



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 —ベクション誘発刺激と背景構成の違いによる影響の考察—

杉江鎌¹⁾, 近藤翔太¹⁾, 橋口哲志²⁾, 森田磨里絵¹⁾, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

1) 立命館大学 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 立命館グローバル・イノベーション研究機構 (〒567-8570 大阪府茨木市岩倉町 2-150)

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、近年は歩行中の運動感覚への影響にも注目が集まっている。特に、歩行時のベクション効果は背景構成に影響される可能性があり、この相互関係を解明することが応用に向けて重要である。そこで本研究では、VR 空間において異なる背景構成 (廊下、並木道、一本道) と視覚刺激 (静止、歩行速度の 4 倍・8 倍) の組み合わせが運動感覚に及ぼす影響を調査した。その結果、廊下や並木道では視覚刺激の速度変化が運動感覚に影響したのに対し、一本道では顕著な変化は見られなかった。さらに、背景内の手がかり密度については、運動感覚の促進に有意な影響を及ぼさないことが確認された。

キーワード: 視覚誘導性自己運動感覚, 歩行運動

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、体験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。

一方、近年は体験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注目が集まり、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[4]。さらに、開放的な空間では歩行速度が遅くなること[5]や、屋外での歩行速度は屋内より速いこと[6]が示されており、歩行環境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、ベクション効果にも影響を与える可能性があり、この相互関係の理解は現実世界での応用に向けても重要課題である。

そこで本研究では、VR 空間において異なる背景構成と視覚刺激 (静止、歩行速度の 4 倍・8 倍) の組み合わせが、体験者の自己運動感覚に及ぼす影響を調査し、その結果を分析した。具体的には、仮想空間の歩行環境の条件を「背景構成」とし、まず実験 1 では、廊下、並木道、一本道という 3 種類の背景構成がベクションに与える影響を検討した。次に実験 2 では、背景を構成するオブジェクトの密度に着目し、並木道の木の配置 (配置なし、10m 間隔、2.7m 間隔) がベクションに及ぼす影響を分析した。

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、体験者は 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、体験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】 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。VR 空間のプレイエリアは HMD の安全機能で管理され、体験者が端に近づくとき警告が表示される (ただし、実験中は体験者に表示されない設定とした)。

【背景構成】 実験 1 では、道幅 3.5m、奥行き 30m に固定した廊下、並木道、一本道の 3 種類の歩行環境 (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。これらの背景構成は、奥行き方向の視覚的手がかりや閉塞感が異なるため、ベクションへの影響を比較できると考えた。

実験 2 では、実験 1 の結果を踏まえ、オブジェクト密度を容易に調整できる並木道を選択し、木の間隔を「なし」「10m」「2.7m」とした 3 種類の歩行環境 (図 3) を構築した。



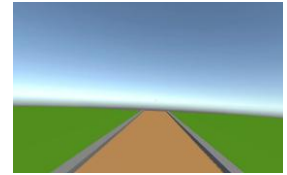
図 1 現実環境



(a) 廊下



(b) 並木道



(c) 一本道

図 2 実験 1 で用いた背景構成



(a) なし



(b) 10m 間隔



(c) 2.7m 間隔

図 3 実験 2 で用いた背景構成 (木の配置)

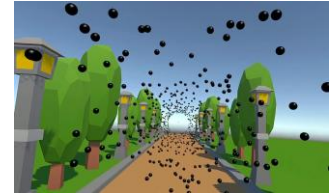


図 4 実験で使った視覚刺激

2.3 視覚刺激

図 4 に Unity のパーティクルシステムを用いた視覚刺激を示す。直径 0.1m の黒球を半径 3.5m の円柱状に配置した (以下、パーティクル)。なお、パーティクルの放出位置から参加者の歩行開始位置までの 30m の区間内に生成される球の数は 750 個に固定し、視覚刺激の速度が変化しても参加者が視認する球の数が一定となるように調整した。これらのパーティクルは体験者に対して後退方向に移動させ、前方ベクションを誘発するようにした。さらに、注視点として赤色のマーカーを消失点に配置した。パーティクルの移動速度は「静止」、「体験者の平均歩行速度の 4 倍」、「同 8 倍」の 3 段階で設定した。

3. 実験

3.1 実験目的

本実験では、歩行環境の違いが視覚刺激による自己運動感覚に及ぼす影響に着目した。参加者が異なる背景構成を歩行する際に直進運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

本研究では、知覚されるベクションを変化させる要因として、仮想歩行環境とパーティクルの速度の 2 要因を操作した。

実験 1 では、歩行環境を廊下、並木道、一本道の 3 条件、パーティクルの速度を静止、平均歩行速度の 4 倍、8 倍の 3 条件を組み合わせた条件を設定した。実験 2 では、実験 1 で用いた並木道における木の配置 (なし、10m 間隔、2.7m 間隔) の 3 条件とパーティクルの速度 (同 3 条件) を組み合わせた。各実験では 9 通りの提示パターンを 2 回ずつ試行し、参加者 1 名あたり 18 試行を実施した。

実験開始前には、参加者にベクショ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 1 には成人男性 14 名・女性 1 名、実験 2 には成人男性 11 名・女性 4 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 20~24 歳であった。

3.3 評価手法

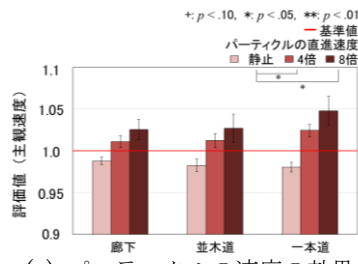
知覚される自己運動感覚は、主観速度、主観距離、歩行速度で評価した。また、ベクション強度の指標として潜時を用いた[3][7][8]。

主観速度は、参加者が知覚した歩行速度を数値で回答したもので、値が大きいほど速く感じたことを示す。主観距離も同様に、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。

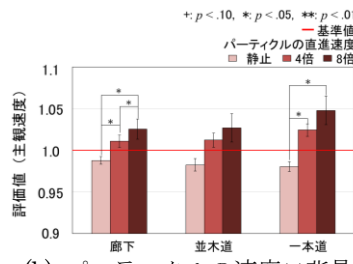
潜時は、パーティクルが提示されてからベクションを知覚するまでの時間であり、短いほどベクション強度が大きいことを示す。実験 1 では、体験者がベクションを知覚したら挙手し、実験者がキーボードで記録した。実験 2 では遅延を考慮し、コントローラのトリガーを体験者自身に押させて潜時を計測した。なお、視覚刺激が静止の場合は潜時の計測を行わなかった。また、40 秒以内にベクションを知覚しなかった場合は潜時を 40 秒とした。

主観速度と主観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。主観距離についても同様に評価させた。得られた評価値はフェヒナーの法則[4]に基づき対数変換し、比例尺度を導出した。実験は以下の手順で行った。

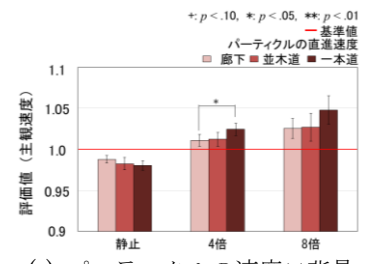
- (1) HMD のビデオシースルーモードによる現実空間と VR 空間の両方を自由に歩行させ、体験者が自然な歩行速度に慣れるようにした。
- (2) 基準となる平均歩行速度を計測するため、ビデオシースルーモードで指定距離の歩行を 6 回実施させた。
- (3) 評価の基準となる試行 (基準試行) を実施した。この際、パーティクルは提示せず、3 秒のカウントダウン後に歩行を開始させた。STOP と画面に表示された時点で参加者を停止させ、このときの移動速度と歩行距離を記憶させた。
- (4) 比較試行では、パーティクルを提示した状態で、基準試行と同様の手順および背景構成で歩行を行った。歩行後、参加者は主観速度および主観距離を基準試行と



(a) パーティクルの速度の効果



(b) パーティクルの速度×背景



(c) パーティクルの速度×背景

図 5 実験 1：主観速度の結果

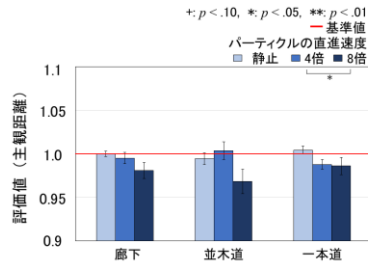


図 6 実験 1：主観距離の結果

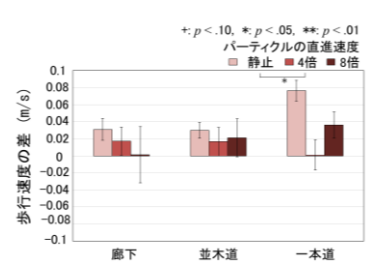


図 7 実験 1：歩行速度の差の結果

比較し、相対的な評価値を回答した。

以上を 1 試行とし、各パーティクルの速度条件につき 2 試行を実施した。パーティクルの速度および背景構成は試行ごとにランダムに変更した。

3.4 結果

主観速度、主観距離、歩行速度については、歩行環境 (3 種類) × パーティクルの速度 (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、歩行環境 (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、歩行環境 (3 種類) × パーティクルの速度 (2 種類) の参加者内分散分析を実施した。

【実験 1：主観速度】図 5 は実験 1 の主観速度を示す。分析の結果、背景構成は有意傾向 ($F_{(2,28)} = 2.670, p = .0870$)、パーティクルの速度は有意 ($F_{(2,28)} = 8.975, p = .0010$)、交互作用も有意であった ($F_{(4,56)} = 2.810, p = .0340$)。

単純主効果の分析では、背景構成はパーティクルの速度が 4 倍で有意傾向 ($F_{(2,28)} = 2.550, p = .0960$)、8 倍で有意 ($F_{(2,28)} = 3.670, p = .0380$)。パーティクルの速度は廊下 ($F_{(2,28)} = 7.180, p = .0030$)、並木道 ($F_{(2,28)} = 4.430, p = .0210$)、一本道 ($F_{(2,28)} = 12.580, p = .0001$) のすべてで有意であった。

多重比較の結果、パーティクルの速度が 4 倍の場合、廊下は一本道より有意に低く ($t_{(14)} = 2.970, p = .0310$)、廊下では静止が他の速度より有意に低く、8 倍より 4 倍が低かった ($ps < .05$)。一本道では静止が他の速度より有意に低かった ($ps < .05$)。

【実験 1：主観距離】図 6 は実験 1 の主観距離を示す。分析の結果、背景構成は有意ではなかった ($F_{(2,28)} = 0.460, p = .6400$) が、パーティクルの速度は有意 ($F_{(2,28)} = 3.590, p = .0410$)、交互作用は有意傾向 ($F_{(4,56)} = 2.304, p = .0700$) であった。

多重比較では、パーティクルの速度が 4 倍のとき 8 倍よりも有意に高かった ($t_{(14)} = 2.741, p = .0478$)。この結果

は、速度が上がるにつれて主観距離は短く知覚される傾向があることを示唆する。

【実験 1：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。分析の結果、背景構成は有意ではなかった ($F_{(2,28)} = 0.800, p = .4600$) が、パーティクルの速度は有意傾向 ($F_{(2,28)} = 3.302, p = .0520$)、交互作用は有意ではなかった ($F_{(4,56)} = 1.850, p = .1300$)。

多重比較では、パーティクルの速度が静止のとき 4 倍よりも有意に高い歩行速度を示した ($t_{(14)} = 3.190, p = .0200$)。静止パーティクルの提示により歩行速度が増加することが確認された。

【実験 2：主観速度】図 8 は実験 2 の主観速度を示す。分析の結果、木の配置 ($F_{(2,28)} = 1.250, p = .3000$)、パーティクルの速度 ($F_{(2,28)} = 1.560, p = .2300$)、および交互作用 ($F_{(4,56)} = 0.510, p = .7300$) のいずれも有意ではなかった。

【実験 2：主観距離】図 9 は実験 2 の主観距離を示す。分析の結果、木の配置は有意ではなかった ($F_{(2,28)} = 0.130, p = .8800$) が、パーティクルの速度は有意 ($F_{(2,28)} = 5.700, p = .0083$) であり、交互作用は有意ではなかった ($F_{(4,56)} = 1.28, p = .29$)。多重比較ではいずれの条件間も有意ではなかった ($ps > .10$)。

【実験 2：歩行速度】図 10 は基準試行と比較試行の歩行速度の差を示す。分析の結果、木の配置は有意ではなかった ($F_{(2,28)} = 0.340, p = .7200$) が、パーティクルの速度は有意 ($F_{(2,28)} = 8.110, p = .0017$) であり、交互作用は有意ではなかった ($F_{(4,56)} = 1.480, p = .2200$)。

多重比較では、パーティクルの速度が静止のとき、他の速度よりも有意に高い歩行速度を示した ($ps < .05$)。

3.5 考察

本研究では、体験者が異なる背景構成を歩行する際にパーティクルを提示し、知覚される自己運動感覚への影響を分析した。

主観速度は、実験 1 で背景構成により異なる結果が得ら

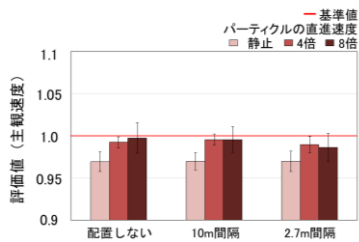


図 8 実験 2：主観速度の結果

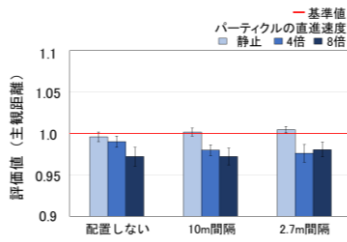


図 9 実験 2：主観距離の結果

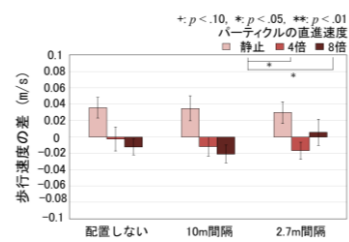


図 10 実験 2：歩行速度の差の結果

れた。視覚的手がかりが少ない廊下や一本道では、視覚刺激の速度が上がるにつれて主観速度も増加した。これは、周囲の手がかりが少ないためパーティクルに注意が集中しやすかったことが要因と考えられる。一方、実験 2 ではこの効果は見られず、一部の参加者は視覚刺激に抵抗感を覚え、主観速度が低下したと回答した。視覚刺激は必ずしも自己運動感覚を強めるとは限らず、提示方法や個人差による影響があると考えられる。また、連続配置された木などの手がかりが線状フローとして機能し、パーティクルと競合して効果を相殺する可能性もある。さらに、廊下のような閉塞空間では奥行き情報の変化が知覚され、視覚刺激の影響が弱まることが考えられる。

主観距離は、視覚刺激の速度が速いと短く感じる傾向があったが、個人差が大きく有意差は認められなかった。

歩行速度は両実験で一貫して、静止した視覚刺激の提示により基準試行より速くなった。これは、静止刺激が浮遊する障害物のように感じられ、空間の快適性が低下したことと無意識に歩行速度を上げたためと考えられる。

以上より、視覚刺激の効果は環境の視覚的手がかりや体験者の抵抗感など複数の要因により変動することが示された。今後は、オブジェクトのマテリアル設定の統一や視覚刺激のパラメータの検討が必要である。

4. むすび

本稿では、背景構成の違いがベクション誘発刺激による運動感覚の促進に与える影響を検討するため、体験者が異なる背景構成を歩行する際にパーティクルを提示し、知覚される自己運動感覚を分析した。

実験 1 では、廊下や一本道で視覚刺激の速度変化が運動感覚に影響を及ぼし、特に速度 4 倍の条件では、一本道より廊下で効果が弱まる傾向が見られた。一方、並木道では顕著な効果は確認されなかった。

実験 2 では、木の配置を変えて視覚的手がかりの密度を操作したが、視覚刺激の効果や手がかりの数の影響は認められなかった。

これらの結果から、背景構成やパーティクルの速度が運動感覚に及ぼす影響は環境特性によって異なり、視覚的手がかりの数の配置は影響しないことが確認された。ただし、本研究では背景構成の広さや奥行き知覚を評価していないため、今後は視覚刺激を提示しない状態での比較や、狭い環境における奥行き情報の変化の検討が必要である。

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: “リニアベクショ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. 1, 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ョン効果の分析”, 情報処理学会研究報告, Vol. 2021-HCI-192, No. 15, pp. 1 - 8, 2021.
- [4] A. Ash, S. Palmisano, D. Apthorp, and R. S. Allison: “Vection in depth during treadmill walking,” *Perception*, Vol. 42, pp. 562 - 576, 2013.
- [5] 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.
- [6] A. C. Schmitt, S. T. Baudendistel, A. L. Lipat, T. A. White, T. E. Raffegeau, 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.
- [7] 妹尾武治, 永田喜子: “没入傾向とベクション強度は相關するか？没入感に関する挑戦的研究”, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 3 - 6, 2016.
- [8] H. Ito and I. Shibata: “Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity,” *Vision Res*, pp. 397 - 402, 2005.