



膝部サポーターの装着によるリダイレクテッドウォーキング の操作知覚への影響

福井岳¹⁾, 中村拓人¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志^{1,2)}, 葛岡英明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, {gaku.f, n.takuto, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp) 2) JST さきがけ

概要: 実空間よりも広い VR 空間の歩行移動を可能にするリダイレクテッドウォーキング (RDW) では, 没入感低下や VR 酔い防止のために実際の位置・姿勢とバーチャル空間での位置・姿勢のずれに気付かない範囲内で視覚フィードバックの操作がおこなわれる。より効果的な RDW を実現するには, 操作が知覚されない閾値を拡大することが求められる。先行研究では, 膝に特定のデバイスを装着すると RDW の知覚閾値が拡大することが示されているが, 装着によって歩きにくさや違和感が生じる状況でしか検証されていない。本研究では, 歩きやすく違和感の小さい膝部サポーターの装着によっても知覚閾値の拡大が可能かどうかを検証した。その結果, 一部の参加者がサポーターの装着によって曲率知覚が曖昧になったと報告したものの, 知覚閾値の拡大は起こらなかった。

キーワード: HMD, リダイレクテッドウォーキング, 歩行感覚, 知覚閾値

1. はじめに

バーチャルリアリティ (VR) が一般に利用されつつあるなかで, 訓練やシミュレーションといった分野において, 現実空間同様の感覚で VR 空間を歩行可能にする技術が求められている。実空間におけるユーザの位置と姿勢をそのまま VR 空間のアバタおよびカメラの座標として利用する “real-walking” は, 最も自然な歩行体験をもたらすと考えられている [1]。しかし, この手法では VR 空間と同等の広さの実空間が必要となる。この課題を解決するために, リダイレクテッドウォーキング (RDW) と呼ばれる手法が提案された [2]。RDW は, ユーザに知覚されない範囲で実空間と VR 空間の空間的な対応関係を操作することで, 実空間よりも広い VR 空間内での自由な移動を可能にする。

RDW は real-walking と比較して, 空間的制約を緩和できるが, それでもなおいくつかの課題を抱えている。その中でも重要なのは, ユーザが RDW に伴う操作を知覚する最小の操作量である知覚閾値 (detection threshold: DT) に関する問題である。ユーザが体性感覚で感じる実身体の位置・姿勢と視覚で感じるバーチャル空間での位置姿勢のずれに気づき, RDW の操作を知覚すると, VR 酔いを感じやすくなったり, 認知負荷が増大したりすることが知られる [3]。そのため, これまで多様な RDW 操作の DT を明らかにする研究が取り組まれてきた。たとえば, 実空間で円弧上を移動するユーザの動きを VR 空間内では直進しているように見えるよう操作するとき (曲率操作), 円弧の半径が 11.0 m 以上であればユーザが操作を知覚せず, 実際に直進しているように感じる事が確認されている [4]。これは, 広大な VR 空間における自然な歩行体験には最低でも半径 11 m の実空間が必要であることを意味する。

近年では DT を拡大して RDW の効率を高めることを狙った研究も行われはじめている。たとえば, 膝に特定のデバイスを装着した状態で RDW を行うと DT が拡大し, 6.8 m 以上の半径であればユーザが操作を知覚しないことが示唆されている [5]。この研究で用いられている膝に装着するデバイスは柔軟性が低く, 歩行の際に違和感を生じさせる, 歩行しづらいといった課題がある。本研究では, 歩行への影響が小さいが, 膝部に圧力を与えることができる膝部サポータを使用した場合にも DT が拡大するかを調査し, 効果的な DT 拡大手法の実現可能性を探索した。

2. 関連研究

2.1 リダイレクテッドウォーキング

RDW [2] は, real-walking の課題であった, 空間的な制約を解消するために提案された手法である。RDW では, 基本的には実空間におけるユーザの動きを別の動きに変換する操作を行い, その動きを VR 空間におけるアバタ及びカメラの動きとすることで, 広大な VR 空間を狭い実空間にマッピングする。位置や姿勢の変換の度合いはゲインと呼ばれ, 変換の手法が異なる様々な種類の操作がある。並進, 回転といった, ユーザのどのような動きに対して操作を適用するかの違いに応じて, 並進移動操作, 回転量操作, 曲率操作, 曲げ操作といった様々な手法が提案されている [6, 7]。並進移動量操作は, 実空間での並進移動量に並進移動ゲイン (g_T) をかけることで, VR 空間での並進移動量を拡大・縮小する操作である。回転量操作は, 実空間での回転量に回転ゲイン (g_R) をかけることで, VR 空間での回転量を拡大・縮小する操作である。曲率操作は, 実空間において円弧上の経路を歩行しているユーザに, VR 空間内においては直線上の経路を歩いている映像を提示することで, ユーザに



図 1: Fukui らの実験 [5] で参加者が装着したデバイス (右) とその装着例 (左)

直進していると知覚させる手法である。曲率操作ゲインである g_C は、実空間における曲率である。曲率ゲインを定義する方法はいくつかあるが、本研究においては以下のような定義を用いる： $g_C := \frac{1}{r_{real}}$ 。ここで、 r_{real} は実空間においてユーザが誘導される円弧上の歩行経路の半径に相当し、その次元は m^{-1} となる。本研究では先行研究 [5] と同様の検証をおこなうために、曲率操作を扱う。

2.2 リダイレクテッドウォーキングと知覚閾値

ユーザが RDW に伴う操作を知覚できる最小の操作量である DT についての調査が行われてきた。DT よりも大きな操作を受けたユーザは RDW に伴う操作を知覚することができる。そのため、一般的に、RDW における DT は強制 2 選択肢弁別課題を用いて分析されてきた。強制 2 選択肢弁別課題を用いた並進移動量ゲイン、回転量ゲイン、曲率ゲインの DT の決定は Steinicke ら [8] によってはじめて行われ、たとえば本研究において用いる手法である曲率ゲインの DT は $0.045 m^{-1}$ であると報告された。その後、他の研究者による研究において報告された曲率ゲインの DT として、 $0.067 m^{-1}$ [9]、 $0.086 m^{-1}$ [10]、 $5.2^\circ/m$ ($g_C = 0.091 m^{-1}$) [4] などがある。上述のように研究によって報告のばらつきが見られるのは、DT は個人差に加えて、使用する HMD の視野角、バーチャル環境の特性によっても変化するためである。

2.3 膝にデバイスを装着することによる知覚閾値の拡大

Fukui らの実験では、膝に特定のデバイスを装着し締め付けを与えることによって、曲率操作の DT が拡大することが示された [5]。この研究においては、図 1 に示したデバイス (以下では圧迫デバイスと呼称する) を膝に装着した状態で、曲率操作を用いた RDW を行うことにより、DT が $0.148 m^{-1}$ まで拡大したと報告されている。圧迫デバイスは膝への拘束が大きく、歩行に違和感があり、歩きにくいという課題があるものの、膝部の締め付けによる RDW の DT の拡大可能性が示唆されている点は興味深い。本研究では、この発見をさらに深めるために、より歩行がしやすい装着デバイスとして膝部サポーターを利用した検証をおこない、知覚閾値の拡大が発生するかを検証する。



図 2: バンドタイプサポーター (ザムスト JK バンド) (左) とソフトタイプサポーター (McDavid M402) (右) の装着例



図 3: VR 環境 (左) と実環境 (右)

3. 実験

3.1 実験目的

本実験では、膝部サポーターの装着が曲率操作を用いた RDW の DT に与える影響を調査する。二種類の膝部サポーターを用意し、それぞれのサポーターを装着した場合と、サポーターを装着しない場合について、知覚閾値の計測を行った。

3.2 膝部サポーター

本実験では、図 2 に示した二種類のサポーターを用いた。ここでは、それぞれバンドタイプ、ソフトタイプと呼称することとする。各サポーターについて、M、L の二種類のサイズを用意し、利用するサイズは参加者の膝の周囲長によって決定した。以後、バンドタイプサポーターを装着した条件を band 条件、ソフトタイプサポーターを装着した条件を soft 条件、サポーターを装着しない条件を control 条件とする。

3.3 実験設備

実験は 5m 四方の実験室内で実施された (図 3)。参加者は、片目につき $1,440 \times 1,600$ ピクセルの画素数、615 PPI の解像度を持ち、視野角は約 110° 、リフレッシュレートは 90Hz である HMD、HTC Vive Pro を着用した。また、アンケートの回答には HTC Vive コントローラを用いた。各試行において参加者が歩行する VR 環境は Unity 2019.4 を用いてレンダリングを行った。VR 環境はコンテナヤードのような場所を用いた (図 3)。VR 環境には、参加者が VR 環境を歩行する際に目指すための目印として、ドラム缶のオブジェクトを配置した。実験に用いた VR 環境および HMD

は先行研究の実験 [5] と同一である。

4. 実験条件

実験参加者として、福井ら [5] の研究と同一の参加者に再び参加してもらい、22 歳から 23 歳の健康な男女 5 人（女性 1 名、男性 4 名）が実験に参加した。すべての参加者は歩行障害、視覚障害、聴覚障害がないことが確認された。参加者全員が利き足を右であると回答した。また、参加者は利き足についてボールを蹴る際に用いる足として説明を受けた。

参加者内条件として、前述の band 条件、soft 条件、control 条件の三種類が存在し、また、曲率ゲインの条件としては (-0.2, -0.1, -0.05, 0, 0.05, 0.1, 0.2) の 7 種類が用いられた。このそれぞれについて 8 回の試行を行い、合計して 168 試行分のデータを用いた。ただし、control 条件は過去の実験 [5] において同一参加者から取得されたデータを用い、band 条件、soft 条件については本実験で新たにデータを取得した。band 条件、soft 条件のデータ取得は、一方の条件のもとで全ゲイン条件が終了した後に、もう一方の条件の前ゲイン条件を実施するブロックデザインを採用して実験を行った。サポーター条件の順番、各サポーター条件内におけるゲイン条件の順番はランダムに選択され、また、実験参加者は事前に実験の目的を知らされなかった。

5. 実験手順

全ての実験参加者は実験及び実験で行われる試行についての詳細な説明を受けた上で、インフォームドコンセントに同意し、実験に参加した。また、参加者は試行が開始する前に年齢や身長、利き足といった基本事項についてのアンケートに回答した。続いて、実験に用いるサポーターのサイズを決定するため、参加者の膝幅と膝厚を計測した。また、実験に用いる靴を 23, 24, 25, 26, 27 cm の中から選択した。参加者は試行の行い方を詳細に理解するための練習用の試行を、実際に HMD およびヘッドホンを装着して 2 回体験した。その後、参加者はノイズキャンセリングヘッドホンとヘッドマウントディスプレイを装着し、本番の試行に移った。

参加者は各試行において、バーチャル環境において前方 12 m 先にあるドラム缶に向かって歩行するよう指示を受けた。それぞれの試行において参加者は、曲率ゲインが提示された状態でターゲットにむかって 5 m 程度の距離を歩行した。この際、ヘッドホンからはホワイトノイズと歩調統制のための 100BPM のテンポが流された。目標地点まで到着すると、試行後アンケートが表示され、参加者はコントローラを用いてアンケートに回答した。

試行後アンケートでは、以下のような質問がなされた。1. 歩行経路が右または左に曲げられたように感じましたか？（右/左）、2. 歩行経路が曲げられたように感じましたか？（1-7）

このうち 1 番目の質問は強制 2 選択肢弁別課題であり、

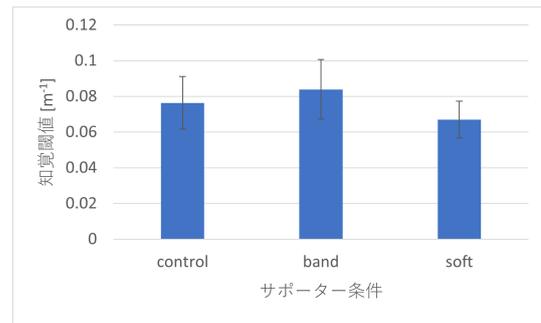


図 4: 知覚閾値の平均値（左から control, band, soft）

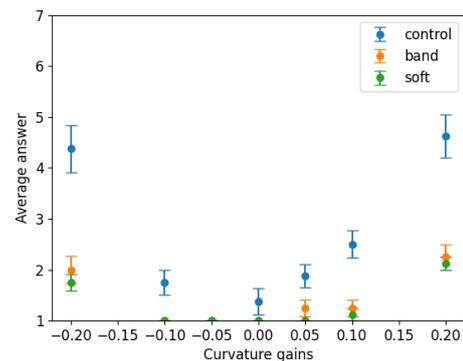


図 5: 曲率知覚が曖昧になった参加者の回答例（エラーバーは標準誤差を示す）: control 条件と比較して、band, soft 条件の値が小さくなっていることが確認できる

右、左の二つの選択肢から回答された。また、2 番目の質問は 7 段階リッカート尺度で回答された。参加者は 1 から 7 の数値で回答を行った。参加者が歩行軌跡が非常に強く曲げられたように感じた際には 7 を回答し、反対に、歩行軌跡が全く曲げられていないように感じた際には 1 を回答した。

全試行終了後、参加者は膝部サポーターを含むすべてのデバイスを取り外し、その後口頭のインタビューに回答した。

各参加者について、実験前後のアンケート、実験説明、ハンガー反射デバイスの調整、本試行、休憩を含む全実験時間は、1 時間から 1 時間半であった。合計の VR 体験時間は最大で 60 分程度であり、連続しての HMD の使用は 30 分以下であった。

5.1 実験結果

5.1.1 DT

図 4 に、本実験で得られた各参加者の DT の平均を示す。DT の算出には、Psignifit 4 [11] を用いた。また、それぞれの参加者のデータは累積ガウス関数を用いてフィッティングを行った。band, soft, control の三条件について、独立変数をサポーター条件、従属変数を DT として、対応のある 1 要因の分散分析を行った。その結果、統計的に有意な主効果は認められなかった ($p = 0.79$, $F = 3.89$)。

一方で、一部の参加者について、図 5 に示すように、control 条件とサポーター装着条件間で大きな差が見られ、全試行終了後のインタビューにおいて、歩行が曲がっている

感覚が全然しなかったと回答した。その一方で、該当参加者の DT は control 条件とサポーター装着条件間においてほとんど差は認められなかった。

5.2 実験考察

曲率知覚について、サポーター装着の有無による有意な差は認められなかったものの、インタビューにおいては、曲がって歩いた感覚が小さかったという旨の回答が得られた。これについて、control 条件と band 条件、soft 条件を別日に実施したことから、それぞれの条件内での相対的な尺度で回答が行われてしまい、条件間の比較が適正でなかった可能性がある。

また、前述のように曲がって歩いた感覚が小さかった旨のアンケート回答が得られた一方で、DT は control 条件とサポーター装着条件で有意な差は認められなかった。これについて、サポーターの装着により、歩行時の、歩行の曲げられ具合の知覚は抑制されるものの、歩行の向きに関する知覚は保たれる可能性が示唆された。

上記を踏まえて新たな実験を設計することで、サポーター装着時の歩行方向知覚、曲率知覚についてより詳細な検討が可能になると考える。

6. おわりに

先行研究においては、膝部を圧迫する特定のデバイスを装着することが曲率操作を用いた RDW の DT を拡大させると確認されているものの、装着による違和感が大きく歩行がしづらいことが課題としてあげられていた。本研究では、圧迫デバイスに代わるデバイスとして膝部サポーターを利用し、膝部サポーター装着時の RDW における DT および曲率知覚について調査を行った。結果として、一部の参加者について曲率の知覚が曖昧になったことが確認された。一方で、DT については control 条件に対して有意な差は認められず、先行研究で使用されたデバイスのような DT の拡大効果は認められなかった。この理由として、圧迫デバイスの装着による歩きにくさ、違和感自体が DT の拡大効果の要因であることや、サポーターによる締め付けが小さく、圧迫による効果が小さかったことなどが考えられる。今後、曲率知覚が曖昧となる条件の調査や、曲率知覚が曖昧になることを利用した applicable gain の調査をすすめ、RDW の DT を拡大させつつ違和感や身体への負担の少ない手法を検討していく。

謝辞 本研究は JSPS 科研費基盤研究 (B)(19H04149, 22H03628), JSPS 科研費若手研究 (22K17929) の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] M. Usoh, K. Arthur, M. C. Whitton, R. Bastos, A. Steed, M. Slater, and F. 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] S. Razzaque, Z. Kohn, , and M. C. Whitton, "Redirected walking in place," in *Proceedings of EURO-GRAPHICS*, pp. 289–294, 2001.
- [3] G. Bruder, P. Lubas, and F. Steinicke, "Cognitive Resource Demands of Redirected Walking," *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, vol. 21, no. 4, pp. 539–544, 2015.
- [4] M. Rietzler, J. Gugenheimer, T. Hirzle, M. Deubzer, E. Langbehn, and E. Rukzio, "Rethinking redirected walking: On the use of curvature gains beyond perceptual limitations and revisiting bending gains," in *2018 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, pp. 115–122, IEEE, 2018.
- [5] G. Fukui, T. Nakamura, K. Matsumoto, T. Narumi, and H. Kuzuoka, "Effects of wearing knee-tightening devices and presenting shear forces to the knee on redirected walking," in *Proceedings of the Augmented Humans International Conference 2023, AHs '23*, (New York, NY, USA), p. 112–121, Association for Computing Machinery, 2023.
- [6] F. Steinicke, G. Bruder, L. Kohli, J. Jerald, and K. Hinrichs, "Taxonomy and implementation of redirection techniques for ubiquitous passive haptic feedback," in *2008 International Conference on Cyberworlds*, pp. 217–223, IEEE, 2008.
- [7] E. Langbehn, P. Lubos, G. Bruder, and F. 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. 1389–1398, 2017.
- [8] 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*, vol. 16, no. 1, pp. 17–27, 2009.
- [9] G. Bruder, V. Interrante, L. Phillips, and F. Steinicke, "Redirecting walking and driving for natural navigation in immersive virtual environments," *IEEE transactions on visualization and computer graphics*, vol. 18, no. 4, pp. 538–545, 2012.
- [10] 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. 113–120, 2016.
- [11] H. H. Schütt, S. Harmeling, J. H. Macke, and F. A. Wichmann, "Painfree and accurate bayesian estimation of psychometric functions for (potentially) overdispersed data," *Vision Research*, vol. 122, pp. 105–123, 2016.