



# 非相同アームを用いた触覚的な空間探索を可能にするフィードバックマッピングに関する検討

A Study on Feedback Mapping for Enabling Haptic Spatial Exploration Using Non-Analogous Arms

戸崎利脩<sup>1)</sup>, 高下修聡<sup>2)</sup>, 齊藤寛人<sup>2)</sup>, 稲見昌彦<sup>2)</sup>

1) 東京慈恵会医科大学 医学部医学科 (〒 105-8461 東京都港区西新橋 3-25-8)

2) 東京大学 先端科学技術研究センター (〒 153-8904 東京都目黒区駒場 4-6-1)

**概要:** ヒトとは身体部位の構造が異なるなど、ヒトと非相合なアバターを自分の身体であるかのように扱うためには、これまでの研究で検討されてきた操作者とアバター間での操作 (コントロール) のマッピングに加え、感覚 (フィードバック) のマッピングも重要であると考えられる。そこで本研究では、特殊な身体性を用いた触覚的な空間探索能力の獲得可能性の検討のために、手指で操作される 12 関節のタコ腕型アバターの触覚を感じるための多チャンネル触覚マッピングシステムを開発した。

**キーワード:** アバター、身体化、マッピング、運動学習、ハプティクス

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ技術の発展は、ヒトにヒト以外の生物に住まう能力 [1] を与えつつある。最も初期の報告は Jalon Lanier らによるもので、彼らは人間が持つ運動自由度をロブスターなどの非人間的な形態にマッピングすることで、多様な形態を持つアバターの操作を実演している [1, 2]。その後、非人間的なアバターを操作するための研究は、尻尾の操作 [3]、蜘蛛やトラに対する最適な操作 [4]、タコ腕に対する操作 [5] などに発展してきた。また、義肢・身体拡張・テレプレゼンスロボットなどの分野においても、ヒトが自分の現実の身体と異なる形の身体を操作するための技術が開発されてきている [6]。

一方で、生得的な自分の身体でない身体を扱うためには、その身体を操作する方法のみならず、その身体の感覚を獲得するためのフィードバック技術も重要である。ヒト型のアバターに対しては、それに与えられる感覚を再現するように現実の人間に与えればよく、例えばアバターの右手が物体に触れた際には現実の右手にそれに触れたような感覚を与えられることが理想である。しかしながら、生得的な身体と形状が異なるアバターや身体に対しては、その刺激をどのように現実の身体に戻せばよいか、という新たな課題が発生する。例えば MetaArm[7] では、拡張腕を現実の足を用いて操作する際に、その足に対して拡張腕の発揮する力の感覚を圧力を用いて伝えている。また、Edgeberg らは、ドラゴンアバターの羽への接触感覚を、その羽の基部付近の肩へ振動刺激としてフィードバックしている [8]。しかし、これらの研究のように、アバターのや拡張身体に与えられた刺激を現実の身体の一か所だけにフィードバックする手法では、刺激が与えられた箇所に関する情報が落ちるなど、空間的な解像度が減衰してしまうという課題がある。例えば、その身体を用いて「触覚的に」空間を探索するような

シナリオにおいては、アバターのどの位置に物体が振れたかという情報が重要になると考えられる。

そこで本研究では、ヒトが自分と非相同なアバターを用いて「触覚的に」空間を探索することを可能にするための、ヒト-非ヒト間多チャンネル触覚マッピングシステムを検討する。具体的には、筆者らの以前の研究 [5] で取り扱ったタコ腕型非相同アバターアームに対して、アームの長さ方向の各位置から触覚を手指もしくは体の別の位置に返すための振動刺激フィードバックシステムを開発した。また、フィードバックを体験するための VR シーンも開発した。加えて、将来的な評価の方針についても、本稿で述べる。

## 2. 非相同アームからのフィードバックシステム

### 2.1 アバター構成

今回用いたタコ腕型アバターアームの構成は、筆者らの以前の研究に則った [5]。アームは抽象的な見た目をしたヒト型アバターの、右手を置換する形で装着される。アームの全長は 75.6cm であり、12 関節 12 ボーンからなる。

### 2.2 アームの動作

アームの各関節は右手の人差し指から小指までの指関節に一对一でマッピングされて動作される。以前の研究 [5] から、人差し指をアームの根元側に、小指側をアームの先端側にマッピングする操作条件を採用した (Fig. 1)。この研究では、最終的に「外見と構造の類似性」「運動学的適合性」「日常動作との対応」が、非相同なアームへの操作マッピングで重要であると結論付けた。今回採用したマッピング条件はこの研究で比較された 4 条件の中で総合的な評価が最も高く、またこれらの要素を満たしている。各指が最大に屈曲した状態 (即ち、力んだグーのポーズ) をアームの最大の正方向の屈曲 (各関節が +30 度回転したポーズ) に、各指が最大に伸展した状態 (即ち、力んだパーのポーズ) をアームの最大の負方向の屈曲 (各関節が -30 度回転したポーズ) にマッピングした。このマッピング条件は、以前の研究 [5] で検証された。今回の研究では、このマッピング条件を用いて、タコ腕型アバターアームを用いた空間探索の検証を行った。

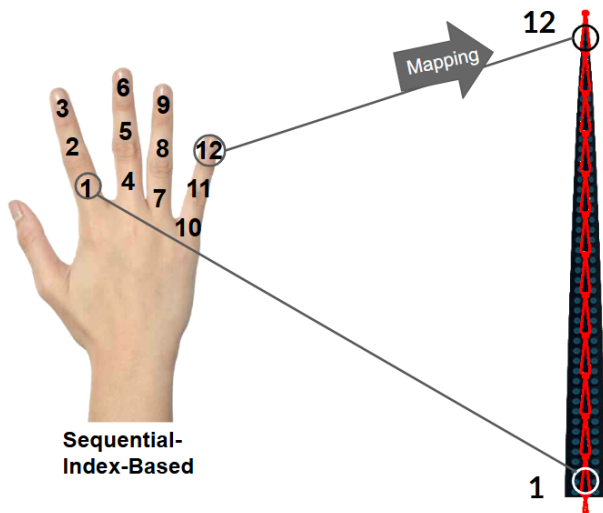


図 1: タコ腕型アバターアームとその操作方法。

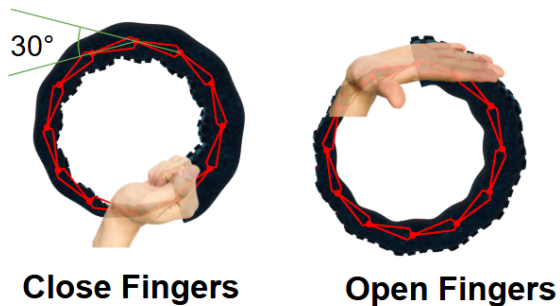


図 2: アバターアームの動作。

ムの最大の逆方向の屈曲 (各関節が  $-30$  度回転したポーズ) に対応付け、その中間の姿勢は線形に補間された (Fig. 2)。

### 2.3 VR システム

VR シーンは Unity 2022 を使用して開発され、HTC Vive Pro 2 上で描画された。システムは Intel Core i7 CPU と NVIDIA GeForce RTX 2080 GPU を搭載したゲーミングノート PC 上で動作した。アバターを動作させるための動作入力となる手指の動作は以前の研究で用いた Manus Quantum Glove ではなく、UltraLeap のカメラベースハンドトラッキングにより取得された。これは、後述する振動フィードバックシステムを手指に装着する際に物理的に干渉したためである。

### 2.4 フィードバックシステムの構成

タコ腕型アバターアームを用いて環境を触覚的に探索するためには、そのアームが物体に触れた時に、その触れた位置をユーザーが理解できることが必要である。そこで本稿では、アームからの各部位からの触覚をユーザーにフィードバックするために、振動子を用いた多チャンネル触覚フィードバックシステムを開発した (Fig. 3)。アームは 12 関節から構成されているため、その各関節のボーンの位置に物体が

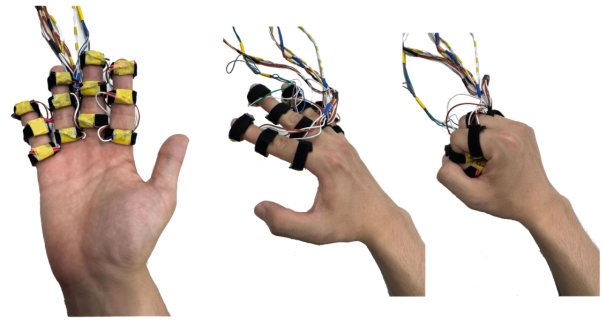


図 3: 多チャンネル触覚フィードバックシステム。手の開閉への支障は少ない。

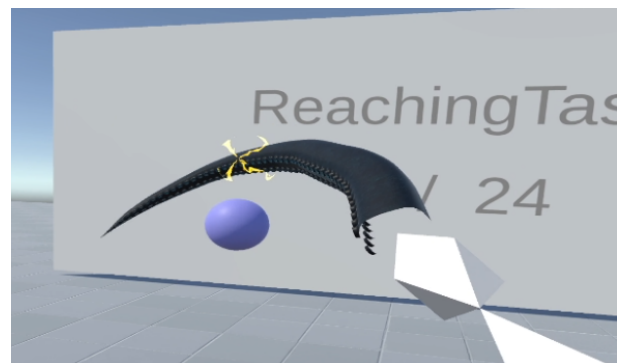


図 4: リーチングシーン。アームの一部に電気のようなエフェクトが提示されており、ユーザーはその部位を用いてボールに触れる。

振れた際に、それぞれに対応する振動子が振動することを想定し、12 個の振動子を用いた。各振動子はマジックテープを用いて各指骨に固定された。使用した振動子は Vybronic 社のリニア振動アクチュエータ VLV041235L-L20 であり、交流 2.5V を印可し周波数 244Hz で振動された。

非相同なアバターからのフィードバックは、操作と同様にマッピングの設計が必要である。最も単純なマッピングは MetaArm[7] のように操作入力部位に対してフィードバックが行われるマッピングであり、感覚-運動の同期が生じるため、学習しやすく身体化感覚 [9] を得やすいと考えられる。一方で、操作入力部位とフィードバック部位が戻ってくる部位を異ならせたマッピングにも、ハンドトラッキング機器との物理的干渉を防ぐことができる、より刺激に対する感度が高い位置でアームの感覚を感じることができるなどの利点が存在する。現段階では前者のマッピングを実現するために指関節に振動刺激を与えるハードウェア構成になっているものの、後者の可能性も含め、幅広い検討が必要である。

## 3. 体験用コンテンツとしてのリーチングシーン

今回開発した多チャンネル触覚フィードバックシステムを用いたコンテンツとして、中空へ浮かんだボールヘリーチングを行う VR シーンを開発した。ユーザーは、アーム

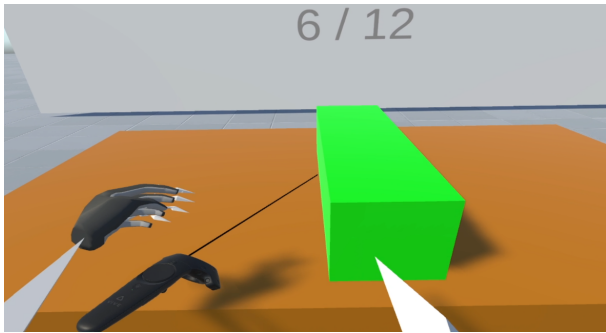


図 5: 刺激位置推定シーン。右手のアバターアームは伸ばされた状態で箱に覆われる。左手に持ったコントローラーから伸びるレイで刺激位置を回答する。

を操作し、空間上に浮遊するボールに接触することを求められた。ボールに接触した際には、アーム上の接触部位と対応付けられた参加者の指骨に対し、振動刺激が提示された。また、リーチング動作中には、アームの特定の部位に視覚的エフェクトが表示されており、その部位でボールに接触した場合、ボールは瞬時に別位置へ移動し、ユーザーには 0.5 秒間の振動刺激が提示された。一方、エフェクトが表示されていない部位でボールに接触した場合、ボールは移動せず、通常の振動刺激のみが該当する指骨に提示された。本シーンを通して、ユーザーはアームへの刺激位置と現実の身体へフィードバックされる刺激位置との対応を学習することができた。

#### 4. 今後の展開

本研究の将来的な展開としては、まず本フィードバックシステムが実現する「触覚的に」空間を探索する能力、およびより良い触覚マッピングの条件を検討することを予定している。このために実装した二つの評価用 VR シーンを説明する。さらに、各指に対する知覚される振動刺激の強度を校正し、よりアームの各部位に与えられた刺激の強さを精確にユーザーに伝えることを目指す。

##### 4.1 刺激位置推定シーン

本シーンは、アームを用いた基礎的な空間知覚能力の評価を目的として実装された。ユーザーはバーチャルな机の上にアームを伸ばし、そのアームに与えられた不可視の刺激の位置を、手指に与えられる振動刺激を手掛かりとして推定し、左手に持ったコントローラーから伸びるレイを用いて回答することが求められた (Fig. 5)。本タスクにおいて、アームを直接的に視認できる状態で、バーチャルなオブジェクトが触れることなしに振動刺激が与えられることは、前段階のリーチングタスクで形成された視覚-触覚の対応関係を壊す可能性があった。そのために、アーム全体を箱で覆い、その内部で刺激が与えられているというシナリオにした。疲労を防ぐために、タスク中、ユーザーの右手は現実の机の上に静置された。

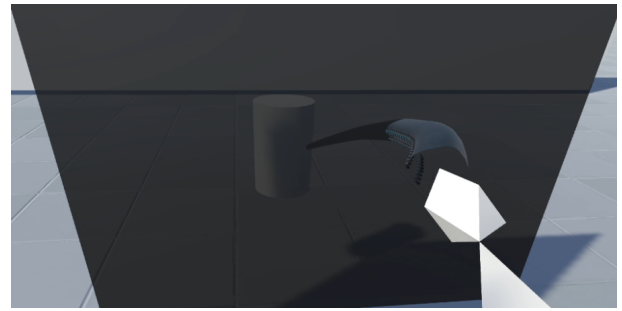


図 6: 物体形状推定シーン。ユーザーは黒幕の後ろにある物体の形状を振動刺激を基に推定する。実際には、黒幕は不透明である。

##### 4.2 物体形状推定シーン

本シーンは、触覚的手掛かりに基づく物体形状知覚能力の評価を目的として実装された。ユーザーは、バーチャル空間上に存在するオブジェクトに対してアームを介して形状の探索を行い、その形状を事前に与えられた候補の中から推定することが求められた (Fig. 6)。提示されるオブジェクトは、球体、立方体、円柱などの基本形状とし、アームの接触部位と連動した振動刺激がユーザーの手指に与えられるよう設計された。タスク遂行中、オブジェクトは視覚的にユーザーから完全に遮蔽されており、ユーザーはアームの動きと、接触中に提示される振動刺激のみを手掛かりとしてオブジェクトの輪郭を探索する必要があった。

##### 4.3 知覚される振動強度の校正

本研究では、理想的にはアームに触れた物体の位置情報に加え、アーム各部位への刺激強度を精確に提示することを最終的な目標としている。この実現には、各指関節上に配置された振動子の物理的な振動強度と、ユーザが知覚する振動強度との対応関係を明らかにする必要がある。先行研究では、Ekman らは 16~64 Hz の低周波数帯において、人差し指と小指の間で小さな VPT (Vibration Perception Threshold) の差が存在することを報告している [10]。これと同様に、本研究で用いる振動周波数・強度においても、各指の知覚特性に差異がある可能性がある。したがって、例えば人差し指の第一関節と小指の第三関節に対応するアーム部位に同一の刺激を提示した場合、同一の物理振動を与えても、知覚される強度が異なりうる。この差異を補正するためには、知覚強度の校正が不可欠である。

さらに予備的検討の結果、指の屈曲状態によっても知覚される振動強度が変化することが確認された。例えば、指を屈曲させた際には中手指節関節の腹側に組織が集まり、知覚される振動刺激強度が減少する傾向が見られた。このため、校正を実施するには、指の 12 関節に対して複数の屈曲状態を考慮した測定が必要となり、膨大な実験量が要求される。

以上の理由から、現段階においては刺激強度の提示は見送り、位置情報の提示に焦点を当てている。今後は、各指・各関節の各屈曲状態における提示振動強度と知覚される振



動強度との対応関係をモデル化し、知覚強度を正確に制御することを目指す。

## 5. おわりに

本研究では、12 関節のタコ腕型アバターアームからの多チャンネル触覚マッピングシステムを開発した。今後の方針としては、今回作成したフィードバック系と評価シーンを用いて、アームに対するより良い触覚マッピングや、触覚を手がかりとする空間探索能力を検討する予定である。また、非相同な身体へ提示された刺激の大きさを正確に感じるための、知覚される振動強度の校正についても取り組む。これを通じて、ヒトが自分と非相同な身体を用いて空間を触覚的に探索するための基礎となる知見を得ることを目指す。

謝辞本研究は、JSPS 科研費 (JP24KJ0955)、JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2292) 及び、公益財団法人セコム科学技術振興財団の支援を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Andrea Stevenson Won, Jeremy Bailenson, Jimmy Lee, and Jaron Lanier. Homuncular Flexibility in Virtual Reality. *Journal of Computer-Mediated Communication*, Vol. 20, No. 3, pp. 241–259, 01 2015.
- [2] Jaron Lanier. Homuncular flexibility. <http://www.edge.org/q2006/q06.print.html#lanier>, 2006. Edge Foundation, Inc.
- [3] William Steptoe, Anthony Steed, and Mel Slater. Human tails: ownership and control of extended humanoid avatars. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 19, No. 4, pp. 583–590, 2013.
- [4] Dong Yong Lee, Yong Hun Cho, and In Kwon Lee. Being them: Presence of using non-human avatars in immersive virtual environment. In Stephen N. Spencer, editor, *Proc. of VRST 2018*. Association for Computing Machinery, November 2018.
- [5] Shuto Takashita, Ken Arai, Hiroto Saito, Michiteru Kitazaki, and Masahiko Inami. Embodied tentacle: Mapping design to control of non-analogous body parts with the human body. In *Proceedings of the 2024 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '24, New York, NY, USA, 2024. Association for Computing Machinery.
- [6] Jonathan Eden, Mario Bräcklein, Jaime Ibáñez, Deren Yusuf Barsakcioglu, Giovanni Di Pino, Dario Farina, Etienne Burdet, and Carsten Mehring. Principles of human movement augmentation and the challenges in making it a reality. *Nature Communications*, Vol. 13, No. 1, p. 1345, 2022.
- [7] MHD Yamen Saraiji, Tomoya Sasaki, Kai Kunze, Kouta Minamizawa, and Masahiko Inami. Metaarms: Body remapping using feet-controlled artificial arms. In *Proc. of UIST 2018*, pp. 65–74, Berlin, Germany, 2018. ACM.
- [8] Mie C. S. Egeberg, Stine L. R. Lind, Sule Serubugo, Denisa Skantarova, and Martin Kraus. Extending the human body in virtual reality: effect of sensory feedback on agency and ownership of virtual wings. In *Proc. of VRIC 2016*, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [9] Konstantina Kilteni, Raphaele Groten, and Mel Slater. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence*, Vol. 21, No. 4, pp. 373–387, 2012.
- [10] L. Ekman, E. Lindholm, E. Brogren, and L. B. Dahlin. Normative values of the vibration perception thresholds at finger pulps and metatarsal heads in healthy adults. *PLoS One*, Vol. 16, No. 4, p. e0249461, 2021.