

身体運動と視覚刺激が自己運動感覚に及ぼす影響

近藤 翔太^{†a} 萩原 息吹[‡] 中村 仁一朗[‡] 松室 美紀^{†b} 柴田 史久[†] 木村 朝子[†]

[†] 立命館大学情報理工学部 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1

[‡] 立命館大学大学院情報理工学研究科 〒525-8577 滋賀県草津市野路東 1-1

E-mail: ^{†a} is0505kp@ed.ritsumei.ac.jp, ^{†b} matumuro@rm2c.ise.ritsumei.ac.jp

あらまし ベクシオンに関して様々な研究が行われている中で、体験者が移動する際に視覚刺激が運動感覚に与える影響について分析した研究が行われている。そこで本研究では、体験者が移動する際に自己運動感覚を引き起こす視覚刺激を与えることにより、知覚される運動感覚がどのように変化するかを検討している。2つの移動環境（VR, MR）、2つの移動方法（能動, 受動）、3つの視覚刺激の速度（平均歩行速度の0倍, 4倍, 8倍）で比較を行った。その結果、VRでの移動, 受動的な移動でより強い運動感覚を知覚し、視覚刺激の速度が上がるにつれて運動感覚が強まることが示された。

キーワード 視覚誘導性自己運動感覚, Virtual Reality, Mixed Reality

1. はじめに

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を視覚誘導性自己運動感覚（ベクシオン）と呼ぶ [1]。かつての研究では体験者が静止していることが多かったが、近年では、体験者が移動する際の視覚刺激の運動感覚に与える影響について分析した研究が行われている。

例えば、Ashら [2] はトレッドミルで歩行中に視覚刺激を提示し、知覚するベクシオン強度を検討した。結果、体験者は静止状態の時に比べて、トレッドミルで歩行する方が知覚するベクシオン強度が減少することを示した。

また、本岡ら [3] はベクシオンを誘発する映像と低自由度動作を複合提示する、小さいスペースで利用できる車椅子シミュレータを作成した。車椅子で移動しながらベクシオンを誘発する映像を提示することで、車椅子の限られた動きをより多様な動きに感じられる可能性が示唆されている。

これらの研究では VR 空間と現実空間が見える MR 空間、そして、参加者自身が歩行運動を行う能動的な移動と乗り物に乗って移動する受動的な移動という 2つの差異がある。これら2つの要因は視覚刺激が知覚する運動感覚に与える影響を変化させると考えられる。

第一に、MR 空間では、参加者の移動により生じる、ベクシオンを生じさせるための視覚刺激と動きの一致しない、視覚情報の変化が生じる。そのため、視覚刺激による促進は小さくなることが予測される。第二に、参加者自身が歩行することを考慮した場合、歩行により生じる体性感覚の変化や足裏への触感が視覚刺激の動きと一致しない可能性がある。そのため、Ashら [2] の実験のように、受動的な移動よりも視覚刺激による移動感覚の促進は小さくなると考えられる。

本稿では、上記の2要因を操作し、異なる速度の自

己運動感覚を引き起こす視覚刺激を与えることにより、体験者が知覚する自己運動感覚がどのように変化するかを検討する。

2. 実験準備

本実験では、複数の移動環境、移動方法の組み合わせで、異なる移動速度の視覚刺激を観察しながら移動した際の移動感覚を評価させた。

2.1. 移動環境

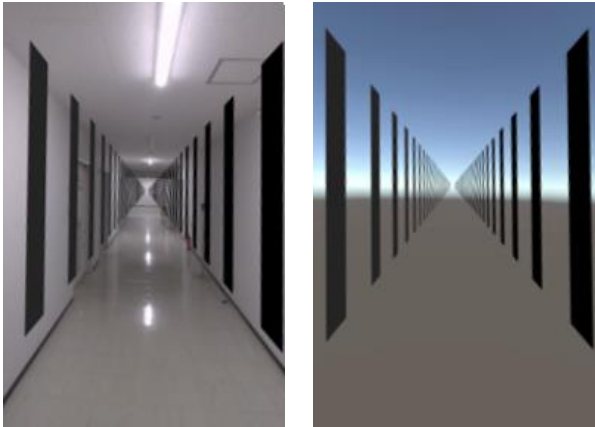
参加者は現実空間または仮想空間を移動した。現実空間では廊下（図 2.1(a) 横 2.6m × 高さ 2.6m × 奥行き 25m）を使用し、現実空間に設置されているスタートラインからゴールラインまでの 4.6m を移動させた。これに対し、仮想空間では床（横 2m × 高さ 1m × 奥行き 5m）が配置され、参加者には現実空間と同様の距離を移動させた。本実験を開始する前に、停止位置の 1m 手前に STOP と書かれた仮想物体を表示することで、参加者を安全に停止させた。

2.2. 移動方法

参加者は能動的または受動的な移動を行った。能動的な移動では、参加者は指定された姿勢で歩行した。これに対し、受動的な移動では、参加者を台車に乗せ、その台車を平均歩行速度と同じ速度で押すことで移動させた（図 2.2）。実験中は、歩行中と姿勢を近づけるために参加者に指定の直立姿勢を維持させた状態で視覚刺激を観察させたが、参加者の安全のために手すりを持たせた。

2.3. 視覚刺激

実験に用いる視覚刺激として、多くのベクシオンに関する研究で使用され、直進運動を認識しやすい、一定間隔に配置された線状のフローを使用した。具体的



(a)MR の視覚刺激 (b)VR の視覚刺激
図 2.1 実験で使用された視覚刺激



図 2.2 受動的な移動

には、直方体（横 0.001m × 高さ 3m × 奥行き 0.5m）を 0.5m 間隔で現実空間の壁の位置に設置する．表示位置は廊下の壁が存在する位置までとし，知覚する奥行き情報を統一した．視覚刺激の消失点に視線方向を固定するために赤色の注視点を設けた．MR, VR 空間における視覚刺激を図 2.1 に示す．ただし，実際の実験では，VR 空間の廊下に対応する床を配置した．

また実験に用いる視覚刺激の直進速度として，我々の先行研究 [4] を参考に，参加者毎の平均歩行速度の 0 倍，4 倍，8 倍の 3 段階を用意した．本実験では，参加者の移動速度によって相対的な直進速度が変化すると考えられる．直進速度を統制するために参加者毎の平均歩行速度を基準とした．

3. 実験

3.1. 実験目的

実験では，参加者が移動する際に，直進運動する視覚刺激を提示し，知覚される自己運動感覚に与える影響について分析，考察する．

3.2. 実験計画

自己運動感覚を変化させる要因として移動環境，視覚刺激の速度，移動方法の 3 要因を操作した．歩行環境を MR, VR の 2 条件，移動方法を能動，受動の 2 条件，視覚刺激の速度を平均歩行速度の 0 倍，4 倍，8 倍の 3 条件の $2 \times 2 \times 3$ の参加者内計画で行った．

3.3. 評価方法

知覚する自己運動感覚の指標として，主観速度，主観距離を採用した．主観速度は，知覚した移動速度を，主観距離は，知覚した移動距離を数値で回答させた値である．

評価方法として，マグニチュード測定法 [5] を採用した．

参加者は基準試行，比較試行の順に評価を行い，基準試行を 100 とした場合の比較試行で知覚した速度，距離を整数値で回答させた．例えば，比較試行が 2 倍の速さを感じたときは 200，半分の速さを感じたときは 50，となる．このとき，得られた評価値をフェヒナーの法則 [5] に基づき，対数変換を行うことで，比例尺度が得られる．なお，基準試行の移動環境，方法は比較試行と同様とし，線状の視覚刺激は表示しなかった．

3.4. 手続き

成人男性 8 名と成人女性 2 名の計 10 名が実験に参加した (21 ± 0.632 歳)．矯正を含め，全参加者が正常視力を有した．

参加者にはまず head mounted display (HMD: Varjo XR-3, Varjo Technologies Oy, ヘルシンキ, フィンランド)を装着した状態で自然な速度の歩行が出来るように MR, VR 内を自由に歩行させる．その後，視覚刺激の速度の基準となる平均歩行速度を計測する．HMD を装着した状態で参加者に MR 空間内の指定した距離を 6 回歩行させた．

実験では，直進運動する視覚刺激を提示し，参加者を移動させた後，主観速度，主観距離を計測した．全ての試行は HMD を装着した状態で実施された．初めに，基準試行を行った．視覚刺激が提示されていない状態で，3 秒のカウントダウン後に移動させた．STOP と書かれた仮想物体が表示されたら停止させ，このときの移動速度と移動距離を記憶させた．開始地点へと戻り，続いて，比較試行を行った．視覚刺激を提示し，参加者がベクションを知覚したら，挙手をさせ，3 秒のカウントダウン後に移動を開始させた．参加者がベクションを知覚しなかった場合，視覚刺激の提示から 40 秒を経過した時点でカウントダウンを行った．基準試行と比較し，主観速度と主観距離を回答させた．

移動方法が受動である場合は，上記の試行は全てかご台車に乗った状態で行き，移動は実験者によって行

われた. カウントダウンや停止の仮想物体等は両環境, 移動方法で共通するよう設定した. 視覚刺激の各速度につき 2 回の試行を実施した. MR 環境と VR 環境は順番に行われその順番はランダムであった. 各環境での移動方法の順番, そして, それぞれの組み合わせでの視覚刺激の速度の提示順もランダムとした.

3.5. 実験結果

図 3.1 は, 直進運動する視覚刺激を提示し, 参加者を移動させた際の (a) 主観速度, (b) 主観距離を示す. それぞれに対して, 歩行環境 (2) × 移動方法 (2) × 視覚刺激の速度 (3) の参加者内分散分析を行った. その結果, 2 次の交互作用, 1 次の交互作用は, 主観速度, 主観距離の全てにおいて, 共に有意でなかった ($F_{(1,9)} < 2.757, ps > .10$). 主観速度, 主観距離ともに, 移動方法の主効果 (主観速度: $F_{(1,9)} = 14.181, p = .004$, 主観距離: $F_{(1,9)} = 15.476, p = .003$) が有意であった. いずれも, 受動条件において評価値が大きかった. 歩行環境の主効果は, 主観速度では有意であったが ($F_{(1,9)} = 23.447, p < .001$), 主観距離では有意傾向であった

($F_{(1,9)} = 4.832, p = .055$). VR 環境での主観速度が有意に速く評価された. 視覚刺激の速度の主効果は, 主観速度では有意であったが ($F_{(2,18)} = 19.752, p < .001$), 主観距離では有意ではなかった ($F_{(2,18)} = 0.761, p = .481$).

多重比較の結果, 主観速度は, 直進速度が 0 倍のとき, 他の速度より有意に低く, 8 倍より 4 倍の方が有意に低かった ($ps < .005$).

3.6. 考察

本実験では, 視覚刺激が自己運動感覚へと与える影響が, 移動環境, 移動方法により変化するか検討した. 実験の結果から, 視覚刺激の速度と他の要因との交互作用は有意ではなかった. よって, 視覚刺激が自己運動感覚に与える影響が, 移動環境や移動方法により変化することは確認されなかった. 一方, 各要因の主効果が有意であり, VR での移動, 受動的な移動で主観速度が速くなり, また視覚刺激の直進速度が上がるにつれて, 主観速度が速くなることを示した (図 3.1(a)). そして受動的な移動で主観距離が大きくなることも示した (図 3.1(b)).

MR 環境での移動の方が VR 環境より運動感覚が弱まる理由として, 基準試行における移動速度や距離の手がかりとなりうる視覚情報が多かったことが挙げられる. MR 環境では, ベクシオンを誘発する視覚情報が重畳描写されることにより, これらの手がかりが隠されてしまう. これにより, 基準試行と比較して, 移動の知覚の手がかりが減少し, その結果, 知覚する主観速度が VR 環境よりも弱くなったと考えられる. VR 環境では視覚刺激により隠される移動の手がかりが少なかったため, MR 環境ほどの影響は生じなかったのだろう.

一方で, MR 環境で視覚刺激の影響が弱まるだろうと予測していたが, そうならなかったのも, この視覚刺激が手がかりを隠したことに関連するかもしれない. 本実験では, 視覚刺激として比較的幅の広い縦線を利用している. この刺激が, 点ではなく面として手がかりを隠すために, 視覚刺激の移動と実際の移動により生じる視覚情報の変化に矛盾が生じにくかった可能性がある.

次に受動的な移動で運動感覚が強まる理由として, 歩いている感覚が弱まることが挙げられる. 能動的な移動では参加者自身が歩行するため, 視覚情報と身体の動きの情報が統合され, 歩行速度が知覚される. 動きの情報が欠落することにより, 速度がより速く知覚された可能性がある. しかし, 高弊ら [6] は, 視覚で知覚される移動速度は, 歩行の運動感覚で知覚される速度よりも遅く知覚されることを示しており, 本実験の結果とは一致しない. 後述するが, 能動条件では参

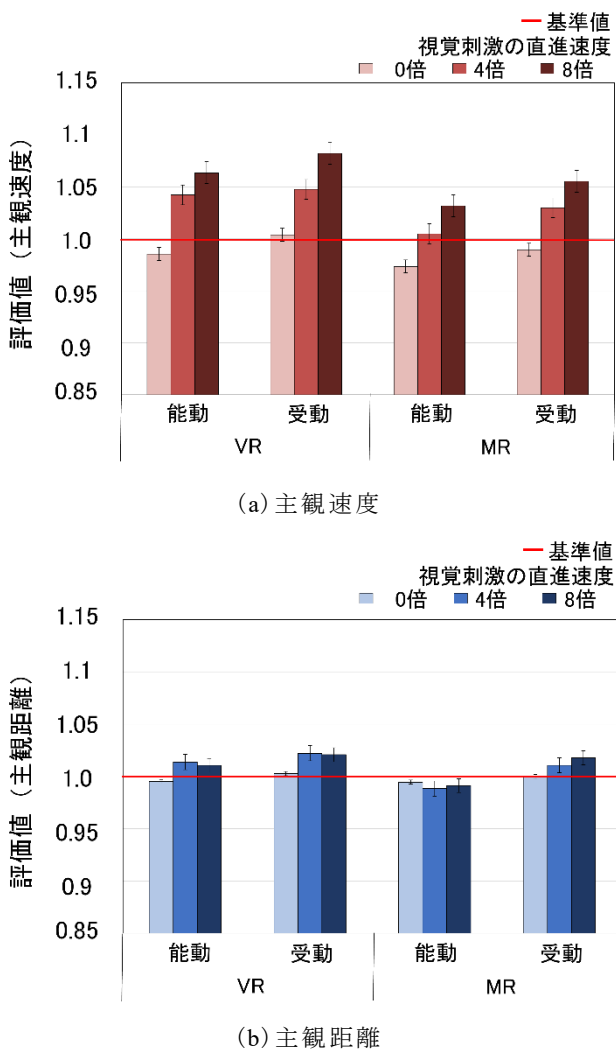


図 3.1 視覚刺激の速度毎の主観速度, 主観距離

加者が実際に遅く歩いていた可能性もあり、この点についてはさらなる検討が必要とされる。

視覚刺激の直進速度が上がるにつれて運動感覚が強まる理由として、先行研究では、視覚刺激の直進速度が上がるにつれて、ベクシオン強度が増加することが示されており [4]、ベクシオンによる移動感覚が強まった可能性が挙げられる。つまり、本実験はどのような環境であっても、自己運動感覚を生じさせる視覚刺激を提示することで、実際の移動よりも自己運動感覚、特に主観速度を増加させることが出来ることを示した。

しかし本実験では、ベクシオン強度を評価していないため、視覚刺激の直進速度が上がるにつれて、ベクシオン強度が増加していることは明らかになっていない。これについては今後ベクシオン強度を評価するための潜時、継続時間、主観速度を調べる必要がある。併せて、能動条件では参加者に移動を任せているため、基準試行と比較試行で歩行速度が変化している可能性がある。今後は、実際の歩行速度を考慮した指標の算出、比較を行う予定である。

4. むすび

本研究では、参加者が実際に移動している際に、自己運動感覚を与える視覚刺激を提示することで生じる、運動感覚の変化を調べた。移動環境として、VR空間と現実空間が見えるMR空間、移動方法として、参加者自身が歩行する能動条件と実験者により運ばれる受動条件を用意した。参加者ごとの平均歩行速度の0倍、4倍、8倍の速さで直線運動する視覚刺激を提示し、主観速度、主観距離を評価させた。

その結果、VRでの移動、受動的な移動で主観速度が速くなり、また視覚刺激の直進速度が上がるにつれて主観速度が速くなることを示した。そして受動的な移動では主観距離が大きくなることも示した。これらの結果から、いずれの移動環境や方法であっても、視覚刺激の直進速度が上がるにつれて、運動感覚が強まるが、その効果は移動環境や移動方法に影響されないことが示された。また、VRでの移動、受動的な移動により強い運動感覚が知覚された。

文 献

- [1] S. Palmisano, R. S. Allison, M. M. Schira, and R. J. Barry: "Future challenges for vection research: definitions, functional significance, measures, and neural bases," *Frontiers in Psychology*, Vol. 6, Article. 193, pp. 1 - 15, February 2015.
- [2] A. Ash, S. Palmisano, D. Apthorp, and R. S. Allison: "Vection in depth during treadmill walking," *Perception*, Vol. 42, no. 5, pp. 562 - 576, January 2013.
- [3] 本岡宏将, 呉健朗, 宇野広伸, 樋口恭佑, 宮田章裕: "電動車椅子とHMDを用いたパリアシミュレ

ーションの検討," *インタラクション 2019 論文集*, pp. 476 - 478, March 2019.

- [4] 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, March 2021.
- [5] 犬飼幸男: 感覚計測とデータ処理; 繊維製品消費化学, Vol. 29, No. 6, PP. 221 - 226, June 1998.
- [6] 高弊俊之, 野村宜邦, 前田太郎: "歩行における視覚と運動感覚の整合性に関する研究 (<特集> ロコモーションインタフェース)", *日本バーチャルリアリティ学会論文誌*, Vol. 5, No. 2, pp. 831 - 835, June 2000.