



# ソーシャル VR 環境における LRA を用いた 視触覚インタラクション設計の予備的検討

Preliminary Study of Visuo-Haptic interaction System in VR Environment using LRAs

亀岡高幸<sup>1)2)</sup>, 早瀬友裕<sup>2)</sup>

Takayuki KAMEOKA and Tomohiro HAYASE

1) 筑波大学 (〒 305-8573 茨城県つくば市天王台 1-1-1, kameoka@ah.iit.tsukuba.ac.jp)

2) クラスタメタバース研究所 (〒 141-0031 東京都品川区西五反田 8-9-5, t.hayase@cluster.mu)

**概要:** バーチャルリアリティ (VR) 体験の向上のために触覚刺激を付随する取り組みが行われているが、専用ハードウェアを用いるため統制した評価が困難である。本研究では、コンシューマー向けヘッドマウントディスプレイ (HMD) にて一般的に使用されているコントローラに内蔵された振動子を用いて、VR 環境下にて振動とインタラクションを組み合わせることで、より没入感のある体験が得られるかを検討した。インタラクションオブジェクトとして、押す、回す、布をなぞる、の3つを用意し、その動作とそれに応じた振動触覚パターンとの関係を調査した。28名への実験の結果、動作に同調した振動が好まれるが、ユーザの想像は多岐にわたるため、特定の物性を知覚するための振動と画像の組み合わせが一意に定まるよう調整することが重要であることが示された。

**キーワード:** LRA、ソーシャル VR、HMD、インタラクション

## 1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) 体験の質向上を目的とした触覚デバイスの開発は多数行われているが、各々の取り組みにおいて専用のハードウェアを用いているため統制した体験の評価が困難である。そこで一般に普及したハードウェアを用いることで統制した触覚体験の設計及び評価を行うことができる。近年では VR 体験において安価なコンシューマー向けヘッドマウントディスプレイ (HMD) が普及しており、これを用いた触覚体験の設計をおこなう。

現在普及している HMD コントローラーには安価であることや制御が簡単なこと、実装が手軽である点などから振動子 (LRA: Linear Resonant Actuators) が内蔵されている。LRA は共振を利用した小型、省電力な振動提示アクチュエータとして様々な機器に導入されており [1]、特に振動触覚提示用の LRA は人間の振動知覚のピークである 200~300Hz の範囲の共振周波数が設定されている。LRA は共振を利用しているため特定周波数での振動のみ提示可能であるが、Yamaguchi ら [2] は高周波領域において主観の強度が一致するように低周波領域の振動を振動振幅を調整することで提示するなど LRA のみを用いた振動触覚の幅を広げている。

本研究では現在普及している LRA を内蔵したコントローラーを用いて、より没入感のある VR 体験を提示できる振動信号と VR 環境におけるインタラクションの組み合わせを探索し、最適な振動パターンを構築する。特に本論では VR 環境におけるオブジェクトとユーザーとのインタラク

ションに応じた振動触覚パターンを複数提示し、ユーザーに提示可能な体験の楽しさと体験の質を主観評価にて評価した。その結果、LRA を用いた VR 体験ではユーザーが体験できる触覚情報は限られているため解釈の幅が広くなり、他のモダリティとの組み合わせなければ意図した感覚を提示することは困難であることがわかった。一方で VR コンテンツから類推した触覚と実際に提示される触覚が一致する場合に良い触覚体験が得られることがわかった。

## 2. 実験

VR 環境を作成し、被験者に複数のインタラクションと複数の振動提示パターンの組み合わせで VR 体験を実施し、体験の結果を主観評価にて回答させた。VR 環境提示する HMD には Meta Quest2 (USA, Meta.inc) を用い、振動を提示するコントローラーも Meta Quest2 に付属するコントローラーを使用した。コントローラーに内蔵された振動子により提示可能な振動周波数は加速度センサを用いた計測の結果 172Hz であった。VR 環境は Unity にて作成し、VR 環境の表示には cluster (Japan, cluster.inc) を使用した (図 1)。また cluster に振動提示機能を追加し、実験に使用した。VR 環境には実験の説明文とインタラクション可能なオブジェクトを設置し、被験者は自由に VR 環境内を移動してオブジェクトに触れるよう指示した。

実験環境にはインタラクション可能なオブジェクトを 3 種類用意した。1 つ目は Push Bar である (図 2)。これは円筒形のオブジェクトで取手がついており、壁に押し込む



図 1: 実験を実施する VR 環境。

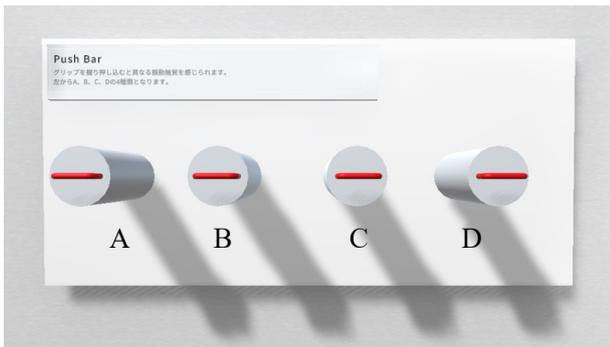


図 2: Push Bar

ことができる。2つ目は Rotation Bar である (図 3)。これは円筒形のオブジェクトで取手がついており、壁に対して垂直に回転する事ができる。3つ目は Cloth である (図 4)。これは布のように変形するオブジェクトで、半球状のオブジェクトを触れさせることで布を揺らすことができる。布は Unity の Cloth コンポーネントを用いて揺れシミュレーションした。これら 3つのオブジェクトに対し複数の振動触覚パターンを設定した。

Push Bar と Rotation Bar には振動なし、継続振動、パルス振動、バネ振動の 4 種類の振動フィードバックパターンを用意した。振動なしの条件ではまったく振動しない。継続振動では取手を把持している間は継続して最大強度の振動が提示される。パルス振動では Push Bar では 130mm 押し込んだときに最大強度の 0.5 倍の強度で 15ms 振動し、Rotation Bar では 90° 傾けたときに最大強度で 15ms 振動した。バネ振動では Push Bar では押し込み量に比例して振動強度を強め、130mm まで押し込んだ時点で最大振動強度で振動させ、Rotation Bar では回転量に比例して振動強度を強め、90° まで回転させた時点で最大振動強度で振動させた。また、Push Bar、Rotation Bar については一定押し込み量、角度まで達した時点でスイッチ音を提示した。

Cloth では振動なし、継続振動、摩擦振動の 3 種類の振動フィードバックパターンを用意した。まず振動なしの条件ではまったく振動しない。継続振動では触れている間常に最大強度の 0.2 倍の強度で振動した。摩擦振動では触れる速度に応じて振動強度を強め、最大強度は最大強度の 0.2 倍の強度とした。さらに現実の摩擦感に近い振動感覚を提示するため摩擦振動では振動強度をランダムに

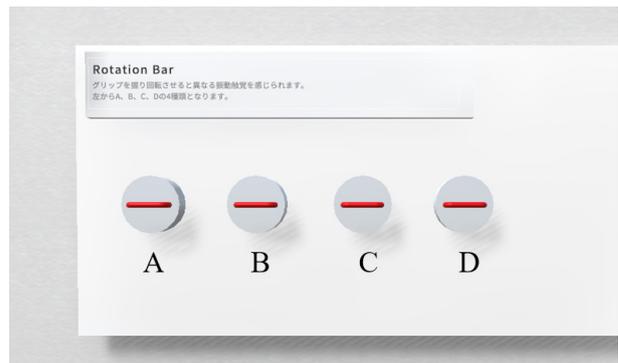


図 3: Rotation Bar



図 4: Cloth

0~1 倍し、振動提示中に振動強度を変化させた。

被験者は各オブジェクト自由に何度でも触れることができ、体験終了後にアンケートに回答した。アンケート項目はリッカートスケール 7 段階で「オブジェクトのリアリティ」と「体験の楽しさ」を回答した (1: 悪い/楽しくない~7: 良い/楽しい)。被験者は 28 名 (うち女性 3 名、31 ± 7.2 歳) であった。

### 3. 結果と考察

主観評価結果を図 5 に示す。回答結果は ART-ANOVA (整列ランク変換分散分析) [3] を行い、ボンフェローニ補正を適用した多重比較を実施した。

まずすべての条件で振動なし条件のリアリティ、楽しさのスコアが低く、振動刺激を加えることで VR 体験の質が向上することがわかった。Push Bar、Rotation Bar のリアリティと楽しさのスコアに関してはパルス振動とバネ振動のスコアが優位に振動なし条件と継続振動条件よりも高いスコアであった (図 5 a d)。また Cloth に関してもランダムノイズを含む摩擦振動条件が優位にスコアが高く、調整した振動触覚が優れていることがわかった。このことはインタラクションに応じて調整した振動触覚のほうがより良い体験を提示できることを示している (図 5 e, f)。

ただし Cloth の reality では振動なし、継続振動条件間で有意差は見られず (図 5 e)、Cloth の楽しさでは振動なし、継続振動条件間で有意差が確認できた (図 5 f)。すなわち

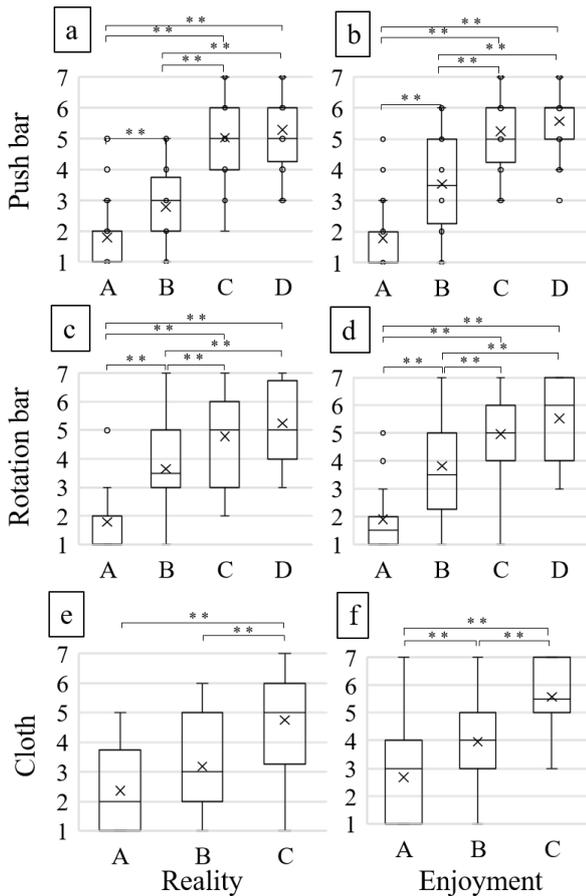


図 5: Push Bar

リアリティと楽しさには同様の傾向が見られるが、体験の楽しさはリアリティが低くとも保たれることがわかる。

一方、Push Bar、Rotation Bar のパルス振動、バネ振動条件間にてリアリティと楽しさのスコアが同程度に高く有意差がなかったことから、今回の実験で用意した振動条件では特定の動作と対応するものは存在しなかったことがわかる。さらに、ある被験者は「Push Bar のパルス振動条件ではオブジェクトが滑る感じがした」とコメントしていた。これらのことからユーザーは動作により生じた振動触覚と対応するオブジェクトの物性を自身で想像し、知覚することがわかった。

また音や映像との相互作用に言及する被験者も多く、音から類推される振動が mismatch であったとの回答もあった。これは Push Bar、Rotation Bar の見た目から類推される重量感が影響しており、特に Push Bar は Rotation Bar と比較して見た目が大きく、より重量があると想起させるが、提示された音が軽かった（部屋のライトを制御するスイッチのような音）ため Push Bar の場合はより違和感を感じた

と考えられる。また Cloth は見た目から、またオブジェクトの名前から軽そうなイメージを持たせたため強度を 0.2 倍に制限した振動との相性が良かったと推察される。

これらの結果よりバーチャルオブジェクトの外観と音、振動の組み合わせのもっともらしさが体験の質を左右すると考えられる。これは単にオブジェクトの外観がリアリスティックかどうかとは別の概念であり、外観がデフォルメ化された場合にもそれに適用した音、振動のパターンが提示されることで体験の質が向上することを示している。

#### 4. おわりに

本論ではコンシューマ向け HMD を用いた VR 体験における LRA を用いた振動提示において、固定された周波数の振動の強度（振幅）と提示時間のみを変化させることで VR 体験の質向上がなされるか調査した。

その結果複数の動作に対して異なる振動パターンを提示してオブジェクトのリアリティ、体験の質を評価した結果、パルス振動やバネ振動、ランダムノイズを含む摩擦振動などが好まれることが明らかになった。この結果より映像から類推される触覚刺激の精度が高く、その推定に一致する刺激は好まれ、そうでないものは違和感を生じることがわかった。同時に映像より類推される物性が曖昧であるほど触覚的解釈の幅も広くなり、提示された振動触覚に合わせた物性の認識がなされる可能性がある。

今後は静的なオブジェクトだけでなく複数のユーザーが同一 VR 環境内に存在する場合における相互インタラクションにおける適した振動フィードバックの調査を行う。

#### 参考文献

- [1] I. Boldea and S. Nasar: “Linear electric actuators and generators”, 1997 IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record, pp. MA1/1.1–MA1/1.5 (1997).
- [2] K. Yamaguchi, M. Konyo and S. Tadokoro: “Sensory Equivalence Conversion of High-Frequency Vibrotactile Signals using Intensity Segment Modulation Method for Enhancing Audiovisual Experience”, 2021 IEEE World Haptics Conference, WHC 2021, pp. 674–679 (2021).
- [3] J. O. Wobbrock, L. Findlater, D. Gergle and J. J. Higgins: “The Aligned Rank Transform for nonparametric factorial analyses using only ANOVA procedures”, Conference on Human Factors in Computing Systems - Proceedings, pp. 143–146 (2011).