



VR 視覚刺激と歩行運動が自己運動感覚に与える影響の分析 (2) ーベクション誘発刺激の提示距離による影響の考察ー

杉江鎌¹⁾, 橋口哲志²⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

1) 立命館大学大学院 情報理工学研究科 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

2) 立命館大学 デザイン・アート学部 (〒603-8577 京都市北区等持院北町 56-1)

概要: 視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) は、一様に運動する視覚刺激を観察することで、自分が移動しているように感じる現象である。従来は静止状態での検討が中心だったが、近年は歩行中の自己運動感覚への影響にも注目が集まっている。本研究では、VR 空間において、視覚刺激の提示距離 (道幅の 1 倍, 2 倍, 3 倍) と歩行空間のオブジェクト密度 (街灯なし, 疎, 密) が歩行中の自己運動感覚に及ぼす影響を調査した。その結果、主観歩行速度には提示距離の主効果が認められ、刺激が近いほど速く感じる傾向が示された。主観歩行距離にはオブジェクト密度の主効果が認められた。また、潜時は刺激が近いほど、またオブジェクト密度が低いほど短縮された。一方、実際の歩行速度には有意差が認められなかった。

キーワード: 視覚誘導性自己運動感覚, 歩行運動, VR, 提示距離

1. はじめに

視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) は、一様に運動する視覚刺激を観察することで、視覚刺激とは逆方向に自身の運動を知覚する現象である。この現象は、Mach による初期の報告[1]以来、広視野ディスプレイや HMD (Head Mounted Display) を用いた多くの研究で分析されてきた[2][3]。従来の研究は、参加者が静止した状態でのベクション知覚に焦点を当て、視覚刺激の提示条件や視野特性の影響を検討している。また、背景にある静止刺激の抑制効果はサイズや提示する位置に依存しないことが確認されており[4]、さらに、両眼視差による奥行き情報の付与が、知覚される速度感や移動距離を強める効果も実証されている[5]。これらの知見から、視覚刺激の空間的な配置や奥行き情報が自己運動感覚に影響を及ぼすことが示唆されている。

しかし、これらの研究の多くは参加者が静止した状態を対象としており、能動的な歩行運動を伴う環境下において、刺激の提示距離や歩行空間がどのように相互作用し、自己運動感覚に影響を及ぼすかについては十分に解明されていない。一方、近年では、参加者が歩行中に視覚刺激を提示した際のベクション知覚に関する研究も進められており、視覚刺激と現実の運動感覚が相互に作用する可能性が指摘されている[6]。このことから、歩行時には静止時とは異なる知覚特性を示す可能性があり、特に、観察者の近傍に提示される視覚情報の変化が、速度感の知覚に寄与する可能性がある。

さらに、開放的な空間では歩行速度が遅くなること[7]や、屋外での歩行速度は屋内より速いこと[8]が示されており、歩行空間の違いが歩行速度に影響することが明らかにな

っている。このような環境の違いは、ベクションにも影響を与える可能性があり、この相互関係を理解することは、現実世界への応用を検討するうえでも重要な課題である。

そこで本研究では、VR 空間における歩行中の自己運動感覚に着目し、視覚刺激の提示距離および歩行空間のオブジェクト密度の組み合わせが、参加者の自己運動感覚に及ぼす影響を調査することを目的とした。具体的には、参加者からの距離 (道幅の 1 倍, 2 倍, 3 倍) と VR 空間における街灯の配置密度 (なし, 疎, 密) をパラメータとし、それらの主効果および交互作用を分析した。

2. 実験準備

2.1 実験システム

実験では HMD (Meta Quest 3) を使用し、参加者は VR 空間内で視覚刺激を観察しながら歩行した。Meta Quest 3 は約 110 度の水平視野角を持ち、広視野での視覚提示が可能である。さらに、ビデオスルーモードに切り替えることで、現実空間を視認しながら歩行することもできる。本実験ではこのモードを用い、参加者が現実空間を視認しながら自然な歩行感覚に慣れるとともに、平均歩行速度を計測し、ベクション誘発刺激の基準として使用した。

2.2 実験環境

【現実環境】 実際に参加者に歩かせる現実環境の様子を図 1 に示す。実験は室内に設置した 6m の歩行エリアで実施した。歩行エリアは HMD の安全機能で管理され、参加者が端に近づくと警告が表示される (ただし、実験中は参加者に表示されない設定とした)。

【歩行空間】 本実験では、道幅 3.5m、奥行き 30m に固定

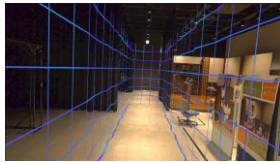
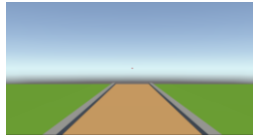
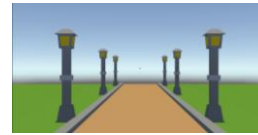


図1 現実環境



(a) 配置なし

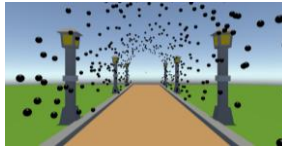


(b) 疎



(c) 密

図2 実験で用いた歩行空間



(a) 1倍



(b) 2倍



(c) 3倍

図3 実験で用いたパーティクル

した一本道をベースに、街灯の配置密度が異なる3種類の歩行空間（図2）をVR空間に構築し、参加者は現実環境と同様の距離を歩行した。これらの歩行空間は、奥行き方向の視覚の手がかりの量が異なるため、その違いがバクシオンに影響を及ぼすかを比較できると考えた。本稿では、街灯の配置密度を「歩行空間のオブジェクト密度」と呼ぶ。

2.3 視覚刺激

バクシオンを誘発するため Unity のパーティクルシステムを用いた視覚刺激を提示した（図3）。直径0.1mの黒球を円柱状に配置し、地面が見えるようにするため下面を表示しないように設定した（以下、パーティクルと呼ぶ）。パーティクルを参加者の前方から後方へ流れるように移動させることで、前進方向の運動感覚を誘発した。また、参加者の視線を安定させるための注視点として、視界の中央に赤色のマーカーを配置した。提示距離によって各黒球の網膜像サイズが変化しないよう、黒球の直径を提示距離に比例して拡大した。パーティクルは参加者を中心軸とする円柱面上に配置した。円柱の半径を道幅3.5mの「1倍」、「2倍」、「3倍」に設定し、これを提示条件とした。

3. 実験

3.1 実験目的

本実験では、視覚刺激となるパーティクルの提示距離の違いが自己運動感覚に及ぼす影響に着目した。参加者がオブジェクトの密度が異なる歩行空間を歩行する際に参加者の前方から後方へ移動するパーティクルを提示し、参加者が知覚する自己運動感覚への影響を評価した。

3.2 実験条件

本実験では、知覚されるバクシオンを変化させる要因として、パーティクルの提示距離と歩行空間のオブジェクト密度の2要因を操作した。

1つ目の要因であるパーティクルの提示距離は、道幅と同じ距離に提示する「1倍」条件、道幅の2倍の距離に提示する「2倍」条件、道幅の3倍の距離に提示する「3倍」条件の3つを設定した。

2つ目の要因である歩行空間のオブジェクト密度につい

ては、一本道の左右に街灯を配置しない「なし」条件、両端に4本ずつ均等に配置した「疎」条件、両端に11本ずつ均等に配置した「密」条件の3つを設定した。これら2要因を掛け合わせた計9通りの試行条件を各2回ずつ、計18試行を行った。

実験前には、参加者にバクシオンおよび実験内容を映像や体験を通じて十分に説明し、手順を教示した。実験には成人男性18名・女性2名の計20名が参加した。全員が矯正を含め正常な視力を有し、年齢は20～25歳であった。

3.3 評価手法

知覚される自己運動感覚は、主観歩行速度、主観歩行距離、歩行速度で評価した。また、バクシオン強度の指標として潜時を用いた[3]。

主観歩行速度は、基準試行に対して比較試行の歩行速度をどの程度速く、または遅く感じたかを数値で回答させたものである。値が大きいほど速く感じたことを示す。主観歩行距離も同様に、知覚した歩行距離を数値で回答させ、値が大きいほど長く感じたことを示す。

潜時は、パーティクルが提示されてからバクシオンを知覚するまでの時間であり、短いほどバクシオンが速やかに誘発されたことを示す。コントローラのトリガーを参加者自身に押させることで潜時を計測した。また、40秒以内にバクシオンを知覚しなかった場合は潜時を40秒とした。

主観歩行速度と主観歩行距離の評価にはマグニチュード推定法を採用した。これは基準試行と比較試行を比較し、基準を100とした相対値で回答させる方法である。例えば、基準の2倍の速さに感じた場合は200、半分の場合は50と回答させた。主観歩行距離についても同様に評価させた。得られた評価値については、分布の歪みを軽減するために対数変換を施した[6]。実験は以下の手順で行った。

- (1) HMDのビデオシースルーモードで現実空間を歩行させた後、VR空間でも自由に歩行させ、参加者が自然な歩行速度に慣れるようにした。
- (2) 基準となる平均歩行速度を計測するため、ビデオシースルーモードで指定距離の歩行を6回実施させた。

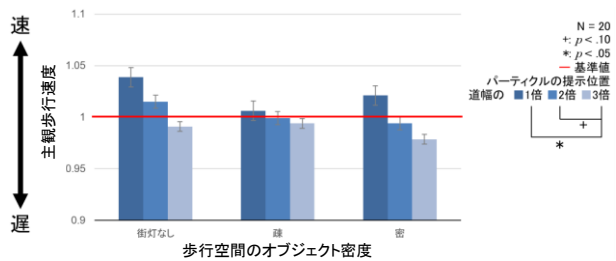


図4 主観歩行速度の結果

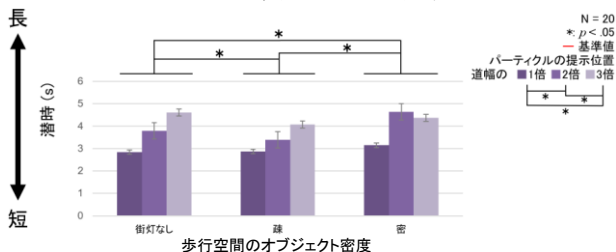


図6 潜時の結果

- (3) 評価の基準となる試行（基準試行）を実施した。基準試行は、パーティクルによる自己運動感覚の増減を評価するため、パーティクルを提示しない条件とした。この際パーティクルは提示せず、3秒のカウントダウン後に歩行を開始させた。「STOP」と画面に表示された時点で参加者を停止させ、このときの移動速度と歩行距離を記憶させた。
- (4) 比較試行では、パーティクルを提示した状態で、基準試行と同様の手順および歩行空間で歩行を行った。歩行後、参加者は主観歩行速度および主観歩行距離を基準試行と比較し、相対的な評価値を回答した。

以上を1試行とし、提示距離3条件とオブジェクト密度3条件を組み合わせた9条件を各2回、計18試行実施した。パーティクルの提示距離および歩行空間のオブジェクト密度は試行ごとにランダムに変更した。

3.4 結果

主観歩行速度、主観歩行距離、歩行速度については、歩行空間のオブジェクト密度（3種類）×パーティクルの提示距離（3種類）の参加者内分散分析を実施した。また、基準試行の歩行速度に対しては、歩行空間のオブジェクト密度（3種類）の参加者内分散分析を行った。さらに、潜時については、歩行空間のオブジェクト密度（3種類）×パーティクルの提示距離（3種類）の参加者内分散分析を実施した。また、各評価項目に対する正規性の確認のため、Shapiro-Wilk検定を行った。

【主観歩行速度】図4に主観歩行速度の結果を示す。本項目では一部の条件で正規性が否定されたため、ART ANOVAを実施した。分析の結果、パーティクルの提示距離の主効果は有意であった（ $F_{(2,152)} = 23.20, p < .001$ ）。一方で、歩行空間のオブジェクト密度による主効果（ $F_{(2,152)} = 1.880, p = .156$ ）および両要因の交互作用（ $F_{(4,152)} = .690, p = .603$ ）は有意ではなかった。

各条件間に対して Holm 法を用いた多重比較を実施した結果、「1倍」条件は「3倍」条件よりも有意に高かった。

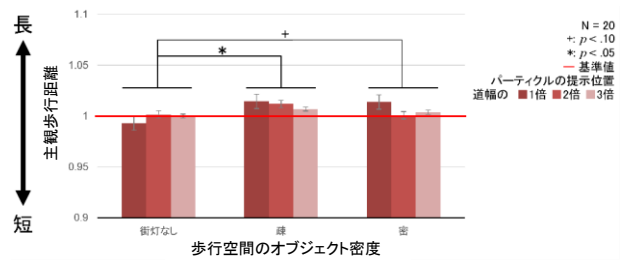


図5 主観歩行距離の結果

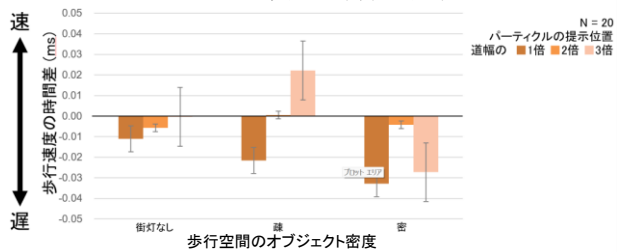


図7 歩行速度の結果

具体的には「1倍・密」と「3倍・密」の間（ $p = .013$ ），そして「1倍・密」と「3倍・なし」の間（ $p = .024$ ）などで有意な差が認められた。

【主観歩行距離】図5に主観歩行距離の結果を示す。本項目では一部の条件で正規性が否定されたため、ART ANOVAを実施した。分析の結果、歩行空間のオブジェクト密度の主効果は有意であった（ $F_{(2,152)} = 3.58, p = .030$ ）。パーティクルの提示距離（ $F_{(2,152)} = .780, p = .460$ ）および交互作用（ $F_{(4,152)} = .810, p = .523$ ）は有意ではなかった。

歩行空間のオブジェクト密度の主効果に対して Holm 法を用いた多重比較を実施した結果、「街灯なし」と「疎」の条件間に有意差が認められた（ $p = .034$ ）。一方、「街灯なし」と「密」の条件間（ $p = .110$ ）および「疎」と「密」の条件間（ $p = .527$ ）に有意な差は認められなかった。

【潜時】図6に潜時の結果を示す。全ての条件において正規性が確認された（ $p > .05$ ）ため、パラメトリック手法である反復測定分散分析（RM ANOVA, Greenhouse-Geisser 補正）を採用した。分析の結果、パーティクルの提示距離（ $F_{(1,38,26.23)} = 22.07, p < .001$ ）および歩行空間のオブジェクト密度（ $F_{(1,93,36.67)} = 7.930, p = .002$ ）の両要因に対する主効果において、それぞれが独立して有意であった。両要因の交互作用は認められなかった（ $F_{(3,58,67.94)} = .220, p = .913$ ）。

Holm 法により検定した結果、歩行空間のオブジェクト密度に関わらず、パーティクルの提示距離が参加者から遠くなるほど潜時が延長する共通の傾向がみられた。特に、歩行空間のオブジェクト密度における全条件に対して、「1倍」と「3倍」の条件間に有意な差が認められた（街灯なし： $t_{(19)} = -4.036, p = .002$ ；疎： $t_{(19)} = -3.446, p = .007$ ；密： $t_{(19)} = -4.424, p = .001$ ）。

【歩行速度】図7は基準試行と比較試行の歩行速度の差を示す。本項目では一部の条件で正規性が否定されたため、ART ANOVAを実施した。分析の結果、パーティクルの提示距離（ $F_{(2,152)} = 1.580, p = .210$ ）、歩行空間のオブジェク

ト密度 ($R_{(2,152)} = 2.070, p = .130$), および両要因の交互作用 ($R_{(4,152)} = 1.73, p = .146$) のいずれにおいても有意差は認められなかった。

3.5 考察

本稿では, VR 空間におけるパーティクルの提示距離と歩行空間のオブジェクト密度の 2 要因を操作し, 知覚される自己運動感覚への影響を分析した。

潜時においては, パーティクルの提示距離に近いほど短く, また歩行空間のオブジェクト密度が低いほど, ベクシオンが早く知覚された。関連研究において周辺視野の刺激速度がベクシオンの誘発に強く寄与することが示されており [3], 「1 倍」条件では参加者の周辺視野におけるパーティクルの速度が相対的に高まることで運動感覚に強く影響したと考えられる。一方で, 歩行空間のオブジェクト密度が密になるほど潜時が長くなった。これは, 周辺視野に存在するオブジェクトの空間周波数が高まることで, オブジェクトがパーティクルの動きと競合し, ベクシオンの誘発を阻害したと考えられる。

主観歩行速度においては, 歩行空間のオブジェクト密度による影響は見られず, パーティクルの提示距離が遠くなるほど値が低下する傾向が確認された。実験では, 各条件においてパーティクルの速度や視野に対して視認できる割合を一定に設定したにもかかわらず, 参加者から「パーティクルが遠くにあるほど遅く感じる」といったコメントが得られた。これは, パーティクルの提示距離が遠くなることによる空間の広がりから, 参加者が「自身の歩幅が相対的に小さくなった」と錯覚し, 結果として主観歩行速度が低下した可能性が考えられる。この結果から, パーティクルの提示距離は歩行空間とは独立して主観歩行速度に影響する可能性が示された。

主観歩行距離においては, 主観歩行速度とは対照的に, パーティクルの提示距離に影響を受けず, 歩行空間のオブジェクト密度に有意な差が確認された。「街灯なし」条件のように歩行空間に何も無い場合, 奥行き情報が不足し, 自身がどれだけ進んだかという距離感が把握しにくくなる。一方で, オブジェクトが存在することにより, オブジェクトが「自身がどこまで歩いたか」を認識するための手がかりとして機能し, 主観歩行距離が長くなったと考えられる。また, 「疎」と「密」の条件間に差がなかったことや, 参加者からの「密度による違いを感じなかった」というコメントを踏まえると, 参加者は歩行空間の空間周波数ではなく, 単なる手がかりの有無としてオブジェクトを認識している可能性が挙げられる。さらに, パーティクルが歩行の主観歩行距離に影響を与えなかったことから, パーティクルを歩行距離の判断手がかりとして利用していない可能性がある。

実際の歩行速度においては, 2 要因のいずれも影響を及ぼさなかった。このことから視覚刺激の操作が実際の歩行速度に及ぼす影響は確認されなかった。

本研究の意義は, ベクシオンの発生傾向の分析, メカニズムの解明を行うことで, VR・MR 映像コンテンツにおけ

る表現力, 没入感の向上に役立てることである。

以上より, パーティクルの提示距離が主観歩行速度に, 歩行空間のオブジェクト密度が主観歩行距離に独立して影響することが確認された。

4. むすび

本稿では, VR 空間における歩行中の自己運動感覚の知覚特性を解明するため, パーティクルの提示距離と歩行空間のオブジェクト密度の 2 要因を操作し, それらが主観的な速度や距離の判断, 潜時, 歩行速度に及ぼす影響を分析した。

実験の結果, 参加者が知覚する主観歩行速度はパーティクルの提示距離に依存し, 提示距離が参加者に近いほど増強することが確認された。一方で, 主観歩行距離はパーティクルの提示距離に影響を受けず, 歩行空間のオブジェクトの主効果が認められた。また, 潜時については, パーティクルの提示距離に近いほど, また歩行空間のオブジェクト密度が低いほど, ベクシオンの潜時が短縮されることを確認した。

これらの知見は, VR・MR 映像コンテンツにおける表現力や没入感の向上に役立てられる。今後は, 歩行空間の条件をさらに拡張して検討する必要がある。

参考文献

- [1] E. Mach: “Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen,” Leipzig, W. Engelmann, 1875.
- [2] 小西晃広, 橋口哲志, 木村朝子, 柴田史久, 田村秀行: “リニアベクシオン現象を高める広視野空間での周辺視刺激の活用とその効果”, 電子情報通信学会論文誌, Vol. J100-D, No. 2, pp. 162 - 170, 2017.
- [3] 松田あゆみ, 萩原息吹, 松室美紀, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: “運動方向の異なる視覚刺激が混在する場合のベクシオン効果の分析”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2021-HCI-192, No. 15, pp. 1 - 8, 2021.
- [4] Masao Ohmi, Ian P Howard: “Effect of Stationary Objects on Illusory Forward Self-Motion Induced by a Looming Display,” Perception, Vol. 17, pp. 5 - 11, 1988.
- [5] Robert S. Allison, A. Ash, and S. Palmisano: “Binocular contributions to linear vertical vection,” Journal of Vision October, Vol. 14, 5, 2014.
- [6] A. Ash, S. Palmisano, D. Apthorp, and R. S. Allison: “Vection in depth during treadmill walking,” Perception, Vol. 42, pp. 562 - 576, 2013.
- [7] 松本直司, 清田真也, 伊藤美穂: “街路空間特性と歩行速度の関係”, 日本建築学会計画系論文集, Vol. 74, No. 640, pp. 1371 - 1377, 2009.
- [8] A. C. Schmitt, S. T. Baudendistel, A. L. Lipat, T. A. White, T. E. Raffegau, and C. J. Hass: “Walking indoors, outdoors, and on a treadmill: Gait differences in healthy young and older adults,” Gait & Posture, Vol. 90, pp. 468 - 474, 2021.