

# VR環境下における接触音の周波数特性が 擬似触力覚に与える影響

植井 康介<sup>1</sup> 中島 武三志<sup>2</sup>

**概要:** ヘッドマウントディスプレイ (HMD) を装着した人工/複合現実感環境 (VR/MR) 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。このようなクロスモーダル錯覚による体性感覚提示手法は、外部装置を装着する負担の少ない手法として期待されている。中でも、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を用いることで、この錯覚をより強めようとする手法が検証されている。本稿では、この擬似触力覚をより効果的に高める聴覚刺激を解明するため、接触音の周波数特性に着目した。具体的には、仮想の流体に手を入れる動作に対し手の表面に感じる擬似触覚と手や腕に受ける擬似力覚の観点から検証した。その結果、波数帯域に比べて低周波数帯域の音量が相対的に大きいほど「体から手や腕に感じる抵抗感」は大きくなると示された。また、実験結果を踏まえ、様々な流体と触れるインタラクションをテーマとしたコンテンツ制作への応用例を検討した。

## 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 VR 環境においては、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。

VR 環境における仮想物体とのインタラクションでは、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 [4]。また、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を用いることで、擬似触

覚をより強めようとする手法が検証されている。白井らは仮想のバネを手で伸縮させる際に、伸縮度に応じて音高の変化する聴覚刺激が擬似力覚の強度へ与える影響を検証している [5]。中島らは擬似接触音を提示すると触感は大きく感じられるが、音量による感じ方の違いは個人差が大きいこと、また触感の印象は視覚刺激によって判断される仮想物体の強度や尖鋭性が、聴覚刺激によって変化することを報告している [6]。

ここで筆者らは音の要素の一つである周波数に着目する。音には大きさ、周波数、音色の3要素があり周波数特性は触感への印象変化の影響を検証する上で重要な指標である。中島らの検証では、聴覚刺激によって触感の印象を変化させられることが分かった一方で、聴覚刺激における印象の変化を生む周波数帯域まで踏み込まれておらず、議論の余地が残されている。擬似触覚に影響を与える聴覚刺激の周波数特性を解明することで、与えられる擬似触覚がより大きくなることが期待できる。

本稿では擬似接触音の周波数特性が擬似触力覚に与える影響を検証する。具体的には、仮想の流体に手を入れる動作に対し手の表面に感じる擬似触覚と手や腕に受ける擬似力覚の観点から検証する。

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、擬似接触音の周波数特性が擬似触力覚に及ぼす影響を明らかにする目的で行われた実験について述べる。さらに、得られた実験結果から、擬似接触音の周波数特性が擬似触力覚に与え

<sup>1</sup> 早稲田大学基幹理工学研究科

<sup>2</sup> 東京工芸大学芸術学部

る影響について考察する。その後、実験結果を踏まえたインタラクティブコンテンツとしての応用例を提案したのち、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させるといった、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、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 [7] がある。

### 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、先述の茂山らの研究 [4] がある。これは手先の位置を平行にずらすのではなく、手首と肘の関節角をずらすことで、実際の身体運動と見かけ上の身体運動とのずれを大きくしても違和感を生じさせず、より大きな疑似力覚を提示できる点が特徴である。

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 [8]。

### 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 [9] 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 [10] 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 [11] 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。一方、機械装置や実物体による体性感覚が得られない状態で聴覚刺激による錯覚を生み出すものとして、先述の白井らの研究 [5] がある。

### 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 [12]。

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、盛川らは光学スルー型 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 [13]。

### 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 VR 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擬似触力覚を、
- (4) より効果的に高める聴覚刺激の周波数特性の解明を特徴としている。

## 3. 実験方法

本章では、HMD を装着した VR 環境下で仮想流体に触れる際、接触音の周波数特性が下記の擬似触力覚に及ぼす影響について検証した実験の詳細を述べる。

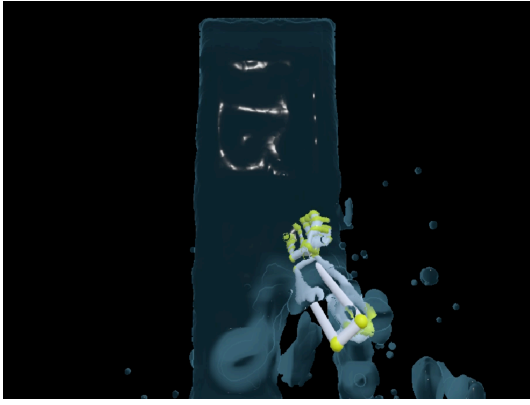


図 1 流体内で手を動かす様子

- (1) 流体から手や腕に受ける擬似力覚の大きさ
- (2) 流体から手の表面に受ける擬似触覚の大きさ

### 3.1 実験概要

実験では、HMD 上に表示される仮想の流体に手で触れながら動かす動作時に聴覚刺激を提示した。標準刺激と比較刺激を交互に提示し、相対的な力覚、触覚の大きさを ME 法 (magnitude estimation method) で評価させた。その後、得られた触覚に関するインタビューを行った。実験参加者はホワイトノイズに 4 種類の異なるフィルタ処理を施した聴覚刺激が提示された。実験参加者は図 1 に示すように上から下へ落ちる仮想流体に右手を入れ、上下に動かす動作を行った。実験は 20 代の男女 5 名の参加者に対して行った。これらの実験は東京工芸大学研究倫理委員会の承認を経て行われた。

### 3.2 実験装置

実験装置は図 2 のとおりである。参加者は防音室内に設置された椅子に座り、肘を台の上に固定させた。

視覚及び聴覚刺激の出力はラップトップコンピュータ (NEXTGEAR-NOTE i5730BA3-SP, NVIDIA GeForce GTX 1070, MouseComputer) を用いた。仮想流体と、手や腕を表すオブジェクト (以下、腕オブジェクト) は HMD (Vive Pro, HTC) を用いて表示した。接触音はコンピュータに接続されたオーディオインターフェイス (MBox Mini, Avid Technology) を介して 2 台のスピーカ (MSP7 STUDIO, YAMAHA) から再生された。これらのスピーカは図 2 に示すとおり実験参加者に対して正面に設置された。手や腕の動きの認識は HMD 前面部に取り付けたハンドトラッキングデバイス (Leap Motion, Leap Motion) を用いた。

### 3.3 提示刺激

視覚刺激として、視界上方から下方へ落ちる仮想の流体を用意した。視覚刺激による擬似触力覚を提示するため、



図 2 実験装置の概略図

腕オブジェクトが仮想流体に触れる際、実際の腕の動きに遅れて反応するような動きと、上下に小刻みに振れる動きを意図して腕オブジェクトの座標を変化させた。腕オブジェクトの座標変換は、(1)(2)(3) 式に示すとおりである。

$$x'_t = \frac{x_t}{10} + \frac{9x'_{t-1}}{10} \quad (1)$$

$$y'_t = \begin{cases} \frac{y_t}{10} + \frac{9(y'_{t-1} - r_{t-1})}{10} + r_t & (v_y > 0) \\ y_t + r_t & (v_y \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

$$z'_t = \frac{z_t}{10} + \frac{9z'_{t-1}}{10} \quad (3)$$

ここで、 $x_t, y_t, z_t$  は現フレームにおける変換前の座標を表す。 $x'_{t-1}, y'_{t-1}, z'_{t-1}$  は前フレーム、 $x'_t, y'_t, z'_t$  は現フレームにおける変換後の座標、 $v_y$  は腕オブジェクトの速度の  $y$  成分を表す。 $r_t, r_{t-1}$  はそれぞれ、現フレームと前フレームにおける  $-0.02 \sim 0.02$  m の乱数である。なお、流体は  $y$  軸の負の方向に運動しているため、0 または負の方向に腕を運動させる際の座標変換は行わず、 $v_y$  が正の場合にのみ腕オブジェクトの  $y$  座標を変換することとした。視覚刺激としての VR コンテンツ制作には Unity\*1 を用いた。仮想流体の実装にはパーティクルベースの流体シミュレーションを行う NVIDIA Flex\*2 の Unity プラグインを用いた。

聴覚刺激として、ホワイトノイズにフィルタ処理を施した音を用いた。フィルタには LPF (ローパスフィルタ) または HPF (ハイパスフィルタ) を用いた。聴覚刺激の生成には Pure Data\*3 を用いた。聴覚刺激は仮想流体と腕オブジェクトの接触時に定期的に再生された。再生時の騒音レベル ( $L_A$ ) は、十分に大きい音量で提示することを意図し、全ての条件で 70 dB に設定された。

### 3.4 実験条件

聴覚刺激として、標準刺激と 4 種類の異なる周波数特性

\*1 <https://unity.com/ja>

\*2 <https://developer.nvidia.com/flex>

\*3 <https://puredata.info/>

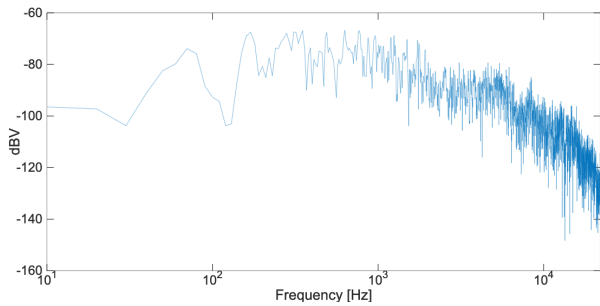


図 3 LPF 1.2 kHz 条件のパワースペクトル

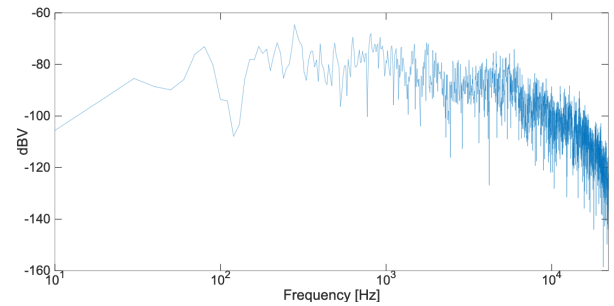


図 4 LPF 2.4 kHz 条件のパワースペクトル

を持つ比較刺激を用意した。標準刺激にはホワイトノイズを用いた。比較刺激にはホワイトノイズに以下のパラメータでフィルタ処理を施した音を用いた。

- (1) LPF (カットオフ周波数 1.2 kHz)
- (2) LPF (カットオフ周波数 2.4 kHz)
- (3) HPF (カットオフ周波数 1.2 kHz)
- (4) HPF (カットオフ周波数 2.4 kHz)

本実験では、聴覚刺激そのものが持つ印象が結果を大きく左右すると考えられる。Solomon は軍艦、小船舶等の音の持つ音色因子を抽出し、各因子に対する評価値とオクターブバンドレベルの対応関係を検討している(岩宮ら [14] による引用。原典は [15])。これによると、150~300 Hz, 300~600 Hz, 600~1200 Hz の帯域のレベルが高いと heavy な(重い)音色、2400~4800 Hz, 4800~9600 Hz の帯域のレベルが高いと light な(軽い)音色になる。これを踏まえ、上記の条件はそれぞれ「重い」印象を与える周波数帯域 (LPF 1.2 kHz), 「軽い」印象を与える周波数帯域外 (LPF 2.4 kHz), 「重い」印象を与える周波数帯域外 (HPF 1.2 kHz), 「軽い」印象を与える周波数帯域 (HPF 2.4 kHz) を想定して設定された。

実際の実験環境で集音した各条件のパワースペクトルを図 3, 4, 5, 6 に示す。集音にはコンデンサマイク (NT5, RODE), オーディオインタフェース (UltraLite mk3 Hybrid, MOTU), ラップトップコンピュータ (Macbook Pro 2019, Apple), 録音編集ソフトウェア (Pro Tools 11, Avid Technology) を使用した。集音されたデータのうち 0.1 秒間のみ抽出し、FFT 解析に使用した。FFT の窓関数にはハニング窓を使用した。

### 3.5 実験手続き

参加者には予め実験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。その後、実験参加者の動作を一定にするために事前練習を行った。練習ではまず、仮想流体に対する動作を記録した動画を視聴させた。その後、動画と同じ動作を行うよう教示し、流体の中で一定の動きができるようになるまで練習を行った。練習時の聴覚刺激は標準刺激として用意したホワイトノイズ

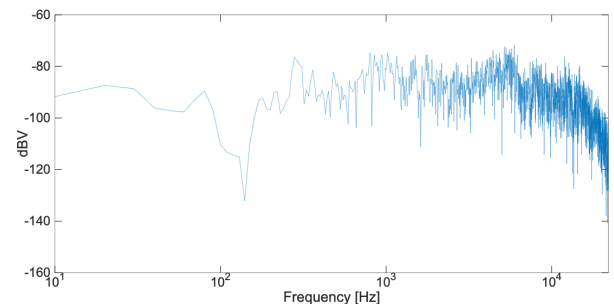


図 5 HPF 1.2 kHz 条件のパワースペクトル

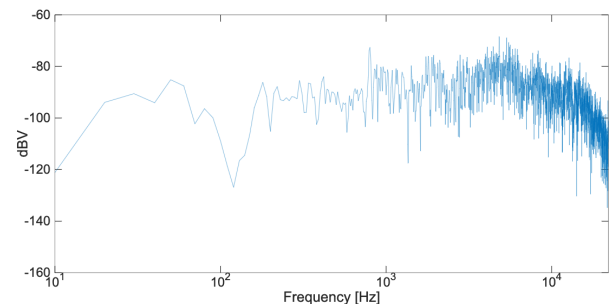


図 6 HPF 2.4 kHz 条件のパワースペクトル

を提示して行った。

実験では、標準刺激を提示した後に比較刺激を提示した。これを 1 セットとして、4 条件に対し 3 セットずつの計 12 セットを行った。比較刺激の提示順序はランダムにした。各セット終了後、一度 HMD を外させ ME 法による評価を行った。具体的には、標準刺激を 100 とした場合の、比較刺激における「流体から手や腕に受ける抵抗感」「流体が手の表面に当たったような感覚」の大きさを数値で回答させた。

全てのセットでの評価後、「体験中、どのような感覚を感じましたか」「条件によって感覚の質が変化しましたか」「変化した場合、それはどのような変化でしたか」という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、接触音の周波数特性が擬似触力覚に与える影響を検証した実験の結果について述べる。

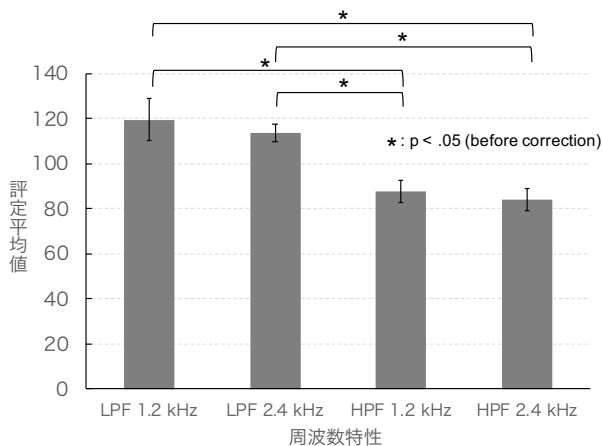


図 7 「手や腕に感じる抵抗感」の評定平均値

#### 4.1 接触音の周波数特性と擬似力覚の関係

周波数特性の異なる各条件における「流体から手や腕に感じる抵抗感」の大きさに関して、合計 15 の回答データが得られた（参加者 5 名×3 回分）。これらのデータに対して対応のない 1 要因分散分析を行った結果、周波数特性の主効果が有意であった ( $F(3, 56) = 8.64, p < .05$ )。さらに、各水準間の差についてテューキーの HSD 法による多重比較を行ったところ、LPF 1.2 kHz 条件と HPF 1.2 kHz 条件、LPF 1.2 kHz 条件と HPF 2.4 kHz 条件、LPF 2.4 kHz 条件と HPF 1.2 kHz 条件、LPF 2.4 kHz 条件と HPF 2.4 kHz 条件との間に有意差があった ( $p < .05$ , 補正前)。

図 7 は、各実験条件における「流体から手や腕に感じる抵抗感」の大きさの評定平均値と標準誤差である。図 7 から、「流体から手や腕に感じる抵抗感」は HPF 1.2 kHz 条件、HPF 2.4 kHz 条件に比べて LPF 1.2 kHz 条件、LPF 2.4 kHz 条件の方が大きかったことが読み取れる。

#### 4.2 接触音の周波数特性と擬似触覚の関係

周波数特性の異なる各条件における「流体が手の表面に当たったような感覚」の大きさに関して、合計 15 の回答データが得られた（参加者 5 名×3 回分）。これらのデータに対して対応のない 1 要因分散分析を行った結果、周波数特性の主効果は有意ではなかった ( $F(3, 56) = 1.08, p > .05$ )。

図 8 は、各実験条件における「流体が手の表面に当たったような感覚」の大きさの評定平均値と標準誤差である。図 8 から、「流体が手の表面に当たったような感覚」の大きさにはわずかな差は見られるものの、全体として大きな差はなかったことが読み取れる。

#### 4.3 体験時の感覚に関するインタビュー結果

実験後に実施したインタビューでの主な回答を以下にまとめる。「体験中、どのような感覚を感じましたか」という質問に対しては、「映像があって抵抗感を感じた」「抵抗

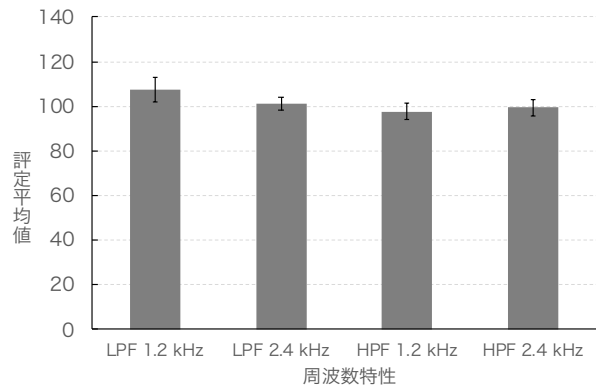


図 8 「手の表面に当たったような感覚」の評定平均値

感は少し遅れるから抵抗を感じた」「手のひらには感じなかった」「手のひらに当たってるのは付けてる感覚」といった意見が得られた。

「条件によって感覚の質が変化しましたか」「変化した場合、それはどのような変化でしたか」という質問に対しては、「軽い音のときは水量が少ない」「水の質感が変わった」「重さは変わった」といった回答が得られた。一方、「明確な違いはなかった」と言った回答も得られた。

## 5. 考察

本章では、接触音の周波数特性が擬似触力覚に与える影響を検証した実験結果について考察する。

実験結果より、接触音の周波数特性は「体から手や腕に感じる抵抗感」の大きさに影響を及ぼすことが分かった。特に、高周波数帯域に比べて低周波数帯域の音量が相対的に大きいほど「体から手や腕に感じる抵抗感」は大きくなると考えられる。参加者からのインタビュー結果からは、各条件において水の重さの違いを感じていたことが読みとれ、聴覚刺激が与える重さの印象が「体から手や腕に感じる抵抗感」の知覚に影響を及ぼしたと推察できる。

接触音の周波数特性が「手の表面に当たったような感覚」の大きさに及ぼす影響に関しては、実験結果から読みとれなかった。今回、腕オブジェクトが仮想流体に触れた際に上下に小刻みに振動する効果をつけて擬似触覚の提示を図ったが、この方法では十分に擬似触覚を提示できなかった可能性が高い。視覚刺激で十分に擬似触覚が得られなかったため、聴覚刺激を変化させても感覚に大きな変化はなかったと考えられる。

以上より、視覚刺激によって擬似力覚を提示でき、聴覚刺激の周波数特性によって変化することが分かった。一方、擬似触覚は視覚刺激による提示が不十分であり、聴覚刺激を変化させても大きな変化はなかった。今後は視覚刺激による擬似触覚の提示手法について、より詳細な検討を重ねる必要がある。また、本実験の参加者は 5 名であったが、擬似触力覚の知覚は個人差が大きい。そのため、実験結果

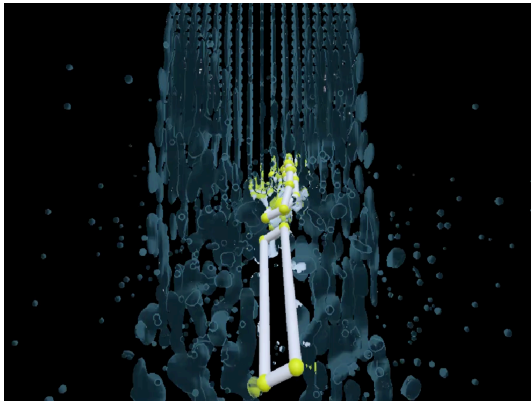


図 9 流体の一例（シャワー）

の信頼性には議論の余地がある。より多くの参加者からデータを集め、信頼性を向上させる必要があると言える。

## 6. インタラクティブコンテンツへの応用

本章では実験結果を踏まえ、様々な流体と触れるインタラクティブコンテンツ制作への応用例を検討する。

本実験より、HMD による VR 環境のもとで仮想流体に手を触れる際、接触音の低周波数帯域の音量が相対的に大きいほど知覚される力覚が大きくなる結果が得られた。この結果をもとに、映像として提示される仮想流体の形状や動きだけでなく、音響的観点も考慮した多彩な力覚提示の可能性について検討する余地がある。そこで筆者らは、知覚される力覚の異なる様々な仮想流体に手を触れながら自身の感覚に意識を集中させることで、没入感が得られるインタラクティブコンテンツ（作品名「電脳瀑布」）としての応用を着想した。

この作品では、時間経過に伴って流体の速度、流出口の面積、粒子の密度、大きさの異なる映像が提示され、映像に合わせた音が再生される。図 9 は、提示される流体の一例（シャワー）である。体験者が、このように様々な形状・動きに変化する流体に触れながら、感覚の違いを楽しむことを意図している。

表示される腕オブジェクトは流体に応じて異なるパラメータで座標変換を行い、異なった感覚を提示する。音に関しては、リアリティを重視して実際に収録された滝やシャワーの音が使用され、実験結果をもとにイコライジングが行われている。

## 7. おわりに

本稿では、仮想の流体に手で触れながら動かす動作に対し、接触音の周波数特性が擬似触力覚に与える影響を検証した。その結果、周波数帯域に比べて低周波数帯域の音量が相対的に大きいほど「体から手や腕に感じる抵抗感」は大きくなると示された。またこの結果をもとに知覚される

力覚の異なる様々な仮想流体に手を触れながら自身の感覚に意識を集中させることで、没入感が得られるインタラクティブコンテンツへの応用例を提案した。

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] 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).
- [5] 白井 亮人, 中島 武三志, 菅野 由弘: 視覚及び聴覚刺激によるバネの擬似力覚呈示, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 4, pp. 271-279 (2018)
- [6] 中島 武三志, 植井 康介, 飯田 隆太郎: MR 環境下での擬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, pp127-137 (2020).
- [7] 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).
- [8] Pusch, A., Martin, O. and Coquillart, S.: Haptic displacement-based pseudo-haptics: a study of a force field application, 2008 IEEE Symposium on 3D User Interfaces, IEEE, pp. 59-66 (2008).
- [9] DiFranco, D. E., Beaugard, 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).
- [10] Guest, S., Catmur, C., Lloyd, D. and Spence, C.: Audio-tactile interactions in roughness perception, Experimental Brain Research, Vol. 146, No. 2, pp. 161-171 (2002).
- [11] 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).
- [12] 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).
- [13] 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).
- [14] 岩宮真一郎 他: 音色の感性学: 音色・音質の評価と創造, コロナ社 (2010).
- [15] Solomon L. N.: *Semantic Approach to the Perception of Complex Sounds, and Reserch for Physical Correlates to Psychological Dimensions of Sounds*, The journal of the Acoustical Society of America, 30, pp.421-497 (1958).