



集束超音波による圧覚点の指先追従に基づく 静的面触感の空中提示

森崎汰雄¹⁾, 藤原正浩¹⁾, 牧野泰才¹⁾, 篠田裕之¹⁾

Tao MORISAKI, Masahiro FUJIWARA, Yasutoshi MAKINO and Hiroyuki SHINODA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, morisaki@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

概要: 集束超音波を用いると、非接触に様々な触覚パターンを提示できる。特定の物体の触感を再現する場合、基本的な構成要素として、余計な振動のない面、すなわち滑らかなで様な面触覚の提示が必要となる。静的面が提示できれば、そこに凹凸感や振動触感を提示していくことで様々な物体の触感が再現できるようになる。本研究では、超音波で生成した圧覚点を被験者の指先に追従させることでこの一様で滑らかな面感覚の提示を行う。圧覚の提示は Lateral Modulation 刺激法における刺激点の移動幅を細かくとることで行う。これまでにも超音波の刺激点を追従させることで面と指先の接触を再現した例はあるが、いずれの刺激も振動を伴うものであった。

キーワード: 静的面触感, 圧覚, 空中触覚, 集束超音波

1. 緒言

人は物体に触れたとき、その表面のテクスチャを知覚する。このテクスチャを人工的に再現及び提示することで、ユーザはバーチャルリアリティやゲーム内のオブジェクトに高い没入感をもって触れることが出来る。Konyo らは複数周波数の振動を組み合わせることで [5]、Yem らは電気刺激と機械刺激を同時提示することで任意のテクスチャ提示を試みた [10]。

空中超音波触覚ディスプレイ (Airborne Ultrasound Tactile display: AUTD) においては、その提示力が弱さから提示できる触覚の種類が制限されてしまう [6]。AUTD とは超音波振動子をアレイ状に並べたデバイスであり、各振動子の位相を適切に制御することによって、触覚刺激を非接触に提示できる [4, 2]。AUTD を用いれば、人は何もデバイスを身に着けることなく空中で触覚刺激を感じることができる。また、人の視覚を遮らないため、没入感を損なうことなく空中映像に触覚を付与できる。しかし、その提示力は数グラムと弱く、人間が知覚できる強い刺激を提示するためには提示された圧力分布を時空間変調する必要がある。このため、AUTD で提示できる感覚はこれまで振動触覚に制限されていた。

一方、近年我々は実物体のテクスチャ再現に必須な触感である静的な圧覚が超音波の LM 刺激を用いて生起することを発見した [11]。LM 刺激とは本来振動触覚を提示するために提案されており、圧力一定である単一の刺激点を、皮膚表面に沿って周期的に移動にさせる刺激方法である [8, 9, 3]。この周波数を 5 Hz、焦点の移動ステップを 0.2 mm にすることで 20 g 程度の強い圧覚が生起する。圧覚は人間が物体に触れるときには必ず知覚されるため、実物体の触感をリ

アリティ高く再現するためには必須の感覚となる。また、圧覚を知覚する I 型の遅順応性受容器の空間解像度は高いため、細かい凹凸パターンなどの表現も可能になると考えられる [1]。

本研究では、物体表面のテクスチャ合成に向けた基本要素として、この LM 刺激による圧覚提示を用いて人間が全く振動を感じない、すなわち完全に平らで滑らかな摩擦のない面触覚の提示を目指す。平らな静的面が超音波で提示できれば、そこに時空間的な振動を重ねることで凹凸や粗さ、摩擦感を増加させ様々な表面テクスチャが提示できるようになると考えられる。

本実験では、超音波による圧覚刺激を用いて静的な面感覚が生起できる条件を調査する。被験者は提示された空中映像の表面を指でなぞり、その表面の触感について評価する。その際、被験者の指先に LM 刺激による圧覚刺激を追従させる。LM 刺激の条件は焦点を走査する向き、周波数、動き軌道の長さを変化させる。被験者は得られた触感について、平坦かつ滑らかな面であったかという観点から評価した。

2. 原理

2.1 空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD)

本研究では、触覚提示に空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD) を使用している。AUTD とは、それぞれの振幅と位相を独立制御できる超音波振動子をアレイ状に配置したデバイスである [4]。各振動子の位相を適切に制御することで各振動子から出力された超音波を集束し、音響放射圧と呼ばれる非接触な圧力が生ずる。この放射圧を人間の皮膚に提示することで非接触な触覚提示が可能となる。超音波を集束させた焦点の直径はおよそ波長程度まで絞ることができる。

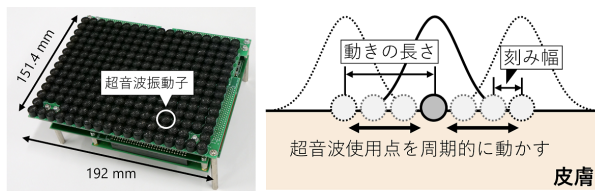


図 1: 左) 本論文で使用した空中超音波触覚ディスプレイ。右) Lateral Modulation 刺激の模式図。

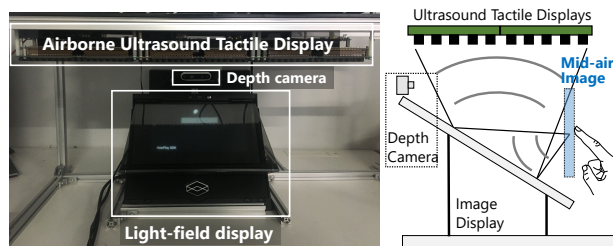


図 2: 実験システムの構成図

本論文では、一台あたりに 249 個の 40 kHz 振動子が配置された AUTD を 6 台使用した [7]。実際に使用した AUTD を図 1(左) に示す。各 AUTD は EtherCat プロトコルで通信しており、常に同期して動作する。振動子の周波数が 40 kHz であることから、本セットアップでは焦点径はおおよそ 8.5 mm 程度まで絞ることができる。

2.2 Lateral Modulation(LM) 刺激を用いた超音波による圧覚提示

本論文では、圧覚刺激を非接触提示するために超音波による LM 刺激を用いている。本論文で用いた LM 刺激の模式図を図 1(右) に示す。LM 刺激は、圧力が一定の超音波刺激点 (焦点) を皮膚表面に沿ってわずかに周期移動することで行う。この LM 刺激は、もともと AUTD を用いてより知覚強度の高い振動触覚を提示するために提案されたものであり、単純に焦点の圧力を時間変動させた場合よりも高い知覚強度が得られる [8, 9]。

本実験では、この LM 刺激について、その移動周波数を 5 Hz 程度と低く、さらにその刺激点移動の刻み幅を極端に小さくすることで静的な圧覚を提示する。我々は以前にこの移動幅を極端に小さくすることで、皮膚表面に与えられる圧力波形の高調波が抑制され、ほとんど振動を伴わない圧覚刺激が生ずることを実験的に示している [11]。この以前の実験では、5 Hz で片側移動幅が 3 mm である LM 刺激において、約 20 g 程度の圧覚が知覚された。

3. 実験

本実験では、被験者が平らなで滑らかな面を被験者が知覚できるか予備的に被験者実験を行った。被験者は空中に表示された棒上のオブジェクトの表面を指でなぞり、その触感を評価する。

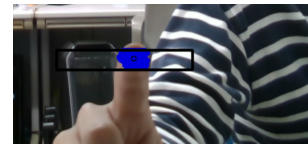


図 3: バーチャルオブジェクトとの接触判定。黒枠がオブジェクト、青が接触領域、黒丸がその重心位置を示す。

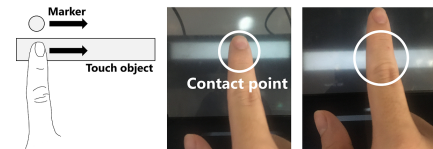


図 4: 実験の様子

3.1 実験装置

図 2 に実験装置をの模式図と外観を示す。この装置は、空中映像を提示するためのライトフィールドディスプレイ (Holo Player One, Looking Glass Factory), 触覚提示を行うための 6 台の AUTD, 被験者の手の位置をセンシングするためのデプスカメラ (Intel Real Sense D435) で構成される。

この実験装置においては、ディスプレイを用いて大きさが $7 \times 1 \times 1$ cm の棒状オブジェクトを投影している。この領域と物体が接触したとき、その接触面積の重心位置に超音波焦点が提示される (図 3)。ここで、超音波はディスプレイ表面に反射することで、指と対抗する向きから照射している。

3.2 実験手順

3 人の男性が実験に参加した。被験者はディスプレイの前に座り、表示された棒状オブジェクトを人差し指でなぞった。図 4 に実際の実験の様子を示す。この時、この棒状オブジェクトの 1.6 cm 上には常に 0.12 cm/s で一方向に移動する直径 1 cm 球体が表示されており、被験者はこの球体の速度と同じ速度で棒をなぞるよう指示された。この速度は、AUTD の出力に意図しない振幅変動が生じないように予備実験から決定した。予備実験の段階で、高速で AUTD の焦点位置、すなわち各振動子の位相を高速に切り替えると出力振幅が変動し、これが意図しない振動として知覚されることがあった。また、超音波のエンベロープにカットオフ周波数が 150 Hz のローパスフィルタも適用しこの振幅変動を抑制した。被験者は、棒の一番左からなぞり動作を開始するよう指示され、最大 3 回までなぞることを許可された。被験者はなぞり動作の後、その触感を評価するため以下の二つの質問に 7 段階リッカート尺度で回答した (1:全く同意できない, 7:非常に同意できる)。

- 質問 1: 感じた触感は、凹凸のない平坦な面であった。
- 質問 2: 感じた触感は、粗さのない滑らかな面であった。

実験条件として、LM 刺激における 3 つの条件を変化させた: A) 焦点を動かす向き (縦/横), B) 焦点の移動周波数

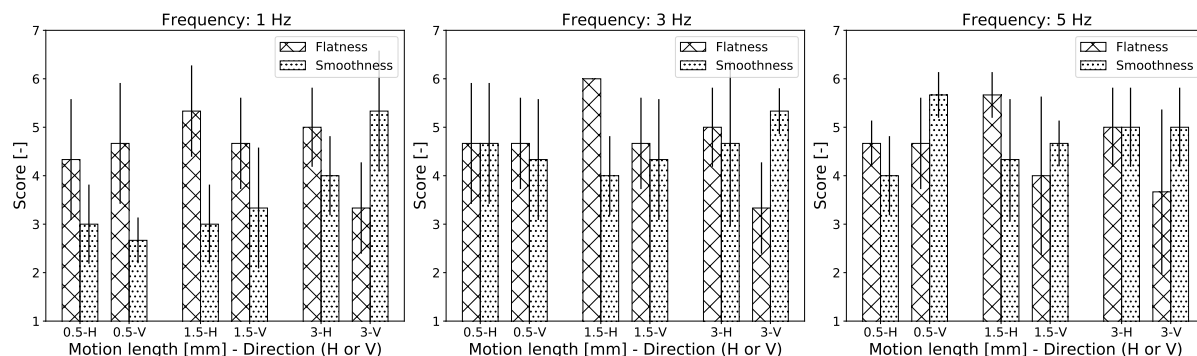


図 5: 指腹における実験結果。H は焦点が横に、V は縦方向に移動したことを意味する。

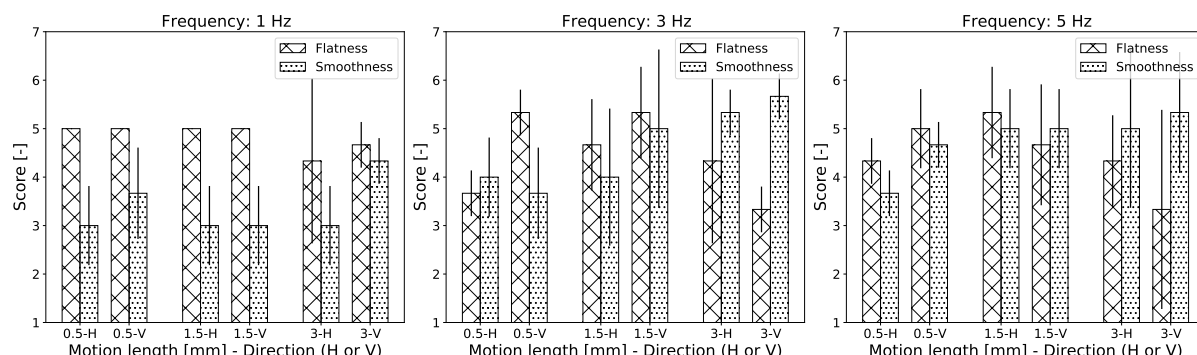


図 6: 指の中節部における実験結果。H は焦点が横に、V は縦方向に移動したことを意味する

(1, 3, 5 Hz), C) 焦点の動く幅 (0.5, 1, 3 mm)。LM 刺激における焦点移動の刻み幅は、振動感が生じないよう移動幅の 10%以下と十分細かく設定した。移動幅が 1, 3 mm の時は刻み幅 0.1 mm, 移動幅が 0.5 mm の時は 0.05 mm とした。

また、すべての被験者は指の腹部分と中節部分でそれぞれ 1 セットずつ試行を行った (図 4)。中節とは指の第一関節と第二関節の間の部位である。ここで部位を変化させた理由は、指腹と中節部の形状にある。指腹の形状は指の中心から山なりになっているため、LM 刺激において焦点を移動した場合、実際に皮膚に加わる圧力が時間で一定でなくなる可能性がある。この意図しない圧力の時間変動が知覚される平坦さ、滑らかさに影響を与えたと考え、より公平である中節部分においても実験を行った。

4. 結果

指腹にける実験結果を図 5 に示す。エラーバーは標準偏差を示す。指腹において平坦さの最大値は 6 であり、その条件は焦点の移動幅が 1.5 mm, 横方向に移動、周波数が 3 Hz であった。また、最小値は 3.33 であり、その条件は移動幅 3 mm, 縦方向、1 Hz 及び 3 Hz であった。指腹において滑らかさの最大値は 5.67 であり、その条件は移動幅が 0.5 mm, 縦方向、5 Hz であった。最小値は 2.67 であり、その条件は移動幅が 0.5 mm, 縦方向、1 Hz であった。

中節部分における実験結果を図 6 に示す。エラーバーは標準偏差を示す。中節において平坦さの最大値は 5.33 であ

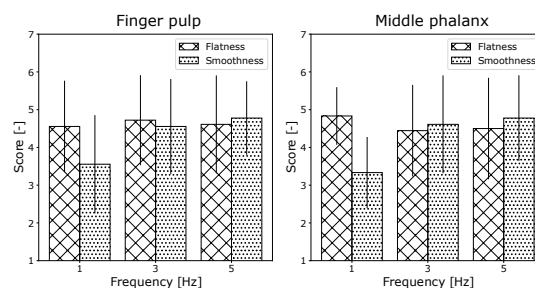


図 7: 周波数ごとに集計した実験結果 (左: 指腹部、右: 中節部)

り、その条件は周波数が 3 Hz、縦方向に移動、焦点の移動幅が 0.5 mm 及び 1.5 mm であった。5 Hz, 縦方向、1.5mm においても同様のスコアであった。平坦さの最小値は 3.33 であり、その条件は移動幅 3 mm, 縦方向、3 Hz 及び 5 Hz であった。指腹において滑らかさの最大値は 5.67 であり、その条件は移動幅が 3 mm, 縦方向、3 Hz であった。最小値は 3 であり、その条件は 1 Hz における 0.5 mm での横方向、また 1.5 mm での両方向であった。

5. 考察

本実験結果より、超音波による圧覚刺激を指先に追従提示することで平坦かつ滑らかである静的面触感が提示できることが示唆された。指先において、3 Hz, 焦点の移動が横

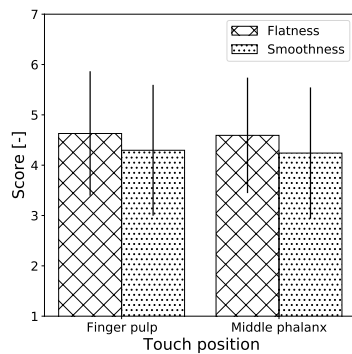


図 8: 提示部位ごとに集計した実験結果。

方向、移動幅 3 mm の条件においては平坦さと滑らかさがいずれも 5 であった。また、指先において 18 条件中 6 条件で平坦さのスコアが 5 以上であった。5 つの条件で滑らかさのスコアが 5 を上回っていた。

被験者数が少ないため条件ごとの明確な傾向は確認できなかったが、その中でも周波数が 1 Hz の場合には滑らかさのスコアが低くなる傾向が観察された。図 7 に周波数ごとに集計した実験結果を示す。いずれの部位においても LM 刺激の周波数が 1 Hz の時のみ滑らかさが 4 を下回っていた。被験者らは条件に応じて明らかに平坦さも滑らかさも変化したことを報告しており、今後被験者の数を増やすことでよりこの傾向、および理由が明確になると考えられる。

また、著者らの予想に反し、指腹部と中節部の間に知覚における大きな差はみられなかった。図 8 に提示部位ごとに集計した実験結果を示す。

6. 結言

本論文では、超音波による多様な触感提示に向けた基礎的な触感として、平らで滑らかな静的面触感の提示を試みた。手法として、低周波かつ移動刻み幅の細かい LM 刺激を用いて圧覚を生じし、この圧覚点を被験者の指先に追従させた。

被験者実験では、被験者は触覚フィードバックを伴う棒状オブジェクトを指先で撫で、その触感を平坦さ、および滑らかさという観点から評価した。結果として、平坦かつ滑らかな静的面の感覚を提示できることが示唆された。今後は被験者数を増や結果を明確にするとともに、棒状オブジェクトのみでなく 2 次元面についても調査を行う予定である。

謝辞 本研究は JST CREST JPMJCR18A2 および科研費 21J12305 の助成を受けたものである。

参考文献

[1] Stanley J Bolanowski Jr, George A Gescheider, Ronald T Verrillo, and Christin M Checkosky. Four channels mediate the mechanical aspects of touch.

The Journal of the Acoustical society of America, Vol. 84, No. 5, pp. 1680–1694, 1988.

- [2] Tom Carter, Sue Ann Seah, Benjamin Long, Bruce Drinkwater, and Sriram Subramanian. Ultrahaptics: multi-point mid-air haptic feedback for touch surfaces. In *Proceedings of the 26th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 505–514. ACM, 2013.
- [3] William Frier, Damien Ablart, Jamie Chilles, Benjamin Long, Marcello Giordano, Marianna Obrist, and Sriram Subramanian. Using spatiotemporal modulation to draw tactile patterns in mid-air. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 270–281. Springer, 2018.
- [4] Takayuki Hoshi, Masafumi Takahashi, Takayuki Iwamoto, and Hiroyuki Shinoda. Noncontact tactile display based on radiation pressure of airborne ultrasound. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 3, No. 3, pp. 155–165, 2010.
- [5] Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro, Akinori Yoshida, and Naoki Saiwaki. A tactile synthesis method using multiple frequency vibrations for representing virtual touch. In *2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, pp. 3965–3971. IEEE, 2005.
- [6] Ismo Rakkolainen, Euan Freeman, Antti Sand, Roope Raisamo, and Stephen Brewster. A survey of mid-air ultrasound haptics and its applications. *IEEE Transactions on Haptics*, 2020.
- [7] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, 2021.
- [8] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Lateral modulation of midair ultrasound focus for intensified vibrotactile stimuli. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 276–288. Springer, 2018.
- [9] Ryoko Takahashi, Keisuke Hasegawa, and Hiroyuki Shinoda. Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus. *IEEE transactions on haptics*, Vol. 13, No. 2, pp. 334–342, 2019.
- [10] Vibol Yem and Hiroyuki Kajimoto. Wearable tactile device using mechanical and electrical stimulation for fingertip interaction with virtual world. In *2017 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 99–104. IEEE, 2017.
- [11] 森崎汰雄, 藤原正浩, 牧野泰才, 篠田裕之. 集束超音波による高解像度な Lateral Modulation 刺激を用いた空中圧覚提示. 第 26 回ハプティクス研究会, 2020.