



手掌部への吸引圧刺激による把持感の提示

齊藤薫¹⁾, 永野光¹⁾, 昆陽雅司¹⁾, 田所諭¹⁾

1) 東北大学大学院情報科学研究科 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-01, nagano@rm.is.tohoku.ac.jp)

概要: 手掌部に偏りのある吸引圧刺激の分布を提示することで疑似的な把握感を提示することを目的とする。本稿では、把持した円筒上の物体に並進と回転の 4 方向の外力が作用した際の手掌部に生じる刺激について検討し、また、吸引圧刺激を用いて手掌部全体に刺激分布を提示出来るデバイスを作成した。作成した刺激分布による把持物体の移動感覚の提示が可能かを検証するために、制作したデバイスを用いて心理物理実験を行った。その結果、把持物体に作用する力の方向を提示するためには、接触面ごとに刺激を偏らせた分布が有効であることが示唆された。

キーワード: 吸引圧刺激, 把持感, 手掌部

1. 緒言

人は日常生活の中で、道具を使った作業や、荷物の運搬、車のステアリング操作など様々な把持動作を行う。そのような動作では、把持物体に作用する外力を知覚し、自らの動作へとフィードバックすることで正確で失敗のない動作を行っている。このことから、VR 空間の物体の操作においても、ハプティックインタフェースで手掌部に把持感覚を提示し、把持対象に作用している外力を表現することで、臨場感や操作性の向上が期待できる。

人の把持感覚については、筋骨格系の深部感覚による力の知覚の他に、手掌部の皮膚に存在する触覚受容器を介した皮膚感覚による力の知覚が重要な役割を果たしていると考えられる。例えば、指先だけでなく指の中間部や掌を利用した把握では、皮膚感覚情報により、複数の接触部による把持物体の拘束条件の変化を知覚することで、器用な動作を実現している。

把持動作に伴う手掌部全体の触覚に着目した研究は、これまでいくつか報告されている。例えば、電気触覚を利用してロボットハンドの接触状況をユーザにフィードバックする力覚提示デバイス [1] や空気圧駆動ピンを用いて VR 空間上の物体の触覚を提示するデバイス [2] などがある。これらは触覚により物体の凸形状など、接触時の法線反力や接触圧に着目して、把持感覚を提示する研究であった。

一方、物体を把持した状態で、物体に外力が加わった際には、手掌部の皮膚には、法線方向だけでなく、せん断方向にも変形が生じる。このような把握時の手掌部に加わるせん断変形による触覚に着目する研究はほとんど報告されていない。筆者らのグループでは、指先による精密把持において、対向する 2 つの指腹部の接触面内に発生するひずみの偏りが、外力の知覚に関与することを検証し、TAKO-Pen と呼ばれる皮膚吸引刺激を用いた疑似力覚ディスプレイを

開発してきた [3]。このディスプレイは、2 本指で把握するペン状のデバイスであり、2 指の接触面がせん断変形した際のひずみエネルギーの偏りを、吸引圧刺激を用いて再現することで外力が与えられた感覚を提示する。ここで、吸引刺激とは、1~2 mm 程度の穴から負圧により皮膚を吸引した際に、ヒトが引っ張りか押し込みかが区別できなく特殊な条件が存在することに着目したものである。この原理として、特定の条件下において吸引圧を与えた際、皮下のメルケル小体が存在する深さでは、吸引によるひずみエネルギーの分布が、押し込みによる分布と区別できなくなる現象として説明されている [4]。

そこで、本研究では、手掌部に偏りのある吸引圧刺激を提示することで疑似的な把握感を提示することを目的とする。吸引圧刺激は、比較的高密度でひずみ分布を制御することが可能であり、大面積をカバーすることも可能であることから、手掌部にも適していると考えられる。筆者らのグループがこれまで研究してきた指先への吸引刺激と同様に、手掌部にひずみエネルギーの偏りを与えることで、把持した物体に外力が加わったような疑似的な把握感を提示できることが期待される。特に、把持した物体に外力が加わった際の皮膚の引き連れを表現することで、物体に特定の方向から力が加わったような疑似的な力覚が知覚できるかを検証する。本稿では、円筒状の物体を把持した際の、円筒の長軸方向への並進力および円周方向への回転力を加えた際に作用する把握感について、必要な吸引刺激について調査を行ったので報告する。

2. 吸引圧刺激を用いた把持感覚提示デバイス

2.1 仮説に基づく吸引刺激分布の検討

本節では、いかなる刺激分布を提示した際にヒトが外力を知覚するかを仮説に基づき検討する。前半では推測した仮説を示し、後半にその仮説に基づき作成した刺激分布を示す。

本稿では、把持物体への外力と刺激分布の関係に関して

Kaoru SAITOH, Hikaru NAGANO, Masashi KONYO, and Satoshi TADOKORO

2つの仮説を立てる。これらの仮説は TAKO-pen で得られた物体に外力が加えられたとき、把持物体の移動方向に対して反対側の領域が強く刺激されるという知見に基づき検討している。

第1の仮説は、ヒトは接触面全体での刺激の偏りを外力として認識するという仮説である。これは、指を対象とした TAKO-pen の知見をそのまま手掌部へと拡張して、手掌部全体を大きな一つの面と考えた場合の推論である。そのため、外力の方向を表現するためには把持物体の移動方向に対して反対側の領域を強く刺激する必要があると考えられる。

第2の仮説は、ヒトはそれぞれの接触面での刺激の偏りを統合して外力として認識するという仮説である。これは手掌部の凹凸により接触面自体が複数存在し、各接触面での刺激の偏りを統合して外力と認識しているという推論である。そのため、外力の方向を提示するためには、母指球近辺と小指球近辺などは別の接触面と考え、外力の方向に応じてそれぞれの領域ごとに刺激の偏りを作成する必要がある。

本実験では上記の2つの仮説のうち前者を採用して図1に示す分布を作成した。刺激は回転と併進をそれぞれ2つずつの計4方向の刺激の分布を作成した。ここでは刺激の強さを4段階で設定しており、赤、オレンジ、黄色、白の順で強い刺激であることを示している。図中の刺激の配置は実際のデバイスの吸引領域の配置に合わせている。吸引領域の設計については次節にて述べる。

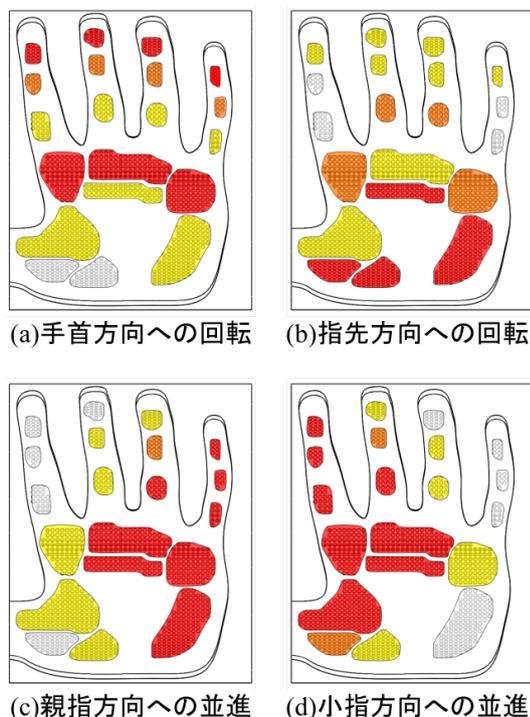


図1: 刺激の分布, 色は刺激の強度を表す

2.2 把持感覚提示デバイス

ここでは2.1節で提案した刺激を実際に提示するための装置についての説明する。まず初めに、外力の感覚を提示

するための吸引圧刺激を提示する吸引領域の設計について説明し、次に吸引孔のパラメータ、デバイスの全体のシステムの概要について説明する。

吸引領域の設計は刺激の分布に直結するため非常に重要である。そのため、吸引部の配置は、実験参加者ごとの吸引領域に大きな誤差が生じないように、事前に円筒物体を把持した際の手形を取得し、すべての参加者に共通する領域を吸引領域と定めた。吸引領域の配置は、親指を除く4本の指にそれぞれ3箇所ずつ、手掌部に8箇所の計20の領域を定めた。この領域の配置は実際に著者が経験的に決定した., それぞれ別のエリアとして分割することで設計した。

個々の吸引孔の直径および中心間距離はそれぞれ、1.4 mm および 2.0 mm とした。この値は吸引圧刺激を用いた触覚提示技術に関する先行研究 [4][5][6] を参考にしており、直径は吸引を圧覚と錯覚させる条件 [4] に基づき、中心間距離は指先の弁別閾の値 [5] に基づき決定している。

デバイス全体のシステムについて説明する。デバイスの形状を図2に示す。デバイスは半径120 mmの円筒を半分にしたような形状となっており、把持体勢をある程度固定させるために表面には手形の溝を設置している。デバイスの各吸引領域はエアチューブによってレギュレータへとつながっており、このレギュレータにマイコンから指令を送ることで領域ごとの圧力制御を可能としている。

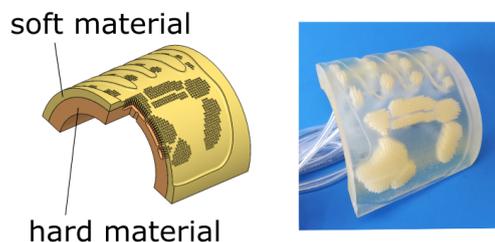


図2: 把持感覚提示デバイスの外観

3. 検証実験

以上の装置を用いて2.1節の刺激の分布により、把持物体の移動感覚が提示可能かどうか心理物理実験により調査を行った。

前半で、心理物理実験の全体の流れ、後半で試行の詳細な条件等について説明する。

実験は次のような手順で行った。まず被験者に実験の趣旨と手順を伝え概要を把握してもらった。次にリファレンス刺激として実際の円筒物体に触れ、把持物体に4方向の力が加わった時の感覚を覚えるよう指示した。その後、手をデバイスに乗せて貫き手掌部全体を同じ圧力で吸引し、その時の圧力値から空気漏れの有無を確認した。空気漏れがあった場合には、空気漏れが起きている部分を指摘し、手の位置を調節してもらった。すべての領域で空気漏れがなくなるように手掌部の位置を調節出来たら、GUIのプログラムを起動して刺激を提示し、その刺激がどの方向を表しているか回答してもらった。1セットが終わるたびに手をデ



図 3: 実験の様子

デバイスから離し、2分間程度の休憩を挟んだ。その後再び円筒に触れりファレンス刺激を感じてもらった後、再び空気漏れの確認を行い同様の手順を繰り返し行った。試行はトレーニングのための1セットとデータを取るための3セットの計4セット行った。試行中は外部の雑音を遮断するために耳当てを装着してもらった。実験の様子を図3に示す。被験者は20名の3人の男性を対象とし、全員、右手に対して実験を行った。

各試行では前述した4方向の刺激に加え、記号的に回答されることを防止するためのダミー刺激2つを合わせた6パターンの刺激を用意し、1セットにつき各パターン2つずつの計12の刺激をランダムに提示した。被験者には提示された刺激が4方向のうちどの方向に当てはまるか4択から選択してもらった。また回答には制限時間を設けず、回答するまで間は図1の白の刺激と同じ強さで手全体を吸引する2.1秒間の刺激と方向性を持たせた0.7秒間の刺激が交互に繰り返し提示されるように設定した。回答を行うと直前の刺激の影響が次の刺激の回答に影響しないように3秒間の吸引無しの時間を挟み次の刺激を提示した。

4. 結果

図1,2,3に実験の結果を示す。表は混合行列であり、提示した刺激に対して、選択肢ごとに被験者が選択する確率を示している。図中の刺激1は図1の左上の刺激(手首方向への回転)、2は右上の刺激(指先方向への回転)、3は左下の刺激(小指方向への併進)、4は右下の刺激(親指方向への併進)を表している。刺激5,6はダミー刺激である。

被験者3の回答にはあまり有意差が表れなかったが、これは空気漏れによるものと考えられる。

実験参加者1および2の結果では、並進および回転方向のそれぞれで逆の方向を回答する確率が多かった。今回提示した刺激は2.1節で述べた1つ目の仮説である”ヒトは接触面全体での刺激の偏りを外力として認識する。”という条件に基づいて作成しており、提示したい外力の方向に対して反対の領域を強く刺激するように設定していた。しかし、結果では反対に、外力の方向側の領域への刺激を外力による作用による刺激と認識していた。全体としては高い

確率でそれぞれの刺激を判別できていることが示された。

この結果に対する考察を述べる。提示した刺激の分布は外力による刺激の偏りではなく、手の姿勢による接触力の強弱と認知されてしまった可能性がある。この場合、外力の方向については提示できていなかったことになるが、実験の被験者の結果を見ると、被験者は外力の方向を識別出来ていた。理由は、皮膚の柔軟性とデバイスの吸引領域の配置に要因があると考えられる。皮膚の柔軟性により手の姿勢の変化や把持力の強弱に伴い把持物体との接触領域は変化する。そのため、外力が加わる前には接触していなかった手掌の外縁部が外力の作用により接触するという状況は容易に想像できる。しかし、デバイスの吸引領域の配置は、空気漏れを防ぐ意図のもと接触状況が変化する手掌部の外縁部を含めることは出来ず、結果的にやや中央寄りの配置となっていた。そのため、手掌部の外縁部分には刺激は提示されず、各領域に刺激を与えたとき、被験者の認識としては、接触部内で刺激に偏りがある状態として提示されていたと考えられる。その結果、接触部の刺激の分布はTAKO-penの知見である“外力の提示には物体の移動方向と反対の領域に強い刺激を与える必要がある”という条件を満たしており、結果的に外力を提示できていたと推論できる。

以上のことから、2.1節で述べた2つ目の仮説が正しく、外力の作用方向を提示するためには、手掌部全体として刺激の偏りを作るのではなく、物体との接触部それぞれに独立して刺激の偏りを提示する必要があると考えられる。

表 1: 被験者 1 の結果. 1: 手首方向の回転, 2: 指先方向への回転, 3: 小指方向への併進, 4: 親指方向への並進,

5: ダミー刺激 1, 6: ダミー刺激 2

		presented stimulus					
		1	2	3	4	5	6
answer	1	0.00	0.67	0.00	0.00	0.00	0.17
	2	1.00	0.17	0.00	0.00	0.67	0.00
	3	0.00	0.00	0.17	0.83	0.00	0.33
	4	0.00	0.17	0.83	0.17	0.33	0.50

表 2: 被験者 2 の結果

		presented stimulus					
		1	2	3	4	5	6
answer	1	0.17	0.67	0.17	0.17	0.33	0.17
	2	0.17	0.00	0.00	0.00	0.50	0.00
	3	0.33	0.00	0.00	0.50	0.17	0.17
	4	0.33	0.33	0.83	0.33	0.00	0.67

表 3: 被験者 3 の結果

		presented stimulus					
		1	2	3	4	5	6
answer	1	0.17	0.33	0.33	0.17	0.33	0.50
	2	0.00	0.17	0.17	0.17	0.00	0.00
	3	0.83	0.33	0.50	0.50	0.50	0.50
	4	0.00	0.17	0.00	0.17	0.17	0.00

5. 結言

本研究では、手掌部に偏りのある吸引圧刺激を提示することで疑似的な把握感を提示することを目的とした。把持

した円筒上の物体に並進と回転の4方向の外力が作用した際の手掌部に生じる刺激について検討し、また、吸引圧刺激を用いて刺激の分布を手掌部に提示出来るデバイスを制作した。作成した刺激の分布により、把持物体の移動感覚が提示可能かを検証するために作成したデバイスを用いた心理物理実験を行った結果、把持物体に作用する力の方向の提示には、手掌部全体に刺激の偏りを作るのではなく、接触部ごとに偏りを提示するべきという今後の方針が得られた。

謝辞 :本研究の一部は ImPACT プログラム「タフ・ロボティクス・チャレンジ」および JSPS 科研費 JP18H01401, JP18K13722 の助成を受けた。

参考文献

- [1] 武井聖也, 渡辺亮, 岡崎 龍太, 梶本 裕: 電気触覚ディスプレイおよび圧力分布センサを用いた把持型マスタハンドの開発第 19 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2014.
- [2] 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, 第 22 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2D1-04, 2017.
- [3] D. Maemori, L. B. Porquis, M. Konyo and S. Tadakoro: "A Multi-DOF Haptic Representation Using Suction Pressure Stimuli on Finger Pads," Haptics: Neuroscience, Devices, Modeling, and Applications, 9th International Conference, EuroHaptics 2014, vol. 8619, pp. 285-294, jun. 2014.
- [4] 牧野泰才, 篠田裕之: 吸引圧刺激を用いた触覚生成法, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol11, No.1, pp123-132, Mar, 2006.
- [5] 東山篤規, 宮岡徹, 谷口俊治, 佐藤愛子: 触覚と痛み, 株式会社おうふう, 2009.
- [6] 永野光, 昆陽雅司, 田所諭: 指腹における吸引圧力の空間分布制御に基づく多指装着型触覚ディスプレイ-他自由度の方向知覚の検証-, 日本バーチャルリアリティ学会論文集, 2017.