

令和元年6月17日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K00226

研究課題名(和文) 高分解能手指用MoCapによる指先の接触力推定手法の構築

研究課題名(英文) Development of a Fingertip Touch Force Estimation Method using a High-Accuracy Hand Motion Capture System

研究代表者

藤原 克哉 (Fujiwara, Katsuya)

秋田大学・理工学研究科・講師

研究者番号：80333128

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：手指接触力計測は、手指巧緻動作検査やその他の作業療法における評価のために重要である。既存の接触力の計測法には圧力センサーなどの力触覚技術がある。しかしながら、手指を覆うセンサーは触覚を阻害してしまう。そこで我々は、指の爪上に設置した高分解能センサーによる手指の位置姿勢計測により指先の接触力を推定する方式を開発した。この方式では圧力センサーは不要となり、計測システムの簡素化も可能となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

作業療法分野における巧緻動作検査は、所要時間・作業量による量的評価が中心で、指先の動きや対象物への力の入れ方の計測による質的評価の実現が課題である。検査感度の向上のためにも、作業中の手指の位置・姿勢・接触力を詳細に測定し、巧緻動作そのものを評価する手法が求められる。しかし、指と対象物の間にセンサを挟む従来型の接触力測定法では、指先の繊細な感覚を阻害してしまい、直接触れる条件とは異質の作業となる。本研究による爪上の位置センサのみによる接触力推定法により、これらの検査に適した直接指で触れる作業の計測が可能になった。

研究成果の概要(英文)：Finger force measurement is important for finger dexterity tests and other occupational therapy assessments. Touch forces are usually measured by means of haptic technologies such as force sensors. However, sensors placed on finger will prevent tactile sensation. We developed a new method that can estimate a fingertip touch force by measuring finger position and posture using a high-accuracy sensor attached onto the fingernail. The method did not use any force sensors, and also made the measuring system simple.

研究分野：情報学

キーワード：接触センシング処理 モーションキャプチャ 人間情報学 接触力測定 巧緻動作検査 手指動作検査  
作業療法 ボクセル

様式 C - 19, F - 19 - 1, Z - 19, CK - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

作業療法分野におけるペグやトークンを使用した巧緻動作検査では、作業量・所要時間の量的評価が中心で、ヒトの認知や行動計画等の高次脳機能の症状が直接反映する指先の動きや対象物への力の入れ方といった疾患が直接反映する動作を正確に計測・評価することはできていない。様々な疾患の検査感度を向上させるためには、作業中の手指の位置姿勢や接触力を測定し、巧緻動作そのものを評価する手法が求められている。そこで我々は、高精度な手指用モーションキャプチャ装置を用いて巧緻動作検査における手指の位置姿勢を測定し、健常者および高次脳機能疾患の症状別の分析を進めてきた。一例として図1にトークン運動課題における示指と母指の位置姿勢の計測例を、図2に計測により得られた指先位置の軌跡例を示す。この研究では、装置の性能を活かし4 $\mu$ mの高い空間分解能および240Hzのサンプリングレートで詳細に計測することで、その計測データから健常者および高次脳機能疾患の症状別の分析方法を提案した。さらに、我々は、指先の力の入れ方を位置姿勢と同時計測するために、手指用モーションキャプチャ装置と指腹の圧力センサを組み合わせた計測システムを構築した。図3にこのシステムの、指骨に合わせた位置センサの配置と指腹への圧力センサの配置を示す。しかし、図のように手指と対象物の間に圧力を計測するセンサーを挟む従来型の接触力測定法では、指先の繊細な感覚を阻害してしまい、直接触れる条件とは異質の作業となり、動作そのものに大きな影響を及ぼす問題があった。そこで本研究では、指と物体の間に何も挟まずに接触力を測る手法の構築を目的とした。既存の方式としては、指腹部は何も覆わず、爪側から指腹部にかかる接触力を計測する2手法が研究されている。

**従来手法**：指先にかかる力が爪に伝わり周囲の血流量が変化し、爪表面を透して赤みの変化として現れる。この変化を光学的に計測する手法である。しかし、指の屈曲運動でも血流量が変化するため誤検知する問題や、圧力がかかってから血流量が変化するまでの遅延の問題があり、特に後者は解決が困難である。

**従来手法**：指先にかかる力により指の両側面が膨らむのを歪みセンサーでとらえる手法がある。この手法では、側面への膨らみしか考慮しておらず、指を押し込む姿勢・角度が異なると正しく接触力を推定できない問題がある。

**なお手法**：ともに、接触位置の計測のためには別に位置センサーの併用が必要となる。

### 2. 研究の目的

本研究では、指先と対象物の正確な位置がわかれば、接触力の変化による指先の歪みをその位置情報として計測できる予備実験結果に注目し、位置情報から接触力を推定するアルゴリズムの構築を目指す。従来手法が歪みによる側面への膨らみをとらえるのに対し、本手法は接触面の凹みをとらえる手法と言える。また本手法では、位置センサー(モーションキャプチャ装置)のみを用いるため、よりシンプルなシステム構成にできる。なお、対象物が柔らかくなるほど、対象物がより歪み、指はより歪まなくなる。よって、本方式は対象物が固い方が適用しやすいと予想された。巧緻動作検査のペグやトークンも剛体であるため、本研究では対象物を剛体とした。

### 3. 研究の方法

(1) 手指の位置姿勢と接触力の同時計測システム

はじめに、手指と対象物との接触時における、接触対象物に対する手指の位置姿勢と、接触対象物と手指との接触力との関係を明らかにするために、両者を同時に計測する必要があった。位置姿勢の計測には、高精度な手指用磁気式モーションキャプチャ装置を用いた。本装置は、最大サンプリングレートが240Hzで、6自由度の位置姿勢情報(Pxyz, xyz)を0.0038mmの位置分解能、0.0012degの角度分解能で計測できる。

接触力の計測には、歪みゲージ式力覚センサー装置を用いた。本装置は、最大サンプリングレ



図1 トークンをつまんで容器に入れる巧緻動作検査の計測風景

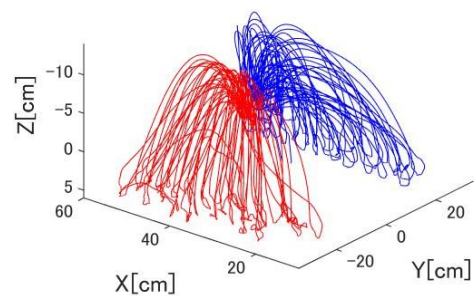


図2 指先位置の計測結果例

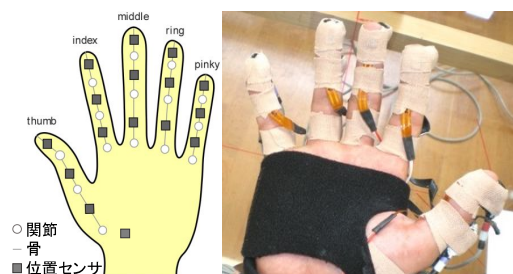


図3 指骨に合わせた位置センサの配置と指腹への圧力センサの配置

ートが 1200Hz で、並進力 ( $F_{xyz}$ ) と偶力 ( $M_{xyz}$ ) の 6 分力を、0.025N および 0.0006Nm の分解能で計測できる。

両装置を用いて、対象物（剛体の平面）に対する指先の押し動作時の位置姿勢と接触力を、各装置の最大サンプリングレートで連続的に同時計測する。対象物の素材は、磁気への影響が少なく剛性が高いエンジニアリングプラスチックとした。

## (2) 手指の位置姿勢からの接触力推定アルゴリズム

触覚等の感覚を活かした作業を計測できるように指腹は何も覆わずに、爪上の高空間分解能を有する位置センサの変位のみからの接触力推定を目指した。巧緻動作検査で用いるペグやトークンなどの剛体に指が接触するとき、接触力が大きいほど指腹は凹んで変形する。接触力と変形量（変形による指腹位置の変化）の関係を明らかにすることで、変形量のみから接触力を推定できるようにする。ただし、指腹の変形は、どのような角度で剛体に接触するかにも依存すると考えられる。そこで、様々な姿勢（平面に対する手指の角度）からの接触を連続的に計測し、それぞれの角度における接触力と変化量の関係を明らかにすることで、様々な角度における接触力推定を可能にした。なお本方式では、爪および爪の近辺への接触については歪みが少なくなるため、接触力推定の対象外とした。

## 4. 研究成果

### (1) 手指の位置姿勢と接触力の同時計測システム

接触対象物に対する手指の位置姿勢と、接触対象物と手指との接触力との関係を明らかにするために、両者を同時に計測するシステムと手法を構築した。図 4 に構築した計測システムによる実験風景を示す。本システムでは、エンジニアリングプラスチック製の円柱の上面の平面を、手指で押す動作を計測できる。

図のように、モーションキャプチャ装置のレシーバ（センサー）を爪上に装着し、トランスミッタをその近く（プラスチック製の机上）に配置することで、レシーバの位置姿勢を計測する。レシーバが手指にしっかりと固定されていれば、このレシーバの位置姿勢から、手指の末節骨の位置姿勢が算出できる。

また、図のように、力覚センサー装置の計測面の上部に円柱を固定することで、手指で円柱の上面の平面に触れて下に押す力を計測できる。なお、磁気式モーションキャプチャ装置で精度よく計測するためには、トランスミッタやレシーバの近くから、磁界に影響を与える金属などを排除する必要がある。そこで、円柱の素材はエンジニアリングプラスチック製とした。また、金属製の力覚センサー装置本体が位置姿勢の計測に影響しない配置を実験により明らかにし、計測範囲から十分に遠ざけた図のような配置とした。

それぞれの装置は、物理現象をセンサーにより計測し、その結果を計測値として算出しデジタルデータとして出力するまでに一定の時間がかかるが、その遅延時間の長さは両装置で異なる。2 つの装置を用いて計測した結果から、指の位置姿勢と接触力の関係を明らかにするために、両者の計測結果の時系列を同期させる必要があった。特に速い手指動作の計測と分析においてはより高精度の同期が求められる。そこで、剛体同士をぶつけることで位置姿勢と力を短時間で同時に変化させ、パルス波として計測させることで、両者の遅延の差を求めて同期させるキャリブレーション手法を構築した。具体的には、プラスチック製のスタイラスにレシーバを固定し、そのスタイラスで、力覚センサー上の円柱の上面を叩いた。結果として得られるそれぞれのパルス波の発生時刻を同時刻として合わせることで両装置の遅延時間の差を解消し同期させる手法とした。

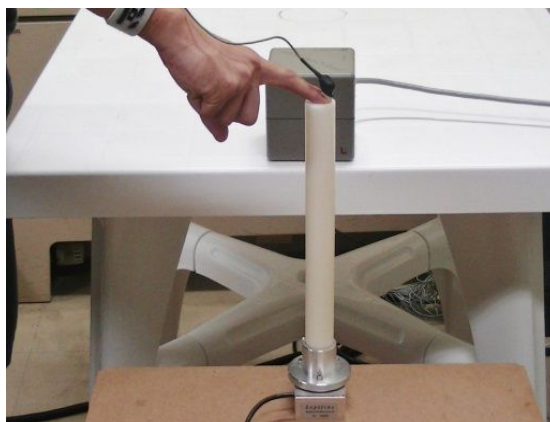


図 4 同時計測システムの外観

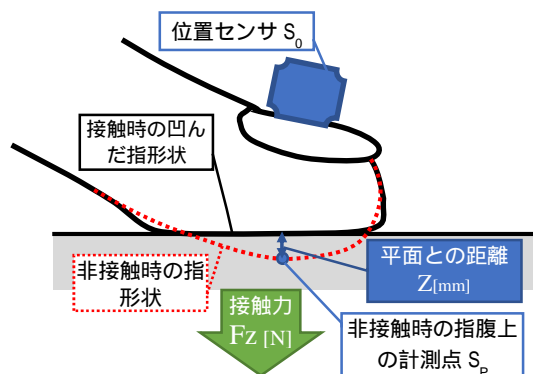


図 5 押し動作時の位置姿勢と力の計測

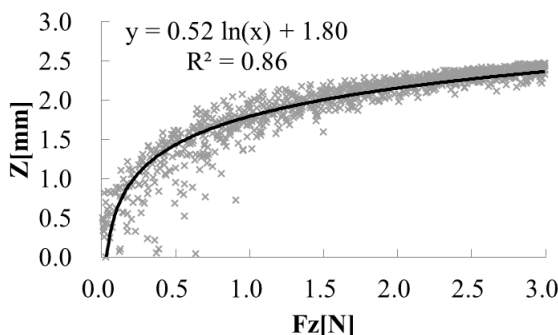


図 6 変形量 Z と接触力  $F_z$  の関係

## (2) 手指の位置姿勢からの接触力推定アルゴリズム

構築した同時計測システムを用いて、押し動作時の手指の接触力と位置姿勢を計測し、両者の関係を明らかにした。図5に、圧力センサーで計測できる接触力 $F_z$ と、爪上の位置センサーで計測できる非接触時の指の表面座標 $S_p$ と接触により凹んだ指の表面(接触対象の剛体表面の平面)との距離 $Z$ (以下、変形量 $Z$ とする)の模式図を示す。図の赤の点線が接触していない時の手指の形状である。黒線が接触時の手指の形状である。図のように、剛体の平面に対して手指で押す動作をすると、剛体は変形せず、手指は平面と接触している部分が凹んで変形する。この凹み具合を表す指標として、先述の変形量 $Z$ を用いる。なお、対象物に対する手指のアプローチの角度によって、最も凹む位置は変化する。最も凹んでいる部分が接触力 $F_z$ との関連性が高いと考え、なるべく多くの計測点を用意してその変形量 $Z$ の最大値を求めた。同時にその時刻における接触力 $F_z$ を記録して両者の関係を調べた。図6に、ある実験参加者の示指による押し動作時の、変形量 $Z$ と接触力 $F_z$ の関係の一例を示す。両者には一定の関係があり近似関数を求めることができた。しかしながら、接触力が大きくなるとそれ以上は変形し難くなることがわかった。図に示した参加者の示指の例では、 $Z$ が2.5mm程度で頭打ちになるとともに、 $Z$ の限界近くでは $F_z$ を推定する誤差が大きくなった。よって、本方式はそれより小さな接触力を対象とした用途に適している。

接触力に対する変形量は個人差があり、最適な関係式は個人毎に異なるため、計測して関係式を求める手順は個人毎に各手指に対して実施する必要があり、時間がかかる問題があった。この接触力推定の応用範囲を広げるためには、より簡易に関係式を求める手法が必要と考えた。そこで、あらかじめ多くの人の手指の計測結果を蓄積してカテゴリ化したデータベースをあらかじめ構築しておくことで、簡易に計測したいときは短い時間の計測結果を元に最も類似した特徴を持つ関係式を検索して用いる手法を検討している。

## (3) 接触力推定の応用

同時計測システムでは、真値の参照のために力覚センサーを用いていたが、接触力推定には不要である。また、同時計測システムでは、接触対象が床面に固定されていたが、接触対象の位置姿勢を計測すれば移動しても構わない。応用システムとして構築した、手書き文字入力システムを図7に示す。このシステムでは、接触対象をアクリル板として、レシーバ(位置センサー)をアクリル板と手指の爪上の2箇所に配置した。両者の相対的な位置姿勢から、アクリル板に対する手指の接触力を推定する。利用者が没入型ヘッドマウントディスプレイ(HMD)を装着した状態で、仮想現実(VR)空間に字を書きたいときに、アクリル板を片手に持ち、もう一方の手の指でアクリル板に触れた時に指先に線を出力する。無接触を含めて4段階の接触力をリアルタイムに検出し、接触力の強さに応じて線の太さを変化させることで、毛筆のような強弱のある字が描けるシステムとした。

本研究成果の接触力推定アルゴリズムを用いれば、従来方式と違い圧力センサーを併用せずに位置センサー(モーションキャプチャ装置)のみでシンプルに計測システムを構成できるため、設置や装着が容易となり、作業療法分野における巧緻動作検査に貢献できる。また、指腹を覆わない手法であるため、細やかな手技からなる技能伝承などの分野にも発展的に利用が期待でき、研究背景で述べた他の接触力測定法と比べて計測システムが単純かつ遅延時間や誤認識などの問題が生じないシステムであり学術的独自性と創造性を有する研究成果である。

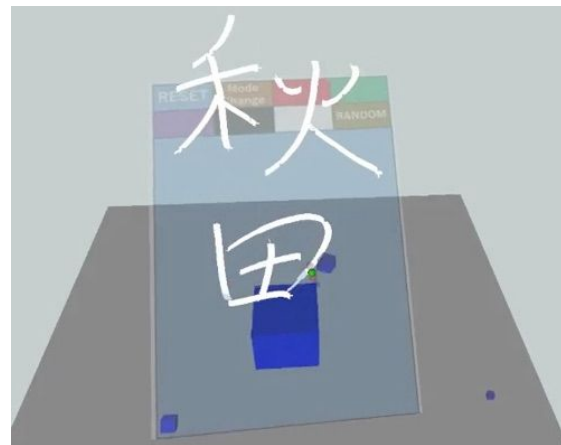
## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計2件)

Katsuya Fujiwara, Hidenori Kano, Kazutaka Mitobe, Feature Extraction of Mild



(a)文字入力中の様子



(b)利用者にVR提示している画像

図7 アクリル板と手指の接触力推定による文字入力システム

Cognitive Impairment Using a Dual-task of Drawing and Counting Test, Journal of Advanced Computational Intelligence & Intelligent Informatics, 査読有, 2019, Vol.23, No.5, printing

Katsuya Fujiwara, Hiroyuki Fujii, Kazutaka Mitobe, Using Finger Dexterity in Elderly and Younger People to Detect Cognitive Decline, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent, 査読有, 2017, Vol.21, No.2, 330-336  
10.20965/jaciii.2017.p0330

〔学会発表〕(計9件)

佐野文哉, 藤原克哉, 齋藤正親, 四反田素幸, 水戸部一孝, 指揮初学者のためのVR 学習支援システムの構築と評価, 平成30年度 情報処理学会東北支部研究会, 2018

及川智也, 藤原克哉, 齋藤正親, 石川慶紀, 水戸部一孝, 椎弓根スクリューを使用する頸椎後方除圧固定術のためのVR 穿孔シミュレータの構築, 平成30年度 情報処理学会東北支部研究会, 2018

Tnew Chen Zhun, Masachika Saito, Katsuya Fujiwara, Kazutaka Mitobe, Evaluation of a Medicine Taking Identification Method Utilizing 3D Camera, 平成30年度情報処理学会東北支部研究会, 2018

佐野文哉, 藤原克哉, 齋藤正親, 四反田素幸, 水戸部一孝, VR空間における指揮動作の学習支援技術の研究, 第23回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2018

及川智也, 藤原克哉, 齋藤正親, 石川慶紀, 水戸部一孝, 椎弓根スクリューを使用する頸椎後方除圧固定術のためのVR 穿孔シミュレータの開発, ヒューマンインタフェースシンポジウム2018, 2018

Tnew Chen Zhun, Masachika Saito, Katsuya Fujiwara, Kazutaka Mitobe, Identification Method of Medicine Taking Action Using 3D Camera, ヒューマンインタフェースシンポジウム2018, 2018

山口祥生, 藤原克哉, 水戸部一孝, 視線計測可能なドライビングシミュレータを用いた遠隔指導システムの開発, 第54回日本交通科学学会総会・学術講演会, 2018

丹野遼平, 藤原克哉, 水戸部一孝, 磁気式MoCapを用いた没入型VR向け手書き文字入力システムの構築と評価, 平成29年度情報処理学会東北支部研究会, 2017

Katsuya FUJIWARA, Hideaki MIYAJIMA and Kazutaka MITOBE, Proposal of Improvement of Contact Force Visualization in Soldering Training VR System, The Eighth International Conference on Materials Engineering for Resources, 2017

〔産業財産権〕

出願状況(計1件)

名称: 入力システム

発明者: 水戸部一孝, 藤原克哉, 丹野遼平

権利者: 秋田大学

種類: 特許

番号: 特許願 2017-234737

出願年: 平成29年

国内外の別: 国内

〔その他〕

<http://mit.ie.akita-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名: 水戸部一孝

ローマ字氏名: (MITOBE, Kazutaka)

所属研究機関名: 秋田大学

部局名: 大学院理工学研究科

職名: 教授

研究者番号(8桁): 60282159

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。