

触覚フィードバックシステムを用いた拡張身体アバタの身体化に関する研究

代表研究者 山 村 浩 穂 慶應義塾大学 理工学研究科 博士後期課程

1 はじめに

動物の耳をモチーフとしたアクセサリやデバイスは現代社会において広く受け入れられている。これらはユーザーの個性を表現するための装飾品やコミュニケーションを支援するデバイスとして、その手軽さと機能性から様々な場面で利用されている。アニメーションや漫画作品では、耳の動きが言葉を喋らない動物キャラクターの感情表現に用いられている。また、人型キャラクターに付加された犬や猫などの動物の耳は獣耳（けもみみ/けものみみ）と呼ばれ[1]個性豊かなキャラクターの心理描写として用いられており、獣耳が人々にとって身近な存在であることが伺える。

他方で、アバタへの身体所有感の生起が注目されている。アバタに対して多感覚刺激を同期させることで、身体所有感が生じることが報告されている [2]。さらに、実身体とは異なる外見を持つアバタ（尻尾が付加されたアバタや3本腕のアバタ）に対しても身体所有感が生起されることが報告されている [3, 4]。これらの研究は、人の尾てい骨が尾の痕跡器官であるという進化的背景や、腕という人体的な関連性に基づいて行われている。しかし、猫耳などの空想上の身体部位に対して人が自分の身体モデルを拡張できるかは明らかになっていない。そこで、本研究では、生得的に持ちえない猫耳に対して、所有感を生起させることを目的とする。猫耳は表情に頼らない感情の伝達や非言語的な表現といった特徴を持ち、猫耳の所有感を生起させることで、新しいアバタインタラクションや非言語コミュニケーションへの応用が期待される。また、メタバースでは多くのユーザーが猫耳アバタを使用していることから、メタバースのアバタ身体性を調査するうえで猫耳は無視できない存在である。本研究では、猫耳に対する所有感を生起させるために、形状記憶合金の一種であるバイオメタルファイバー [5] を活用したソフトアクチュエータを使って髪の毛を介した触覚刺激提示デバイスを提案する。視覚刺激と連動する触覚刺激を提示することによって、猫耳に対する所有感が生起されるかを検討する。実験では、バーチャル環境に参加者が変身する猫耳アバタと Non player character (NPC) アバタ、および参加者が自身の様子を観察するための鏡を提示する。NPC アバタが参加者アバタの猫耳を撫でることで生じる触覚刺激および猫耳が揺れる視覚刺激の有無が猫耳の所有感に与える影響を調査する。

本研究におけるリサーチクエスチョン (RQ) は以下の通りである。

- RQ1:猫耳の動きと連動する触覚刺激を提示することで猫耳に対して所有感が生起されるのか。
- RQ2:猫耳を視覚的に揺らすことで猫耳に対して所有感が生起されるのか。
- RQ3:触覚刺激と猫耳を視覚的に揺らす相乗効果によって、猫耳に対して所有感が生起されるのか。

2 実装

2-1 システムデザイン

本研究で実装するバーチャル耳は広くアクセサリやデバイスとして普及している猫耳をモチーフとした。触覚刺激の提示方法として形状記憶合金を活用したソフトアクチュエータを利用した。アクチュエータには、高い静音性と軽量性が VR 環境での没入感を担保するために必要であると考えた。ソフトアクチュエータの種類には様々なものがあるが、電気信号による制御が容易な点、また触覚を提示するだけのパワーが必要である点から形状記憶合金を採用した。

本研究では、頭部への触覚提示手法として髪の毛を介した触覚提示を行い、それによって生じる猫耳の所有感を検証した。所有感生起には視覚刺激と触覚刺激の空間的一致が重要であり [6, 7]、猫耳に対応する位置として頭部へ触覚刺激を提示した。また、人の体毛は接触した物体のサイズ、触覚の方向、位置といった様々な触覚的情報を識別可能であり、さらに心地よさなどの感情的感覚を誘発することが知られている [8]。本研究では、髪の毛を介して猫耳が撫でられている方向などの様々な触覚的情報と心地よさを再現し、それに伴う猫耳の所有感を検証した。

2-2 バイオメタルファイバーを活用したソフトアクチュエータ

本研究では、形状記憶合金の一種であるバイオメタルファイバー（トキ・コーポレーション登録商標：BMF）を活用したソフトアクチュエータを用いて、触覚刺激を提示した。BMF は温度変化によって緊張収縮-弛緩伸張する極細線状の人工筋肉アクチュエータである。加熱されることで収縮し、冷却されると元のナイロンのように柔軟な状態に戻る特性がある。直径 5mm、長さ 60mm の柔らかいシリコンゴム製のチューブの両端にそれぞれ BMF を通すことで、BMF が緊張収縮-弛緩伸張した際にチューブ全体が湾曲する（図 1）。BMF を通電した際の抵抗加熱を用いて、BMF の緊張収縮-弛緩伸張を制御している。ヘッドマウントディスプレイ（HMD）に統合するアクチュエータ設置台とボール型ジョイントを 3D プリンターで作成し、HMD の左右に接着した。頭部の形、髪型、毛量が個々人によって異なることが予想されたため、アクチュエータの向きを調節可能なボール型ジョイントを採用した。アクチュエータの上部とアバタの猫耳に対応する位置の髪の毛を固定することで、アクチュエータが駆動した際に髪の毛を介して触覚刺激を提示する（図 2）。

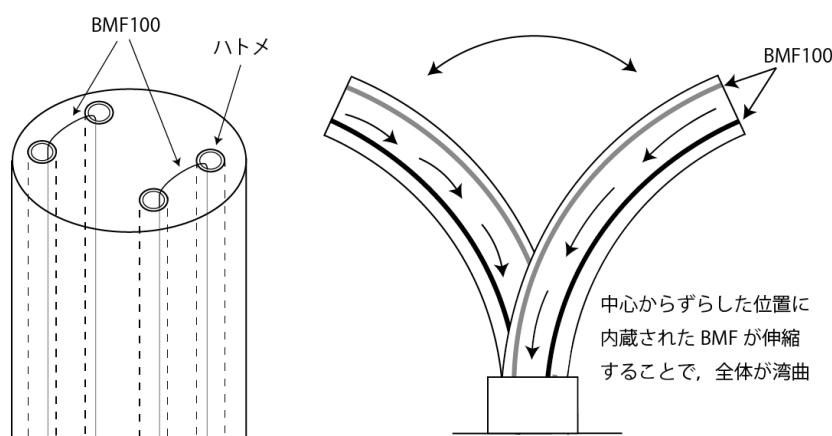


図 1 左：アクチュエータ先端部の断面、右：アクチュエータの動く仕組み

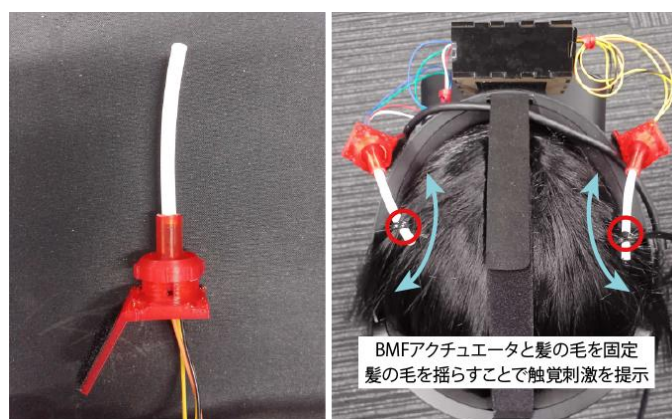


図 2 左：BMF アクチュエータ、右：アクチュエータが統合された HMD

3 方法

3-1 実験参加者

正常な身体能力と視力を有した 20 名（男性 17 名、女性 3 名、年齢平均 23.25 歳±2.22 SD）が実験に参加した。なお、本研究は慶應義塾大学理工学部・理工学研究科生命倫理委員会による実験プロトコルの承認を受け、実験参加者の同意書を取得した上で実施した。

3-2 実験環境

実験は 1 台のコンピュータ（OS:Windows10, RAM:32GB, CPU:11th Gen Intel(R) Core i9-11900H, GPU:Ge

Force RTX 3080 LaptopGPU) で実施した。視覚刺激はヘッドマウントディスプレイ (HMD:Oculus Rift-S, 1280×1440 pixel, 115 degree, 両眼立体視提示, リフレッシュレート 80Hz) で提示した。

実験は静音環境で行い, VR 空間にも音響的手がかりは設定されていなかった。

ガルバニック皮膚反応 (Galvanic skin response : GSR) センサ (Grove GSR Sensor, Seeed Studio) で皮膚抵抗値を計測し, m5stickC plus を介してコンピュータに取り込んだ。実験で使用したバーチャル環境は Unity 3D (version 2019.4.31f1) で作成された。バーチャル環境には, 参加者が変身する猫耳アバタと参加者の頭を撫でる Non player character (NPC) アバタ, 参加者のアバタが座る椅子, 机, 鏡が設置された (図 3)。猫耳アバタはアニメ調の猫耳の生えたアバタ (ハオランくん 3D モデル, かなりあ), NPC アバタも同様にアニメ調の猫耳が生えたアバタ (RadDollV2 の 3D モデル, @三丁目の魔界) を使用した。Unity アセットの Dynamic Bone を用いて猫耳が揺れる動きを実装した。Dynamic Bone はキャラクターの体の動きに合わせて, 耳や尻尾を視覚的に揺らすことを可能とするアセットである。Dynamic Bone のパラメータは Damping:0.06, Elasticity:0.02, Stiffness:0.1 を設定した。NPC アバタの撫でる動作には既存のモーションセットを利用した。撫でられた際に参加者アバタの猫耳が揺れると BMF アクチュエータが作動して, 触覚刺激を提示する。



図 3 VR 環境

3-3 実験条件

実験参加者は触覚刺激あり・なしと視覚的な耳揺れあり・なしを組み合わせた計 4 条件をランダムな順で体験した (各条件 3 分=撫で動作セッション+脅威刺激提示セッション)。撫でるモーションは 1 周期 (12.5 秒) をループさせており, この間, NPC アバタは前後に 4 往復分の撫で動作を行う。

触覚刺激あり条件では, NPC アバタに頭を撫でられることでアクチュエータが作動し, 頭部へ髪の毛を介した触覚刺激が提示される。アクチュエータは頭部に沿って前後方向に 35mm の幅で 1 周期あたり 4 往復分作動する。耳揺れあり条件では, 参加者アバタの猫耳は NPC アバタに撫でられることで, 参加者から見て前後方向に 4 往復分揺れる。耳揺れなし条件では, アバタの猫耳は移動せず, NPC アバタの手にめり込むように見える (図 4)。



図 4 猫耳の揺れ方 (左:猫耳揺れなし, 右:猫耳揺れあり)

図5は耳揺れあり条件での1周期(12.5秒)あたりの左右の猫耳の頂点の移動量であり、X軸が前後方向、Y軸が上下方向、Z軸が左右方向に相当する。

猫耳を含まないアバタの頭頂部から猫耳の頂点までの高さは6cmである。図6のグラフはX軸がNPCアバタの手の前後方向の移動量に相当し、Y軸が上下方向、Z軸が左右方向に相当する。

X軸のグラフの谷は撫で動作が行われるタイミングを示しており、撫で動作に応じて猫耳の移動量も変化する。NPCアバタの手と参加者アバタの猫耳が触れると衝突判定が行われ、猫耳が揺れた方向に応じて、アクチュエータが参加者の髪を引っ張る。アクチュエータとPC画面上の猫耳を同一のフレームに写る視点から240fpsで撮影して著者がコマ送りで目視確認したところ猫耳が動き始めてからアクチュエータが動き出すまでに62.5ms(15フレーム)の遅延があった。所有感錯覚は視触覚刺激の遅延が300ms未満で生起されることが報告されている[9]。

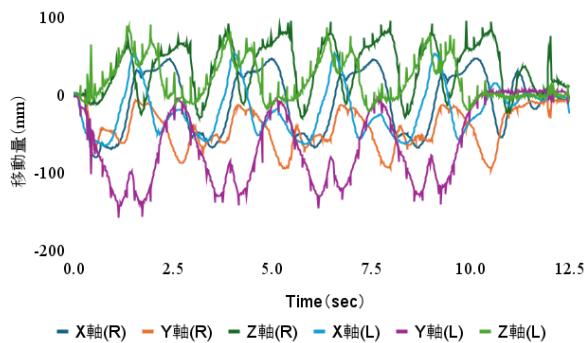


図5 視覚的な猫耳揺れあり条件における猫耳の頂点の移動量、R:右耳、L:左耳

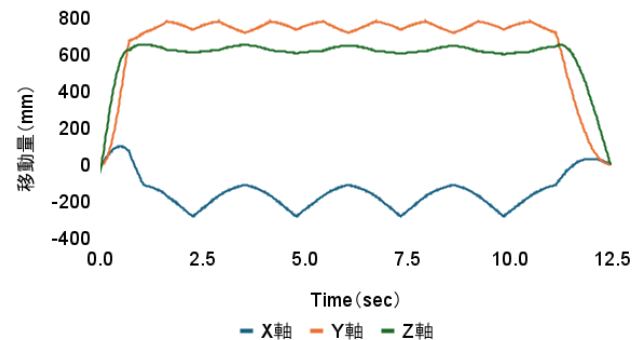


図6 撫で動作中のNPCアバタの手の移動量

3-4 手続き

参加者はHMDとGSRセンサを装着した。触覚提示において、受容器に近い位置で刺激を提示するために、髪の毛の根本付近にアクチュエータを固定した。GSRセンサは左手の人差し指と中指の第二関節に装着し、体験中はGSRセンサへのノイズを減らすため、左手は動かさないように教示した。参加者はアバタの姿勢と合わせて机の前で座位姿勢で実験を行った。参加者がHMDとGSRセンサを装着後、各条件開始前に自身の頭部の最高地点と思う位置を指差す(以下ポインティングタスク)ように教示した。この値を固有受容感覚ドリフトのベースラインとして記録した。猫耳を揺らすシナリオには、VR環境における疑似接触行動として頭を撫でる行為を採用した。NPCアバタが参加者アバタの猫耳を撫で、参加者はそれを1人称視点から鏡で観察した(撫で動作セッション:176秒)。その際、アバタの手を避けるといった著しい頭部運動を行わないよう教示した。撫で動作終了後の脅威刺激セッション(4秒)では、NPCアバタは消え、ナイフが参加者アバタの猫耳を切るように水平に移動した(図7)。脅威刺激セッション終了後に再度、ポインティングタスクを実施し、その時点での頭部の最高地点を指差すように教示した。ポインティングタスク終了後、参加者は猫耳の所有感に関するアンケートに回答した。全条件が終了した後に、体験に関して自由に感想を述べるインタビューを実施した。

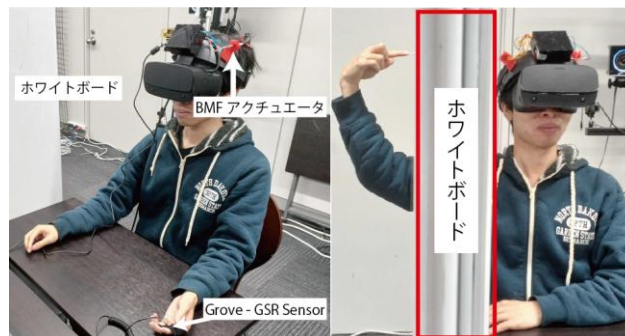


図7 実験環境とポインティングタスク:ホワイトボード越しに頭部の最高地点を指で示す



図 8 脅威刺激セッション

3-5 評価方法

主観的評価として猫耳の所有感に関するアンケートとインタビューを実施した。参加者はアンケート 6 項目全てに対して、7 段階のリッカート尺度で回答した（0：全くそう思わない ～ 6：非常にそう思う）。質問は下記の項目がランダムな順で表示された。Q1 と 2 は猫耳の所有感（以下：Ownership），Q3 と 4 は触覚が猫耳から生じる感覚（以下：Referral of touch），Q5 と 6 は耳の増加感（以下，Extra ears）をそれぞれ計測するための項目である。

- Q1 猫耳が自分の身体の一部であると感じた
- Q2 猫耳が自分のものであるように感じた
- Q3 猫耳が撫でられている箇所に触覚を感じた
- Q4 横にいるアバタの手が猫耳に触れたことによって、撫でられた感触が引き起こされたと感じた
- Q5 自分に猫耳が生えたように感じた
- Q6 3 つ以上の耳を持っているように感じた

ラバーハンド錯覚などの所有感の生起には視触覚刺激の時間的および空間的一致が重要であるため、猫耳への触覚の生起を問う Referral of touch 項目を設定した。

また、ラバーハンド錯覚の応用として、ゴムの手に対する所有感生起に伴い、実際の腕とゴムの腕の両方に対して所有感が生起する例も報告されている[6]。こうした所有感の側面である身体部位の増加感を評価するために Extra ears 項目を設定した。客観的評価として、頭部最高地点のドリフト、脅威刺激提示中の頭部移動量および皮膚コンダクタンス反応（Skin conductance response：SCR）を計測した。

ラバーハンド錯覚では、手の固有受容感覚ドリフトが報告されていることから、猫耳の所有感の客観的評価として、頭部最高地点のドリフトを計測するポインティングタスクを実施した。本研究では、猫耳に対する所有感生起に伴い、頭部最高地点が上（猫耳の）方向へドリフトすると仮説をたてた。実験開始前と各条件終了後に、実験参加者は HMD を装着した状態で右側に設置されたホワイトボード越しに、頭部の最高地点と思う位置を指さすように教示された。参加者が示した位置を実験者が記録し、実験開始前の位置を固有受容感覚ドリフトの基準として各条件における垂直方向への移動距離を計測した。また、ラバーハンド錯覚が生じているとき、ゴムの手が脅威にさらされると、手を引いて回避したいという衝動が引き起こされることが報告されている[10]。SCR は脅威に対する恐怖などの心理状態を反映し、所有感生起の生理指標として有効であることが示されている[11]。本研究では、猫耳への所有感生起時に脅威刺激（ナイフ）を提示することで、SCR が強くなり、回避行動として頭部の移動量が増加するという仮説をたてた。

SCR の測定には GSR センサを使用した。

4 結果

実験で得たデータの解析には R（version 4.3.2）と SPSS（version 29.020）を使用した。

4-1 ポインティングタスク

ポインティングタスクの結果は正規性(Shapiro-Wilk test)の仮定が棄却されなかったため、実験参加者内

要因二元配置分散分析を行った（要因 1: 触覚刺激 [触覚 刺激あり, 触覚刺激なし], 要因 2: 猫耳揺れ [猫耳揺れあり, 猫耳揺れなし], $N=20$ ）。その結果, 触覚刺激の主効果 ($F(1, 19) = 0.423$, $p = 0.523$, $\eta^2 p = 0.022$) と, 猫耳揺れの主効果 ($F(1, 19) = 0.090$, $p = 0.768$, $\eta^2 p = 0.005$) 及び交互作用 ($F(1, 19) = 1.081$, $p = 0.311$, $\eta^2 p = 0.054$) は見られなかった (図 9)。

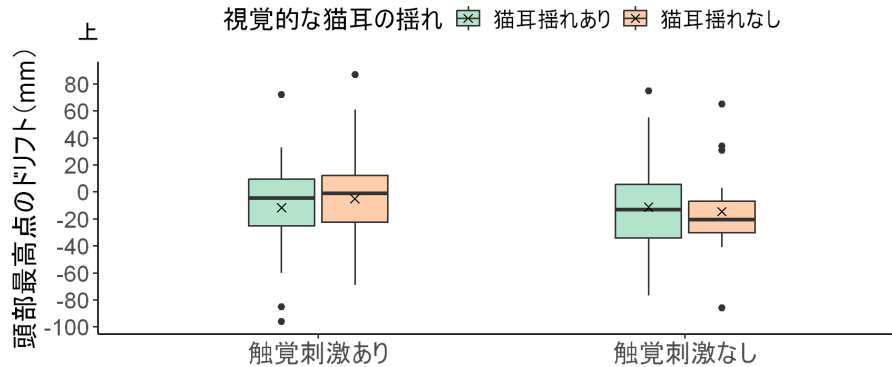


図 9 ポインティングタスクの結果. ベースラインから上下方向へのドリフト

4-2 頭部の移動量

各条件における脅威刺激中 (4 秒間) の頭部移動量を分析した結果, 正規性が棄却された. ノンパラメトリックデータに対する分散分析の手法として整列ランク変換 (ART) が知られている. ART を実施した後に二元配置分散分析を実施した (触覚刺激: 触覚刺激あり, 触覚刺激なし; 猫耳揺れ: 猫耳揺れあり, 猫耳揺れなし: $N=20$). その結果, 脅威刺激提示中の頭部位置の移動量において, 触覚刺激の主効果 ($F(1, 19) = 10.817$, $p = 0.004$, $\eta^2 p = 0.363$) があつた. 猫耳揺れの主効果 ($F(1, 19) = 0.132$, $p = 0.720$, $\eta^2 p = 0.007$), および交互作用 ($F(1, 19) = 0.221$, $p = 0.643$, $\eta^2 p = 0.012$) は見られなかった (図 10)。

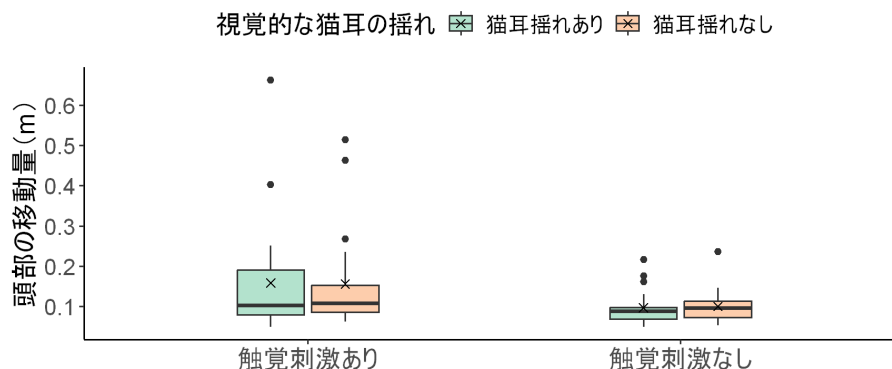


図 10 バーチャルナイフ出現中の頭部移動量. 太線は中央値, $\times$ は平均値を示す. 箱ひげ図の上下限は 75% と 25% を示す.

4-3 皮膚コンダクタンス反応

皮膚コンダクタンス反応 (SCR) の結果は正規性 (Shapiro-Wilk test) の仮定が棄却された. SCR は脅威刺激提示中 (4 秒間) の GSR センサ取得値の最大値と最小値の差分を分析した. その際, 半分以上の試行で GSR センサ取得値の差分が $0.03 \mu S$ 未満の参加者 (8 名) のデータは脅威刺激に反応しなかったことから, 先行研究の手続きに従って統計処理の対象から除外した. [6, 11]. また, データ欠損により, GSR センサ取得値が常に 0 を示した 1 名のデータを統計処理の対象から除外した. 脅威刺激に対する反応が確認された 11 人を対象に ART を実施した後に二元配置分散分析を実施した (触覚刺激: 触覚刺激あり, 触覚刺激なし; 猫耳揺れ: 猫耳揺れあり, 猫耳揺れなし: $N=11$). また, サンプルサイズ ($N=11$) で事後の検定力を分析した. そ

の結果、猫耳揺れの主効果 ($F(1, 10) = 9.401, p = 0.012, \eta^2 = 0.485$, 検定力 = 0.99) があつた。触覚刺激の主効果 ($F(1, 10) = 0.299, p = 0.597, \eta^2 = 0.029$, 検定力 = 0.14) 及び交互作用 ($F(1, 10) = 0.019, p = 0.892, \eta^2 = 0.002$, 検定力 = 0.05) は見られなかった (図 11)。

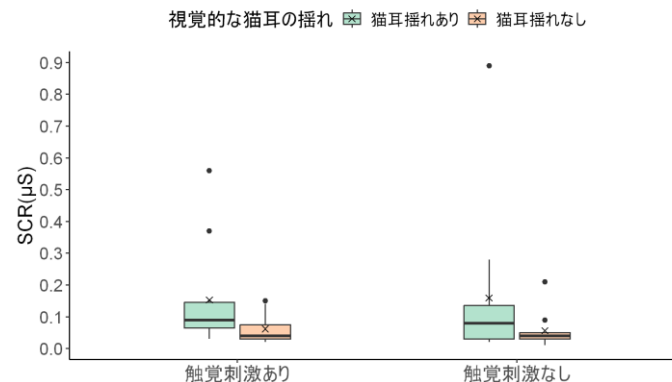


図 11 バーチャルナイフ出現時の GSR センサ取得値の最大値と最小値の差分。太線は中央値, ×は平均値を示す。箱ひげ図の上下限は 75%と 25%を示す。

4-4 アンケート結果

アンケート結果は正規性の仮定が棄却されたため、1 標本 Wilcoxon 検定を実施し、リッカート尺度の中央値 (3) と各質問のスコアを比較した (触覚刺激：触覚刺激あり, 触覚刺激なし；猫耳揺れ：猫耳揺れあり, 猫耳揺れなし：N=20, 回答なし 0 名)。また、Q4「横にいるアバタの手が猫耳に触れたことによって、撫でられた感触が引き起こされたと感じた」の質問文では、撫でられた感触が引き起こされた部位について実験参加者によって異なる解釈の余地が残されていると考えられたため、感触が引き起こされた部位についてインタビューを行い、「猫耳が撫でられた感触」として回答していた 14 名を対象に分析した。その他、「猫耳を含まない頭が撫でられた感触」(3 名)、「猫耳と頭 のどちらかを撫でられた感触」(1 名)を回答した実験参加者と、部位に関する回答を得られなかった実験参加者 (2 名) がいた。その結果、触覚刺激あり・耳揺れあり条件では、Q1, Q2, Q3, Q4, Q5 のスコアは中央値より有意に高かった (Q1 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.751$, Q2 : $p = 0.006$, effect size $r = 0.629$, Q3 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.848$, Q4 : $p = 0.002$, effect size $r = 0.877$, Q5 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.882$)。Q6 のスコアは中央値との有意差はなかった ($p = 0.074$, effect size $r = 0.360$)。触覚刺激あり・耳揺れなし条件では、Q1, Q2, Q3 のスコアは中央値との有意差はなかった (Q1 : $p = 0.354$, effect size $r = 0.179$, Q2 : $p = 0.901$, effect size $r = 0.042$, Q3 : $p = 0.874$, effect size $r = 0.070$)。Q4 と Q5 のスコアは中央値より有意に高かった (Q4 : $p = 0.047$, effect size $r = 0.560$, Q5 : $p = 0.032$, effect size $r = 0.484$)。Q6 のスコアは中央値より有意に低かった ($p = 0.005$, effect size $r = 0.693$)。触覚刺激なし・耳揺れあり条件では、Q1, Q2, Q5, Q6 のスコアは中央値より有意に低かった (Q1 : $p = 0.035$, effect size $r = 0.474$, Q2 : $p = 0.020$, effect size $r = 0.513$, Q5 : $p = 0.019$, effect size $r = 0.517$, Q6 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.831$)。Q3 と Q4 のスコアは中央値との有意差はなかった (Q3 : $p = 0.070$, effect size $r = 0.398$, Q4 : $p = 0.061$, effect size $r = 0.442$)。触覚刺激なし・耳揺れなし条件では、全質問のスコアは中央値より有意に低かった (Q1 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.718$, Q2 : $p = 0.004$, effect size $r = 0.669$, Q3 : $p = 0.006$, effect size $r = 0.622$, Q4 : $p = 0.014$, effect size $r = 0.658$, Q5 : $p = 0.005$, effect size $r = 0.637$, Q6 : $p < 0.001$, effect size $r = 0.825$)。図 12 は各条件におけるスコアの結果である。

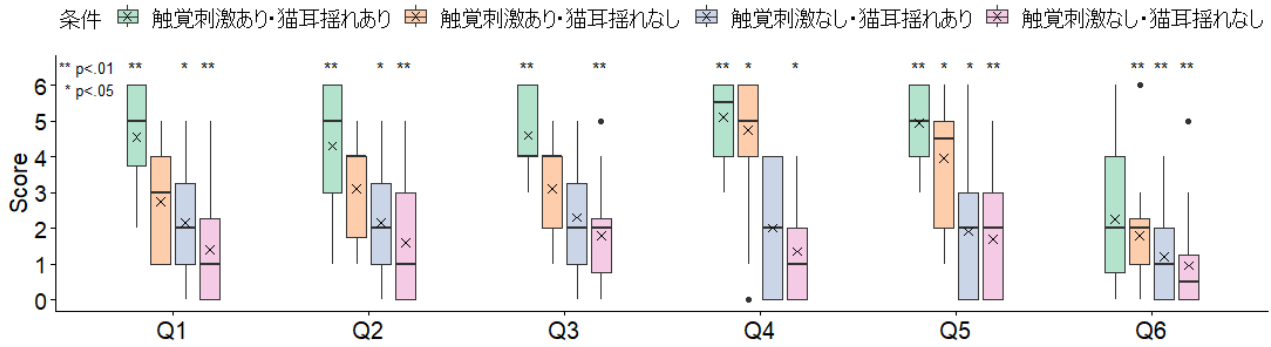


図 12 各条件におけるスコアの結果. 太線は中央値, ×は平均値を示す.
箱ひげ図 の上下限は 75%と 25%を示す.

5 インタビュー

実験参加者からは、以下のようなコメントが得られた。

視触覚刺激を提示した猫耳の柔らかさに関して「(バーチャル空間に表示している) 猫耳が自分の思っていたより柔らかかったため、触覚がない条件では固い方 (耳揺れなし条件) が本物ぽかった。けど、触覚がある条件ではやわらかい猫耳の方が本物のように感じました」、「猫耳のカチューシャを想像したので、猫耳はもっと固いイメージだった」、「(猫) 耳が柔らかすぎる. 自分の耳の硬さと同程度を想像しました」他 4 件、といった参加者の想像よりも猫耳が柔らかい印象を受けたというコメントが計 7 件あった。一方で、「自分のイメージでは、猫耳はもう少し柔らかいイメージでした」、「思ったより弾力のある耳なんだと思いました」のように参加者の予想よりも猫耳が硬く弾力があるというコメントも見られた (計 2 件)。

猫耳の所有感に関して、「耳が動いているときのほうが (猫耳を) 持つて感がありました」、「全部がある (触覚あり: 耳揺れあり) 条件が一番、自分のもの感がありました」、「耳が揺れるだけ (触覚なし: 耳揺れあり条件) では猫耳ではなく、髪の毛の進化系のように感じた」というコメントがあった (計 3 件)。

耳の数に関して、「元の耳がなくなって、猫耳が 2 つ新たに備わったと感じた」、「3 つ目 (触覚あり: 耳揺れあり条件) で元の耳があることに気付いた」、「本当の耳に刺激がないと耳の増加感はないけど、そうなる」と猫耳の刺激とは思わなくなるから難しい」、「途中 (触覚あり耳揺れなし条件) で実際の耳の存在に気付いた」というコメントがあった (計 4 件)。

6 考察

実験結果をもとに、本研究における以下の RQ に対して考察する。[RQ1:猫耳の動きと連動する触覚刺激を提示することで猫耳に対して所有感が生起されるのか], [RQ2: 猫耳を視覚的に揺らすことで猫耳に対して所有感が生起されるのか], [RQ3:触覚刺激と猫耳を視覚的に揺らす相乗効果によって、猫耳に対して所有感が生起されるのか]

6-1 頭部最高地点のドリフト

バーチャルな猫耳の付加に伴う、頭部最高地点のドリフトを調査した。RQ1 について、触覚刺激の条件間において、有意差はなかった。RQ2 について、猫耳ゆれ条件間に有意差はなかった。RQ3 について相乗効果はみられなかった。これらの原因として、実験中の姿勢の変化および「頭部最高地点」の解釈の違いが考えられる。ラバーハンド錯覚実験でのポインティングタスクでは、対象となる腕を机の上に置いて、ドリフトを計測するのに対し、本実験では、ヘッドレストといった、参加者の頭部移動を抑制する仕組みがなかった。そのため、時間経過の疲労にともなう姿勢変化や、無意識に背筋を正す、または曲げるといった要因がドリフト量の計測結果に影響を与えた可能性がある。また、本実験において、参加者はポインティングタスクとして頭部最高地点を指差すように教示されたが、頭部最高地点に猫耳を含めるか否かについて解釈が参加者間で異なり、これが測定結果に影響した可能性がある。

6-2 脅威刺激提示中の頭部移動量

脅威刺激中の頭部移動量を計測した。RQ1 について、触覚刺激を提示することで、脅威刺激中の頭部移動量が有意に増加した。この結果は触覚刺激を提示することで、猫耳への所有感が生起され、脅威刺激に対して回避行動を促したことを示唆する。一方で、RQ2 について猫耳揺れ条件間に有意差はなく、RQ3 も同様に、相乗効果はみられなかった。原因として、脅威刺激に関連する触覚刺激の予測が影響を与えた可能性がある。本実験では撫で動作中にアクチュエータによって猫耳の動きと対応した触覚刺激が提示されていたため、ナイフが猫耳を通過する脅威刺激が提示された際も、対応した触覚刺激が提示されると参加者が予測した可能性がある。その結果、耳揺れの視覚刺激の有無によっては有意差がなく、触覚刺激の有無によって頭部移動量が変化した可能性がある。

6-3 脅威刺激に対する SCR

脅威刺激に対する SCR を計測した。RQ1 について、触覚刺激の条件間に有意差はなかった。一方で、RQ2 について、猫耳を揺らすことで、脅威刺激提示中の SCR が有意に強くなった。RQ3 について、相乗効果はみられなかった。これらは、脅威刺激提示中の頭部移動量や所有感に関連する先行研究の結果と異なる[6]。原因として本実験で提示した脅威刺激が SCR を引き起こすには不十分であり、その結果サンプルサイズが減少したことが挙げられる。本実験で SCR が引き起こされた参加者は 11 名に留まり、サンプルサイズが他の評価指標と比較しておよそ半分となった。これによって、触覚刺激の条件間に有意差が生じなかった可能性がある。

6-4 主観評価の考察

触覚刺激あり・猫耳揺れあり条件において Ownership 項目 (Q1, Q2) と Referral of touch 項目 (Q3, Q4) および Extra ears 項目 (Q5) のスコアが有意に上昇した。これは、触覚刺激の提示と視覚的に猫耳を揺らす相乗効果によって、猫耳への所有感と猫耳に対する触覚が生起したことを示唆する。耳の増加感については、Q5 のスコアのみが有意に上昇したため、猫耳が生えた感覚が生起されたことを示唆する。一方で、Q6 のスコアは有意差が見られなかった。Q6 は耳の数について問う質問であり、本研究で提示された猫耳と実際の耳の外観が大きく異なっていること、また、Q6 の「耳」という表現が猫耳を含まない実際の耳のみと解釈されたことにより、Q6 のスコアが上昇しなかった可能性が考えられる。また、主観評価として所有感が生起されたにも関わらず、頭部最高地点のドリフトが発生しなかった今回の結果は、所有感と固有受容感覚ドリフトが異なるメカニズムによって生じる可能性を示唆する研究と一致する[12]。

7 まとめ

本研究では、生得的に持ちえない猫耳に対して所有感を生起させるために、形状記憶合金の一種であるバイオメタルファイバーを活用したソフトアクチュエータを使って、髪の毛を介した触覚刺激提示デバイスを提案した。猫耳の動きと連動する触覚刺激と猫耳の揺れの有無が猫耳の所有感に与える影響を検討した。参加者が猫耳アバターに変身し、猫耳を撫でられた後、脅威刺激が提示されるというシナリオで実験を行った結果、脅威刺激提示中の頭部移動量は触覚刺激を提示することで有意に増加した。一方で、脅威刺激に対する SCR は触覚刺激の有無によって有意差がなかった。主観評価では、触覚刺激の提示と猫耳の揺れによって、猫耳への所有感、触覚が猫耳から生じる感覚および猫耳が生えた感覚が生起することが示唆された。固有受容感覚ドリフトではいずれの条件においても、有意差はなかった。脅威に対する移動量と主観評価の結果は、猫耳の動きと連動する触覚刺激の提示が、本来持ちえない猫耳に対する所有感生起に寄与する可能性を示しているものの、SCR や固有受容感覚ドリフトとの関連についてはさらなる調査が必要である。

【参考文献】

- [1] 四條亮太, 櫻井翔, 広田光一, 野嶋琢也. 獣耳の感情表現能力を用いた感情表現インターフェースの検討. ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 419–430, 2021.
- [2] Mel Slater, Daniel P´erez Marcos, Henrik Ehrsson, and Maria V Sanchez-Vives. Inducing illusory ownership of a virtual body. *Frontiers in neuroscience*, p.29, 2009.
- [3] William Steptoe, Anthony Steed, and Mel Slater. Hu-man tails: ownership and control of extended humanoid avatars. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 583–590, 2013.
- [4] Ken Arai, Hiroto Saito, Masaaki Fukuoka, Sachiyo Ueda, Maki Sugimoto, Michiteru Kitazaki, and Masahiko Inami. Embodiment of supernumerary robotic limbs in virtual reality. *Scientific reports*, Vol. 12, No. 1, p. 9769, 2022.
- [5] 本間大. 金属系人工筋肉型アクチュエータ: バイオメタル・ファイバーについて. 日本ロボット学会誌, Vol. 21, No. 1, pp. 22–24, 2003.
- [6] Arvid Guterstam, Valeria I. Petkova, and H. Henrik Ehrsson. The illusion of owning a third arm. *PLOS One*, Vol. 6, No. 2, pp. 1–11, 02 2011.
- [7] Donna M Lloyd. Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain and cognition*, Vol. 64, No. 1, pp. 104–109, 2007.
- [8] Roger Boldu, Sambhav Jain, Juan Pablo Forero Cortes, Haimo Zhang, and Suranga Nanayakkara. M-hair: Extended reality by stimulating the body hair. In *SIGGRAPH Asia 2019 XR, SA ’19*, p. 27 – 28, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [9] Sotaro Shimada, Kensuke Fukuda, and Kazuo Hiraki. Rubber hand illusion under delayed visual feedback. *PloS one*, Vol. 4, No. 7, p. e6185, 2009.
- [10] H Henrik Ehrsson, Katja Wiech, Nikolaus Weiskopf, Raymond J Dolan, and Richard E Passingham. Threatening a rubber hand that you feel is yours elicits a cortical anxiety response. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 104, No. 23, pp. 9828–9833, 2007.
- [11] K Carrie Armel and Vilayanur S Ramachandran. Projecting sensations to external objects: evidence from skin conductance response. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, Vol. 270, No. 1523, pp. 1499–1506, 2003.
- [12] Marieke Rohde, Massimiliano Di Luca, and Marc O. Ernst. The rubber hand illusion: feeling of ownership and proprioceptive drift do not go hand in hand. *PLOS One*, Vol. 6, No. 6, p. e21659, 2011.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Necomimi illusion: Generating Ownership of Cat Ears through Haptic Feedback via Hair	SIGGRAPH Asia 2024 XR	2024 年 12 月
Necomimi Illusion: アバタの猫耳と連動する毛髪を通じた触覚フィードバックによる所有感生成	日本バーチャルリアリティ学会論文誌	2025 年 3 月