



# 勾配ゲインと曲率ゲインを固定化したリダイレクション

山本達己<sup>1)</sup>, 松本啓吾<sup>2)</sup>, 鳴海拓志<sup>2)</sup>, 谷川智洋<sup>2)</sup>, 廣瀬通孝<sup>2)</sup>

1) 東京大学 学際情報学府 (〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1, yamamoto@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 東京大学 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:** ロール方向の勾配視点操作とリダイレクションにおける曲率操作には密接な関係があると考えられる。本研究では、リダイレクションにおいてロール方向の勾配ゲインを付加することによる曲率ゲインのスレショルドへの影響を、各ゲインを固定した状態で検討する。

**キーワード:** マルチモーダル・クロスモーダル

## 1. はじめに

バーチャル空間における歩行は魅力的な体験の 1 つである。近年のバーチャルリアリティ (VR) 技術の発展により、我々はヘッドマウントディスプレイ (HMD) といったデバイスを通して、室内にしながら広大なバーチャル空間を知覚し、歩行できるようになった。しかし、広大なバーチャル空間を現実空間と 1 対 1 に対応させてしまうと、これらのバーチャル空間における歩行可能な範囲は現実世界のスペースに制限されてしまう。この問題に対し、リダイレクションテッドウォーキング (Redirected Walking, RDW)[9] と呼ばれる方法論が提案されている。この手法では、ユーザが歩行する際の視点の位置を実際とはわずかにずらすことで、バーチャル空間内での歩行経路と実際の経路を乖離させる。その結果、ユーザは限られた物理空間内を移動しながら広大なバーチャル空間を歩行することが可能になる。

RDW では、典型的には並進移動ゲイン・回転量ゲイン・曲率ゲインの 3 種類の操作方法が存在し [12]、いくつかの研究においてこれらのゲインに対する知覚閾値を推定している。また Lengbehn et al.[6]は、現実世界で曲がった経路を歩行しながらバーチャル空間における経路の曲率を変更する手法を提案した。以上はヨー方向の視点操作についての報告だが、ピッチ方向の視点操作についての研究も報告されている。Marchal et al.[7] は高さ・向き・速度効果の 3 種類の視覚的フィードバックを適用して上下に歩く没入感をユーザに提示する方法を提案した。ヨー方向以外の視覚操作に焦点を当てた研究は、歩行体験を拡張する上で重要と考える。

しかしロール方向については、ロール軸に対応する回転ゲインの定義はなされているものの [12]、ロール方向の操作ゲインについて調べた研究は少ない。一方シミュレータの分野では、ヨーとロール方向を同時に考慮した研究が存在する。車の走行体験を再現するためには、旋回に伴う慣性

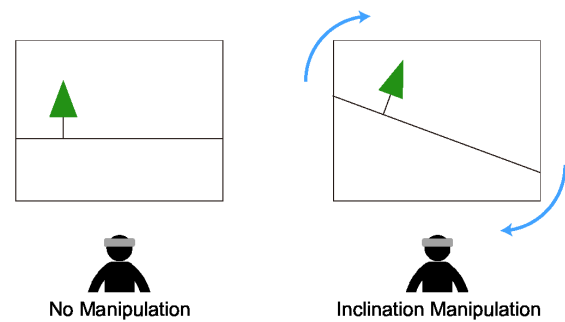


図 1: 勾配操作の概念図

## Explanation of inclination manipulation

力を重力加速度によって代用するドライビングシミュレータが必要となる。Casili et al.[1] は、慣性力に伴う加速度を再現するに当たってどの程度のロール角が最適であるかを検討した。その結果、旋回に伴う車体のロール角に加えて横加速度成分を様々な変化させた結果、発生する実際の加速度の約 35% が最適となった。この結果は、ヨー方向における動きの人間の知覚がロール方向の操作によって操作可能であることを意味すると考える。

### 1.1 知覚閾値

RDW においては、視点操作を強くするほど強力な空間知覚操作によって自由な探索が可能となるが、強力な操作はユーザに違和感を与え視点操作に気づかれてしまう可能性が高いため、ゲインへの知覚閾値が重要となる。知覚閾値とは、人間がどの程度のゲイン操作まで知覚できるか示す値である。Razzaque et al.[8] は、曲率ゲインの知覚閾値を初めて決定しようとしたが、経験者の参加者数や試行回数が不十分であったため信頼できる値を得ることができなかった。

その後、知覚閾値を調査した研究は多数行われている。Steinicke et al.[11] は、ヨー方向のゲインに対し初めて包括的な研究を行った。彼らは二肢強制選択 (2AFC) タスクを

適用した実験を行い、回転・並進移動・曲率ゲインの知覚閾値を算出した。その結果、回転の増加については 49%、減少については 20% と推定した。並進移動ゲインについては、移動距離を 14% 縮小、あるいは 26% 拡大したときに知覚閾値となった。また曲率ゲインについては、実験参加者はバーチャル空間上で直線経路を歩行したとき、22m 以上の半径を持つ円弧の歩行経路については気づかなかった。

これらの操作を適用し、ユーザーを物理的に制約された現実空間内で誘導するいくつかの RDW アルゴリズムが提唱されている [4]。これらのアルゴリズムにおける回転ゲインは一定ではなく、RDW の適用範囲を広げる上では動的に変化するゲインをより議論する必要があると考える。

Grechkin et al.[3] は、曲率ゲインと並進移動ゲインの 2 種類の知覚操作を同時に適用し、曲率ゲインの知覚閾値に対する効果を調査した。その結果、参加者が個別に全体的な傾向に従うことはなかったが、曲率ゲインに対する知覚閾値は平均的には並進移動ゲインの増加とともに減少した。この研究のように、さまざまな種類の知覚操作の組み合わせをさらに検討する必要があると考える。

## 2. 研究目的

関連研究とヨー方向およびロール方向の運動知覚の関連性に基づき、本研究ではヨー方向とロール方向の操作間の相互作用について調べることを目的とした。本研究では特にヨー方向およびロール方向のゲインを一定値に固定させた場合に着目し、勾配ゲインによる人間の曲率知覚への影響を検証した。

## 3. 実験

### 3.1 実験内容

#### 3.1.1 実験参加者

本実験は 16 名の実験参加者に対し行われた。実験参加者はいずれも 20 代であり、男性が 9 名、女性が 3 名であった。被験者のうち 8 名は HMD の使用経験があった。被験者にはあらかじめ実際とは異なる実験目的（「試作した VR システムの評価実験」）を伝え、本実験に対する事前知識を与えなかった。全ての被験者は正常な視力、あるいは矯正視力を有していた。

#### 3.1.2 システム構成

本実験は 4m×3m の屋内空間にて行われた。図 3 に示しているように、実験参加者は HTC Vive HMD を装着し、HTC Vive コントローラーを所持した状態で実験に臨んだ。HMD の解像度は両眼ともに 1080×1280 ピクセルであり、フレームレートは 90Hz、視野角はおよそ 110 度であった。HMD およびコントローラーの座標と回転角は赤外線センサによって検知した。

#### 3.1.3 評価指標

先行研究に則り、本実験では全ての被験者に対し *two alternative forced-choice*(2AFC) タスク [5] と呼ばれる選択課題を課した。2AFC タスクは、ある質問に対しその正誤

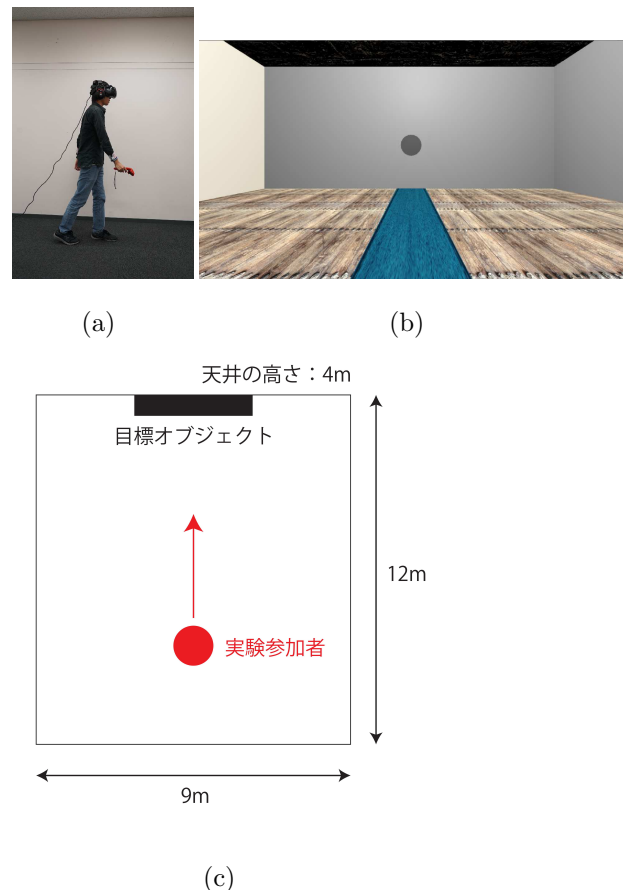


図 2: 実験の設計 (a) 実験時の被験者の様子 (b) 実験で用いたバーチャル空間 (c) バーチャル空間の俯瞰図

を問う Yes-No タスクと比較して選択バイアスが生じる可能性が低いことが示唆されている [10]。本実験では被験者に対し、「実際に歩いた経路はどちらに曲がっていただけましたか？」という質問に「右」または「左」という選択肢から選択する課題を課した。

#### 3.1.4 実験計画

本実験は参加者内計画で、全ての実験参加者は 3×8 の 24 条件に対し各 4 試行の計 96 試行を行った。勾配ゲインについては、なし・右下がり勾配・左下がり勾配の 3 条件を設定し、勾配の値は 1.65° とした。曲率ゲインは曲率 0.1、0.05、0.025、0.0125 の 4 種類の曲率 (すなわち曲率半径 10m、20m、40m、80m) を左右両方向に提示する 8 条件を設定した。実験は完全無作為法で行った。

#### 3.1.5 実験手順

実験 1 と同様に、実験参加者は試行を開始する前に実験についての説明を受け、事前アンケートに回答した。試行の開始時に、実験参加者は屋内を模した平坦なバーチャル空間内に配置され、前方の壁面にある灰色の円盤状のオブジェクトと床面の青いカーペットオブジェクトを目印に、およそ 3.5m まっすぐ歩行した。壁面まで歩行する間に、バーチャル空間をランダムに適用された曲率ゲインおよび勾配ゲインに即して回転した。これにより、実験参加者はバーチャル空間では直線上を歩く映像を見ながら、現実空間で

は曲率ゲインに即した曲線経路を歩行した。

歩行が終了した後、実験参加者は2AFCタスクに回答した。回答はコントローラーの入力によって行われた。回答が終了した後、バーチャル空間を次の試行の準備のために用意したものに切り替え、実験参加者はオブジェクトを目印に次の試行の開始地点に移動した。移動が完了すると再びバーチャル空間が切り替わり、実験参加者は次の試行を開始した。

以上の試行を96試行、1回の休憩を挟んで行った。5分間の休憩を含め、実験全体はおよそ60分で行われた。

3.2 結果

3.2.1 曲率ゲインの知覚閾値

勾配ゲインの知覚閾値を算出するため、2AFCタスクの回答データに対し、Psignifit3 [2] という Python パッケージを用いてカーブフィッティングを行い、被験者ごとに感覚強度曲線を得た。フィッティングには以下に示すシグモイド関数を用いた:

$$y = \gamma + \frac{1 - \gamma - \lambda}{1 + \exp(\frac{x-b}{a})} \quad (1)$$

ここで  $\gamma$  および  $\lambda$  は漸近値、 $a$  および  $b$  はフィッティングパラメータである。

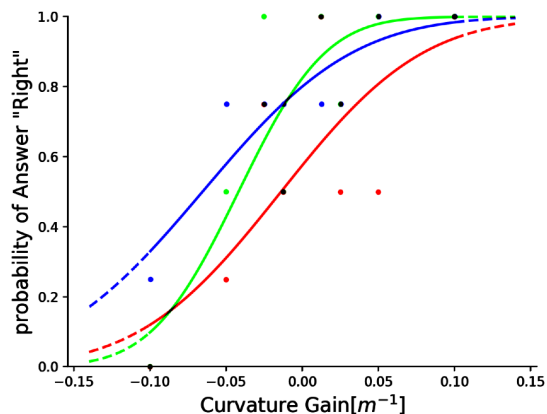
図に各条件において実験参加者が「右」と答えた確率のプロット、および感覚強度曲線の例を示す。また、各勾配ゲインにおける曲率ゲインのPSEおよび各方向への知覚閾値の全参加者平均を表に示す。図に示すように、本実験で得られた実験参加者ごとの曲率知覚は個人差が大きく、PSEおよび知覚閾値の分散が大きくなった。そこで、全参加者のPSEおよび知覚閾値に対しノンパラメトリック検定であるフリードマン検定を行ったところ、左方向の曲率知覚については有意水準5%で有意差が得られた ( $\chi^2=9.125, p = .01044$ ) が、その他の値については有意差が得られなかった (PSE:  $[\chi^2=3.875, p > .05]$  右方向の曲率ゲイン:  $[\chi^2=0.375, p > .05]$ )。

表 1: 曲率ゲインの PSE および各方向への知覚閾値 [ $/m$ ](曲率の負値は左曲がり、正値は右曲がりを示す)

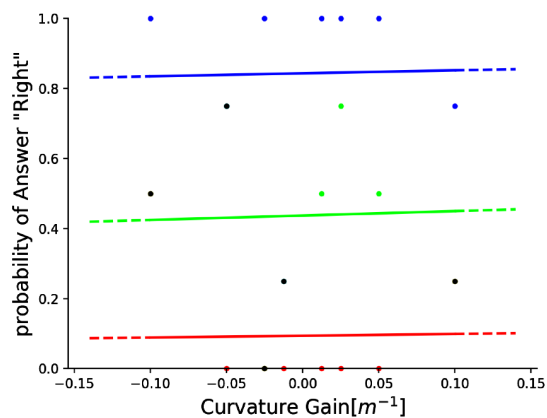
		左方向	PSE	右方向
勾配	左勾配	-1.75	-0.29	1.16
	なし	-1.46	0.01	1.48
	右勾配	-0.84	0.27	1.38

3.3 考察

本実験で算出された曲率ゲインの知覚閾値は、先行研究で報告された値よりも大きかった (すなわち、曲率半径が小さかった)。この主な原因としては、図 (b) に示すように示すように曲率を十分に知覚することができず、フィッティングがうまくいかなかった実験参加者が多かったことが挙げられる。その理由としては、曲率ゲインの設定範囲が適切



(a) VR 経験のある実験参加者の感覚強度曲線



(b) VR 経験の無い実験参加者の感覚強度曲線

図 3: 実験結果 (各図において青色は左下がり勾配、緑色は勾配ゲインなし、赤色は右下がり勾配条件を指す)

でなかったことや、参加者ごとに HMD を用いた VR 経験に差があったことが考えられる。

算出された知覚閾値は、左方向の曲率への知覚閾値については勾配条件感における有意差が認められた。このことから、左方向の曲率への知覚閾値は同方向への勾配ゲイン下において知覚されやすく、逆に右方向への勾配ゲイン下においては知覚されにくくなっていることが示唆された。

4. 結論

本研究ではリダイレクションにおいてロール方向の視点操作を利用する手法に着目し、特に曲率ゲインと勾配ゲインを一定値に固定した条件における影響を調べることを目的とした。

実験においては、ゲインの設定範囲の影響や実験参加者における個人差が大きかったことから、知覚閾値が先行研究で報告された値よりも大きくなった。一方で、本研究で算出された値の中においては、左曲がりの曲率への知覚閾値については、勾配ゲインの方向を変えることで有意差が認められた。この結果から、ロール方向の勾配ゲインはヨー方向の曲率ゲインへの知覚に影響する可能性があると考えた。

今後の展望としては、ゲインの設定範囲をより適切な条件に変更し、勾配ゲインによる曲率ゲインの知覚への影響をより正確に調査することが挙げられる。

謝辞 本研究はMEXT研究費（課題番号25230057）の助成を受けたものであり、ここに改めて謝意を表す。本研究は東京大学大学院情報理工学系研究科において研究倫理審査の承認を受けたものである。

#### 参考文献

- [1] J. G. Casali and W. W. Wierwille. The effects of various design alternatives on moving-base driving simulator discomfort. *Human Factors*, 22(6):741756, 1980.
- [2] I. Freund, N. V. Haenel, and F. A. Wichmann. Inference for psychometric functions in the presence of nonstationary behavior. *Journal of vision*, 11(6):1616, 2011.
- [3] T. Grechkin, J. Thomas, M. Azmandian, M. Bolas, and E. Suma. Revisiting detection thresholds for redirected walking: Combining translation and curvature gains. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception*, pp. 113120. ACM, 2016.
- [4] E. Hodgson and E. Bachmann. Comparing four approaches to generalized redirected walking: Simulation and live user data. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 19(4):634643, 2013.
- [5] S. A. Klein. Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary. *Attention, Perception, Psychophysics*, 63(8):14211455, 2001.
- [6] E. Langbehn, P. Lubos, G. Bruder, and F. Steinicke. Bending the curve: Sensitivity to bending of curved paths and application in roomscale vr. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 23(4):13891398, 2017.
- [7] M. Marchal, A. L'ecuyer, G. Cirio, L. Bonnet, and M. Emily. Walking up and down in immersive virtual worlds: Novel interactive techniques based on visual feedback. In *3D User Interfaces (3DUI)*, 2010 IEEE Symposium on, pp. 1926. IEEE, 2010.
- [8] S. Razaque. Redirected walking. University of North Carolina at Chapel Hill, 2005.
- [9] S. Razaque, Z. Kohn, and M. C. Whitton. Redirected walking. In *Proceedings of EUROGRAPHICS*, vol. 9, pp. 105106. Manchester, UK, 2001.
- [10] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe. Analyses of human sensitivity to redirected walking. In *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*, pp. 149156. ACM, 2008.
- [11] F. Steinicke, G. Bruder, J. Jerald, H. Frenz, and M. Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, 16(1):1727, 2010.
- [12] F. Steinicke, G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald, and K. Hinrichs. Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback. In *Cyberworlds, 2008 International Conference on*, pp. 217223. IEEE, 2008.