

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2013

課題番号：24700160

研究課題名(和文) 触覚センサグローブによる手の接触制御スキルの解析

研究課題名(英文) Analysis of skiful hand motions by original tactile sensor glove

研究代表者

大村 吉幸 (Ohmura, Yoshiyuki)

東京大学・情報理工学(系)研究科・助教

研究者番号：10598022

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：人の手指運動の巧みさの仕組みの解明のために、本研究では、手になじむ触覚センサグローブの開発を行った。独自の小型圧力センサをフレキシブル基板に埋め込む技術を開発し、手になじむ触覚グローブを構成した。また、手指の運動を計測するためのモーションキャプチャ装置を独自に開発し、組み合わせ、日常物体を操作するときの、手指の接触と運動の同時計測を行い、解析を行った。
以上の成果により人の手指運動の巧みさを調べる基盤技術の進歩に寄与した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a new tactile sensing glove fitting in hands for understanding manipulation mechanisms. This tactile sensing glove was made by original ultra-thin small pressure sensor embedded in flexible print circuit(FPC). Moreover we developed an original motion capture system for measuring hand motions. Using it we carried out detailed measurements of natural human skiful hand motions. Analyses of these data are also carried out.

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学

キーワード：行動計測 触覚センサ 感覚行動システム 実世界行動データベース

1. 研究開始当初の背景

人の手の器用な動きは古くから関心がもたれており、医療、福祉、ロボティクス、ユーザビリティ評価など幅広い分野において、計測・解析が行われ、把持形態や指の動きのパターンなどが分類されてきた。しかし、多くが外観によるもので、人がどのような感覚入力に基づいて制御を行っているかについて定量化する手段が十分でなかった。そして、このようにして得られた知見は、ロボットハンドや義手を設計する上で重要な知見であったが、現状の人の手を模したロボットハンドは、その巧みさにおいて人には遠く及ばないという現実がある。

また、近年、人の手の表面の柔軟さや多点接触に対する関心が高まりつつあり、人の手の巧みさを理解する上でこれらの要素が重要であると考えられる。しかし、変形する人の手の接触状態の遷移を計測する手段が確立しておらず、人の手の接触制御や皮膚変形の利用法に関する知見は乏しい。

2. 研究の目的

従来までは、計測技術の限界から、人の手が日常的に行う接触状態の制御に関する検討が不十分であった。本研究の目的は、独自に開発した「柔軟小型の触覚センサ」と本研究で開発する小型の分布姿勢センサを統合することで、人が物体操作する際の接触状態の遷移を計測する触覚センサグローブを開発する。また、少人数の実験協力者に対して、触覚センサグローブを装着してもらい、実験を行い、その有用性を示す。

3. 研究の方法

(1) 触覚センサグローブの開発：

独自開発した薄型・柔軟・高密度圧力センサ

手指の接触情報を取得するためには、薄く、柔軟で高密度に、広い領域を実装できる圧力センサが必要となる。シリコン技術を応用した高密度圧力センサは、高解像度という条件を満たすが、手全体という比較的広い領域に実装することは困難である。このような要望を満たす技術がないため、独自に高密度圧力センサの構成法を開発してきた。

広い領域に柔軟な圧力センサを実装するために、フレキシブル基板 (FPC) に圧力センサを埋め込む方法をとる。FPC 上に圧力センサを一体成型することで、任意の位置に任意のサイズの圧力センサを実現することができる。

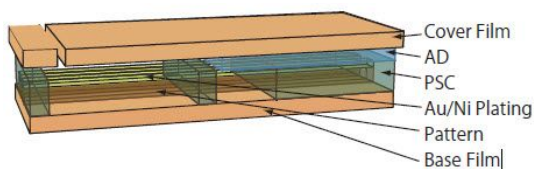


図1：圧力センサの構造

圧力センサの構造は図1の通りである。通常の FPC 製造工程を利用し、電極を構成する。配線部は光硬化樹脂 (PSC) でカバーした後、電極部を金メッキ処理する。その後、接着剤を用いて、導電性のカバーフィルムを貼り付ける。カバーフィルムが電極に接触することで変化する接触抵抗を測定することで圧力を検知することが可能となる。

小型化の実現のために、素材の薄型化、電極形状の最適化を行う。また、カバーフィルムにスリットを設けることで、曲げに対して鈍感にし、感度を向上させる。

小型分布姿勢センサの開発

接触運動の計測に適した姿勢センサとして慣性センサ (加速度センサ、ジャイロセンサ) を利用した装置を開発した。慣性センサを利用することで、接触時に生じる隠れの影響がなく、姿勢計測が可能となる。

8mm角の姿勢センサモジュールを開発し、片手に18個のセンサを用いて計測するシステムとした。18個の姿勢センサの情報をリアルタイム計測するために、独自の通信技術の開発を行った。また、慣性センサ方式ではしばしば問題となる重力方向回りのドリフトを除去するために、手形を用いた初期姿勢を決める台を用いた。実験の開始と終了時の姿勢を等しくすることで、ドリフトの影響を除去するアルゴリズムを開発する。

さらに、この手形と初期姿勢台を用いることで、手の3次元モデルの作成、手に対する姿勢センサの取り付けキャリブレーション、骨格推定、後述の触覚センサグローブの圧力センサの位置情報のモデル化を行う。

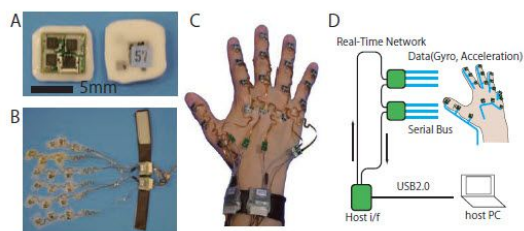


図2：開発した指の姿勢センサ

触覚センサグローブ

手の運動を阻害せず、人の手の触覚知覚を妨げない触覚センサグローブの開発を行う。実現のために、図3に示すような細帯基板に開発した圧力センサを埋め込む。

人の手の2点弁別域を考慮して、指先2~3mmピッチ、手のひら6mmピッチとして設計を行う。

細帯状の基板を用いて、エラストマーで覆うことで、伸縮性に富み運動を阻害しないグロブを構成する。

感度の向上のために、最後に触覚センサエレメントごとに、ゴム製の突起を設ける。

各触覚センサグロブは、折り曲げ、センサエレメントの切り取りなどを行い、実験協力者ごとにカスタムメイドで製作する。

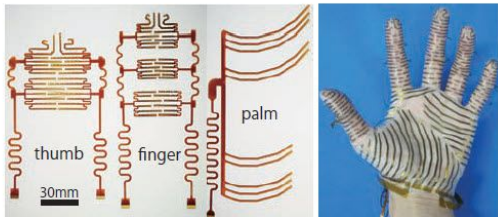


図3：開発した触覚センサグロブ

(2) 実験方法：スキルの計測

手の上で円柱形状の物体を転がすタスクを行った。実験協力者には、回転の周期を一定とするために音刺激が与えられた。このときの手指の接触運動を、開発したシステムを用いて計測した。

円柱形状の物体は2種類用意した。1つ目の条件は重心が中央にある条件。2つ目の条件は重心に偏りがある条件である。この2条件について、それぞれ、触覚情報と運動情報について分散解析を行う。

まず、回転動作を周期ごとに切り出し、周期を正規化する。その後、圧力素子ごとに、接触の再現性とタイミングの分散を評価する。接触の再現性は、毎周期接触があったかを評価する。タイミングは、接触があった場合に、正規化したタイミングの一致度を評価する。

運動については、関節角度変化の極値について、そのタイミングの一致度を評価する。

2つの異なるタスク間で分散構造を比較することで、人の指運動の生成戦略について考察する。

4. 研究成果

(1) 開発した触覚センサグロブの感度検証

開発した圧力センサの感度は、構造・素材によって理論的に上限が存在し、有限要素法解析を行った結果、カバーフィルムへの切り込みと突起による応力集中がなければ、所望の感度を得ることができないことがわかった。そこで、ゴム製の突起をつけ、その効果を検証した。

図4に示すとおり、ゴム製の突起をつけることで、固い対象物に対して、感度の劇的な向上を得ることができた。

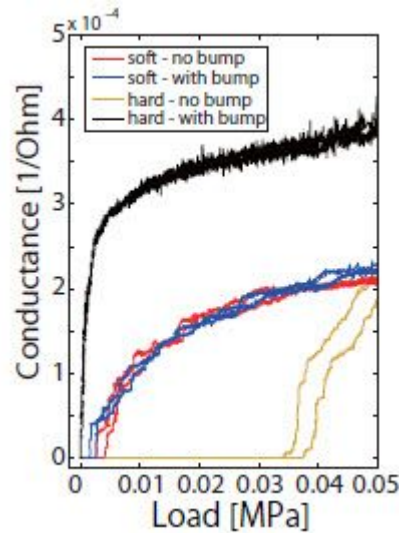


図4：突起による効果の検証

(2) 触覚センサグロブが柔軟な手になじむことを検証

開発した触覚センサグロブが手の運動を阻害せず、手の変形になじむかについて検証を行った。実験方法は、実験協力者に対して、図5のような実験装置を用いて、指の曲がり難さを定量評価した。これは、手指の変形にグロブがなじむ条件ほど、小さな値となる。

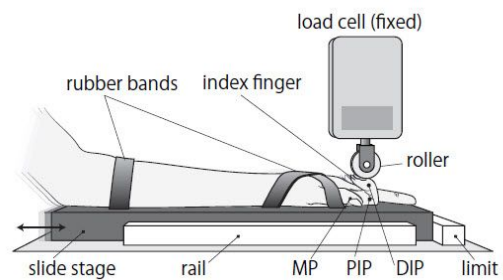


図5：運動阻害力の計測装置

3つの条件について実験を行った。1つ目はグロブを装着しない条件、2つ目は本研究で採用したツリー状のフレキシブル基板を用いる条件、3つ目は、パッチ状のフレキシブル基板を用いる条件である。

結果を図6Bに示す。複数の被験者に対して、グロブ装着によって柔軟性が損なわれるものの、ツリー状の基板を採用することで、変形に対応しやすいことがわかった。

また、2点弁別課題(図6A)や、ペグボード課題(図6C)においても、ツリー状の基

板を採用することで、パッチ状に比較して有意に成績向上することが明らかとなった。

この結果は、独自に開発した小型・柔軟触覚センサを用いることで初めて可能となった。

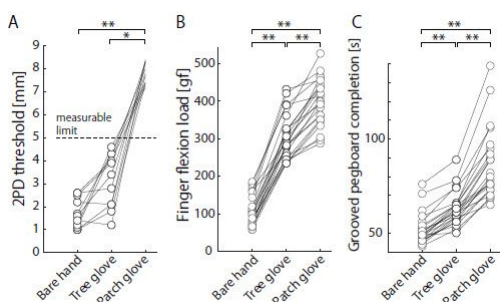


図6：変形に対するなじみやすさの評価結果

(3) 姿勢センサのドリフト除去

慣性センサを用いた姿勢センサにおいて問題となるドリフトについて、触覚センサグローブを製作する際に必要となる手形を用いることで軽減する手法を提案した。

製作した手形を用いて計測の開始時の姿勢と終了時の姿勢を一致させることで、ドリフト量を評価し、ドリフトの値を減少させるように角速度センサのゼロ点を最尤推定する手法を提案し、ドリフトの軽減を行った。

(4) 日常物体操作実験

製作した圧力センサのサイズは、1.2x0.75mmと小型で、厚さも0.1mmと薄い。このサイズにも関わらず、0.01MPaの感度と曲げに対する鈍感を実現した。この感度は、日常物体動作を計測するには不可欠な感度であるが、小型サイズで実現することは極めて困難であり、現状の製造法で理論的に出しよう限界値となっている。

この圧力センサを片手1000点実装した触覚センサグローブを実験協力者ごとにカスタム製作し、被験者実験を行った。計測は1000Hzで可能となっている。



図7：日常物体操作ベータベース

開発したグローブを用いて、日常物体を操作する際の接触分布と姿勢の情報を同時計測した。その結果の一部について図7に示す。

(5) 接触運動スキルの解析結果

2種類の円柱物体(C:重心が中央条件、NC:重心に偏り)を手中で回転する動作について、分散解析を行った。

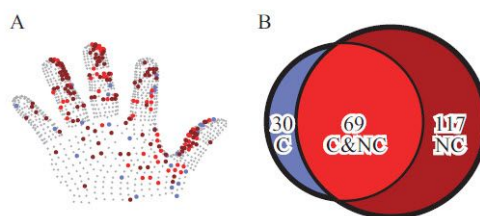


図8：接触の分散解析の結果

2つの条件について再現性が90%を超え、タイミングの一致度が閾値を越える触覚センサをプロットしたのが図8である。

この結果より、再現性が得られた接触部位の多くが重複すること、NC条件のほうが再現性の高い接触領域が広いことがわかる。条件Cでは、重心が円柱の中央にあるために、重心が手のひらから外れることがなく安定性が高いのに対し、条件NCでは、重心が手のひらから外れやすく不安定な条件である。すなわち、安定なタスクにおいてより分散が大きいという結果が得られた。同様の結果は姿勢についても得られた。

このような分散構造の違いを、手指運動において、接触部位とタイミングについて解析した例は世界で初である。

(6) 人の動作生成原理に関する考察

生物の手指運動制御に関する知見を調べると、手指の独立な運動を生成することができる脊髄路は、皮質脊髄路と赤核脊髄路であり、同時に動かすことは網様体脊髄路でも可能ということが明らかになっている。

小脳による自動的な運動は、赤核や網様体への投射があることから、これら2つの脊髄路が、手指の自動運動については担うことが考えられるが、人の場合、赤核脊髄路が退化していると考えられており、皮質モータニューロンが手指の巧みさと相関することから、皮質脊髄路とその発達、人の手指運動の巧みさに寄与すると考えられてきた。

しかし、本研究で示した結果は、タスクの難易が高い条件で接触運動の分散が小さくなるというものであり、人は難しい条件下でより調整を行っていることを示す。このような結果が得られる理由を考察するとき、小脳による自動的な運動によってスキルの実現の大部分がなされており、タスクの難易度に応じて、皮質からのさらなる調

整が行われるという仮説を立てることができ。(皮質脊髄路と脳幹脊髄路系とでニューロン数が皮質脊髄路で圧倒的に多く、分散の大きな運動を生成するのに小脳 脳幹脊髄路系のほうが合理的であると考える。)

脳の解剖学的な知見は、システムが上記の仮説のように動くことを示唆し、本研究の結果は、人の手指の運動であっても小脳-脳幹脊髄経路の自動的な運動が生じうることを示唆するものと考えている。これが真実であれば、従来退化したと考えられてきた赤核脊髄路が人の手指の運動制御に使われていることを意味し、リハビリテーションなどの分野にもインパクトを与える結果であるといえる。

また、従来のロボット制御では、系が不安定であるほど、制御の分散が大きくなるのに対して、人では逆に、安定性の高いタスクで分散が大きくなるという結果が得られた。このような結果は、われわれが過去に全身運動で得た結果を手指に対しても示したことを意味する。これらの結果は、新しいロボット制御の方法を構築する上でも重要な知見であると考えている。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

大村吉幸, 慣性センサによる手の姿勢計測時のドリフト削除, 第 18 回ロボティクスシンポジウム, 査読あり, 2013, pp.316-321.

鷺坂隆志, 大村吉幸, 長久保晶彦, 國吉康夫, 尾崎和行, 皮膚の変形に追従する高密度触覚センサグローブ, 日本ロボット学会誌, 査読あり, Vol.30, No.7, 2012, pp.711-717.

Takashi Sagisaka, Yoshiyuki Ohmura, Yasuo Kuniyoshi, Akihiko Nagakubo, Kazuyuki Ozaki, Development and applications of High-Density Tactile Sensing Glove, EuroHaptics2012, 査読あり, 2012, pp.445-456.

〔学会発表〕(計 2 件)

若田部亮, 山田康智, 鷺坂隆志, 大村吉幸, 國吉康夫, 高時間分解能データグローブを用いた物体操作のロバストな接触運動パターンの抽出, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2014 in Toyama, 2014 年 5 月 25 日, 富山国際会議場

大村吉幸, 國吉康夫, 分布姿勢センサによる手の運動計測システム, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 19 日, 札幌コンベンションセンター

〔産業財産権〕

出願状況(計 1 件)

名称: 圧力センサ及びその製造方法並びに圧力検出モジュール

発明者: 國吉康夫, 大村吉幸, 鷺坂隆志, 長久保晶彦, 尾崎和行

権利者: 国立大学法人東京大学, 産業技術総合研究所, 日本メクトロン株式会社

種類: 特許

番号: 特願 2011-121090 号

出願年月日: 23 年 5 月 30 日

国内外の別: 国内

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.isi.imi.i.u-tokyo.ac.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大村 吉幸 (OHMURA, Yoshiyuki)

東京大学・大学院情報理工学系研究科・助教

研究者番号: 10598022