

VR 空間における歩行者アトラクタによる進路誘導の影響分析 An Analysis of Influence of Path Guiding by Pedestrian-type-Attractors in a VR Space

勝又 梨玖[†] 小俣 昌樹[‡]
Riku Katsumata Masaki Omata

1. はじめに

Virtual Reality (VR) 空間での歩行は高い身体存在感につながる[1]. しかし、現実での物理的な空間は範囲が限られていること、センサが歩行者を正しく計測できる範囲が限られていることから、歩行移動の範囲は制限されてしまう[2]. そこで、リダイレクテッドウォーキング (redirected walking, RDW) という、歩行者に提示する視覚的情報を操作することで、物理空間よりも広い空間を提供する技術が提案されている[2]. アトラクタは、RDW 手法のひとつで、ユーザとの関わり (見せる、触らせる、聞かせるなど) をつくり、歩行者の注意を引き付ける. そして、引き付けている間に現実世界の回転運動とは異なる回転ゲインで仮想世界の回転度を操作し、歩行者を無意識に目的の場所に方向転換させる技術である[3]. しかし、歩行者が方向転換するとき、アトラクタへ注意を向け続ける必要があることやアトラクタの不自然な介入が、仮想世界への没入感を阻害してしまうことが問題となる[3].

本研究では、このような問題を解決するために、ユーザの周りを歩いている仮想の歩行者 (以降、歩行者アトラクタとよぶ) の進路によって、ユーザを無意識に進路誘導するアトラクタを提案する. この歩行者アトラクタはユーザとの関わりを要求しないため、方向転換のときにアトラクタを注視する必要がなく、また、突然の介入を必要としないため、没入感を阻害しないと考えられる. しかし、このような状況下での知見は十分ではなく、歩行者アトラクタを開発するためには、限られた空間での効果的なリダイレクトを可能とする歩行者アトラクタの因子やその程度を知る必要がある. 本稿では、このための初期研究として、ユーザの周りの歩行者アトラクタがユーザの進路に与える影響を調査し、分析する. 長い歩行距離を分析するため、物理的空間に制限のない VR 歩行デバイスのトレッドミルを使用する.

2. 関連研究

2.1 リダイレクテッドウォーキング

RDW とは、人間が主に空間知覚において、視覚優位であることを利用し、ヘッドマウントディスプレイを通してユーザの視覚に提示される映像を変化させることで、実空間と VR 空間とで移動方向・移動量をずらし、実空間よりも大きな歩行可能空間を提示する技術である[2].

この RDW の基本操作には、ユーザが実際に回転した角度に回転ゲイン (rotation gains) を掛けることで、VR 空間上の回転量を調整する「回転量操作」や、実際には円弧上の経路を歩行するユーザに曲率ゲイン (curvature gains) を

[†] 山梨大学 University of Yamanashi

適用し VR 空間上の直線上の経路と対応させて、ユーザに直進運動感覚を生起させる「曲率操作」などがある[4].

しかし、このように視覚提示される映像を操作するだけでは、リダイレクトできる角度に限界があるため、触覚刺激を組み合わせることで、効果的なリダイレクトを可能にする試みがおこなわれている[4]. 本研究で提案する歩行者アトラクタも、より効果的なリダイレクトを可能にすると考えている.

2.2 アトラクタ

Peck らはアトラクタを提案し、アトラクタがユーザと関わっている間、ユーザが VR 空間の回転を知覚しにくいと報告している[5]. また、Cools らは「見る (Looking)」「触れる (Touching)」「相互作用のある (Interacting)」アトラクタを比較した[6]. その結果、複雑な関わりを要求するアトラクタは、ユーザに好まれ、より長く注意を引くことができ、VR 空間が回転したことを知覚しにくいと報告している. しかし、このようなアトラクタは視覚操作の面で限界があるため、別タイプのアトラクタも提案されている. Lee らは視覚操作の限界を改善するため、においや音を使用したアトラクタを提案し、その有効性を検証した[3].

これらのアトラクタは、ユーザを目的の方向に誘導するまで、頻繁に介入してくるため、ユーザの没入感を阻害してしまう. さらに、方向転換時にはアトラクタと関わり続けている必要があるため、アトラクタによるリダイレクトを制限する可能性がある. 本研究では、ユーザとの関わりを求めないアトラクタを提案することで、このような問題の解決を試みる.

2.3 歩行者による影響

歩行者による影響について、Dachner らはフォロワとリーダーを対象にし、歩行中の方位合わせなどを観察した[7]. フォロワはリーダーと一緒に歩きながら、一定の距離を保ち、方向が変わっても一緒にいるように指示された. その結果、フォロワは、空間的位置や対人距離に関係なく、リーダーの歩行方向に密接に合わせる傾向が示された. また、Nguyen らは上記の研究のように明示的な指示がない場合にも、ユーザはリーダーである仮想エージェントに速度や歩行経路を合わせるのかを検証した[8]. その結果、ユーザは仮想エージェントの歩行速度に合わせて速度を大きく変化させ、歩行経路を合わせて歩くことがわかった.

これらの研究では、明示的な教示がなされたり、ユーザと仮想エージェントとの関係を意識させていたりして、ユーザと無関係な仮想の歩行者による進路誘導への影響は対象としていない.

3. 実験

実験目的は、歩行者アトラクタがユーザの進路に与える影響を明らかにすることである. そのために、ユーザが

VR 空間で複数の歩行者アトラクタと共に歩行しているときに歩行者アトラクタの進路がそれた場合、ユーザの進路にどのように影響するかを調査する実験をおこなった。さらに、没入感に関する質問紙調査をおこない、歩行者アトラクタによる誘導が没入感を阻害しない方向転換を可能にするかどうかを検証した。

3.1 実験環境と条件

実験用の仮想環境として、仮想空間の中で目印になるものがない、仮想の平原を作成した(図 1 参照)。この図のように、平原にはゴールの目印となる旗を、歩行者アトラクタと一緒にまっすぐ歩いて約 1 分 30 秒で到達できる距離に配置した。ゴールの旗は、参加者が歩行タスクを開始すると見えなくなり、一定のラインを超えると再び見えるように設定した。また、複数の歩行者アトラクタとして、あらかじめ経路を設定した 14 人の歩行者アトラクタをユーザの周りを取り囲むように配置した。

実験条件として以下の 3 条件を用意した。

- 条件 A : 歩行者アトラクタなし
- 条件 B : 歩行者アトラクタがゴールに向かってまっすぐ歩く
- 条件 C : 歩行者アトラクタがゴールから右にそれて歩く

実験には VR 歩行デバイスであるトレッドミル (KAT VR, KAT WALK C) と VR ヘッドマウントディスプレイ (VIVE, VIVE Pro Eye) を使用した。VR 環境の構築には、Unity を使用した。実験タスク実行時の様子を図 2 に示す。

3.2 実験タスク

参加者には、タスクとして、仮想世界の平原でゴールに向かってまっすぐ歩くように指示した。あわせて、タスクを開始するとゴールは見えなくなってしまうので、ゴールが見えていたところを目指して歩行するよう教示した。

3.3 実験手続きと参加者

実験に関する事前説明、インフォームドコンセント、歩行練習、実験、休憩、質問紙調査を含めた実験参加者一人あたりの合計時間は約 40 分であった。参加者は実験を通して HMD を約 15 分間着用した。事前説明では参加者に先入観が生じ実験結果に影響を与えることを避けるため、「トレッドミルのユーザビリティを評価する実験」という偽の実験目的の説明をした。

参加者にはタスクを始める前に、トレッドミルでの歩行に慣れてもらうためと、実験での歩行速度を統一するため

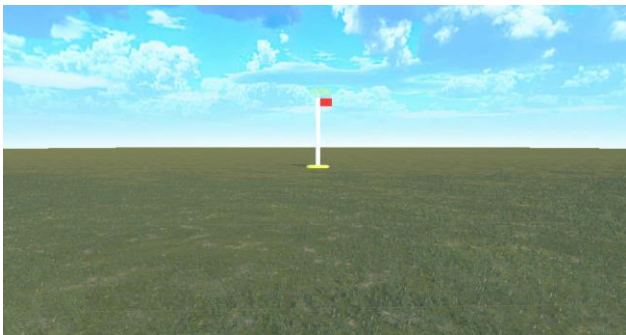


図 1 実装した仮想環境



図 2 実験タスク実行時の様子

に、VR 歩行の練習をしてもらった。

実験は被験者内計画でおこない、各参加者の条件の順序はラテン方格に基づいて割り当て、それぞれ 1 回ずつ実施した。各条件において、スタート地点からゴール地点手前までの参加者の通過座標を記録した。また、参加者は各条件下でタスクを終了するごとに、HMD を取り外し、VR 体験の没入感に関する質問紙調査[9]へ回答した。この回答には 5 段階のリッカート尺度 (1 = 全く当てはまらない, 5 = 非常に当てはまる) を用いた。本実験には、工学部の男子大学生 12 人 (21~22 歳) が参加した。

4. 実験結果

4.1 歩行経路

条件 A (歩行者アトラクタなし) での参加者の歩行経路を図 3 に、条件 B (歩行者アトラクタがゴールに向かってまっすぐ歩く) での歩行経路を図 4 に、条件 C (歩行者アトラクタがゴールから右にそれて歩く) での歩行経路を図 5 に示す。これらのグラフにおいて、スタート地点の座標を (0, 0)、ゴール地点の座標を (500, 0)、スタートからゴールまでの直線を $y = 0$ の直線で表す。縦軸の正の値はスタートからゴールまでの直線から参加者が右にそれて歩いたことを、負の値は左にそれて歩いたことを示す。図 5 の破線は歩行者アトラクタの歩行経路を表す。

座標データは、参加者がスタート地点からゴール地点手前のラインにたどり着くまでの時間経過で記録したため、参加者によってデータ数が異なる。そのため、これらの図では各参加者の通過座標データの数を 500 個に正規化して使用した。

これらの図の結果から、図 3 の条件 A では、参加者によって経路がばらついていることがわかる。図 4 の条件 B では、参加者 2 を除いてスタートからゴールまでの直線から大きくそれることなく歩いていることがわかる。図 5 の条件 C では、参加者は右にそれて歩いていることがわかる。また、それぞれの条件で、途中で大きく方向転換している参加者の経路は、ゴールが一定ラインを超えると見えるよ

うに設定してあることから、その時点でゴールに気づき、ゴールに向かって向きを補正して歩いたことを示している。

各参加者のスタートからゴールまでの直線からそれた距離（歩行経路グラフの縦軸座標の絶対値）の総和を取り、歩行者アトラクタが参加者の進路をそらすことができたかを、Friedman 検定により検証した。直線からそれた距離に対して、歩行者アトラクタによる差はないとはいえないという結果になり ($\chi^2(2) = 13.5, p = .001$)、ボンフェローニ法を用いた多重比較によれば、条件 A と C、条件 B と C との間に有意差があり（順に、 $p = .010; p = .004$ ）、条件 C での参加者の進路のそれた距離が有意に大きいという結果になった。

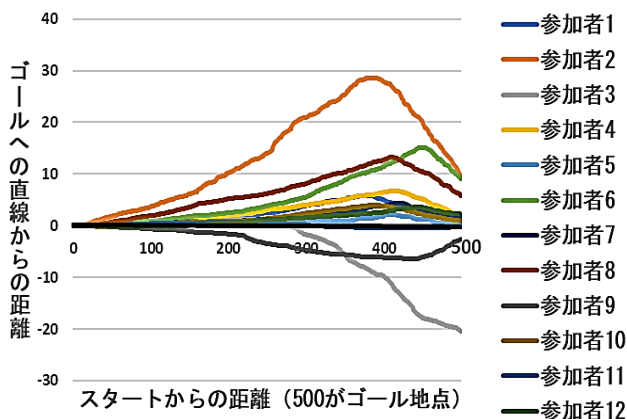


図 3 条件 A の歩行経路

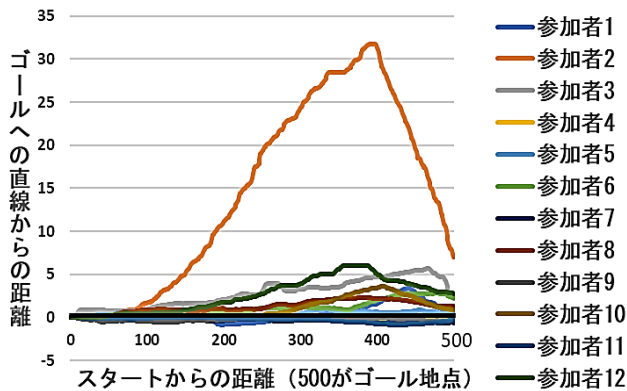


図 4 条件 B の歩行経路

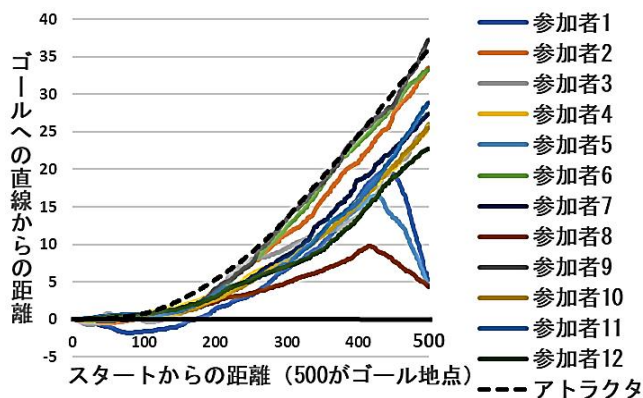


図 5 条件 C の歩行経路

4.2 没入感に関する質問紙調査

没入感について、7つの質問の点数を合計し、その値を没入感のスコアとした。歩行者アトラクタが参加者の没入感を阻害したか、対応のある一要因分散分析により検証したところ、没入感に対して、歩行者アトラクタによる差があるとはいえないという結果になった ($F(2, 32) = 0.634, p = .537$)。

この結果から、歩行者アトラクタによる没入感への影響は少なく、歩行者アトラクタによる進路誘導がユーザの没入感を阻害する可能性は少ないことがわかった。一方で、没入感が助長されることもないこともわかった。

5. 歩行経路の詳細分析

参加者と歩行者アトラクタとの歩行経路の関係をより詳細に分析するために、同時刻での参加者と歩行者アトラクタの座標を比較する。

条件 C での参加者の歩行経路に時間軸を加えたグラフを図 6 に、参加者と歩行者アトラクタとの距離を経過時間に即して表したグラフを図 7 に示す。これらの図では、参加者と歩行者アトラクタとの座標を秒単位で比較するために、同じタイムスタンプに複数の座標データがある場合はその平均を取り、その値をその時刻の座標とした。図 6 はスタート地点の座標を(0, 0)、ゴール地点の座標を(0, 67)、z 軸を経過時間とし、参加者や歩行者アトラクタの時刻ごとの座標を表している。

図 6 から、歩行者アトラクタの進路が右にそれてから、参加者の進路も右にそれている様子がわかる。あわせて、同時刻で参加者と歩行者アトラクタが同じような座標にいることから、参加者は歩行者アトラクタを追随していることがわかる。図 7 から、参加者と歩行者アトラクタとの距離は一定ではなく、少しばらついていることがわかる。

6. 考察

6.1 歩行経路

参加者の歩行経路結果では、条件により参加者の経路に違った特徴が見られた。図 3 の条件 A の結果から、参加者の経路にばらつきがあることがわかり、参加者が実験タスク中に目印にするものがなく歩いたためだと考える。図 4 の条件 B の結果から、参加者は大きくそれることなく歩けていることがわかり、歩行者アトラクタと一緒に歩くことでまっすぐ歩くことができたことが理由だと考える。図 5 の条件 C の結果から、参加者が右にそれて歩いていることがわかり、歩行者アトラクタが右にそれて歩いたことで、参加者も右に誘導されたと考える。右に誘導された理由として、参加者が直線方向を知るために歩行者アトラクタを指標としたため、歩行者アトラクタがそれても、その進路方向をまっすぐだと錯覚してしまい右にそれた可能性が考えられる。

歩行経路の詳細分析では、参加者が歩行者アトラクタを追随している様子（図 6）や参加者と歩行者アトラクタの距離が一定ではない様子（図 7）が確認できた。参加者が歩行者アトラクタを追随した理由として、歩行者アトラクタを疑っていなかったため、歩行者アトラクタがまっすぐ進んでいると思いつき、歩行者アトラクタについていった可能性や、同調バイアス（集団の中にいる場合、周囲の人と

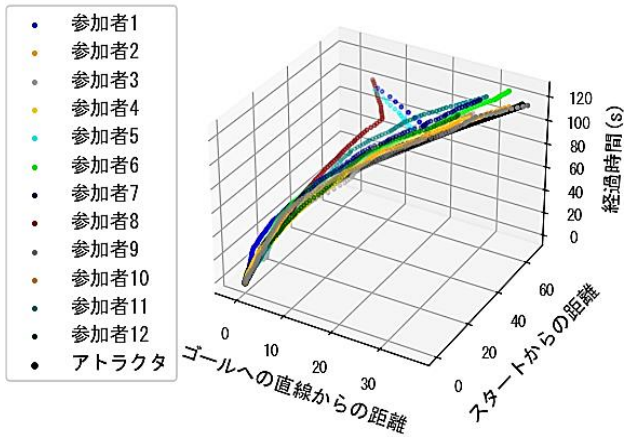


図6 時間軸を加えた参加者の歩行経路(条件C)

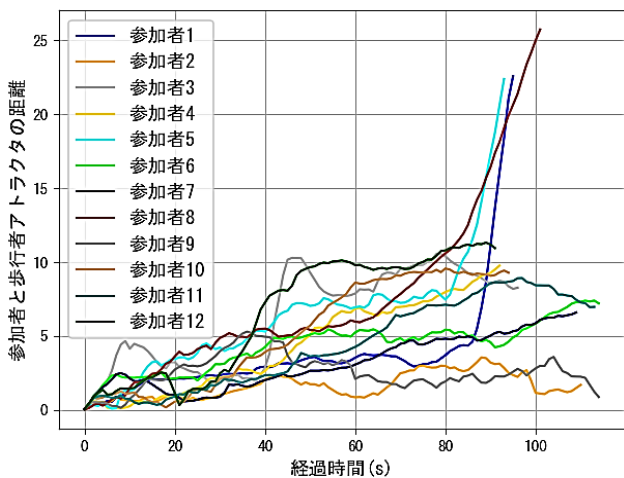


図7 参加者と歩行者アトラクタとの距離(条件C)

同じ行動をとってしまう心理) [10]が働き、歩行者アトラクタと同じ行動をとってしまった可能性が考えられる。参加者と歩行者アトラクタとの距離が一定ではなく少しばらついている理由として、参加者は明確にゴールの方向だと確信して進んでいるのではなく、方向があっているか迷いつつ、歩行者アトラクタに影響されながら歩いているからだと考えられる。

ほとんどの参加者が誘導された一方で、参加者8などは、条件Aと条件Cでの歩行経路にあまり変化が見られないことから、歩行者アトラクタの影響をあまり受けていないと推定される。影響を受けなかった理由として、歩行者アトラクタの進路がそれたことに気づいた可能性があげられる。

6.2 没入感に関する質問紙調査

質問紙調査の結果から、条件間で参加者の没入感に差はなく、歩行者アトラクタによって没入感が阻害されることはなかったといえる。理由として、歩行者アトラクタによる誘導が不自然ではなかったからだと考えられる。一方で、没入感が助長されることもなかった。これは、本実験で使用した仮想環境が、仮想の歩行者が存在する環境として、現実感という点で自然ではなかったからだと考えられる。

7. おわりに

本研究では、従来のアトラクタの問題点である、方向転換のときにアトラクタを注視し続ける必要があることや、

不自然な介入が没入感を阻害する可能性があることを解決するため、歩行者アトラクタを提案し、歩行者アトラクタによる進路誘導の影響を調査した。実験では、ユーザにゴールを目指すよう指示し、予め経路を設定した複数の歩行者アトラクタをユーザの周りに配置して、仮想の草原で、歩行者アトラクタがまっすぐ歩く条件、右側にそれていく条件、および、ひとりもない条件を比較した。

調査の結果、ユーザは、歩行者アトラクタの進路が右にそれたとき、歩行者アトラクタを追従し、右にそれる傾向を確認した。このことから、歩行者アトラクタの進路誘導によって、ユーザの進路を誘導できる可能性が示された。さらに、歩行者アトラクタの誘導によって没入感が阻害されることはなかった。これらの結果から、本研究で提案した歩行者アトラクタは、ユーザの没入感を阻害せず、ユーザの注視がなくてもユーザを方向転換させることが可能であることを示した。

今後は、今回の実験で効果的に誘導できなかった参加者がいたため、歩行者アトラクタによる進路誘導に気づく閾値の検証をする必要がある。また、今回の実験で使用したような何もない仮想の平原は、実際にはあまり使用されないと考えられるため、建造物や動植物などの目印がある仮想環境下での誘導効果の程度も検証する。さらに、歩行者アトラクタの数や配置による進路誘導への影響や、今回の実験とは異なる経路での進路誘導を調査し、効果的なリダイレクトを可能にする歩行者アトラクタの因子をさらに詳しく明らかにしていく計画である。

参考文献

- [1] Wilson, P. T., Kalescky, W., MacLaughlin, A., and Williams, B., "VR locomotion: walking > walking in place > arm swinging", VRCAI'16: Proceedings of the 15th ACM SIGGRAPH Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry, Vol. 1, pp. 243-249(2016).
- [2] Razaque, S., Kohn, Z., and Whitton, M. C., "Redirected walking", In Proceedings of EUROGRAPHICS 2001, 9, pp.105-106(2001).
- [3] Lee, J., Hwang, S., Kim, K., and Kim, S., "Auditory and Olfactory Stimuli-Based Attractors to Induce Reorientation in Virtual Reality Forward Redirected Walking", In Extended Abstracts of the 2022 CHI Conference, Article 446, pp.1-7(2022).
- [4] 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(2018).
- [5] Peck, T. C., Whitton, M. C., and Fuchs, H., "Evaluation of Reorientation Techniques for Walking in Large Virtual Environments", IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, Vol. 15, No. 3, pp. 383-394(2009).
- [6] Cools, R., and Simeone, A. L., "Investigating the Effect of Distractor Interactivity for Redirected Walking in Virtual Reality", SUI '19: Symposium on Spatial User Interaction. Article 4, pp. 1-5(2019).
- [7] Dachner, G. C., and Warren, W. H., "Behavioral Dynamics of Heading Alignment in Pedestrian Following", Transportation Research Procedia, Vol. 2, pp. 69-76(2014).
- [8] Nguyen, A., Wüest, P., and Kunz, A., "Human Following Behavior In Virtual Reality", VRST '20: Proceedings of the 26th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology, Article 57, pp. 1-3(2020).
- [9] IJsselseijn, W. A., de Kort, Y. A. W., and Poels, K., "The Game Experience Questionnaire", Technische Universiteit Eindhoven, (2013).
- [10] 藤川真子, 横田晋大, 徳岡大, 中西大輔, "多数派同調バイアスは正解の存在する問題で観察されるか?", 心理学研究, Vol.94, No.6, pp.506-511(2024).