



# 触覚ディスプレイの比較評価を目的とした 共通体験サンプルの試作と検討

Prototype and study of common experience samples for comparative evaluation of tactile displays

岡拓也<sup>1)</sup>, 森本浩輔<sup>2)</sup>, 築瀬洋平<sup>3)</sup>, 渡邊恵太<sup>2)</sup>

Takuya Oka, Kosuke Morimoto, Yohei Yanase, and Keita Watanabe

- 1) 明治大学大学院 先端数理科学研究科 (〒164-0001 東京都中野区中野 4-21-1, tky.star.1231@gmail.com)  
 2) 明治大学 総合数理学部 (〒164-0001 東京都中野区中野 4-21-1, watanabe@fms.meiji.ac.jp)  
 3) ユニティ・テクノロジーズ・ジャパン株式会社 (〒104-0061 東京都中央区銀座 6-10-1, yanase@unity3d.com)

**概要:** ユーザに触覚フィードバックを与える触覚ディスプレイが多く提案されているが、実験環境の違いからディスプレイ間での比較が難しい。そこで、既存研究調査を基にフィードバックするものの特性を分類し、各々の特性の表現に必要な仮想オブジェクトやシーンを集めた共通体験サンプルを試作する。さらに、提案サンプルを用いたディスプレイの評価手法を検討し、複数ディスプレイ間の比較評価を目指す。

**キーワード:** 触覚, 視覚, クロス・マルチモーダル

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) では、仮想身体に没入する体験が求められている。視覚情報に加え、マルチモーダル、クロスモーダルを実現するための触覚ディスプレイデバイスの開発が盛んである [1-3]。このような触覚ディスプレイは、仮想空間でのインタラクションを通して体験やデバイスの表現性能を評価することが多い。しかし、評価に使用される仮想環境は研究ごとに作成されており、研究間でデファクトスタンダードとして共通利用されているものはない。これにより、ディスプレイ間の体験比較ができない。さらに、触覚刺激は視覚刺激の影響を受けるため [4,5]、表現された触覚の比較も同様に困難である。

そこで、本研究では触覚ディスプレイ間の比較評価を可能にする、誰もが利用可能な共通体験サンプルを提案する。本論文では、サンプル設計のために既存研究を調査し、評価刺激となる仮想環境の特性や要件を分類した。それに基づき、共通体験サンプルを試作した。さらに、本サンプルの利用方法の理解を目的に、ユースケースを例示する。最後に、触覚ディスプレイの研究者にインタビューを行い、本サンプルの有用性や課題についての意見を集めた。

## 2. 触覚ディスプレイの分類と利用される仮想環境

これまでに多数の触覚ディスプレイが提案されている。これらの研究を調査した結果、触覚ディスプレイが表現するものの特性と、評価実験の目的によって利用される仮想環境が設計されることが分かった。

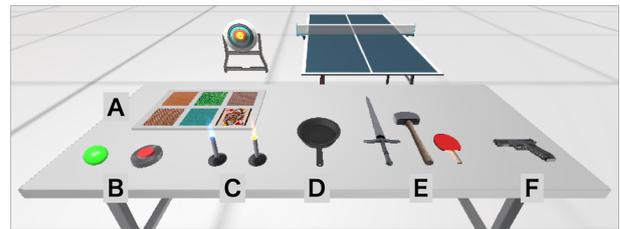


図 1: 共通体験サンプル 1.0 の仮想環境

### 2.1 フィードバックするものの特性

触覚探索運動を通して知覚可能なものの特性は、質感、硬さ、温度、重さ、形状 (全体, 詳細), 体積, 動き, 機能と言われている [6]。これらを基に触覚ディスプレイを分類し、先行研究で利用された仮想オブジェクトを例示する。また、体積は形状の一部と捉え、機能は該当研究が無かったため記載していない。

(1) **質感:** Haptic Revolver [2] は仮想表面とインタラクトする際に、ホイールを回転させることで指先の触覚を表現できるコントローラである。質感ディスプレイの評価には、様々なテクスチャが並べられたマテリアルボードを使用した。

(2) **硬さ:** CLAW [1] や CapstanCrunch [7] は手のひらサイズの触覚ディスプレイで、人差し指に動的な抵抗を与えることで硬さの異なる物体の触覚フィードバックを提供する。硬さディスプレイの評価には、圧縮時に変形するプリミティブな図形や、銃のトリガー、ボタンなどを使用した。

(3) **温度:** Thrminator [8] は温度の異なる液体を流すことで、熱伝導による温冷フィードバックをする。温冷ディスブ

レイの評価には、炎、水、氷を使用することが多い。

(4) **重さ**: Aero-Plane [9] は、2つの小型ジェットプロペラを用いたコントローラで、左右二つのプロペラの風量を調整することにより、重さや重心のずれを表現する。重さディスプレイの評価には、上にものを重ねたり取り払うことで重さの変化を表現できるフライパンやグラスを使用した。

(5) **形状**: PoCoPo [10] は手元で様々な形状を表現できるピン型ディスプレイである。また、SHAPIO [11] のように、ゲームシーンに応じて動的に形状を表現可能なデバイスもある。形状ディスプレイの評価には、市販のVRアプリケーションで頻繁に使われる武器やスポーツ器具を使用することが多い。

(6) **動き**: JetController [12] は、複数の空気推進ジェットを組み合わせて3DoFのフォースフィードバックを発生させることができる。動きディスプレイの評価には、動的なオブジェクトが必要であり、射撃時やボール接触時の反動を有するシーンを使用することが多い。

## 2.2 評価実験の種類と必要な視覚刺激

触覚ディスプレイ研究の評価実験は2つに大別することができ、各々使用する仮想環境の特性や要件は異なる。

(1) **触覚の再現性**: この実験では、実験参加者の総合的な体験の豊かさを重要視せず、フィードバックに対する知覚を厳密に評価する。そのため、提示感覚に影響を与える可能性のある視覚刺激を避け、プリミティブな形状のオブジェクトや単色のオブジェクトが使用されることが多い。また、触覚刺激に最も合った視覚刺激を対応づける実験が行われることも多く [3, 10]、大きさや形の調整可能性が求められる。

(2) **仮想身体への没入**: この実験では、コンテキストに応じた専用の視覚刺激を使用することが多い。例えば PaCaPa [13] の提案研究では、ディスプレイの評価実験では単色でプリミティブな図形を使用したのに対し、体験評価ではモグラ叩きのような専用コンテキストに沿った視覚刺激を使用した。

## 3. 共通体験サンプル 1.0

### 3.1 コンセプト

共通体験サンプルは、触覚ディスプレイ間の比較評価を可能にする仮想実験環境で、デファクトスタンダードとして実験利用されることを目指して作成した。また、誰でも利用可能なオープンサンプルで、基本インタクションを基に専用アプリケーションを開発できる (図 1)。また、1.0としたのは、研究者のニーズやサンプルの妥当性を鑑みてアップデートを重ねることを前提としたためである。

### 3.2 設計方針

#### 3.2.1 サンプルの種類と選定理由

共通体験サンプルで利用可能な仮想オブジェクトは、触覚ディスプレイが表現するものの特性ごとに利用頻度の高いものを選定した。

**A マテリアルボード**: 質感ディスプレイの評価のために、様々なテクスチャを並べる。標準のテクスチャだけでなく、既存

のテクスチャサンプルデータベース [14, 15] などから取得したテクスチャをインポートして使うこともできる。

**B ボール・ボタン**: 硬さディスプレイの評価のために、硬さを調整できる。ボールは把持するシーン、ボタンは指で押し込むシーンでの使用を想定している。

**C 炎・水**: 温冷ディスプレイの評価のために使用する。温度を予測しやすい点から、先行研究でも利用頻度が高かった。

**D フライパン**: 重さディスプレイの評価のために、ものを追加・削除することで重さの増減を表現できる。また、フライパンは重さの異なる状況を再現できるだけでなく、乗せるオブジェクトの配置場所によって重心の違いも表現できる。

**E 剣・卓球ラケット・ハンマー**: 形状ディスプレイの評価のために使用する。先行研究でも利用頻度が高いため選定した。大きさは利用者が自由に変更でき、変更情報を書き出し、共有することもできる。

**F 拳銃**: 動きディスプレイの評価のために、先行研究でも利用頻度の高かった反動のある拳銃を作成した。

#### 3.2.2 調整・再現可能性

本サンプルはデファクトスタンダードとして共通利用されることを目指す一方、各研究者固有のニーズに応える専用性も必要である。そこで、評価実験でニーズの高いパラメータを調整可能にする。例えば、視覚形状と触覚形状の対応付けを行う実験 [3, 10] において、形状に関するパラメータを調整可能にすることで、様々な形状の視覚刺激を手軽に準備できる。そのほかにも、ボールやボタンの硬さ、炎や水の大きさ、フライパンに乗せるものの数や位置、ハンマーの柄の長さや重り部分の大きさ、銃の反動の大きさなどを調整できる。また、調整したパラメータの情報は JSON 形式のデータとして記録することができる。

共通体験サンプルの最も重要な特徴は、サンプルの再現可能性だ。標準状態のサンプルは、GitHub 上の当該リポジトリをクローンして利用する (付録を参照)。さらに、他研究者と同条件のサンプルを利用する場合、パラメータ情報が記録された JSON データを読み込むことで再現できる。

## 4. 共通体験サンプルの利用シーンの例示

本章では共通体験サンプルを用いた2つの実験ユースケースを紹介する。一つ目は、触覚刺激に対応した視覚刺激を探る実験ユースケース。二つ目は、2種類のディスプレイを使用した体験を比較する実験ユースケースである。

### 4.1 視覚刺激の調整実験

このユースケースでは、卓球ラケットの形状を表現したデバイス (図 2) を用いた実験を想定する。形状ディスプレイの評価のために、卓球サンプルを用いて実験を行う。体験を評価する実験の前に、視覚刺激と触覚刺激の適切な組み合わせを探るため、視覚刺激を調整する必要がある。実験参加者は、デバイスを振った際の触覚刺激から卓球ラケットの大きさを予想し、共通体験サンプルのパラメータ調整機能を用いて視覚刺激の大きさを調整する。また、調整ログは実験後にワンクリックで出力することができる。

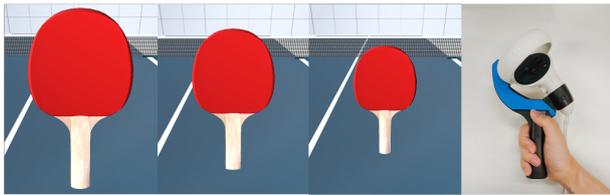


図 2: 大きさの異なる視覚刺激とラケット型コントローラ



図 3: 視覚刺激と 2 種類の銃型コントローラ

#### 4.2 2 種類の銃型デバイスを用いた体験比較

共通体験サンプルを用いて、形状と機構が異なる 2 種類の銃型デバイス（図 3 中と図 3 右）を用いた体験の比較評価を行う。各デバイスは、事前に共通体験サンプルの入力システムへのマッピングを行い、トリガーを引いた際に弾が発射するように設定する。どちらのデバイスも銃型の形状をしているが、図 3 右のデバイスは発射時に反動フィードバックが生じる。実験では、共通体験サンプル内の的に向かって弾を発射し、命中率を競うタスクを行う。その後、「触覚レンダリングは視覚的な印象とどの程度一致していましたか？」という質問に対して 7 段階のリッカート尺度で評価させ、任意で追加コメントを求めるものとする。

### 5. 触覚ディスプレイ開発者へのインタビュー

本サンプルが研究者間で広く利用されるために、研究者の意見を取り入れる必要がある。そこで、Transcalibur [3] や PoCoPo [10] などの開発に携わった吉田と橋本、SHAPIO [11] の開発に携わった井上にインタビューを行った。

#### 5.1 本サンプルの利点

3 人の共通した意見は、研究用のデファクトスタンダードとして使える仮想環境がなく、開発に手間がかかるという点である。さらに、盛んな研究分野であるため、研究サイクルを早めることへの必要性が高く、誰もが手軽に利用可能な本サンプルに対しての期待の声があった。また、不変的な標準評価刺激としてだけでなく、各研究者が自由に修正できる更新可能な評価指標としての発展を期待する声があった。これらの意見から、本研究の問題意識や本サンプルの設計方針は、研究者に賛同されることが分かった。

#### 5.2 本サンプルの課題

吉田と橋本は、研究間のコントローラ比較において、実験統制を課題に挙げた。研究間において、評価手法など実験結果に影響を与える要素を完全に統制し、直接比較するのは難しい。また、触覚ディスプレイ開発の大きな目的は共通していても、表現したい触覚はそれぞれ異なり、比較す

る必要がないという意見もあった。一方で、全般的に網羅・分類された触覚サンプルを一通り体験し、ディスプレイの表現可能領域を可視化する比較手法は有用かつ実現可能性があるとした。

井上は、本サンプルでの評価が難しい研究として、専用のかつ連続的なシナリオでの体験を想定した触覚ディスプレイを挙げた。例えば、SHAPIO はゲームコンテキストに応じてコントローラの形状を変形させることができるため、変形シナリオや変形前後の視覚刺激が必要である。しかし、本サンプルにはこのような専用のかつ連続的なシナリオのシーンがなく、適切な評価ができない可能性がある。

## 6. 議論

### 6.1 サンプルの妥当性

サンプル内の仮想オブジェクトの種類やグラフィックは、さらなる調査を基に更新が必要である。オブジェクトの種類は、既存研究を基に選定したが、触覚ディスプレイが表現すべきシーンが全て網羅されているわけではない。表現すべきシーンを全般的に調査した上で、明確な理由のもと分類し、扱いやすい粒度のサンプルを構築する必要がある。グラフィックは、実験やデモなど利用用途によって求められるものが異なる。本サンプルは両方の用途で使われることを目指しているため、グラフィックの両立が必要である。実験で汎用的に使われるサンプルのグラフィックは、調査を基に探索してく一方で、デモ用の専用の仮想空間の網羅には限界がある。そのため、研究者間でアセットシェアリングが可能な環境を構築することを考えている。

### 6.2 比較評価の可能性と課題

本研究により、研究者間で使用する視覚刺激を共有できる実験基盤が利用可能になった。しかし、視覚刺激以外の実験条件を複数研究間で統制するまでには及んでいないため、研究間での直接比較は依然として難しい。とはいえ、特性の似ているディスプレイ間の比較はすべきである。そこで、ディスプレイの特性を可視化することで、類似ディスプレイの存在を明確化し、直接比較の必要性をより強く認識させることができると考えた。そのため、今後は触覚ディスプレイのジェネラルな特性チェックリストと、各々の特性を評価するサンプルを開発する。

## 7. おわりに

触覚ディスプレイの比較評価を目的とした共通体験サンプルの提案と試作をした。本研究により、研究者間で視覚刺激を共有できる実験基盤が利用可能になったが、実験統制などの課題が見つかった。今後は、触覚ディスプレイのジェネラルな特性チェックリストを開発し、ディスプレイ特性の可視化を通して研究間比較の必要性を高めていく。

**謝辞** 本研究は JSPS 科研費 JP22K12336 の助成を受けたものです。

本研究の遂行にあたり、インタビューにご協力頂いた OMRON SINIC X シニアリサーチャー 吉田成朗先生、東京大学 情報理工学系研究科博士課程 橋本健さん、東京工科大学 コンピュータサイエンス学部 コンピュータサイエンス学科 准教授 井上亮文先生に深謝致します。

付録 共通体験サンプル <https://github.com/open-video-game-library/CoExperienceSamples>

### 参考文献

- [1] Inrak Choi, Eyal Ofek, Hrvoje Benko, Mike Sinclair, and Christian Holz. Claw: A multifunctional handheld haptic controller for grasping, touching, and triggering in virtual reality. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–13, 2018.
- [2] Eric Whitmire, Hrvoje Benko, Christian Holz, Eyal Ofek, and Mike Sinclair. Haptic revolver: Touch, shear, texture, and shape rendering on a reconfigurable virtual reality controller. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '18, p. 1–12. Association for Computing Machinery, 2018.
- [3] Jotaro Shigeyama, Takeru Hashimoto, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Transcalibur: A weight shifting virtual reality controller for 2d shape rendering based on computational perception model. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, p. 1–11, 2019.
- [4] Irvin Rock and Jack Victor. Vision and touch: An experimentally created conflict between the two senses. *Science*, Vol. 143, No. 3606, pp. 594–596, 1964.
- [5] Yuki Ban, Takashi Kajinami, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Modifying an identified curved surface shape using pseudo-haptic effect. In *2012 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 211–216, 2012.
- [6] Susan J. Lederman and Roberta L. Klatzky. Hand movements: A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, Vol. 19, pp. 342–368, 1987.
- [7] Mike Sinclair, Eyal Ofek, Mar Gonzalez-Franco, and Christian Holz. Capstancrunch: A haptic vr controller with user-supplied force feedback. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 815–829, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [8] Sebastian Günther, Florian Müller, Dominik Schön, Omar Elmoghazy, Max Mühlhäuser, and Martin Schmitz. *Therminator: Understanding the Interdependency of Visual and On-Body Thermal Feedback in Virtual Reality*, p. 1–14. 2020.
- [9] Seungwoo Je, Myung Jin Kim, Woojin Lee, Byungjoo Lee, Xing-Dong Yang, Pedro Lopes, and Andrea Bianchi. Aero-plane: A handheld force-feedback device that renders weight motion illusion on a virtual 2d plane. In *Proceedings of the 32nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '19, p. 763–775, New York, NY, USA, 2019.
- [10] Shigeo Yoshida, Yuqian Sun, and Hideaki Kuzuoka. *PoCoPo: Handheld Pin-Based Shape Display for Haptic Rendering in Virtual Reality*, p. 1–13. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 2020.
- [11] Hayato Kajiyama, Akifumi Inoue, and Tohru Hoshi. Shapio: Shape i/o controller for video games. In *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*, CHI PLAY '15, p. 565–570, 2015.
- [12] Yu-Wei Wang, Yu-Hsin Lin, Pin-Sung Ku, Yōko Miyatake, Yi-Hsuan Mao, Po Yu Chen, Chun-Miao Tseng, and Mike Y. Chen. Jetcontroller: High-speed ungrounded 3-dof force feedback controllers using air propulsion jets. In *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '21, 2021.
- [13] Yuqian Sun, Shigeo Yoshida, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. Pacapa: A handheld vr device for rendering size, shape, and stiffness of virtual objects in tool-based interactions. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '19, p. 1–12, New York, NY, USA, 2019.
- [14] Heather Culbertson, Juan José López Delgado, and Katherine J. Kuchenbecker. One hundred data-driven haptic texture models and open-source methods for rendering on 3d objects. In *2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 319–325, 2014.
- [15] Matti Strese, Jun-Yong Lee, Clemens Schuwerk, Qingfu Han, Hyoung-Gook Kim, and Eckehard Steinbach. A haptic texture database for tool-mediated texture recognition and classification. In *2014 IEEE International Symposium on Haptic, Audio and Visual Environments and Games (HAVE) Proceedings*, pp. 118–123, 2014.