



空中超音波が引き起こす触質感の実証的検討：実物体との比較

Psychophysical investigation of tactile textures induced by airborne ultrasound: Comparison with real objects

小丹枝 涼哉¹⁾, 大屋 里佳²⁾, 松村 蒼一郎¹⁾, 曾明 然¹⁾ 鈴木 颯¹⁾, 篠田 裕之¹⁾, 北田 亮²⁾

1) 東京大学大学院 新領域創成科学研究科 (〒 277-0885 千葉県柏の葉 5-1-5, onishi@hapis.k.u-tokyo.ac.jp)

2) 神戸大学大学院 国際文化科学研究科 (〒 657-8501 兵庫県神戸市灘区鶴甲 1-2-1, rika@port.kobe-u.ac.jp)

概要: 空中超音波による触感提示技術は注目を集めているが、その触質感については明らかでない。本研究では、空中超音波による触質感の特徴を、実物との比較により検討した。実験では手の甲に対して、時間変調を超音波刺激 3 種と実物刺激 5 種を提示した。参加者は各刺激に対して触質感の感情性および弁別性を評価した。本発表では、空中触覚と実物の触質感の類似性や VR 空間での利用可能性について議論する。

キーワード: 空中超音波, 触覚, 快感, 感情的触覚, CT 線維

1. 序論

近年、空中超音波を用いた非接触な触覚提示技術が注目を集めており、空中超音波ハプティクスという分野として確立しつつある [1]。空中超音波ハプティクスでは、規則的に並べた超音波振動子の位相をそれぞれ制御することで空間中に超音波を集束させ、その集束超音波による音響放射圧によりデバイスを身に着けることなく触覚を提示する [2]。

しかし、空中触覚の感性評価は未だ十分に検討されていない。触覚の感性評価は大別して識別的触覚と感情的触覚の 2 種類がある [3]。前者は我々が物体に触れた際に物体そのものに対しておこなう評価であり、滑らかさ、柔らかさ、温かさの評価が該当する [4]。後者は物体が触れたことによって我々自身に喚起される感情的な評価であり、心地よさを表す感情価、目が覚める感じを表す覚醒度、くすぐったさの評価などが該当する。空中触覚で実物体の触感を再現するためには識別のおよび感情的触覚を調査する必要がある。

そこで本研究では、空中超音波に対する感性評価を識別のおよび感情的触覚の両面から検討する。実物体に対する評価との比較を通して、空中超音波の触質感はどのような実物体の質感と類似するのかを被験者実験を通して検討する。

2. 方法

2.1 触覚刺激

本研究では、触覚刺激として 8 種類の触感を用意した。うち 5 種類は実物体で、3 種類は空中超音波であった。実物体は布、アルミ樹脂、紙やすり (240 番)、毛筆、ウレタン樹脂 (バイオスキン#18, ビューラックス社) を用いた (図 1)。布は粗く柔らかい、アルミ樹脂は滑らかで硬い、紙やすりは粗く硬い、毛筆は滑らかで柔らかい質感を持つ刺激として選定した。ウレタン樹脂は人肌を模した素材であり、毛筆と同様の質感特徴を持つが、超音波刺激が人肌とどのような点で類似するかを検討するため使用した。なお、布および紙やすりは、実物体刺激として使用したものと異なる



図 1: 5 種類の実物体の写真

ウレタン樹脂に貼り付け用いた。

空中超音波刺激としては、無変調な焦点に加え、10 Hz、100 Hz の振幅変調 (Amplitude Modulation, AM) をかけた焦点を用いた。無変調焦点は振動感の少ない触覚刺激で、滑らかな柔らかい質感の再現を、振幅変調焦点は振動感を付与するため、粗く硬い質感の再現を期待したものである。

2.2 装置

触覚刺激は図 2 のようなセットアップを用いて提示された。セットアップは空中超音波フェーズドアレイ (AUTD3 [5])、ロボットアーム (DOBOT Magician, DOBOT)、およびアームレストで構成された。実物体刺激は、ロボットアームの先端に素材を装着して提示した (図 3)。実験参加者の手の位置を取得するために、深度センシングおよび RGB 検出機能を搭載したカメラ (RealSense™, Intel) を使用した。

2.3 提示部位

RGB カメラの画像から、Mediapipe (Google) により右手甲の人差し指付け根から手首の位置を取得し、その間の 5 cm をなぞるように刺激した。刺激提示時のロボットアームの高さは、デブスカメラで取得された手の位置に基づいて自動で調整された。

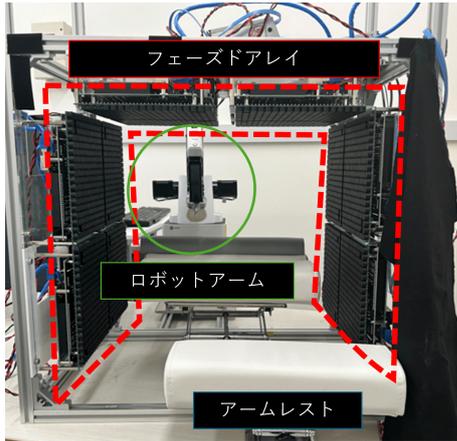


図 2: 実験セットアップの外観。



図 3: (左) ロボットアームと提示位置の拡大図。(右) ロボットの先端構造。銅板により圧力の調整が可能。

2.4 提示圧

触覚刺激はすべて 0.03 N/cm^2 の力で提示した。圧力の違いによる影響を防ぐために、空中超音波刺激に揃える形で全触覚刺激の提示圧を統制した。実物体の圧力は、電子天秤で事前に測定することで制御した。また、ロボットアームの微小な上下運動によって刺激圧が変わることを防ぐため、アームに銅板をもちいて減圧構造をつけた(図 3, 右)。

なお、毛筆を使用して接触時の心地よさにおける速度依存性を検討した先行研究 [6] では提示圧を 0.2 から 0.4 N/cm^2 程度としている。本研究の提示圧はこれより 10 分の 1 程度弱い。そこで、本研究のように比較的弱い圧でも、先行研究と同様の速度依存性が再現されるか、後述する操作チェックセッションにおいて検討した。

2.5 提示速度

触覚刺激は $3, 10, 30, 100 \text{ mm/s}$ の速度で提示した。 3 mm/s は、触覚刺激を提示した際に喚起される心地よさの程度が低いとされ、この速度条件を統制条件とした [6]。最大速度は、本研究で使用したロボットアームが出力可能な最大速度である 100 mm/s とした。

2.6 評価項目

刺激に対する評価項目は、感情的触覚として心地よさ、驚き、くすぐったさを、識別的触覚として滑らかさ、柔らかさ、および温かさの計 6 項目を検討対象とした。実験参加者はこれらの項目について、最も当てはまる数字を 11 件法 (0-10) で回答した。5 をどちらでもないとして、0 に近い数字ほど不快(驚かない、くすぐったくない、粗い、硬い、

冷たい)であり、10 に近い数字ほど心地よい(驚いた、くすぐったい、滑らか、柔らか、温か)とした。

2.7 手続き

実験は全 5 セッション (実物体 $\times 2$ + 空中超音波 $\times 2$ + 操作チェック) から構成された。実物体セッションでは 1 セッションにつき 20 試行 (実物体 5 種類 \times 速度 4 種類) を実施した。空中超音波セッションでは 1 セッションにつき 12 試行 (変調 3 種類 \times 速度 4 種類) を実施した。セッション順と刺激提示順は、カウンターバランスをとった。刺激の開始と終了の合図および評価項目に関する指示は、実験参加者前方に設置したモニタに表示した。被験者はモニタ上の合図とともに触覚刺激を提示された。刺激提示が終わるとモニタに終了の合図が表示され、刺激の評価をした。6 項目すべてについて回答すると次の試行に進んだ。1 セッション終わるごとに 2 分間休憩した。操作チェックセッションでは、本研究の触覚刺激の提示圧が適正であったか検討した。毛筆を一般的な圧である 0.3 N と本研究の提示圧である 0.03 N で提示し、喚起される心地よさを比較した。操作チェックセッションでは全 16 試行 (提示圧 2 種類 \times 速度 4 種類 \times 繰り返し 2 回) を実施した。視覚的影響を排除するため、暗幕により参加者から自身の手が見えないようにした。また、聴覚的影響を排除するため、実験中の参加者はヘッドフォン (HD300Pro, Sennheiser) を通してピンクノイズを聴取した。実験全体の所要時間は一人当たり 120 分程度であった。

2.8 実験参加者

成人の男女 31 名 (うち女性 15 名, $M_{\text{age}} = 31.26, SD_{\text{age}} = 5.14$) が実験に参加した。

3. 結果

本試行セッションおよび操作チェックセッションにおける 6 項目への回答について、まず参加者ごとに平均値を算出し、当該平均値を全参加者で平均した。

3.1 心地よさの速度依存性

操作チェックセッションにおける毛筆の速度ごとの心地よさ評価を図 4 にプロットした。次に、毛筆の提示圧 (0.03 N , 0.3 N) および提示速度 ($3, 10, 30, 100 \text{ mm/s}$) を要因とする 2 要因 2×4 水準分散分析を実施した。その結果、速度の主効果が有意であったが ($F(1.71, 51.37) = 28.95, p < .001, \eta^2 = 0.26$)、圧の主効果 ($F(1, 30) = 1.33, p = .26, \eta^2 = 0.01$) および交互作用 ($F(3, 90) = 1.44, p = .24, \eta^2 = 9.73 \times 10^{-3}$) は有意ではなかった。 3 mm/s 条件はその他の速度条件より心地よさが低く、 10 mm/s 条件は $30, 100 \text{ mm/s}$ 条件より心地よさが低かった (すべて $p < .001$)。圧によらず心地よさは $3, 10, 30, 100 \text{ mm/s}$ 条件の順に高くなったことから、本研究の提示圧でも先行研究 [6] と同様の速度依存性が再現されたと言えるであろう。

次に、それぞれの超音波刺激の速度ごとの心地よさ評価を図 5 にプロットした。片側 t 検定では、 $AM100 \text{ Hz}$ のみにおいて 3 mm/s と他の速度に有意な違いがみられた。つまり 30 mm/s の心地よさは 3 mm/s より有意に高く ($p =$

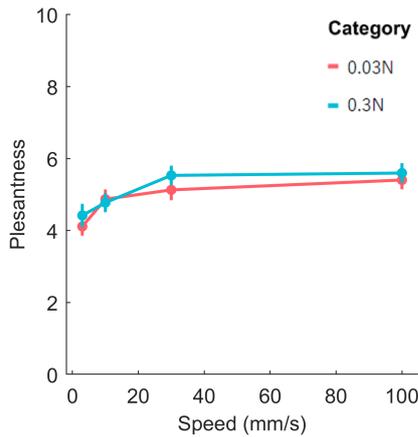


図 4: 0.03N の毛筆と 0.3N の毛筆の心地よさの比較.

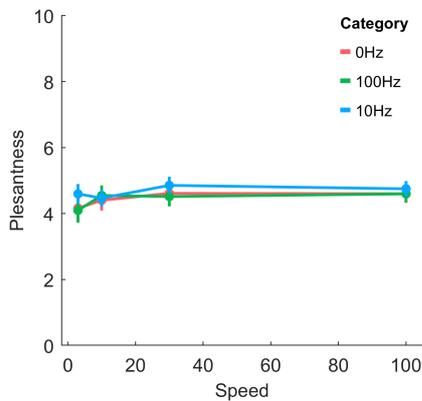


図 5: それぞれの超音波刺激の速度依存性.

0.048), 10 mm/s と 100 mm/s は 3 mm/s より高い傾向がみられた ($p = 0.06$). 一方, 無変調と AM10 Hz では 3 mm/s と他の速度で有意な差がみられなかった ($p > 0.1$).

3.2 触覚刺激の触質感比較

6 種類の評価項目の評価平均値を図 6 に示す. 6 項目それぞれについて, 統制条件 (3 mm/s) を除く 3 種類の速度条件ごとに, 触覚刺激 8 種類のうち 2 種類の評価の差異を両側 t 検定によって比較した. t 検定を繰り返すため, 有意水準に FDR-BH 補正をおこなった.

3.2.1 識別的触覚

滑らかさにおいて, 空中超音波の 3 条件は, すべての速度においてやすりより滑らかであった ($p < .001$). 100 mm/s 条件において空中超音波 AM10 Hz および 100 Hz 条件は, アルミ樹脂, 毛筆, およびウレタン樹脂より粗い ($p < .05$). 柔らかさにおいて, 空中超音波の 3 条件は, すべての速度においてアルミ樹脂ややすりより柔らかい ($p < .05$). 空中超音波の無変調および 10 Hz 条件は, すべての速度において布より柔らかい ($p < .05$). 空中超音波 100 Hz 条件は, すべての速度において毛筆より硬い ($p < .01$). 温かさにおいて, 空中超音波の 3 条件は, すべての速度においてアルミ樹脂やウレタン樹脂より温かい ($p < .01$). また, 空中超音波の無変調条件は, すべての速度において空中超音波 10 Hz 条件より温かい ($p < .01$). 以上を総合すると, 超音波の滑らかさはやすりより他の実物体に類似しており, 柔らかさはアルミ樹脂ややすりより布や毛筆, ウレタン樹

脂に類似しており, 温かさはアルミ樹脂やウレタン樹脂より布ややすり, 毛筆に類似した質感を持つことが示唆された.

3.2.2 感情的触覚

心地よさにおいて, 30 mm/s 条件では, 空中超音波の無変調および 100 Hz 条件はウレタン樹脂より心地よさ評価が低い ($p < .05$). 100 mm/s 条件では空中超音波の 3 条件はウレタン樹脂より心地よさ評価が低い ($p < .05$). また空中超音波の無変調および 100 Hz 条件は, アルミ樹脂より心地よさが低い ($p < .05$). 驚き評価にはいずれの比較においても有意差がなかった. くすぐったさにおいて, 空中超音波の 3 条件はすべての速度で毛筆よりくすぐったくない (ただし 10 mm/s-10 Hz 条件を除く; $p < .05$). 以上を総合すると, 超音波の心地よさはウレタン樹脂やアルミ樹脂より布ややすり, 毛筆に類似しており, 驚きは実物体と類似しており, くすぐったさは毛筆より他の実物体に類似した質感を持つことが示唆された.

4. 考察

結果 3-2 から識別的および感情的触覚の各項目ごとに超音波刺激との類似する実物体は異なることが確かめられた. 6 項目すべてで類似度の高い素材は布であった. VR 空間での触感再現に超音波刺激を用いる場合は, この結果を参考にして仮想オブジェクトを選定するとよい.

結果 3-1 から, 先行研究 [6] より弱い提示力である 0.03 N でも毛筆刺激に速度依存性が確認された. また, 超音波と毛筆の心地よさに有意差はなかった. 以上より, 超音波も快情動に関わる CT 線維群を活動させた可能性が示唆された. ただし, 超音波刺激の中で速度依存性を示したのは AM100 Hz だけであった. この結果をより強固に検証するためには Microneurography を用いる必要がある.

本実験で用いられた超音波による提示圧力は, 先行研究 [6] で用いられた筆の圧 0.2 N より小さいため, より強力な超音波刺激による心地よさの比較が将来研究として望まれる. また, 今回選択した超音波刺激は無変調および振幅変調をかけた単一の焦点であった. 空中超音波で再現できる刺激はこれのみならず, 空間変調 [7] や多焦点の活用, 異なる軌跡での提示などを加えると膨大なパターンがある. どの触覚パターンがもっとも心地よい, または実物体の類似度が高いかを比較し追求することは今後の課題である.

5. Conclusion

本研究では, 空中超音波の触質感評価のため, 31 名の参加者による実物刺激との比較実験を行った. 空中超音波はアルミ樹脂ややすりに比べて, 他の素材に近い評点を示し, 全指標で最も近い評価が得られたのは布であった. また, 心地よさの評点において AM100 Hz の超音波刺激は毛筆刺激と同様の速度依存性を示したため, 快情動に関わる CT 線維群を刺激できる可能性が示唆された. この結果から超音波刺激と実物刺激の関係が明らかになり, 布や毛筆の触感を再現できる可能性が示された. 本研究は空中超音波による

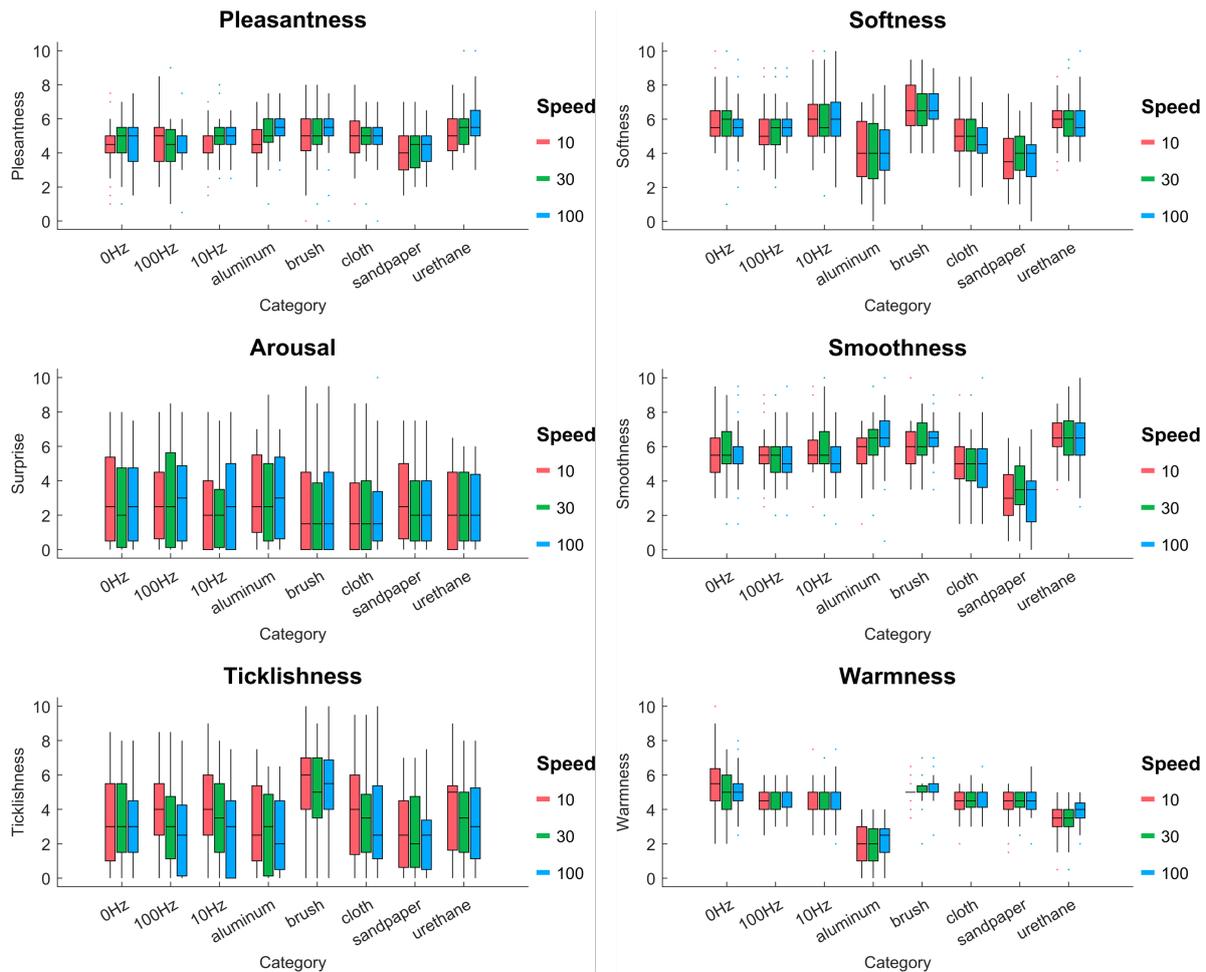


図 6: 評価項目別の各条件平均評定値

触感再現の際に参考となる大規模な実験データを提供する。ただし、本実験の超音波刺激は基本的な 3 種類のみであり、より多くの刺激パターンとの比較は今後必要とされる。

謝辞 本研究は JPMJMS239E-01 および JPMJMS239E-02 の支援を受けて行われた。

参考文献

- [1] Orestis Georgiou, William Frier, Euan Freeman, Claudio Pacchierotti, and Takayuki Hoshi. *Ultrasound mid-air haptics for touchless interfaces*. Springer, 2022.
- [2] Takayuki Iwamoto, Mari Tatzono, and Hiroyuki Shinoda. Non-contact method for producing tactile sensation using airborne ultrasound. In *Haptics: Perception, Devices and Scenarios: 6th International Conference, EuroHaptics 2008 Madrid, Spain, June 10-13, 2008 Proceedings 6*, pp. 504–513. Springer, 2008.
- [3] Francis McGlone, Ake B Vallbo, Hakan Olausson, Line Loken, and Johan Wessberg. Discriminative touch and emotional touch. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, Vol. 61, No. 3, p. 173, 2007.
- [4] Shogo Okamoto, Hikaru Nagano, and Yoji Yamada. Psychophysical dimensions of tactile perception of textures. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 6, No. 1, pp. 81–93, 2012.
- [5] Shun Suzuki, Seki Inoue, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 740–749, 2021.
- [6] Line S Löken, Johan Wessberg, Francis McGlone, and Håkan Olausson. Coding of pleasant touch by unmyelinated afferents in humans. *Nature neuroscience*, Vol. 12, No. 5, pp. 547–548, 2009.
- [7] 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 *Haptics: Science, Technology, and Applications: 11th International Conference, EuroHaptics 2018, Pisa, Italy, June 13-16, 2018, Proceedings, Part I 11*, pp. 270–281. Springer, 2018.