



空中超音波による硬さの異なるタップ感提示

Presentation of Tapping Sensation of Different Hardness Using Airborne Ultrasound

土屋億ダニエル¹⁾, 曾明然¹⁾, 砥出悠太郎¹⁾, 森崎汰雄¹⁾, 牧野 泰才¹⁾, 篠田 裕之¹⁾

Haruka, D. T., Zen, S., Yutaro. T., Tao, M., Yasutoshi, M. and Hiroyuki, S.

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), tsuchiya@hapis.k.u-tokyo.ac.jp

概要: VR 環境下で空中に提示された平面を手で叩く状況を想定し, 空中超音波を用いた振幅変調により硬さ感の表現に取り組んだ. 物体を叩く時に衝撃として手に伝わる減衰正弦波は, 物体によって変化する. 本研究では, 素手でバーチャル面に触れた時に超音波の減衰振動波を出力し, 硬さ感を知覚できるか検証した. その結果, 周波数や減衰率を調整することで各被験者内の硬さ知覚を変化させられた.

キーワード: 超音波フェーズドアレイ, 硬さ提示, 減衰正弦波

1. はじめに

空中触覚デバイスは非接触な触覚提示ができ, コンピュータゲーム [1], 記号情報伝達 [2] など多くの用途が期待されている. 空中触覚デバイスの中でも, 空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD[3]) は圧力分布の時空間制御性が高い [4]. この制御性を利用して, 空中タッチスクリーン [5], 立体映像との連動システム [6] などが実証されている.

近年 AUTD では知覚強度の向上 [7] や, 振動感の制御 [8] が可能になり, 触感再現の幅が広がっている. 触感再現では主にマクロ粗さ, ミクロ粗さ, 硬さ, 温冷, 乾湿が必要と考えられてきた [9]. マクロ粗さではこぼこ感 [10], ミクロ粗さでは摩擦感の大小 [11], 温冷ではミストによる冷覚 [12] などが AUTD で再現されている.

本研究では AUTD による多様な触感再現の一環として, 物体接触時の硬さ感提示に取り組んだ. 既に Marchal らにより, 物体を手で押し込んだ硬さ感を, 手の動きに合わせて振幅を変えた集束超音波で誘発できることが明らかになっている [13]. 一方, 著者らはタップ時の硬さ感表現として減衰正弦波に着目した. 物体を叩く衝撃は, 最大振幅, 周波数, 減衰率からなる減衰正弦波として表現され, その波形は物体毎に変化する [14]. 蜂須らは棒状の振動子で物体を叩く際, 想定物体に合わせて振動子の出力波形を変化させた [15].

本稿では指とバーチャル物体とのタップ時に合わせて AUTD による減衰正弦波を指に照射した時, その減衰正弦波の違いから硬さ感の違いを把握できることを明らかにした.

2. 提案手法

2.1 減衰正弦波モデル

一般に物体を手で叩いたときに生じる衝撃は減衰正弦波で表現される. 減衰正弦波における時刻 t の振幅 $Q(t)$ を式 1 に, その振動波形例を図 1 左に示す.

$$Q(t) = A(v)e^{-Bt}(2\pi ft) \quad (1)$$

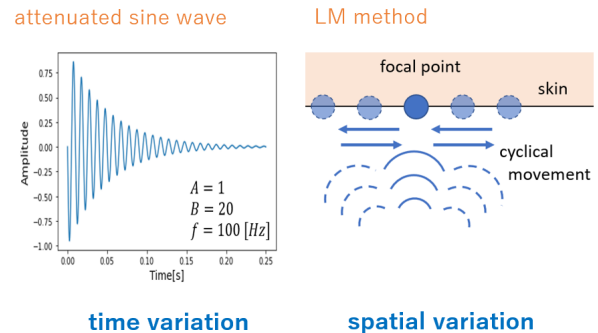


図 1: 硬さ感提示刺激 (左: 減衰正弦波, 右: LM 法)

$A(v)$ は接触時の衝撃の大きさ (最大振幅) であり, 一般に衝突時の速度 v によって決まる. B は振動波形の減衰率, f は振動波形の周波数である.

本稿では AUTD を用いて上記パラメータを変化させた. そのうち, 最大振幅 A においては AUTD で出力できる最大振幅に固定した. これは A が衝突時の撃力を表現したものであり, 硬さにおける各物質特性を表現したものではないからである. 以上より 3つのパラメータの内, 減衰率と周波数による硬さ感の提示能力について検証した.

2.2 空中超音波を利用した硬さ感提示システム

本実験では硬さ感に指とバーチャル物体がタップされる瞬間に合わせて AUTD で減衰正弦波を出力する. 実験でも述べるように, 硬さ感の調査では 300 Hz 以下の周波数領域を対象にとる. AUTD の搬送周波数は 40 kHz であり, これらの周波数と大きく異なる. このように AUTD の搬送周波数と異なる周波数を知覚させる方法として AM (Amplitude Modulation) 法と LM (Lateral Modulation) 法があるが, 本実験ではより知覚強度の強い LM 法を用いる [7].

LM 法は皮膚上で焦点を移動させることで強い知覚を与える手法である. 今回は線状 (linear movement) に往復す

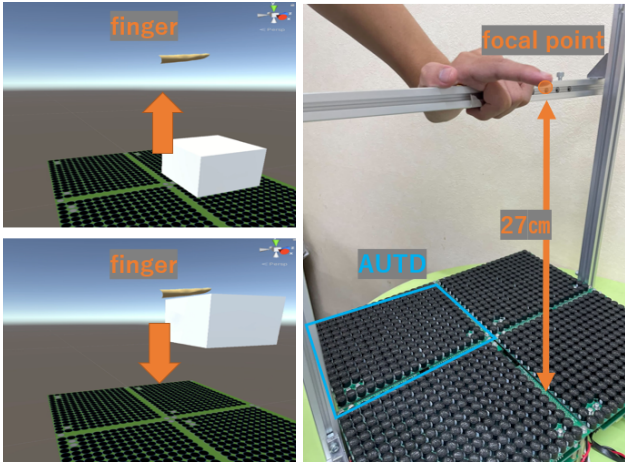


図 2: 実験システム (左: モデルケース, 右: 実験装置)

る焦点により触覚提示を行う。指に沿った方向の区間 l 内に、焦点を f [Hz] で正弦振動させる。すなわち、

$$z = l \sin(2\pi ft) \tag{2}$$

として焦点 z を変動させる。本実験では $l = 5$ [mm] に固定し、 f を目的とする周波数 (30, 100, 300) Hz に設定した。また目的とする減衰率に合わせ、タップ時からの経過時間に応じて振幅を減衰させることによって、減衰正弦波を表現した。以上、本手法についてまとめたものを図 1 に示す。

3. 実験方法

本実験では、超音波の振幅変調を用いた減衰正弦波を出力し、想定物体との接触時に生じる硬さを表現できるかを検証した。具体的には、減衰正弦波モデルの減衰率と周波数を変えることで表現される硬さの違いを、硬さ度合いの評価と想定材質との類似度評価という観点から検討を行った。

3.1 実験のモデルケース

本実験では、指とバーチャル物体がタップする瞬間に減衰正弦波を指に対して提示した。体性感覚の影響を排除し、皮膚感覚に集中させるため、モデルケースではバーチャル物体側が指に接近、衝突する状況を想定した。この衝突は 1 秒周期で繰り返された。また触覚情報のみで硬さを判別出来るかを確かめるため、衝突時の減衰正弦波による可聴音はホワイトノイズを聞かせることで遮断した。

3.2 実験装置

実験装置を図 2 右に示す。実験装置は AUTD 4 台と指の支持台で構成される。支持台は、指の高さが AUTD から 27 cm 離れた位置に固定されるように配置した。

3.3 実験手順

図 2 右のように、被験者の非利き手人差し指の腹に焦点が当たるように指の位置を調整した。実験前には図 2 左を見せ、指にバーチャル物体がタップされる状況の旨を伝えた。

実験ではホワイトノイズを聴いている被験者に 9 種類の減衰正弦波を照射し、各減衰正弦波に対し質問 (I) ~ (III)

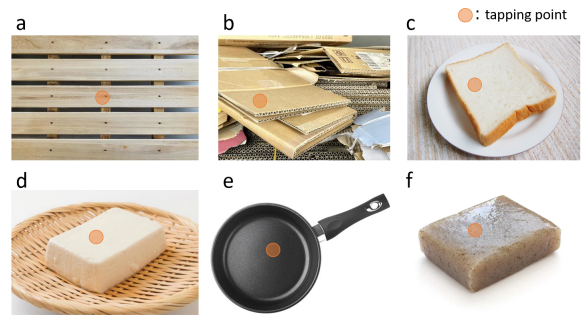


図 3: 提示した 6 種類の画像

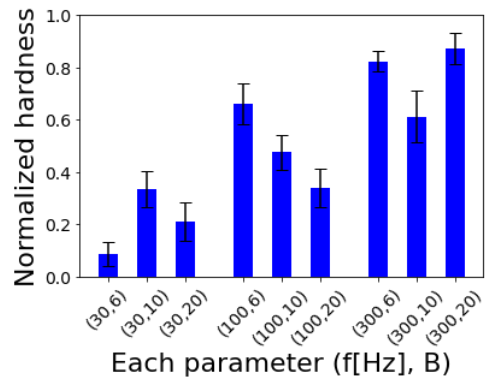


図 4: 質問 (I) の結果

に答えてもらった。質問に回答できるまで、被験者は繰り返し刺激を知覚することが出来る。質問は以下である。

質問 (I) 衝突物体の硬さは 100 段階中いくつか。

[1:非常に柔らかい] ~ [100:非常に硬い]

質問 (II) その触覚刺激はモノで例えると何か。

図 4 に示した画像 6 種類から選択

質問 (III) 選んだ画像と触覚刺激はどの程度似ているか。

以下の 7 段階リッカート尺度で評価。

[1:ほとんど似ていない] ~ [7:非常に似ている]

用意した刺激は、減衰率 B (20, 10, 6) の 3 種類と周波数 f (300, 100, 30) Hz の 3 種類の計 9 種類である。先行研究 [14] 及び著者の予備調査に基づき、最も触感の違いが知覚できたものを選定した。さらに周波数については指の知覚閾値の都合上、感度のピークである 300 Hz 付近以降は違いの知覚が困難なため今回のパラメータ設定にした。

以上の実験で計 9 条件の刺激提示を 1 回の試行とし、2 回試行を行った。触覚刺激の順序はランダムで被験者にはパラメータ値の情報は提示していない。質問 (II) において示した図 3 の写真は、予備調査に基づき今回のケースで触感に大きな差が生じるものや、触感が類似していると感じた物体 (食パン、こんにゃく、木の板) を選定した。実験は健康な男性 4 人、女性 1 人 (22~25 歳) に行った。

4. 実験結果

質問 (I) による実験結果を図 4 に示す。図 4 は、各減衰率における周波数に対する規格化された硬さである。各

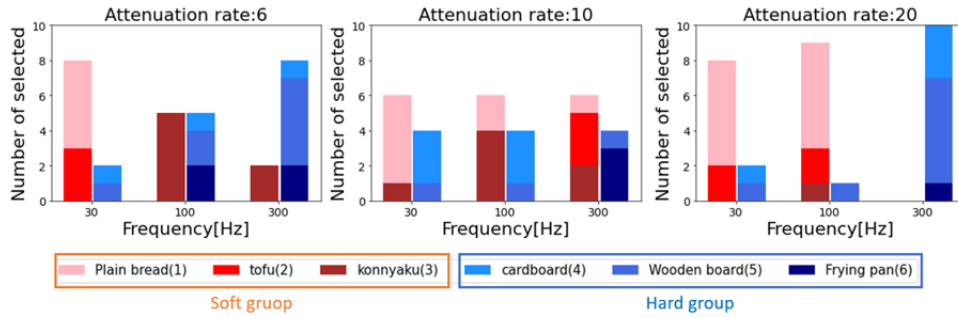


図 5: 質問 (II) の結果

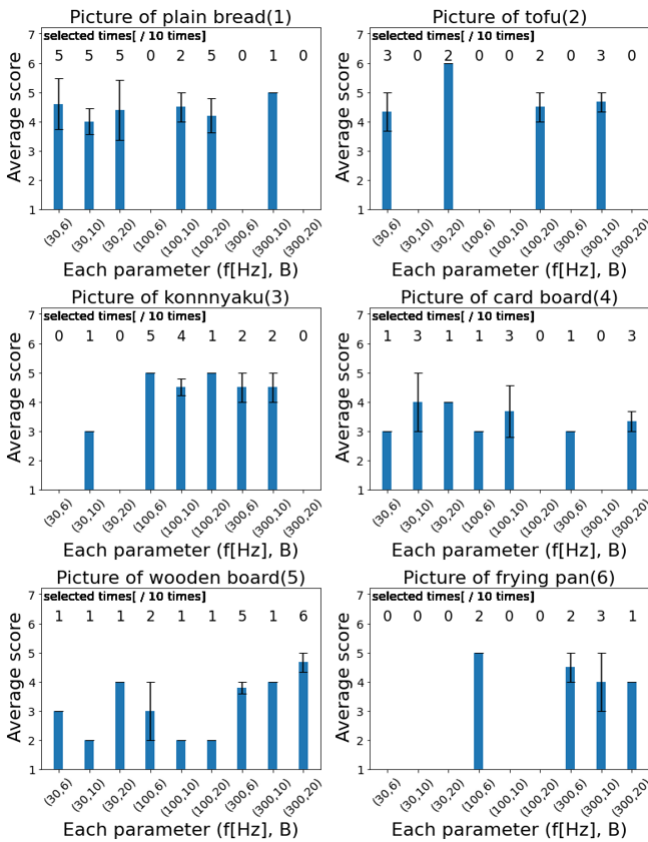


図 6: 質問 (III) の結果

被験者から得られたスコアを式 3 に代入することで規格化された硬さ $NV_{i,j}$ を算出した。

$$NV_{i,j} = \frac{(\text{score}_{i,j} - \text{score}_{i,\min})}{(\text{score}_{i,\max} - \text{score}_{i,\min})} \quad (3)$$

$\text{score}_{i,j}$ は被験者 i の触覚刺激 j に対する硬さスコアで、 $\text{score}_{i,\min}$, $\text{score}_{i,\max}$ は 1 試行中の被験者 i のスコアの最小値, 最大値である。規格化は絶対値の評価ではなく、各被験者の中で硬さ感が変化したかの評価を目的としている。

図 4 より、全体の傾向だけでなく、各減衰率に対しても周波数が高くなる程硬いと知覚された。また、今回のパラメータ範囲では、知覚上の最大硬さは (周波数, 減衰率)=(300 Hz, 20) の時、最小硬さは (30 Hz, 6) の時であった。

質問 (II) による実験結果を図 5 に示す。図 5 は各減衰率、

周波数ごとに選ばれた画像の積み上げ棒グラフを示している。この時、各パラメータの左側には柔らかいもの (食パン, 豆腐, こんにゃく), 右側に硬いもの (段ボール, 木の板, フライパン) を積み上げている。凡例に付与した数字は柔らかさの順位を示している。これは、全被験者の画像のみから判断される柔らかさの順位付け結果を用いている。

図 5 より、減衰率 $B = 6$ の時周波数 f が高くなる程硬いものが選ばれた。 $B = 10$ のときは各 f で選ばれた硬いものと柔らかいものの総数は同じであるが、 f が高くなる程より硬い材質に選択内容が変化した。 $B = 20$ の内、 $(f, B) = (30, 20)$, $(20, 100)$ の時はほぼ柔らかいものが、 $(f, B) = (300, 20)$ の時は全て硬いものが選ばれていた。

各周波数ごとに傾向を見た場合、(例えば $(f, B) = (30, 6-20)$ をまとめて 30 Hz として見る) 30 Hz では食パン, 100 Hz ではこんにゃく, 300 Hz では木の板が最も選ばれた。

質問 (III) による実験結果を図 6 に示す。各パラメータの触覚刺激と各画像に対する想定触覚の類似度をみるため、各刺激における 7 段階リッカート尺度の平均値及び選ばれた回数を画像ごとにまとめた。選ばれた数の最大は 10 である。

図 6 より、食パン・こんにゃく・木の板では選ばれた回数かつ平均値が大きい、つまり類似度が高い触覚刺激があった。食パンでは減衰率に依らず周波数が 30 Hz のときに、こんにゃくでは $(f, B) = (100, 6)$, $(100, 10)$ の時に、木の板では $(f, B) = (300, 20)$ の時に類似度が高くなっていた。

5. 考察

実験全体を通じて、減衰正弦波のパラメータ変化による硬さ知覚は、高周波になるにつれて硬く変化した。本研究で対象にした周波数成分では、高周波になるほど知覚強度が大きくなることから [14], 減衰正弦波の最大振幅は一定であるにも関わらず、硬さの度合いが変化したと考えられる。実際に全被験者からも、刺激の知覚される強さが主な硬さの判断材料になっていたとのコメントも受けている。

図 6 において、食パン・こんにゃく・木の板では比較的類似度の高い触覚刺激を生成できていた。周波数成分の傾向として、30 Hz で食パンが、100 Hz ではこんにゃくが、300 Hz では木の板が想定した硬さ感に近いものと評価を受けており、周波数が高くなる程硬い方向に向かう結果と一

致する。続いて、上記3つの材質に対する対象周波数パラメータの類似度の特徴について検討を行う。

食パンでは30 Hzの周波数で、どの減衰率でも高い評価を得ていた。この評価は食パンが最も柔らかく、30 Hzの超音波触覚自体の弱い最大提示力でも十分再現可能な接触感を減衰率に依らず提示できたことが要因と考えられる。

次に、こんにゃくでは、100 Hzかつ減衰率が小さいほど評価が高くなる結果となった。これはこんにゃく特有の弾力感によって、振動が持続すると捉えられたためである。一方硬い材質である木の板では接触時に振動が持続しないと捉えられたことから、300 Hzの条件かつ減衰率の大きい20の値で最も高い評価を示した。こんにゃくと木の板の結果は、周波数に加え減衰率でも評価が大きく変わることから、減衰率も硬さに由来する触感の質を変えられることが分かった。

通常、硬い材質に対する接触時の反発力は集束超音波の最大提示出力の観点から現実的な再現が行えないため、最も硬いフライパンでは評価が低かった。一方木の板の300 Hz、減衰率20の結果が最も評価が高いため、木の板までのヤング率では反発力を再現せずとも、適切な周波数と減衰率で多様な硬さの接触感を再現できる可能性がある。

図6では、対象画像に基づく触覚刺激の類似度を評価しており、硬さ以外の要素にも影響を受けることは注意が必要である。実際に豆腐では、冷たさも考慮したとのコメントが見受けられた。本実験では豆腐の冷たさを再現する冷覚提示は行わなかったため、類似度が低くなったと考えられる。

6. 結論

本実験では、超音波の振幅変調を用いた減衰正弦波を出力することでバーチャル物体とのタップ時に生じる硬さを表現できるかを検証した。具体的には、減衰正弦波モデルの減衰率と周波数によって表現される硬さの違いについて、硬さ度合いの評価と想定材質との類似度評価という観点から検討を行った。その結果、周波数成分を調整することにより各参加者の硬さ知覚を変化させることに成功した。また、減衰率についても直接硬さ知覚に影響を与えるとは言えないものの、想定材質に対する触感再現の質に寄与することが分かった。今後は空中超音波の減衰正弦波で表現可能な材質感表現のマッピングを行いたいと考えている。

参考文献

- [1] A. Israr, Poupyrev *et al.*, “Surround haptics: sending shivers down your spine,” in *ACM SIGGRAPH 2011 Emerging Technologies*, 2011, pp. 1–1.
- [2] D. S. Alles, “Information transmission by phantom sensations,” *IEEE transactions on man-machine systems*, vol. 11, no. 1, pp. 85–91, 1970.
- [3] S. Suzuki *et al.*, “Autd3: Scalable airborne ultrasound tactile display,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 4, pp. 740–749, 2021.
- [4] M. Y. Tsalamlal *et al.*, “Hair: Haptic feedback with a mobile air jet,” in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*. IEEE, 2014, pp. 2699–2706.
- [5] Y. Monnai *et al.*, “Haptomime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen,” in *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, 2014, pp. 663–667.
- [6] Y. Makino *et al.*, “Haptoclone (haptic-optical clone) for mutual tele-environment by real-time 3d image transfer with midair force feedback,” in *CHI*, vol. 16. San Jose, CA, 2016, pp. 1980–1990.
- [7] R. Takahashi *et al.*, “Tactile stimulation by repetitive lateral movement of midair ultrasound focus,” *IEEE transactions on haptics*, vol. 13, no. 2, pp. 334–342, 2019.
- [8] T. Morisaki *et al.*, “Non-vibratory pressure sensation produced by ultrasound focus moving laterally and repetitively with fine spatial step width,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 15, no. 2, pp. 441–450, 2021.
- [9] S. Okamoto *et al.*, “Psychophysical dimensions of tactile perception of textures,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 6, no. 1, pp. 81–93, 2012.
- [10] Z. Somei *et al.*, “Spatial resolution of mesoscopic shapes presented by airborne ultrasound,” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2022, pp. 243–251.
- [11] T. Morisaki *et al.*, “Midair haptic-optic display with multi-tactile texture based on presenting vibration and pressure sensation by ultrasound,” in *SIGGRAPH Asia 2021 Emerging Technologies*, 2021, pp. 1–2.
- [12] M. Nakajima *et al.*, “Spatiotemporal pinpoint cooling sensation produced by ultrasound-driven mist vaporization on skin,” *IEEE Transactions on Haptics*, vol. 14, no. 4, pp. 874–884, 2021.
- [13] M. Marchal *et al.*, “Can stiffness sensations be rendered in virtual reality using mid-air ultrasound haptic technologies?” in *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*. Springer, 2020, pp. 297–306.
- [14] A. M. Okamura *et al.*, “Reality-based models for vibration feedback in virtual environments,” *IEEE/ASME transactions on mechatronics*, vol. 6, no. 3, pp. 245–252, 2001.
- [15] T. Hachisu *et al.*, “Hachistack: Dual-layer photo touch sensing for haptic and auditory tapping interaction,” in *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2013, pp. 1411–1420.