

機関番号：34419

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K12104

研究課題名（和文）示指と拇指による繊細な触動作であるつまみ触動作の計測とモデリング

研究課題名（英文）Measurement and modeling of pinching, a precise tactile motion performed by the index finger and thumb

研究代表者

池田 篤俊（Ikeda, Atsutoshi）

近畿大学・理工学部・准教授

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）：本研究は、皮膚感覚の感度が高い身体部位の一つである指先を使ったつまみ動作による触動作に対して計測と解析を可能とするシステム構築を目的として研究を実施した。

初年度につまみ触動作を計測するための新たな指腹部変形計測デバイスの開発を行い、2年目は指腹部変形計測デバイスの計測部および固定部の設計を最適化し、伝達関数モデルによる指先力推定精度の向上を目的として研究を推進した。最終年度では、実際に釣りの仕掛けを作る際の指先力を計測し、熟練者と初心者の動作および指先力の違いについて解析した。

熟練者の作業におけるつまみ動作による触動作の計測とモデリングを行うことが可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、日常生活や熟練作業に不可欠な「つまみ触動作」に注目し、指先の皮膚感覚と接触状態を同時に計測・解析する技術を開発するものである。学術的には、触覚受容の詳細な仕組みや個人差の要因を明らかにすることで、ヒトの触知覚メカニズムの解明に貢献する。社会的には、美容師や職人などの熟練技能の構造化やアーカイブを可能とし、技術継承やリハビリ支援、触覚提示デバイス開発など多方面への応用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The objective of this study was to develop a system that facilitates the measurement and analysis of tactile actions executed by pinching with the fingertips.

In the first year, a novel fingertip deformation measurement device was developed for the assessment of pinching tactile actions. In the second year, the design of the measurement and fixation components of the fingertip deformation measurement device was optimized, and research was promoted with the objective of enhancing the accuracy of fingertip force estimation using a transfer function model. In the final year of the study, the fingertip force was measured during the process of creating fishing tackle. The differences in movements and fingertip force between skilled and novice individuals were then analyzed.

The capacity to quantitatively assess and model tactile actions, particularly pinching movements, has been demonstrated in the context of skilled individuals' work.

研究分野：生体計測

キーワード：触覚 スキル評価 生体計測 つまみ動作 指先

1. 研究開始当初の背景

ヒトが物体に触れたときに得られる力学的な感覚である「触覚」は、主に皮膚に存在する受容器から得られる皮膚感覚と、筋・腱・関節などに存在する受容器から得られる深部感覚に大別される。これらの情報は、脳内で統合的に処理されることにより、私たちは対象物の硬さ、滑らかさ、形状、動きなどを瞬時に認識することができる。

本研究で対象とする「つまみ触動作」は、比較的小さく軽量の物体に対して、拇指と示指を使って行う繊細な操作動作である。このような動作では、物体に対する押し付け力が小さく、関節や筋への負荷も少ないため、感覚の主体は深部感覚よりも皮膚感覚にあると考えられる。したがって、こうした微細動作の理解には、指先における皮膚感覚の詳細な計測と解析が不可欠である。

しかしながら、指先の自然な接触状態を保持しつつ、皮膚変形や力覚を高精度に計測することは技術的に困難であり、既存のセンサデバイスでは計測時に動作を妨げたり、対象物の操作性を損なったりする課題がある。特に、両手指で対象物を挟むつまみ動作においては、センサのサイズ・重量・装着方法が操作感覚に大きく影響を与えるため、より小型・軽量かつ高精度なセンサ技術の開発が求められる。

一方で、触覚に関する研究は、解剖学、生理学、工学など複数の分野で積極的に進められており、触覚受容器の時間・空間分解能の高さや、外部環境の微細な変化を感知できる精度の高さが明らかになっている。さらに、触覚には個人差が顕著であることが知られており、これは身体的要因（指の形状や皮膚の硬さなど）と情報処理的要因（年齢・性別・経験など）という二つの観点から理解することができる。これらの個人差を考慮した上で、計測・解析技術を構築することは、ヒトの触覚情報処理機構のより深い理解につながると考えられる。

研究代表者は、過去の科研費において、小型の指腹部変形計測センサの開発および伝達関数モデルによる指先力・滑り推定技術の基礎を確立してきた。従来の研究では、押し付け力が 1[N] 程度の繊細な「なぞり動作」に対して、±10%以下の高精度で指先力と摩擦係数を推定する手法を実証している。さらに、伝達関数モデルを用いて、個人ごとの指機械特性をモデル化することに成功した。

しかしながら、触覚が最も活用される場面は物体の「把持」や「操作」といったより複雑な触動作である。こうした現実的な触覚運動における情報処理過程を解明するためには、より高度で柔軟な計測・解析技術の確立が必要である。以上のような背景を踏まえ、本研究では、つまみ触動作を対象とした高精度な触覚情報の計測およびモデリングを行うことで、ヒトの触覚メカニズムの新たな理解を目指した。2. 研究の目的

本研究は、皮膚感覚の感度が高い身体部位の一つである指先を使ったつまみ動作による触動作に対して計測と解析を可能とするシステム構築を目指す。ヒトが小さな物体を把持・操作する場合に用いる示指と拇指によるつまみ動作に着目し、つまみ動作における指先の微細な皮膚変形を計測することにより、指先を用いた繊細な触覚知覚原理の一端を解明することを目的とする。

2. 研究の目的

本研究の目的は、ヒトの指先によるつまみ動作における皮膚感覚と触覚知覚情報処理のメカニズムを明らかにするための計測および解析システムの構築にある。特に、皮膚感覚の感度が高いとされる示指と拇指を用いた操作に着目し、両指で物体をつまんでこすり合わせる「つまみ触動作」の中で生じる微細な皮膚変形を高精度に計測することで、繊細な触覚知覚に關与する物理的・生理的メカニズムの一端を解明することを目指す。

つまみ動作は、布や紙の質感を確かめる、薬の錠剤を取り出す、釣り糸を結ぶなど、日常生活の中で非常に多く見られる自然な触動作である。これらの動作では、皮膚感覚をもとに微細な圧力や摩擦、変形を感知しながら運動制御が行われており、その情報処理プロセスには高度なフィードバック制御が關与していると考えられる。

したがって、本研究では以下のような観点から、つまみ触動作に対する計測・解析技術の構築を目的とする：

- ・ 自然なつまみ動作を妨げない計測デバイスの開発
- ・ 皮膚変形情報から力・滑りを高精度に推定するアルゴリズムの構築
- ・ 熟練度などによる触覚知覚の差異を定量的に評価する手法の確立

これらの技術的基盤を構築することで、触覚情報の理解を深めるとともに、今後のリハビリテーション技術や人間拡張インターフェース、技能評価技術への応用展開も視野に入れている。

3. 研究の方法

本研究では、つまみ触動作における皮膚変形・指先力・滑りの高精度な計測と、触覚情報処理メカニズムの解析を実現するため、以下の3つの研究課題を設定し、段階的に取り組んだ。

- (1) つまみ触動作を計測するための新たな指腹部変形計測デバイスの開発

まず、従来のなぞり動作センサを発展させ、つまみ動作に特化した新たな指腹部変形計測デバイスの開発を行った。既存の6軸MEMSセンサを用いた両側面計測では、指2本でつまんだ際にデバイス同士が干渉してしまう問題があったため、本研究では片側のみの計測構成とし、操作の自然さを確保した。

さらに、これまで両側センサから得ていた情報の一部を、片側のモーメント(回転力)データから推定可能であることが確認され、装着性・計測精度の両立を図った。センサの配置位置・向き最適化、装着機構の軽量化など、ハードウェア側の改善を行い、操作性と計測精度のバランスを追求した。

(2) つまみ触動作における伝達関数モデルの構築とアルゴリズム開発

つまみ動作中の皮膚変形データから、指先力や滑り量を推定するために、伝達関数モデルを用いたモデリング技術を発展させた。従来は力センサデータに依存したモデル構築が主であったが、今回はモーメントデータの活用注目し、片側デバイスでもパラメータ推定が可能なモデルへの拡張を試みた。

この過程で課題となったノイズ混入に対しては、信号処理技術(フィルタ設計・ノイズ除去アルゴリズム)を導入し、データ前処理の最適化を図った。加えて、機械学習による特徴量選択技術を導入し、モデルの汎用性と推定精度の両立を目指した。

(3) 熟練者と初心者における触知覚および操作動作の差異の検証

最終段階では、実際の応用例として「釣りの仕掛け作成」という細かな手作業を題材に、熟練者と初心者のつまみ触動作の差異を定量的に評価するための被験者実験を実施した。被験者には同一の課題を与え、つまみ動作中の指先力・摩擦・皮膚変形をリアルタイムで計測・記録し、動作パターンや触知覚の違いを抽出した。

これらの実験結果は、モデル評価や解析に活用し、つまみ触動作における感覚運動制御の熟練度に関する知見を得るための重要なデータとなった。

4. 研究成果

本研究は、皮膚感覚の感度が高い身体部位の一つである指先を使った「つまみ動作」による触動作に対し、計測と解析を可能とするシステムの構築を目的として実施された。特に、日常生活において頻繁に行われるつまみ動作中の微細な皮膚変形を定量的に捉え、触知覚の情報処理機構を明らかにすることを目指した。

研究初年度には、つまみ触動作を妨げることなく指腹部の微細な変形を高精度に計測可能とする新たなセンサデバイスの設計・試作を行った。これまでの研究成果を応用しつつ、デバイス同士の干渉を回避するための片側計測方式を採用するなど、つまみ動作特有の運動条件に適した構成とする工夫を重ねた。

2年目には、開発したデバイスの性能向上を目的として、計測部および装着時の安定性を高めるための固定部の構造最適化を行い、さらには、従来両側計測に依存していた伝達関数モデルを、片側の3軸モーメントデータを活用する形で拡張する研究を推進した。信号ノイズの影響を軽減するため、モーメントデータへの事前フィルタ処理を行い、バンドパスフィルタの設計や特徴量選択のアルゴリズムを取り入れることで、安定したモデル構築を目指した。これにより、計測装置の簡素化と実用性の向上に貢献できる見通しを得た。

最終年度には、開発した計測システムを用いて、実際の応用例として釣りの仕掛け作成作業を題材とした被験者実験を実施した。熟練者と初心者それぞれに同一の課題を与え、つまみ動作中の皮膚変形・指先力・滑りのデータを収集した。解析の結果、熟練者は対象物への力の加え方やタイミングに一貫性があり、繊細かつ効率的な触覚制御がなされていることが明らかとなった。一方、初心者は操作における力の大きさや方向のばらつきが大きく、感覚に基づく運動制御に未熟さが見られた。これらの差異は、伝達関数モデルを用いることで定量的に記述可能であり、触知覚における熟練の効果を数値的に可視化する成果が得られた。

本研究により、つまみ触動作における指先の微細な触知覚メカニズムの一端を明らかにし、触覚の個人差や熟練度の影響を定量的に評価する基盤技術の構築に成功した。今後は、得られた知見を活用し、リハビリテーション支援やスキル評価、触覚フィードバック技術の設計への応用が期待される。

・今後の展望

本研究では、つまみ触動作における皮膚変形情報の高精度計測、および伝達関数モデルによる力・滑りの推定に関する技術的基盤を構築した。これにより、ヒトの触覚情報処理機構の理解に向けた新たな知見が得られつつある。今後は、以下の3つの方向性においてさらなる発展が期待される。

・ 触覚モデリングの高精度化と多指動作への拡張

本研究では主に拇指・示指による2指のつまみ動作に着目していたが、今後は中指や薬指などを含む多指操作や、**把持動作(grasping)**の解析へと拡張していくことで、より実践的かつ

多様な触動作に対応可能なモデルの開発が期待される。また、伝達関数モデルの非線形拡張や、機械学習アルゴリズムの導入により、より高次な感覚運動制御の推定が可能となると考えられる。

- ・ 個人差・熟練度の評価指標としての応用

本研究で得られた皮膚変形の計測データおよび伝達関数モデルは、触知覚の個人差評価や熟練度判定といった応用にも大きな可能性を持つ。たとえば、特定の作業（釣りの仕掛け作り、工芸、手術など）における熟練者の触覚パターンを定量化し、初心者との比較を通して技能習得のメカニズムを明らかにすることで、今後の技能評価や訓練支援システムの開発に貢献できると考えられる。

- ・ リハビリテーション・医療・人間拡張技術への応用

触覚は、高齢者や脳卒中後のリハビリテーションにおいて重要な感覚モダリティの一つであり、本研究成果は、リハビリ評価・支援技術への応用可能性を持つ。具体的には、手指の触覚機能を定量的に評価し、機能回復の過程を可視化するシステムや、義手・触覚フィードバック付き義指などの人間拡張インターフェースへの展開が挙げられる。また、タッチパネルやウェアラブル機器における高精度な触覚インターフェース設計にも寄与することが期待される。

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 Ikeda Atsutoshi, Mori Katsuya	4. 巻 36
2. 論文標題 Basic Analysis for Evaluation of Tennis Volley Skill Using Body Propagated Vibration Sensing	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Journal of Robotics and Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1235 ~ 1242
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.20965/jrm.2024.p1235	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6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Katsuya Mori, Atsutoshi Ikeda
2. 発表標題 Analysis of Brushing Techniques for Quantitative Evaluation of Hairdresser's Skills
3. 学会等名 2025 IEEE/SICE International Symposium on System Integration（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 ショウ セケン, 池田 篤俊
2. 発表標題 微細作業の定量評価に向けた指腹部変形と動作の同時計測システムの開発
3. 学会等名 第25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 2024年

1. 発表者名 高井 裕平, 池田 篤俊
2. 発表標題 指先の押し込み時における指腹部変形の3次元解析手法
3. 学会等名 ロボティクスメカトロニクス講演会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 種田基希, 池田篤俊
2. 発表標題 指腹部変形計測センサの適切な設計に向けた指腹部の3次元変形と指形状との関係性の解明
3. 学会等名 第28回ロボティクスシンポジア
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Uetani, Naoya Suzuki, and Atsutoshi Ikeda
2. 発表標題 Development Consecutive Sensing Buoy System for Measurement of Ocean Waves
3. 学会等名 AGU Fall Meeting 2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 種田基希, 池田篤俊
2. 発表標題 3次元計測に基づく指腹部変形の解析
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
---------	---------