



逆遠近法的錯視による Pseudo Haptics 効果の検証

Verification of Pseudo Haptics Effect by an Inverse Perspective Illusion

一丸裕介¹⁾, 嵯峨智²⁾

Yusuke ICHIMARU, and Satoshi SAGA

- 1) 熊本大学 大学院自然科学教育部 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2 丁目 3 9 番 1 号, ichimaru@saga-lab.org)
2) 熊本大学 大学院先端科学研究部 (〒 860-8555 熊本県熊本市中央区黒髪 2 丁目 3 9 番 1 号, saga@saga-lab.org)

概要: 視覚情報のズレによって疑似的な触力覚を生じさせる Pseudo-Haptics は、奥行き方向での生起率および知覚力覚量が減少することが知られている。我々はこの原因を奥行き方向ではズレが起こりにくいからだと考えた。そこで本稿では、近くの物体を小さくし遠くの物体を大きくする逆遠近法的錯視を用いて、Pseudo-Haptics の重さ知覚を向上させられるかを調査を行った。その結果を報告する。

キーワード: 触覚, Pseudo-Haptics, 錯視

1. はじめに

Virtual Reality (VR) 技術は年々発展しており、様々な産業にも応用されている。そして、高い没入感のある VR 体験を提供するために、触力感の提示が必要である。そこでデバイスを使わずに触力覚を提示する方法として Pseudo Haptics 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変化させることで、疑似的な触力覚を提示する錯覚のことである。現在では、Pseudo Haptics についての研究が数多くされており、VR 上の物体の重さ [1, 2] などを知覚可能にさせることが知られている。その一方で、それらの効果の大きさに限界があることや個人差があることが問題となっている [3, 4]。また奥行き方向では水平方向や垂直方向よりも生起率・知覚力覚量が減少することが知られている [5]。この原因として、我々は Pseudo Haptics の生起に必要なズレが水平方向や垂直方向と比べて減少するからであると考えた。

そこで本研究では、奥行き方向での Pseudo Haptics による重さ知覚の効果向上を目的として、逆遠近法的錯視が与える感覚的な遠近感の差が影響を及ぼすかについて調査を行なった。そのために、VR 空間で逆遠近法的錯視が知覚される距離に与える影響を検証し、その後物体を押したときに知覚される重さと移動距離についての影響を検証した。

2. 提案手法

2.1 Pseudo Haptics

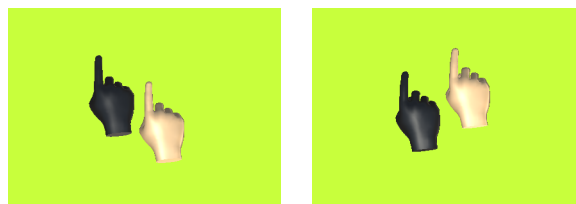
我々が提案する Pseudo Haptics は Head Mounted Display (HMD) によってハンドトラッキングされた手の奥行き方向 (z 方向) に CD 比を加え、実際の手の動きと表示される VR 上での手の動きにズレを与え、生起させる。

実験環境は Unity を用いて作成を行い、VR 空間上に押す対象となる箱 (一辺が 0.1 m の正方形)、ハンドトラッキ

ングした実際の手 (透明) とそれに CD 比を加えた見せかけの手 (薄橙色) を用意する。箱は箱の正面が視点の位置 ($z = 0$ m) から 0.3 m の位置に来るように設置する。通常の状態では CD 比を 1.0 としておき、箱に人差し指の先端が触れた瞬間から CD 比を変化させる。見せかけの手の移動量を ΔZ_{Fake} とし、実際の手が箱に触れた瞬間の z 方向の位置を Z_{Start} 、箱を押した移動量を ΔZ_{Real} とすると、これらの関係式は式 1 のように表すことができる。

$$\Delta Z_{Fake} = Z_{Start} + \Delta Z_{Real} \times CD \quad (1)$$

以下に CD 比が 0.8, 1.2 の場合において、実際の手と見せかけの手の位置の変化を上から見た図 1 に示す。位置の差を示すために、実際の手の色を透明から黒色に変更した。



(a) CD 比が 0.8 のとき (b) CD 比が 1.2 のとき

図 1: 実際の手と見せかけの手の位置

2.2 逆遠近法的錯視

逆遠近法的錯視とは、近くにあるものを大きく描き、遠くにあるものを小さく描く技法である。そして、線遠近法のように消失点を設け、それを視点 (0 m) から $-z$ 方向へ位置させ、拡大度を設定した。Unity 上で直線レーン (以下 Straight)、消失点の位置が視点から -6 m にある錯視レーン (以下 Illusion6)、消失点の位置が視点から -2 m にある錯視レーン (以下 Illusion2) を用いて実験を行った。逆遠近法を用いる目的は視対象までの知覚される距離を短くする

ことで、Pseudo Haptics の生起に必要な視覚情報とのズレを違和感なく大きくすることである。これにより、Pseudo Haptics の重くなる知覚を向上させることが可能であると考える。

Illusion6 では、レーン上の棒の大きさ (0.6 m) を +z 方向へ 0.25 m 進むごとに棒の高さを約 0.025 m 拡大させる。また箱の大きさが 0.1 m であるため、箱の大きさの拡大度は 0.25 m ごとに 0.0042(≒ 0.025/6) m となる。そして、Illusion2 では、棒の大きさを +z 方向へ 0.25 m 進むごとに棒の高さを約 0.075 m 拡大させる。こちらも箱の大きさが 0.1 m であるため、箱の大きさの拡大度は 0.25 m ごとに 0.0125(= 0.075/6) m となる。加えて錯視レーンでは手の大きさを 0.2 m として、同様に変化させる。Straight では棒の大きさ、箱の大きさ、手の大きさは距離に応じて変化させず、常に一定となっている。これらのレーンを横から見た図を図 2 に示す。

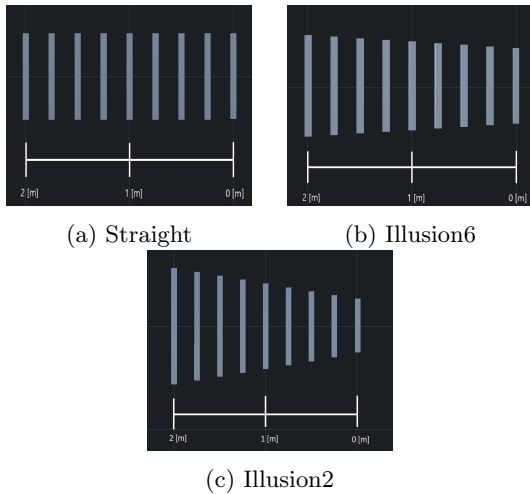


図 2: 横から見たレーンの様子

3. 実験

VR 環境下で逆遠近法的錯視による Pseudo Haptics の影響を調べるために 2 つの実験を行った。実験 1 では、逆遠近法的錯視が視対象までの距離感に与える影響を調べるために、Straight, Illusion6, Illusion2 の 3 つのレーンを使った視対象までの距離感をマグニチュード推定法で比較した。実験 2 では、実験 1 と同様な 3 つのレーン上で箱を押し、知覚される重さと移動距離をマグニチュード推定法を用いて比較した。2 つの実験は参加者 8 名 (男性 7 名, 女性 1 名, 21-23 歳) に対して実施した。

3.1 実験 1: 逆遠近法的錯視による物体までの視覚的な距離の変化

参加者は椅子に座った状態で Meta Quest 2 を装着する。そして標準刺激として 3 秒間表示される Straight 上にある白いラインの位置 (0.3 m) から箱 (箱の正面の位置 0.6 m) までの距離を覚える。標準刺激での距離の値を 10 として、その後ランダム順で表示される比較刺激での距離を標準刺激での距離より遠く (近く) に感じると値を大きく (小さ

く) して評価する、マグニチュード推定法を用いる。

標準刺激と比較刺激は交互に表示され、刺激が変わるごとに画面を暗くする。比較刺激では Straight, Illusion6, Illusion2 にそれぞれ箱の正面の位置を 0.55 m, 0.575 m, 0.6 m, 0.625 m, 0.65 m と変化させたもの、計 15 パターンを用意し、各 3 回ずつ行う。実験中の VR 空間の標準刺激 (Straight で箱の正面の位置が 0.6 m), 比較刺激 1 (Illusion6 で箱の正面の位置が 0.6 m), 比較刺激 2 (Illusion2 で箱の正面の位置が 0.6 m) を以下の図 3 に示す。

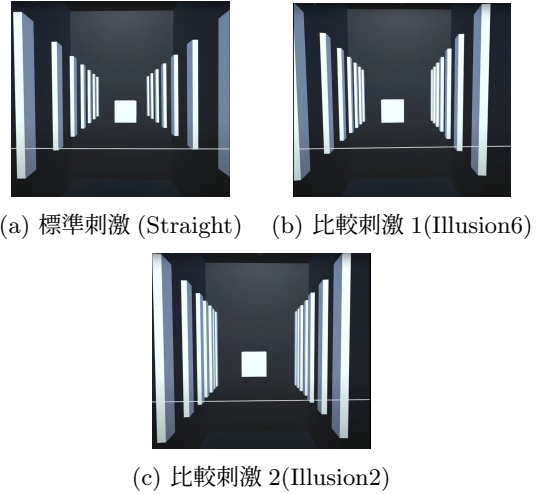


図 3: VR 空間の様子

3.2 実験 1 の結果

実験結果として扱う数値は回答された値を標準化したものであり、距離の評価値とする。距離の評価値を z とし、回答された値を x , そしてそれらの平均値 \bar{x} , 標準偏差 σ を用いて、 z は以下の式 2 により求める。

$$z = \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \tag{2}$$

各レーンと物体の位置の 2 要因が評価値に及ぼす影響を確認するために、距離の評価値に関する統計検定を実施した。なお、統計検定の有意水準はすべて 5 % とした。

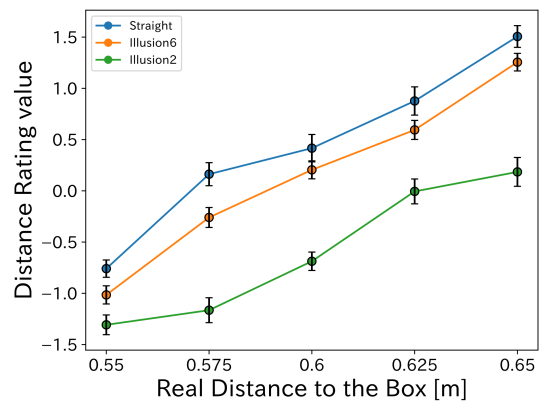


図 4: 各条件における知覚された距離の評価値平均

参加者の評価値の平均を図 4 に示す。図 4 より、箱の正面の位置が遠くなるほど評価値が高くなっている。また、

Illusion6 は Straight よりも評価値が低いが、あまり差がみられないことがわかる。一方で、Illusion2 は Illusion6 や Straight と比べて、評価値が低く、視対象が遠くなくても評価値が上がっていないことがわかる。

そして統計検定は 3 つのレーンの同じ位置条件ごとに分けて行なった。それぞれの 3 群のデータについて Shapiro-Wilk 検定を行って正規性を確認したところ、正規分布との有意差が認められた。そのため、対応のあるノンパラメトリックなデータの各群を比較するために、Bonferroni 法により多重性を回避した ($p \approx 0.017$) Wilcoxon の符号順位法検定を行った。その結果を表 1 に示す。

表 1: 同じ位置の条件での検定結果

条件	Straight-Illusion6	Straight-Illusion2	Illusion6-Illusion2
0.55 m	$p = 0.098$	$p = 0.0050$	$p = 0.038$
0.575 m	$p = 0.018$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
0.6 m	$p = 0.35$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
0.625 m	$p = 0.14$	$p < 0.001$	$p = 0.0024$
0.65 m	$p = 0.096$	$p < 0.001$	$p < 0.001$

表 1 より、Straight と Illusion6 では全ての位置条件において有意差が認められなかった。また、Illusion2 は Straight と全ての条件において有意差が認められ、Illusion6 と 0.55 m の条件以外で有意差が認められた。

3.3 実験 1 の考察

図 4、表 1 より、Illusion2 は Illusion6 と比べて評価値が低く、Straight との全ての位置条件において有意差が出ていることから、消失点を視点に近づけさせることで、視対象までの知覚される距離を短くさせることが可能であると示唆される。そして、Illusion6 は Straight との全ての条件において有意差が出ていないことから、消失点が -6 m 以下のとき、逆遠近法的錯視が知覚される距離にほとんど影響を与えられないと思われる。

また、Illusion2 と Straight の評価値の差は箱の正面の距離が 0.55 m のときが最も小さいことから、逆遠近法的錯視は視対象との距離が近いと、知覚される距離はあまり変わらないことが考えられる。

これらのことから、逆遠近法的錯視は視対象までの知覚される距離を減少させ、その効果は消失点の位置を近づけるほど大きくなることが示唆される。

3.4 実験 2: 逆遠近法的錯視を用いた Pseudo Haptics による知覚された重さおよび移動距離の変化

参加者には椅子に座った状態で Meta Quest 2 を装着し、利き手をハンドトラッキングする。そして、箱を押す練習と標準刺激の重さと移動距離を覚えてもらうために 5 回箱を人差し指で押しってもらう。標準刺激は Straight 上にある白いラインの位置 (0.3 m) に箱の正面が来るように置き、箱の正面が 0.6 m に来るまで押しってもらう。このとき CD 比は 1.0 とし、実世界の手の移動量と VR 空間上の手の移動量は同じになるようにする。重さは箱を押ししたときに知覚されたものとし、移動距離は箱が白いラインから進んだ距離とする。標準刺激での知覚された重さ、移動距離をどちら

も 10 として、その後ランダム順に行う比較刺激での知覚された重さまたは移動距離が標準刺激よりも重く (軽く) または長く (短く) 感じられれば値を大きく (小さく) して評価する、マグニチュード推定法を用いる。標準刺激と比較刺激は交互に行われ、刺激が変わるごとに画面を暗くする。比較刺激では標準刺激と同様に箱を押してもらい、Straight, Illusion6, Illusion2 でそれぞれ CD 比が 0.8, 1.0, 1.2 と変化させたもの、計 9 パターンを 3 回ずつ行う。以下に VR 空間上で各レーンの押し切った状態を図 5 に示す。

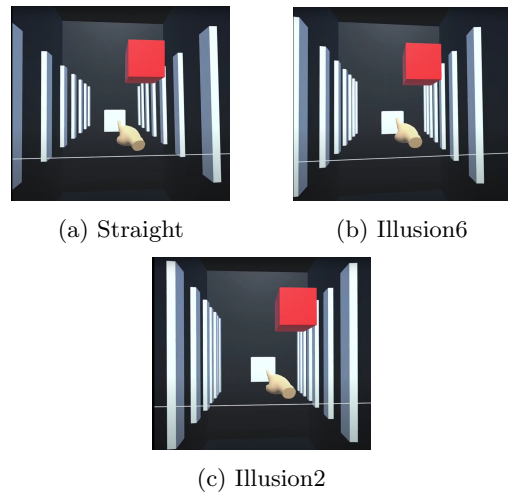


図 5: 押し切った状態

押す動作は図 5a, 5b, 5c からわかるように、画面上部に設置してある箱のオブジェクトの色が赤くなるまで行う。赤くなれば、箱は動かない設定にしている。

3.5 実験 2 の結果

実験結果として扱う数値は、回答された値を標準化したものであり、重さの評価値、移動距離の評価値とする、それぞれの評価値を z_{weight} , $z_{distance}$ とし、実験 1 と同様な計算式によって算出する

参加者の重さの評価値の平均を図 6 に、移動距離の評価値の平均を図 7 に示す。図 6 より、CD 比が 0.8 のときは Illusion6 の評価値が最も低く、1.0 や 1.2 のときは Straight の評価値が最も低いことがわかる。また、CD 比が 0.8 のときに Illusion6 と Illusion2 に評価値に差があったものの、それ以外では差がないことがわかる。

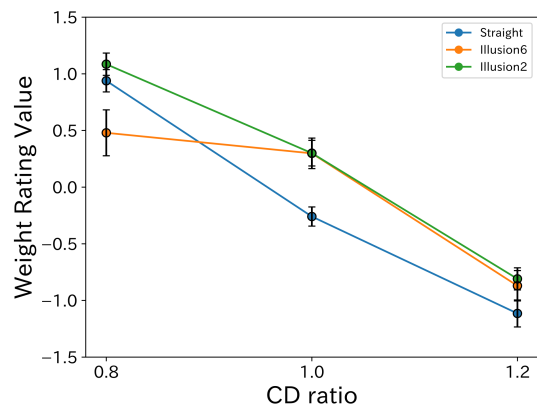


図 6: 各条件における重さの評価値の平均

図7より、Illusion2は他の2つのレーンと比べて評価値が低く、最も移動距離が短いと知覚されていることがわかる。また、Illusion2はIllusion6と比べて、Straightとの差が大きいことがわかる。

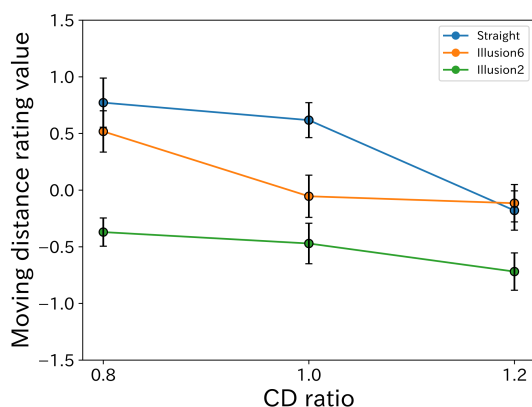


図7: 各条件における移動距離の評価値の平均

そして統計検定は3つのレーンを同じCD比条件ごとに分けて行なった。それぞれの3群のデータについてShapiro-Wilk検定を行って正規性を確認したところ、正規分布との有意差が認められた。そのため、対応のあるノンパラメトリックなデータの各群を比較するために、Bonferroni法により多重性を回避した($p \approx 0.017$) Wilcoxonの符号順位検定を行った。その重さの検定結果を表2に、移動距離の検定結果を表3示す。

表2: 同じCD比の条件での重さの検定結果

条件	Straight-Illusion6	Straight-Illusion2	Illusion6-Illusion2
0.8	$p = 0.14$	$p = 0.26$	$p = 0.018$
1.0	$p = 0.0089$	$p = 0.0012$	$p = 0.73$
1.2	$p = 0.18$	$p = 0.061$	$p = 0.80$

表3: 同じCD比の条件での移動距離の検定結果

条件	Straight-Illusion6	Straight-Illusion2	Illusion6-Illusion2
0.8	$p = 0.33$	$p < 0.001$	$p < 0.001$
1.0	$p = 0.013$	$p < 0.001$	$p = 0.15$
1.2	$p = 0.88$	$p = 0.10$	$p = 0.031$

表2より、CD比が1.0のとき、それぞれの錯視レーンはStraightとの有意差が認められた。一方で、Illusion6とIllusion2は全てのCD比条件で有意差が認められなかった。

表3より、StraightとIllusion6はCD比が1.0のときに有意差が認められ、StraightとIllusion2はCD比が0.8と1.0のときに有意差が認められた。また、Illusion6とIllusion2ではCD比が0.8のとき、有意差が認められた。

3.6 実験2の考察

図6、表2より、CD比が1.0のときIllusion6とIllusion2はStraightよりも評価値が高く有意差が認められたが、それ以外の条件では有意差が認められていない。このことから、逆遠近法的錯視はPseudo Hapticsの重さ知覚にあまり影響を及ぼさないことが推察される。また、Illusion6と

Illusion2では全てのCD比条件で有意差が出ていないことから、消失点の位置による影響は小さいことが考えられる。

図7、表3より、Illusion2がIllusion6よりも評価値の値が低く、Straightと比較したときの p 値が低いことから、消失点の位置を近づけるほど逆遠近法的錯視による知覚される移動距離が短くなると示唆される。

これらのことから押す動作において、逆遠近法的錯視は消失点の位置を近づけるほど知覚される移動距離を減少させる可能性があるが、Pseudo Hapticsの重さ知覚を向上させられないことが考えられる。

4. まとめ

本研究では、押す動作においてPseudo Hapticsによる重さ知覚の効果向上を目的とし、逆遠近法的錯視による感覚的な遠近感の差が影響を及ぼすかについて検証を行なった。そのため、実験1では逆遠近法的錯視が知覚される距離に与える影響を調査し、実験2では物体を押したときに知覚される重さと移動距離に与える影響について調査した。

結果として、実験1より視対象までの知覚される距離が減少し、消失点の位置が近いときほどその効果が増加すると思われた。そして実験2より、知覚される移動距離が減少させる可能性をもっているが、Pseudo Hapticsの重さ知覚を向上させられないことが示唆された。このことから、逆遠近法的錯視はPseudo Hapticsの重さ知覚を向上させることができない可能性があると思察される。

参考文献

- [1] Lionel Dominjon, Anatole Lécuyer, J-M Burkhardt, Paul Richard, and Simon Richir. Influence of control/display ratio on the perception of mass of manipulated objects in virtual environments. In *IEEE Proceedings. VR 2005. Virtual Reality, 2005.*, pp. 19–25. IEEE, 2005.
- [2] Michael Rietzler, Florian Geiselhart, Jan Gugenheimer, and Enrico Rukzio. Breaking the tracking: Enabling weight perception using perceivable tracking offsets. In *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, pp. 1–12, 2018.
- [3] 宇治土公雄介, 伴祐樹. Pseudo-haptics 効果の個人差要因解明の基礎検討, 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集. 第26回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2021-9, 2021.
- [4] 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.
- [5] 石井雅博, 佐藤秀一. 3次元空間内における pseudo-haptics について. 映像情報メディア学会誌, Vol. 66, No. 6, pp. J188–J191, 2012.