

空中超音波触覚における周波数変調を用いた情動遷移表現： バーチャルペットへの貢献感の拡張

康 中睿^{1,a)} 金 杜^{1,b)} 割澤 伸一^{1,c)} 伴 祐樹^{1,d)}

概要：バーチャル・アニマル・アシステッド・セラピーの分野においては、ユーザの能動的なケア行為によってバーチャルペットの状態が好転したという因果関係を実感すること、すなわち貢献感の形成は極めて重要である。しかし、既存のシステムは視覚偏重であり、ユーザは自身の行為が相手の変化を引き起こしたという手応えを得にくいという課題があった。そこで本研究では、空中超音波の焦点移動による周波数変調を用い、ユーザの撫で動作に連動して質感が粗さ（不快・警戒）から滑らかさ（快・リラックス）へとシームレスに変化するシステムを構築した。この時系列的な触覚変容をユーザの介入による状態改善プロセスとして機能させ、貢献感の向上を果たすインタラクションシステムを提案する。実験では、触覚条件（快方向遷移、不快方向遷移、固定）と視覚条件（表情変化あり、なし）を要因とした被験者内設計を行い、バーチャルペットに対する情動知覚、自分自身の貢献感、愛着、および感情状態への影響を検証した。その結果、特に視覚的な手がかりのない条件において、ユーザの行為と連動した快方向遷移の触覚変化の導入は、エージェントに対する貢献感を有意に向上させることが確認された。本手法は、視覚的な手がかりが限定的な状況においても、ペットとの触覚インタラクションを通じてユーザの貢献感を向上させることを示し、バーチャル・アニマル・アシステッド・セラピーにおける触覚設計の有効性を示唆するものである。

1. はじめに

近年、動物との触れ合いを通じてストレス緩和や共感性の向上を促す「アニマル・アシステッド・セラピー（AAT）」が社会的課題の解決策として注目されている [1]。この AAT において最も本質的な要素は、動物を撫でるといった身体的な接触にある [1]。人間が撫で、動物がそれに応答するという双方向のプロセスこそが、オキシトシンの分泌を促し、安心感や信頼関係を形成する基盤となる [1], [2]。しかし、実際の動物を病院や施設に導入するには、アレルギーや感染症のリスク、飼育コストといった物理的な制約が伴う [3]。そこで近年、VR 技術等を活用してこれを代替する「バーチャル・アニマル・アシステッド・セラピー（バーチャル AAT）」への期待が高まっている [4]。

バーチャル AAT において人とエージェントが信頼関係を築くためには、ユーザが自分のケア行為によって相手の状態が良くなったと実感できる「貢献感」の形成が極めて重要である。この貢献感とはエージェントへの愛着や継続的な関与の動機づけとなるものであり、その形成には「自身の

行為が対象のポジティブな状態変化を引き起こした」という因果関係を正確に認識することが必要不可欠である [5]。しかし、既存のシステム設計において主流となっている視覚的なフィードバックは、情動を伝える上では強力な手段である一方で、「自分の物理的な働きかけが相手に作用した」という身体的な因果関係を実感させるには限界がある [6], [7]。さらに、視覚情報が制限される環境や、視覚的な変化のみでは対象の微細な情動変容を直感的に解釈することが困難な状況においては、フィードバックの欠如によって因果関係の認識が十分に成立せず、結果として貢献感の形成が困難になる要因となり得る。

上述の課題を解決するため、本研究では、ユーザがバーチャルペットとのインタラクションから得る触覚刺激の変化によって、ペットの情動状態の変化を知覚・解釈させることで、ユーザがインタラクションから得る貢献感を向上させる手法を提案する。具体的には、心理物理学的に「粗さ」が不快、「滑らかさ」が快と知覚される特性 [8], [9] を理論的基盤とし、これを動物の「立毛反射（毛の逆立ち）」という生理現象のメタファと対応付けることで、直感的な情動提示モデルを構築する [10], [11]。ユーザの撫でという主体的な行為に応じて、毛並みの質感を粗さ（不快・警戒）から滑らかさ（快・リラックス）へと連続的に遷移させる手法を用いる。本手法によって、ユーザの行為（撫で

¹ 東京大学 大学院新領域創成科学研究科

a) kang-zhongrui@lelab.t.u-tokyo.ac.jp

b) dujin@lelab.t.u-tokyo.ac.jp

c) warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp

d) ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp

る)とそれによる対象の状態変化との間の因果関係を、触覚フィードバックによって補完・確立することを目指す。

本手法の有効性を検証するにあたっては、物理的な質感変化が動物の情動へと正しく変換・解釈されるかをまず明らかにする必要がある。その上で、視覚情報が欠落する場合において、触覚という独立したチャンネルを通じたフィードバックがユーザの貢献感を向上させる要因となり得るかを検討する。貢献感は愛着形成やユーザ自身の感情状態と密接に関連することが示唆されているため [5], それらの指標に対する影響についても併せて検証を行う。さらに、視覚と触覚を統合した際の相乗的な増強効果も明らかにする。以上の議論に基づき、以下の3つのリサーチクエスチョン(RQ)を設定した:

- RQ1: 周波数変調による触覚変化を通じて、ユーザはペットの情動変化(好転・悪化)を知覚可能か。
- RQ2: ユーザの行為に連動した触覚変化は、独立して貢献感の形成を促進するか。また、それは愛着形成とユーザ自身の感情状態(セラピー効果)にどのような影響を与えるか。
- RQ3: 視覚情報(表情変化)と触覚変化を統合することで、貢献感やセラピー効果は増強されるか。

2. システム設計

2.1 実験環境構成

本研究の応用先と期待される病院等での衛生面や運用を考慮し、Head Mounted Display は使用せず、据え置き型モニタと空中触覚デバイスを用いた完全非接触の構成とした。参加者は固定された椅子に着座し、正面約25cmの位置に設置されたモニタと Ultraleap 社の超音波ディスプレイ(Ultrahaptics STRATOS Inspire)に向き合う。ユーザの手の動きは内蔵の Leap Motion Controller を用いて取得される。また、聴覚情報によるバイアス(超音波デバイスの駆動音および環境音)を除くため、実験中はノイズキャンセリングヘッドホン装着させた。

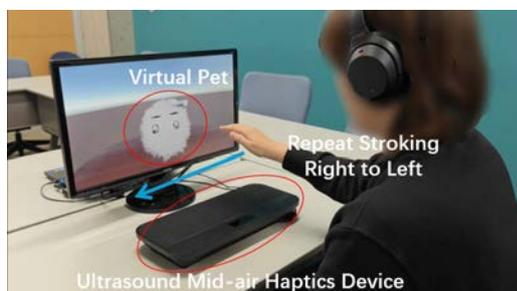


図 1 実験環境

2.2 触覚提示設計

撫でるにつれて毛並みが良くなるという動的な質感変化を実現するためには、従来の物理的な素材(ファー素材やロ

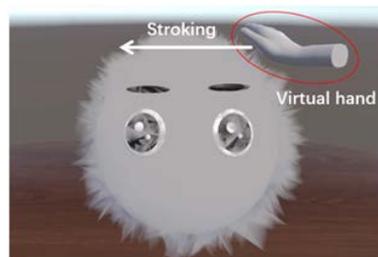


図 2 バーチャルペットを撫でるシーン

ボット)には限界がある。物理的な実体はその表面性状をプログラム制御によって瞬時に、かつシームレスに変化させることが困難だからである。これに対し、集束超音波を用いた Mid-air Haptics は、パラメータの変更のみで触覚パターンを動的に書き換えることが可能であり、本研究が目的とする動的な質感生成に極めて有効である [12], [13]. 本システムでは、Spatiotemporal Modulation (時空間変調)の手法に基づき、空中超音波の焦点を円軌道上で高速移動させることにより生成される振幅変調刺激を利用する [13]. この円軌道の半径は 25mm に設定した。周波数範囲は、20Hz (不快/ざらついた感覚) から 80Hz (快/滑らかな感覚) に設定した。この設定は、仮想毛皮の質感を効果的に表現するために類似の周波数帯域 (30~70Hz) を利用した細井ら [14] の研究を参照している。触覚と感情の対応関係については、粗い質感が一般的に「不快」と知覚されることを示す Etzi ら [8] の心理物理学的知見に基づいている。システムは、ユーザがペットを1回撫でる(1ストローク)ごとに、周波数を4Hzずつ変化させる。これは弁別閾(JND)以下の微細な変化であり [15], 15回のストロークを通じて、質感が徐々に、かつシームレスに変化するように設計されている。

本研究では、これらのパラメータ設定に基づき、以下の3つの触覚条件を実装した:

- **Positive Transition (Pos):** ユーザの撫で動作(1ストローク)ごとに周波数を4Hzずつ上昇させ、15回のストロークで20Hz(粗さ/不快)から80Hz(滑らかさ/快)へと遷移させる条件。これはペットの状態好転を触覚で表現する。
- **Negative Transition (Neg):** 撫で動作ごとに周波数を4Hzずつ下降させ、「80Hz」から「20Hz」へと遷移させる条件。
- **Fixed (Fix):** 常に50Hzを提示し続け、撫で動作による変化が生じない条件。

2.3 視覚提示設計

視覚的エージェントとして、特定の生物種を想起させない中立的な表情を持つ架空の生物(POYO[16])をUnity Asset Storeで購入し採用した。これは、参加者が既存の動物(犬や猫)に対する知識や経験則に基づいて情動を類

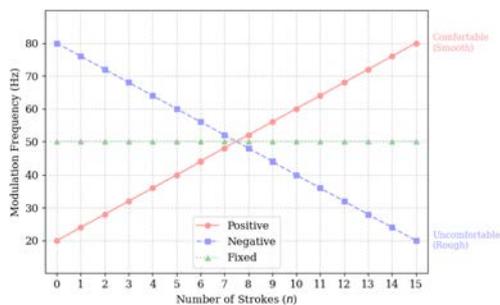


図 3 触覚設計 3 条件

推すバイアスを排除し、純粋に提示された刺激に基づいて評価を行わせるためである。視覚的なアニメーションとして、全ての条件において生命感を感じさせるための微細な動き（呼吸による体の膨張・収縮）を一貫して実装した (24BPM)。

本研究では、これらのパラメータ設定に基づき、以下の 2 つの視覚条件を実装した：

- **With Expression (Vis+)**: バーチャルペットの眉が上がり、目が大きくなるといった「悲しい表情」から「喜んでいる表情」への変化を実装した。この視覚的变化は、触覚の周波数変化と対応関係を持っており、15 回の撫で動作に応じて表情パラメータを線形補間することで、段階的かつ滑らかに遷移するように設計されている。
- **No Expression (Vis-)**: 表情を変化させず、常にポジティブな状態（喜びの表情）で固定する設定とした (Vis-)。

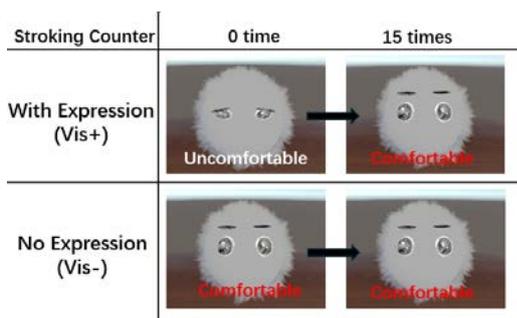


図 4 視覚設計 2 条件

3. 実験概要

3.1 参加者および環境

本実験は、東京大学倫理審査委員会の承認を受けて実施された。本研究には、18 名の健康な成人（男性 13 名、女性 5 名）が参加した。年齢範囲は 21 歳から 34 歳であり、平均年齢は 25.3 歳 (SD = 3.2) でした。参加者はメールを通じて募集され、事前に研究概要の説明を受け、同意を得た上で実験に参加した。実験環境の室内温度は平均 24.2 ± 1.2 °C、相対湿度は平均 35.9 ± 5.2 % だった。

3.2 実験条件

実験は、3 つの触覚条件と 2 つの視覚条件を組み合わせたい計 6 条件の被験者内要因計画とした。順序効果を相殺するため、条件提示順序はラテン方格法を用いてカウンターバランスをとった。

3.3 実験手順

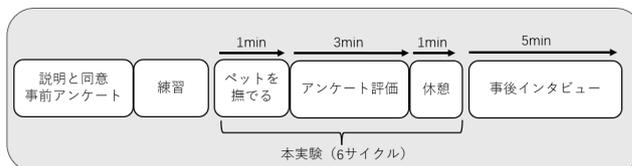


図 5 実験流れ

1. 事前説明と練習: 実験の目的とデバイスの操作方法を説明した。続いて、実験手順への習熟を目的として、視覚一定 (No Expression)、触覚固定条件 (Fixed) を用いて本番と同様の 1 試行 (15 回のストロークおよび質問紙への回答) の練習を行った。参加者はデバイスの上に手をかざし、画面上の手形のガイド (バーチャルハンド) をペットの毛並みに合わせ、右から左へやさしく一定の高さで撫でる動作を行った。1 回撫で終わったら自然に手を上げてリセットし、次の撫でを行うよう指示した。

2. 本試行: 参加者は 6 つの条件を順次体験した。参加者は自分が何回撫でる必要があるかを事前には知らされておらず、実験者が撫で回数をカウントした。各条件において、「撫でてください」という指示に従い、参加者はペットを撫でるタスクを開始し、規定の 15 回に達した時点で実験者より「止めてください」という指示が出され、タスクを終了とする。システムは 1 ストロークごとに刺激を更新した。

3. アンケートとインタビュー: 各条件終了直後にアンケート回答を行った。全条件終了後、約 5~10 分のインタビューを行い、どのような手がかりで気持ちの変化を感じ取ったか、触り心地の変化をどう感じたかについて聴取した (録音実施)。

3.4 評価指標

各試行ごとに以下の項目を評価した。

知覚した変化の確認 (選択式) :

- **Q1**: ペットの気持ちの変化 (良くなった・悪くなった・変化なし)。
- **Q2**: 触り心地の変化 (感じた・感じなかった)。
- **Q3**: 見た目の変化 (感じた・感じなかった)。

情動推定と主観評価 (9 段階リッカート尺度) :

- **Q4**: 撫で始めのペットの情動推定 (不快そう - 心地よさそう)。
- **Q5**: 撫で終わりのペットの情動推定 (不快そう - 心地よさそう)。

- **Q6:** 貢献感（ペットの気持ちを良くしてあげられたと感じたか）。
- **Q7:** 愛着（ペットへの親近感や愛着が湧いたか）。

参加者の感情状態: 提示された触覚・視覚刺激が、参加者の主観的な感情状態に意図した通りの影響（快・不快）を与えているかを確認する操作チェックとして、PANAS日本語短縮版（16項目）[17]を用いた。参加者は、ペットを撫でている時の自身の感情について、6段階（1: 全く当てはまらない～6: 非常によく当てはまる）でランダムに提示される項目に対し評価を行った。

4. 結果

収集されたデータに対し、正規性の仮定が満たされなかったこと、および複数要因間の交互作用を検証する必要があることから、ノンパラメトリックな多要因分散分析手法である ART (Aligned Rank Transform) ANOVA を実施した [18]。主効果または交互作用が有意であった場合、事後検定として Wilcoxon の符号付き順位検定 (Wilcoxon signed-rank test) を実施し、Bonferroni-Holm (BH) 法による多重比較補正を行った。

本研究は比較的小規模な探索的研究であるため、統計的仮説検定に加えて効果量 (Cohen's r) を報告し、将来の追試の基礎資料とする。効果量の解釈は Cohen の基準 (0.1=小、0.3=中、0.5=大) に従う。ただし、統計的に有意でない結果については確定的な結論は避け、予備的知見として報告する。

4.1 情動推定および知覚 (RQ1)

撫で開始時の情動推定において、視覚要因の主効果のみ有意でした ($p < 0.001$)。視覚ポジティブ条件 (Vis+) において、触覚条件間 (Pos vs Neg ($p = 0.1, r = 0.434$), Fix vs Neg ($p = 0.1, r = 0.422$)) に統計的有意差は確認されなかった。しかし効果量は中程度であり、予備的な知見として、触覚変化の方向性が貢献感に影響する可能性が示唆される。

撫で終了時の情動推定においては、視覚要因の主効果 ($p < 0.001$) に加え、有意差が認められたが、触覚要因の主効果は有意水準には達しなかった ($p = 0.069$)。しかしながら、下位検定の結果を効果量の観点から確認すると、Vis-条件（視覚変化なし）における Pos 条件は Neg 条件と比較して有意に高いことが示した ($p = 0.028, r = 0.644$)。Pos と Fix 間では中程度の近い効果量 ($p = 0.066, r = 0.473$) が確認された。Vis+条件（視覚変化あり）においても、Pos と Neg 間 ($p = 0.195, r = 0.423$)、Fix と Neg 間 ($p = 0.195, r = 0.374$) で中程度の効果量が確認され、統計的有意差は認められないものの、実質的な評価の差異が存在する可能性が示唆された。

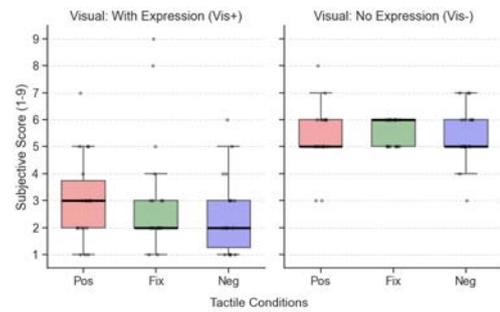


図 6 撫で開始

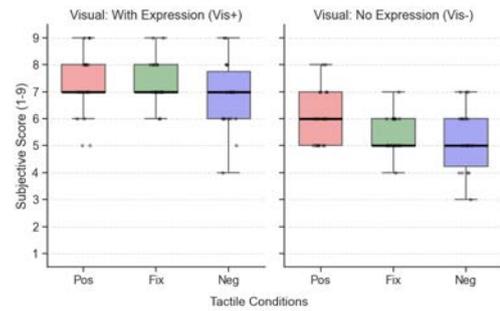


図 7 撫で終了

4.2 貢献感への影響 (RQ2)

「ペットの気持ちを良くしてあげられたか」という問いに対し、視覚要因の主効果 ($p < 0.001$) に加え、触覚要因の主効果に有意差が認められた ($p = 0.045$)。具体的には、Vis-条件において、触覚 Pos 条件は Fix 条件よりも有意に高い貢献感を示した ($p = 0.047, r = 0.525$)。Neg と Fix 間でも中程度の効果量 ($p = 0.087, r = 0.439$) が確認された。Vis+条件においては、Pos と Neg の間に、統計的有意差は確認されなかったが、高い効果量 ($p = 0.071, r = 0.560$) が示された。

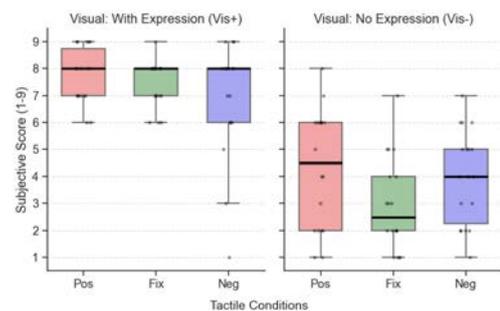


図 8 貢献感

4.3 愛着・親近感および感情状態 (RQ2)

愛着・親近感については、視覚要因の主効果のみ強い有意差が確認された ($p < 0.001$)。触覚条件間での有意差は見られませんでした。

PANAS (自身の感情状態) については、ポジティブ感情 (PA) は視覚主効果のみ有意でした。ネガティブ感情 (NA) については、触覚主効果は有意ではなかったものの

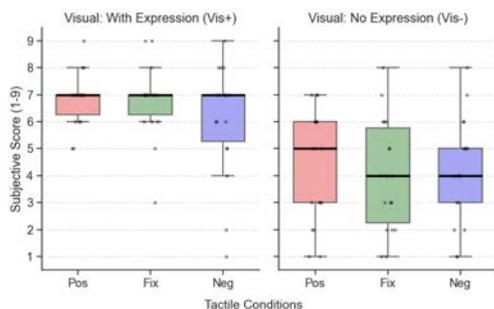


図 9 愛着

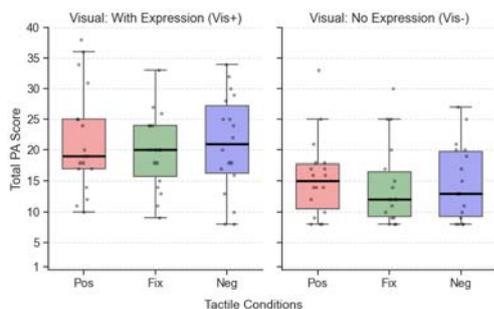


図 10 ポジティブ感情

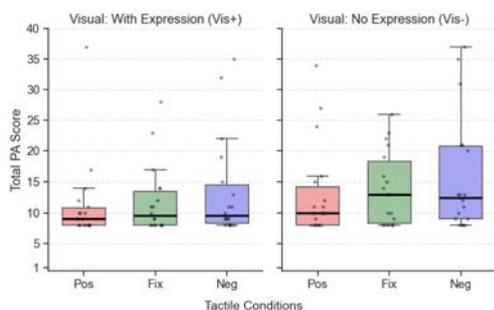


図 11 ネガティブ感情

($p = 0.121$) . なお, Pos 条件と Neg 条件の間には視覚条件にかかわらず, 中程度の効果量が存在することを確認した (Vis+: $p = 0.363, r = 0.341$, Vis-: $p = 0.369, r = 0.424$) .

5. 考察

5.1 情動推定 (RQ1)

まず, RQ1「触覚変化による情動伝達」について考察する. 本研究の結果は, ユーザが触覚の変化を単なる物理現象としてではなく, エージェントの状態を示唆する手がかりとして解釈し得たことを示している. 特に, 撫で終了の視覚情報が変化しない (Vis-) 条件において, 触覚が滑らかになる (Pos) 条件が, 粗くなる (Neg) 条件よりも有意に高いポジティブ評価を得た点は重要である. これは, ユーザが「粗さ=不快・拒絶」「滑らかさ=快・受容」という意味合いを解釈できたことを示している [19], [20].

5.2 貢献感の形成メカニズムと愛着 (RQ2)

次に, RQ2「貢献感と愛着」について考察について, 全体的な傾向として, 貢献感のような即時的な実感には触覚が寄与するが, 愛着のような長期的な心理変容には明確な差

が生じなかった [1]. まず「貢献感」について, 視覚変化がない (Vis-) 条件では, 触覚 Pos 条件は Fix 条件よりも有意に高い評価 ($p = 0.047$) を得たほか, 触覚 Neg 条件と Fix 条件の間にも中程度の効果量 ($r = 0.439$) が確認された. これは, 変化の良し悪し以前に, 自身の行為に対して物理的な応答が返ってきたこと自体が身体的な因果関係を刺激し, 貢献感の基礎を形成した可能性を示唆している [5], [21]. この結果は, 視覚情報が乏しい環境 (Vis-) では, 触覚は情報の欠損を補完し, 情動伝達の主要なチャンネルとして機能する. すなわち, 表情変化を持たないロボットや, 視覚障害者支援において触覚が視覚の代替となり得ることを示している [22].

対照的に「愛着」に関しては, 触覚による有意差は見られなかった. これには, 今回用いたペットの表情変化という視覚刺激影響が支配的であり, 触覚による差異がその強い視覚の手がかりに覆い隠されてしまったこと (視覚優位性) や, 15 回という短いインタラクション時間の制約が影響していると考えられる. しかし, 本研究で確認された貢献感の向上は, 愛着の前段階である「行為と反応の即時的なループ」を確立できた可能性を意味しており, これを長期的に積み重ねることで, 将来的な愛着形成につながる土台は築けられると考えている [5].

加えて, PANAS の結果 (NA) において, ユーザ自身の感情にも影響を与えた可能性が考えられ, 視覚変化なし (Vis-) の多重比較では, 触覚 Pos 条件と触覚 Neg 条件の間にも中程度の効果量が確認された. 触覚が粗くなる (Neg) 条件においてネガティブ感情が高まる傾向が見られた要因としては, 不適切な触覚フィードバックによって「拒絶された」あるいは「ケアに失敗した」と認識され, この貢献感の欠如がユーザに心理的なストレスを与えた可能性が高い [19]. 要するに, バーチャル空間において不適切な触覚フィードバックはユーザに心理的な負荷を与えるリスクがあり, 共感的な触覚設計がいかに重要であることを示唆される結果となった.

5.3 マルチモーダル統合における触覚の役割 (RQ3)

最後に, RQ3「マルチモーダル統合における触覚の役割」について述べる. 本研究の結果からは, 触覚が状況に応じて「補完」と「整合性の維持」という異なる機能を果たしている可能性が示唆された.

貢献感の視覚的にポジティブな (Vis+) 条件においては, 触覚 Pos 条件と触覚 Neg 条件の間に高い効果量 ($r = 0.560$) が確認された. この結果は, 視覚情報 (良くなっている) と矛盾する触覚情報 (悪くなっている) が提示された際の認知的な不整合により, ユーザが「ケアが上手くいっていないのではないか」という疑念を抱いたためと解釈できる [19]. すなわち, 提案手法が「ケアの成功/失敗」というメッセージとして機能している可能性があると考えられる.

視覚情報がリッチな環境において、触覚は情報の整合性を維持し、体験の質を担保する役割を果たす可能性が高い。視覚的なポジティブ変化に対し、同様にポジティブな触覚変化を付加してもスコアの劇的な向上は見られなかったが、これは視覚優位性による評価の飽和が生じた可能性だと考えられる。しかしながら、視覚情報と矛盾する触覚変化が提示された条件においては、高い効果量をもって貢献感などの体験の質を低下させる傾向が確認された。すなわち、マルチモーダル統合において触覚は、視覚が不十分な場合には情報を補完し、視覚が十分な場合には感覚間の矛盾を回避して体験の質を底支えするという、状況に応じた役割を担っていることが示唆された。

6. おわりに

本研究では、空中超音波触覚を用いた動的な周波数変調により、バーチャルペットへの貢献感を醸成する手法を提案した。実験の結果、視覚情報が欠如した環境下において、ユーザの行為に連動した快方向への触覚変化が、貢献感を有意に向上させることが実証された。一方、視覚情報が豊富な環境下では、触覚は視覚との整合性を保ち、体験の質を底支えする役割を果たすことが示唆された。本知見は、時系列的な触覚提示が視覚の制約を超えて「ケアの成功」を実感させる手段となり、人間とエージェントの情動的結合を拡張する可能性を示している。

参考文献

- [1] Andrea Beetz, Kerstin Uvnäs-Moberg, Henri Julius, and Kurt Kotrschal. Psychosocial and psychophysiological effects of human-animal interactions: the possible role of oxytocin. *Frontiers in psychology*, Vol. 3, p. 234, 2012.
- [2] Jan B. F. Van Erp and Alexander Toet. Social touch in human computer interaction. *Frontiers in Digital Humanities*, Vol. 2, p. 2, 2015.
- [3] Sarah J Brodie, Francis C Biley, and Michael Shewring. An exploration of the potential risks associated with using pet therapy in healthcare settings. *Journal of Clinical Nursing (Wiley-Blackwell)*, Vol. 11, No. 4, 2002.
- [4] Heewon Na and Suh-Yeon Dong. Mixed-reality-based human-animal interaction can relieve mental stress. *Frontiers in Veterinary Science*, Vol. 10, p. 1102937, 2023.
- [5] Z. Zhu, et al. The benefits of prosociality towards ai agents: Examining the effects of helping ai agents on human well-being. In *Proceedings of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '25)*, 2025.
- [6] Antal Haans and Wijnand A. IJsselstein. Mediated social touch: a review of current research and future directions. *Virtual Reality*, Vol. 9, No. 2, pp. 149–159, 2006.
- [7] Patrick Haggard. Sense of agency in the human brain. *Nature Reviews Neuroscience*, Vol. 18, No. 4, pp. 196–207, 2017.
- [8] Roberta Etzi, Charles Spence, and Alberto Gallace. Textures that we like to touch: An experimental study of aesthetic preferences for tactile stimuli. *Consciousness and cognition*, Vol. 29, pp. 178–188, 2014.
- [9] Alberto Gallace and Charles Spence. The science of interpersonal touch: an overview. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, Vol. 34, No. 2, pp. 246–259, 2010.
- [10] Mathias Benedek and Christian Kaernbach. Physiological correlates and emotional specificity of human piloerection. *Biological Psychology*, Vol. 86, No. 3, pp. 320–329, 2011.
- [11] Jonathon McPhetres and Janis Zickfeld. The physiological study of emotional piloerection: A systematic review and guide for future research. *International Journal of Psychophysiology*, Vol. 179, pp. 6–20, 2022.
- [12] Euan Freeman, Ross Anderson, Julie Williamson, Graham Wilson, and Stephen A Brewster. Textured surfaces for ultrasound haptic displays. In *Proceedings of the 19th ACM international conference on multimodal interaction*, pp. 491–492, 2017.
- [13] Ismo Rakkolainen, Antti Sand, and Roope Raisamo. A survey of mid-air ultrasonic tactile feedback. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*, pp. 94–944. IEEE, 2019.
- [14] J. Hosoi, et al. Voluminous fur stroking experience through interactive visuo-haptic model in virtual reality. *IEEE Transactions on Haptics*, 2024.
- [15] Isa Rutten, William Frier, and David Geerts. Discriminating between intensities and velocities of mid-air haptic patterns. In *International Conference on Human Haptic Sensing and Touch Enabled Computer Applications*, pp. 78–86. Springer, 2020.
- [16] Unity Asset Store. Poyo. <https://assetstore.unity.com/packages/3d/animations/poyo-318829>, 2024. Accessed: 2024-12-21.
- [17] A. Sato and A. Yasuda. Development of the japanese version of positive and negative affect schedule (panas) scales. *The Japanese Journal of Personality*, Vol. 9, No. 2, pp. 138–139, 2001.
- [18] Jacob O Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J Higgins. The aligned rank transform for non-parametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI conference on human factors in computing systems*, pp. 143–146, 2011.
- [19] Damien Ablart, et al. Using ultrasonic mid-air haptic patterns in multi-modal user experiences. In *Proceedings of the IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE)*, pp. 1–6. IEEE, 2019.
- [20] Matthew J Hertenstein, Rachel Holmes, Margaret McCullough, and Dacher Keltner. The communication of emotion via touch. *Emotion*, Vol. 9, No. 4, p. 566, 2009.
- [21] Hannah Limerick, David Coyle, and James W Moore. The experience of agency in human-computer interactions: a review. *Frontiers in human neuroscience*, Vol. 8, p. 643, 2014.
- [22] Mohamad A Eid and Hussein Al Osman. Affective haptics: Current research and future directions. *IEEE Access*, Vol. 4, pp. 26–40, 2015.