



# 空中超音波触覚提示における主観的衝撃感の向上

Enhancing Subjective Impact Sensation in Mid-Air Ultrasound Haptic Feedback

佐々木大祐<sup>1)</sup>, 牧野泰才<sup>1)2)</sup>, 篠田裕之<sup>1)2)</sup>

Daisuke SASAKI, Yasutoshi MAKINO, and Hiroyuki SHINODA

- 1) 東京大学大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1)  
2) 東京大学大学院新領域創成科学研究科 (〒 277-8561 千葉県 柏市 柏の葉 5-1-5)

**概要:** 超音波を用いた触覚提示では物理的に大きな力を提示できないことが知られる。そのため、超音波の振幅や焦点位置の変調を行い主観的に大きな力を感じさせる研究が行われてきた。本研究では扱う刺激の種類を衝撃感(瞬時的な触覚刺激)に絞り、主観的な強度を増す提示手法について検討する。超音波の提示時間や視覚情報との相対的なタイミングを変化させる実験を行った結果、超音波の提示時間を長く引き伸ばすことで衝撃感が高まる可能性があることを示した。

**キーワード:** 触覚, 視覚, クロス・マルチモーダル

## 1. 序論

物体表面に超音波の焦点を形成することによって、その焦点において音響放射圧による力を非接触的に発生させることが知られる。空中超音波触覚ディスプレイ (AUTD) はこの現象を利用して非接触的に力を提示するデバイスである [1]。AUTD を用いて、非接触的に触覚を提示する研究や [2], 物体の運動を制御する研究などが行われている [3]。

一方で、空中超音波には提示できる力の大きさが数 g 程度であるという特徴がある。森崎らの研究によれば、一般的な動作環境を想定した時、AUTD6 台を使用して提示できる力の大きさは 0.027N である [4]。そこで、AUTD による触覚刺激の主観的な強度を増すことを目的とした研究がいくつか行われている。例えば振幅変調 (AM 刺激) と呼ばれる手法では、提示する超音波の振幅を周期的に変化させることで人体表面に振動を起こし、実際よりも強度の大きい力として知覚させることが出来る [5]。また、焦点位置の時空間変調 (LM 刺激または STM) と呼ばれる手法では、ある点に触覚を提示したいとき、その近傍で焦点位置を周期的に変化させることで実際よりも強度の大きい力として知覚させることが出来る [4, 5, 6]。

これらの研究においては、主に定常的な力を提示する状況が想定されている。そこで本研究では、ボールが手のひらに衝突して跳ね返るときのような、衝撃感(瞬時的な触覚刺激)が提示される状況において、その主観的な強度を増す手法を探索する。ここで衝撃感を増すために操作することが出来るパラメータとしては、触覚提示を行う際の焦点提示時間や、超音波の振幅変調や時空間変調などが挙げられる。バーチャルなオブジェクトに触覚フィードバックを付与するような視触覚システムを想定すれば、触覚提示と視覚的な衝突時刻の間の時間差や、バーチャルなオブジェク

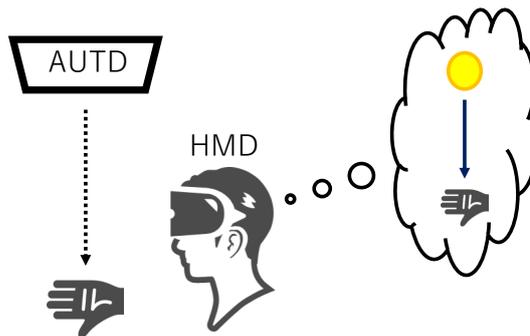


図 1: 視触覚システムの構成図

トのテクスチャ情報など視覚的な情報も操作できる。本研究の範囲では、触覚提示を行う際の焦点提示時間と、触覚提示と視覚的な衝突時刻の間の時間差の 2 点に特に注目し、効果的に衝撃感を提示するためにこれらのパラメータをどのように設定すべきか探る。AUTD による非接触の触覚刺激を用いて効果的に衝撃感を提示する手法が確立できれば、例えばバーチャルなオブジェクトに触れてその運動に干渉することができるような、AUTD による触覚提示の非接触性を生かしたインタラクティブな視触覚システムにおいて、実現できる体験の幅を広げることにつながると思われる。

## 2. システムの概要

本研究では、触覚刺激のための焦点提示時間やタイミングの操作、また視覚刺激との組み合わせを実現するため、AUTD と HMD を用いた視触覚システムを作成した。

システムの概要は図 1 の通りである。本実験には 12 台の AUTD を用いた。その実際の配置は図 2 の通りであり、4 台を 2 × 2 に並べて下向きに設置した後、その周辺 4 方向にそれぞれ 2 台ずつを 45 度傾けて設置した。体験者は下向

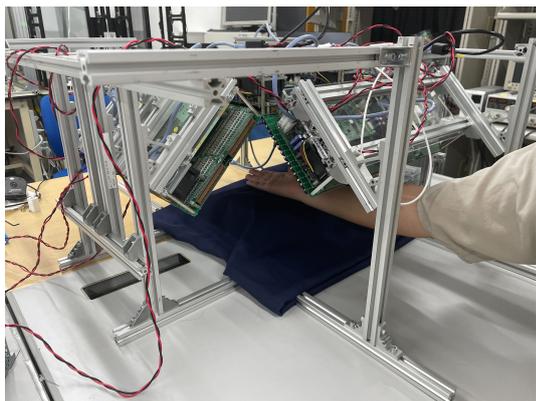


図 2: 実際の視触覚システム

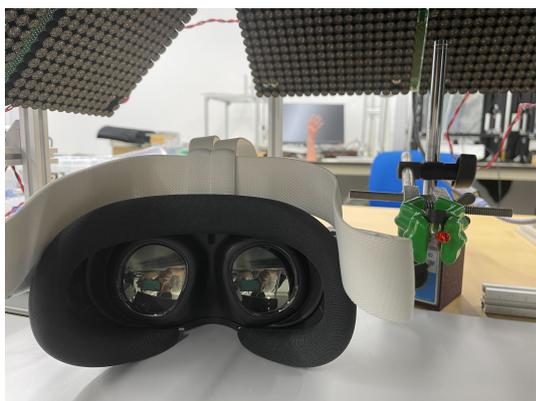


図 3: 遅延計測用の装置

きに設置された4台のAUTDの中心部分から下に20cm離れた台の上に、図2のように手掌部を上に向けて手を置き、触覚刺激を受ける。また、体験者はHMD(Meta Quest3)を装着すると、周辺環境の映像(パススルー映像)の上に表示されたボールの3Dモデルが、手掌部の30cm上の位置から落下し、手掌部に衝突して跳ね返る様子を見ることが出来る。このシステムでは、焦点提示の時間やタイミング、振幅の変調などのパラメータを調整することが出来る。

本研究には触覚刺激と視覚刺激の時間差による知覚への影響を調べる実験が含まれるため、AUTDによる焦点提示とHMDによる映像提示の間の遅延時間が問題となる。この遅延時間は図3のような装置によって測定した。超音波振動子と発光ダイオードを接続した回路を作成し、超音波振動子をAUTDから提示される焦点の部分に置くことで、焦点が提示されているときに発光ダイオードが光っている。また、HMD上でのバーチャルな球の衝突瞬間に関しては、衝突の瞬間からHMDスクリーン全体の色を変化させるように実装しておくことで、HMDを被ってなくてもその瞬間が判断できるようになっている。これら発光ダイオードの発光とHMDスクリーンを、約500fpsで動画撮影可能な高速カメラで撮影することによって、触覚刺激と視覚刺激の間に元々ある遅延時間を測定する。この遅延測定の結果、実行時のPCの処理状況にも依存するが、触覚刺激の方が約50ms早いという結果が得られた。後述

する実験を行う際には、その遅延を打ち消すようにプログラム内でオフセットを入れてから実験を行った。

### 3. 実験

本研究では、提示時間を変えながら触覚刺激のみを提示する実験1と、視覚刺激と触覚刺激を組み合わせて提示する実験2を行った。被験者は20代男性3名である。本研究で提示する触覚刺激は、すべて200Hzの振幅変調(AM変調)を施した単焦点提示である。実験中にAUTDの駆動音が聞こえないよう、被験者にはイヤホンを装着し、ホワイトノイズを聞きながら実験に参加してもらった。AUTDから手掌部までの距離は5mm単位で調節し、被験者が最も刺激が強いと感じる距離に固定して実験を行った。この距離は3名の被験者ともに18.5cmであった。

#### 3.1 実験1

実験1では、焦点提示時間を変更した時の、体験者の主観的な感じ方の変化を探る。この実験において被験者は図2のように、手掌部をAUTDの下に置く。実験1は触覚刺激のみで行うため、被験者はHMDを装着しない。被験者には、手掌部に対して瞬時的な触覚刺激を提示すること、その強度と瞬時性を評価するよう伝えておく。また実験前にAUTDの出力を最大にした状態で数秒にわたって定常的な焦点提示を行い、その強度を7として評価するよう伝えた。

焦点提示時間は50ms, 100ms, 150ms, 200ms, 250msの5パターン用意した。これら各10回の合計50回の刺激をランダムな順番で被験者の手掌部へ提示し、感じた触覚刺激の強度と瞬時性を7段階で評価してもらうこととした。強度とは、手掌部に提示されたと感じた力の大きさであり、弱い場合に1、強い場合に7に近い評価とした。瞬時性とは、物体が手掌部に衝突した時のような力を感じるかの評価項目であり、そのように感じる場合は7を、遠いと感じる場合は1を回答するように伝えた。

#### 3.2 実験2

実験2では、HMDによって提示される視覚刺激に対する焦点提示のタイミングを変更した時、体験者の主観的な感じ方がどのように変化するかを探る。この実験においても被験者は図2のように、手掌部をAUTDの下に置く。実験2は触覚刺激と視覚刺激の間の相対的な時間差を扱うため、被験者はHMDを装着する。被験者はHMDを通してパススルー映像と呼ばれる、周辺環境がそのままスクリーン上に表示された映像を見る。PC側で操作を行うと、この映像の上に重畳する形で図4のようなバーチャルな球が、手掌部の鉛直上方30cmの位置に表示される。この球はそのまま自由落下し、被験者の手掌部に衝突して跳ね返る。この衝突に合わせて、AUTDによる触覚提示が行われる。

視覚刺激(視覚上での球と手掌部の衝突)に対する焦点提示のタイミングは、視覚刺激の時刻を $t = 0s$ としたとき、 $-100 \leq t \leq 0ms$ ,  $-75 \leq t \leq +25ms$ ,  $-50 \leq t \leq +50ms$ ,  $-25 \leq t \leq +75ms$ ,  $0 \leq t \leq +100ms$ の5パターン用意した。焦点提示時間は100msで一定である。この実

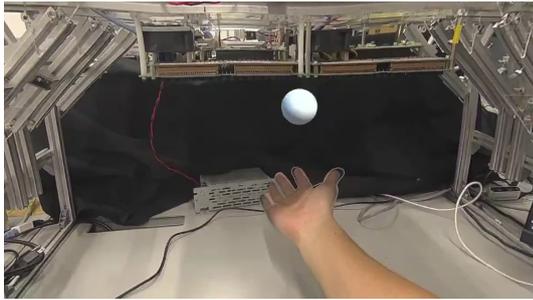


図 4: HMD 上に表示されるバーチャルな球

験において被験者には実験 1 と同様に強度・瞬時性を評価してもらったほか、視触覚間の時間差も評価してもらった。視触覚刺激の時間差が感じられない場合を評価 4 とし、触覚の方が速いと感じる場合は 7 に近い評価を、触覚の方が遅いと感じる場合は 1 に近い評価をするよう伝えた。

## 4. 実験結果とその考察

### 4.1 実験 1

実験結果は図 5 のようになった。実験結果より、被験者が感じた主観的な刺激強度は、焦点提示時間と正の相関にある可能性が高い。すなわち、刺激時間が 250ms までの間については、その時間が長いほど強い刺激として知覚される傾向にある。今後十分な被験者数と試行回数で実験を行うことで、「強度の高い刺激を提示したい場合、焦点提示時間を長くした方がよい」という結果が得られる可能性がある。

また、被験者が感じた瞬時性と焦点提示時間に関しては負の相関があるように見える。つまり、提示時間に応じて主観的な瞬時性は低下する傾向にある。ただし、被験者に実験内容に関するコメントを求めたところ、ホワイトノイズを聞いていても AUTD の駆動音が聞こえてしまう事があったとの指摘を受けた。この音の情報が瞬時性の評価に影響している可能性が否定できず、より詳細な調査が必要である。

以上より実験 1 を通じて、触覚刺激の主観的強度と焦点提示時間は正の相関にある可能性が高いという結果を得た。

### 4.2 実験 2

実験 2 の結果は図 6 のようになった。刺激はすべて 100ms 提示されており、横軸は視覚上の衝突瞬間を  $t = 0ms$  としたときの、焦点提示を開始した時刻を示している。つまり、グラフ左の結果ほど、視覚的な衝突瞬間よりも前に、触覚刺激が提示されていることに対応する。結果を見る限り、焦点提示のタイミングと主観的強度・瞬時性の間に特に関係が見られない。

下段の視触覚間の時間差については、図上で右肩下がりになる、つまり衝突瞬間からずれるほどそのタイミングの違いに気づくことを想定したが、これについても特に傾向が見られなかった。つまりこの結果は、視覚刺激のタイミングから前に 100ms 程度ずれて提示されたとしても、被験者にはその差を知覚できなかったことを示唆している。

被験者の人数を増やしたさらなる検証が必要であるが、これらの結果を踏まえると、瞬時的に大きな衝撃感を提示す

るために、刺激の開始時刻を視覚的な接触瞬間よりも早いタイミングにしたうえで、刺激の持続時間を長めに確保することで強度を上げる、という方法が可能ではないかと考えている。

## 5. 結論

本研究では、AUTD による触覚提示の主観的な衝撃感を増す手法を検討した。考えられる手法として、焦点提示の時間とそのタイミングを操作することを考え、どのように操作するのが最適であるかを実験を通して調査した。その結果現時点では、少なくとも 250ms までの間であれば、焦点提示時間を伸ばすことが主観的な強度を高めることに資する可能性が示された。今後は実験設定を見直しつつ被験者実験を継続し、AUTD によって衝撃感を提示したいとき一般に利用可能な焦点提示手法を提案することを目指す。

## 参考文献

- [1] 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.
- [2] Yasuaki Monnai, Keisuke Hasegawa, Masahiro Fujiwara, Kazuma Yoshino, Seki Inoue, and Hiroyuki Shinoda. Haptomime: mid-air haptic interaction with a floating virtual screen. In *Proceedings of the 27th annual ACM symposium on User interface software and technology*, pp. 663–667, 2014.
- [3] Tao Morisaki, Ryoma Mori, Ryosuke Mori, Yasutoshi Makino, Yuta Itoh, Yuji Yamakawa, and Hiroyuki Shinoda. Hopping-pong: Changing trajectory of moving object using computational ultrasound force. In *Proceedings of the 2019 ACM International Conference on Interactive Surfaces and Spaces*, pp. 123–133, 2019.
- [4] Tao Morisaki, Masahiro Fujiwara, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. 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.
- [5] 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.
- [6] 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.

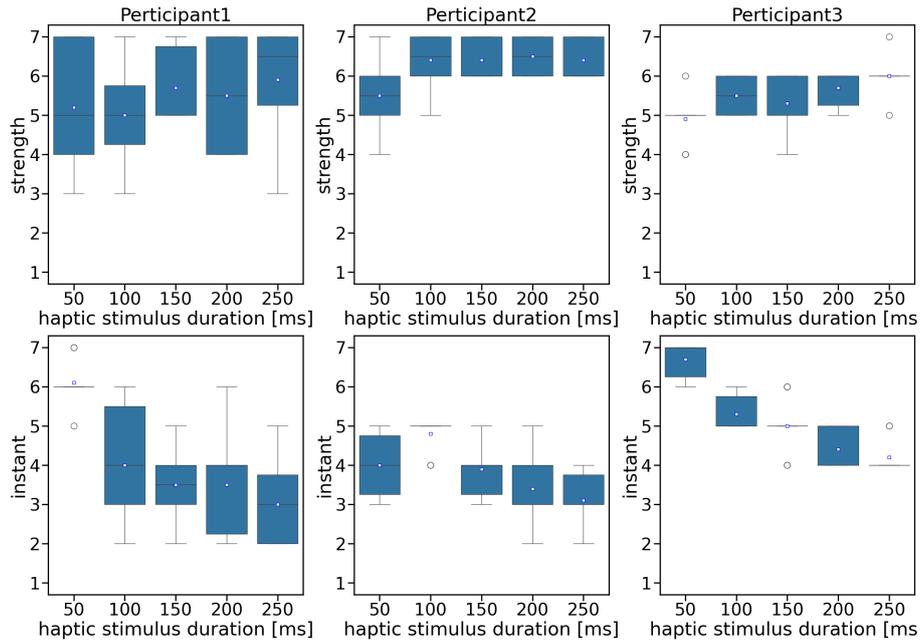


図 5: 実験 1 の各条件で 10 回ずつ測定した結果の箱ひげ図。縦軸は強度 (strength), 瞬時性 (instant) に関する被験者の 7 段階評価。横軸は焦点提示時間の長さ [ms]。青い四角は平均値, 白い丸は外れ値を示す。

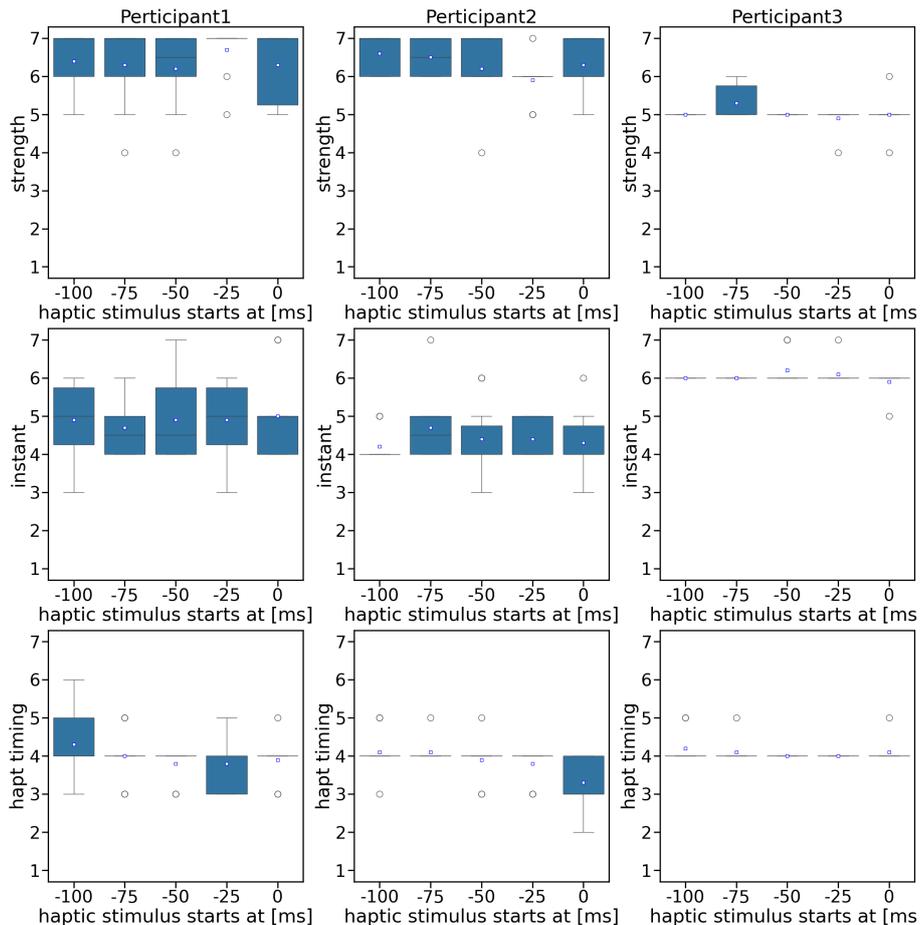


図 6: 実験 2 の各条件で 10 回ずつ測定した結果の箱ひげ図。縦軸は強度 (strength), 瞬時性 (instant), 視覚的な衝突に対する触覚刺激タイミングの早さ (hapt timing) に関する被験者の 7 段階評価。hapt timing の評価は視覚上の衝突時刻に対して触覚を感じた時刻が早い場合 7, 同じ場合 4, 遅い場合 1。横軸は視覚上の衝突瞬間を  $t = 0ms$  としたときの, 焦点提示を開始した時刻 [ms]。焦点提示時間はいずれも 100ms。青い四角は平均値, 白い丸は外れ値を示す。