

手の骨格推定を用いた視覚と音声のクロスモーダル効果による疑似触覚コンテンツ

近藤圭^{†1} 望月茂徳^{†1}

概要：本研究では映像と音声を用いて擬似的な触感を提示するコンテンツを、エンターテインメントメディアとして表現する方法について検討を行った。特に、物理的な触覚デバイスを用いることなく、映像と音声を用いて触感を生起させる疑似触覚（Pseudo-haptics）に着目した。体験者の手の骨格推定に基づいたインタラクティブな映像と音声の生成により、触感を生起させる新しい表現の可能性を探る。

1. はじめに

VR, AR, HCI 研究の領域において、デジタル技術を用いた触覚を提示する技術の検討が進められている。その方法として大きく 2 種類の触覚提示技術が検討されている。一つはスマートフォンにおける触覚フィードバック [1] や Synesthesia X1-2.44 [2] など、モーターや振動アクチュエータを用いて人体に直接、物理的な触覚刺激を与えるという方法がある。もう一つは、疑似触覚（Pseudo-haptics）と呼ばれる、人体と物体の直接的接触ではなく複数の感覚統合を通じた錯覚に起因する触覚提示技術がある。

後者の疑似触覚（以下 Pseudo-haptics）において、そのメリットはアクチュエータのような複雑な装置を使用せず、手軽で低コストであることが挙げられ、またその応用領域は提示される触感が現実のものと同値である必要のない領域、例えばエンターテインメントや補助アプリにおいて期待されている [3]。「自己の身体運動などのユーザ入力を反映する視覚刺激が操作されることで疑似的な触覚が感じられる現象」 [3] としての Pseudo-haptics を中心に、関連研究について紹介する。宇治土公 (2023) によると、Pseudo-haptics として報告される現象では主に摩擦感、重さ感、柔らかさ感の提示が可能であることがわかっている [3]。その具体的な例として、摩擦感提示について、渡邊恵太の『VisualHaptics』 [4] は、マウスカーソルをユーザ入力とし、そのカーソルが画面内の画像上を動く際に通常のマウスの動きと比べて特殊な挙動を起こす。例えば、カーソルが扇風機の画像の前を動く際は風に吹かれるようカーソルがゆらゆらと振動し、ガムテープの画像上を動く際はカーソルが飛び飛びに動く。重さ感提示について、NTT イリュージョンフォーラム『視覚フィードバック遅れによる抵抗感』 [5] は、マウスで入力した動きが即座にはなく、数百ミリ秒程度の遅れを伴って実行されることで、カーソルの代わりである UFO のイラストの動きに抵抗感を感じるというものである。また宇治土公ら (2017) の『Yubi-Toko』 [6] は、カーソルではなく背景を動かすことで Pseudo-haptics による抵抗感を生起させていることから、Pseudo-haptics のエンターテインメント応用可能性の幅が窺える。

また、Pseudo-haptics は多感覚統合によるものであるため、視覚のみならず聴覚刺激による触感の生起も検討したい [7]。中島武三志 (2021) の『電脳瀑布』 [8] は Pseudo-haptics を用いた VR コンテンツであり、周波数帯域の違いにより抵抗感の量的変化をもたらしている。他にも、身体拡張と自己所有感について、小川ら (2019) の『えくす手』 [9] では、画面内に映る体験者のバーチャルハンドの変容について研究している。

以上を踏まえて本作品では、映像と音声によるクロスモーダル環境の中で Pseudo-haptics を生起させる体験型コンテンツの可能性を探ることを目的とする。そのうえで、いくつかの映像や音声からどのような触感が生起されるか、制作者による実験的な提起と体験者の受容について考察を行う。

2. 作品『触感シンフォニー』について

2.1 作品概要

本作品は、体験者が中身の見えない箱の中で手を動かすことで画面の中の手も動き、それが画面内の物体と音声的なインタラクションを発生させることで、疑似的に触覚を感じてもらうことを目的とした作品である。箱の中に雲が流れているという想定のもと、体験者は何らかの物体に触れることなく作品を体験する。この作品の全体構成は以下の図 1 で示しており、センサー部分、映像処理部分、映像提示部分、音声提示部分から構成される。

図 1 中の①はセンサー部分であり、赤外線深度カメラ (Leap Motion Controller) を用いて手の骨格推定を行う。図 1 中の②は映像処理部分であり、手の座標情報をもとに映像をリアルタイム生成し、体験者用のモニターへ送る。図 1 中の③は映像提示部分であり、PC で生成された映像が体験者に提示される。図 1 中の④は音声提示部分であり、体験者はヘッドホンを着用し音声を聴取する。

また、ハードウェアの工夫として、体験者自らの手と画面内の手のズレが認識されることで Pseudo-haptics の効果

が弱まること[10]から、目隠しのパーツを設置した。箱は黒色の型紙を用いて制作し、センサーの入っている箱の内部が外から見えない状態になっている。

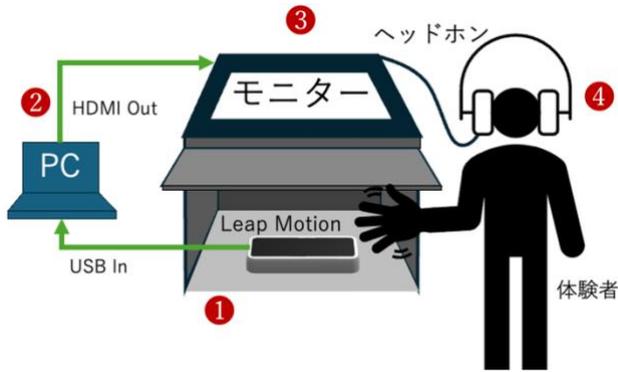


図 1 作品の全体構成図

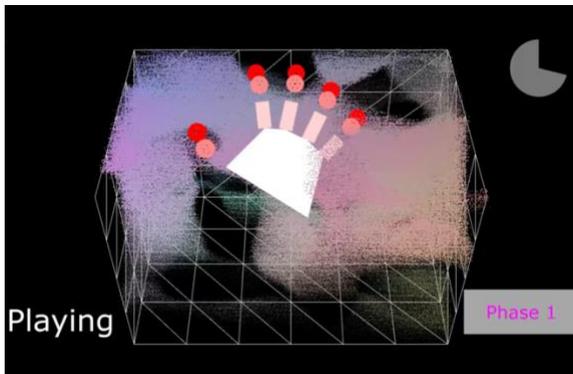


図 2 体験画面のキャプチャ

2.2 体験概要

体験者は図 1 における箱の中に、手前の穴の空いた面から手を入れ、上部の画面を見て、ヘッドホンから流れる音を聞く。映像について、モニターに画面の中に手の形を模した図形が表示され、Leap Motion の骨格推定に基づいて体験者の手と同様に位置と形が変化する。そこに、大量の粒子が雲の形をかたどって流れる映像が表示される。音声について、画面の中の手のそれぞれの指先が雲の粒子の中に接触した際に音が発生する。同時に指先の動きにも、実際の体験者の指の動きとは違う変化がもたらされる。

体験には 4 つの段階（以下 Phase 1~4）があり、順番に体験する。

指先の動きと音声について説明する。まず、映像における指先の動きと触感について、制作者が仮説を設定し、図 3、図 4 に見られるような動きが体験できるものとした。すなわち、変化 1 では、粒子に触れたような触感としてつぶつぶ感やザラザラ感を感じさせると想定し、指先の動きとして雲の中に指を入れると指先が小刻みに震えることとした。変化 2 では、摩擦のような触感として伸び感や粘り感を感じさせると想定し、指先の動きとして、指先が他の手指から遅れて追従することとした。

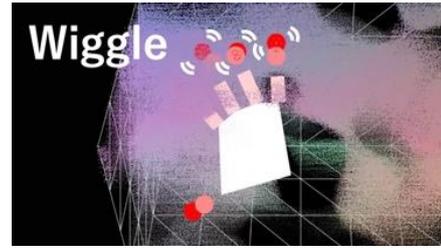


図 3 変化 1 のイメージ図



図 4 変化 2 のイメージ図

次に、音声についても制作者が仮説を設定した。すなわち、前述のつぶつぶ感、ザラザラ感を感じさせると想定した音源 1 と伸び感、粘り感を感じさせると想定した音源 2 を用意した。

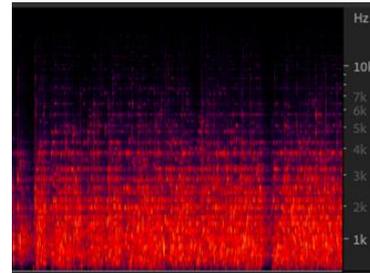


図 5 音源 1 の 30 秒間のスペクトル図

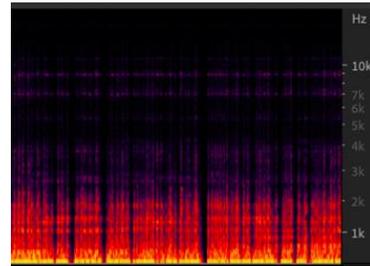


図 6 音源 2 の 30 秒間のスペクトル図

Phase1 から Phase4 では指先の動きの変化と音声の組み合わせがそれぞれ違っており、その組み合わせは表 1 の通りである。

これらの映像と音声について、体験者は同時に受容することになる。その際、どのような組み合わせにおいて異なる触感が生起されるか、本研究ではアンケートをもとに考察を行う。

表 1 映像と音声の組み合わせ

映像と音の組み合わせ	音源 1	音源 2
変化 1	Phase1	Phase2
変化 2	Phase3	Phase4

なお、制作時の仮説では、Phase1 では、つぶつぶ感、ザラザラ感が伸び感、粘り感より顕著に強く感じられると推測した。反対に Phase 4 では、伸び感、粘り感がつぶつぶ感、ザラザラ感より顕著に強く感じられると推測した。Phase2, Phase3 について、それら二つの触感の差は Phase 1, Phase 4 の場合よりも小さく感じられると推測した。つぶつぶ感、ザラザラ感と伸び感、粘り感のどちらが強く感じられるかは、視覚情報と聴覚情報のどちらが信頼できる情報として体験者に提示されるかによって変化すると推測した。

3. 考察

大学内において本作品の展示を行い、43 件の体験アンケートを実施した。Phase ごとに感じた粒子感覚（つぶつぶ・ザラザラ感）、摩擦感覚（伸び・粘り感）の主観的な強さについて、5 段階評価の平均、歪度、標準偏差をまとめる。

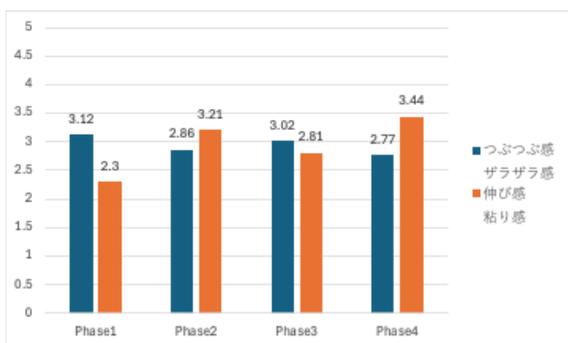


図 7 平均

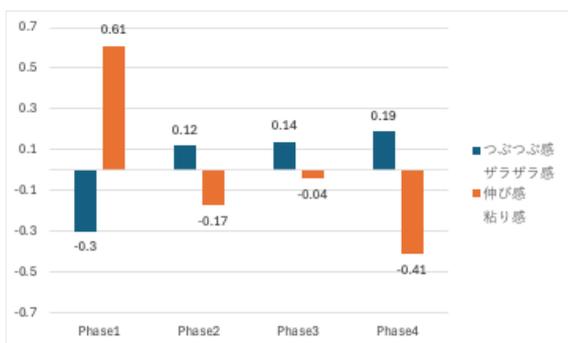


図 8 歪度

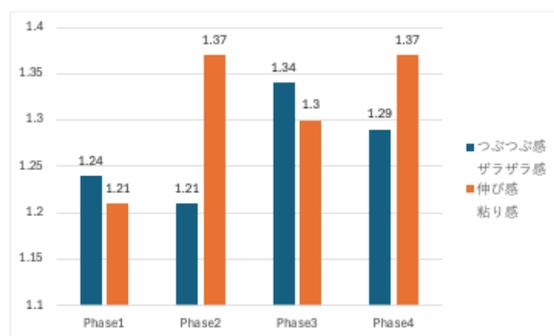


図 9 標準偏差

以上を踏まえ、擬似触覚の特性としての個人差、および、触感ごとの分析、Phase ごとの分析についての考察を行った。

まず、擬似触覚の特性としての個人差について述べる。それぞれの Phase の平均と標準偏差について、その相関係数は 0.71 と強い相関関係が見られた。このことから、弱く感じられた感覚については個人差は小さかったが、強く感じられた感覚については個人差が大きかった。擬似触覚の知覚には個人差があることが知られており、今回もその傾向が見られたことが推測される。

次に、触感ごとの分析の考察について述べる。平均を見ると、つぶつぶ感、ザラザラ感において Phase1 が最も強く感じられた。また、伸び感、粘り感において、Phase4 が最も強く感じられた。このことは予想通りの結果となり、制作者の意図通りの触感を再現できたと言える。

Phase ごとの分析としては、それぞれの平均に関して、Phase 1 と Phase 4 では、それぞれつぶつぶ感、ザラザラ感と伸び感、粘り感の平均点の差は 0.82, 0.67, Phase 2 と Phase 3 では 0.35, 0.21 であった。このことから、Phase 1 と Phase 4 は Phase 2, Phase 3 と比べてはっきりと触感が判別されたと考えられる。Phase 2 と Phase 3 に関して、Phase 2 では伸び感、粘り感、Phase 3 ではつぶつぶ感、ザラザラ感が若干強く感じられた。つまり、触感が映像よりも音声に影響されたと言える。また Phase3 において、他の Phase では平均と歪度は比例した動きを見せている（平均点が高ければ、ヒストグラムの山も高得点側に傾いている）。しかし Phase 3 においてはそれらと逆の傾向を示している。このことから、体験者間で触感の二極化が起きていることが推測される。

Phase 2 と Phase 3 における音声の優位性について、今回の作品では、指先が雲に触れた際に指先が雲の中に埋もれてしまい、音声情報に対して視覚情報が低下してしまうことがわかった。よって、統合された結果としての触感は、より信頼度の高い音声情報による影響が強くなったことが推測される。前述の先行研究[4][5][6]では 2D レンダリングによって Pseudo-haptics を生起させているため視認性に大きな低下は発生しないが、今回の作品のような 3D レンダ

リングではオブジェクトの重なり合いによる視認性の低下が発生する可能性が十分ある。アート・エンターテインメント領域では映像の表現力は重要であり、3D レンダリングが取り入れられる場合も想定されるため、視認性の低下は大きな課題となるだろう。

また、この特性を表現に活かすならば、視覚的に見えない領域の操作を音声情報に頼るという方法が考えられる。例えば、あるオブジェクトの奥に存在する隠れたオブジェクトに触れる操作を行う場合、まず映像と音声で触感の提示を行い、次に音声のみを手がかりにオブジェクトの奥に存在する隠れたオブジェクトに触れるタスクを実行することが考えられる。他にも、作品に具体的なストーリーを設定したり、複数の感覚情報のうちからどれを提示するかを切り替えたり、具体的な作品のデザインで体験者の感覚情報に対する信頼度を補強することで、より柔軟な触感提示ができることが推測される。

今回の作品における課題と今後の研究を述べる。操作インターフェースについて、体験者アンケートや実際の様子から、一部の体験者は手を十分に操作できなかったことが挙げられた。この原因として、Leap Motion の追従が外れてしまったことと、手のアニメーションモデルが簡素であったことが推測される。それぞれの改善について、一つ目に関して、Leap Motion の安定的な骨格分析に向けて改善したい。設置方法の再検討や、複数のセンサー、MediaPipe などの画像認識ライブラリを用いた複数の推定による精度向上を目指したい。二つ目に関して、単純な図形の組み合わせではなく、実際の人の手に近い見た目の 3D モデルを利用することが挙げられる。再度視認性について述べるが、手が雲の中に突入した際に、雲の中に埋もれてしまい指の動きが確認することが難しかったことが挙げられる。よって今後は、雲の透明度、粒子の間隔などの視覚的要素において検討の余地があることがわかった。

4. まとめ

本研究では、クロスモーダル現象である Pseudo-haptics において、音声のみならず効果を検証することを目的に体験型作品を制作した。その結果、制作者の経験則に基づいて映像と音声を提示した場合、制作者の意図に近い触感が認識される傾向がわかった。また、経験則と異なる映像刺激と音声刺激の組み合わせが提示された場合、触感は音声に影響される可能性が示唆された。その原因として 3D レンダリング環境特有の視認性の低下が考えられることから、それぞれの感覚刺激の提示方法についてさらなる検証が必要であると同時に、このことをアート・エンターテインメント領域における柔軟な触感提示の切り口になりうると思える。

参考文献

- [1] Apple Developer 「触覚フィードバックの提供」, <https://developer.apple.com/jp/design/human-interface-guidelines/playing-haptics> (2024 年 12 月 10 日確認)
- [2] Synesthesia Lab 「Synesthesia X1 - 2.44」, <https://synesthesialab.com/x/> (2024 年 12 月 10 日確認)
- [3] 宇治土公 雄介, 『視覚刺激の操作に基づく疑似的な触覚提示—Pseudo-haptics の事例と性質—』, 基礎心理学研究, 42 巻, 1 号, p. 159-167, 2023
- [4] Keita Watanabe, Michiaki Yasumura. VisualHaptics: Generating Haptic Sensation Using Only Visual Cues, ACE2008, Proceedings of the International Conference on ACE2008, pp405, December 2008
- [5] NTT イリュージョンフォーラム 『視覚フィードバック遅れによる抵抗感』, <https://illusion-forum.ilab.ntt.co.jp/multisense-delayed-feedback/index.html> (2024 年 12 月 10 日確認)
- [6] 宇治土公 雄介 『Yubi-Toko』, <https://www.cyber.t.u-tokyo.ac.jp/~ujitoko/yubitoko.html> (2024 年 12 月 10 日確認)
- [7] 荒井 颯, 岡嶋 克典, 『クロスモーダル現象としての Pseudo-haptics』, システム／制御／情報, 61 巻, 11 号, p. 440-446, 2017
- [8] 植井康介, 中島武三志, 飯田隆太郎. 『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』, インタラクシオン 2021 論文集, pp. 457-462, 2021
- [9] 小川 奈美, 鳴海 拓志, 伴 祐樹, 櫻井 翔, 谷川 智洋, 廣瀬 通孝, 『えくす手: バーチャルな拡張身体を用いたピアノとのインタラクシオン』, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 23 巻, 3 号, p. 91-101, 2018
- [10] 伴 祐樹, 宇治土公 雄介, 『バーチャル紐を用いることによるタッチスクリーンでの Pseudo-haptics 効果の向上』, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, 24 巻, 4 号, p. 389-399, 2019