

視覚・聴覚・触覚のマルチモーダルフィードバックによる アバタの猫耳に対する身体所有感の探究

代表研究者 山村 浩穂 東京大学先端科学技術研究センター

要旨

人間が生得的に持たない身体部位の拡張、たとえば余剰肢（supernumerary limbs）への関心が近年高まっている。こうした拡張身体部位は既存の身体構造に類似しているため、その動きや感覚を既存の身体部位の経験から類推することができる。しかし、猫耳のように人間がこれまで一度も持ったことのない想像上の身体部位に対する身体所有感（sense of ownership）については、十分な検討が行われてこなかった。本研究は、視覚・聴覚・触覚の刺激を統合したマルチモーダルフィードバックを通じて、人間が生得的に持たない身体部位である猫耳に対する身体所有感の変化を検討する実験を提案するものである。頭頂部に猫耳を付加したアバタを用い、アバタの猫耳に対する視覚刺激と、それに空間的に整合した聴覚・触覚フィードバックを提示することによって、想像上の猫耳に対する身体所有感を高めることを目指す。本報告書では、提案するシステムの構成、実験手法、評価手法、ならびに今後の展望について詳述する。なお、これに基づくユーザスタディの詳細な結果については、別途、学術論文として公表する予定である。

1. はじめに

1.1 生得的に持たない身体部位の所有感

近年、人間が生得的に備えていない身体部位の拡張が注目を集めている。その代表的な例が、余剰肢（supernumerary limbs）と呼ばれる、本来の腕や脚に加えて付加される追加的な身体部位である。このような拡張身体部位の特性として、それらが既存の身体構造に類似しているという特徴がある。追加された腕や脚のような身体部位は、人間が本来持っている腕や脚と形態的に類似しているため、その動きや感覚を、生得的に存在する身体部位での経験から推し量ることが可能である。ユーザは、自身がすでに有している身体の運動や感覚の知識を手がかりとして、付加された身体部位をどのように動かし、どのような感覚が生じるのかを類推できるのである。

このような類推が成立することは、拡張身体部位を自身の身体の一部として受け入れる過程において重要な役割を果たすと考えられる。ある身体部位が「自分自身の身体（の一部）として帰属する」と感じる主観的な感覚は身体所有感と呼ばれる。既存の身体部位と類似した拡張部位であれば、ユーザはその制御や感覚処理に関して既存の身体図式を流用でき、結果として拡張部位に対する身体所有感を比較的容易に獲得すると期待される。

実際に、バーチャルリアリティ（VR）やロボティクスの技術を活用して、こうした余剰肢に対する身体所有感を生起させる試みが数多く行われてきた。たとえば、参加者の本来の手と同期して刺激される第三の腕に対して所有感が生じること[1]や、足で操作する人工の腕を自身の身体として取り込めること[2]、さらには既存の四肢から独立して動く余剰肢に対しても所有感が成立しうること[3]が報告されている。これらの追加的な身体部位はいずれも、既存の腕や指の延長として解釈しやすいという共通の特徴を備えており、ユーザは自身の身体経験からその挙動や感覚をある程度推し量ることができる。

1.2 想像上の身体部位に対する身体所有感

一方で、人間がこれまで一度も持ったことのない想像上の身体部位、たとえば動物の耳のような部位に対する身体所有感については、これまで十分に検討されてこなかった。猫耳のような身体部位は、人間の既存の身体構造には対応するものが存在しない。そのため、ユーザは自身の身体経験からその動きや感覚を類推することが難しく、既存の身体部位の拡張とは本質的に異なる問題を含んでいる。

生得的に存在する身体部位や、それに類似した余剰肢については、こうした所有感の生起メカニズムが比較的検討されてきた。しかし、形態的にも機能的にも人間の身体に対応物を持たない想像上の身体部位に対して、人間がどのようにして所有感を抱きうるのか、またそれをどのように増強できるのかは、未解明の課題として残されている。

この点に関して、これまでも非人間的なアバタに対する身体所有感の研究は行われてきた。たとえば、

視覚と運動の同期によって、コウモリやクモのように完全に人間とは異なる姿のアバタに対してさえ所有感が誘導されうること[4]や、アバタに付加された尻尾に対して所有感が生じうること[5]が示されている。ただし、これらの研究の多くは、運動と視覚の同期を所有感の主たる手がかりとしている点に特徴があり、非人間的な身体部位に対してどのような感覚フィードバックを与えれば所有感を高められるのかは、依然として明らかでない。

想像上の動物の耳に対する身体所有感を高めることは、動物の耳を備えた拡張アバタへの没入感(sense of immersion)を向上させることにつながると期待される。バーチャルリアリティ(VR)環境において、ユーザは自身とは異なる姿のアバタへと変身することができる。猫耳のような人間にはない部位を備えたアバタを用いる場合、その付加された部位を自分の身体の一部として感じられるかどうかは、アバタ全体への没入の質を大きく左右すると考えられる。

猫耳に対する身体所有感が高まれば、ユーザはその猫耳を含むアバタ全体をより自分自身のものとして受け入れやすくなり、結果として拡張アバタを用いた体験全体の没入感が向上することが見込まれる。実際、自身とは異なる姿のアバタへの身体所有感は、その外見に対応して行動が変化するプロテウス効果を引き起こすこと[6]が知られており、身体所有感は運動主体感や自己定位とともに、VRにおけるアバタへの身体性(embodiment)を構成する中核的な要素として位置づけられている[7]。このことは、想像上の身体部位に対する所有感の研究が、単に基礎的な知覚・認知の問題にとどまらず、VRにおけるアバタ体験の質の向上という応用的な意義をも持つことを示している。

1.4 先行研究の知見と本研究の位置づけ

先行研究では、視覚刺激と空間的に整合したマルチモーダルフィードバックを提示することによって、実際の身体とは見た目が異なる想像上の身体部位、たとえば翼[8]や猫耳[9]に対してであっても、身体所有感を生じさせることが報告されている。

しかしながら、これらの先行研究は主として視覚と触覚を組み合わせたマルチモーダルフィードバックに焦点を当てたものであった。触覚刺激については、時間的な整合性だけでなく空間的な整合性もまた身体所有感に影響することが知られており、視覚的に触れられる部位と実際に触覚が与えられる部位とが空間的にずれると所有感が低下することが報告されている[10]。これに対して、聴覚刺激が動物の耳に対する身体所有感に与える効果については、これまで検討されてこなかった。

耳という身体部位は、本来「音を聞くための器官」である。したがって、猫耳という身体部位を対象とする場合、聴覚という感覚モダリティは、視覚や触覚と並んで、あるいはそれ以上に本質的な意味を持つ可能性がある。猫耳の位置から音が聞こえてくるという聴覚的な手がかりは、その猫耳を自分の身体の一部として感じさせるだけでなく、聴覚器官としての機能的な役割を持つ身体部位として知覚される可能性がある。

聴覚をはじめとする非視覚的なフィードバックと身体所有感の関係についても、近年いくつかの知見が蓄積されつつある。聴覚に関しては、ラバーハンド錯覚に同期した聴覚刺激が錯覚を増強すること[11]や、能動的な運動を伴う仮想の手の錯覚において、視覚・触覚・聴覚の多感覚統合が強い所有感を誘導すること[12]が示されている。また、動物の耳そのものを扱った研究としては、専用の感覚提示装置を用いずに視覚的なリターゲットングによってエルフ耳の変形錯覚を生じさせる試み[13]や、頭部運動に連動した立体音響と振動とを同期して提示することで、追加された仮想の耳に対する所有感を高めうるとする報告[14]が知られている。さらに、非人間的な身体部位全般については、聴覚と触覚を組み合わせることで犬のアバタへの身体性が強まりうる一方、聴覚刺激のみでは身体性が変化しにくいこと[15]も示されており、聴覚を他の感覚と適切に組み合わせることで提示することの重要性が示唆されている。

本研究はこの空白に着目する。第一歩として、形状記憶合金(shape memory alloy: SMA)で駆動されるソフトアクチュエータによって生成される触覚フィードバックと、ダミーの猫耳を通してバイノーラル方式で録音された聴覚フィードバックとを組み合わせたシステムを提案する。さらに、このシステムを用いて、猫耳に対する身体所有感の変化を調べる実験計画を提案する。これにより、従来は視覚と触覚に限られていたマルチモーダルフィードバックの研究に、聴覚という新たな刺激を加え、想像上の身体部位への所有感の理解を一步前進させることを狙いとする。本研究では人間が生得的に持たない身体部位の代表例として「猫耳」を取り上げ、その身体所有感が視覚・聴覚・触覚を組み合わせたマルチモーダルフィードバックによって、どのように変化するかを検討することを目的とする。

2. 提案システムと実験手法

本章では、提案するシステムの全体像と、それを用いた実験手法について述べる。提案システムの概要を図1に示す。

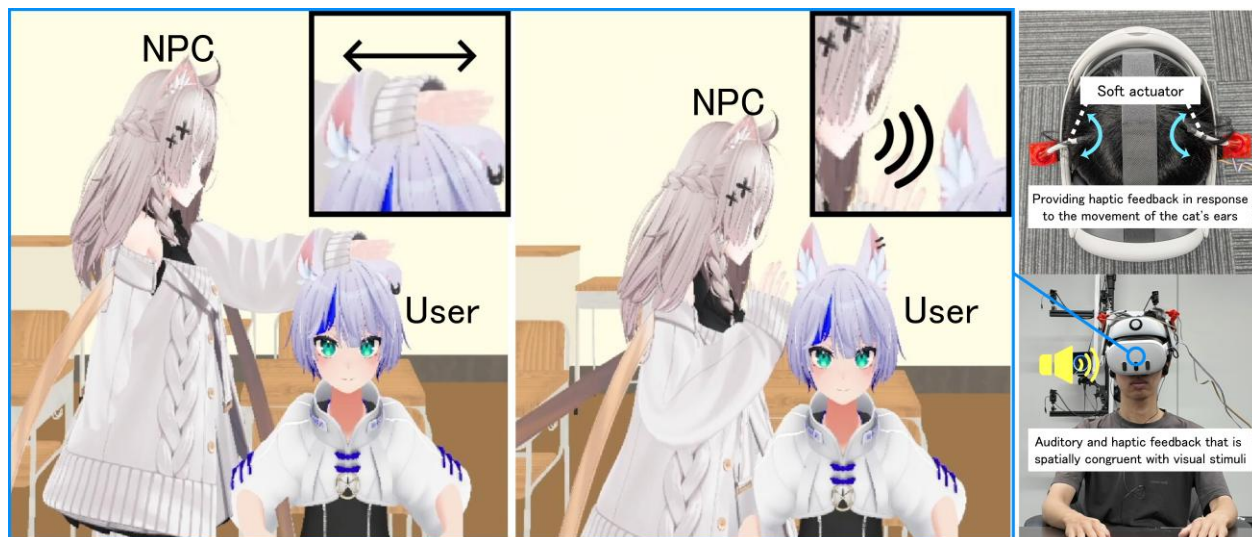


図1 提案システムの概要。NPC アバタが参加者のバーチャルな猫耳を撫で(左)、続いて猫耳の近くで話しかける(中)。HMD に統合した形状記憶合金 (SMA) 駆動のソフトアクチュエータにより、視覚刺激と空間的に整合した触覚・聴覚フィードバックを提示する (右)。

2.1 VR 環境とアバタの構成

本提案実験では、Unity バージョン 2019.4.31f1 を用いてバーチャルリアリティ (VR) 環境を構築する。実験参加者はヘッドマウントディスプレイ (HMD) として Meta 社の Meta Quest 3 を装着し、頭頂部に猫耳が付いたアニメ調のアバタへと変身する。VR 空間には参加者が変身する猫耳アバタの正面に鏡が配置されており、参加者は鏡を通して、自身の様子を確認することができる。シナリオの開始前に参加者は自身の頭部の動きとアバタの頭部の動きが連動することを鏡越しに確認して、目の前の猫耳アバタに対する所有感を生起させる。

2.2 実験シナリオ

実験のシナリオは、参加者が変身したアバタの猫耳がノンプレイヤーキャラクター (NPC: Non-Playable Character) のアバタによって2分間にわたって撫でられ、その後に NPC から話しかけられる、という流れで設計されている(図2)。猫耳が撫でられるフェーズでは、NPC アバタが参加者の猫耳を撫でるといった触覚的・視覚的なインタラクションが行われる。猫耳の耳元で NPC から話しかけられるフェーズでは、NPC アバタが参加者に向かって発話するという聴覚的・視覚的なインタラクションが行われる。

この一連のシナリオは、撫でられるという触覚的経験と、話しかけられるという聴覚的経験の双方を、猫耳という身体部位に関連づけて提示することを意図している。撫でる動作は猫耳への触覚フィードバックと結びつけられ、発話は猫耳の位置を起点とする聴覚フィードバックと結びつけられる。こうして、視覚・触覚・聴覚の複数モダリティにわたる刺激が、猫耳という一つの身体部位に集約される構成となっている。



図2 実験シナリオ。左：NPC アバタが参加者のバーチャルな猫耳を撫でる局面。右：NPC アバタが猫耳の近くで話しかける局面。

2.3 実験計画：2×2 要因計画

本実験は、二つの独立変数を持つ 2×2 要因計画 (factorial design) を採用する。(1) 聴覚フィードバックの空間的整合性 (spatial congruency: 整合条件 congruent と非整合条件 incongruent)、ならびに (2) 触覚フィードバックの有無 (提示する／提示しない) である。

これら二つの要因と二水準の組み合わせから構成される四つの条件を、整理して述べると以下のようになる。

- ・条件 1：聴覚フィードバックが空間的に整合し、かつ触覚フィードバックが提示される条件。視覚的に提示される猫耳の位置に対して、聴覚的な音源の位置も触覚刺激の位置もともに整合的に提示される。
- ・条件 2：聴覚フィードバックが空間的に整合し、触覚フィードバックは提示されない条件。猫耳の位置から音が聞こえるという聴覚的整合性のみが与えられ、撫でられる触覚は伴わない。
- ・条件 3：聴覚フィードバックが空間的に非整合であり、触覚フィードバックが提示される条件。撫でられる触覚刺激は猫耳の位置と整合して与えられるが、音響刺激を受容する位置は生得的な耳の位置を起点としているため、猫耳の位置とずれている。
- ・条件 4：聴覚フィードバックが空間的に非整合であり、触覚フィードバックも提示されない条件。音響刺激の需要位置は生得的な耳の位置を起点とし、撫でられた際の触覚的手がかりも欠く、相対的に手がかりの乏しい条件である。

このように四つの条件を設けることにより、聴覚の空間的整合性という要因と、触覚の有無という要因とが、それぞれ単独で、あるいは互いに組み合わさって、猫耳に対する身体所有感にどのように寄与するのかを切り分けて検討することが可能となる。

各条件の提示順序は、順序効果 (order effects) を統制するために、参加者ごとにランダム化される。これにより、特定の条件が常に先に提示されることによる学習効果や慣れ、疲労などの影響が、結果に系統的なバイアスを与えることを防ぐ。順序のランダム化は、実験デザインの内的妥当性を確保するうえで重要な手続きである。

2.4 聴覚フィードバックの設計とバイノーラル録音

聴覚フィードバックについては、各参加者ごとに個別にバイノーラル録音を用意する。バイノーラル録音とは、人間の両耳の位置で音を収録することにより、再生時に音源の方向や距離を含む空間的な聴覚体験を再現する録音方式である。本実験では、この方式を用いて、猫耳の位置から音が聞こえてくるという聴覚的体験を作り出すことを目指す。

具体的な手続きは次の通りである。参加者が VR 環境に入る前に、まずダミーの猫耳アクセサリを装着する。そして、各条件に応じて、バイノーラルマイク (Roland 社製 CS-10EM) を、ダミーの猫耳、あるいは参加者

本来の耳のいずれかに取り付ける。スピーカー（Audio-Technica 社製 AT-MSP56TV）はダミーの猫耳の側方に設置され、NPC アバタの音声は、同一のゲイン設定のもとで録音される（図 3）。

ここで、ダミーの猫耳に取り付けたマイクから得られた録音を「空間的整合条件（spatially congruent condition）」と定義し、生得的な耳に取り付けたマイクから得られた録音を「空間的非整合条件（spatially incongruent condition）」と定義する。

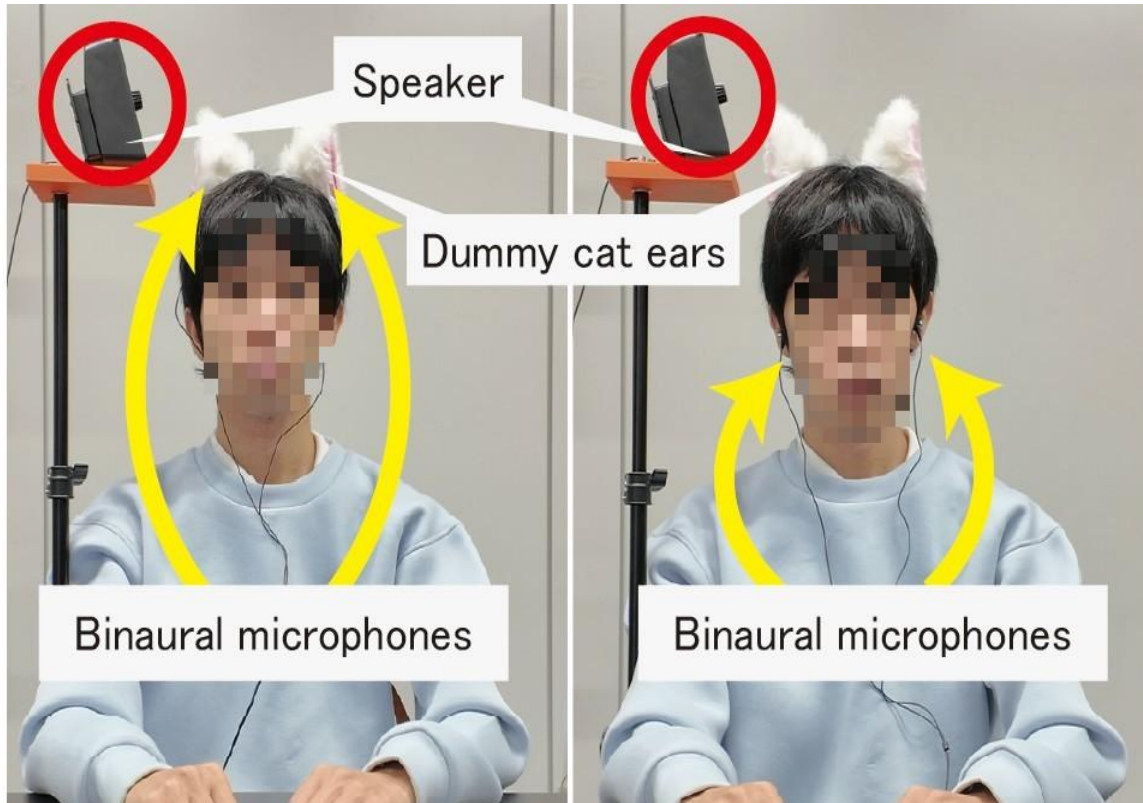


図 3 バイノーラル録音の構成。左：空間的整合条件（ダミーの猫耳にマイクを装着し、收音点を猫耳の位置へ移す）。
右：空間的非整合条件（本来の耳にマイクを装着し、收音点を実際の耳の高さに保つ）。

空間的整合条件では、録音された音声は、猫耳の位置で発話する NPC アバタのアニメーションと同期して提示され、音声は側方から到来するものとして知覚される。猫耳の位置で収録された音が猫耳の位置から聞こえてくるため、視覚的に提示される猫耳の位置と、聴覚的に知覚される音源の位置とが空間的に一致する。これにより、参加者は「自分の猫耳を通して音を聞いている」という体験に近づくことが期待される。

一方、空間的非整合条件では、音声は上方の斜め方向から到来するものとして提示され、その音量は整合条件と比べて、距離に応じて減衰させられる。本来の耳の位置で収録された音は、猫耳の位置から見ると相対的に下方かつ異なる位置から到来したものとなるため、視覚的に提示される猫耳の位置と聴覚刺激の受容位置との間に空間的なずれが生じる。この空間的なずれが、聴覚フィードバックの整合性という独立変数の操作を構成する。

このように、同一の NPC 音声を、収録するマイクの装着位置（ダミー猫耳 対 生得的な耳）を変えることで録音し分けることにより、聴覚フィードバックの空間的整合性のみを操作し、その他の条件をできるだけ一定に保つ工夫がなされている。各参加者ごとに個別に録音を用意する点も、個人の頭部形状や耳の位置に起因する聴覚特性の違いを反映した、より自然な空間音響体験を実現するための配慮である。

2.5 触覚フィードバックの設計とソフトアクチュエータ

触覚刺激を提示するために、先行研究[9]で用いられたソフトアクチュエータを HMD に組み込み、参加者の髪に取り付ける。このアクチュエータは、前述のとおり形状記憶合金（SMA）によって駆動されるチューブ型ソフトアクチュエータである。形状記憶合金を用いることで、柔軟かつ静かに動作する触覚提示が可能となる。とりわけ静粛性は、後述する聴覚フィードバックを妨げないという点で、本実験において重要な利点となる。

このアクチュエータが、猫耳が撫でられるという視覚刺激と同期して作動すると、参加者の髪がアクチュエータによって前後に揺らされる（図 4）。これにより、アバタの猫耳と空間的に整合した触覚フィードバックが提供される。視覚的にはアバタの猫耳が NPC に撫でられる様子が提示され、それと同期して参加者自身の髪が物理的に動かされることで、「猫耳が撫でられている」という触覚的な感覚が、視覚刺激と時間的・空間的に整合した形で参加者に与えられる。

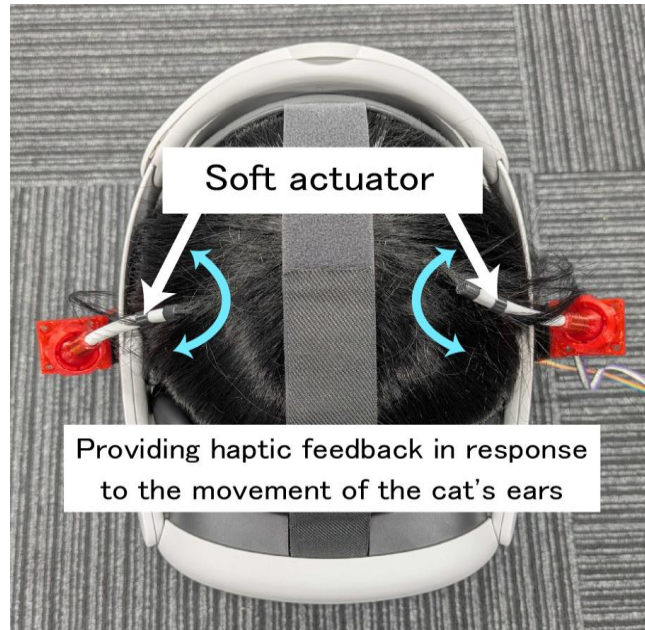


図 4 HMD に統合した、髪を介して触覚を提示するソフトアクチュエータ。猫耳の動きに同期して左右の髪を前後に揺らし、空間的に整合した触覚フィードバックを提示する。

このようにして、本提案システムは、(1) アバタの猫耳が撫でられる視覚刺激、(2) バイノーラル録音による空間的に整合（あるいは非整合）した聴覚フィードバック、(3) SMA 駆動のソフトアクチュエータによる髪を介した触覚フィードバック、という三つの感覚モダリティにわたる刺激を統合的に提示する構成となっている。

3. 評価手法

本研究では、猫耳に対する身体所有感を評価するために、客観的指標と主観的指標の二つの側面からアプローチする。客観的指標としては固有感覚ドリフト（proprioceptive drift）を測定し、主観的指標としてはアンケートによる評価を行う。

3.1 固有感覚ドリフトによる客観的評価

固有感覚ドリフトの測定は、ラバーハンド錯覚(rubber hand illusion)における知見に基づいている[16]。ラバーハンド錯覚に関する研究では、身体所有感が生起するにつれて、知覚される手の位置が、実際の手の位置からゴム製の手（ラバーハンド）の方向へとずれていくことが報告されている。この、知覚される身体部位の位置が実際の位置からずれていく現象が、固有感覚ドリフトと呼ばれるものである。ある対象に対して身体所有感が高まると、その対象の方向へと自己身体の知覚位置が引き寄せられるのである。

本研究では、この固有感覚ドリフトの考え方を、猫耳に対応する身体部位に適用する。具体的には、猫耳に対応する身体部位として、頭頂部（head vertex）と本来の耳（real ears）の固有受容感覚ドリフトを測定する。ここで本研究が立てる仮説は、猫耳に対する身体所有感が生起するにつれて、参加者は猫耳が付加されている方向、上方へと、自己身体の知覚位置がドリフトするであろう、というものである。

固有感覚ドリフトを測定するために、目盛りの付いたボードを参加者の側方に設置する。各条件の終了時に、参加者は自分の頭頂部と、自分の本来の耳の位置として知覚される位置をボード越しに指し示すよう教示（図 5）。実験者は、これらの身体部位の実際の位置を測定し、参加者が指し示した位置と実際の位置との

間の鉛直方向の差を比較することによって、ドリフトが生じているか否かを判定する。

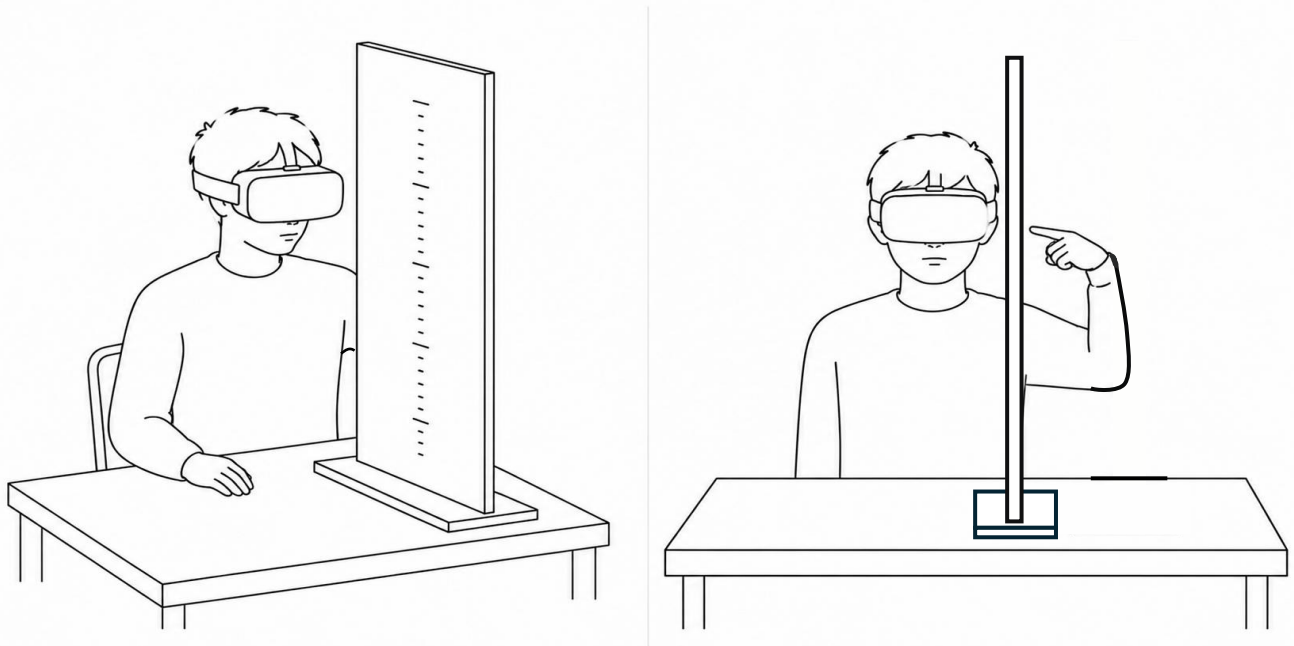


図5 固有受容感覚ドリフト計測の様子。参加者はHMDを装着したまま、目盛り付きのボードを介して、頭頂部・本来の耳・バーチャルな猫耳の高さとして知覚した位置を指し示す。

3.2 アンケートによる主観的評価

主観的評価としては、猫耳に対する身体所有感に関するアンケートを設計する。このアンケートは7件法のリッカート尺度 (Likert scale) を用い、0 (まったくそう思わない、strongly disagree) から 6 (強くそう思う、strongly agree) までの範囲で回答を求めるものである。

アンケート項目は、評価する内容によって三つのカテゴリに分類される。(1) 身体所有感 (Ownership)、(2) 触覚の参照 (Referral of touch)、(3) 音の参照 (Referral of sound) の三つである。各カテゴリには以下のような質問項目が含まれる。

(1) 身体所有感 (Ownership) に関する項目

- ・Q1：バーチャルな猫耳が自分の身体の一部であるかのように感じた。
- ・Q2：バーチャルな猫耳が自分のものであるかのように感じた。

これらの項目は、猫耳という身体部位そのものを、参加者が自分の身体の一部として、あるいは自分に帰属するものとして感じたかどうかを直接的に問うものである。

(2) 触覚の参照 (Referral of touch) に関する項目

- ・Q3：バーチャルな猫耳が触れられている位置で、撫でられる触感を感じているかのように思えた。
- ・Q4：自分が感じた触感が、NPC アバタの手が自分のバーチャルな猫耳に触れることによって生じたかのように思えた。

これらの項目は、参加者が感じた触覚が、視覚的に提示された猫耳の位置に参照 (referral) されたかどうか、触覚体験が猫耳という身体部位に帰属されたかどうかを問うものである。

(3) 音の参照 (Referral of sound) に関する項目

- ・Q5：NPC アバタの声を、頭頂部にあるバーチャルな猫耳を通して聞いたかのように思えた。
- ・Q6：NPC アバタの声を知覚した耳は、頭頂部に配置されているかのように思えた。

これらの項目は、参加者が知覚した音が、頭頂部の猫耳に参照されたかどうか、聴覚体験が猫耳に帰属されたかどうかを問うものである。

3.3 アンケート項目の出自

これらのアンケート項目のうち、身体所有感 (Ownership) と触覚の参照 (Referral of touch) を評価する項目は、先行研究で用いられた質問項目を参考にして作成したものである。ラバーハンド錯覚や身体性に関する従来の心理測定的研究で確立された質問項目 [16, 17] を、本研究の猫耳という対象に合わせて修正・流用している。これにより、先行研究との比較可能性を確保するとともに、評価尺度としての妥当性を担保することが意図されている。

一方、音の参照 (Referral of sound) に関する項目については、先行研究の中に対応する項目が見出されなかった。そこで、これらの項目については、本研究の文脈と目的に基づいて新たに開発した。この点は、聴覚という新たなモダリティを所有感研究に導入する本研究の独自性を反映したものであり、今後の同種の研究における評価尺度の基礎を提供しうるものである。

以上のように、本研究の評価手法は、固有感覚ドリフトという客観的指標と、アンケートという主観的・指標の双方を組み合わせている。固有感覚ドリフトは、参加者の意識的な報告に依存しない形で身体所有感の生起を捉える客観的な手がかりを提供する。一方、アンケートは、参加者自身が体験した所有感や、触覚・聴覚が猫耳に参照される感覚を、直接的に評価することを可能にする。

これら二つの指標を併用することによって、猫耳に対する身体所有感を多角的に評価し、視覚・聴覚・触覚のマルチモーダルフィードバックがその所有感に及ぼす影響を、より頑健に検証することが期待される。

4. 結論と今後の展望

本研究は、人間が生得的に持たない想像上の身体部位である猫耳に対する身体所有感の変化を、視覚・聴覚・触覚の刺激を組み合わせたマルチモーダルフィードバックを通じて検討する実験計画を提案するものである。

本報告書で提示したシステムは、NPC アバタが猫耳を撫で、続いて猫耳の近くで話しかけるというシナリオにおいて、空間的に整合した触覚フィードバックと聴覚フィードバックを提供することで各要因が非人間的な身体部位である猫耳の所有感に与える影響を検討するものである。触覚フィードバックは、HMD に組み込まれ参加者の髪に取り付けられた形状記憶合金駆動のソフトアクチュエータによって、猫耳が撫でられる視覚刺激と同期して提供される。聴覚フィードバックは、ダミーの猫耳あるいは本来の耳に取り付けたバイノーラルマイクによる個別録音を通じて、空間一致条件と不一致条件として提示される。そして、これらの効果を評価するために、頭頂部および本来の耳の固有感覚ドリフトの測定と、身体所有感・触覚の参照・音の参照を問う 7 件法アンケートとを組み合わせた評価手法を設計した。

本報告書で述べた実験デザインに基づく詳細な実験結果は別途、学術論文で公表予定である。

【参考文献】

- [1] Guterstam, A., Petkova, V. I., and Ehrsson, H. H. (2011). The illusion of owning a third arm. PLOS ONE 6, 1–11. doi:10.1371/journal.pone.0017208
- [2] Saraiji, M. Y., Sasaki, T., Kunze, K., Minamizawa, K., and Inami, M. (2018). Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In Proceedings of the 31st Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. 65–74.
- [3] Umezawa, K., Suzuki, Y., Ganesh, G., and Miyawaki, Y. (2022). Bodily ownership of an independent supernumerary limb: an exploratory study. Scientific reports 12, 2339
- [4] Krekhov, A., Cmentowski, S., and Krüger, J. (2019). The illusion of animal body ownership and its potential for virtual reality games. In 2019 IEEE Conference on Games (CoG). 1–8. doi:10.1109/CIG.2019.8848005
- [5] Steptoe, W., Steed, A., and Slater, M. (2013). Human tails: ownership and control of extended humanoid avatars. IEEE transactions on visualization and computer graphics 19, 583–590
- [6] Yee, N. and Bailenson, J. (2007). The Proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior. Human communication research 33, 271–290

- [7] Kilteni, K., Groten, R., and Slater, M. (2012). The sense of embodiment in virtual reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 21, 373–387
- [8] Egeberg, M. C., Lind, S. L., Serubugo, S., Skantarova, D., and Kraus, M. (2016). Extending the human body in virtual reality: Effect of sensory feedback on agency and ownership of virtual wings. In *Proceedings of the 2016 Virtual Reality International Conference*. 1–4
- [9] Yamamura, H., Kondo, R., and Sugimoto, M. (2024). Nekomimi illusion: Generating ownership of cat ears through haptic feedback via hair. In *SIGGRAPH Asia 2024 XR (Association for Computing Machinery), SA '24*. doi:10.1145/3681759.3688923
- [10] Lloyd, D. M. (2007). Spatial limits on referred touch to an alien limb may reflect boundaries of visuo-tactile peripersonal space surrounding the hand. *Brain and cognition* 64, 104–109
- [11] Radziun, D. and Ehrsson, H. H. (2018). Auditory cues influence the rubber-hand illusion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance* 44, 1012
- [12] Choi, W., Li, L., Satoh, S., and Hachimura, K. (2016). Multisensory integration in the virtual hand illusion with active movement. *BioMed research international* 2016, 8163098
- [13] Shi, H. and Je, S. (2025). Dobbyear: Inducing body illusion of ear deformation with haptic retargeting. In *Proceedings of the 2025 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 1–12
- [14] Kometani, Y., Matsumura, N., and Yonezawa, T. (2025). Sense of ownership for “sensory organ”: Additional virtual ears using stereophonic sound and vibration. *Transactions of the Virtual Reality Society of Japan* 30, 275–286. doi:10.18974/tvrsj.30.3 275
- [15] Vargas, M. F., Fribourg, R., Bates, E., and McDonnell, R. (2023). Now I wanna be a dog: Exploring the impact of audio and tactile feedback on animal embodiment. In *2023 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR) (IEEE)*, 912–921
- [16] Botvinick, M. and Cohen, J. (1998). Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see. *Nature* 391, 756–756
- [17] Longo, M. R., Schüür, F., Kammers, M. P., Tsakiris, M., and Haggard, P. (2008). What is embodiment? A psychometric approach. *Cognition* 107, 978–998

〈発表資料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
Exploring Ownership of an Avatar’s Cat Ears through Visual, Auditory, and Haptic Multimodal Feedback	ICAT-EGVE 2025 (International Conference on Artificial Reality and Telexistence and Eurographics Symposium on Virtual Environments), Posters and Demos, The Eurographics Association	2025 年 12 月