



連続的な曲率変化下でのリダイレクテッドウォーキング

迫野弘明¹⁾, 松本啓吾¹⁾, 鳴海拓志¹⁾, 葛岡英明¹⁾

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, {sakono, matsumoto, narumi, kuzuoka}@cyber.t.u-tokyo.ac.jp)

概要: 限られた実空間で広大なバーチャル空間の歩行を可能にするリダイレクテッドウォーキングにおいて、空間圧縮率向上のためにはより大きな操作量を適用する必要があるが、それは同時にユーザの違和感の増大につながる。本研究では操作量を連続的に増加させることで、違和感を低減しつつ従来より大きな操作量が適用可能になるか検証する。予備実験としてユーザの歩行経路の半径を連続的に操作し、その変化率によりユーザの違和感が変化するか検証した。その結果経路の半径増加条件ではユーザの違和感知覚に有意な差は見られず最大で 3.36 倍まで操作可能であり、半径減少条件では有意差が見られ、最小で 0.48 倍まで操作可能であることがわかった。

キーワード: リダイレクテッドウォーキング, 空間知覚, 曲げ操作, クロソイド曲線

1. はじめに

歩行は現実だけでなくバーチャル空間においても重要な移動手段の一つである。バーチャル空間において没入感の高い歩行を実現するためには、実空間の移動量をバーチャル空間の移動量に 1 対 1 で反映することが有効である。しかしこの手法では移動できる範囲が実空間の広さに制限されてしまい、広大な空間を十分に歩き回ることができない。

この問題に対して、リダイレクテッドウォーキング (RDW) が提案されている。RDW は人間の空間知覚が視覚優位であることを活用し、実空間の位置と姿勢をユーザに気づかれない範囲で操作した映像を提示することで実空間よりも広大なバーチャル空間を歩行しているようにユーザに知覚させる手法である [1]。RDW では基本操作としてユーザの移動量を増減させる並進移動量操作、回転量を増減させる回転量操作、実空間での曲線上の歩行をバーチャル空間での直線歩行もしくは異なる曲率の曲線上歩行と知覚させる曲率操作・曲げ操作、旋回時の回転角を操作する旋回量操作などが存在する [2][3][4]。先行研究 [2][4] では、これらの操作がユーザに気づかれない操作量の上限、下限を示す知覚閾値が算出されており、その範囲内であれば効果的に操作を適用できることが示されている。一方、実用を考えると、この範囲をより広げられることが望ましい。適用可能な操作量の範囲は、視覚情報の提示に加えて触覚情報や聴覚情報等の他感覚情報を付加することで拡張できることが示されている [5][6]。しかし、こうした触覚情報や聴覚情報等の付与はコンテンツに一定の制約を与えることが多い。

一方で、前述のような一定の操作量の適用ではなく、動的な操作量に着目した先行研究が存在する。Congdon らは回転量操作において連続的に操作量を増加させる場合と非連続的に操作量を増加させる場合を比較し、前者のほうが後者よりもユーザが操作に気づきにくく、大きな操作量を適用できることを示した [7]。これを踏まえ、本研究では視覚情

報のみの提示でより大きな操作量の適用を目指して、ユーザの歩行経路の曲率を動的に操作する手法を提案する。

2. 提案手法

本研究では視覚情報のみの操作により効果的な RDW を実現するため、RDW の操作手法の一つである曲げ操作を用いてバーチャル空間のユーザの歩行経路の曲率を連続的に変化させる手法を提案する。

2.1 歩行経路

前述の操作を実現するため、実空間の歩行経路は半径一定の円周上とし、VR 空間の歩行経路は曲率半径が実空間の歩行経路と同一の値から連続的に増加あるいは減少し続けるようにする必要がある。そのため VR 空間の歩行経路にはクロソイド曲線を使用した。クロソイド曲線はその曲率が曲線長に比例して変化する平面曲線であり、その曲率変化の滑らかさから高速道路のカーブ部やジェットコースターの垂直ループに用いられている。クロソイド曲線は以下の二式を満たすような曲線である。

$$\begin{aligned} \mathbf{P} &= \mathbf{P}_0 + \int_0^s e^{j\phi} ds \\ &= \mathbf{P}_0 + \int_0^s (\cos \phi + j \sin \phi) ds \end{aligned} \quad (1)$$

$$\phi = c_0 + c_1 s + \frac{1}{2} c_2 s^2 \quad (2)$$

ここで式 (1) は平面曲線を表す式であり、 \mathbf{P} は曲線上の位置ベクトル、 \mathbf{P}_0 は曲線の始点、 s は始点からの弧長、 ϕ は曲線上の任意の点における接線方向 [rad] を表す。また、 c_0 は始点での接線方向 [rad]、 c_1 は始点での曲率 [rad · m⁻¹]、 c_2 は曲率の変化率 [rad · m⁻²] である縮率を表し、式 (2) において c_2 が一定、すなわち弧長によらず縮率が一定となる。

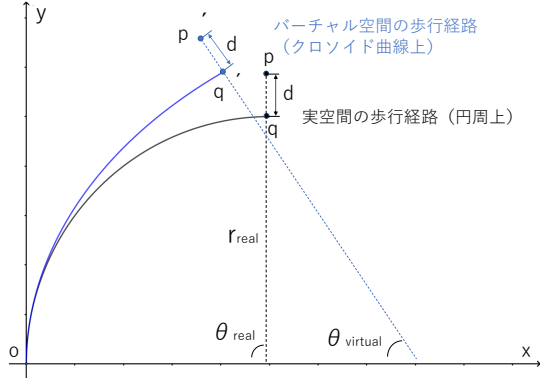


図 1: 実空間とバーチャル空間の歩行経路の対応。実空間のユーザの位置が p ，バーチャル空間のユーザの位置が p' であり，各既定経路上の位置 q, q' から半径方向外側に d だけオフセットのある状態を示している。 r_{real} は実空間の経路の半径， θ_{real} は実空間のユーザの移動量に対応する角度， $\theta_{virtual}$ はバーチャル空間のユーザ位置における曲率半径方向と x 軸がなす角。

2.2 動的な曲げ操作

曲げ操作は VR 空間の歩行経路の曲率を実空間とは異なるように知覚させる手法である。曲げ操作ではその操作を表す量として曲げゲイン g_B というものが定義されている。ここで実空間の歩行経路の半径を r ，バーチャル空間の歩行経路の半径を r' とすると $g_B := \frac{r'}{r}$ と定義される。本研究ではバーチャル空間の半径を変化させるため，先行研究 [3][6] を参考にして従来の円弧上から異なる曲率の円弧状への写像ではなく円弧上からクロソイド曲線上への写像を考える。この写像について図 1 を用いて説明する。

実空間のユーザの位置を p ，バーチャル空間のユーザの位置を p' とし， r_{real} は実空間の歩行経路の半径を表す。ここでの目的はユーザの実空間の位置 p からバーチャル空間で対応する位置 p' を求めることであり，以下の操作を行う。

1. 実空間のユーザの位置 $p(x, y)$ を既定した経路からのずれ d だけ補正した位置 $q(q_x, q_y)$ へと移す。

$$q_x = p_x + d \cos(\theta_{real}) \quad (3)$$

$$q_y = p_y - d \sin(\theta_{real}) \quad (4)$$

2. 円弧上の位置 $q(q_x, q_y)$ からクロソイド曲線上の位置 $q'(q'_x, q'_y)$ へと移す。このときユーザの歩行距離は変化させないようにクロソイド曲線の弧長は円弧の弧長と等しくなるようにする。なお， ϕ は式 (2) 中のものを用いている。

$$q'_x = \int_0^{r_{real} \cdot \theta_{real}} \cos \phi ds \quad (5)$$

$$q'_y = \int_0^{r_{real} \cdot \theta_{real}} \sin \phi ds \quad (6)$$

3. 実空間におけるずれ d だけ補正した位置 $p'(p'_x, p'_y)$ へ

と移す。

$$p'_x = q'_x - d \cos(\theta_{virtual}) \quad (7)$$

$$p'_y = q'_y + d \sin(\theta_{virtual}) \quad (8)$$

以上により実空間では円弧上を歩行するユーザの位置をバーチャル空間の歩行経路であるクロソイド曲線上の適切な位置に移すことができる。

3. 予備実験

前章の提案手法に基づいて予備実験を行った。本章では実験内容，結果，考察について述べる。

3.1 実験概要

この実験ではバーチャル空間におけるユーザの歩行経路の曲率を連続的に変化させてユーザが違和感を知覚するタイミングを計測した。そして曲率を変化させる際の変化率を変えることでユーザが違和感を知覚するタイミングが変化するかを検証した。実験参加者には実空間では半径 2.5 m の円周上を歩行してもらい，バーチャル空間ではクロソイド曲線を用いて曲率半径が 2.5 m から徐々に変化していく経路上を歩行しているように操作した。なお，実空間の半径 2.5 m は先行研究 [2] で用いられた条件と同じである。

実験ではヘッドマウントディスプレイ (HMD) として HTC VIVE Pro とコントローラ 2 個を実験参加者に装着してもらった。実験参加者は男性 5 名 (年齢 23-25 歳，平均年齢 23.6 歳) で，すべての実験参加者の視力または矯正視力は正常であった。実験参加者全員が以前に HMD の使用経験があった。実験は参加者内計画で行い，条件としてバーチャル空間の歩行経路の曲率変化率 7 条件，各条件につき左回り，右回りそれぞれ 2 条件ずつの計 $7 \times 4 = 28$ 試行行なった。ここで曲率変化率の条件はバーチャル空間の歩行経路となるクロソイド曲線の縮率をその初期曲率で割ったもの $[m^{-1}]$ を用い，予備的検討からこの値が $\{-0.07, -0.06, -0.05, -0.04, 0.02, 0.05, 0.08\}$ となる 7 条件とした。各条件とバーチャル空間における歩行経路の 5 m ほどの曲率半径の倍率は表 1 の通りとなる。

条件 1-4 はバーチャル空間の歩行経路の半径が増加する条件であり，条件 5-7 は減少する条件である。条件 1 であれば実験参加者が 5 m 歩行するごとにバーチャル空間の歩行経路の曲率半径は 2.5 m から 1.54 倍ずつ増加していく。

実験の各試行において実験参加者には図 2 に示すような映像を提示し，表示された道の上を歩行し続けてもらった。道は 5 m ずつ提示し，実験参加者が各道を 4 m 進むごとに次の道を新たに提示するようにしている。ユーザには事前に VR 体験において生じうる違和感の原因として以下の 3 つを伝えておき，歩行中に違和感が生じた際は装着してもらったコントローラのトリガを引くと同時に口頭でどの違和感に該当するか，該当しないならそれはどういった違和感であったかを報告してもらった。

- 画面がかくかくする，映像が遅れていたり，乱れている

表 1: 曲率変化率条件と 5 m ごとの曲率半径倍率の対応。

条件番号	曲率変化率 [m^{-1}]	5 m ごとの半径倍率 (-)
1	-0.07	1.54
2	-0.06	1.43
3	-0.05	1.33
4	-0.04	1.25
5	0.02	0.91
6	0.05	0.8
7	0.08	0.71

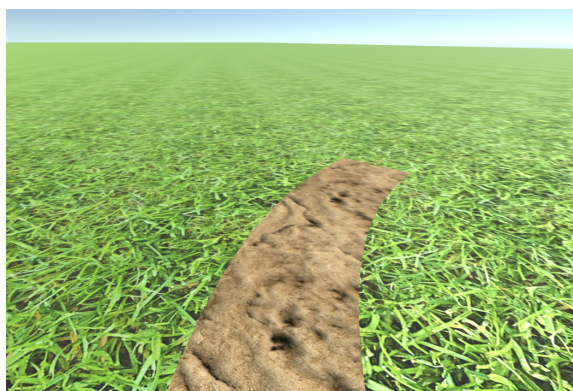


図 2: 実験参加者に提示するバーチャル空間。各試行において実験参加者は表示されている経路に沿うよう歩行する。

- 映像で提示されている景色の現実感が弱い
- 映像の動きが実際の歩行感覚とずれている

この中でユーザから 3 番目の「映像の動きが実際の歩行感覚とずれている」という違和感の報告があったところで各試行を終了し、これを計 28 試行行なった。また、曲率変化率 7 条件について各 1 回ずつそれぞれの試行後にシミュレータ酔いを計測する評価指標である SSQ(Simulator Sickness Questionnaire)[8] のアンケートを計 7 回行った。すべての試行終了後に実験参加者には実験に対する意見や感想を口頭で報告してもらった。

3.2 結果

曲率変化率ごとの違和感知覚時の曲げゲインの値は図 3, 4 の通りである。図 3 で示す曲率半径増加条件について正規性検定のために Shapiro-Wilk 検定を行い、仮定が棄却されたので Friedman 検定を行ったところ条件間で有意差は見られなかった ($\chi^2 = 2.52, p = .471$)。図 4 で示す曲率減少条件について正規性検定のため Shapiro-wilk 検定を行い、正規性の仮定が満たされたため 1 要因参加者内分散分析にかけたところ有意差が見られた ($F = 9.651, p = .007, \eta^2 = .506$)。曲率半径減少条件において条件間の比較のため Shaffer 法により p 値を補正して多重比較を行ったところ条件 5,6 間, 条件 5,7 間で有意差が見られた (5,6 間: $p = .025$,

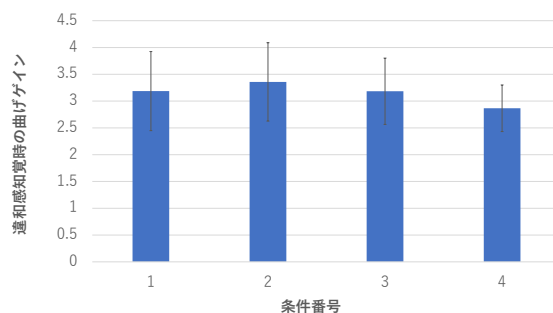


図 3: 曲率半径増加条件における違和感知覚時の曲げゲイン。条件番号は表 1 に対応している。

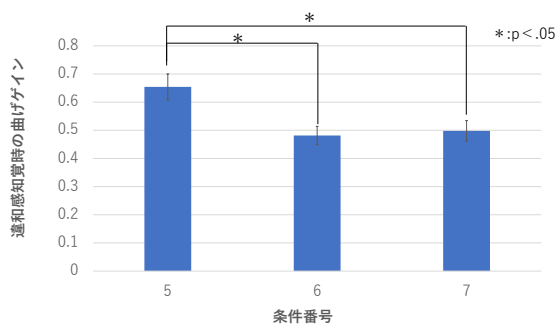


図 4: 曲率半径減少条件における違和感知覚時の曲げゲイン。条件番号は表 1 に対応している。

5,7 間: $p = .046$)。違和感知覚時の曲げゲインの値は曲率半径増加条件では条件 2 で最大の 3.36, 減少条件では条件 6 で最小の 0.48 となった。また SSQ の結果について 1 要因参加者内分散分析を行ったところ、曲率変化率の条件間で有意差は見られなかった ($F = .446, p = .840, \eta^2 = .018$)。

実験終了後参加者から得られた意見には、以下のようなものが見られた。

- 違和感は感じたもののそれを受け入れて体験が続けられた
- トリガーを引く前にもわずかに違和感があったが、それが明確なものになったタイミングでトリガーを引いた
- 半径が減少する試行では回転がきつくなることでその回転の感覚が歩行感覚とのずれによる違和感なのか判断しづらいことがあった

3.3 考察

実験結果から、バーチャル空間の歩行経路の半径増加率は 5 m 進むごとの倍率が 1.25 から 1.54 倍の範囲では参加者の違和感知覚のタイミングに有意な違いが見られず、半径減少率は 5 m 進むごとの倍率が 0.71 から 0.91 倍の範囲では 0.8 倍の時が最も違和感を知覚しにくくなることが分かった。条件 5,6 間, 条件 5,7 間で有意差が見られたことから半径減少条件ではその変化率が体験の没入感に影響を及ぼす要因となりうると思われる。また参加者からのコメントで見られたように、半径減少により回転量が増えるこ

とでその回転の厳しさと歩行感覚のずれの違和感がまざり、半径減少条件において違和感知覚のタイミングを正確に判断できなかった可能性が考えられる。さらに参加者数が5人と少なかったために、違和感知覚における個人差の影響が結果に大きく反映された可能性もある。

また、半径増加条件において、先行研究 [2] ではユーザが操作に気づくとされる曲げゲインの知覚閾値が 4.35 であったのに対し、今回の実験では条件 2 の 3.36 が最も大きい値となった。先行研究よりも小さな値となった原因としては、評価指標と実験環境の違いが挙げられる。先行研究では複数のゲインの値の条件を用意し、各試行で一定の曲げゲインをかけて、歩行し終わった参加者に対しバーチャル空間の経路が実空間の経路と比較して左か右どちらに曲がっているか答えさせる二肢強制選択法（two-alternative forced choice task : 2AFC 法）を用いた評価法であった。それに対して、今回の予備実験では連続的に変化する曲げゲインをかけて、歩行中の参加者に対し違和感を感じたその場でその違和感について報告してもらう手法をとっている。これにより今回の実験では先行研究と比較してより早い段階で違和感に気づき、到達した曲げゲインの値が小さくなったと考えられる。また実験環境においては、先行研究では実験部屋は現実にいる感覚を低減するために暗くされていたことや提示していた映像中に複数の木が存在していたことが没入感の差を生み出し違和感知覚に影響を及ぼした可能性が考えられる。

一方で、参加者のコメントから、違和感には体験を続けるうえで許容できる違和感と許容できない違和感が存在すると考えられる。許容できる違和感であれば没入感が途切れずに体験を継続できると考えられる。また、先行研究において回転量操作では実験参加者に歩行中に口頭で違和感知覚を報告してもらったタイミングと 2AFC 法によって求めた知覚閾値が異なっていることが示されている [9]。これらのことから体験の没入感を保つためには許容できる違和感を知覚したタイミングや RDW の操作に気づくタイミングだけでなく、没入感に影響を及ぼしうる許容できない違和感を知覚したタイミングに着目する必要があると考えられる。

4. 結論

本論文では視覚情報のみの操作による効果的な RDW の手法として曲げ操作を用いてバーチャル空間の経路の曲率を連続的に変化させる手法の提案を行い、予備実験により曲率変化率がユーザの違和感知覚のタイミングに与える影響を検証した。これによりユーザは曲率半径増加条件では曲げゲインが最大で 3.36、減少条件では最小で 0.48 となると違和感を知覚することが示された。また曲率の変化率は、曲率半径が 5m ごとに 1.25 から 1.54 倍となる増加条件においてはユーザの違和感知覚のタイミングに影響を与えず、曲率半径が 5 m ごとに 0.71 から 0.91 倍となる減少条件においては影響を与えることが示された。

今後は本稿で示した予備実験の結果を踏まえて、歩行経路の曲率変化率の条件を固定した上で、連続的にバーチャル空間の経路の曲率半径を変化させた場合と非連続的に変化させた場合を比較し、ユーザの違和感知覚に与える影響と動的な曲げ操作の効果について検証する。

謝辞 本研究の一部は科研費 基盤研究 (B)(19H04149) 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 EUROGRAPHICS, Vol. 9, pp. 105–106, 2001.
- [2] 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. 1389–1398, 2017.
- [3] 水谷純也, 松本啓吾, 鳴海拓志, 葛岡英明, 廣瀬通孝. 旋回量操作型リダイレクション手法の検討. 第 24 回日本バーチャルリアリティ学会大会論文集, 2019.
- [4] 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.
- [5] 松本啓吾, 鳴海拓志, 伴祐樹, 谷川智洋, 廣瀬通孝. 視覚間相互作用を用いた曲率操作型リダイレクテッドウォーキング. 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 23, No. 3, pp. 129–138.
- [6] Peizhong Gao, Keigo Matsumoto, Takuji Narumi, and Michitaka Hirose. Visual-Auditory Redirection : Multimodal Integration of Incongruent Visual and Auditory Cues for Redirected Walking. IEEE ISMAR 2020, to be appeared.
- [7] Ben J. Congdon, and Anthony Steed. Sensitivity to rate of changes in gains applied by redirected walking. In 25th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, pp. 1–9, 2019.
- [8] Robert S. Kennedy, Norman E. Jane, Kevin S. Berbaum, and Michael G. Lilienthal. Simulator sickness questionnaire: an enhanced method for quantifying simulator sickness. 1993.
- [9] Patric Schmitz, Julian Hildebrandt, Andr e Calero Valdez, Leif Kobbelt, and Martina Ziefle. You spin my head right round: Threshold of limited immersion for rotation gains in redirected walking. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 24, No. 4, pp. 1623–1632, 2018.