



# バーチャルハンドの視触覚提示が 曲率操作型リダイレクションに与える効果の検討

松本啓吾<sup>1)</sup>, 鳴海拓志<sup>1)</sup>, 谷川智洋<sup>1)</sup>, 廣瀬通孝<sup>1)</sup>

1) 東京大学 大学院情報理工学系研究科 (〒 113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, {matsumoto, narumi, tani, hirose}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

**概要:** ヘッドセットを通して提示する映像を変化させることで体験者の空間知覚を操作し, 広大な VR 空間を限られた実空間に圧縮することを可能にするリダイレクションという方法論が提案されている. 本稿では, VR 空間内で体験者の手にあたるバーチャルハンドの視覚提示とバーチャルハンドの視覚提示と触覚・自己固有感覚提示により形状知覚操作を行い, それに伴って生じた空間認知の変化が, リダイレクションの基本的な手法の一つである曲率操作に対して与える効果について検討する.

**キーワード:** 視触覚間相互作用, リダイレクテッド・ウォーキング, 空間知覚操作

## 1. はじめに

本論文では, 視触覚間相互作用を用いたリダイレクション (Redirection) 手法について論じる. リダイレクションとは, 歩行時に主に視覚に提示する映像を変化させることで空間知覚操作を行い, 限られた実空間の中で広大なバーチャル空間を歩いて探索することを可能にする方法論である [1]. 先行研究では, 実際は半径 22 m 以上の円弧状の歩行経路を歩くユーザにヘッドマウントディスプレイを通してバーチャル空間上で直線状の歩道の上を歩いている映像を提示することで, 実際は曲線上を歩いているにも拘らず, 直進しているとユーザに知覚させることができることが知られている [2]. また, 視覚操作に加えて触覚手掛かりを用いることで, 半径 6 m の円弧上の経路を歩くユーザに VR 空間上で直進していると感じさせることができたとする報告もなされている [3]. 本論文では, 触覚的手掛かりを用いたリダイレクションに関して, VR 空間上でユーザの手にあたる部分にバーチャルハンドを視覚提示することで視触覚間相互作用を生起させることで, 従来の触覚手掛かりのみを提示する手法よりも効果的な空間知覚操作を試みる.

## 2. 実験目的

触覚・自己固有感覚刺激に対応したバーチャルハンドを VR 空間上に表示することで視触覚間相互作用が生起させる条件とバーチャルハンドを表示せずに触覚・自己固有感覚提示のみを行なった条件下での曲率操作の効果を比較することで, 形状知覚操作によって空間知覚の変化が生じるかを検証する.

### 2.1 システム構成

ユーザは HTC Vive ヘッドセット (以下, ヘッドセット) を頭部に, Vive トラッカー付きハンドバンド (以下, トラッカー) を両手に, ヘッドホンを頭部に装着した. ヘッドセットは片目当たり 1080 × 1200 ピクセルの解像度, 90Hz のリフレッシュレートおよび約 110° の水平視界を持つ. また, 2 台のベースステーションから投影される赤外線パターンをヘッドセットに内蔵されている IR カメラで捉えることで, 最大 4.6 m 四方の範囲の動きをサブミリレベルの正確さで捉えることができるトラッキングシステムを備えており, ジャイロセンサによって姿勢を取得することができる. また, トラッカーはヘッドセット同様内蔵されている IR カメラから自身の位置を, ジャイロセンサから姿勢を取得することができる. ヘッドホンからはホワイトノイズを流し, ユーザが周囲の環境音から自身の位置を推定できないようにした.

これらのシステムに加えて, ユーザがテーブルで触れることで触覚刺激を得る対象として, 高さ 0.72 m 縁が半径 2 m の円弧の一部となるような机を 3 台用意した. ユーザはこれらのテーブルの縁に手で触れることで触覚・自己固有感覚から刺激を得る. 以下, この触覚・自己固有感覚刺激のことを触覚手掛かりと呼ぶ.

図 1 の左上に示すような高さ 0.72 m のテーブルが配置された部屋で構成された VR 空間をユーザの視点に合わせてレンダリングし, ヘッドセットを通してユーザに視覚提示した. レンダリングには Unity3D 2017 を用い, フレームレートは 75 fps に保った.

ユーザに提示する映像のレンダリング, システム管理, データ記録には 2.6-GHz Core i7 プロセッサ, 16-GB のメインメモリ, NVIDIA GeForce GTX1060M グラフィックカードを搭載した intel PC を用いた.

ユーザに提示する映像のレンダリング, システム管理, データ記録には 2.6-GHz Core i7 プロセッサ, 16-GB のメインメモリ, NVIDIA GeForce GTX1060M グラフィックカードを搭載した intel PC を用いた.

## 3. 座標変換アルゴリズム

実際は半径 2 m の円形のテーブルの縁に手で触れながら歩くユーザに, VR 空間上で半径 10 m の円形のテーブル

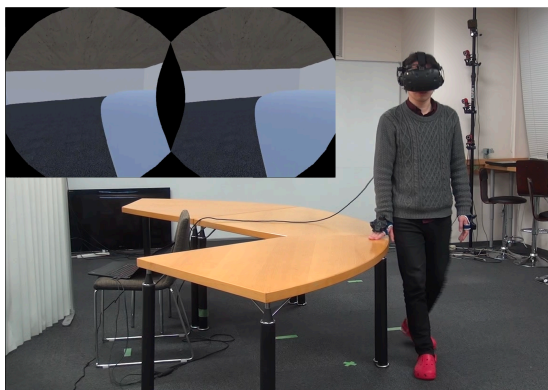


図 1: 実験風景および被験者に提示した VR 環境

や直方形のテーブルの縁に手で触れながら歩く映像を提示するため、以下の座標変換アルゴリズムを頭部と手部に適用した。手部の座標変換を行うことで、図 2 のように VR 空間で表示するテーブルの形状が実空間のテーブルの形状と異なるときに生じるバーチャルハンドの位置と姿勢のずれを補正することができる。

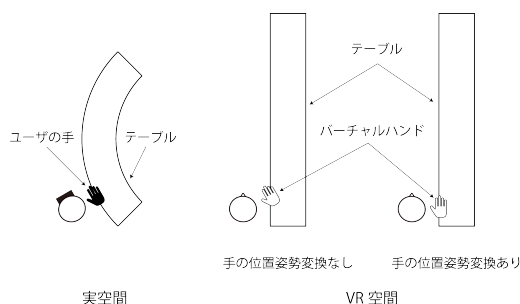


図 2: 手部の位置姿勢操作の有無によるバーチャルハンドの位置と姿勢

実空間と VR 空間ともに同じ曲率の曲線上を歩行する場合は、実空間におけるユーザの位置と VR 空間におけるユーザの位置とを一対一対応した。

実空間で円弧の一部を歩行するユーザに、VR 空間上で異なる半径の円弧の一部を歩行していると視覚提示するため、Langbehn ら [4] の曲げゲインを参考に図 2 に示すような座標変換を行った。このとき、実空間上で歩行を開始する位置を  $s_{real}$ 、実空間での歩行経路の円弧の中心を  $c$ 、VR 空間での歩行経路の円弧の中心を  $c'$ 、実空間でのユーザの座標を  $p$ 、VR 空間でのユーザの座標を  $p'$  としている。

$$\cos(\alpha) = \frac{(c-s) \cdot (c-p)}{|c-s| \cdot |c-p|} \quad (1)$$

実際の歩行距離は  $\alpha \cdot r_{real}$  であり、実空間と VR 空間とで歩行距離は変わらないことから VR 空間での回転量は以下のようになる。

$$\beta = \alpha \cdot \frac{r_{real}}{r_{virtual}} \quad (2)$$

これより VR 空間の円弧上の位置は以下のようになる。

$$q'_x = c'_x + r_{virtual} \cdot \cos(\beta) \quad (3)$$

$$q'_y = c'_y + r_{virtual} \cdot \sin(\beta) \quad (4)$$

$q'$  にオフセットを加えることで、VR 空間上でのユーザの位置  $p'$  が得られる。

また、VR 空間でのユーザの姿勢は実空間でのユーザの姿勢に対して鉛直方向に  $\alpha - \beta$  回転することで補正される。

実空間で円弧の一部を歩行するユーザに、VR 空間上で直進していると視覚提示するため、以下の座標変換を行った。

ここで、実空間上で歩行を開始する位置を  $s_{real}$ 、実空間の歩行経路の円弧の中心を  $c_{real}$ 、実空間でのユーザの座標を  $p_{real}$ 、VR 空間でのユーザの座標を  $p_{virtual}$  とする。

$$\cos(\alpha) = \frac{(c-s) \cdot (c-p)}{|c-s| \cdot |c-p|} \quad (5)$$

このとき実際の歩行距離は  $\alpha \cdot r_{real}$  であり、実空間と VR 空間とで歩行距離は変わらないことから VR 空間の直線上での位置  $p'$  は以下のようになる。

$$q'_x = 0 \quad (6)$$

$$q'_y = c'_y + \alpha \cdot r_{real} \quad (7)$$

$q'$  にオフセットを加えることで、VR 空間上でのユーザの位置  $p'$  が得られる。

また、VR 空間でのユーザの姿勢は実空間でのユーザの姿勢に対して鉛直方向に対して  $\alpha$  回転させる。

## 4. 実験設定

### 4.1 実験被験者

女性 3 名、男性 9 名（年齢 21-25 歳、平均年齢 23.3 歳）を対象に実施した。被験者の視力または矯正視力は全員正常値だった。実験中、7 名の被験者がメガネを、1 名の被験者がコンタクトレンズを着用しており、4 名は裸眼であった。また被験者は全員右利きであった。いずれの被験者からも視覚及び平衡感覚の異常は報告されなかった。被験者全員が以前にヘッドマウントディスプレイおよび 3D ゲームの経験があった。いずれの被験者も今回の実験について事前知識はなかった。被験者には実験協力金として学内の規定に基づき、一人あたり 1,000 円のアマゾンギフト券を渡した。

#### 4.1.1 実験計画

実験は図 3 三条件の VR 空間上での歩行経路（半径 2.5 m, 10 m, 直線）と手の表示の有無の二条件の組み合わせ計六条件について行なった。各条件について左回りと右回りの二通りの歩行経路をそれぞれ 2 回ずつ行なったため、被験者は計  $3 \times 2 \times 4 = 24$  試行を行った。また、試行順は完全無作為化した。

#### 4.1.2 アンケート

酔いに関するアンケートとして SSQ[5] を、没入感に関するアンケートとして SUS PQ [6] を用いた。また実験中、各試行毎に直進運動感覚と違和感について調査するため 7 段階のリッカート尺度を用いた。このとき提示した質問文および選択肢を以下に示す。



図 3: 半径 2.5m 図 4: 半径 10m 図 5: 直線

- 直進していたと感じましたか?それとも曲がっていたと感じましたか?

1: 曲がっていた - 7: 直進していた

- 違和感はありましたか?

1: 全くなかった - 7: 非常にあった

#### 4.2 実験の手続き

事前説明, 事前アンケートへの記入, 実験試行, 事後アンケートへの記入, デブリーフィングを含めた被験者 1 人あたりの実験時間は合計 45 分であった。また, 被験者はヘッドセットを 1 試行あたり約 30 秒, 実験全体を通して 15 分程度着用した。

実験室に入室した被験者は「VR 空間を歩行する際の VR 酔いについての実験」という偽の実験目的の説明を受け, 同意書に記入を行なった後, 年齢・性別・利き手・身長・眼鏡およびコンタクトレンズの使用の有無・VR および 3D ゲーム体験の有無・平衡感覚および視覚に異常がないかについてのアンケートと SSQ に回答した。

アンケートに回答後, ヘッドセットを装着させ両眼間隔に合わせてレンズ間距離を調整した。その後, 一旦ヘッドセットを取り外し, 左右の手にトラッカーを装着させた。

トラッカーを装着後, 被験者は実験者の誘導に従って初期位置まで移動した後ヘッドセットを装着した。このとき実験で用いる円形のテーブルを被験者は視認している。

ヘッドセットを装着後ユーザは画面の中央に表示された「Start」いう文字を 2 秒以上見つめることで試行を開始した。試行中はテーブルに近い側の手でテーブルの縁をなぞりながら歩くように指示した。4 m 歩行後, ユーザは視線を用いて VR 空間上に提示された二つの質問に回答した。質問に回答後, ユーザはその場で 180 度回転し, 再度表示された「Start」という文字を 2 秒以上見つめることで試行を行なった。

全ての試行が終了後, 被験者はヘッドセットとトラッカーを外した上で, SSQ および SUS PQ によって構成された事後アンケートに回答した。その後, デブリーフィングを通して感想を記録した。

## 5. 結果

デブリーフィングの際に 3 名の被験者が実験中に VR 空間上に表示した手を一切見ていなかったと報告したため, この 3 名の被験者を除いた 9 名のデータについて解析を行なった。

図 6 は実験に用いた VR 空間上の経路と手の表示の有無

の各条件に対して, 被験者が回答した直線運動感覚の平均値を記載したものである。x 軸は VR 空間上の経路, y 軸は直線運動感覚を示しており, 値が大きいほどより直進していたと知覚していたことを示している。また, エラーバーは標準誤差を示している。

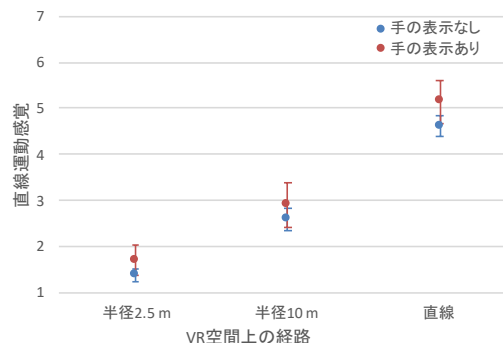


図 6: VR 空間の経路×手の表示の各条件と直線運動感覚との関係

直線運動感覚について二要因参加者内分散分析を行なったところ, 手の表示の有無の主効果について有意差と大きな効果量 ( $F(1, 8) = 10.59, p = .012, partial \eta^2 = .570$ ) がみられた。また, VR 空間上の経路の主効果についても有意差と大きな効果量 ( $F(2, 16) = 42.20, p < .001, partial \eta^2 = .841$ ) がみられた。一方, 交互作用はみられなかった ( $F(2, 16) = .200, p = .821, partial \eta^2 = .024$ )。手の表示の有無による直進運動感覚について事後検定を行なったところ, いずれの VR 空間の経路の条件でも有意差はみられなかった。

図 7 は実験に用いた VR 空間上の経路と手の表示の有無の各条件に対して, 被験者が回答した違和感の平均値を記載したものである。x 軸は VR 空間上の経路, y 軸は違和感を示しており, 値が大きいほど違和感が大きいことを示している。また, エラーバーは標準誤差を示している。

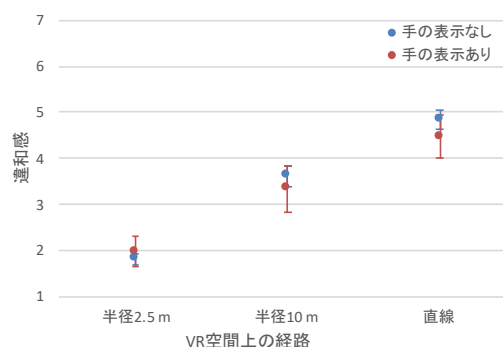


図 7: VR 空間の経路×手の表示の各条件と違和感との関係

違和感について二要因参加者内分散分析を行なったところ, 手の表示の有無の主効果について有意差はみられなかった ( $F(1, 8) = .526, p = .489, partial \eta^2 = .062$ )。一方, VR 空間上の経路の主効果について有意差と大きな効果量 ( $F(2, 16) = 31.71, p < .001, partial \eta^2 = .799$ ) がみら



れた。交互作用はみられなかった ( $F(2, 16) = .639, p = .541, \text{partial } \eta^2 = .074$ )。

図8は実験に用いたVR空間上の経路と手の表示の有無の各条件に対して、被験者の歩行速度の平均値を記載したものである。x軸はVR空間上の経路、y軸は歩行速度を示している。また、エラーバーは標準誤差を示している。

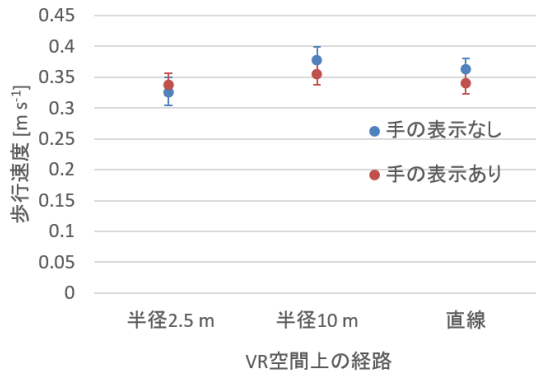


図8: VR空間の経路×手の表示の各条件と歩行速度との関係

歩行速度について二要因参加者内分散分析を行なったところ、手の表示の有無の主効果について有意差と大きな効果量がみられ ( $F(1, 8) = 5.90, p = .041, \text{partial } \eta^2 = .424$ ), VR空間上の経路の主効果についても有意差と大きな効果量 ( $F(2, 16) = 4.44, p < .029, \text{partial } \eta^2 = .357$ ) がみられた。一方、交互作用はみられなかった ( $F(2, 16) = 1.43, p = .268, \text{partial } \eta^2 = .0152$ )。手の表示の有無による歩行速度について事後検定を行なったところ、いずれのVR空間の経路の条件でも有意差はみられなかった。

酔いの程度を示すSSQの平均値は、実験前は7.48であったが、実験後は24.52となり有意に増加していた ( $t(-2.65, 8), p = .029, dz = .885$ )。また、VR空間への没入感を示すSUS PQの平均値は5.24であった。

## 6. 考察

バーチャルハンドの表示の有無で直線運動感覚の主効果に有意差および大きな効果量が生じていた。これはバーチャルハンドの表示により視触覚間相互作用が生起され、テーブルに対する形状知覚が変化したことで空間全体に対する空間知覚操作の効果が向上したためだと考えられる。また、バーチャルハンドの表示の有無で違和感の主効果に変化がなかったことから、バーチャルハンドの表示およびバーチャルハンドの位置操作による違和感を増加は生じないことがわかった。一方、実験の前後で酔いの程度を示すSSQの平均値が有意に増加しており、空間知覚・認知操作が酔いに繋がったと考えられる。また、VR空間への没入感を示すSUS PQの平均値は5.24であり、被験者は実験中に十分な没入感を伴っていたことが確認された。以上より、バーチャルハンドの表示によって視触覚間相互作用を生起させることでVR体験へのクオリティを保ちつつ空間知覚・認知操

作の効果を高めることがわかった。

しかし、今回用いたテーブルの高さが72 cmと低かったため、一度も被験者がバーチャルハンドを見ない場合もみられた。また、バーチャルハンドを見ていたと回答した被験者であってもバーチャルハンドを見ていなかった時間のほうが長かったといった回答が複数寄せられた。一度でもバーチャルハンドを見ることによって形状知覚操作の効果が向上する可能性も考えられるが、視触覚間相互作用を生起させるために歩行時に自然と視界に入る位置にバーチャルハンドを表示することが望ましいと考えられる。

## 7. まとめ

実験から、VR空間にバーチャルハンドの表示を行うことで、提示なしの条件に比べて直進運動感覚がより強く生起されることがわかった。これにより、手の表示による視覚刺激と触覚・自己固有感覚からの刺激によって生起された視触覚間相互作用により形状知覚操作を行うことで、空間知覚操作の効果が向上するという仮説が正しいことが示唆された。

謝辞 本研究の一部は科研費若手研究(A)(16H05866)の助成を受けた。

## 参考文献

- [1] Sharif Razzaque, Zachariah Kohn, and Mary C Whitton. Redirected walking. In *Proceedings of EURO-GRAPHICS*, Vol. 9, pp. 105–106. Citeseer, 2001.
- [2] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *Visualization and Computer Graphics, IEEE Transactions on*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, 2010.
- [3] Keigo Matsumoto, Yuki Ban, Takuji Narumi, Tomohiro Tanikawa, and Michitaka Hirose. Curvature manipulation techniques in redirection using haptic cues. In *3D User Interfaces (3DUI), 2016 IEEE Symposium on*, pp. 105–108. IEEE, 2016.
- [4] Eike Langbehn, Paul Lubos, Gerd Bruder, and Frank Steinicke. Bending the Curve: Sensitivity to Bending of Curved Paths and Application in Room-Scale VR. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 23, No. 4, pp. 1349–1358, 2017.
- [5] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, 1993.
- [6] Martin Usoh, Ernest Catena, Sima Arman, and Mel Slater. Using Presence Questionnaires in Reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Vol. 9, No. 5, pp. 497–503, 2000.