

MR環境における接触音の音量が触感に及ぼす影響

植井 康介¹ 飯田 隆太郎¹ 中島 武三志² 菅野 由弘³

概要: ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着した人工現実感 (VR) / 複合現実感 (MR) 環境における体性感覚提示手法として、感覚間の相互作用 (クロスモダリティ) による錯覚が応用されている。この手法は、身体に外部装置を装着する形で実際に体性感覚を提示する必要がないため、手間や負担の少ない手法として期待されている。一方、MR 環境下で仮想物体に触れた際に得られる錯覚は微弱であり、個人差があるなど、未だ改善の余地が残されている。擬似的に得られる触感をより強める手段として、筆者らは触覚との共起性が高いモダリティである聴覚への刺激提示に着目してきた。本稿では、MR 環境下で2種類の異なる大きさ・形状の仮想物体に対して、手のひらに接触した際に提示される擬似接触音の音量が触感に及ぼす影響について検証した。その結果、触感強化に有効な音量には個人差が大きい、触感が大きく感じられる音量を決定づける要因として、(1) 視覚刺激によって得られる物体の解釈、大きさおよび速度に対する、擬似接触音の音量の尤もらしさ、(2) 擬似接触音の大きさが重さや速度の大きさ、知覚される触感の大きさとして関連づけられる度合いの二つが関与していることが示唆された。

1. はじめに

ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着した人工現実感 (VR) / 複合現実感 (MR) 環境における体性感覚提示手法として、感覚間の相互作用 (クロスモダリティ) による錯覚が応用されている。このような錯覚自体は、以前よりシャルパンティエ効果 [1] やラバーハンド錯覚 [2], Pseudo-haptics [3] (スードハプティクス, 擬似触覚) などとして知られていたが、近年では比較的安価な HMD の普及に伴い、視覚刺激を変形して HMD 上に表示することで擬似的に体性感覚を生み出したり、変化させようとする研究が一層活発に行われている。

このようなクロスモーダル錯覚による体性感覚提示手法は、身体に外部装置を装着する形で実際に体性感覚を提示する必要がない。そのため、MR 環境においては装置が視野に映り込み、コンテンツに影響を及ぼす心配がない上、VR 環境においても外部装置を用意し、装着する手間や負担の少ない手法として期待されている。

MR 環境においては、実世界環境に重畳表示された仮想物体とのインタラクションが核となる。MR 環境下で仮想物体に触れた際の触覚提示について、盛川らは光学シースルー型 HMD を用いて身体と仮想物体が接触するように表現することで微弱な触感 (微触感錯覚) が生じることを報

告している [4]。一方で、この錯覚は微弱であり、個人差によって十分に感覚が提示できないなど、未だ改善の余地が残されている。

擬似的に得られる触感をより強める手段として、筆者らは触覚との共起性が高いモダリティである聴覚に作用する刺激に着目してきた。人間が対象物体に触れたり動かすなどの身体動作に伴って、多くの場合で物体が振動し、音が伝播する。したがって、触覚と聴覚の両感覚刺激はしばしば同時に知覚され、ひとつの現象として統合される。人間はこのような触覚と聴覚の共起性を実世界との相互作用から学習し、記憶として蓄積しており、それがクロスモーダル知覚を引き起こす重要な手がかりとなり得る。

本研究は、MR 環境下で仮想物体に触れる際、擬似的に知覚される触感の強化に有効な聴覚刺激提示手法の解明を目的とする。これまでに筆者らは、手のひらの上で仮想の立方体を転がす際に擬似的な接触音を付加すると、得られる触感錯覚が強化されることを報告している [5]。一方、視覚刺激として提示される仮想物体と、擬似接触音の音色・音量の組み合わせによっては体験者に違和感を与えることも判明した。これは、視覚刺激によって得られる物体の解釈、大きさおよび速度に対する、接触音の経験的な尤もらしさが影響していると考えられる。そこで本稿では、2種類の異なる大きさ・形状の仮想物体に対して、手のひらに接触した際に提示される擬似接触音の音量が触感に及ぼす影響について検証する。

次章以降では、はじめに本研究と関連の深い研究事例を

¹ 早稲田大学大学院基幹理工学研究科

² 東京工芸大学芸術学部インタラクティブメディア学科

³ 早稲田大学基幹理工学部表現工学科

挙げながら、本研究の位置付けを示す。その後、擬似接触音の音量と知覚される触感の関係を明らかにする目的で行われた2種類の実験について述べる。さらに、得られた実験結果から、仮想物体の大きさ・形状と、触感強化に有効な音量との関係性について考察し、結論を述べる。

2. 関連研究

本章ではまず、本研究と関連の深い研究事例について整理する。具体的には、ディスプレイと外部インタフェースによるGUI環境やHMDを用いたVR/MR環境といった提示環境による分類、視覚刺激や聴覚刺激といった錯覚を引き起こす元となる刺激による分類、深部感覚や皮膚感覚といった錯覚として生じる体性感覚による分類、実物体を把持する際に得られる体性感覚を錯覚によって変化させたり、実際には何も触れていない状況で体性感覚を生じせるといった、実物体に対する体性感覚の有無による分類を行う。そして、これらを踏まえた本研究の位置付けを示す。

2.1 GUI環境下での擬似触覚提示

外部インタフェースを操作し、その操作が反映されるオブジェクトをディスプレイに表示する環境で生じる様々な擬似触覚が報告されている。その例としてまず挙げられるのが、ピストン型入力デバイスを押した際にディスプレイ上のピストンの動作量を低減させることで反力を提示する手法[6]である。

また、マウスカーソルで触れる対象の状態に応じてカーソルの形状、動き、サイズを変化させることで、実際に触っているような感覚を再現する手法[7]は、特殊な外部インタフェースでなくても一般的なマウスで様々な手触りを再現できる点が特徴である。

2.2 VR/MR環境下での擬似触覚提示

HMDを用いたVR環境においては、体験者の身体を表すCGオブジェクトのサイズや形状、動きなどを変化させることで様々な擬似触覚が生じることが分かっている。その例として、体験者の腕と連動して動くアバタの関節角度を変化させることで抵抗感を提示する手法が提案されている[8]。

ビデオスルー型HMDを用いたMR環境下では、映像内に表示される体験者の手や腕の動きを変形させることで擬似触覚が得られることが示されている。Puschらは、CGで表されたチューブ内に流体が流れており、そのチューブ内に手を入れる際に映像内の手の位置を変動させることで、流体による抵抗感が再現できることを示している[9]。

2.3 聴覚刺激による触知覚への影響

視覚刺激だけでなく、聴覚刺激を元にして錯覚を引き起

こそうとする研究もある。聴覚刺激による触知覚への影響を明らかにする研究として、PHANToMと呼ばれる触覚提示装置を利用して仮想的な表面を叩くと同時に、様々な衝突音を提示して認識される物理的剛性について調査したもの[10]や、聴覚刺激が触覚的な粗さ判断に及ぼす影響を検討したもの[11]が挙げられる。

MR環境における研究例としては、触知する実物体とは異なる粗さのMR型視覚刺激に聴覚刺激を付加して提示した場合に、より触印象へ影響を及ぼすかどうかについて検討したもの[12]が挙げられる。これらの研究では、触覚提示装置や実物体によって実際に触覚を提示した際に聴覚刺激を付加した場合の知覚変化を検証している。

2.4 深部感覚と皮膚感覚の提示

提示される体性感覚は深部感覚と皮膚感覚に分けられる。重さや硬さ、抵抗感といった感覚は深部感覚に分類でき、深部感覚に刺激を与えるものは力覚ディスプレイと呼ばれる。一方、手触りや粗さといった感覚は皮膚感覚に分類でき、皮膚感覚に刺激を与えるものは(狭義の)触覚ディスプレイと呼ばれる[13]。

体性感覚の分類によっても研究アプローチは異なっている。これまでに紹介した研究事例の中では、身体動作を反映する視覚刺激の動作量を変動させることで深部感覚に影響を与える研究が多く見られる。一方、聴覚刺激を利用した研究には、皮膚感覚の提示を目的としたものが比較的多く見られる。

2.5 実物体に触れていない状況下での触覚提示

これまでに紹介した研究事例は、外部インタフェースやARマーカなど、実物体を把持している際に得られる体性感覚を錯覚によって変化させるものと、実際には何も触れていない状態で錯覚を生み出すものにも分類できる。中でも、何も触れていない状態で皮膚感覚の錯覚を生み出そうとする研究は比較的少ないが、先述の[4]がその代表例である。

2.6 本研究の位置付け

ここまでクロスモーダル錯覚を応用したいくつかの体性感覚提示手法を概観し、分類を行った。これらを踏まえると、本研究は、

- (1) HMDを装着したMR環境において、
- (2) 実物体に触れていない状況下で、
- (3) 仮想物体に触れる際に感じられる微かな触感を、
- (4) 聴覚刺激の付加によって高めようとする点を特徴としている。

3. 実験方法

本章では、聴覚刺激の音圧レベルによる擬似的な触感の

大きさについて検討するために行った実験の詳細を述べる。なお体験動作として、実生活においてあまり過去に経験のない動作を用いた実験1と、経験した動作に近い動作の実験2の2種類を用意し比較した。

3.1 実験概要

実験1では、ビデオスルー型HMD上に表示される仮想の立方体（以下、仮想キューブ）を左右の手のひらで転がす動作に、手と仮想キューブの擬似接触音の大きさを変化させることによる擬似的な触感の変化に着目して実験を行った。本実験で行った動作の様子を図1に示す。定量的評価のため、擬似接触音を付加しない場合の体験行為を標準刺激として定めた。

実験2では、実験1と同様の実験をビデオスルー型HMD上に表示される仮想の球体（以下、仮想スフィア）を片手で弾く動作に体験動作を変更して行った。本実験で行った動作の様子を図2に示す。実験2においても標準刺激は擬似接触音を付加しない場合の行為とした。

なお、これらの実験は東京工芸大学研究倫理委員会の承認を得て行われた。



図1 実験1の動作

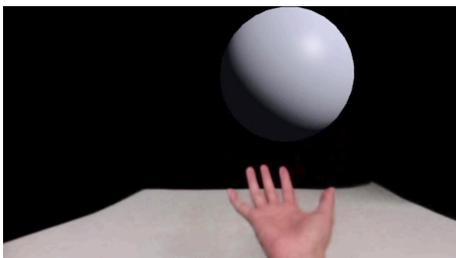


図2 実験2の動作

3.2 実験参加者

実験は20歳から25歳までの男女11人の参加者に対して行った。また、事前に参加者に対して実験1と実験2共に練習を行った。実験1は仮想キューブを手のひらで往復3回、実験2は仮想スフィアを片手で3回弾けるようになるまでそれぞれ行った。

3.3 実験環境

使用したシステムの構成は図3の通りである。参加者は暗幕で3方を囲われたブースの中、MR環境下で実験を行った。コンピュータは暗幕の外に設置し、参加者からこれが見えない環境で実施した。

視覚刺激の提示はHMD（Vive Pro, HTC）を用いて、前面部に搭載されたデュアルカメラを用いて両眼視差を利用した立体映像を表示した。聴覚刺激の提示はオープン型Bluetoothイヤホン（Xperia Ear Duo XEA20, SONY）を用いた。手の動きの認識はハンドトラッキングデバイス（Leap Motion, Leap Motion）を用いて、HMD前面部に取り付けた。視覚及び聴覚刺激の出力はコンピュータ（NEXTGEAR-NOTE i5730BA3-SP, NVIDIA GeForce GTX 1070, MouseComputer）を用いた。

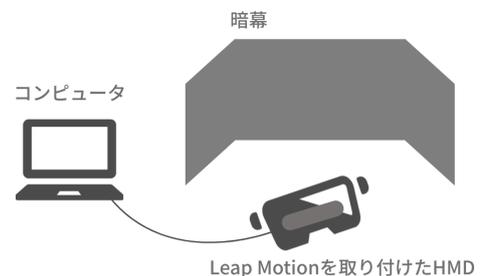


図3 実験環境

3.4 提示刺激

3.4.1 視覚刺激

実験1では、視覚刺激としてMR空間上で仮想キューブを提示した。提示した仮想キューブの寸法は1辺3cmとした。

実験2では、視覚刺激としてMR空間上で仮想スフィアを提示した。提示した仮想スフィアの寸法は半径15cmとした。

なお、視覚刺激の製作にはUnityを用いた。また、Unity環境でHMDの制御を行うために、UnityにSteamVRプラグインを導入した。

3.4.2 聴覚刺激

擬似接触音として、実験1では、コルクを抜いたような音（「ボンツ01」、『OtoLogic』*1）を用いた。この音のパワースペクトルを図4に示す。窓関数にはハニング窓を使用した。

実験2では、ボールを弾くような音（「サッカーボールが跳ねる1」、『効果音ラボ』*2）を用いた。この音のパワースペクトルを図5に示す。窓関数にはハニング窓を使用した。

聴感上の違和感を取り除くために、実験1と実験2共に

*1 <https://otologic.jp/free/se/onmtp-others01.html>

*2 <https://soundeffect-lab.info/sound/various/various3.html>

聴覚刺激は再生速度 0.97~1.0 倍でランダムに変化させ提示した。

本稿では、聴覚刺激の音圧レベルの変化を実験条件として検討するため、予備調査としてコンピュータから出力した音をイヤフォン越しに騒音計 (RION NL-32) を用いて測定した。本実験では単発的な音を用いたため、単発騒音暴露レベル (LAE) を測定した。測定は同じ音量を 3 回ずつ行い、その平均を算出した。結果を表 1 に示す。また、測定時の部屋の暗騒音は A 特性音圧レベルで 19.2db であった。

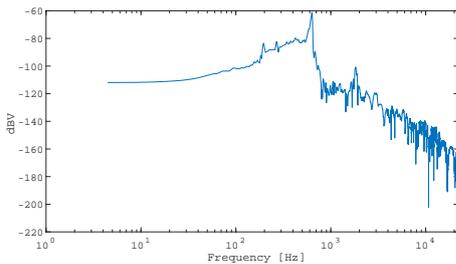


図 4 実験 1 聴覚刺激のパワースペクトル

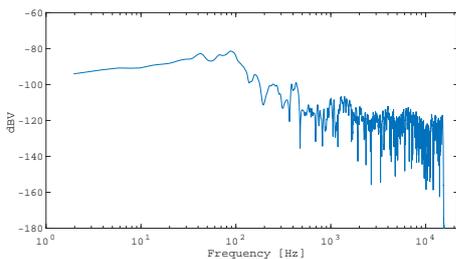


図 5 実験 2 聴覚刺激のパワースペクトル

3.5 実験条件と手続き

3.5.1 実験条件

実験条件として、音量 50db を実験条件の最大の値とし、そこから約 6db 間隔で下げていった 5 つの音量を条件とした。実験 1 では、条件 1 は約 26.7db, 条件 2 は約 32.1db, 条件 3 は約 38.1db, 条件 4 は約 44.1db, 条件 5 は約 50.1db であった。実験 2 では、条件 1 は約 27.2db, 条件 2 は約 32.8db, 条件 3 は約 38.6db, 条件 4 は約 43.5db, 条件 5 は約 49.4db であった。また、「視覚刺激のみ提示」を標準刺激とし、練習は実験 1 と実験 2 共に条件 3 の音量で行った。

3.5.2 手続き

参加者には実験の目的や取得するデータについての説明と、実験の流れについての説明を行った。実験刺激の提示に先立って HMD の装着感の確認をした。次に、条件 3 において仮想物体を正常に触ることができるかを確認した上で、音が正常にイヤフォンから聞こえているかどうかを確認

した。

実験順序について、比較のために標準刺激で体験させた後に実験条件を提示した。これを 1 セットとして、5 つの実験条件の計 5 セットを行った。なお、実験条件の提示順序はランダムにした。各セット終了後、一度 HMD をはずさせ ME 法 (magnitude estimation method) による評価を行った。標準刺激を 100 として、「触ったような感覚の大きさはいくつですか?」という質問に回答させた。質問の提示には刺激提示で用いたコンピュータとは別の回答用コンピュータ (Macbook Air (13-inch, Early2015), Apple) を用いた。

また、全てのセットでの評価後、「音量の差で感じる感覚はどのように違ったか」、「手に感じる感覚はどのようなものか」、「提示した聴覚刺激についてどう思ったか」といった内容についてインタビューを実施し、自由回答させた。

4. 実験結果

本章では前章で述べた、仮想キューブを転がす動作について検討した実験 1 と、仮想スフィアを片手で弾く動作について検討した実験 2 について、評価実験と実施したインタビューで得られた結果を示す。

4.1 実験 1

実験 1 で得られた評価値の平均値を図 6 に示す。図 6 において、エラーバーは標準誤差を表す。図 6 から音量と知覚される触感の関係は、平均値の値からは単調増加傾向であったが、標準誤差を考慮するとどの音量においても触感への影響は同程度であった。

実験時に行ったインタビューについて、「音量の差で感じる感覚はどのように違ったか」という質問に対しては、「小さい音量がよかった」「大きいほうがよかった」「音量差による違いあまり感じず、体験する順序が影響してそう」といった意見が得られた。

「手に感じる感覚はどのようなものか」という質問については、「大きい音だと硬めに感じた」「大きいほうがやや重さを感じた」「質感、存在感を感じた」「音が大きいと衝撃を感じる」といった意見が得られた。

「提示した聴覚刺激についてどう思ったか」という質問については、「ポコポコしていてかわいい」「ちょうどいい」といった意見が得られた。

4.2 実験 2

実験 2 で得られた評価値の平均値を図 7 に示す。図 7 において、エラーバーは標準誤差を表す。図 7 から参加者が触ったような感覚を大きく感じる音量は、音量 2 と音量 5 に大別された。

実験時に行ったインタビューについて、「音量の差で感じる感覚はどのように違ったか」という質問に対しては、「音

表 1 聴覚刺激の単発騒音暴露レベル

音量	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
刺激 1	26.7	29.6	29.7	32.2	35.5	35.4	38.1	41.1	44.1	47.2	47.1	50.1	52.7	55.7	56.0	59.1	62.1	62.1	65.1	67.5
刺激 2	-	-	21.1	22.7	24.7	24.5	27.2	29.9	32.8	35.5	35.9	38.6	40.5	43.5	43.5	46.4	49.4	49.4	52.2	55.2

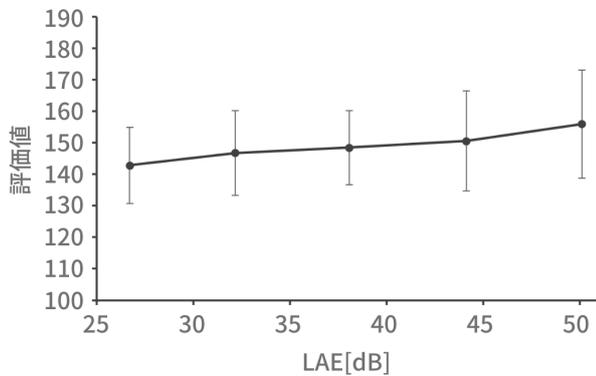


図 6 実験 1：評価値の平均値

が大きいほうが弾ませてる感じ強い」「小さい方が強かった」「音量差が顕著だとわかりやすい」といった意見が得られた。

「手に感じる感覚はどのようなものか」という質問については、「ボールを弾ませている感覚」「硬いものをバウンドさせている感じ」「ふわっとした感じ」「やわらかいものを触ってる感じ」「風船を弾いてるようだ」「スライムをトスしているような感覚」といった意見が得られた。

「提示した聴覚刺激についてどう思ったか」という質問については、「小学校とかで使うボールの感じ」「音量が大きいとき音の後ろに高音で金属音のような音が鳴っていて気になった」「音が大きいときカチツという音に違和感があった」といった意見が得られた。

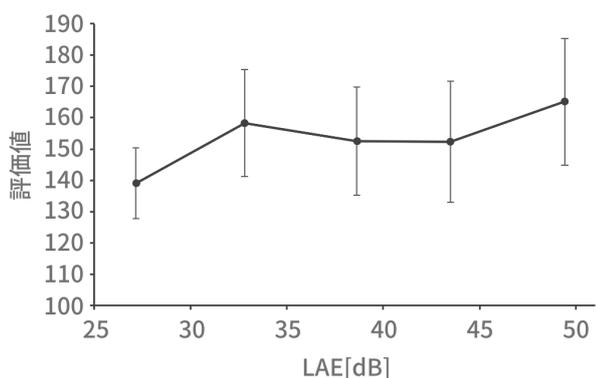


図 7 実験 2：評価値の平均値

5. 考察

本稿で行った実験について、擬似接触音の音量と知覚される触感の関係と、誇張された音量による触感の違和感の 2つの観点から考察する。

5.1 擬似接触音の音量と知覚される触感の関係

各実験の結果から触感強化に有効な音量には個人差が大きいと分かった。

実験 1 におけるインタビューの結果から、一部の参加者は音量が大きくなると重みや硬さを感じたと話しており、参加者は擬似接触音の大きさと仮想キューブの重さを関連づけて感じとっていたと考えられる。

また、実験 2 におけるインタビューの結果について、「手に感じる感覚はどのようなものか」という質問の回答から、仮想スフィアに対する解釈として、「風船」「スライム」のように「柔らかい、ふわっとした」解釈と、「ボール」のように「硬い、重い」解釈の 2通りがあったと言える。

実験 1、実験 2 とも共通していた個人差の要因として、

- (1) 経験優位な要因として、視覚刺激によって得られる物体の解釈、大きさおよび速度に対する、擬似接触音の経験的な尤もらしさ
- (2) 聴覚優位な要因として、擬似接触音の大きさが重さや速度の大きさ、知覚される触感の大きさとして関連づけられる度合い

これら 2つの要因を統合して触感の大きさが評価されたと推測できる。

実験 1 において、仮想キューブに対して行う動作は実生活において過去に経験していた動作ではなかった。そのため、(1)の影響よりも実験時に与えられる感覚刺激に比重が置かれ、(2)の影響が大きかったと考えられる。実験 2 において、インタビューでは実際に物体への解釈が話されていたことから (1)の経験優位な要因に比重が置かれていた可能性がある。ここで、仮想スフィアの解釈と擬似接触音の関係について「柔らかい、ふわっとした」という解釈では音量が小さい方に尤もらしさを感じ、「硬い、重い」という解釈では音量が大きい方に尤もらしさを感じるとすると、「柔らかい、ふわっとした」という解釈では音量 2 が、「硬い、重い」という解釈では音量 5 が経験的に尤もらしい擬似接触音であったと考えられる。よって本稿の実験においては個人差の要因の比重として、仮想キューブでは要因 (2) が大きく、仮想スフィアでは要因 (1) が大きかったと推測される。

また、体験する順序が影響するとインタビューで答えた参加者がいたことから、実験の経過に伴って (1) と (2) の重みづけに変化があった可能性がある。参加者は仮想物体に対して明確な解釈が先にあるわけではなく、感覚刺激に対して解釈が変化し、(1)の尤もらしさに変化があったと考えられる。

5.2 誇張された音量による触感の違和感

著者らの以前の報告 [5] では「不自然に音量が誇張された聴覚刺激は違和感を与える可能性」が報告されていた。

本稿の実験におけるインタビュー結果において、仮想キューブ、仮想スフィアともに音量が大きい方がいい、小さい方がいいという個人差は存在していた。また、仮想キューブを扱った実験 1 では違和感を訴える参加者はなく、仮想スフィアの実験 2 では音量 5 で違和感を訴える参加者が 2 名だった。

仮想キューブについて、以前の実験から今回の実験 1 を行うにあたり、体験の質を向上させるための変更点として、聴覚刺激の提示の仕方をスピーカからイヤホンへの変更、聴覚刺激として提示した接触音をメラミンスポンジを叩いた音からコルクを抜いたような音への変更の 2 点を行っていた。仮想キューブについては音量が大きい方が「硬さ、重さ」が感じられるという報告があったものの違和感までには至らなかった。物体への解釈が曖昧であったために違和感には繋がらなかったと考えられる。

2 名の参加者が音量 5 で違和感を訴えていた実験 2 について、仮想スフィアの擬似接触音はほぼ全周波数帯域にエネルギーが分布しているが、周波数が上がるにつれて緩やかに減少する傾向がパワースペクトル (図 5) より読み取れる。したがって擬似接触音の音量が大きくなると、それまでは気にならなかった高周波数帯域が十分聞こえるようになり、「カチツ」と「金属音」といった印象が生まれ、風船のようだと物体を解釈し「柔らかい、ふわっとした」感触に感じられていた人にとっては音量 5 のときの高周波が違和感につながったと推測される。

以上を踏まえると、物体への明確な解釈とのズレ、すなわち個人が経験的に尤もらしいと思う接触音と実際に与えられた聴覚刺激の乖離が違和感の要因になる可能性が考えられる。

6. おわりに

本研究は、MR 環境下で 2 種類の異なる大きさ・形状の仮想物体が手のひらに接触した際に提示される擬似接触音の音量が触感に及ぼす影響について検証した。その結果、触感が大きく感じられる音量を決定づける要因として、(1) 視覚刺激によって得られる物体の解釈、大きさおよび速度に対する、擬似接触音の音量の尤もらしさ、(2) 擬似接触音の大きさが重さや速度の大きさ、知覚される触感の大きさとして関連づけられる度合いの二つが関与していることが示唆された。これらの要因が触感の大きさ判断に与える影響については個人差が大きい、過去の経験と結びつきにくい体験の場合、経験的な尤もらしさによる判断が難しく、(2) の聴覚優位な要因が比較的重視される傾向が推察された。また、個人が経験的に尤もらしいと思う接触音と、実際に与えられた聴覚刺激に乖離があると違和感が生じる

ことが推察された。今後は、擬似接触音によって生じる触感の大きさを決定づける要因として、経験優位な要因と聴覚優位な要因それぞれの影響の詳細な分析を行うことが課題である。

謝辞 本研究は JSPS 科研費若手研究 18K18095 の助成を受けた。

参考文献

- [1] Charpentier, A.: Analyse expérimentale: De quelques éléments de la sensation de poids.[Experimental analysis: On some of the elements of sensations of weight], *Archives de Physiologie Normale et Pathologique*, Vol. 3, pp. 122–135 (1891).
- [2] Botvinick, M. and Cohen, J.: Rubber hands ‘feel’ touch that eyes see, *Nature*, Vol. 391, No. 6669, p. 756 (1998).
- [3] Pusch, A. and Lécuyer, A.: Pseudo-haptics: from the theoretical foundations to practical system design guidelines, *Proceedings of the 13th international conference on multimodal interfaces*, ACM, pp. 57–64 (2011).
- [4] 盛川浩志, 飯野瞳, 金相賢, 河合隆史: シースルー型 HMD を用いた微触感錯覚の呈示と評価 (<特集> クロスモーダル/マルチモーダル), *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 18, No. 2, pp. 151–159 (2013).
- [5] 植井康介, 中島武三志, 菅野由弘: 聴覚刺激による MR 環境下での擬似触覚の強化, *インタラクシオン 2019 予稿集*, 情報処理学会, pp. 725–729 (2019).
- [6] Lecuyer, A., Coquillart, S., Kheddar, A., Richard, P. and Coiffet, P.: Pseudo-haptic feedback: can isometric input devices simulate force feedback?, *Proceedings IEEE Virtual Reality 2000 (Cat. No. 00CB37048)*, IEEE, pp. 83–90 (2000).
- [7] Watanabe, K. and Yasumura, M.: VisualHaptics: Generating haptic sensation using only visual cues, *Proceedings of the 2008 International Conference on Advances in Computer Entertainment Technology*, ACM, pp. 405–405 (2008).
- [8] 茂山丈太郎, 小川奈美, 鳴海拓志, 谷川智洋, 廣瀬通孝: アバタの関節角補正による疑似抵抗感提示, *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 22, No. 3, pp. 369–378 (2017).
- [9] Pusch, A., Martin, O. and Coquillart, S.: Hemp-hand-displacement-based pseudo-haptics: a study of a force field application, *2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces*, IEEE, pp. 59–66 (2008).
- [10] DiFranco, D. E., Beauregard, G. L. and Srinivasan, M. A.: Effect of auditory cues on the haptic perception of stiffness in virtual environments, *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, Vol. 61, pp. 17–22 (1997).
- [11] Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D. and Spence, C.: Audiotactile interactions in roughness perception, *Experimental Brain Research*, Vol. 146, No. 2, pp. 161–171 (2002).
- [12] 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).
- [13] 岩田洋夫: 体性感覚呈示技術, *バイオメカニズム学会誌*, Vol. 31, No. 2, pp. 78–81 (2007).