



MR 環境下における仮想物体に対する手の配置の違いが ベクション効果に与える影響の分析 ー視覚刺激の移動方向による差異の検討ー

近藤孝宣¹⁾, 山田直樹¹⁾, 橋口哲志²⁾, 森田磨里絵^{3),4)}, 柴田史久¹⁾, 木村朝子¹⁾

Takanobu KONDO, Naoki YAMADA, Satoshi HASHIGUCHI, Marie M. MORITA,
Fumihisa SHIBATA, and Asako KIMURA.

- 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 デザインアート学部 (〒603-8577 京都市北区等持院北町 56-1)
- 3) 大阪工業大学情報科学部 (〒573-0196 枚方市北山 1-79-1)
- 4) 立命館大学 OIC 総合研究機構 (〒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, 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. 本研究では, 複合現実 (MR) 環境下において, ベクションを誘発する背景刺激の手前に配置した仮想球に手を添えた際の姿勢が, ベクション知覚に与える影響を検討した. 上下方向に移動する背景刺激を用いた実験では, 仮想球を下から支える姿勢で継続時間および主観強度が有意に増加し, 下降方向のベクションが上昇方向よりも強く知覚された. 左右方向に移動する背景刺激を用いた実験では, 潜時および継続時間に有意差は認められなかったものの, 仮想球に横から触れる姿勢で主観強度が有意に増加した.

キーワード: 視覚誘導性自己運動感覚, 複合現実感, 仮想物体に対する手の配置, 視覚刺激の移動方向

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. ベクションの研究は 1875 年の Mach による報告 [1] に始まり, 現在に至るまで様々な分析が行われてきた. 提示された映像に対する没入感やインタラクション, 認知的要因がベクション効果に影響を与えることが示唆されている [2][3]. しかし, これまでのベクション研究の多くは, 各種 2D ディスプレイや人工現実感 (Virtual Reality; VR) 用の Head Mounted Display (HMD) を用いたものである. 一方, 複合現実感 (Mixed Reality; MR) 空間におけるベクション, 特に現実身体と仮想物体との関係がベクション効果に及ぼす影響については, 十分に検討されていない.

MR 空間では, 体験者は自身の身体を視認しながら仮想物体に触れることができる. この特徴は, 身体と視覚刺激との関係性を変化させ, ベクション効果に影響を及ぼす可能性がある. そこで本研究では, MR 空間において体験者が仮想物体に直接触れる状況を対象とし, ベクション効果について分析する. 特に, 仮想物体に対する手の配置の違い (身体姿勢) がベクション効果に与える影

響に着目し, 視覚刺激の移動方向の違いも考慮して検討を行う. 具体的には, 重力の影響を受けやすい上下方向と, その影響を受けにくい左右方向の 2 条件で実験を実施し, 身体姿勢と視覚刺激の移動方向がベクション効果に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする.

2. 実験準備

2.1 実験システム

HMD にはビデオシースルー方式を採用した Varjo XR-3 を用い, 実験参加者はカメラ映像を介して自身の手を視認しながら, 現実空間に重畳して提示された仮想物体に手を配置した. 実験参加者の頭部の位置姿勢は SteamVR Base station を用いて取得しており, 頭部位置に応じた視覚刺激は Unity を用いて生成している. 実験参加者の足元には, ベクションを知覚していることを入力するためのフットスイッチが設置されており, 実験用の PC に USB 接続されている.

2.2 実験環境

実験参加者は黒色の暗幕によって囲まれた縦 1.8m × 横 1.7m の空間に設置された椅子に座り, HMD に投影された視覚刺激を観察した. 先行研究[4]より, MR 環境において知覚する運動感覚は VR 環境に比べて弱まることが示唆

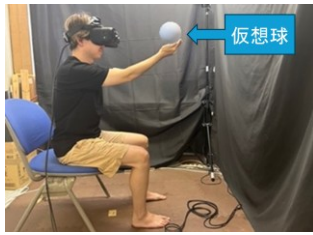


図1 実験のイメージ

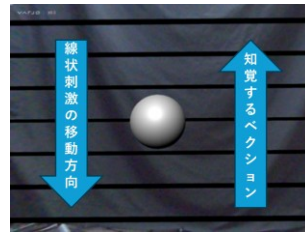


図2 実験1で提示する線状刺激と仮想物体

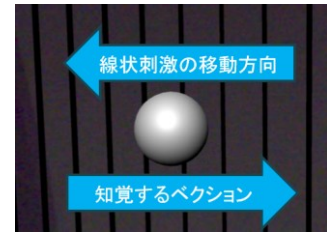


図3 実験2で提示する線状刺激と仮想物体

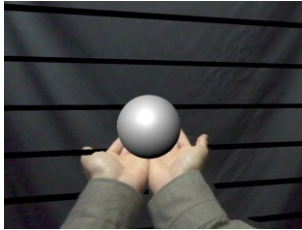


図4 実験1の仮想物体に触れる様子

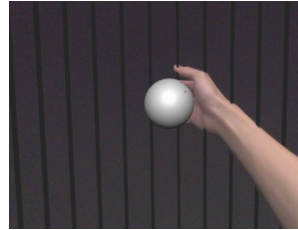


図5 実験2の仮想物体に触れる様子



図6 基本姿勢



図7 下から腕を前に出す姿勢



図8 上から腕を前に出す姿勢

されており、その要因として現実空間の環境(机や扉など)の視覚情報によるものだと考えられている。そのため、本実験では体験者の身体(手)以外の現実空間の影響を可能な限り排除し、視覚情報を統一するために暗幕を使用した。実験参加者は正面を向くことで暗幕外の背景を視認できないようにしている。実験のイメージを図1に示す。

2.3 視覚刺激

実験では、背景としてベクションを誘発する視覚刺激と、実験参加者が手を添えるための仮想物体を提示した。

【線状刺激】本実験ではベクションを誘発する視覚刺激として、0.1m 間隔に配置された線状のフロー横 1.5m × 高さ 0.01m × 奥行き 0.015m の直方体状の線群を使用した(以下、線状刺激と呼ぶ)。線状刺激は現実空間の暗幕の手前に提示し、移動方向は参加者に対して水平な左右方向とした。

【仮想物体】実験中、実験参加者が手で触れる仮想物体として、直径 10cm の仮想球を線状刺激より手前の中空に提示した。提示する線状刺激と仮想物体を図2, 3に、実験参加者が仮想物体に触れる様子を図4, 5に示す。なお、実験中は、実験参加者に指定の着席姿勢を維持した状態で視覚刺激を観察させた。

3. 実験1:上下方向における手の姿勢の影響

3.1 実験目的

実験参加者の観察姿勢がベクションに影響を及ぼすか調査する。本実験では体験者が提示された仮想物体に触れている際に、背景に上昇・下降する線状刺激を提示し、ベクション効果に与える影響について分析する。

3.2 実験条件

知覚するベクションを変化させる要因として観察姿勢、線状刺激の2要因を操作した。観察姿勢は椅子に深く座ら

ず背もたれから背を離し、両手を膝の上に置いて正面を向いた状態である「基本姿勢」、「下から腕を前に出す姿勢」、および「上から腕を前に出す姿勢」の3条件を設定した。それぞれの様子を図6, 図7, 図8に示す。線状刺激の移動方向は、鉛直上から下向きに移動する条件と、鉛直下から上向きに移動する条件の2条件の3姿勢×2刺激方向の参加者内条件で行い、それらを3回ずつ、計18試行を行った。男性14名と女性2名の計16名が実験に参加した。全実験参加者が矯正を含め正常な視力を有した。

3.3 評価手法

知覚されるベクションの強度を評価する方法として、先行研究[2]でも用いられている、潜時、継続時間、主観強度を採用した。具体的には、実験参加者は、視覚刺激提示後、ベクションを知覚したら足元のスイッチを踏み、ベクションを知覚している間はそのままスイッチを踏み続けるように指示される。このとき、視覚刺激が提示されてからスイッチが踏まれるまでの時間を潜時、視覚刺激提示終了までの間でボタンを踏んでいた時間の総和を継続時間とする。視覚刺激の提示終了後、画面を暗転し、ベクションを全く知覚していない状態を0、想像できる最も強いベクションを知覚した状態を100として、101段階で主観強度を回答させた。視覚刺激の提示時間は先行研究[2]に倣って40秒とした。

3.4 実験手順

実験参加者は椅子に座りHMDを装着した後、指定された観察姿勢をとり視覚刺激を観察した。ベクションを知覚した際にはフットスイッチを押し、刺激提示終了後に主観強度を報告させた。各条件について同様の手順を繰り返し実施した。ベクションは酔いを誘発することが知られているため、6試行ごとに5分間の休憩時間を設けた。

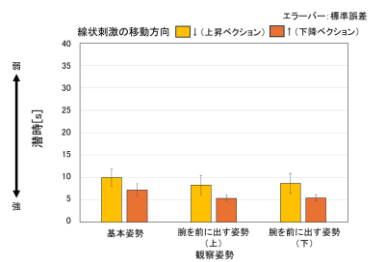


図9 潜時の平均値

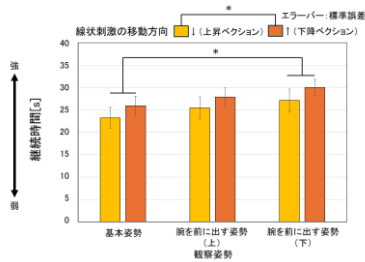


図10 継続時間の平均値

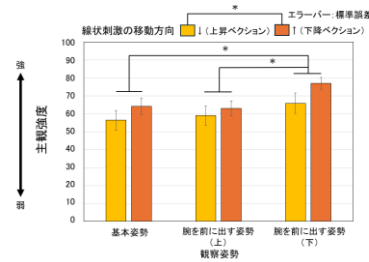


図11 主観強度の平均値

3.5 結果

潜時, 継続時間, 主観強度のそれぞれに対して, 線状刺激の移動方向 (2 種類) × 観察姿勢 (3 種類) の参加者内分散分析を行った. 球面性の仮定が満たされない場合には, Greenhouse–Geisser 修正を用いて自由度を補正した. また, 各条件の正規性を確認するためにシャピロ・ウィルク検定を実施した.

【潜時】図9は潜時の結果の平均を示す. 分析の結果, 観察姿勢 ($F(1.28, 19.27) = 3.69, p = .061, \eta_p^2 = .197$), 線状刺激の移動方向の主効果 ($F(1, 15) = 2.44, p = .139, \eta_p^2 = .140$), および観察姿勢と線状刺激の移動方向の交互作用はいずれも有意ではなかった ($F(2, 30) = 0.06, p = .938, \eta_p^2 = .004$).

【継続時間】図10は継続時間の結果の平均を示す. 分析の結果, 継続時間においては観察姿勢の主効果が有意であった ($F(2, 30) = 6.24, p = .005, \eta_p^2 = .294$). Holm 法による多重比較の結果, 下から腕を前に出す姿勢 ($M = 28.29$) は基本姿勢 ($M = 24.72$) より有意に高い値を示した ($p = .027$). しかし, 基本姿勢と上から腕を前に出す姿勢 ($p = .135$), 上から腕を前に出す姿勢と下から腕を前に出す姿勢 ($p = .135$) の間には有意差は認められなかった. また, 線状刺激の移動方向の主効果も有意であり ($F(1, 15) = 6.29, p = .024, \eta_p^2 = .296$), 上昇ベクションを誘発する条件 ($M = 25.11$) よりも下降ベクションを誘発する条件 ($M = 28.04$) において, 継続時間が有意に長かった. なお, 観察姿勢と移動方向の交互作用は有意ではなかった ($F(1.55, 23.26) = 0.19, p = .775, \eta_p^2 = .012$).

【主観強度】図11は主観強度の結果の平均を示す. 分析の結果, 主観強度において観察姿勢の主効果が有意であった ($F(2, 30) = 9.24, p < .001, \eta_p^2 = .381$). Holm 法による多重比較の結果, 下から腕を前に出す姿勢 ($M = 71.45$) は, 基本姿勢 ($M = 60.30, p = .002$) および上から腕を前に出す姿勢 ($M = 61.03, p = .007$) のいずれと比較しても, 主観強度が有意に高かった. また, 線状刺激の移動方向の主効果も有意であり ($F(1, 15) = 8.06, p = .012, \eta_p^2 = .350$), 上昇ベクションよりも下降ベクションの方が有意に強く知覚された. なお, 観察姿勢と移動方向の交互作用は有意ではなかった ($F(1.38, 20.7) = 1.85, p = .188, \eta_p^2 = .110$).

3.6 考察

本実験の結果から, MR 環境下における上下方向のベクションには, 身体姿勢および視覚刺激の移動方向が影響することが示された. 特に, 下から腕を前に出す姿勢では,

仮想物体との位置関係がベクションを増強した可能性がある. また, 下降方向のベクションが強く知覚されたのは, 重力に基づく自然な運動として解釈されやすかったためと考えられる. 先行研究においても, 同様の非対称性が報告されている [5][6]. 一方, 上から腕を前に出す姿勢では姿勢の自然さや視野内での腕の位置が影響し, 効果が得られなかった可能性がある. さらに, 潜時に有意差が認められなかったことから, 身体姿勢はベクションの発生よりも知覚の維持や強度に影響すると考えられる.

4. 実験2: 左右方向における手の姿勢の影響

4.1 実験目的

上下方向のベクションは重力の影響を受けるため, 実験1で得られた知見が上下方向特有の現象である可能性がある. そこで実験2では, 重力の影響を受ける上下方向ではなく, 左右方向のベクションを対象とし, 視覚刺激の移動方向に対応した複数の観察姿勢を設定した. これにより, 仮想物体に対する身体姿勢がベクション知覚に与える影響が, 運動方向によらず生じるかを検討する.

4.2 実験条件

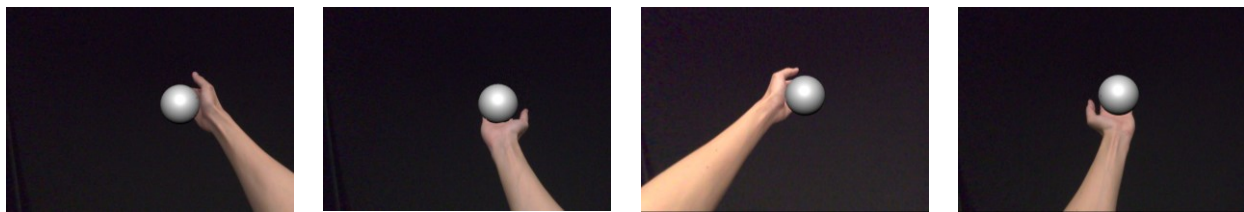
知覚するベクションを変化させる要因として観察姿勢, 線状刺激の2要因を操作した. 観察姿勢は右腕を前方に出し, 仮想球に対して右側から手を添える「右手右条件」, および下から手を添える「右手下条件」を設定した. 同様に左腕を用いる条件として, 仮想球に対して左側から手を添える「左手左条件」, および下から手を添える「左手下条件」の4条件, それらの条件を図12に示す. 線状刺激の移動方向は左右の2条件の 4×2 の参加者内条件で行い, それらを2回ずつ, 計16試行を行った. 男性19名と女性3名の計22名が実験に参加した. 平均年齢は22.3歳 ($SD = 0.93$) で, 全実験参加者が矯正を含め正常な視力を有した. 実験1と実験2の参加者は別集団であった.

4.3 評価手法・実験手順

評価手法は実験1と同様である. 実験手順は実験1と同様の手順を前述の観察姿勢4パターンにて行った. 8試行毎に5分間の休憩時間を設けた.

4.4 結果

潜時, 継続時間, 主観強度のそれぞれに対して, 観察姿勢 (4 種類) × 線状刺激の移動方向 (2 種類) の参加者内分散分析を行った. 球面性の仮定が満たされない場合には, Greenhouse–Geisser 修正を用いて自由度を補正した. また, 各条件の正規性を確認するためにシャピロ・ウィルク検定を実施した.



(a) 右手右条件

(b) 右手下条件

(c) 左手左条件

(d) 左手下条件

図 12 実験参加者の視点

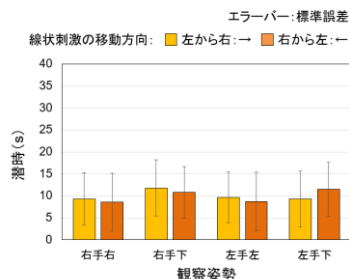


図 13 潜時の平均値

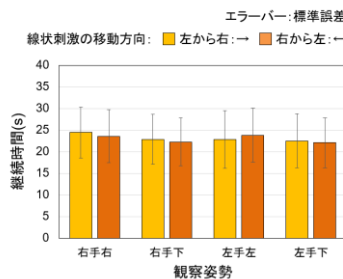


図 14 継続時間の平均値

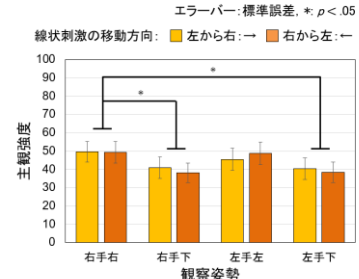


図 15 主観強度の平均値

【潜時】図 13 は潜時の平均値の結果である。シャピロ・ウィルク検定の結果、8 条件すべてで正規性が棄却された($p < .05$)。そこで、8 条件間の潜時を比較するため、Aligned Rank Transform (ART) による二要因分散分析を行った結果、姿勢の主効果は有意ではなかった ($F(3, 147) = 0.84, p = .472$)。また、視覚刺激の移動方向の主効果も有意ではなかった ($F(1, 147) = 0.03, p = .866$)。姿勢と視覚刺激の移動方向の交互作用も有意ではなかった ($F(3, 147) = 0.41, p = .743$)。

【継続時間】図 14 は潜時の平均値の結果である。シャピロ・ウィルク検定の結果、8 条件中 6 条件において正規性が棄却された($p < .05$)。そこで、8 条件間の継続時間を比較するため、ART による二要因分散分析を行った結果、姿勢の主効果は有意ではなかった ($F(3, 147) = 0.09, p = .964$)。また、視覚刺激の移動方向の主効果も有意ではなかった ($F(1, 147) = 0.11, p = .743$)。姿勢と視覚刺激の移動方向の交互作用についても有意ではなかった ($F(3, 147) = 1.12, p = .343$)。

【主観強度】図 15 は主観強度の平均値の結果である。分析の結果、主観強度において観察姿勢の主効果が有意であった ($F(1.94, 40.79) = 6.49, p = .004, \eta_p^2 = .236$)。Holm 法による多重比較を行った結果、右手 右条件 ($M = 49.43$) は、右手下条件 ($M = 39.53, p = .019$) および左手下条件 ($M = 39.35, p = .014$) のいずれと比較しても、主観強度が有意に高かった。一方で、線状刺激の移動方向の主効果 ($F(1, 21) = 0.05, p = .821, \eta_p^2 = .003$)、および要因間の交互作用 ($F(3, 63) = 0.56, p = .646, \eta_p^2 = .026$) は有意ではなかった。

4.5 考察

実験結果から、MR 空間における左右方向のベクシオンでは、身体姿勢が主観強度に影響を与えることが示された。特に、側方から仮想物体に触れる姿勢では、下方から触れる姿勢と比較して主観強度が有意に高かった。一方、視覚刺激の移動方向による有意な差は認められなかった。これらの結果から、本実験で設定した条件においては、身体姿勢が左右方向のベクシオン効果に影響を及ぼす可能性が

示唆された。また、利き手の影響を考慮するとともに、重力の影響を排除した条件で追加実験を行う必要がある。

5. むすび

本稿では、MR 空間において仮想物体に手を添えた際の身体姿勢がベクシオン効果に与える影響について、上下方向および左右方向の視覚刺激を用いて検討した。上下方向では、下から腕を前に出す姿勢において継続時間および主観強度が増加し、下降方向のベクシオンがより強く知覚された。一方、左右方向では、側方から仮想物体に触れる姿勢において主観強度が増加し、視覚刺激の移動方向による有意な差は認められなかった。以上より、本研究で設定した条件において、身体姿勢がベクシオン効果に影響を及ぼす可能性が示された。今後は、重力や利き手の影響を考慮するとともに、同一実験条件下で運動方向との関係についてさらに検証する予定である。

参考文献

- [1] E. Mach: "Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen," Leipzig, W. Engelmann, 1875.
- [2] 妹尾, 永田: "没入傾向とベクシオン強度は相関するか? 没入感に関する挑戦的研究", 日本 VR 学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 3-6, 2016.
- [3] D'Amour S, Harris LR, Berti S, Keshavarz B: "The role of cognitive factors and personality traits in the perception of illusory self-motion (vection)" ; Attention, Perception, & Psychophysics, Vol. 83, pp. 1804-1817 (2021).
- [4] 近藤, 萩原, 中村, 松室, 柴田, 木村: "身体運動と視覚刺激が自己運動感覚に及ぼす影響", 信学技報, Vol. 122, No. 386, HIP2022-89, pp. 64-67, 2023.
- [5] Desaeleer, C., Vidal, M., Lipshits, M., Bengoetxea, A., Cebolla, A. M., Berthoz, A., Cheron, G., McIntyre, J.: "Weightlessness alters up/down asymmetries in the perception of self-motion", Experimental Brain Research, vol.226, pp.95-106 (2013).
- [6] Tsuruoka, M., Shibui, S., & Kaneko, H.: "Up-down asymmetry in vertical vection", BMC Neuroscience, vol. 16, no. S1, P102 (2015).