

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：14603

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25870436

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development fingertip lateral deformation sensor for the fingertip force and the incipient slip estimation

研究代表者

池田 篤俊 (Ikeda, Atsutoshi)

奈良先端科学技術大学院大学・情報科学研究科・助教

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、人間が物体を操作する場合に触覚情報をどのように利用しているかを明らかにすることを目標として、指先の接触面に影響を与えずに物体操作における指先力と指先初期滑りの同時計測が可能なセンサの開発を行った。本研究では、指腹部の変形を計測するためのセンサ開発とセンサデータから指先力と初期滑り量を推定するための伝達関数モデルの生成手法について提案を行った。

研究成果の概要(英文)：The goal of this research is to develop a fingertip sensor for measurement of fingertip force and fingertip incipient slip without any cover between the fingertip and the surrounding environment for investigation of human sensorimotor control using haptic feedback. I propose both a novel fingertip lateral deformation (FLD) sensor and an estimation method of fingertip force and incipient slip using a system identification technique. Lateral deformation of the fingertip during touch, motion is converted to the normal force, tangential force and incipient slip value by transfer function models.

研究分野：バイオメカニクス

キーワード：指先変形 初期滑り 指先力 ウェアラブルセンサ

### 1. 研究開始当初の背景

人の物体操作スキルは触覚、視覚、聴覚などの情報フィードバックが非常に重要であることが知られている。特に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、器用な物体操作には必要不可欠な感覚である。

これまでに解剖学や生理学、工学の分野において人が触覚情報を得るために用いている触覚受容器に関する研究が行われている。これらの研究成果により、人の触覚センサが空間分解能・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。触覚情報が人の物体操作にどのように貢献しているかを明らかにするためには触覚情報がどのように処理されているかを解明する必要がある。様々な物体操作条件下での計測が必要となる。これまでの研究では人の手指と物体の接触状態を計測する為に、物体側にセンサを取付けたり人がセンサグローブを付けたりするなどの方法が取られていた。しかし、この方法では操作対象物体の形状が限られてしまったり、グローブを装着するために本来の接触状態と変わってしまうという問題がある。

これまでに研究代表者は、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(図1を参照)。

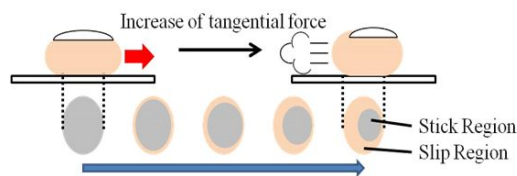


図1 指先負荷増大に伴う初期滑りの発生

偏心度は指先が変形した時の接触面積の差分のみで計算されるため、計算が容易でノイズに強いという特徴を有する。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。しかし、接触面画像から偏心度を計算して初期滑りを計測する場合、対象物の内部にカメラが必要となり、デバイ

スの形状が制限されてしまうという問題がある。

### 2. 研究の目的

本研究は、人間が物体を操作する場合に触覚情報をどのように利用しているかを明らかにすることを目標として、物体操作における指先力と指先初期滑りの同時計測が可能なセンサの開発を行う。物体操作では特に滑り始めに発生している初期滑りの知覚が重要であると言われており、開発するセンサは初期滑りを高精度に検出することを目指す。

また、センサを指の側面に配置することで指先の接触状態に影響を与えないようにし、**指の側面(指腹部)の脹らみ(変形)から、変形から指先力と指先初期滑りを同時に推定**することを目指す。

### 3. 研究の方法

本研究では指腹部の変形から指先にかかる接線力と法線力および指先で発生している初期滑りを推定するために、次の4つの技術課題に取り組んだ。

(1) 指先変形をシミュレートするための簡易指先モデルの構築：指が構造的にどのように変形するかをシミュレートするための簡易指先モデルを作成した。本研究ではカメラ画像に基づいて、指腹部の変形を放物面で近似することでモデル化し、解析を行った。

(2) 指先変形特性に基づいた指腹部変形計測デバイスの設計・開発：指の構造特性に基づいて最適なセンサ形状をデザインし、試作機を開発した。開発したセンサは歪みゲージによって指側部の脹らみを左右別々に計測することが可能となっており、2つのひずみゲージのデータを用いて、初期滑りと指先力(2方向)の推定を行った。

(3) 指先変形計測センサを用いた指先力・初期滑り同時推定アルゴリズムの構築：指先の変形から指先力と初期滑りを独立して推定するアルゴリズムを制御工学で用いられる伝達関数モデルを利用して構築した。入力として技術課題(2)で開発したセンサに搭載されている2つのひずみゲージのデータを用いて、出力として初期滑り、接線方向力、法線方向力の3つの物理量を設定した。モデルパラメータを高精度に推定するために、カメラと力センサを備えたキャリブレーション装置を新しく開発した。また、摩擦や移動速度や押付け力などの計測条件が推定精度に及ぼす影響を検証し、最適なキャリブレーション条件について検討を行った。

(4) 指腹部変形計測デバイスを用いた物体操作の解析：従来の計測装置に比べて、開発したセンサを用いることでより多彩な物体操作における計測が可能であることを示すために、コマ回し動作を対象として開発した計測システムを用いてコマ回し動作の学習における触覚情報の遷移を計測した。

#### 4. 研究成果

3章で示した4つの技術課題それぞれに対する研究成果を以下に述べる。また、各研究成果の詳細データについては発表文献を参照されたい。

(1) 指先変形をシミュレートするための簡易指先モデルの構築

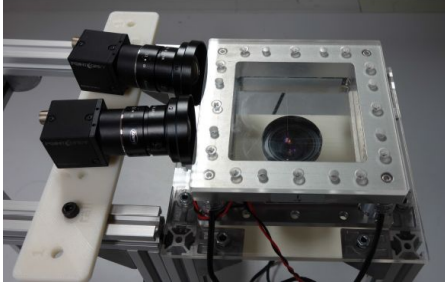


図2 指先変形画像計測装置

指腹部の変形をステレオカメラで計測し、曲面近似を行うことで、指先の押付けによる指腹部変形のモデル化を行った。

実験結果より、提案手法により指腹部の変形が観測されたが、変化が非常に微小であるために推定精度が低いことが明らかとなった。

(2) 指先変形特性に基づいた指腹部変形計測デバイスの設計・開発

図3に製作した指先変形計測デバイスを指先に装着した状態を示す。デバイスは図3に示すようにコの字型をしており、コの字の内側を爪部に両面テープ等で固定して使用する。デバイスを指に装着した状態で指腹部を物体に押し付けると、押付方向に応じて指腹部全体が変形し、その変形に応じてデバイスに取り付けられた左右のひずみゲージが変形する。指先力の成分が接触面に対して法線方向のみの場合は、全体的に均一に指腹部が変形し、接線方向の力が加わった場合は指腹部の左右の変形に偏りが生じる。このような指腹部の変形を計測するために、デバイスの側部（赤丸部）の左右にはそれぞれひずみゲージが配置されている。

本デバイスは、株式会社テック技販および株式会社資生堂の協力の元に、Haplog ([http://www.tecgihan.co.jp/p2/p2\\_2.htm](http://www.tecgihan.co.jp/p2/p2_2.htm)) をベースに開発を行った。



図3 指腹部変形計測デバイス

(3) 指先変形計測センサを用いた指先力・初期滑り同時推定アルゴリズムの構築

本研究では、次式で表現される伝達関数モ

$$Y(s) = G(s)U(s)$$

$$Y(s) = \begin{bmatrix} Y_{fn}(s) \\ Y_{ft}(s) \\ Y_i(s) \end{bmatrix}$$

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{nl}(s) & G_{nr}(s) \\ G_{tl}(s) & G_{tr}(s) \\ G_{il}(s) & G_{ir}(s) \end{bmatrix}$$

$$U(s) = \begin{bmatrix} U_l(s) \\ U_r(s) \end{bmatrix}$$

デルを用いて、指腹部の変形から指先にかかる2方向（接線方向および法線方向）の力および指先に発生する初期滑りを推定した。

ここで、 $Y(s)$ は接線方向と法線方向の力および指先に発生している初期滑り量である偏心度からベクトルで、 $G(s)$ は指腹部の変形量から指先力および偏心度を推定するための伝達関数行列で、 $U(s)$ はセンサから得られるデータベクトルである。

伝達関数モデルのパラメータを推定するために、3つの実験条件（押付け力：2, 4, 6 [N]、指先移動速度：15.5, 62 [mm/sec]、摩擦条件：乾燥、湿潤）を変化させ、それぞれ6回ずつの試行を行った。計測に際しては、事前に被験者に対して十分な説明を行い、説明内容に納得し実験に同意を得た上で計測

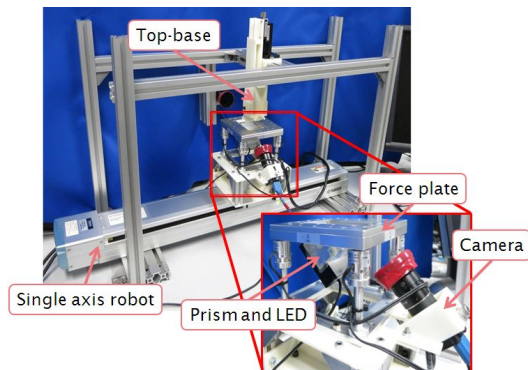


図4 指腹部/接触面同時計測システム

を行った。また、実験の実施に際しては、被験者の安全に対して十分な配慮を行っている。

図4に計測実験に用いた計測システムを示す。図の中央にある計測部はプリズムとLEDとカメラ（Flear3, Point Grey）から構成されている。プリズムの上に置かれた指先接触面をカメラでキャプチャすることで、指先に発生している初期滑りを計測する。カメラと反対側にはプリズムに接するようにLEDが配置されており、接触面のみが撮影可能となっている。プリズムは4つの力センサで支えられており、実験中の6軸力を計測することが可能である。



被験者は右指の示指を計測装置上部の固定部にバンドによって固定される。固定部をねじで高さ調整することによって、押し付け力を任意の値で固定して実験を行うことが出来る。計測部は産業用ロボット(FLIP-X, YAMAHA Motors)によって駆動され、一定の速度で示指に対して相対的に動作させることが出来る。

初期滑り量は、接触面内で検出される特徴点の総数とその内移動していると判定された特徴点の数との割合として定義する。特徴点は、接触面画像より Harris corner 検出器によって抽出される。特徴点の移動判定は、抽出された特徴点を Lucas-Kanade 法を用いてオプティカルフローを計算し、オプティカルフローが閾値より大きい場合に移動と判定される。

データ解析の結果より、伝達関数モデルのパラメータを推定する場合は、指先の変形が急激に変化する条件、つまり摩擦係数が低い場合や指先の移動速度が速い場合のデータを用いて推定を行うことによって、指先の変形が遅い場合においても高い精度で指先力と初期滑りの推定が可能であることが明らかとなった。また、個人毎に伝達関数モデルをキャリブレーションした個人モデルを用いると平均 80%程度の再現率が得られており、十分な推定精度が得られていると言える。さらに複数被験者のデータより作成した一般化モデルを用いた場合においても平均 70%程度の再現率が得られていることから、キャリブレーションフリーによる応用の可能性も示唆されたと言える。

#### (4) 指腹部変形計測デバイスを用いた物体操作の解析

ヒトのダイナミックな物体操作の習熟において、触覚や筋感覚がどのような役割を果たしているかを明らかにすることを目的とする。ダイナミックな物体操作としてコマまわし動作を対象タスクとした感覚運動制御の習熟実験を行った。実験では図5に示すヒトの自然な操作を妨げない触覚(指先変形)・指先位置・表面筋電(筋力)の同時計測システムを用いてコマ回し動作の計測を行った。触覚の有無によるコマ回し動作の習熟への影響を調べるために、指先にテープを

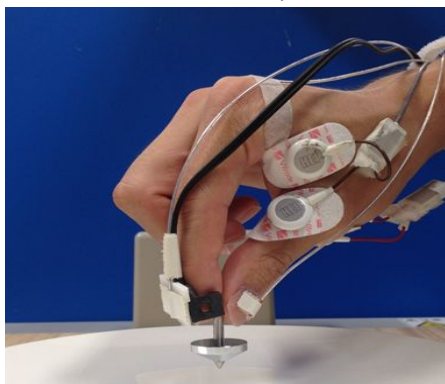


図5 指先運動同時計測システム

貼って触覚を制限したグループと自然な状態のコントロールグループの2つのグループにおけるコマ回し時間の比較実験を行った。

実験の結果より、提案システムにおいてヒトの運動に影響を与えずに、指の運動・指先変形・筋電を計測することが可能であり、習熟過程において変化がみられることが確認できたが、グループ毎による有意差は確認できなかった。

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 1件)

鈴木 隆裕, 池田 篤俊, 高松 淳, 小笠原 司, "把持型触覚提示デバイスを用いた振動による柔らかさ提示", 日本ロボット学会論文誌, Vol.30, No.7, pp.56-64, Sep. 2012.査読有

DOI: 10.7210/jrsj.30.718

〔学会発表〕(計 5件)

Felix Von Drigalski, Atsutoshi Ikeda, Tamim Asfour, and Tsukasa Ogasawara, "A Measurement Setup for the 3D Validation of Fingertip Deformation Models," The 3rd International Digital Human Modeling Symposium (DHM2014), #41, May 20-22, 2014, AIST Tokyo Waterfront(Tokyo, Oume).

杉垣 彰教, 池田 篤俊, 高松 淳, 小笠原 司: "マニピュレーションタスクにおける「しなり」の積極的利用", ロボティクスメカトロニクス講演会 2014(ROBOMECH2014), 3P1-W04, May 25-28, 2014, 富山国際会議場(富山県, 富山市).

小林 哲也, 池田 篤俊, 高松 淳, 小笠原 司: "指先腹部の変形計測による滑り量推定", 第20回 横浜・京都・奈良 バイオメカニクスカンファレンス, 12, Dec. 21, 2013, 奈良県立医科大学(奈良県, 橿原市).

池田 篤俊, 小林 哲也, 高松 淳, 小笠原 司: "スポーツ応用に向けた指腹部の変形に基づく指先力推定", 第14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(SI2013), 2J1-4, Dec. 18-20, 2013, 神戸国際会議場(兵庫県, 神戸市).

小林 哲也, 一圓 健太郎, 春日 照之, 松本 真, 井林 雅樹, 安並 健太郎, 池田 篤俊, 松原 崇充, 小笠原 司: "ダイナミックな物体操作に向けたロボットフィンガテストベッドの開発", 第13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(SI2012), 3H4-1, Dec. 18-20, 2012, 福岡国際会議場(福岡県, 福岡市).

(SI2012 優秀講演賞)

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

池田 篤俊 (Ikeda Atsutoshi)

奈良先端科学技術大学院大学

情報科学研究科 助教

研究者番号: 20609903