

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2016～2017

課題番号：16K12474

研究課題名(和文) 触力覚他部位提示による能動的触認識の特性解明

研究課題名(英文) Characteristic of tactile recognition by alternative haptic presentation

研究代表者

広田 光一 (Hirota, Koichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号：80273332

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)：操作にともなう触力覚が操作手ではなく足裏にフィードバックされる状態における、運動と触力覚の統合による触認識の特性を調査した。足裏の128点に力(圧力)提示を行うことのできるデバイスを開発し、これを用いて代替提示の場合の重さ・柔らかさ、2次元形状、3次元形状の認識特性を評価した。重さ・柔らかさについては、手による場合と近い精度が得られる可能性が示された。2次元形状の認識については、同じデバイスを手に用いた場合と同様の正答率および時間での遂行が可能であった。3次元形状の認識では、手に同じ自由度の刺激提示を行った場合と比較して、正答率と時間ともに劣ることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：We investigated the characteristics of tactile recognition by integration of body motion and haptic sensation in a state in which haptic sensation accompanying operation is fed back to the foot rather than the operating hand. We developed a device capable of presenting force (pressure) to 128 points on foot sole, and evaluated weight / stiffness, two-dimensional shape and three-dimensional shape recognition characteristics in case of the alternative presentation. For weight and stiffness, it was proved that the accuracy close to that by hand was obtained. Regarding recognition of two-dimensional shape, it was possible to perform the recognition task at the correct rate and time as in the case of using the same device to hand. In recognition of three-dimensional shape, it became clear that both correct answer ratio and completion time are inferior compared with the case where stimulus presentation with the same degree of freedom is given to the hand.

研究分野：ヒューマンインタフェース

キーワード：触力覚 触認識 触力覚デバイス バーチャルリアリティ ヒューマンインタフェース インタラクション

## 1. 研究開始当初の背景

VR やテレイグジスタンスの分野において触力覚提示の技術が検討されてきたが、今なお十分な性能をもつ提示デバイスは実現されていない。力覚提示については、自由度の拡大が試みられているが、今なお、各指先への独立な力提示が可能な程度である。圧覚提示は、コンパクトな機構により圧迫力や剪断力を提示する手法が検討されているが、多くは母指・示指の指先への提示にとどまっている。電気刺激による触感提示は、刺激密度が比較的高く分布の表現も可能であるが、操作力の感覚の提示には適さないと考えられる。他部位への提示はほとんど検討されていない。実践的な試みとしては、触診の教示の際に対側手あるいは同側手背面に触力覚を提示する手法が提案されているが、限定的状況での検討に留まっている。触覚パターンの認識については、視触変換システムに関する研究があり、たとえば OPTACON では長期間(数か月)の習熟によりある程度有効な速度で文字パターンの読み取りが可能になると報告されている。

申請者はこれまでに VR 環境における操作に関する検討を行っており、この中で、対象と手との面的接触を触力覚情報として提示する必要性と、現在の触力覚提示デバイスの限界を認識してきた。触力覚情報の聴覚による代替提示についても検討を行ったが、面的なパターンの提示が難しいことから悲観的である。また、予備的な実験として対側手への触力覚提示による形状認識や把持操作の評価を行い、比較的単純な作業は遂行可能であることを確認した。これらの試行錯誤を通して他部位提示の着想に至った。また、この予備実験を通して、他部位提示における触認識特性についてより詳細な分析が必要であることが明らかになった。このため本申請課題では、物体の把持操作のような複合的なタスクではなく、位置や形の触認識など、操作の要素となる認識過程の分析へと研究を発展させることとした。

## 2. 研究の目的

手を使った操作に伴う触力覚を、操作手とは異なる部位に提示(他部位提示)した場合の触知覚の特性を解明する。他部位提示を通して知覚される対象物の位置および形の認識特性に焦点を当てる。指および掌が机上面に拘束される平面運動と、そのような拘束がなく指の関節の屈曲も許す空間運動の2条件で認識精度を評価する。また、触力覚を提示する他部位として操作手でない側の手(対側手)および操作手と同じ側の足(同側足)を扱う。触力覚の他部位提示の可能性が示されれば、VR やテレイグジスタンス環境における応用が期待される。本申請課題はそのための基礎的な知見を提供するものである。

## 3. 研究の方法

操作にともなう触力覚が操作手とは異なる他部にフィードバックされる状態における、運動と触力覚の統合による触認識の特性を調査した。具体的には以下を検討した。

### (a) 操作環境の構築

手指の計測と操作のシミュレーションを行うことのできる VR 環境を構築した。手指の運動計測には磁気式センサを用いるものとした。爪と手の甲にセンサを装着し、これらの計測値から手のリンクモデルの関節角を推定する手法を検討した。手モデルとしては、これまでに代表者らが開発してきたものを用いた。また、次項で開発された触力覚提示デバイスで出力する力の計算手法を開発した。

### (b) 触力覚提示デバイスの開発

触力覚提示デバイスを開発した。エアシリンダを足のサイズに合わせて配列することで、分布的な圧力提示を実現する方式による実装を検討した。刺激点数を128点まで拡張することを試みた。

### (c) 触認識特性の評価

予備的な特性評価実験を行った。触覚代替提示による触認識の基礎的な特性として、重さ柔らかさの認識、2次元および3次元形状の触認識について検討した。

## 4. 研究成果

### (a) 操作環境の構築

触覚提示デバイスと統合して評価実験に使用するための VR 操作環境を開発した。後述の評価実験の違いにより2つの環境を構築した。一つは、手モデルを用いて3次元的な手の動きに伴う VR 物体との接触をシミュレートすることで接触力を計算するもの(以下、3D 環境)であり、もう一つは、机上面での手の2次元的な動きに対して、あらかじめパターンとして定義された力を提示するもの(以下、2D 環境)である。

3D 環境には、操作者の動作計測や視覚情報提示のためのシステムと、手の動きに関する接触力のシミュレーション手法が含まれる。操作者の動作は手と頭部の運動を計測することとした。これらの計測には、磁気センサ(Liberty 240、Polhemus)を用いた。手については、掌と指先端(爪)の位置と方向を測定し、そのデータに基づいて手モデル(VR 手)の状態を推定した(図1(a)(b))。頭部は、立体視用の眼鏡にセンサを取り付け、この計測値から視点位置を推定した(図1(d))。有限要素法(FEM)とペナルティ法を用いた VR 手の変形解析により、VR 手と VR 物体との接触力を算出している。シミュレーションの更新レートは、接触面積(ノード数)の増減に応じて変動するが、約100Hzである。

後述のように、触覚提示はピンアレイデバイスによって実現される。すなわち、手モデルの各ノードについて計算された接触力から、デバイスの各ピンが提示する力を計算す

る必要がある。現在の実装では、ノードとピンのマッピングを以下のように決定している (図 1(c))。まず、手のモデルに手のひらが平らで指が整列する姿勢をとるように変形させ、この状態で、ノードの2次元位置を計算する。次に、このノードの2次元位置にピンアレイのピン位置に重ね合わせ、各ノードを最も近いピンに対応付ける。各ノードに力が計算されると、各ピンにマップされているノードにおける力の総和 (ベクトル値) を計算し、その絶対値をピンの出力とする。なお、手の甲の側にあるノードはマッピングから除外された。

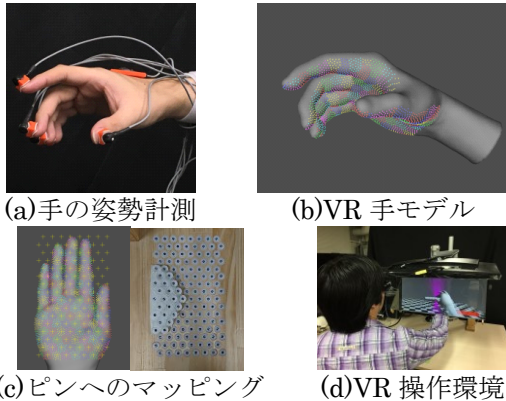


図 1 操作環境(3D 環境)の構築

2D 環境では、物体に加えられた接触力を手モデルを用いずに2次元の力パターンで近似した。相互作用における各ピンの接触点を表すために仮想のピンアレイが定義された。磁気センサ (Fastrak、Polhemus) によって得られた掌または圧力装置の動きによって仮想のピンアレイの位置および方向が更新される (図 2(a))。各仮想のピンの位置における力の強さをパターンから読みだすことで力を決定する (図 2(b))。力パターンは、グレースケール 512×512 画素の 256 階調の2次元画像として定義され、力は階調値に比例して定義された。磁気センサによる追跡を含む力計算の更新レートは 60Hz であった。

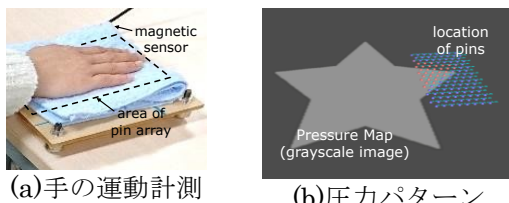


図 2 操作環境(2D 環境)の構築

(b) 触力覚提示デバイスの開発

触覚刺激を生成するために、エアシリンダのアレイを使用することとした。エアシリンダはそれ自身が動力源をもたないため比較的小型の実装が可能であり、すなわち高密度の配置が可能になる。実装では、エアシリンダとして金属製のピンをプラスチックパイ

プに挿入した構造を用いた。ピンの直径は 3mm とした。エアシリンダのアレイ (ピンアレイ) は、正エアシリンダ 128 本を 10mm の間隔の三角形の格子状に配置することで、70mm×130mm の領域をカバーしている (図 3(a)(b))。エアコンプレッサを圧力源として用い、エアシリンダに作用する圧力を電空レギュレータ (VY1B、SMC) でコントロールした (図 3(c))。すべてのエアシリンダの圧力は独立に制御することができる。作動空気圧が 0.5MPa のとき、各ピンの出力は 3.5N であった。電空レギュレータへの出力圧力を指令するアナログ電圧は、マイクロコンピュータ (H8 / 3664F、RENESAS) と DA コンバータ (LTC1660CN、リニアテクノロジー) によって生成された。PC からの指令値をシリアル通信によりマイクロコンピュータに送ることにより、ピンの発生力が変化する。アナログ電圧の更新レートは約 50Hz である。

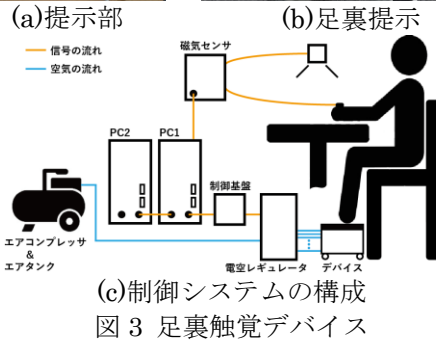
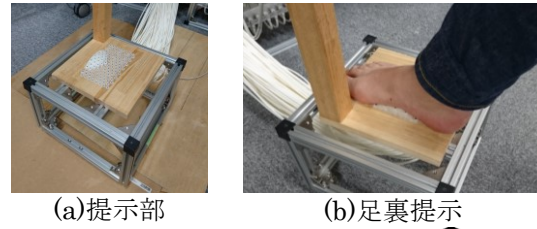


図 3 足裏触覚デバイス

足用装置を足に用いた実験では、土踏まずのエアシリンダの高さを調整することにより、皮膚表面とピンとの間の隙間を減少させた。一方、装置を手で使用する実験では、デバイスにボールキャスタを取り付けることで、手を水平面内で容易に動かすことができるようにした。

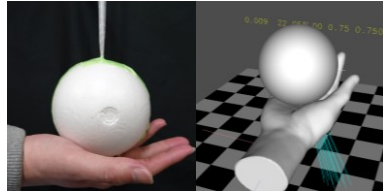
(c) 触認識特性の評価

(c-1) 重さおよび柔らかさの認識

手で物体を持ち上げている間に加えられた力の強度から物体の重量の推定することができる。また、物体の表面を押すときの力と変位との関係は物体の柔らかさを認識するのに役立つ。この実験では、足裏への代替提示を行った場合の重量と柔らかさの認識精度を評価した。柔らかさの認識に関して、皮膚表面の接触面積の変化も柔らかさを認識するための手掛かりとして使用されることが知られているが、本実験では物体は変形しないものとした。

実験の設定を図 4 に示す。この実験は、上

述の 3D 環境を用いて行った。実物体の重さおよび柔らかさを基準刺激として、VR 物体による比較刺激（足に提示される）が実物体と等しく感じられるようにパラメータを調整する方法（調整法）により被験者の認識を調査した。被験者は 12 人（男性 10、女性 2、年齢 22-26 歳、全員右利き）であった。



(a) 重さの提示（左：実環境、右：VR 環境）



(b) 柔らかさの提示（上と同様）

図 4 重さおよび柔らかさの認識実験

結果を図 5 に示す。重さについては、被験者が比較的正確に認識できることが示された。この結果は、手に作用する重さを足裏代替提示によっても認識できることを示している。なお、0.5kg の球では比較的大きな誤差が観察されているが、これはおそらく、ピン重量に対する出力力の補償が行われなかったことによる可能性がある。

柔らかさについては、基準刺激に対して平均 20% の誤差で柔らかさが認識されたことを示している。柔らかさについても、足裏代替提示の可能性が示唆されたと考えている。

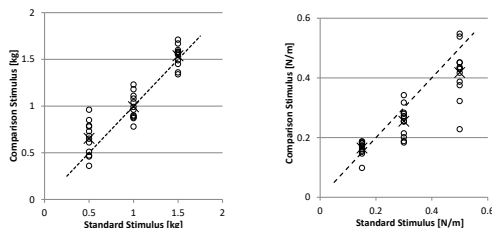


図 5 重さおよび柔らかさの認識特性

### (c-2) 2次元形状の認識

手で触れることによって物体の形状が認識される。この実験では、足底への圧力の代替提示下での認識の特性を評価した。

この実験は、上述の 2D 環境を用いて行った。机上面での手の動きにしたがって、形状のパターンに応じた力が、被験者の足または手に提示された。認識率および完了時間を被験者の特性として記録した。条件は、フィードバックの対象として足(S)および手(P)、触覚提示の領域として手または足全体(A)および指先の領域のみ(F)の組み合わせ、すなわち全体で 4 条件とした。手への提示(P 条件)の場合は、触覚提示装置にボールキャスター

に取り付けてテーブルに置き、被験者は装置を手で動かした。足の場合、装置は床に置かれ、被験者は足をその上に置いた。ボールキャスターのついた台車に手を載せることで、被験者が手を動かす際の摩擦を軽減した。

実験で提示した形状（圧力パターン）を図 6 に示す。ピクセル強度に比例する力が装置によって出力された。実験では、輝度が 255（画像の白い部分）で 1.4N の力が出力されるように比例係数を決定した。VR 環境では、図形の形状は 460mm×460mm の領域にマッピングされた。形状は 4 つのグループに分けられ、各グループは 5 つの認識タスクを実行するために使用され、グループから異なる形状が提示される。グループ分けは、形状の特徴を考慮せずランダムに行った。順序効果を低減するために、提示形態と条件の組み合わせを被験者ごとに変更した。被験者は 10 人の被験者（男性 8、女性 2、22-26 歳、全員右利き）であった。

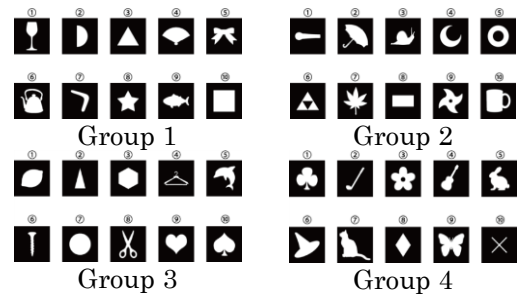


図 6 形状認識(2D)の提示パターン

正解率と完了時間の結果を図 7 に示す。正答率は SF 以外の条件で 75% 以上であった。SF 状態は他の状態よりも低い、チャンスレベルより高い。フィードバックの部分 (P/S) と提示の領域 (A/F) の 2 つの要因による分散の二元分析が行われ、いずれの要因も結果に有意な影響を及ぼさないことが判明した。完了時間に関しても、P/S および A/F の因子による双方向分析を行い、A/F の効果が有意であることが証明された。一方、P/S と A/F との相互作用は有意ではなかった。この結果から、手 (P) および足 (S) の状態に有意差は観察されなかった。したがって、足への代替提示は、手に提示するのと同じ効果をもたらすと考えることができる。

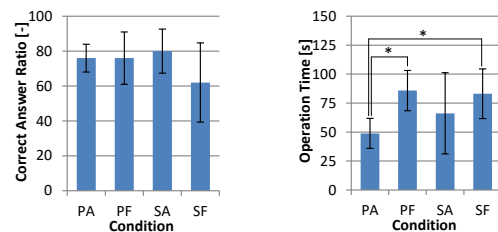


図 7 形状認識(2D)の特性

### (c-3) 3次元形状の認識

手で 3次元の物体の表面を探ることで、体性感覚と触覚の統合により形状を認識する



作業である。この実験は上述の 3D 環境に 3 次元の VR 物体を定義し、これとの接触力を計算し提示することで行った。条件として、足裏代替提示（足裏デバイス）に加えて、手指に触覚提示を行うデバイスを用いた場合についても検討した。手指のデバイスはこれまでに研究室で開発してきたもので、手全体にはほぼ等しい密度の刺激を提示するもの（手デバイス 1）と指先の密度を比較的高くする不均一性を与えたもの（デバイス 2）を用いた（図 8）。対象としての 4 種類の形状（それぞれ、正四面体、正八面体、トーラス、棒）を用いた（図 9）。いずれも体積が約 0.004 m<sup>3</sup> となるようにサイズを調整した。認識特性の指標として、被験者ごとの正答率および回答時間を得た。被験者は 8 名（男性 6、女性 2、年齢 20-23、足のサイズ 23.5-27.5 cm、右利き 7、左利き 1）であった。



図 8 手に触覚提示を行うデバイス

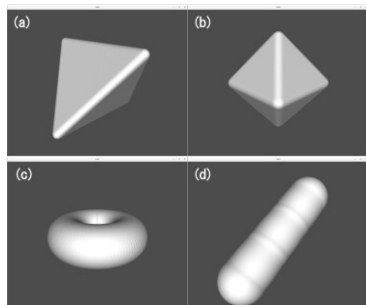


図 9 形状認識(3D)の提示形状

結果を図 10 に示す。正答率については、足裏デバイスは 2 つの手デバイスよりも劣っている傾向がみられるが、分散分析の結果からは有意とは言えなかった。回答時間についても、足裏デバイスは 2 つの手デバイスよりも多くの時間を要する傾向がみられ、Bonferroni 法による対応ある多重比較をにより、手デバイス 2 と足裏デバイスとの間に有意な差 ( $p > 0.05$ ) が見られた。

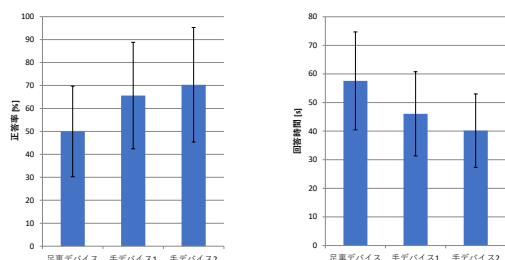


図 10 形状認識(3D)の特性

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 0 件)

〔学会発表〕 (計 7 件)

- Keigo Hiki, Tetsuhiro Okano, Sho Sakurai, Takuya Nojima, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei, Koichi Hirota: Substitution of hand-object pressure cues with the sole of the foot for haptic presentation using a tactile pin array; EuroHaptics 2018, 2018 (accepted)
- 谷口 登章, 櫻井 翔, 野嶋 琢也, 広田 光一: 空気圧駆動ピンを用いた多点圧覚提示デバイス; 日本 VR 学会第 22 回大会予稿集, 2D1-04, 2017
- Tetsuhiro Okano, Kengo Hiki, Koichi Hirota, Takusya Nojima, Michiteru Kitazaki, Yasushi Ikei: Development of a Sole Pressure Display; Proc. AsiaHaptics 2016, 67E-2, 2016
- Shunsuke Fujioka, Takao Uchiyama, Kazuyoshi Tagawa, Koichi Hirota, Takusya Nojima, Katsuhito Akahane, Makoto Sato: Object Manipulation by Hand with Force Feedback; Proc. AsiaHaptics 2016, 66E-1, 2016
- 藤岡 駿介, 広田 光一, 野嶋 琢也, 赤羽 克仁, 佐藤 誠: 力覚提示システムを用いた触覚認識に関する評価; 日本 VR 学会第 21 回大会予稿集, 32A-03, 2016
- 岡野 哲大, 日岐 桂吾, 広田 光一, 野嶋 琢也, 北崎 充晃, 池井 寧: 空気圧駆動型デバイスを用いた足裏への触覚提示による物体の位置認識; 日本 VR 学会第 21 回大会予稿集, 11A-05, 2016
- 日岐桂吾, 岡野哲大, 広田光一, 野嶋琢也, 北崎充晃, 池井寧: 足裏触覚提示による位置認識精度の評価; 日本 VR 学会研究報告, VRUR1, 23-26, 2016

〔図書〕 (計 0 件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

〔その他〕 なし

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

広田 光一 (HIROTA, Koichi)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・教授

研究者番号: 80273332

(2) 研究分担者 なし