定する多層 NN モデルの構築：

皮膚の触覚受容器は受容器毎に反応する刺激の帯域が異なることが知られている。そこで伝達関数モデルによって得られた指先変形を周波数分解し、周波数スペクトルを多層 NN の入力として用いる。本研究では、NN を 2 層に重ねてモデルを作成する予定であり、1 層目によって神経伝導路のモデル化が、2 層目によって脳における知覚情報処理のモデル化が行われることを狙いとする。出力の感性評価値としては、従来研究において布地や皮膚の評価に用いられるような感性ワードを用いる。

・モデルの統合および個人差の検証：

伝達関数モデルと多層 NN モデルを統合し、入力を外力、出力を感性評価とする皮膚感覚知覚モデルを構築する。はじめに、指先の機械特性に近い被験者を集めてモデルを構築し、クロスバリデーションによって提案手法の有効性を検証する。その後、様々なパラメータを持つ被験者を対象にモデルを構築し、提案手法の適用範囲や個人差との関係について検証する。

#### 4. 研究成果

令和元年度は、外力から内部応力への伝達を入力を外力、出力を指腹部の変形とした伝達関数モデルを用いてモデル化する研究を進めた。触覚受容器は外力によって加えられた指先内部の応力に対して反応するため、外力から内部応力への伝達をモデル化することによって個人の指先の機械特性をモデル化することが可能である。

具体的には、指腹部変形の計測に適した材料特性を持った低定格容量の MEMS6 軸力センサを用いたウェアラブル計測デバイスを製作し、計測プログラムの開発を行い、高精度な指先力推定を可能とする伝達関数モデルの構築を行った(図1)。ウェアラブル計測デバイスは、MEMS センサの材料特性を最適化することによって高い S/N 比での計測を可能とし、従来の研究で用いていたひずみゲージタイプのものやロボットに用いるような MEMS センサを用いる場合に比べて、安定した指腹部変形の計測が実現できた。MEMS センサの定格は、X 軸および Y 軸： $\pm 2$  [N]、Z 軸： $5$  [N]であり、センサ基盤サイズは、 $10$  [mm] x  $22$  [mm]と小型である。指腹部に接触する樹脂パーツは直径が  $\phi 4$  [mm]と計測に適したサイズとなっている。

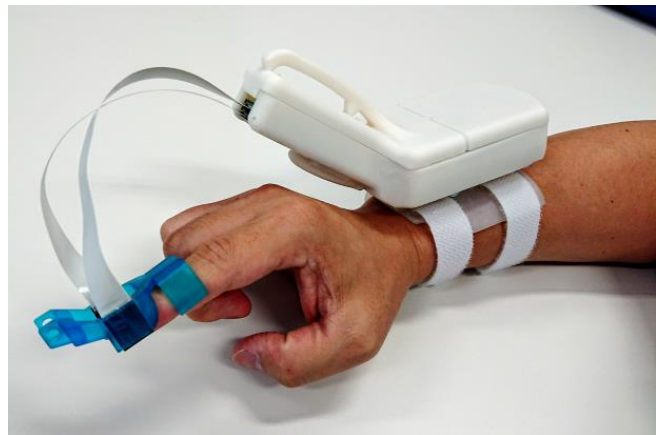


図1 ウェアラブル計測デバイス

また、指先力を推定するために適した伝達関数モデルを検討するために、極の数による影響を比較した。ウェアラブル計測デバイスを装着した状態で、フォースプレート上で指を押し付けながら動かすような触動作を行い、指腹部変形(ウェアラブル計測デバイス)と指先力(フォースプレート)のデータから伝達関数モデルを構築した。実験結果より、6次ないしは7次が適していることを明らかにした。

令和2年度は、伝達関数モデルの妥当性を検証するための指腹部変形計測装置の開発を行った。単眼カメラによる2次元計測と3Dスキャナによる3次元計測を組み合わせることで指腹部変形の詳細な計測を可能とするシステムを構築した(図2)。

具体的には、単眼カメラと3Dスキャナを用いて被験者は、男性2名、女性1名の3名とした。示指を平板に押し付けた状態で計測を行い、指先力は  $2$  [N]とした。カメラ画像および3Dスキャナのデータは、指を押し付けていない時と押し付けた後のデータとで差分を計算し、それぞれのデータを膨らみとした。爪の根本・中間・爪先の3か所における膨らみの比較を行った。また、被験者の指の形状を計測し、指の形状と指腹部変形との関係の解析を行った。

被験者3名の示指の形状は、指の厚みは3名とも同じ程度であったが、指の幅においては3名ともに違いが見られた。特に女性被験者の指は、爪も指も細い結果が得られた。実験結果より、構築した計測システムを用いることで高精度に指腹部変形を計測することが可能であり、爪の根本

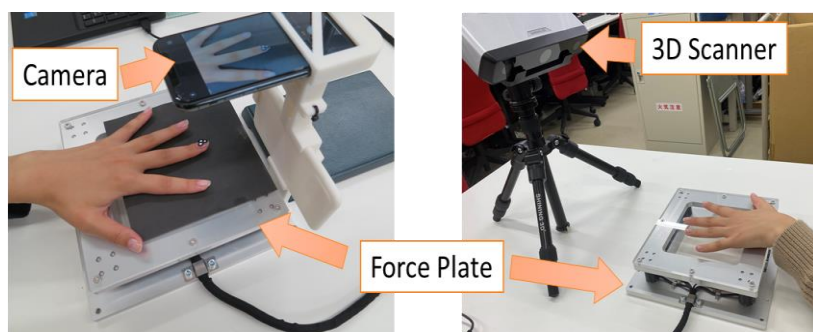


図2 指腹部変形計測システム

において最も変形が顕著に表れることが明らかとなった(図3). この結果は、被験者3名ともに見られた結果である. 指および爪の幅に違いのある3名の被験者において同じ傾向が得られたことから、指腹部変形は指の幅に関わらず爪の根本において最も膨らみやすい傾向にあることが明らかとなった.

令和3年度は、ゲームのジョイスティック操作を対象として指腹部変形と感性評価の関係性を明らかにするためのデータ解析を行った.

ジョイスティック操作時の指腹部変形の計測には、我々の開発した指先力計測デバイスを用い、ジョイスティックの長さを変更することで指先にかかる負荷と感性評価とがどのように変化するかを評価した. また、ジョイスティック操作時の筋負荷を推定するために、我々の開発した詳細なモーメントアーム変化を実現した指の筋骨格モデルを用いてシミュレーションを行った. 実験結果より、拇指の指先をCM関節から遠い位置に動かす動作では指の負担が大きくなることが明らかとなり、拇指可動域の限界に近づくほど指の負担が大きくなることが明らかとなった(図4). また、ジョイスティック操作時の直感的な操作負荷と筋骨格モデルにより計算されたシミュレーション結果には正の相関があることが確認された. また、ジョイスティック操作に必要な指先力は、ジョイスティックの形状によらず一定であることが確認され、感性評価との関係は明らかにすることができなかった. しかしながら、研究目的である指先力の高精度な推定は行っていたため、十分な研究成果が得られたものと考えられる.

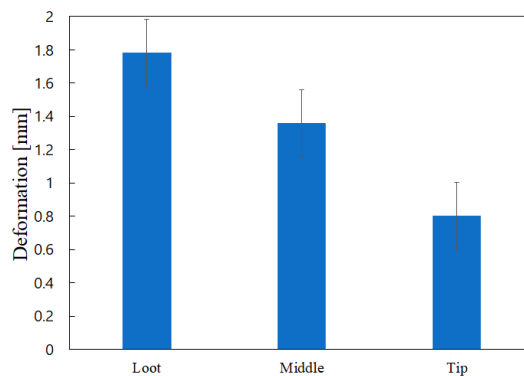


図3 指先変形の3次元計測結果の例

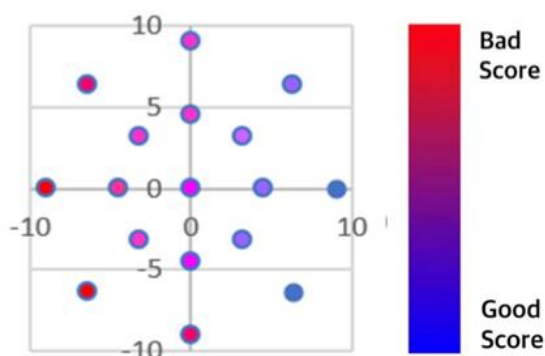


図4 ジョイスティックの操作負荷評価

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 種田 基希, 池田 篤俊
2. 発表標題 指の押しつけによる指腹部変形の計測
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 種田 基希, 池田 篤俊
2. 発表標題 指先変形の特性を考慮した指腹部変形計測装置の設計手法
3. 学会等名 第21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
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shimon Tasaka, Atsutoshi Ikeda, Takashi Harada, Kanji Fukuda, and Hiroyuki Kawamura
2. 発表標題 Analysis of Haptic Perception of Physical Therapists Using End-Feel Training Robot
3. 学会等名 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Atsutoshi Ikeda, Naoki Saito, Juncheng Li, Akira Yano, and Tomoyuki Kawazoe
2. 発表標題 Wearable finger pad deformation sensor for precise 3D fingertip force estimation
3. 学会等名 IEEE World Haptics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019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
---------	---------