

ユーザ視点位置の動的変更による擬似触覚生起に関する一検討

多田祥起¹ 小川剛史²

概要：感覚間の相互作用を用いたクロスモーダルインタフェースに関する研究が盛んに行われている。特に力触覚に関しては、擬似触覚と呼ばれる現象がよく知られている。従来の手法では、力覚提示部位の位置を変位させて見せることで擬似触覚を生起するが、これを現実空間ベースの複合現実で用いることは難しい。本稿では、ビデオシースルー環境での視点変位による擬似触覚生起についての検討を行った。VR環境で実験システムを構築し、「抵抗感」の方向への力覚提示について、手法の有効性・生起される力覚の程度・違和感の小さい適切な変位幅・JND（丁度可知差異）を検証した実験について述べる。

A Study on Evoking Pseudo-haptics by Viewpoint Displacement

SHOKI TADA¹ TAKEFUMI OGAWA²

1. はじめに

現在、普及しているバーチャルリアリティ（VR）システムにおいてユーザに提示される主な知覚情報は、映像による視覚刺激と音響による聴覚刺激によるものである。これは、触覚や嗅覚、味覚といった他の感覚を提示するためには、視覚でのヘッド・マウンティッド・ディスプレイ（HMD）、聴覚でのヘッドホンといった提示手法と比較して、その提示方法やシステムが複雑になってしまうことが主な原因である。しかし、VRにおけるリアリティを高める上では視覚や聴覚以外の知覚情報も欠かすことのできないものであり、特に触力覚のフィードバックは重要な要素といえる。そこで、シンプルなシステム構成で実際に提示している刺激とは異なる感覚を知覚する感覚間相互作用が注目されている。

感覚間相互作用とは矛盾した複数の感覚刺激を脳が矛盾の無いように解釈することで発生する一種の錯覚効果であり、力触覚に関しては擬似触覚[1]と呼ばれる現象が知られている。例えばPCの操作中にマウスカーソルの動きが突然遅くなると、この視覚情報によってマウス（もしくはマウスカーソル）が重くなったように感じる現象がこれに相当し、擬似触覚は、自身が行う身体動作と得られる視覚情報の乖離によって生じる感覚である。

擬似触覚はこれまで主にモニタ内の物体とのインタラクションにおいて報告されてきたものであるが、ユーザの手そのものの動きを編集して見せることでも擬似触覚が生起することが確認された[2]。さらに近年では、バーチャル空

間における力覚提示に擬似触覚を応用する研究[3][4]が行われている。

一方で、実空間とバーチャル空間を融合した複合現実（Mixed Reality: MR）環境においても力触覚の提示は重要であるが、VR環境で用いられる手法をそのまま適用することはできない。なぜなら、バーチャル空間では手などユーザ自身の身体もバーチャルオブジェクトとして描画されるため、提示する位置や移動速度を容易に操作できるが、MR空間においては手などを背景から分離する必要があるためである。MR空間における擬似触覚を用いた力覚提示手法も考案されているが、力覚提示方向が制限されるもの[5]やクロマキ合成用の背景を必要とするもの[6]、専用の現実物体を介したインタラクションが要求されるもの[7]など制約が大きい。

そこで、本研究では、特殊な環境設定を用いず任意方向に力覚を提示できるシステムを提案する。具体的にはユーザの視点を動的に変位させることで擬似触覚を生起させ、力覚提示を目指す。最終的な実際のシステムとしては、ビデオシースルー環境でカメラを移動させるか、アレイ状にカメラを配置してソフトウェア処理により視点を移動させる実装方法を想定している。

本稿では、視点移動による擬似触覚提示が可能であるかどうかを検証するため、VR環境でシステムを構築し、被験者実験による評価を実施する。実験では、「抵抗感」の方向への力覚提示について、手法の有効性・生起される力覚の程度・違和感の小さい適切な変位幅・JND（丁度可知差異）を検証した。

¹ 東京大学大学院工学系研究科
Graduate School of Engineering, The University of Tokyo
² 東京大学情報基盤センター
Information Technology Center, The University of Tokyo

2. 関連研究

近年の研究により、感覚間の相互作用が人間の知覚において重要な役割を持つことが明らかになっている。その中でも、視覚情報を用いて触覚を生成する研究が多く試みられており、よく知られている現象として擬似触覚がある。Lécuyer らは、被験者にピストンを押させ、その変位に応じて収縮するバーチャルなバネの映像を被験者に提示した[1]。このバーチャルなバネの映像中の変形量を変化させることによって、被験者が知覚するバネの硬さを操作できることが確かめられている。そのほかにも、前述のバネと同様の機構で物体の質量感を操作できること[8]や、擬似触覚を用いて凹凸感を表現できること[9]、振動の重畳によってより細かいテクスチャや衝突感を提示できること[10]が知られている。

擬似触覚は当初、マウス等の入力デバイスを用い、モニタ内の物体を操作するインタラクションにおいて確認されていたが、実世界で生じるインタラクションにおいても生起することが示されている。例えば、ユーザの手の位置を変化させて見せることにより、手が流されるような圧力を感じさせられること[2]が知られている。

特にバーチャル空間における力覚提示に擬似触覚を用いることについては、近年、応用研究が進んでいる。具体的には、VR 空間でバーチャル物体を持つ際に、物体と手を実際よりも低い位置に描画することで物体の重量を表現し、ボーリングゲームに適用した例[3]や、手がバーチャルな壁を押す際に、手を実際より手前に描画することで抵抗感を表現した例[4]がある。

一方で、実空間とバーチャル空間を融合した MR 環境においても力覚提示は重要であるが、VR 環境で用いられる手法をそのまま適用することはできない。なぜなら、バーチャル空間では手などユーザ自身の身体もバーチャルオブジェクトとして描画されるため、提示する位置や移動速度を容易に操作できるが、MR 空間においては手などを背景から分離する必要があるためである。

MR 空間における擬似触覚を用いた力覚提示システムについても既に研究が行われているが、制約が大きい。

大塚らは、ビデオシースルー環境において提示映像全体の速度を遅らせたり速めたりすることにより擬似触覚を生起する手法を提案した[5]。しかし、この手法で提示できる力覚の向きは、手などの触覚提示部位の動きに平行な向きのみ限定される。加えて、手が動く方向と同方向の力を表現したい場合、映像を一度遅延させてから早送りする必要がある。すなわち、表現したい力と逆方向の力をまず提示することになるため、力覚提示手法として十分とはいえない。

Taima らは、クロマキ合成用のブルーバック環境において、物体とそれを持つ手を色抽出し、ビデオシースルーで

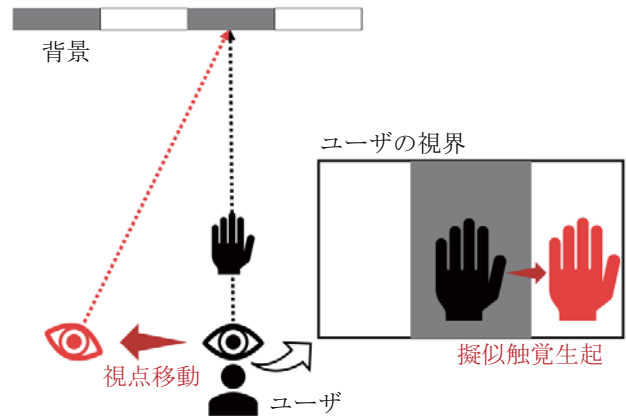


図1 本提案手法のイメージ

高さを変位させて視覚提示することによって擬似触覚を生起させる手法を提案した[6]。しかしながら、この手法の場合、あらかじめ環境設定を行う必要があり、HMD・ヘッドホン程度にシンプルな知覚提示システムとはいえない。また、クロマキ合成用の環境は、現実空間として非常に不自然である。

Issartel らは、現実物体を介してバーチャルな物体を操作する際に、現実物体にバーチャルなクローンを重畳し、クローン物体を変位させることで質量を感じさせる手法を提案した[7]。しかしながら、このシステムでは、手で直接バーチャル物体を操作するといった自然なインタラクションは不可能である。

本研究では、先行研究における以上のような問題点を解消するシステムの提案を目指す。

3. ユーザ視点位置の動的変更による擬似触覚生起

3.1 概要

図1に提案手法の概要を示す。ビデオシースルー環境において、外界を撮影するカメラを移動させ、ユーザの視点を動的に変更する。視点を移動させることにより、ユーザの視界における手の移動量と身体動作としての移動量に不整合を生じさせ、擬似触覚の生起を目指す。視点移動の際には、ユーザの視野における背景の変化が最小限となるように、視点の変位を打ち消す向きに視線方向を回転させることで、力覚提示部位のみが変位して見えるような視覚情報を実現する。

最終的なシステムは、ビデオシースルーにおける HMD のカメラを実際に移動させる、あるいは、HMD にカメラをアレイ状に配置してソフトウェア処理により視点の移動を実現する実装を想定している。

本稿では、視点位置の変更によって擬似触覚が生起されるかどうかを検証するため、VR 環境においてシステムを構築した。

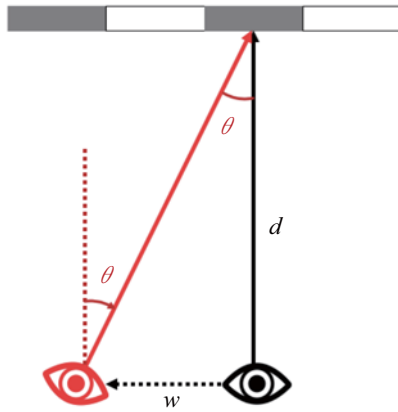


図2 視点変位時の回転角度

3.2 視点変位時の回転角度

本提案システムでは、ユーザの視野における背景の変位を低減させるため、視点移動と同時に視線方向の回転を行う。図2に示すように、視点の変位と視線方向の回転を併用することで視野の中心に表示される背景が変位しないように考えると、回転角 θ 、変位幅 w 、背景までの距離 d の関係は、

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{w}{d} \right)$$

で表される。本システムでの回転角は本式によって決定する。

4. 実験環境

4.1 環境設定

本稿での実験では、前章で述べたシステムを VR 環境において再現し検証を行った。具体的には、現実の部屋を模した VR 空間を用意し、HMD (HTC VIVE) でそれを提示する。力覚提示部位は右手とし、手を認識するデバイスとして Leap Motion を HMD に取り付け、これによって被験者の手を図3に示すモデルで VR 空間に描画した。視点変位及び視線方向の変更は、VR 空間における被験者の視点を動かすことで行った。

図4に被験者の視界の例を示す。実験において被験者は立位である。被験者の前には、赤色の球と青色の球を配置した。被験者とオブジェクトを上部から見た位置関係を図5に示す。被験者の前方40 cm、高さ160 cmに赤球があり、被験者から見て赤球の右40 cmに同じ高さで青球がある。赤球の左60 cmには送風機を描画し、送風機の右端からは赤球と青球の中間地点(赤球の20 cm右側)の位置までパーティクルが噴き出している。送風機から赤球と青球の中間地点までを送風機の風が届く空間と設定し、この空間に手が位置するときに提案手法を適用する。背景の壁面は、赤球・青球から奥行き450 cmの距離にある。

今回の実験では、提案手法による視点変位と従来手法に

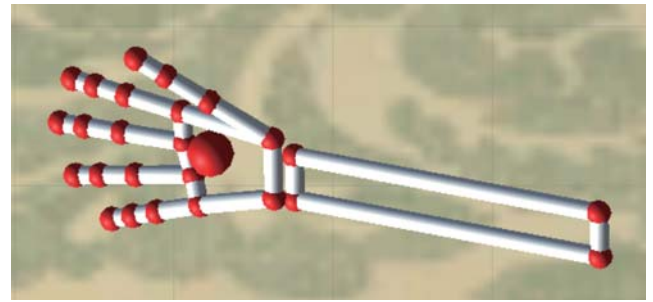


図3 手腕モデル

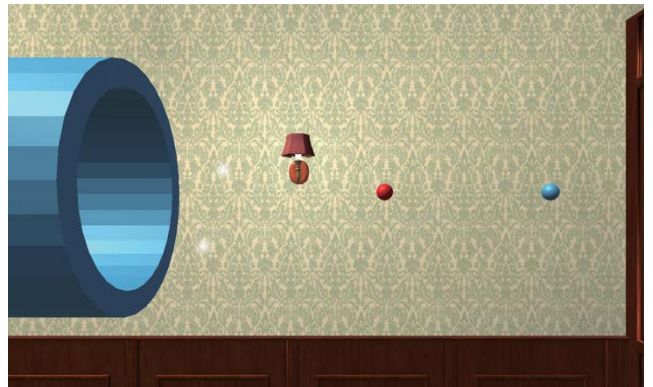


図4 被験者の視界

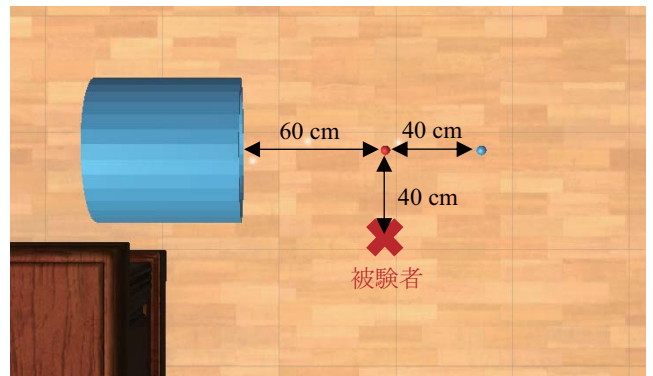


図5 実験環境

よる手の変位を行う。視点変位では、赤球・青球・送風機を視点と共に変位させる。また、各実験パラメータは変位幅で表現する。「視点変位幅 w [cm]」とは、青球から赤球まで手を移動させるとき、手法の適用範囲である赤球と青球の中間地点から赤球までの20 cmを手が移動する際にVR空間内での視点が手の移動に応じて被験者の左方に移動し、手が赤球に到達したときには視点が w [cm]左に移動する設定のことである。また「手の変位幅 w [cm]」とは、手法の適用範囲を手が移動する際に、現実の手の移動距離よりもバーチャルな手の移動距離を短くし、VR空間で赤球までバーチャルな手を移動させたときに、被験者の現実の手が赤球よりも w [cm]左に位置する設定のことである。



図6 実験の様子

4.2 被験者タスク

本稿の実験における被験者は、全ての実験において20代男性8人である。被験者には、各実験条件において、青球から赤球まで右手を動かすよう指示し、被験者の右手が赤球の位置まで到達すると、画面全体が暗転する。その後、知覚した抵抗感について評価させた。

5. 実験1：有効性・力覚程度評価実験

5.1 目的

実験1として、提案手法の有効性、及び、従来の手の変位による擬似触覚と比較してどの程度の力覚が生起できるかを調べる実験を行った。

5.2 実験内容

本実験はシェッフェの対比較法（浦の変法）に基づいて行われた。比較条件は、「変位なし」「手の変位（10, 20, 30, 40 cm）」「視点変位（10, 20, 30, 40 cm）」の計9条件である。

被験者は、各条件において知覚した抵抗感を、他の8条件で知覚した抵抗感と比較した。回答は「前者の方がとても強い」「前者の方がやや強い」「変わらない」「後者の方がやや強い」「後者の方がとても強い」の5選択肢から1つを選択させた。

5.3 実験結果

シェッフェの対比較法（浦の変法）により得られた各条件における力覚強度を図7に示す。統計分析によって確認された有意差は以下の通りである。

- ① 視点変位 10～40 cm の全4条件で、「変位なし」に対するの1%有意水準における有意差が確認された。
- ② 視点変位 10～40 cm の全4条件で、互いに1%有意水準における有意差が見られた。
- ③ 視点変位 10 cm では、手の変位 10 cm との間に有意差は見られなかった。

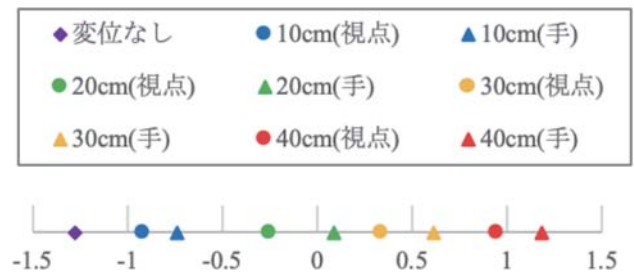


図7 生起された力覚の強度

- ④ 視点変位 20 cm では、手の変位 10 cm, 20 cm との間にそれぞれ1%有意水準における有意差が確認された。
- ⑤ 視点変位 30 cm では、手の変位 20 cm, 30 cm の両方に足して有意差が見られなかった。
- ⑥ 視点変位 40 cm では、手の変位 30 cm との間に5%有意水準における有意差は見られたが、手の変位 40 cm との間には有意差は確認されなかった。

5.4 考察

実験結果①より、今回の実験環境で、視点変位幅 10～40 cm における本手法の有効性を確認することができた。また、実験結果②より、変位幅を増大させるほど力覚強度が強くなるといえる。

実験結果③～⑥より、本手法によって視点を w [cm] 変位させる ($w = 10, 20, 30, 40$) ことで提示できる力覚は、従来手法による擬似触覚で手を $w \sim (w - 10)$ [cm] 変位させたときの力覚に相当すると考えられる。同変位幅で考えると、手の変位と比較して視点変位による力覚強度が小さくなっている。この原因としては、本手法に含まれる視線方向の回転によって、手の見かけの変位幅が視点変位幅よりも小さくなっていることが挙げられる。今回の環境では、視点変位幅の値に対して手の見かけの変位幅が約8%減少していると算出できる。

6. 実験2：違和感評価実験

6.1 目的

一般的に、擬似触覚においては、変位幅が大きくなると身体感覚と視覚情報の矛盾が過大となり違和感が生じる。実験2では、本手法に伴う違和感の程度を調査し、自然な力覚提示として適切な変位幅を明らかにする。

6.2 実験内容

視点変位 10, 20, 30, 40 cm の4条件をランダムに提示し、違和感を感じたかどうかを回答させた。回答の際には、自由に感想等を話すように促した。

さらに、視点変位 10, 20, 30, 40 cm の4条件を順番に体験させ、その後、手ではなく視点が変位していたことを伝え、

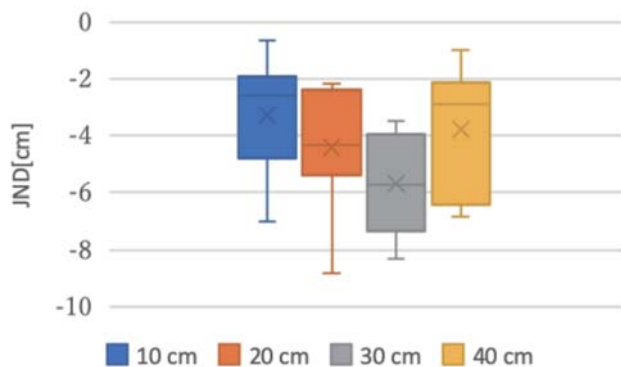


図 8 JND 評価実験結果（凡例は変位幅）

表 1 各視点変位幅の JND

視点変位幅	JND (中央値)
10 cm	- 2.58 cm
20 cm	- 4.33 cm
30 cm	- 5.75 cm
40 cm	- 2.92 cm

視点の変位に気づいたかどうかを回答させた。「視点の変位に気づいた」と回答した被験者に対しては、何度目の試行で気づいたか、視点の変位は明確であったかを追加で質問した。

6.3 実験結果

実験の結果得られた回答は以下の通りである。人数を記していない回答の回答人数は 1 人である。

◇ 質問 1：違和感を感じたか？

■ 変位幅：10 cm

- なかった (7 人)
- 「20 cm 変位」よりは非常に少ないが、違和感があった

■ 変位幅：20 cm

- なかった (6 人)
- 少しあった
- 手が動いてないことでの違和感があった

■ 変位幅：30 cm

- なかった (4 人)
- 手が動いてないことでの違和感が若干あった (2 人)
- 「20 cm 変位」より大きい違和感があった
- 手が進まない違和感があった

■ 変位幅：40 cm

- なかった (2 人)
- 抵抗感というより疲労感を感じた
- 明確ではないが違和感があった
- (変位幅が大きくなってくると) 終盤に違和感があった
- 明らかに手の位置が違うと感じた
- 一番大きい違和感があった
- 編集感を強く感じた

◇ 質問 2：視点の変位に気づいたか？

- 気づかなかった (7 人)

- 「40 cm 変位」で気づいた、言われれば分かる程度であった

6.4 考察

質問 1 の回答において「違和感がなかった」とした被験者数は、変位幅が大きくなるにつれて増加し、変位幅 30 cm で半数となっている。また、変位幅 40 cm において、「抵抗感というよりも疲労感を強く感じた」と回答した被験者がいた。これらの結果から、今回の実験環境での力覚提示システムとして適切な変位幅は、30 cm 程度以下であると結論できる。

質問 2 の回答では、変位幅 40 cm のみで視点の変位に気づいた被験者が 1 人いた。このことから、適切な変位幅が 30 cm 程度までであると考えられる。また、8 人中 7 人が変位幅 10 cm ~ 40 cm の全条件で視点変位に気づかなかったとしたことから、視点変位によって力覚提示部位のみが変位しているように視覚提示するという本手法の意図が達成できていることも確認できた。

7. 実験 3：JND 評価実験

7.1 目的

本手法を適用する最終的なシステムを考えれば、できるだけ小さい変位幅で力覚を表現することが重要となる。実験 3 では、各変位幅 10, 20, 30, 40 cm で生起される力覚の大きさを保ったままどれほど変位幅を小さくできるかを検証するため、JND (丁度可知差異) の評価を行った。

7.2 実験内容

本実験は、上下法の手続きに基づいて行った。変位幅 10, 20, 30, 40 cm をそれぞれ基準刺激とし、比較刺激は基準刺激と等しい条件から開始した。被験者は基準刺激と比較刺激の抵抗感を比較し、どちらが強く感じたかを回答した。回答の選択肢は「基準刺激の方が強い」「変わらない」「標準刺激の方が強い」の 3 つである。最初のステップサイズは 2 cm で比較刺激の変位幅を小さくしていき、「基準刺激の方が強い」という回答が得られると比較刺激を増大に転じた。その後、「変わらない」という回答が得られると比較刺激を再び減少させた。これ以降ステップサイズは 1 cm とした。合計 6 回の反転が起こった時点で実験を終了し、反

転が起こった変位幅の平均をその被験者の JND とした。

7.3 実験結果

実験結果を図 8, 表 1 に示す。実験 2 で違和感の小さい変位幅の限界として得られた変位幅 30 cm での JND は -5.75 cm となった。

7.4 考察

実験結果より, 視点変位幅 30 cm で生起される力覚は, 視点変位幅 24~25 cm 程度で再現できるといえる。他の変位幅についても, 力覚の強度を保ったまま変位幅を小さくすることができる。

8. おわりに

本稿では, ユーザの視点を変位させることで擬似触覚を生起させる手法について, VR 空間を用いた評価実験を行い, 以下の知見を得た。

今回の環境での変位幅 10cm~40cm において,

- 提案手法は有効である
- 変位幅を大きくするほど抵抗感は増大する
- 本提案手法の視点変位 w [cm] では, 従来の擬似触覚での手の変位 $w \sim (w - 10)$ [cm] 程度の力覚が生起できる
- 違和感のない変位幅は 30cm 程度以下である
- 変位幅 24~25 cm で, 変位幅 30 cm と同等の抵抗感が生起できる

今後は, さまざまな空間での使用を想定して, 奥行き等の空間の条件や手の高さ(目線の角度)が手法の効果に与える影響を検証する予定である。また, 本手法を適用できるアプリケーションの条件についても検証を進める。さらに, 力覚提示部位の動きと同方向・直交方向の擬似触覚生起に関して検討する予定である。

謝辞

本研究の一部は JSPS 科研費 16K00266, 19H04150 の助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- [1] A. Lécuyer, S. Coquillart, A. Kheddar, P. Richard, and P. Coiffet, "Pseudo-haptic Feedback: can Isometric Input Devices Simulate Force Feedback?," Proceedings of IEEE Virtual Reality 2000, pp. 83-90, 2000.
- [2] A. Pusch, O. Martin, and S. Coquillart, "HEMP—hand-displacement-based pseudo-haptics: A Study of a Force Field Application and a Behavioural Analysis," International Journal of Human-Computer Studies, vol. 67, no. 3, pp. 256-268, 2009.
- [3] M. Rietzler, F. Geiselhart, J. Gugenheimer, and E. Rukzio, "Breaking the Tracking: Enabling Weight Perception using Perceivable Tracking Offsets," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), Paper 128, New York, NY, USA, 2018.
- [4] M. Rietzler, F. Geiselhart, J. Frommel, and E. Rukzio, "Conveying the Perception of Kinesthetic Feedback in Virtual Reality using State-of-the-Art Hardware," Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '18), Paper 460, New York, NY, USA, 2018.
- [5] 大塚隆史, 小川剛史, "拡張現実感における擬似触覚を用いた力覚フィードバックの実現に関する検討," VR 学研報, 2012.
- [6] Y. Taima, Y. Ban, T. Narumi, T. Tanikawa, and M. Hirose, "Controlling Fatigue While Lifting Objects Using Pseudo-haptics in a Mixed Reality Space," Proceedings of 2014 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS), pp. 175-180, 2014.
- [7] P. Issartel, F. Guéniat, S. Coquillart, and M. Ammi, "Perceiving Mass in Mixed Reality Through Pseudo-haptic Rendering of Newton's Third Law," Proceedings of 2015 IEEE Virtual Reality (VR), pp. 41-46, 2015.
- [8] L. Dominjon, A. Lécuyer, J.-M. Burkhardt, P. Richard, and S. Richir, "Influence of Control/Display Ratio on the Perception of Mass of Manipulated Objects in Virtual Environments," Proceedings of IEEE Virtual Reality 2005, pp. 19-25, Bonn, Germany, 2005.
- [9] A. Lécuyer, J. Burkhardt, and L. Etienne, "Feeling Bumps and Holes Without a Haptic Interface: the Perception of Pseudo-haptic Textures," Proceedings of SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI '04), pp. 239-246, New York, NY, USA, 2004.
- [10] T. Hachisu, G. Cirio, M. Marchal, A. Lécuyer, and H. Kajimoto, "Pseudo-haptic Feedback Augmented with Visual and Tactile Vibrations," Proceedings of 2011 IEEE International Symposium on VR Innovation, pp. 327-328 Singapore, 2011.