



下方視野の提示がリダイレクテッドウォーキングの 知覚閾値に与える影響

有川由祐¹⁾, 中野萌士¹⁾, 松本啓吾^{2,3)}, 鳴海拓志¹⁾

1) 東京大学大学院 情報理工学系研究科

(〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1, {u-arikawa, kizashi, narumi}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

2) 筑波大学 システム情報系 (〒 305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1, matsumoto@iit.tsukuba.ac.jp)

3) 産業技術総合研究所 人間社会拡張研究部門 (〒 305-8560 茨城県つくば市梅園 1-1-1)

概要: 下方向の視野は歩行時の地面の認識に重要であり, パーチャル環境での歩行における没入感や自己位置推定能力に影響することが確認されている. 本研究では, 下方視野角を拡大したヘッドマウントディスプレイを用いて, 下方視野の提示がリダイレクテッドウォーキングの曲率操作における知覚閾値に与える影響を検証した. 下方視野の拡大が視覚の手がかりの増加を通じて知覚閾値を拡大させると仮説を立てたが, 下方視野の提示有無による知覚閾値に有意な差は確認されなかった. その原因として, 下方視野を拡大したことで提示される新たな視覚の手がかりが少なかったことが示唆された.

キーワード: リダイレクテッドウォーキング, 下方視野, 知覚閾値

1. はじめに

バーチャルリアリティ (Virtual Reality: VR) 分野において, ユーザに自然な歩行感覚を提供しながらバーチャル環境内を自由に探索させることは, 重要な課題の一つである. なかでも最も自然な移動手段とされるのが Real walking であり, 実空間におけるユーザの位置・姿勢を, 対応するバーチャル空間上に 1 対 1 でマッピングすることで, 自然な歩行体験を実現できるとされている [1]. しかし, この手法は実空間の広さがバーチャル環境の広さに直接制約として影響するため, 現実的なプレイエリアでは広大なバーチャル環境を探索することが困難であるという制限がある. この空間的制約に対処する有望な手法の一つが, リダイレクテッドウォーキング (Redirected Walking: RDW) である [2]. RDW は, ユーザが実空間を移動する際に, その移動をわずかに変換してバーチャル環境内に反映させることで, ユーザに気づかれない範囲で空間を再構成する技術である. これにより, 自然な歩行感覚を維持しつつ, 実空間よりも広大なバーチャル環境を探索することが可能になる. 一方で, RDW にも依然として限界が存在する. ユーザが変換の存在に気づかずに自然な歩行を維持するためには, RDW 中に適用される操作量であるゲインが知覚閾値を超えないように制御する必要がある. 例えば, ユーザに直線的な歩行を感じさせ続けるためには, 半径約 22m [3] あるいは約 11.6m [4] の円弧状空間が必要とされる. これは一般的なプレイエリアの規模を大きく上回るため, RDW の工学的応用においては, 知覚閾値を拡大し, より効率的に空間を圧縮する技術の確立が重要な課題となる.

RDW の知覚閾値を拡大する一つの手法として, 視野角の拡大が有効であることが報告されている. RDW は空間

知覚において前庭感覚よりも視覚情報の影響が強いことを利用する技術であり, 視覚への依存度が高いほどユーザの知覚閾値が拡大することが知られている [5]. そのため, 視覚の手がかりの増加につながる視野角の拡大は, 視覚依存度の上昇を通じて知覚閾値を拡大させると考えられる. しかし, 既存の研究の多くは主に水平方向や前方の視野に焦点を当てたものであり, 垂直方向の視野, とりわけ歩行制御や距離知覚に重要とされる下方向の視野の影響については十分に検討されてこなかった. 下方視野は歩行中におけるユーザに近い地面や足元の把握にとって不可欠であり, 歩行制御や距離の把握において重要な役割を果たす. しかし, 多くの HMD ではハードウェア的な制約により下方視野が大きく制限されており, この視野領域の効果についての検討は限られていた. こうした制限に対応する形で, 中野らは下方視野を拡大した HMD を開発し, パーチャル環境における下方視野の提示が自己位置推定能力やプレゼンスの向上に効果的であることを示した [6]. この HMD を RDW に応用することで, より自然な歩行体験を実現することが可能になると考えられる. そこで本研究では, 下方視野を広く提示可能な HMD を RDW の曲率操作に適用し, 下方視野に対する映像提示が RDW の曲率ゲインにおける知覚閾値に与える影響を調査した.

2. 実験手法

本研究では, RDW における曲率操作を対象として, 下方視野が曲率ゲインの知覚閾値に与える影響を検討するため, 通常よりも広い下方視野を提示可能な HMD を用いて実験を行った. 曲率操作は, ユーザの直線歩行に対して継続的にわずかな回転を加えることで, 実際には円弧上の軌道

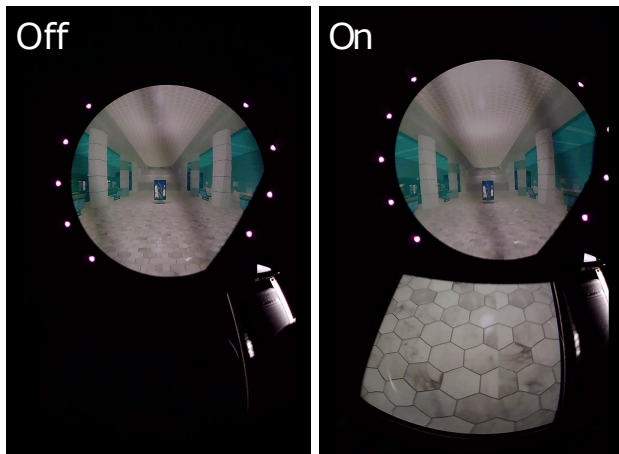


図 1: 歩行タスク中の各条件でのバーチャル環境の見え方。(左) 下方視野を提示しない Off 条件, (右) 下方視野を提示する On 条件。

を歩かせつつ直進していると知覚させる手法であり, RDW 研究において広く用いられている。

2.1 実験設計

実験は参加者内計画で, 下方視野の提示条件 (下方視野を提示する On 条件, 提示しない Off 条件) × 曲率ゲイン 9 条件 (-0.2, -0.1, -0.05, -0.025, 0, 0.025, 0.05, 0.1, 0.2 [m^{-1}]) × 各 8 試行の計 144 試行を実施した。実験は約 5m × 約 3.5m の歩行スペースを持つ室内で行われ, 各試行で参加者は約 4m を歩行し, その間に曲率ゲインが適用された。

HMD には, 中野らが開発した下方視野拡大 HMD [7] を用いた。この HMD は, HTC Vive Pro Eye に LCD とフレネルレンズを追加したもので, 単眼の水平視野角は約 70 度である。垂直視野角は, Off 条件で約 70 度であるのに対し, On 条件で約 130 度に増加する。アンケート回答には HTC Vive コントローラを用いた。バーチャル環境は Unity 2021.2.19f1 を用いて構成した。歩行中の視野例を図 1 に示す。

2.2 評価指標

曲率ゲインにおける知覚閾値を Two alternative forced-choice (2AFC) タスクによって測定し, 条件間で比較を行った。また, 参加者の感じ方を示す指標として, 参加者がどの程度曲げを感じたかについての 7 段階リッカート尺度での主観評価, および歩行中の行動指標として, 参加者が歩行中に下方視野をどの程度注視していたかの割合を計測した (中野らの手法 [7] に基づき計算)。また, RDW 中の想定された歩行経路に対する水平方向の頭部のずれを計測した。

2.3 作業仮説

先行研究により, 視野角の拡大は視覚的手がかりの増加を通じて知覚閾値を拡大させることが示唆されている [8]。下方視野の拡大によっても同様の効果が生じると考えられるため, 下方視野の提示は知覚閾値を拡大させる可能性がある (H1)。また, 曲げ具合の主観評価についても, 下方視野を提示した場合の方が曲げを知覚しづらいと考えられる (H2)。

H1 曲率操作に対する知覚閾値は, Off 条件より On 条件で有意に大きい。

H2 どの程度曲げられたかの主観評価は, Off 条件より On 条件で有意に小さい。

また, 下方視野の拡大によってバーチャル環境に提示された歩行経路により正確に従うことが示唆されている [6]。この効果が RDW を適用した場合においても生じ, 歩行経路に対する頭部の横方向のずれが減少すると考えられる (H3)。

H3 歩行経路に対する頭部の横方向のずれが, Off 条件より On 条件で有意に小さい。

2.4 実験手順

参加者は, 説明を受けて実験に同意し, 属性情報に関する質問票に回答した。その後, 実験手順について詳細な説明を受け, 指定の歩行用サンダルに履き替え, タスクに慣れるための練習を 4 回行った。練習試行の終了後, 歩行および質問票回答に問題がないことを確認した後, 本実験に移行した。参加者は全試行の四分の一である 36 試行ごとに HMD を外し休憩を取った。また, 72 試行ごとに下方視野の提示条件を切り替えて試行を行った。各ブロック内でのゲイン条件の提示順はランダム化され, 下方視野提示条件の順序は参加者間でカウンターバランスを取った。それぞれの試行は以下の手順に従って行われた:

- (1) 準備: スタート位置を示す黒い矢印の上に立ち, 矢印で示された方向を向いた。
- (2) 歩行: バーチャル環境が地下鉄ホームのシーンに切り替わり, 正面に看板が出現した。参加者は, ホワイトノイズと 100 BPM に設定されたメトロノーム音を聞きながら, 看板に向かって約 4m 歩行した。歩行中に曲率ゲインが適用された。
- (3) 回答: 歩行の後, 質問票が表示され, コントローラを用いて回答した。
- (4) バーチャル環境が非表示になり, 次の試行の開始位置を示す新たな矢印が表示された。

2.5 参加者

18 歳以上の 24 名が実験に参加し, 1 名は機材不良により除外された。また, 回答結果からフィッティングした感覚強度曲線の brier score が 0.25 を超えた 2 名の参加者について, 感覚強度曲線が十分に回答を反映していないと判断し除外した。最終的に統計の対象となったのは 21 名 (男性 11 名女性 10 名, 平均年齢 26.7 歳, SD=8.3) であった。参加者は実験に関する事前知識を持たず, 裸眼またはコンタクトレンズを使用した両眼視力が 0.7 以上であった。実験終了後, 謝礼として 3000 円の Amazon ギフト券が支払われた。

3. 結果

結果の解析において, 検定の有意水準は 5% に設定した。

まず、2AFC タスクにおける回答結果から、各参加者の知覚閾値を算出した。参加者の内 4 名は両条件において歩行経路が曲げられた向きをバーチャル環境が曲げられた向きと誤解して回答していたため、これらの回答は反転させて解析に用いた。各ゲインで曲げられた方向が右であると回答した割合について、累積ガウス関数にフィッティングした。フィッティングには psignifit 4.3 [9] を用いた。フィッティングの結果から算出した 25%点、主観的等価点、75%点、および 25%点と 75%点の絶対値の平均により算出した知覚閾値の参加者平均を表 1 に示す。知覚閾値についてウィルコクソンの符号順位検定により **On** 条件と **Off** 条件で検定を行ったところ、有意差は認められなかった ($p = .838$, $r = 0.032$)。

また、どの程度曲げられたと感じたかについての主観評価について、ゲインによる影響を確かめてから下方視野条件が影響したかを確かめるため、ゲインと下方視野有無の 2 要因について、整列ランク変換を施してから 2 要因分散分析を行った。その結果、ゲインについて有意な主効果が確認された ($p < .001$, $\eta_p^2 = 0.758$) が、下方視野提示条件による主効果と交互作用は確認されなかった。また、設定された歩行経路に対する横方向の頭部位置のずれについて同様の分析を行った結果、ゲインによる主効果が有意であった ($p = .015$, $\eta_p^2 = 0.110$) が、下方視野提示条件による主効果と交互作用は確認されなかった。

最後に、下方視野を注視している割合について計測した結果の箱ひげ図を図 2 に示す。ウィルコクソンの符号順位検定で **On** 条件と **Off** 条件を比較したところ、**On** 条件では **Off** 条件と比較して有意に下方視野を注視している割合が高かった ($p = .002$, $r = 0.487$)。一方で、それぞれ下方視野を注視している割合の平均は **On** 条件で 0.0804 ($SD = 0.113$)、**Off** 条件で 0.0422 ($SD = 0.080$) にとどまった。参加者が下よりも前方を注視している割合が多かったことは、下方視野を中心視野でなく周辺視野で利用していたことを示している。

4. 考察

曲率操作における知覚閾値について、条件間で有意差は確認されなかった ($p = .838$, $r = 0.032$)。これは仮説 H1 を支持しない。この原因として、第一に、拡大された下方視野から得られる新たな視覚の手がかりが乏しかったことが考えられる。先行研究において視野角の拡大が知覚閾値の

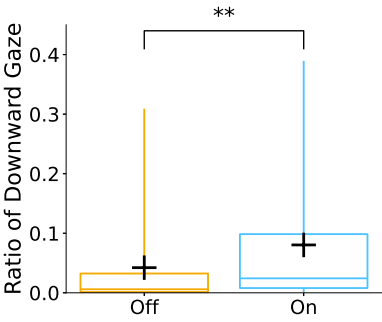


図 2: 下方視野を注視している割合の箱ひげ図。グラフ中の**は $p < .01$ であることを示す。

拡大をもたらしたのは、前方や水平方向の視野が大きく拡大されることによって周辺環境の手がかりが増加し、自己運動感覚が強く生じられたことによると考えられる。一方、本実験で追加された情報は地面上の単調なタイルのみであり、**Off** 条件においても参加者は下方の状況のある程度推察できたため、視覚の手がかりとして機能しなかった可能性がある。周辺環境における手がかりを増加させやすい水平視野は垂直視野よりも自己位置推定に大きな影響を与えることも示唆されており [10]、単なる下方視野の増大では知覚閾値に影響を及ぼしにくいことが考えられる。一方で、自己アバタや歩行経路を示す線などが下方視野に提示されていた先行研究 [6] では、下方視野の拡大によって自己位置推定能力の向上が報告されている。本実験においても、参加者から「地面の矢印は見つけやすくなったが、歩行中の感覚には影響を感じなかった」との報告が得られており、下方視野拡大による効果は提示される視覚的な情報量に依存する可能性がある。本研究では、下方視野の拡大そのものの効果を検討することを目的としていたため、歩行中に補助的な手がかりは表示しなかったが、不整地などの地面に表示される情報量が多い場合や、アバタや歩行経路などの下方視野によって視認できる新たな視覚の手がかりを提示した場合についても検証することで、下方視野拡大が知覚閾値に与える影響をより明確に検証できると考えられる。

また、視野角の拡大が、知覚閾値を拡大させる要因と縮小させる要因の両方を含んでいた可能性も考えられる。視野角の拡大は視覚的手がかりの増加を通じて知覚閾値を拡大させると考えられる一方で、逆に体性感覚とのずれに気づきやすくなる可能性も考えられる [6]。近年の研究 [11] から、視覚的手がかりの増加は VR 経験者の知覚閾値を拡大

表 1: 25%点、主観的等価点 (PSE)、75%点、および知覚閾値 (DT) の各条件での参加者平均と標準偏差。

	25%		PSE		75%		DT	
	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD	Mean	SD
On	-0.089	0.048	-0.005	0.038	0.080	0.050	0.084	0.030
Off	-0.089	0.043	-0.007	0.028	0.076	0.038	0.082	0.029

させる一方、初心者には逆にずれを知覚させやすくする可能性も示唆されており、ユーザの特性に応じた検討が今後必要であると考えられる。

また、曲げ具合の主観評価および歩行経路に対する頭部位置のずれについても、視野提示条件による有意差は見られなかった。これらは H2 と H3 をそれぞれ支持しない。これも知覚閾値と同様に、周辺視野中心の情報提示や視覚的手がかりの不足、あるいは拡大・縮小要因の相殺が影響した可能性がある。特に H3 の結果は、下方視野の拡大により自己位置推定が向上したとする先行研究の報告 [6] とは一致しない。本研究のように地面に対する視覚の手がかりが少ない条件下では、歩行経路への追従性を向上させる効果は限定的である可能性が示唆される。

5. 結論

本研究は、通常よりも下方視野の広い HMD を RDW に適用し、下方視野に対する視覚の手がかりの提示が RDW の曲率操作における知覚閾値に与える影響を評価した。先行研究では前方のディスプレイの視野を拡大すると知覚閾値が拡大することが示唆されており、これに基づき、本研究では下方視野の拡大も同様に知覚閾値を上昇させると仮説を立てた。しかしながら、実験の結果、知覚閾値の有意な拡大は確認されなかった。知覚閾値が拡大しなかった一因として、下方視野の拡大それ自体によって提示される新たな視覚の手がかりが少なかったために影響が見られなかった可能性が考えられる。水平視野の拡大とは異なり、下方視野の拡大は周辺環境よりも地面の情報を主に増加させるため、本実験で用いたような単調な地面を持つ環境では新たな視覚の手がかりとして機能せず、知覚閾値に与える影響が見られなかったことが考えられる。加えて、下方視野の拡大が、単に知覚閾値を拡大させるだけでなく、知覚閾値を低下させる効果を有している可能性も考えられる。本研究の知見は、RDW における下方視野の役割に関する更なる検討の必要性を示している。より自然かつ効率的な歩行を RDW と下方視野の拡大の組み合わせによって実現するためには、下方視野に提示される新たな視覚の手がかりが RDW に対してどのように影響するのかを明らかにすることが求められる。

謝辞 本研究は、科研費若手研究 (JP24K20813) および JST ムーンショット型研究開発事業 (JPMJMS2013) の助成を受けた。

参考文献

- [1] Martin Usoh, Kevin Arthur, Mary C Whitton, Rui Bastos, Anthony Steed, Mel Slater, and Frederick P Brooks Jr. Walking, walking-in-place, flying, in virtual environments. In *Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 359–364, 1999.
- [2] Zachariah Kohn Sharif Razzaque and Mary C. Whitton. Redirected walking. In *Proceedings of EUROGRAPHICS 2001*, Vol. 16, pp. 17–27, 2001.
- [3] Frank Steinicke, Gerd Bruder, Jason Jerald, Harald Frenz, and Markus Lappe. Estimation of detection thresholds for redirected walking techniques. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 16, No. 1, pp. 17–27, 2010.
- [4] Timofey Grechkin, Jerald Thomas, Mahdi Azmandian, Mark Bolas, and Evan Suma. Revisiting detection thresholds for redirected walking: combining translation and curvature gains. In *Proceedings of the ACM Symposium on Applied Perception, SAP '16*, p. 113 – 120, New York, NY, USA, 2016. Association for Computing Machinery.
- [5] Yannick Rothacher, Anh Nguyen, Bigna Lenggenhager, Andreas Kunz, and Peter Brugger. Visual capture of gait during redirected walking. *Scientific Reports*, Vol. 8, No. 1, p. 17974, Dec 2018.
- [6] Kizashi Nakano, Naoya Isoyama, Diego Monteiro, Nobuchika Sakata, Kiyoshi Kiyokawa, and Takuji Narumi. Head-mounted display with increased downward field of view improves presence and sense of self-location. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 27, No. 11, pp. 4204–4214, 2021.
- [7] Kizashi Nakano and Takuji Narumi. Avatars, should we look at them directly or through a mirror?: Effects of avatar display method on sense of embodiment and gaze. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, Vol. 31, No. 5, pp. 2912–2922, 2025.
- [8] Niall L Williams and Tabitha C Peck. Estimation of rotation gain thresholds considering fov, gender, and distractors. *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, Vol. 25, No. 11, pp. 3158–3168, 2019.
- [9] Heiko H. Schütt, Stefan Harmeling, Jakob H. Macke, and Felix A. Wichmann. Painfree and accurate bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data. *Vision Research*, Vol. 122, pp. 105–123, 2016.
- [10] Sina Masnadi, Kevin Pfeil, Jose-Valentin T Sera-Josef, and Joseph LaViola. Effects of field of view on egocentric distance perception in virtual reality. In *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22*, New York, NY, USA, 2022. Association for Computing Machinery.
- [11] Jieun Lee, Seokhyun Hwang, Aya Ataya, and SeungJun Kim. Effect of optical flow and user vr familiarity on curvature gain thresholds for redirected walking. *Virtual Reality*, Vol. 28, No. 1, p. 35, 2024.