

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：12612

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20H04224

研究課題名（和文）多点圧覚提示装置を介した形状触認識特性の解明

研究課題名（英文）Characteristics of haptic shape recognition through multipoint pressure sense presentation device

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） 8,500,000円

研究成果の概要（和文）：多点圧覚提示は、皮膚上の離散的な点に力を作用することで実現され、多くの場合、物体表面上での皮膚の拘束は行なわれない。離散化と拘束力の欠如の影響について、表面にガラス粒子を配したグローブとウレタンフォームで成形された物体を用いて評価した。実験の結果から、物体のやわらかさによる反力の低減を刺激点の密度の向上により補うことができる可能性が示唆された。高密度な多点刺激を提示可能なデバイスを開発し、これを用いた形状パターンの認識特性を評価した。文字形状パターンの認識を行なうことが可能で、その際に提示面積が認識精度に影響を与えることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

物体のやわらかさによる反力の低減を刺激点の密度の向上により補うことができる可能性を示唆する結果が得られたことは、触覚デバイスの設計に重要な知見を与えている。高密度な触覚デバイスによる形状パターンの認識の特性や、刺激点の数が認識精度に与える影響に関する知見は、今後のデバイス設計の参考となる情報を提供すると期待される。変形最適化の計算手法の提案は、触覚表現計算の新しいアプローチを提案するもので、デバイスの能力を最大限に引き出す手法として新規性が高いと考えている。デバイスの自由度が不足している場合には、デバイスにより目標状態を表現することはできず、最適な近似表現を考える必要がある。

研究成果の概要（英文）：Multi-point pressure sensation presentation is achieved by applying force to discrete points on the skin, and in many cases, the skin is not constrained on the surface of the object. The effects of discretization and lack of constraint were evaluated using a globe with glass particles on the surface and an object molded from urethane foam. The results of the experiment suggested the possibility that the reduction in the reaction force due to the softness of the object could be compensated for by increasing the density of the stimulus points. We have developed a device that can present high-density multipoint stimuli, and evaluated the recognition characteristics of shape patterns using this device. It was clarified that it is possible to recognize character-shaped patterns, and that the presentation area affects the recognition accuracy.

研究分野：触力覚提示

キーワード：触力覚提示 触認識 ハプティックス バーチャルリアリティ ヒューマンインタフェース

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

触力覚の提示技術は、古くはテレオペレーションにおける操作において、最近ではバーチャルリアリティ（VR）環境における物体とのインタラクションにおいて、その必要性が指摘されている。触力覚を通してオペレータあるいはユーザが認識する情報は多様である。接触・拘束・すべり・作用力・重さなどについては、対象物の操作における重要性から多くの研究が行われてきた。触力覚には接触対象の材質や表面の特性に関する情報も含まれ、それを通して得られる質感についても研究が進められている。対象物の形状も触力覚を通して得られる情報であり、心理学的な視点での研究は行われているが、人工的に提示された触力覚による形状の認識は必ずしも興味を集めてこなかった。形状の認識には人と対象物との面的な接触、すなわち、接触領域での分布的な接触力の情報が必要であり、これを表現することのできる提示装置（デバイス）の実現がこれまで難しかったことによると考えられる。

面的な接触の表現は、多くの自由度を使って皮膚に分布的な刺激を与えるデバイスによって実現されると考えられる。触力覚に関係する感覚（知覚される情報）として、力覚・圧覚・振動覚・電気触覚・皮膚変形感覚などが含まれ、機械的な作用をあたえる手段として、モータ・ソレノイド・VCM・偏芯モータ・ピエゾ素子・SMA・空気圧などが検討されてきている。皮膚表面に分布的な刺激を与えるためには、アクチュエータの大きさが提示したい刺激の密度で実装できる程度に小型である必要があり、従来の研究でも VCM・空気圧・電気刺激などが用いられている。最近では従来よりも、高密度・広範囲をカバーするデバイスが検討され、形状認識の特性を評価する研究も出てきているが、結果として得られているパフォーマンスは現実と比べると非常に低い。

2. 研究の目的

本研究の目的は、触覚提示装置（デバイス）による離散的な圧覚刺激を提示する環境における形状の触認識の特性を明らかにすることである。刺激の密度・提示範囲・拘束の欠如などが形状認識に与える影響を定量的に明らかにすることを目標とする。

本研究では、形状の触認識に関して、実物体を用いた評価と、デバイスを用いた評価の両面からアプローチする。実物体による評価では、接触点を離散化する手袋と柔軟な素材の実物体によりデバイスによる表現を模擬する。これにより、現在のデバイスでは実現が困難な高密度まで条件を広げた実験を行うことができる。デバイスによる評価では、刺激密度や提示範囲の設計自由度が高いデバイスを開発することで、従来のデバイスでは難しかった、刺激を手の掌側全体に提示する条件での評価を可能とする。両者の結果を総合することで、多点圧覚提示による形状触認識の特性を解明し、デバイスの設計の基礎となる知見を得る。

3. 研究の方法

(1) 実物体による評価

実物体による評価では、手袋の表面にパッドを張り付けることで接触点の離散化を模擬する装具（離散化グローブ）と発泡ウレタンで作成した柔軟な物体（柔軟物体）を用いて、接触点密度・接触範囲・拘束力低減などの条件と触認識の正答率・所要時間との関係を網羅的に調査する。離散化グローブの作成には、薄くて柔軟な手術用ゴム手袋を使用する。パッドは、ガラスビーズの使用を考えている。柔軟物体は、柔らかさの異なる複数の発泡ウレタン素材を用いて作成する。これにより、同一の形状に対して拘束力の大きさの異なる複数の条件での接触を表現することができる。触認識に拘束力が与える効果を調べることができる。

(2) デバイスによる評価

デバイスによる評価では、圧覚提示デバイスとシミュレーションによる形状触認識の特性を評価する。圧覚提示を選択したのは、振動覚や電気触覚よりも現実の接触に近い性質の刺激を与えることができると考えたためである。圧覚提示デバイスには、空気圧を利用したアクチュエータ（エアシリンダ）を配列したものを使用する。ベースにあけた円筒穴をシリンダ、ピンをピストンとすることで構造を簡略化し、ベースを 3D プリンタで作成することで、密度や配置について自由度の高い設計を可能とする。

4. 研究成果

(1) 実物体による評価

フィルムの表面にガラス粒子を張り付けた指サックを製作した。ガラス粒子は球形で、表面に鋭いエッジを持たず不必要な触覚刺激を生成しない。ガラス粒子は大きさの異なる 5 種類（d1～d5 と呼ぶ）を使用し、直径はメーカーの公表値で、0.425、1.194、2.0、3.0、および 4.3305 mm である（図 1）。刺激の密度（すなわち粒子の密度）は、顕微鏡を使用して一定面積の領域の粒子の数を数えることで求めた。指サックのフィルムは天然ゴムで弾力性があり、伸長していない状態での厚さは 0.1mm である。対象物の材料には、ウレタンフォームを使用した。柔らかさの異なる 3 種類（S1～S3 と呼ぶ）を使用し、25%硬さは 80、156.8、400.35 N である（図 2）。物体の形状は 3 種類（直方体、台形、三角形）として、以下の実験では形状を判別するタスクを行う。

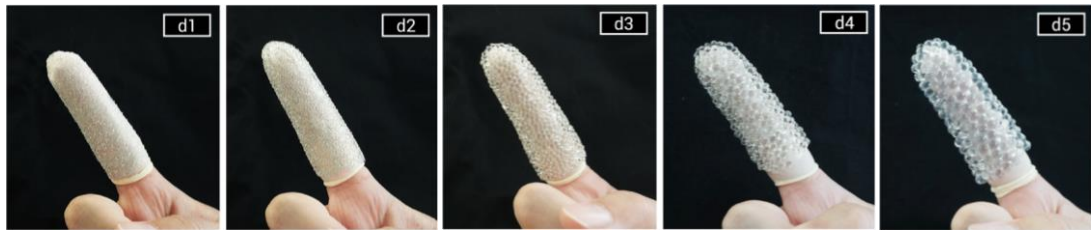


図1 ガラス粒子のサイズの変化



図2 ウレタンフォームの硬度の変化

被験者のタスクは、指サックをして物体に触り、いずれの形状であるかを回答する事である。指サックのガラス粒子の大きさ5種類、物体の柔らかさ3種類と形状3種類、反復3回で、全体で135回のタスクを行い、その際の回答と遂行時間を記録した。被験者は10人であった。

分析では、それぞれの条件における正答率と遂行時間について分散分析を行った。正答率については、粒子の大きさおよび物体の柔らかさによる有意な主効果は見られなかった。遂行時間については、粒子の大きさおよび物体の柔らかさによる主効果が見られた。このことから、ガラス粒子が小さく刺激の密度が高いほど、また、ウレタンの硬度（物体の反力）が高いほど、認識率が向上することが示された（図3）。

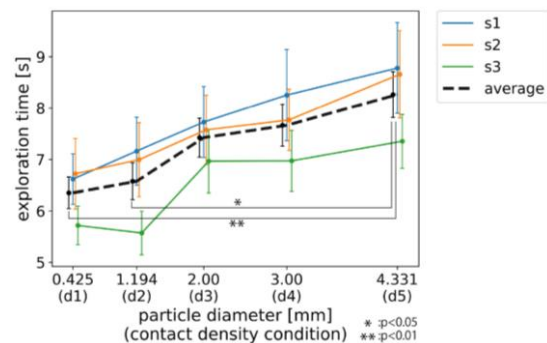


図3 条件による遂行時間の違い

この結果で興味深いことは、この実験の条件の範囲では、物体のやわらかさによる反力の低減を刺激点の密度の向上により補うことができる可能性が示唆されていることである。拘束力のない触覚デバイスを用いる場合に、触覚デバイスの高密度化により影響を軽減できれば、触覚デバイスの利用範囲を拡大することができる。

(2) デバイスによる評価

デバイスは示指（人差し指）に装着するように設計された。デバイスは128個の可動ピンをもち、これらを空気圧で駆動することで皮膚に押し当てて圧力の刺激を生成する。力を発生する仕組みはエアシリンダと同様であり、円筒形の穴（シリンダ）をピン（ピストン）が摺動する。ピンの直径は1mm、ピンの間隔はおよそ1.4mmの千鳥配列、ピンのストロークは5mm程度である（図4）。ピン毎に圧力制御バルブをもち、空気源（コンプレッサ）で生成された圧縮空気の圧力を独立に制御することができる。装着部分の重量はおよそ600gであり、以下の実験ではゴムひもで支えること重量を相殺し被験者の負担を軽減している。

デバイスを用いて形状の触認識の特性に関する調査を行った。示指指先による2次元的なパターン認識の評価した。英文字（A~Jの10種類、図5）の全ての組み合わせの弁別について、全128点を使用した条件（full）と、中心部の66点を使用した条件（half）とで、弁別率を調べた。練習フェーズでは文字の情報がディスプレイ上に視覚情報として提示され、それぞれの文字について視覚と触覚による認識を許された。実験フェーズでは、提示された文字形状を触覚情報のみに基づいて回答する。回答の制限時間は10秒とした。各被験者は、文字10種類、触覚条件2種類、反復6回の、120回のタスクを行なった。

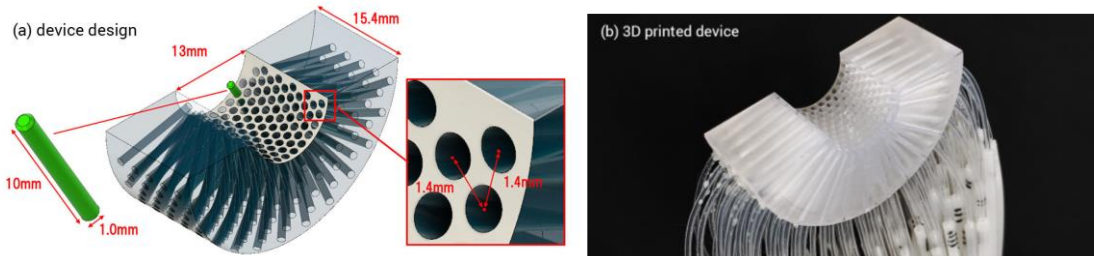


図4 ピンアレイデバイスの設計と実装

その結果、平均の認識率が full では 93%、half では 87%で、有意な違いがみられた ($p < 0.01$)。このことは、パターンの認識に密度だけでなく刺激が同時的に提示される領域の広さがパフォーマンスに影響することを示している。また、パターン（文字の形状）の類似性によって混同しやすい組み合わせ（「G」を「B」「D」と誤るなど）があることが示された（図6）。



図5 提示した文字形状

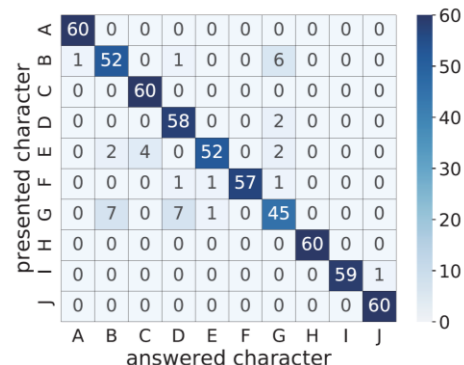


図6 混同行列 (full 条件)

本研究で開発した触覚デバイスは刺激の密度の点で最高レベルの性能をもっており、この密度による形状パターンの認識の特性を明らかにすることができたことは意義があると考えている。刺激点の数が認識精度に影響を与えることから、密度の向上の際に刺激の提示範囲を犠牲にするべきではなく、全体としての自由度の向上が必要であることが示唆される。

(3) 触覚表現計算に関する検討

検討の中で、デバイスによる触覚提示においては、デバイスの解像度だけでなく、デバイスの制御方法によっても認識しやすさが変化することを改めて認識した。圧迫力を提示するデバイスの制御では、一般的には皮膚上の圧力を再現する考え方が採られる（力最適化：FM）。これに対して、指に作用する力ではなく、デバイスの作用によって指に生じるであろう変形を目標の変形状態（シミュレーションにより得られた指の変形状態）に近づけることで、より適切な触覚提示をおこなうことができるのではないかと考えた（変形最適化：DM）。

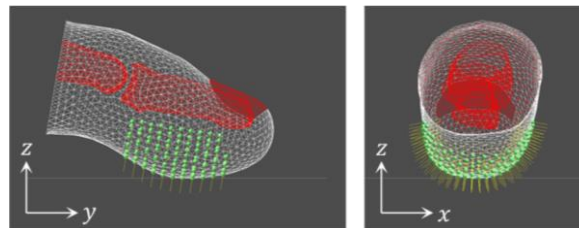


図7 指の変形シミュレーションモデル

物体との接触で皮膚の接線方向に生じる摩擦力の表現について、この考え方の有効性を評価した。ピンの可動方向が皮膚の面におよそ垂直なデバイスでは、接線力の提示は一般的には困難であると考えられる。指の変形のシミュレーションモデルを構築し（図7）、これを用いて接触に伴って指に作用する力（目標の力）と指の変形（目標の変形）を計算した。力最適化（FM）では、目標の力とデバイスが指に作用する力（作用力）との誤差が最小になるように力を計算した。変形最適化（DM）では、目標の変形と作用力による指の変形（シミュレーションで計算）との誤差が最小になるように作用力を計算する。さらに、デバイスには負の力（皮膚をひっぱる方向の力）を作用できないという制約がある。以下では、この制約を考慮しない計算をFM1 およびDM1、考慮する計算をFM2 およびDM2 と表記する。従来の触覚表現計算ではFM1 に近い方法が採られ

ており、本研究で提案する方法は DM2 である。

以上の触覚表現計算により指に生じることが期待される変形を計算した結果、DM2 が目標の変形に最も近い結果を生じることが期待されることが確認された (図 8)。また、指に作用する力の方向の知覚について被験者を用いた評価を行い、FM1 の計算方法では摩擦に伴う接線力をほとんど知覚できないのに対して、DM2 の方法では接線成分が知覚されることを確認した (図 9)。

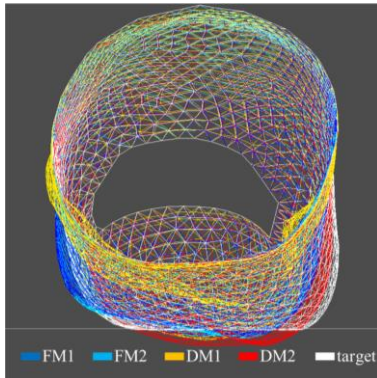


図 8 提示計算毎の予想変形状態

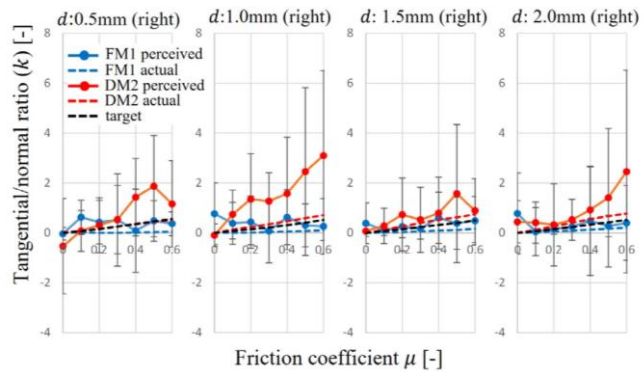


図 9 知覚される力の方向 (接線力/法線量の比)

以上の結果から、変形最適化の計算手法は触覚表現手法として効果があると考えている。一般に、デバイスの自由度が皮膚上で表現したい自由度より小さい (すなわちデバイスの自由度が不足している) 場合には、デバイスにより目標状態を表現することはできず、近似的な表現をおこなう必要が生じる。変形最適化は近似のための一つのアプローチと位置付けることができる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Ota Yusuke, Ujitoko Yusuke, Sakurai Sho, Nojima Takuya, Hirota Koichi	4. 巻 9
2. 論文標題 Inside Touch: Presentation of Tactile Feeling Inside Virtual Object Using Finger-Mounted Pin-Array Display	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 75150 ~ 75157
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3082100	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Ujitoko Yusuke, Taniguchi Takaaki, Sakurai Sho, Hirota Koichi	4. 巻 8
2. 論文標題 Development of Finger-Mounted High-Density Pin-Array Haptic Display	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 145107 ~ 145114
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3015058	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Hirota Koichi, Ujitoko Yusuke, Sakurai Sho, Nojima Takuya	4. 巻 15
2. 論文標題 Deformation Matching: Force Computation Based on Deformation Optimization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Haptics	6. 最初と最後の頁 267 ~ 279
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TOH.2022.3142053	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0件

〔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
---------	---------