



手掌部皮膚変形提示装置が生じさせる力知覚の評価

西本和貴¹⁾, 中村拓人¹⁾, 橋本健¹⁾, 鳴海拓志¹⁾

Kazuki NISHIMOTO, Takuto NAKAMURA, Takeru HASHIMOTO and Takuji NARUMI

1) 東京大学 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1,
{nishimoto, n.takuto, hashimoto, narumi} @cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 指先を対象として皮膚を剪断方向に変形させることによる重量感提示手法が研究され、力知覚と物理量の対応が明らかにされている。他方、手掌部は指先より皮膚変形を大きく生じさせることが可能なため、より強い力知覚を提示できる可能性がある。本研究では、手のひらの特定の2点に皮膚剪断変形を引き起こせる把持型触覚提示デバイスおよび手掌部皮膚の変形量と生じる力知覚の関係を調査するための実験系を開発している。本稿ではこれまでに実装した実験系について紹介を行う。

キーワード: 触覚提示デバイス, 皮膚剪断変形, 力知覚

1. はじめに

VR 体験において、視聴覚情報の提示だけではなくさまざまな触覚提示手法が開発されており、現在一般に普及している VR コントローラでは振動提示が主な手法となっている。しかし、卓球やテニスのような VR ラケットスポーツにおいて振動刺激のみでは触覚刺激として十分ではない。例えば卓球をプレイする際には振動だけではなく、ボールの当たった位置に応じたトルクが発生する。ラケットスポーツにおいて適切にボールを打ち返すためには、手元を見ずにボールが当たった感触を頼りにすることが重要である。実際に視覚フィードバックを使った VR トレーニングシステムと触覚によるガイドを使った VR トレーニングシステムでは触覚によるガイドを使った条件の方が学習を促進させるという先行研究も存在する [1]。そのため、トレーニングの面や没入感の向上のためには、振動だけではなくトルクのような力覚フィードバックを行う触覚提示が必要となる。また、これらのより効果的な体験を多くの人に提供するためには力覚提示を VR コントローラへの組み込みが可能な形で実現する必要がある。

しかし、例えばボールの衝突を物理的に再現しようとすると装置が大型化・高重量化してしまうという課題があり、力覚フィードバック技術の開発において小型な仕組みで力覚提示を実現する試みがなされてきた。例えばボールの衝突時に発生するような衝撃を小型な装置で提示する手法として、一つの DC モーターのみを用いて打撃感を生み出す提案がされている。祖父江らはおもりつきの DC モーターを1方向に回転させたのち、逆方向に回転させることでトルク感を生じることなく反発感を生み出した [2]。しかし、このような衝撃感提示は瞬間的な感覚提示を行うことに着目しており、持続的な力覚提示が難しいという課題を抱えている。

他方、特に指先を対象として皮膚を剪断方向に変形させることによる重量感提示手法が研究され、力知覚と物理量

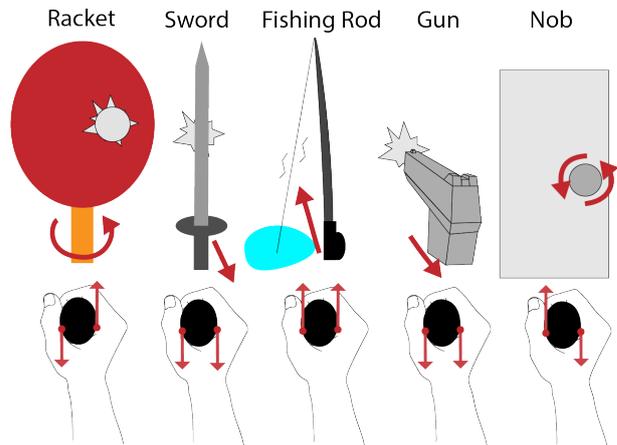


図 1: VR 環境における把持物体とのインタラクションと 2 点のカベクトルによる表現手法のイメージ

の対応が明らかにされている。南沢らが提案した Gravity Grabber では指先に取り付けたベルトを 2 つのモーターで駆動し、指先の皮膚をベルトで引っ張ることで皮膚の剪断変形を引き起こし、実際に持っている物体の重量感を変化させることが可能である [3]。また、Gravity Grabber を使ったアプリケーションとして、空の箱を持っているだけでも関わらず、ボールが箱の中に入っているという感触を作り出すことに成功している。この研究ではおもさの知覚が皮膚の変形によって引き起こされるという知覚構造を明らかにしており、物理現象を全て再現せずとも人の知覚上では同様の効果をもたらすことができる、効率的な触覚提示の可能性が示唆された。

次に皮膚剪断変形を使った力覚提示手法の例として、刺激対象部位を手掌部にしている例を挙げる。手掌部は指先より皮膚変形を大きく生じさせることが可能なため、より強い力知覚を提示できる可能性が示唆されており、これに

着目して手掌部における皮膚剪断変形を用いたゲームコントローラの提案がされている。Tactical Haptics ではスライドパッドを使って、把持物体の感触を提示可能な製品を提案している [4]。この提案手法では VR 環境の状態に応じて、さまざまな把持物体の感触の再現を試みた。しかし、この手法ではラケットで生じるような方向のトルク提示には向いていないといった課題や、生じる力知覚と実際の物理量との対応関係が明確になっていないという課題がある。

本研究では VR 環境における把持物体を使ったインタラクションの例として卓球を筆頭に剣や釣竿、銃やノブなどを想定した (図 1)。そして、これらの把持物体の動きを提示するためには図 1 の赤矢印で示すような手の特定の 2 点における力ベクトルを感じさせることで把持物体のトルク感や並進方向の動きを提示できるのではないかと考えた。

このアイデアに基づき、本研究では手のひらの特定の 2 点に皮膚剪断変形を引き起こせる把持型触力覚提示デバイスの開発を行った。さらに VR 環境において生じた力の大きさを皮膚変形によって表現するための刺激設計手法を構築することを目指し、手掌部皮膚の変形量と生じる力知覚の関係性を定式化するために心理物理実験の実施を予定している。本稿ではこの心理物理実験実施にあたって開発した実験系の紹介を行う。

2. 実験設計

本実験の目的は手のひらの特定の 2 点に提示した皮膚剪断変形によって知覚された力の大きさを物理量によって評価することである。まず、基準刺激としてデバイスによって変形量の異なる皮膚剪断刺激を提示する。その後、おもりとテグスで引っ張り力を提示して基準刺激と比較してもらうことで、知覚力の大きさと物理量の間関係を明らかにする。

2.1 実験システム概要

図 2 は実験システムの実際の様子である。触力覚提示デバイス (詳細は次項) にテグスを取り付け、スタンドに取り付けられた可動する滑車を介して、反対の端におもりを置くための台 (総重量 10g) を取り付けている。実験中は触力覚提示デバイスによって、あらかじめ定めた 4 種類の皮膚変形のうちのいずれかが引き起こされ、引っ張り力を生起させる。本稿では触力覚提示デバイスによって引き起こされる 4 種類の皮膚変形を基準刺激と呼ぶ。基準刺激が提示されている時は滑車を移動させてテグスを弛ませることで物理的な引っ張り力を提示しないようにした。他方、触力覚提示デバイスから提示される基準刺激に対する比較刺激として、この台におもりを置き、滑車を移動させてテグスを引っ張ることで物理的な力を提示する。また、比較刺激を提示する際は触力覚提示デバイスの接触子は回転していない状態を維持するようにモータの制御を行った。

2.2 触力覚提示デバイス

本稿では図 1 のように、赤矢印で示すような手の特定の 2 点における力ベクトルを感じさせることが可能なデバイスの開発を行なった。図 3 に開発したデバイスの様子を



図 2: 実験システムの様子

赤矢印：提示される力 青矢印：接触子の回転方向



図 3: 圧力センサを組み込んだ触覚提示デバイス

す。仕組みはエンコーダ付きの DC モータのシャフトに接触子を取り付け、回転する接触子によって触れている皮膚に対して剪断方向の変形を引き起こす。具体的には図 2 中「Top View」に示すように、皮膚に触れている 2 点において赤い矢印方向に力を生じさせる場合、水色の矢印の方向に接触子が回転する。この時の回転角度は外部から指定することができ、エンコーダの値をもとに位置制御されている。そして、このエンコーダ付き DC モータを 2 つ組み合わせることで 2 点の力ベクトルの提示を可能にした。なお、本実装の基本的な仕組みは振動と力覚提示を実現することを目的として開発された触力覚提示技術 HapReel を参考にしている [5]。

デバイスの実装において、先行研究と大きく異なるのは圧力センサが組み込まれていることである。これは実験において把持力の統制を行うことを目的として組み込まれている。具体的には先端に接触子を持つ 2 つの DC モータにおいて、接触子の間に圧力センサを配置し、2 つの DC モータの逆側のみを接続するコの字型の筐体を作成し、外側にも筐体を用意して入れ子構造にすることで、2 つの接触子に加わる挟み込む方向の把持力を測定可能にした。

2.3 実験手順

実験は次のような流れで行う。

1. 実験説明と実験準備 実験参加者は初めに触力覚提示デバイスの接触子と皮膚とのずれをなくすために、接触子部分には医療用の両面テープを貼り付ける。

- 2. 触力覚提示デバイスの把持** 次に実験参加者には図 1 下部の手のように母指と示指の付け根に 2 つある接触子がそれぞれ接触するように握ってもらい、台の上に腕を置いて固定してもらった。
- 3. 把持力の統制のための練習** その後、把持力の統制を行うために、画面に表示されている圧力を一定にするような練習を行い、実験中その把持力をなるべく維持するように指示した。
- 4. 強度比較** 実験参加者は 1 試行の中で触力覚提示デバイスによる力覚提示とおもりを使った物理的な引っ張り力の 2 回の刺激を受けて、2 回目の刺激が「強い」か「弱い」か回答する。

また、実験中は実験参加者とおもりの間には仕切りを設けて、実験中に実験参加者がおもりを見ることを防いだ。

2.4 実験条件および強度比較の詳細

本実験において実験参加者には一つの試行につき、2 回の刺激が提示される。1 回目の刺激を基準刺激と呼び、これはデバイスによって提示される 2mm から 10mm を log スケールで 4 分割した点 [2mm, 3.42mm, 5.85mm, 10.0mm] の 4 種類の皮膚変形刺激である。2 回目の刺激を比較刺激と呼び、これはデバイスをテグスで繋がれたおもりによって引っ張ることで提示される刺激である。

基準刺激の提示の後、比較刺激が提示され実験参加者は 2 回目の比較刺激の力覚が「強い」か「弱い」かを回答する。各試行においておもりの質量は階段法により変化させた。ある試行で実験参加者が比較刺激を「強い」（「弱い」）と回答した場合は、次の試行ではおもりの質量を 1 段階減らした（増やした）。初めて回答が反転する（ある試行において前回の試行と比較して回答が「強い」から「弱い」に変わる、あるいはその逆）までは、おもりの 1 段階の質量変化量を 60g とし、反転後は 1 段階の質量変化を 20g とした。比較刺激のおもりの初期値は各基準刺激条件に対して、初期値が十分に小さい（0g）の上昇系列と十分に大きい（600g）の下降系列の 2 種類を用意した。

本実験では、実験参加者が比較刺激の変化の予測により生まれるバイアスを排除するため、4 種類の基準刺激およびそれぞれに対する上昇系列と下降系列の合計 8 系列を並列に進行させた。実験参加者は 8 系列をランダムな順に 1 試行ずつ行い、次にまたランダムな順で各系列を 1 試行ずつ行うといった形で実験を行った。

本試行の前に、実験参加者は把持力の維持や回答方法に慣れるための練習試行を行った。最初に画面に表示される把持力の値を指定した値（2000[mN] ± 10%）に維持するような練習を行い、実験中は常にその把持力を維持するように指示した。次に各基準刺激の上昇系列および下降系列の初期値の試行を一通り、合計 8 試行を行った。本試行では 8 系列（基準刺激 4 種類に対する上昇系列および下降系列）を 1 試行ずつランダムな順に行う合計 8 試行を 1 セットとし、1 セットごとに 1 分間の休憩を設けながら 1 4 セット行っ

た。本実験において実験参加者は練習施行を 8 試行および本試行を 112 試行の合計 120 試行を行う予定である。

3. むすび

本稿では把持物体とのインタラクションにて生じる、力覚を手掌部における 2 点の皮膚剪断変形を通じて提示するためのデバイス開発および皮膚剪断変形量と知覚力の関係を明らかにするための実験系の実装について述べた。今後、実装した実験系をもとに皮膚剪断変形量と知覚力との関係をモデル化する。その後、モデル式を用いて VR 環境において生じた力を適切に皮膚剪断量に変換し、提示するシステムを開発する予定である。

謝辞 本研究の一部は、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の支援を受けて実施された。

参考文献

- [1] L. Marchal-Crespo et al.: The effect of haptic guidance and visual feedback on learning a complex tennis task, *Experimental brain research* 231 (2013), 277 – 291.
- [2] M. Sobue et al.: Presentation of Hitting Sensation to the Racket by a Single DC motor Embedded in a Handle, *IEEE Haptics Symposium* 2024.
- [3] K. Minamizawa et al.: Gravity Grabber: Wearable Haptic Display to Present Virtual Mass Sensation, *ACM SIGGRAPH 2007 Emerging Technologies*.
- [4] Tactical Haptics, Inc.: <https://tacticalhaptics.com/products/>
- [5] D. Inoue et al.: HapReel: A Racket-shaped Haptic Display Controller for Presenting Vibrotactile and Force Feedback through Fingertip Deformation, *ACM SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*.