

触覚力覚の提示手法と感覚融合に関する基礎的研究

宇高正憲, 池井 寧
首都大学東京

概要—本論文では、触覚力覚の提示手法および感覚融合に関して述べる。指が物体に接触した際の硬さの表現に関しては、力覚のみでは不十分とされてきた。本研究では、物体に接触したときの皮膚感覚を、ピン振動刺激で表現することで、硬さ感覚の一部を分担表現できるのではないかと仮説について、その基礎的な検証を行なう。実験的検証は、44本の振動ピン刺激による触覚と2台のPhantom Omni(力覚デバイス)による力覚を表現可能なTD44FXを用いて行なった。まず、硬さに対する力覚の弁別閾を恒常法によって計測した。その結果に基づいて、振動ピン刺激を変位比例提示、接触時最大提示した場合の硬さの感覚量の変化を調査した。

Basic research on the presentation technique and the tactile/force sensation fusion

Masanori Udaka, Yasushi Ikei
Tokyo Metropolitan University

Abstract—This paper describes the presentation technique of tactile (cutaneous) sensation and force sensation (proprioception) at the user's fingertip. The expression of hardness of an object is not sufficiently performed only by the sense of force. In the present study, the hypothesis that hardness is partially expressed by the pin vibration stimulation is investigated. The experiment was performed by the TD44FX consists of a cutaneous display with forty-four vibratory pins and a force display built with two Phantom-Omni force feedback devices. We conducted an experiment to examine the differential threshold of hardness by the constant method. The change in the sensation of hardness was investigated with proportional tactile stimulus and with constant stimulus.

1. はじめに

触覚におけるバーチャルリアリティ (VR) を実現する技術に関して、様々な試みが行われているが、触覚(皮膚感覚)と力覚を同時に提示可能なディスプレイは、まだ十分と言える形態は実現されていない。特に、対象物の硬さは、力覚デバイスのみでの表現では、皮膚感覚を精度よく刺激できず十分とはいえないことが佐々木ら[1]によっても指摘されている。本論文では、触覚力覚デバイスTD44FXを用いた3次元VR空間の対象物の硬さ表現に関して、ピン振動刺激と力覚デバイスの統合提示のための基礎的な評価実験を行った。

2. 触覚(皮膚感覚)と力覚提示による硬さ表現

人間の触覚(体性感覚)は、皮膚感覚と深部感覚から構成されている。皮膚感覚は、皮膚表面の機械的刺激に基づく感覚であり、中でも振動刺激に対する感受性が鋭敏である。振動受容器としては、マイスナー小体(MC)とパチニ小体(PC)があり、それらの感度が最も高

くなる特性周波数は、夫々50 Hz, 250 Hz 付近である。硬さの感覚に関しては、皮膚感覚は指先の皮膚変形や接触面積の増加を知覚することで関与している。一方、深部感覚は、身体の各部の位置や力、運動状態に基づく感覚であり、筋肉の筋紡錘や関節、腱、靭帯中の受容器に依存して力覚を生じるが、力覚は皮膚感覚もその生成に一部関与している。[2]

皮膚感覚を刺激するデバイスとしては、TextureDisplay2R [3]やGravityGrabber [5]があるが、TextureDisplay2R では、硬さの表現には直接触れてはいないが、振幅と周波数により実振幅以上の高さ感覚を得られている。また、GravityGrabber では、せん断刺激により、対象物体の重さや慣性重力が表現されている。更に、硬さに関しては丸山ら[5]が、接触速度によって感覚が変わることを指摘している。

本論文では、指先が物体に接触したときにおきる皮膚変形に基づく硬さ感覚や、接触面積の増加の関与を、振動ピン刺激分布で表現することにより、硬さの感覚

を表現できるのではないかという仮説について検証を行なう。

3. 触覚力覚ディスプレイ TD44FX

3-1 装置の概要

振動ピン型触覚ディスプレイ (44-pin Texture Display, TD44) を、2 台の力覚デバイスで保持して、3 次元空間での自由度を加えた触覚ディスプレイ TD44 with Force eXtension (TD44FX) の概要を Fig. 1 に示す。

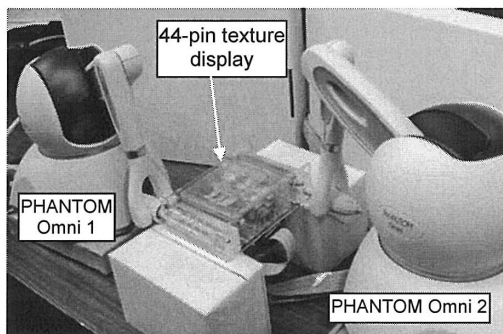


Fig. 1 TD44FX (TextureDisplay44/Force eXtension)

TD44 の提示部に示指末節を置き、外周部を保持して 3 次元対象の表面の手触り(texture)、形状を探索することができる。TD44 を駆動する小型力覚デバイスとして、PHANTOM Omni (SensAble Technologies, Inc.) を 2 台使用した。アクリル製のジョイントにより、PHANTOM Omni のスタイラス部に TD44 を取り付けている。スタイラスの回転は制御できないため、TD44 は 5 自由度を位置決め可能である。可動範囲は配置によるが、凡そ 130×190×240 mm 程度である。また、2 台の力覚デバイスで駆動される構成のため、力フィードバックの提示について、荷重用錘を用いて出力が正確であることが確認されている。

3-2 触覚提示システム

触覚提示は、44 本のピンをバイモルフアクチュエータで駆動することによって行っている。FPGA での制御により、ピン 1 本 1 本の振幅と周波数を制御することが可能であり、多様な触覚を提示することができる。

TD44FX による感覚尺度構成は先行研究[6]において行われており、TD44FX では 250 Hz、12 μm の振

動刺激で、平均 20 段階程度の感覚強度レベルを提示可能となっている。以下に行う弁別実験では、この実験で得られたデータに基づいてピン刺激を提示する。

3-3 実験環境

実験時の TD44FX の操作状況を Fig. 2 に示す。被験者は、前腕を台に固定した状態で、人差指が触覚提示部にのるようにデバイスを保持して鉛直下向きに押し込み動作を行う。このとき台の平面の延長上を触覚デバイスが VR オブジェクトに接触する面としている。2 台の力覚デバイスによって触覚デバイス (TD44) の重さはキャンセルされており、操作者は VR オブジェクトに設定された力の分だけを押し込み動作を行う。また、押し込み量の確認は前面のモニタに、ポイントが表示されており、操作者はそのポイントを見ながら接触点から力の最大値のラインまで押し込み動作を行う。

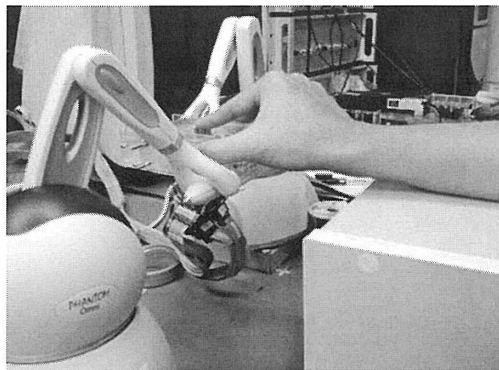


Fig. 2 Experimental setup for measurement

4. TD44FX での力覚弁別閾の計測

4-1 目的

TD44FX を操作して、2 個の VR オブジェクトを押し込んだときの硬さ比較を行なうことにより、硬さに関する弁別閾を計測する。

4-2 計測方法

恒常法に基づいて、標準刺激と変化刺激を比較してもらう。押し込み量は、10 mm で一定とし、反力は $F=S*x$ (S は変化刺激値、 x は押し込み量を $0<x<1$ となるように正規化した値) とし、押し込み量に対して線型に提示した。標準刺激として、1.2 N を使い、比較刺激として 0.9~1.5 N の範囲で 0.1 N きざみの 7 種類用意した。標準刺激、変化刺激を交互に押し込んだときに、どちらが硬く感じるかを 2 件法で回答させ

た。一種類の刺激に対して、各 10 回の試行を行った。被験者は、5 名（男子 4 名、女子 1 名）である。

4-3 結果と考察

標準刺激 1.2 N に対して、硬いという回答を得た確率および正規累積確率分布関数による S 字カーブフィッティングの結果 Fig. 3 に示す。主観的等価値 (PSE) は 1.20 N、確率誤差 (PE) は 0.13 N という結果が得られた。標準刺激 1.2 N に対し PSE が 1.20 N ということから、本デバイスにおける力覚提示が精度良く行われ、かつ被験者は硬さという指標に対して正確に判断を行えていることがわかる。また、PE は 0.13 N ということから、標準刺激に対して 11% 程度での弁別度であり、このデバイスでの表現が十分な解像度をもっていていることが分かる。

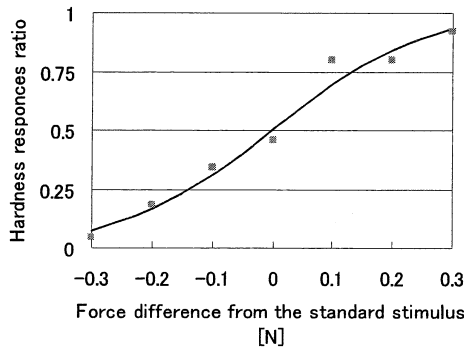


Fig. 3 Mean ratio of hardness responses for each variable stimulus.

5. 触覚（振動ピン刺激）と力覚の融合による硬さ感覚

5-1 目的

比較刺激に振動ピン刺激（触覚）を加えた場合に、PSE と弁別閾どのような変化が現れるかを計測する。振動ピン刺激の加え方は、2 種類用意した。

5-2 計測方法

力覚弁別閾計測の条件に加えて、比較刺激のみに振動ピン刺激を加えた。振動ピン刺激は、周波数 250 Hz、振幅 12 μm とし、44 本のピンが同じ条件で振動する。この刺激の感覚量としては、以前感覚尺度構成を行い、凡そ 20 段階程度の感覚強度レベルに相当することが分かっている。

刺激条件は、次の 2 通りである。

- 1) 振動ピン刺激を侵入量に比例するように与える。
- 2) 振動ピン刺激は、VR オブジェクトに接触した時から、一定（最大）振幅を与える。

5-3 結果と考察

条件 1) での計測結果を Fig. 4 に示す。このときの PSE は 1.10 N、PE は 0.15 N であった。力覚弁別実験より PSE が 0.1 N 低い結果となった。このことからピン刺激が触覚力覚統合提示において、硬さの感覚を分担提示しうることが示唆された。

PE は、0.02 N 増加した。これについては、被験者が判断する際に、本条件では、ピン刺激と力覚を融合的に判断するため、判断の難易度が上昇したことが原因として考えられる。ウェーバー比が一定とすれば、等価点が上昇したことによる増加分も含まれると考えられる。

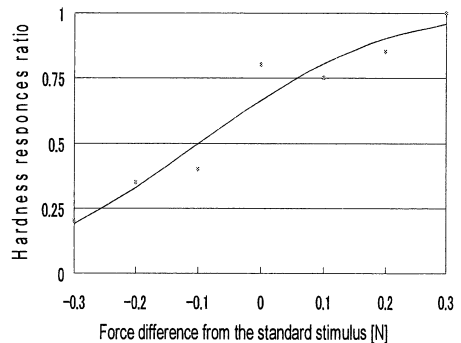


Fig. 4 Mean ratio of hardness responses for each variable stimulus with proportional tactile stimulus to the length of invasion.

次に、条件 2) での計測結果を Fig. 5 に示す。このときの PSE は 1.01 N、PE は 0.17 N となった。PSE に関しては、触覚刺激がない場合より 0.19 N 低く、振動ピン刺激比例提示の場合より 0.9 N 低い結果となった。このことにより、振動ピン刺激をバーチャルオブジェクトに接触とともに、一定（最大）振幅で提示したときのほうが、より硬いという印象を与えられることがわかった。PE は、さらに 0.02 N 増加という傾向にあり、感覚の融合判断において、触覚の刺激の平均強度が大きい場合に、判断のばらつきが増加すること、刺激絶対値の増加による PE の増加が、その原因

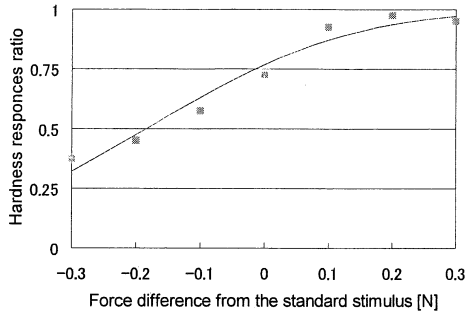


Fig. 5 Mean ratio of hardness responses for each variable stimulus with constant tactile stimulus.

として考えられる。

6. おわりに

力覚フィードバックに加えて、皮膚面への振動触覚刺激（振動ピン刺激：250 Hz, 12 μ m）を加えて提示する構成において、融合された硬さ知覚に現れる変化を調査した。その結果、侵入量に対して比例して振動触覚刺激を提示した場合は 0.1 N、接触時から一定（最大）振幅提示した場合は 0.19 N の硬さの感覚相当量を分担提示できることが示唆された。

振動ピン刺激の提示方法によって、融合された硬さの感覚を変化させられることがわかった。刺激量の増加に伴って、弁別閾は増大する傾向が観察された。

本研究の結果は、極めて限定された計測条件にとどまっており、より広い条件において、今後、計測を進める予定である。更に、ピン刺激を空間配分することによる弁別閾の変化についても調査を行い、より有効な融合提示手法を探索する。

参考文献

- [1] 佐々木, 藤田: 力覚提示装置を用いた硬さ提示における視覚情報の寄与と改変効果に関する実験的検討, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, vol. 5, No. 1, pp. 795-802 (2000)
- [2] 岩村吉晃: タッチく神経心理学コレクション, 医学書院, (2001).
- [3] Y. Ikei, M. Yamada, S. Fukuda: A new design of haptic texture display -TextureDisplay2- and its preliminary evaluation, Proc. IEEE-VR2001, pp.

21-28 (2001)

[4] 南澤孝太, 深町聡一郎, 梶本裕之, 川上直樹, 舘暲: バーチャルな物体の質量および内部ダイナミクスを提示する装着型触力覚ディスプレイ, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 13, No. 1 pp. 15-24 (2008)

[5] 丸山, 平野, 中原: 指と物体の接触状態と主観的な固さ評価との関係, 日本機械学会, 福祉工学シンポジウム講演論文アブストラクト集, pp. 279, 2001

[6] 池井寧, 宇高正憲: 触覚力覚ディスプレイTD44FXに関する研究, ヒューマンインターフェースシンポジウム, (2007)