



# MR 環境下での Pseudo-haptics 利用による 空間的不整合の視認が重さ知覚に与える影響の解明

Examining the Effect of Visual Recognition of Displacement on Weight Perception  
Using Pseudo-Haptics in Mixed Reality

小林 修也<sup>1</sup>, 島村 一輝<sup>1</sup>, 伴 祐樹<sup>1</sup>, 割澤 伸一<sup>1</sup>

Shuya KOBAYASHI, Kazuki SHIMAMURA, Yuki BAN, and Shin'ichi WARISAWA

1) 東京大学 新領域創成科学研究科 (〒 277-8563 千葉県柏市柏の葉 5-1-5, kobayashi\_shuya@s.h.k.u-tokyo.ac.jp, shimamura-kazuki351@g.ecc.u-tokyo.ac.jp, ban@edu.k.u-tokyo.ac.jp, warisawa@edu.k.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** MR 環境下の Pseudo-haptics では実際の身体と仮想オブジェクト間の空間的不整合が視認されるため生起が困難だと考えられているが, 実証されていない. そこで本研究では MR 空間内での Pseudo-haptics 利用による空間的不整合の視認が重さ知覚に与える影響を調べた. 特に, 持ち上げる際の視線方向が MR での Pseudo-haptics 効果に影響を与えるという仮説を立て, 検証した.

**キーワード:** Pseudo-haptics, Mixed Reality, 触覚, クロスモーダル

## 1. はじめに

Virtual Reality (VR) が広く普及する中で, 触力覚の利用による VR 体験のリアリティ向上が期待されている [1]. その中でも複雑なデバイスを用いない触力覚提示方法として Pseudo-haptics という現象が注目されている.

Pseudo-haptics とは, 身体動作を反映する視覚情報を操作することによって, 疑似的な触力覚を生み出す錯覚のことである. 物理的な力を直接提示する必要がないため, Head Mounted Display (HMD) などの視覚提示デバイスのみでユーザーに触力覚を提示できるという利点がある. しかし, Pseudo-haptics では実際のユーザーの入力とそれを反映したスクリーン上の動きにズレを生じさせるため, 図 1 のように両者の間にズレが生じてしまう. 本稿ではこのズレのことを空間的不整合と呼ぶ. VR 空間内では実際のユーザーの入力が見えないように設計することで空間的不整合を視認しないようにできるが, MR 空間内では空間的不整合を視認してしまう. ポインタと身体動作の速度比や位置のズレが大きく, それが意識されるときには違和感が生じ Pseudo-haptics が生起しにくいことが知られており [2], 空間的不整合が視認される MR 環境下では Pseudo-haptics を生起させることは困難だと考えられている [3].

しかし, 空間的不整合の視認による Pseudo-haptics 効果への影響を実際に検証した研究事例はない. この影響についての解明は MR や AR における Pseudo-haptics 効果向上や新しい Pseudo-haptics 生起手法を生み出すために重要だと考える. そこで本研究では, 定量的評価のしやすい重さ知覚を操作する Pseudo-haptics に着目し, MR 空間内での Pseudo-haptics 利用による空間的不整合の視認が重さ知覚に与える影響を検証した.

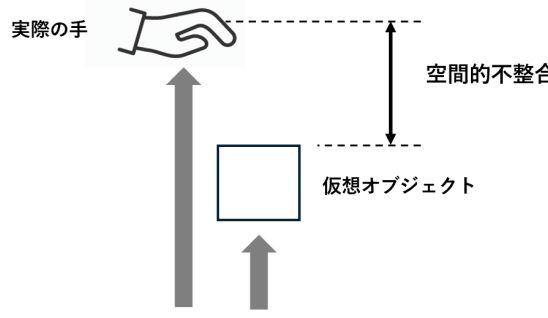


図 1: Pseudo-haptics における空間的不整合

## 2. 関連研究

### 2.1 重さ知覚を操作する Pseudo-haptics

HMD を装着した人が物体を持ち上げる際, スクリーン上に映る手や物体の移動量を実際よりも小さく (大きく) 表示することで, その物体を実際よりも重く (軽く) 感じることが知られている [4]. このとき実際の移動量に対するスクリーン上の移動量の比のことを CD 比と呼び, CD 比が 1 より小さいと物体を重く, 1 より大きければ軽く感じる.

### 2.2 空間的不整合が視認される状況での Pseudo-haptics

MR 環境下での Pseudo-haptics の例として Paul ら [5] は反作用力を視覚的に表現することで Pseudo-haptics を生起するという手法を提案した. 彼らは, 現実のオブジェクトを介して仮想のオブジェクトを移動させる際に, 現実のオブジェクトに 6 軸でばね拘束されたクローンを実装し, 仮想オブジェクトから受ける反作用力をシミュレートできるようにした. そして, クローンが大きく移動・回転すること

によって仮想オブジェクトを重く知覚させることに成功した。この際、現実のオブジェクトとそのクローンは対照的な色が用いられており、位置や方向の違いが視覚的に明確になっている。

MR と同様に Pseudo-haptic を利用すると空間的不整合が視認できてしまうインタフェースの一つにタッチパネルがある。伴ら [6] は CD 比をかけたタッチパネル上のオブジェクトを指でドラッグする際に指とオブジェクトの間にバーチャルな紐を表示することで、Pseudo-haptics 効果を高めることに成功した。これはバーチャル紐によって空間的不整合の視認による違和感が低減されたためだと考えられている。

### 3. 予備検証

予備検証として MR 空間内と VR 空間内における重さ知覚 Pseudo-haptics の効果を調べた。

9 人に対して実験を行った結果、MR での Pseudo-haptics 効果が下がった参加者が 4 名、VR と MR で同様に Pseudo-haptics が生じた参加者が 5 名いた。この個人差の原因を考察するため、HMD の映像を分析したところ、MR で Pseudo-haptics 効果の低減が起きる参加者は、手が箱から離れた際に頭部方向が手の方に引かれる傾向があった。頭部方向は視覚的注意に影響を与える [7] ため、これは意識が手のほうに向くことで空間的不整合による違和感を強く覚え、Pseudo-haptics 効果が低減されたのではないかと考えられる。

以上の検証から持ち上げ際の視線方向が MR での Pseudo-haptics 効果に影響を与えるという仮説を立てた。

## 4. 実験

予備検証の結果を踏まえ、MR 空間と VR 空間における重さ知覚 Pseudo-haptics 効果の違いと注視対象が重さ知覚 Pseudo-haptics 効果に与える影響を検証した。

### 4.1 実験参加者

実験参加者は 21 歳から 25 歳（平均年齢 22.8 歳）で男性 7 名、女性 1 名の合計 8 名であった。

### 4.2 実験条件

実験条件は実装環境が 3 条件、注視対象が 2 条件の計 6 条件で行った。実装環境は図 2 のように箱と手の CD 比が一致する VR 空間、手の CD 比が 1.0 で固定の VR 空間、手の CD 比が 1.0 で固定の MR 空間の 3 種類である。簡単のため、以降はそれぞれの条件を”VR-CD 比一致”、”VR-CD 比不一致”、”MR-CD 比不一致”とする。VR-CD 比不一致の条件を用意したのは、Pseudo-haptics 効果の違いが空間的不整合を視認したことによるものなのか、周りの環境が VR か MR かという違いによるものなのかを検証するためである。また、注視対象は箱を持ち上げる際に注視する対象のことで”箱注視”か”手注視”を指示した。箱がずれる条件では手注視よりも箱注視の条件のほうが空間的不整合を意識せず、Pseudo-haptics 効果が上がると考えた。

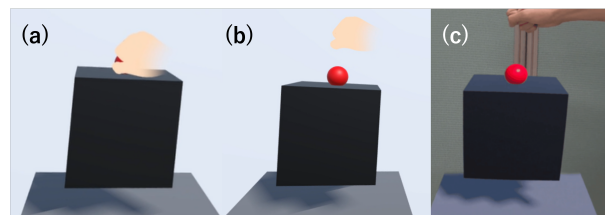


図 2: 実装環境別比較箱持ち上げ時の映像。(a)VR-CD 比一致、(b)VR-CD 比不一致、(c)MR-CD 比不一致



図 3: 実験参加者から見える映像

### 4.3 実験手順

タスクの流れは以下の通りである。まず図 3 のように VR または MR 空間内でバーチャルな台の上に二つの箱を配置し、右の箱を CD 比 1.0 の基準箱、左の箱を CD 比 0.5 の比較箱とした。参加者は指示された注視対象を見ながらこの箱を右、左、右、左の順で交互に持ち上げ、その後比較箱の重さを評価した。重さの評価は基準箱の重さを 100 としたときの比較箱の重さをバーチャル空間内のタッチパネルを操作することで回答させた。

参加者は実験前に全条件について練習を行った。これは VR 空間と MR 空間の切り替えや箱から手が離れることを不審に感じ、実験結果に影響が出ることを防ぐためである。6 条件について 3 試行ずつ計 18 試行のタスクをランダムに行った後、実験中感じたことについて自由回答形式でアンケートを行った。

### 4.4 実験結果

各条件における重さ評価値の分布を箱ひげ図として図 4 に示す。また、実装環境および注視対象の 2 要因が重さ評価に及ぼす影響を調べるため、統計検定を実施した。なお、本稿で報告する統計検定の有意水準はすべて 5% とした。

得られた実験データの残差について、Shapiro-Wilk 検定にて正規性を確認したところ、正規分布との差が有意であった。そのため、ノンパラメトリックなデータにも適応可能な整列ランク変換 (Aligned Rank Transform: ART [8]) を用いた統計検定を行った。ART による二次元配置反復測定分散分析の結果を表 1 に示す。分散分析の結果主効果が実装環境について有意であり ( $p < 0.001$ )、注視対象については有意差

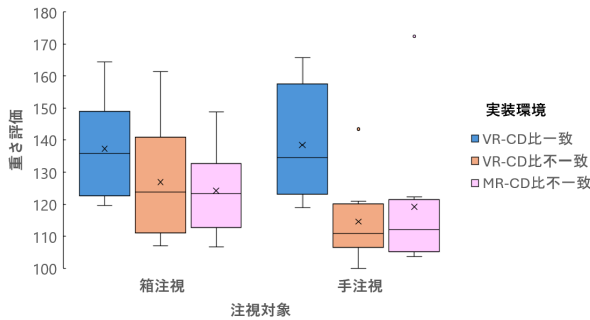


図 4: 各条件における重さ評価の分布

表 1: 実装環境と注視対象に関する ART-ANOVA の結果

実装環境	注視対象	交互作用
$F_{2,14} = 9.23$	$F_{1,7} = 3.99$	$F_{2,14} = 0.983$

■ :  $p < .001$ , □ : n.s.

が認められなかった ( $p=0.0537$ )。また実装環境と注視対象の要因間の交互作用に有意差は見られなかった ( $p=0.384$ )。有意差の見られた実装環境の主効果に関して Holm 法による多重比較を行った。その結果、VR-CD 比一致と VR-CD 比不一致間、VR-CD 比一致と MR-CD 比不一致間に有意差が認められたが、VR-CD 比不一致と MR-CD 比不一致間には有意差が認められなかった。

#### 4.5 考察

実装環境に関する多重比較の結果において、VR-CD 比不一致と MR-CD 比不一致間には有意差が認められなかったため、VR 空間と MR 空間の違いによる Pseudo-haptics 効果への影響は確かめられなかった。一方で VR-CD 比一致と VR-CD 比不一致間、VR-CD 比一致と MR-CD 比不一致間には有意差が認められ、空間的不整合を視認することによって Pseudo-haptics 効果が低減されることが示唆された。

また、実験前に「手と箱がずれる条件では手注視よりも箱注視の条件のほうが空間的不整合を意識せず、Pseudo-haptics 効果が上がる」という仮説を立てたが、注視対象について重さ知覚に有意な差が見られなかった理由について考察する。実験終了後の自由回答アンケートでは「手と箱の CD 比が異なる条件で手を注視したときは重さをほとんど感じなくなった」と仮説を支持する回答をした参加者が 3 名いた。また、手注視の条件と箱注視の条件で重さ知覚に差が見られなかった参加者は、箱注視の条件で空間的不整合の視認以外の要因によって Pseudo-haptics 効果が低減された可能性がある。その根拠として自由回答アンケートでは 4 名の参加者が「箱を注視している時は横方向のブレが気になり、軽く感じた」と回答している。この原因としては今回の実験で使用した比較箱の CD 比が 0.5 と小さく、横方向には CD 比をかけなかったため、縦方向と横方向の CD 比の違いが大きく、箱を注視すると違和感が生じてしまい、

Pseudo-haptics が上手く生起しなかったのではないかと考えられる。

## 5. おわりに

本研究では MR と VR における重さ知覚 Pseudo-haptics 効果の違いと注視対象が Pseudo-haptics 効果に与える影響を検証した。実験の結果、空間的不整合を視認することによって Pseudo-haptics 効果が低減されることが示唆された。また、注視対象の主効果について有意でなかった。この原因は実験終了後のアンケート結果から持ち上げ時の横ブレという予期せぬ要因が箱を注視した際の Pseudo-haptics 生起を妨げたと考えられる。そのため、さらなる予備実験によって適切な CD 比を決定したうえで再度実験を行う必要がある。

謝辞 本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金 (基盤 B) 「課題番号 21H03478」と「課題番号 23H04333」の助成を受けたものである。

## 参考文献

- [1] Adilzhan Adilkhanov, Amir Yelenov, Ramakanth Reddy, Alexander Terekhov, and Zhanat Kappassov. Vibero: Vibrotactile stiffness perception interface for virtual reality. *IEEE Robotics and Automation Letters*, Vol. PP, pp. 1–1, 02 2020.
- [2] Andreas Pusch and Anatole Lécuyer. Pseudo-haptics: from the theoretical foundations to practical system design guidelines. In *Proceedings of the 13th International Conference on Multimodal Interfaces, ICMI '11*, p. 57–64, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.
- [3] Yusuke Ujitoko and Yuki Ban. Survey of pseudo-haptics: Haptic feedback design and application proposals. *IEEE Transactions on Haptics*, Vol. 14, No. 4, pp. 699–711, 2021.
- [4] Majed Samad, Elia Gatti, Anne Hermes, Hrvoje Benko, and Cesare Parise. Pseudo-haptic weight: Changing the perceived weight of virtual objects by manipulating control-display ratio. In *Proceedings of the 2019 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '19*, p. 1–13, New York, NY, USA, 2019. Association for Computing Machinery.
- [5] Paul Issartel, Florimond Guéniat, Sabine Coquillart, and Mehdi Ammi. Perceiving mass in mixed reality through pseudo-haptic rendering of newton's third law. In *2015 IEEE Virtual Reality (VR)*, pp. 41–46, 2015.
- [6] Yuki Ban and Yusuke Ujitoko. Enhancing the pseudo-haptic effect on the touch panel using the virtual string. In *2018 IEEE Haptics Symposium (HAPTICS)*, pp. 278–283, 2018.

- [7] Ryoichi Nakashima and Satoshi Shioiri. Facilitation of visual perception in head direction: Visual attention modulation based on head direction. *PLoS ONE*, Vol. 10, No. 4, 4 2015.
- [8] Jacob O. Wobbrock, Leah Findlater, Darren Gergle, and James J. Higgins. The aligned rank transform for nonparametric factorial analyses using only anova procedures. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '11*, p. 143–146, New York, NY, USA, 2011. Association for Computing Machinery.