



# 呼吸運動を模した空中超音波刺激による 仮想的な動物とのインタラクション

Virtual Animal Interaction Through Mid-air Ultrasound Haptic Feedback  
Simulating Respiratory Motion

細井十楽<sup>1</sup>, 金 杜<sup>1</sup>, 伴 祐樹<sup>1</sup>, 割澤伸一<sup>1</sup>

Juro HOSOI, Du JIN, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, hosojuro@lelab.u-tokyo.ac.jp, dujin@lelab.t.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** 動物とのインタラクションはアニマルセラピーや教育等の観点から需要が大きい。一方で、実際の動物との触れ合いは、アレルギーや外傷との危険性、倫理性の観点から制約がある。本研究では、非接触に触覚刺激を提示可能な空中超音波刺激を用いた仮想的な動物とのインタラクション体験において、呼吸運動を模した視触覚刺激を提示することを提案した。猫とのインタラクションを行う実験によって、猫の呼吸運動を視触覚的に提示することで、猫の生き物らしさについての主観評価が向上することを確認した。

**キーワード:** アニマルセラピー, 空中超音波刺激, 呼吸シミュレーション, 猫

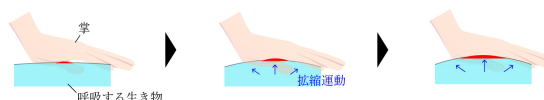
## 1. はじめに

猫や犬などの生き物との触れ合いは、長きにわたって人類が行ってきた営みであり、心地よく、楽しいものである [1]。生き物との触れ合いは、アニマルセラピーの観点で注目されており、お世話や倫理的責任、アレルギーの問題が少ないペット型ロボットが多数開発されており、よりリアルで生き物らしい体験を目指した試みが行われている。例えば、ペット型ロボットとのインタラクションにおいて、生き物の呼吸運動を視触覚的に模擬することで、リラックス効果を向上させられることが明らかとなっている [2]。一方で、ペット型ロボットは、生き物らしい行動の模倣や、成長などの変容の提示を物理的に再現することが難しく、体験の多様性やリアリティが限定的であるという課題がある。

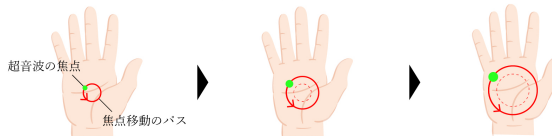
近年の Virtual Reality (VR) 分野では、物理的に再現が困難な刺激提示を代替的に再現する技術が多数研究されている。特に、接触や装着を要さず触覚刺激を提示可能な空中超音波刺激を用いることで、柔らかく繊細な毛並みの触感を撫でている感覚を提示する試みが行われている [3, 4]。本研究では、これらの研究を発展させ、生き物の撫でている際の毛並みの触感に加えて、手を触れた際に感じる呼吸運動の感覚を提示することによって、仮想的な生き物とのインタラクションにおけるリアリティと心地よさを向上させることを提案する。本稿では、空中超音波刺激による動物とのインタラクション体験設計の初端として、呼吸運動を模した空中超音波刺激を提案し、呼吸する猫の CG モデルと合わせて提示することで、猫とのインタラクション体験に対してどのような効果があるかを検証した。

## 2. アプローチ

### 呼吸運動の触覚



### 超音波刺激による提示イメージ



**図 1: 本研究の提案手法の概要。生き物の呼吸運動の拡張を、空中超音波刺激の焦点の円運動の直径と強度を制御することで提示する。**

本研究では、空中超音波刺激によって、仮想的な生き物の呼吸運動を模した触覚刺激を提示することを提案する。空中超音波刺激は、複数のパラメトリックスピーカによる超音波を空間上のある位置に収束させることで焦点を作り出し、非接触に触覚刺激を提示することが可能である。非接触に触覚刺激を提示することが可能であるため、接触を要する硬い振動子では提示が困難な生き物の柔らかい触感を提示可能であると考えられる。空中超音波刺激は焦点の位置や振幅を変調させることによって様々なテクスチャや形状を提示することができ、様々な変調方式が提案されてきた。例えば、Spatio-temporal modulation (STM) [5] という変調方式において、焦点を掌や指先上で円状に移動させた際に、円運動の直径と速度を変化させると、粗さ知覚

等が変化することが明らかとなっている [6].

生き物、特に猫などの呼吸運動を掌における触覚刺激として知覚する際、知覚される刺激は生き物の拡張運動である。呼吸運動に合わせて、生き物表面の皮膚並びに毛並びが拡張することによって、触覚刺激の接触範囲と強度が変化すると考えられる。具体的には、膨らむ際は掌に対する接触範囲と強度が増加し、しぼむ際は接触範囲と強度が減少する。ペット型ロボットにおいて呼吸運動を模擬する先行研究では、サーボモータ等を用いて、物理的に皮膚の上下運動を再現していた。本研究では、超音波刺激における焦点の円運動の直径と振幅を制御することにより、呼吸運動の接触範囲と強度の変化を提示することを試みた (図 1)。吸気によってによって拡大する時は焦点移動の円径を大きくするとともに振幅も大きくし、逆に呼気によって縮小する時は、焦点移動の円の直径を小さくするとともに振幅を小さくすることとした。

### 3. 実験

本実験の目的は、手を猫の上に静止させた際の猫の呼吸運動を触覚刺激として提示することによって、VR 空間における仮想的な猫の生き物らしさが向上するのではないかという仮説を検証することである。

実験には 11 人の参加者 (男性：10 名、女性：1 名) が参加した。参加者の平均年齢は 24.5 歳であった

#### 3.1 実験条件

本実験条件は 3 つである。1 つ目は、触覚刺激を提示しない「提示なし条件」である。この条件では、本実験のベースラインとして、視覚刺激のみの提示を行う。2 つ目は、定常的な触覚刺激を提示する「定常提示条件」である。この条件では、視覚刺激に加えて呼吸運動を模していない触覚刺激を提示することで、触覚刺激としての空中超音波刺激の提示自体による猫の生き物らしさへの効果を見ることが可能である。3 つ目は、本研究の提案手法である呼吸運動を模した触覚刺激を提示する「呼吸運動提示条件」である。1 つ目の「提示なし条件」と比較することで、ベースラインからの生き物らしさの向上効果を見ることができ、2 つ目の「定常提示条件」と比較することで、空中超音波刺激の設計において、呼吸運動を模した提示デザインが猫の生き物らしさに与える寄与を検証することができる。

実験参加者は各実験条件ごとに 1 回ずつタスクを行い、計 3 回のタスクを行った。実験条件の順序はラテン方格法を用いて実験参加者間でカウンターバランスを取った。

#### 3.2 実験手順

実験参加者は事前アンケートに回答したのち、空中超音波振動子アレイの正面に着席した。その後、HMD とノイズキャンセリングヘッドホンを装着した。参加者は実験タスクにおけるインタラクションとアンケート回答を練習を行い、タスクの内容を事前に把握した状態で、以下の実験タスクを実験条件ごとに 1 回ずつ行った。この時、本実験の目的が呼吸運動提示による生き物らしさの向上であり、あ

る条件で呼吸運動を模した触覚刺激を提示していることは参加者には通知されなかった。

参加者は前方で寝ている猫に右手を伸ばし、猫の背中の上に右手を 30 秒間置く体験を行った。その後、HMD の装着を取り外し、30 秒間の体験について、主観評価 (猫の生き物らしさ、心地よさ) を 10 段階 (1：全く感じない、10：非常に感じる) で回答した。加えて、体験について感じたことを自由回答で回答した。回答は全て iPad で行った。

#### 3.3 実験システム

本研究で用いたデバイスを以下にまとめる。映像の提示にヘッドマウントディスプレイ (Meta Quest 3, Meta) を用いた。また、聴覚刺激の統制のため、ノイズキャンセリングヘッドホン (WH-1000XM4, SONY) を用いた。手の位置、形状の認識にはハンドトラッキングカメラ (Leap Motion Controller 2, Ultraleap) を用いた。触覚刺激には 1 台につき 249 個の振動子がアレイ上に配置されている空中超音波刺激アレイである Airborne Ultrasound Tactile Display (AUTD) [7, 8] 2 台を用いた (図 2)。AUTD を用いることで、ハンドトラッキングカメラによって取得した掌の位置に対して、非接触に触覚刺激を提示することが可能である。

映像の提示として、1 分間に 20 回の呼吸を行い、呼吸と連動して皮膚と毛並びが拡張する猫の CG モデルを作成し、一般的な家屋のベッドの上に寝ている猫が目の前にいる VR 空間を用意した (図 3)。20 bpm は寝ている猫の呼吸ペースとして自然なペースであり、先行研究でのペット型ロボットの呼吸ペース模擬においても用いられたペースである [2].

触覚刺激の提示として、多くの先行研究において一般的に用いられている、超音波の焦点を掌上に円運動させる STM を用いた [6]。提示なし条件では、超音波刺激を提示しなかった。定常提示条件では、超音波の焦点変調の円運動の直径を 4 cm、強度を約 15 mN/cm<sup>2</sup> で固定した。対して呼吸運動提示条件では、円運動の直径を最小 0 cm、最大 4 cm、強度を最小約 4 mN/cm<sup>2</sup>、最大約 15 mN/cm<sup>2</sup> とした振幅で、周期を 3 秒 (20 bpm) としたサインカーブでそれぞれ設定した。この時、体験が自然となるよう、直径と強度のサインカーブは映像の猫の CG の呼吸と時間的に同期させた。これらの強度と直径は、予備実験において呼吸運動に感じられるような値として設定した。

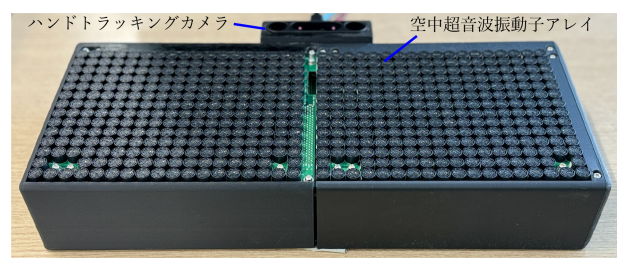


図 2: 本研究の触覚提示に用いた、ハンドトラッキングカメラと空中超音波振動子アレイ



図 3: 実験で体験した VR シーン。実験参加者は正面の猫の背中の上に掌を置いた。

### 3.4 実験結果

図 4 は、「猫の生き物らしさ」、「心地よさ」についての結果の箱ひげ図を示す。

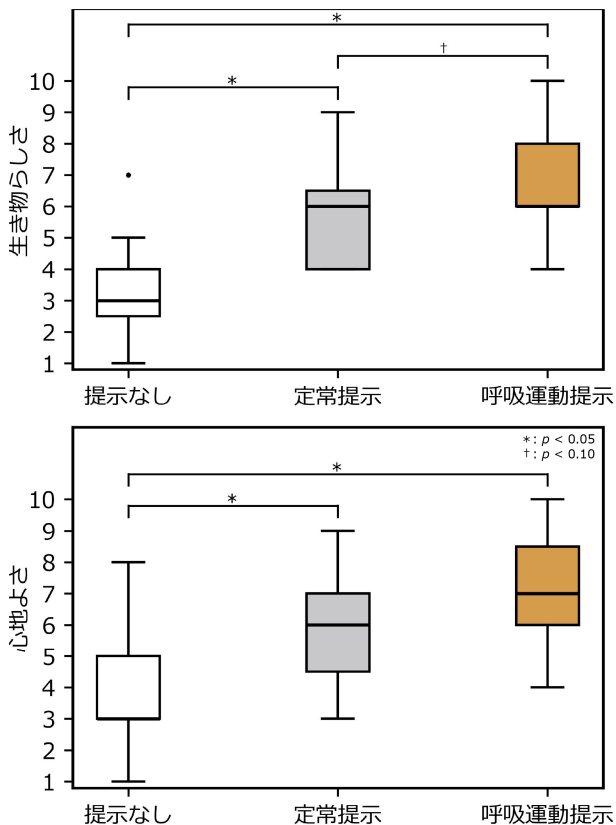


図 4: 猫の生き物らしさと心地よさについての主観評価の結果の箱ひげ図。外れ値は四分位点から 1.5 倍以上離れたデータ。

それぞれの結果に対し、以下の統計検定を行った。なお、本研究における有意水準は 5% とする。まずフリードマン検定を行った結果、猫の生き物らしさ ( $\chi^2 = 12.3, p = 0.002$ ), 心地よさ ( $\chi^2 = 6.78, p = 0.034$ ) のそれぞれについて、有意な主効果が確認された。そのため、事後検定として、Benjamini-Hochberg 法による補正の下、各条件間でウィルコクソンの符号付き順位検定を行った。

猫の生き物らしさの主観評価について、「提示なし条件」-「定常提示条件」間 ( $Z = 2.22, p = 0.039$ ) と「提示なし条件」-「呼吸運動提示」間 ( $Z = 2.59, p = 0.029$ ) で有意な差が見られ、「定常提示条件」-「呼吸運動提示」間 ( $Z = 1.77, p = 0.077$ ) で有意傾向が確認された。

心地よさの主観評価について、「提示なし条件」-「定常提示条件」間 ( $Z = 2.61, p = 0.013$ ) と「提示なし条件」-「呼吸運動提示」間 ( $Z = 2.67, p = 0.022$ ) で有意な差が見られ、「定常提示条件」-「呼吸運動提示」間 ( $Z = 1.61, p = 0.107$ ) では有意な差は確認されなかった。

### 3.5 考察

猫の生き物らしさについて、統計検定の結果から、定常提示条件について、提示なし条件と比較して主観評価が有意に高くなった。これは、猫とのインタラクションについて、映像に加えて触覚刺激を提示することで、猫の生き物らしさの知覚が向上したことが意味する。提示なし条件での自由回答には「何も感じなかったため、リアルさはあまりなかった。映像がリアルなため、置いているような気はした。」という回答があったのに対し、定常提示条件では、「触っている感覚はあったが、生き物感は少なかった」という回答があり、空中超音波刺激の存在によって、猫の触覚的な実体を知覚させられたことを示唆している。さらに、統計検定の結果から、呼吸運動提示条件が提示なし条件、定常提示条件よりも主観評価が高くなることが示唆された。これは呼吸運動を模した空中超音波刺激によって、猫とのインタラクションにおける猫の生き物らしさ知覚を向上させられたことを意味する。自由回答では、実験参加者には呼吸運動を模した刺激を提示したことを通知していなかったにも関わらず、「呼吸に合わせて猫が上下する感じがした」「呼吸に合わせて膨らむ感じ、猫の体温を感じた。」といった呼吸に対する言及が 11 人中 6 人に見られ、提案手法の刺激が呼吸運動を想起させられたことを示唆された。

心地よさの主観評価について、統計検定の結果から、定常提示条件、呼吸運動提示条件は、提示なし条件より有意に大きくなった。また、定常提示条件と呼吸運動提示条件間では有意な差は見られなかった。これは、超音波触覚刺激によって、心地よさが向上したことを示す一方で、呼吸運動を模した刺激設計には効果がみられなかったことを意味する。超音波刺激を提示することで、猫とのインタラクションのリアリティが増加し、猫との触れ合いによる心地よさが生じたと考えられる。呼吸運動を模した刺激設計は猫らしさの主観評価に対して効果が確認できたのに対し、心地よさに対する効果がみられなかった要因の一つとして、本実験のインタラクションが限定的であったことが考えられる。本実験のタスクは 30 秒間猫の上に掌を置くというもので、一般的な猫とのインタラクションと比較して短時間かつ単純なものであるため、生き物らしい猫とのインタラクションにおける心地よさが十分に生じなかった可能性がある。もう一つの要因として、呼吸運動を模した刺激設計のリアリティが不足していることが考えられる。自由回答では、触

覚刺激が機械的で心地よさが減少したという回答があった。本実験では、単純な正弦波によって呼吸運動を模したが、先行研究ではのこぎり波が用いられているものもあり [2]、他の波形によってさらにリアルで心地よい呼吸運動を提示できる可能性がある。今後、より複雑でリアルな呼吸運動シミュレーション設計をした上で、掌を置く以外の撫でるといった動作や、触られる、舐められるといったパッシブな体験も含むインタラクションによって、生き物らしさと心地よさをより向上させることを検討する。

#### 4. おわりに

本研究では、空中超音波刺激を用いた猫などの動物とのインタラクションにおいて、呼吸運動を模した視触覚刺激を提示することによって、仮想的な動物の生き物らしさと心地よさが向上させることを提案した。実験から、空中超音波刺激の焦点の円運動における直径と強度について呼吸運動を模した刺激を提示することで、体験したインタラクション中の猫の生き物らしさが向上することが示唆された。今後、より複雑な刺激設計とインタラクションを検討することで、さらにリアリティと心地よさが向上できる可能性が考えられる。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP21H03478, JP23H04333, JP23KJ0770 の助成を受けたものです。

#### 参考文献

- [1] Takumi Nagasawa, Mitsuaki Ohta, and Hidehiko Uchiyama. Effects of the characteristic temperament of cats on the emotions and hemodynamic responses of humans. *PLOS ONE*, Vol. 15, No. 6, pp. 1–15, 06 2020.
- [2] Yasaman S. Sefidgar, Karon E. MacLean, Steve Yohanan, H.F. Machiel Van der Loos, Elizabeth A. Croft, and E. Jane Garland. Design and evaluation of a touch-centered calming interaction with a social robot. *IEEE Transactions on Affective Computing*, Vol. 7, No. 2, pp. 108–121, 2016.
- [3] Juro Hosoi, Du Jin, Yuki Ban, and Shin’ichi Wari-sawa. Furair: Non-contact presentation of soft fur texture by psuedo-haptics and mid-air ultrasound haptic feedback. In *SIGGRAPH Asia 2023 Emerging Technologies*, SA ’23, New York, NY, USA, 2023. Association for Computing Machinery.
- [4] Juro Hosoi, Du Jin, Yuki Ban, and Shin’ichi Wari-sawa. Voluminous fur stroking experience through interactive visuo-haptic model in virtual reality, 2024.
- [5] William Frier, Dario Pittera, Damien Ablart, Marianna Obrist, and Sriram Subramanian. Sampling strategy for ultrasonic mid-air haptics. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI ’19, p. 1–11, New York,

NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.

- [6] Damien Ablart, William Frier, Hannah Limerick, Orestis Georgiou, and Marianna Obrist. Using ultrasonic mid-air haptic patterns in multi-modal user experiences. In *2019 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, pp. 1–6, 2019.
- [7] Seki Inoue, Yasutoshi Makino, and Hiroyuki Shinoda. Scalable architecture for airborne ultrasound tactile display. In Shoichi Hasegawa, Masashi Konyo, Ki-Uk Kyung, Takuya Nojima, and Hiroyuki Kajimoto, editors, *Haptic Interaction*, pp. 99–103, Singapore, 2018. Springer Singapore.
- [8] 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.