



投影型手腕拡張インタフェースへの聴覚フィードバックの付与

佐藤優志¹⁾、岩井大輔¹⁾、佐藤宏介¹⁾

1) 大阪大学 大学院基礎工学研究科 (〒 560-8531 大阪府豊中市待兼山町 1-3,
y.sato@sens.sys.es.osaka-u.ac.jp, {daisuke.iwai, sato}@sys.es.osaka-u.ac.jp)

概要: 本研究ではプロジェクタからユーザの手の代替となる CG 手腕を投影する拡張現実インタフェース ExtendedHand において、投影拡張手が実物体に触れた際に触れている物体の材質に応じた音(触音)をユーザに提示することで、触れている物体の触感をユーザに知覚させる手法を提案する。ExtendedHand では、ユーザは投影拡張手で自身の手の届かない遠くの物体に触れる機会があることから、様々なユーザ-物体間距離に対して適切な触音音圧を調査した。結果、ユーザ-物体間の距離に依存せず、45 dB(A) 程の一定音圧で触音を提示することが望ましいことが示唆された。

キーワード: 投影バーチャルハンド、聴覚フィードバック、触音

1. はじめに

超少子高齢化が進捗し労働不足や要介護者数の増加が懸念される現在、人間の身体的能力を拡張させる技術の発展、実用化が待ち望まれている。この技術の一つに、日常生活場面におけるユーザの手の到達範囲の拡張を実現した拡張現実インタフェース ExtendedHand がある [1]。このインタフェースは、ユーザの手の動きを増幅して CG 手腕の動きに反映し、プロジェクタからその CG 手腕を投影する(以後、投影された CG 手腕を投影拡張手と呼ぶ)。これよりユーザは投影拡張手を介して、遠くの物体に対して自身の手のような直観性を持って触れたり指示したりすることが可能となる。

著者らはこの投影拡張手が実物体上に投影された際に拡張手の指先を振動させる等の視覚効果を付与することで、疑似触覚フィードバックにより追加の触覚提示装置の必要無しに物体に触れた感覚をユーザに知覚させる手法を提案している [2]。この研究では視覚効果の触覚提示能力を調査し、物体の物理的特徴に適した種類や変化量の視覚効果を付与することで、視覚効果のみでも様々な物体の触感をユーザに提示できることを確認した。

一方視覚刺激の他にも、聴覚刺激が触覚情報知覚に影響することが知られている。これまでも聴覚刺激によって、実物体の触印象を変調させた研究 [3, 4] や、仮想物体の触覚提示やその触印象を変調した研究 [5] がある。ここで聴覚刺激は、一般に普及している音響機器を用いて容易にユーザに提示可能であることから、ExtendedHand においても活用可能な機会は多いと考えた。

これらを踏まえ、本研究では ExtendedHand においてユーザが投影拡張手で実物体に触れている際に、その物体に適した視覚効果付与に加えて、その物体表面材質に整合した材質音(以後、単に触音と呼ぶ)をイヤフォンやヘッドフォン等でユーザ聴覚に提示するシステムを提案する。ユーザは視覚効果付き投影拡張手の映像と物体に整合した触音

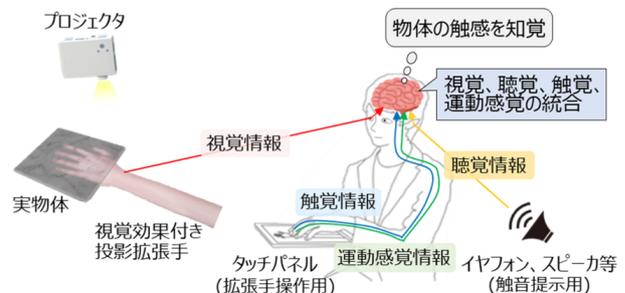


図 1: 投影拡張手物体接触時の視聴覚フィードバックによる物体触覚提示の概要

から、触れている物体の触感をより強く知覚でき、投影拡張手体験のリアリティ向上に繋がることが期待できる。図 1 に提案システムの概要を示す。

ここで ExtendedHand では、ユーザは投影拡張手で様々な距離の物体に触れる場面が存在する。この際、現実の物理現象では音源との距離が遠いほど我々の耳で聴こえる音圧は距離減衰で小さくなる。一方、投影拡張手で物体に触れた際の触音提示において、現実の物理現象と同様の距離減衰則を成立させる必要があるか、拡張現実世界においては自明でないと考えた。これらのことから、本稿ではユーザ-物体間距離によって、提示すべき触音の音圧がどのように変化するかを被験者実験により調査した。

2. ユーザ-物体間距離と触音音圧の関係調査実験

2.1 実験目的

本実験ではユーザが投影拡張手で机上の物体に触れる際に、ユーザからその物体までの距離と提示すべき触音音圧との関係を調査することを目的とする。

2.2 実験条件

本実験の実験環境を図 2 に示す。実験参加者(21-24 歳の 9 名)は椅子に座った状態で、タッチパネルを介して投影拡張手を操作し、机上に置かれた物体に触れる。なお本実

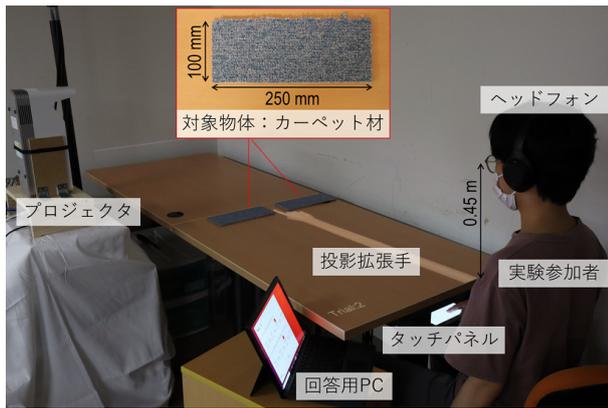


図 2: 実験環境

験では距離と触音音圧間の関係を解明することを目的としているため、投影拡張手への視覚効果付与は行わなかった。

投影拡張手で触れる物体とその触音

投影拡張手で触れる物体として 250 mm×100 mm のタフテッド機カーペット材（東リ社、GA1043）を用いた（図 2）。またカーペットに触れた際の触音として、LMT Haptic Texture Database [6] のうち、第一著者を含めた 3 名の簡易調査で最もカーペットの触音として適していると判断された音データ（G6Towel_Sound_Movement_train1.wav）を使用した。

触音の音圧

本実験では参加者への触音提示にノイズキャンセリング機能付きヘッドフォン（Sony 社、WH-1000XM3）を用いた。この際、触音の音圧 [dB(A)] は、騒音計（サンコー社、RAMA11008）測定部をヘッドフォン音提示部に当てた状態で触音データを再生した際の平均音圧とした。

参加者-物体間の距離

本実験では参加者-物体間の距離を様々に変化させる。この際参加者-物体間の距離は、参加者の眼（両眼中心）と物体中心間の斜距離とした。なお参加者の眼は、机端部で机面上から 0.45 m の高さになる位置で固定した（図 2）。

2.3 実験手順

本実験では参加者は投影拡張手の操作に慣れた後、以下の二つの実験タスクを順次実施した。

シェッフェの一对比較法を用いた実験タスク

参加者はタッチパネルを介して投影拡張手を操作し、机の上に置かれた二つの物体（物体 A、物体 B）にそれぞれ触れた。物体に触れた際はヘッドフォンから 0 dB(A)（触音無し）、48 dB(A)、54 dB(A)、60 dB(A) のうちのいずれかの音圧で触音が再生される。両方の物体に触れた後、参加者は以下の二つの質問に 7 段階（-3：物体 A をとともそう思う-0：同程度+3：物体 B をとともそう思う）で回答した。

質問 1：どちらの方が物体の触感を強く感じますか？

質問 2：どちらの方が投影拡張手で自然に物体に触れていると感じますか？

参加者は 3 段階の距離（0.50 m、1.00 m、2.00 m）のそれぞれに対し、4 段階の音圧（0 dB(A)、48 dB(A)、54 dB(A)、60 dB(A)）の全ての組み合わせ（物体 A、物体 B の順序を考慮する）について 1)、2) のタスクを実施した。すなわち、各参加者は $4P_2 \times 3 = 36$ 回このタスクを実施した。タスクを提示する順番の順序効果の影響を抑制するために、被験者間で調整した。

調整法を用いた実験タスク

参加者は 0.50 m の距離に置かれた物体に投影拡張手で触れた。物体に触れた際、被験者手元の MIDI コントローラのスライド位置に応じた音圧（30 dB(A)–60 dB(A) の範囲）で触音が再生される。参加者は「最も投影拡張手で自然に物体に触れていると感じる音量」となるよう、スライドを介して音圧を調節した。

距離 0.50 m の物体に対して最適な音圧を設定した後、参加者は距離 2.00 m、1.00 m、0.75 m、1.50 m の物体に対しても順次最適な音圧を調節した。この際、既に音圧を設定した物体も机上に設置したままにし、参加者はそれら物体に設定した音圧と比較参照することができた。

2.4 結果

シェッフェの一对比較法の実験結果

シェッフェの一对比較法の結果について、質問および距離ごとに浦の変法 [7] を使用して平均評価値を算出した結果を図 3 に示す。このグラフにおいて正の値が大きいほど参加者は、質問 1 では物体触感を強く知覚し、質問 2 では投影手で自然に物体に触れていたと感じたことを示している。

質問 1 について、距離ごとの結果に対して、音圧の違いを要因として分散分析を実施した結果、全てにおいて主効果は有意であった（0.50 m： $F(3, 69) = 82.3$, $p < 0.01$ 、1.00 m： $F(3, 69) = 81.6$, $p < 0.01$ 、2.00 m： $F(3, 69) = 75.8$, $p < 0.01$ ）。Yardstick 尺度 Y を使用して各音圧間の差の 99%信頼区間を計算したところ 0.50 m： ± 0.56 、1.00 m： ± 0.59 、2.00 m： ± 0.59 であった。これより全ての距離において、[0 dB(A)] と [48 dB(A)、54 dB(A)、60 dB(A)] の間で有意差が認められた。

質問 2 について、距離ごとの結果に対して、音圧の違いを要因として分散分析を実施した結果、全てにおいて主効果は有意であった（0.50 m： $F(3, 69) = 76.9$, $p < 0.01$ 、1.00 m： $F(3, 69) = 105.9$, $p < 0.01$ 、2.00 m： $F(3, 69) = 106.1$, $p < 0.01$ ）。Yardstick 尺度 Y を使用して各音圧間の差の 99%信頼区間を計算したところ 0.50 m： ± 0.54 、1.00 m： ± 0.47 、2.00 m： ± 0.52 であった。これより全ての距離において、[0 dB(A)] と [48 dB(A)、54 dB(A)、60 dB(A)] の間で、[60 dB(A)] と [48 dB(A)、54 dB(A)] の間で有意差が認められた。さらに、距離 0.50 m と 2.00 m においては [54 dB(A)] と [48 dB(A)] の間にも有意差が認められた。

調整法の実験結果

調整法の結果について、距離ごとの選択された音圧の分布を図 4 に示す。距離を要因として分散分析を実施した結果、有意差は認められなかった（ $F(4, 40) = 0.87$, $p > 0.1$ ）。

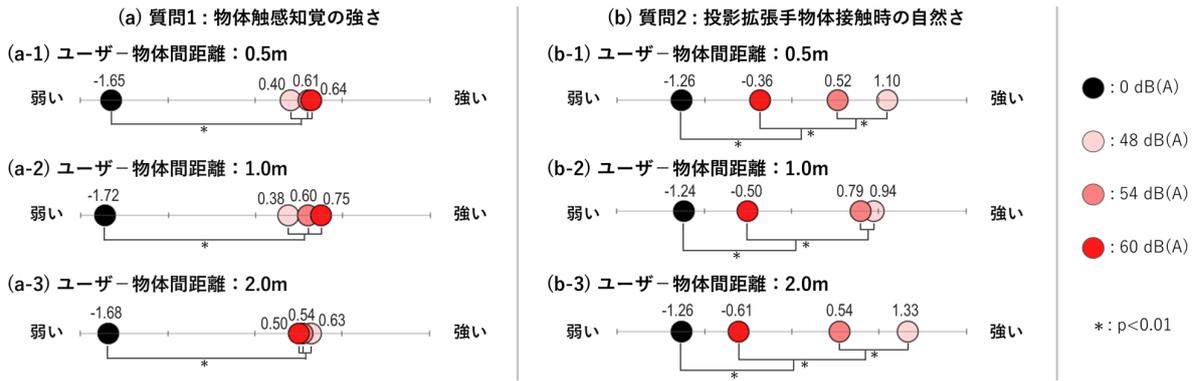


図 3: シェッフェの一対比較法による触覚評価値

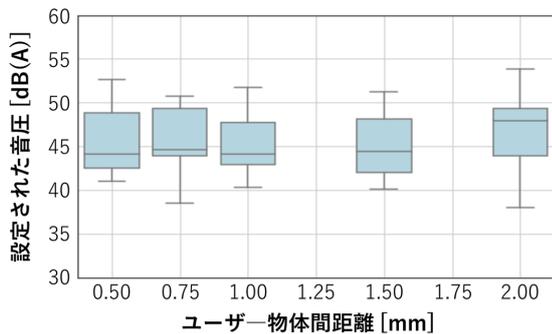


図 4: 最適音圧調整の実験結果

2.5 考察

図 3(a) より、触音を提示することで触音提示がない場合よりも物体の触感知覚を有意に強化可能であることが分かった。一方本実験では全ての距離において、音圧の違いが触感知覚の強さに影響する傾向は見られなかった。この要因として、我々の経験上、自分の手で物体に触れた際に想定していたより大きな音が聞こえたからといって、その物体の触感をより強く知覚しているとは思わないことが考えられる。

投影拡張手で自然に物体に触れている音圧は、図 3(b) および図 4 からわかる通り、距離に依存せず 45 dB(A) 程であった。興味深いことに、現実の物理現象では音源が遠くなるほど耳への音圧は減衰するが、本実験では距離によって適切な音圧が変化する傾向は見られなかった。すなわち投影拡張手で物体に触れる際の触音は現実の物理現象に従う必要はなく、現実では距離が遠いために音が聞こえない場合に対しても、ユーザに聞こえる音圧で触音を提示することが望ましいと考えられる。ただし本実験では触音提示にヘッドフォンを使用していたため、実験参加者は、物体の位置から触音が鳴っているのではなく、ヘッドフォンから触音が再生されていると感じたと申告していた。実際の物体の位置から触音を音響出力する場合に、本実験と同様の結果が得られるかは未解明である。

3. おわりに

本稿では投影拡張手の実物体接触時に物体材質に整合した触音を提示することで、自然に物体の触感をユーザに提示す

る手法を提案した。そして、ユーザと投影拡張手の触れている物体までの距離と、提示すべき触音音圧との関係を被験者実験により調査した。その結果、触音をヘッドフォンから提示する際は、ユーザ-物体間の距離に依存せず 45 dB(A) 程の音圧で触音を提示することが望ましいことが示唆された。

今後は、著者らがこれまで提案してきた投影拡張手への視覚効果付与による物体触感提示手法と、本触音提示を組み合わせた際の相互効果を調査する。

謝辞 本研究は大阪大学フェロウシップ創設事業の補助によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] 岡原浩平, 小川修平, 新明拓也, 岩井大輔, 佐藤宏介. 身体拡張型インタフェースのための前腕の投影表現に関する基礎検討. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 19, No. 3, pp. 349-355, 2014.
- [2] Yushi Sato, Takefumi Hiraki, Naruki Tanabe, Haruka Matsukura, Daisuke Iwai, and Kosuke Sato. Modifying texture perception with pseudo-haptic feedback for a projected virtual hand interface. *IEEE Access*, Vol. 8, pp. 120473-120488, 2020.
- [3] Steve Guest, Caroline Catmur, Donna Lloyd, and Charles Spence. Audiotactile interactions in roughness perception. *Experimental Brain Research*, Vol. 146, No. 2, pp. 161-171, 2002.
- [4] 鍵本麻美, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行. 複合現実型視覚刺激と聴覚刺激が触印象に与える影響: 産業応用システムでの利用を想定した評価. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 14, No. 3, pp. 325-333, 2009.
- [5] 中島武三志, 植井康介, 飯田隆太郎. MR 環境下での疑似接触音が触感錯覚に与える影響. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 25, No. 2, pp. 127-137, 2020.
- [6] Matti Strese and Eckehard Steinbach. Toward high-fidelity haptic interaction with virtual materials: A robotic material scanning, modelling, and display system. In *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 247-254, 2018.
- [7] 浦昭二. 1 対比較実験の解析. 品質管理, Vol. 10, No. 2, pp. 78-80, 1959.