



# MR 環境下における仮想物体とのインタラクションが ベクション効果に与える影響の分析

山田直樹<sup>1)</sup>, 中村仁一郎<sup>1)</sup>, 橋口哲志<sup>2)</sup>, 松室美紀<sup>3)</sup>, 柴田史久<sup>1)</sup>, 木村朝子<sup>1)</sup>  
Naoki YAMADA, Jinitirou NAKAMURA, Satoshi HASHIGUCHI, Miki MATSUMURO,  
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 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)  
3) Department of Communication, Cornell University

**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。これまでのベクション研究では、視覚刺激提示デバイスとして一般的なディスプレイや大型/広視野ディスプレイ、VR 用 HMD が多く利用されてきた。しかし、MR 環境下でのベクション効果に関する分析はほとんど行われていない。また、MR での体験には、体験者自身の身体を直接見ながら仮想物体とインタラクションすることができるという特徴がある。そこで本研究では、MR 環境において体験者が仮想物体と直接インタラクションする際のベクション効果を分析した。現実空間に仮想物体を重畳描画すると同時に、ベクションを誘発する線状刺激を提示し、仮想物体に手で触れている間のベクションを誘発する効果について分析した。実験の結果、仮想物体に触れる条件では潜時と継続時間でベクションが強く知覚された。一方、主観強度には影響が見られなかった。

**キーワード:** 視覚誘導性自己運動感覚, 複合現実感, インタラクション

## 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] から始まり、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。しかし、多くのベクションの研究は各種 2D ディスプレイや人工現実感 (Virtual Reality; VR) 用の Head Mounted Display (HMD) を用いたものであり、複合現実感 (Mixed Reality; MR) 空間でのベクション効果は明らかになっていない。

MR の特徴として、体験者自身の身体を直接見ながら仮想物体とインタラクションが可能であるという特徴がある。そこで本研究では、MR 環境において体験者が仮想物体と直接インタラクションする状況でのベクション効果について分析する。

本研究では、体験者と仮想物体とのインタラクションを、「仮想物体に手で触れること」とし、

- (1) 触れることができる仮想物体の有無

- (2) 仮想物体に手で触れる際の姿勢 (観察姿勢)

- (3) 視覚刺激の移動速度

の各々の条件が、ベクションにどのように影響するかについて実験・分析を行う。

## 2. 実験準備

### 2.1 実験システム

実験参加者は、HMD (Varjo XR-3) を装着し、2.3 で述べる視覚刺激を観察する。実験参加者の頭部の位置姿勢は 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 [2] 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事が示唆されており、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、

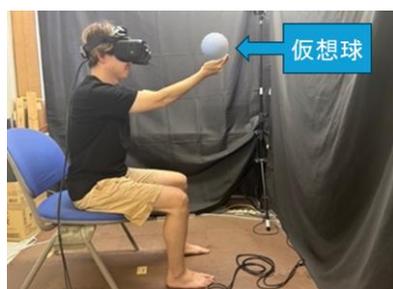


図1 実験のイメージ

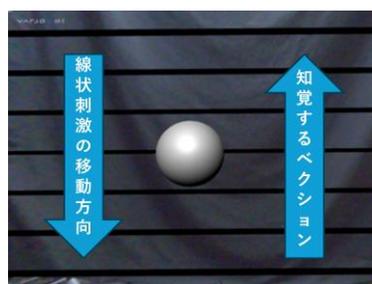


図2 提示する線状刺激と仮想物体

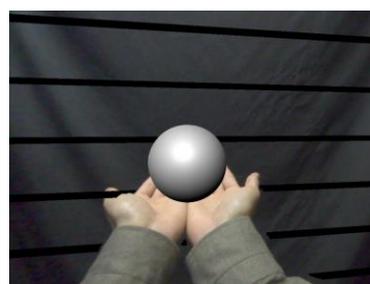


図3 仮想物体に触れる様子

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、視覚刺激として、背景として提示するベクシオンを誘発する映像（線状刺激）と、実験参加者がインタラクションを行うための仮想物体を提示する。

【線状刺激】本実験ではベクシオ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下降方向とした。また、視線方向を固定するために赤色の注視点を参加者が肘を軽く曲げて腕を前に出した位置に提示した。

【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 CG 球を線状刺激より手前の中空に提示した。CG 球の中心と注視点は同じ位置に提示し、CG 球を提示する際は注視点を非表示にした。

提示する線状刺激と仮想物体を図2に。実験参加者が仮想物体に触れる様子を図3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

### 3.1 実験目的

ここでは、体験者が仮想物体に手で触れることによって、知覚されるベクシオン強度が向上するか調査する。体験者が仮想物体に対してインタラクションを行うことで、没入感が向上し、ベクシオン効果が高まる可能性も考えられる[3]。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、背景に上昇する線状刺激を提示し、ベクシオン効果に与える影響について分析・考察する。

### 3.2 実験条件

知覚するベクシオンを変化させる要因として提示映像、観察姿勢、線状刺激の速度の3要因を操作した。提示映像はCG球あり、なしの2条件、観察姿勢は膝の上に手を置いた状態で着座している基本姿勢と、基本姿勢から両腕を前に出した姿勢の2条件、線状刺激の速度は4.50cm/s（低速）、22.25cm/s（中速）、40.00cm/s（高速）の3条件の2

×2×3の参加者内条件で行い、それらを3回ずつ、計36試行行う。男性15名と女性6名の計21名が実験に参加した。実験参加者の年齢は20～24歳で、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

知覚されるベクシオンの強度を評価する方法として、先行研究[4]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、ベクシオンを知覚したら足元のスイッチを踏み、ベクシオ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、ベクシオンを全く知覚していない状態を0、想像できる一番強いベクシオ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[4]に習って40秒とした。

### 3.4 実験手順

- まず、実験参加者は椅子に座り、HMDを装着する。
- 基本姿勢と腕を前に出す姿勢のどちらか1つを提示し、その姿勢を取るよう指示する。
- 基本姿勢の条件では、手を膝に置き、腕を前に出す姿勢の条件では、CG球の高さに表示された基準線(CG)のところまで手を上げ、その位置で手固定するように指示した後、基準線を非表示にする。
- 姿勢を確認した後、線状刺激、または線状刺激とCG球を提示する。実験者の合図とともに、線状刺激の移動速度からランダムに1つ選択された速度で線状刺激が移動を開始する。
- 実験参加者は視覚刺激を観察し、上昇するベクシオンを知覚している間、足元に設置したスイッチを足で押す。40秒後、視界が暗転するので、実験参加者に主観強度を0から100の数字で、口頭で回答させる。
- 回答後、30秒から1分間の休憩をとる。休憩中は、HMDを外した状態とする。これらをすべての実験条件で繰り返す。

ベクシオ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。実験は提示パターン18試行ごとに2日に分けて行い、両日の間には1日

以上のインターバルを空けた。

### 3.5 結果

潜時、継続時間、主観強度のそれぞれに対して、提示映像 (2種類) × 観察姿勢 (2種類) × 線状刺激の移動速度 (3種類) の参加者内分散分析を行った。

#### 3.5.1 潜時

図4は潜時の平均値の結果である。分析の結果、観察姿勢では有意傾向であり ( $F(1,20) = 3.036, p = .0968$ ), 線状刺激の移動速度では有意であった ( $F(2,40) = 16.559, p < .001$ )。1次の交互作用では、提示映像と観察姿勢において有意であり ( $F(1,20) = 5.766, p = .026$ ), 提示映像と線状刺激の移動速度、観察姿勢と線状刺激の移動速度では、どちらも有意でなかった ( $ps > .100$ )。そして2次の交互作用は有意でなかった ( $F(2,40) = 1.831, p = .173$ )。

提示映像と観察姿勢について1次の交互作用が有意であったため、単純主効果の分析を行った。その結果、提示映像の主効果は観察姿勢が基本姿勢のときのみ有意であり ( $F(1,20) = 6.180, p = .021$ ), 観察姿勢の主効果は提示映像がCG球あり条件のときのみ有意であった ( $F(1,20) = 5.868, p = .025$ )。これより、CG球ありの条件において、基本姿勢よりも腕を前に出す姿勢のときに潜時が短くなることが示された。

#### 3.5.2 継続時間

図5は潜時の平均値の結果である。分析の結果、観察姿勢、線状刺激の移動速度が有意であった (観察姿勢:  $F(1,20) = 6.386, p = .020$ , 線状刺激の移動速度:  $F(2,40) = 15.159, p < .001$ )。1次の交互作用では、提示映像と観察姿勢において有意傾向であり ( $F(1,20) = 3.814, p = .065$ ), 提示映像と線状刺激の移動速度、観察姿勢と線状刺激の移動速度ではどちらも有意でなかった ( $ps > .100$ )。そして2次の交互作用では有意傾向であった ( $F(2,40) = 2.863, p = .068$ )。2次の交互作用が有意傾向であったため、単純交互作用の分析を行った。その結果、線状刺激の移動速度が低速、中速における提示映像と観察姿勢の交互作用が有意傾向であったが (低速:  $F(1,20) = 4.034, p = .058$ , 中速:  $F(1,20) = 4.007, p = .059$ ), 高速では有意でなかった ( $F(1,20) = 0.869, p = .362$ )。また、観察姿勢が腕を前に出す姿勢における提示映像と線状刺激の移動速度の交互作用が有意であったが ( $F(2,40) = 4.156, p = .022$ ), 基本姿勢では有意でなかった ( $F(2,40) = 0.807, p = .453$ )。

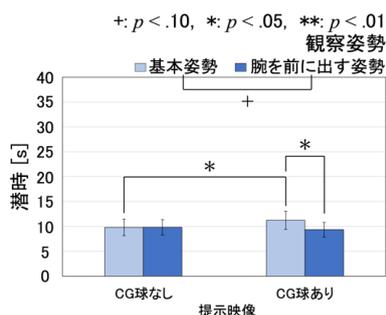


図4 潜時の平均値

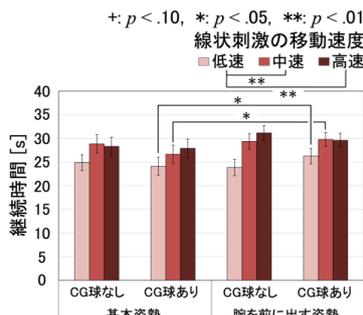


図5 継続時間の平均値

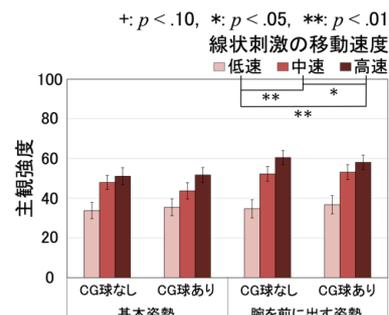


図6 主観強度の平均値

次に、2次の交互作用が有意であった (1) 線状刺激の移動速度が低速、中速における提示映像と観察姿勢、(2) 腕を前に出す姿勢における提示映像と線状刺激の移動速度の単純主効果の分析を行った。

その結果、(1) では、CG球あり条件かつ線状刺激の移動速度が低速、中速の両方で観察姿勢の効果が有意であり ( $F(1,20) > 5.052, p < .036$ ), 線状刺激の移動速度が低速かつ腕を前に出す姿勢の場合、提示映像の効果が有意傾向であった ( $F(1,20) = 3.760, p = .067$ )。これより、CG球が提示され、ベクションを誘発する線状刺激が低速または中速で提示された際に基本姿勢より腕を前に出す姿勢でベクションの継続時間が増加することが示された。また、線状刺激が低速かつ腕を前に出す姿勢の場合、CG球を提示したときにも同様に増加することが示された。

また (2) では、線状刺激の移動速度が低速または高速で腕を前に出す姿勢の場合、提示映像の効果が有意傾向であった ( $F(1,20) > 3.368, p < .081$ )。これより、腕を前に出す姿勢で、線状刺激が低速で移動する場合、CG球が提示されたときにベクションの継続時間が増加することが示された。一方で、線状刺激が高速で移動する場合は、CG球が提示されたときにベクションの継続時間が減少する傾向がみられた。

さらに、提示映像と観察姿勢について1次の交互作用が有意であったため、単純主効果の分析を行った。その結果、提示映像の主効果は観察姿勢にかかわらず有意でなかったが ( $ps > .100$ ), 観察姿勢の主効果は提示映像がCG球あり条件のときのみ有意であった ( $F(1,20) = 9.128, p = .006$ )。これより、CG球が提示され、腕を前に出す姿勢のときにベクションの継続時間が増加する傾向がみられた。

#### 3.5.3 主観強度

図6は主観強度の平均値の結果である。分析の結果、観察姿勢、線状刺激の移動速度が有意であった (観察姿勢:  $F(1,20) = 7.068, p = .015$ , 線状刺激の移動速度:  $F(2,40) = 27.484, p < .001$ )。1次の交互作用では、観察姿勢と線状刺激の移動速度において有意であり ( $F(2,40) = 3.978, p = .026$ ), 提示映像と観察姿勢、提示映像と線状刺激の移動速度では、どちらも有意でなかった ( $ps > .100$ )。そして2次の交互作用は有意でなかった ( $F(2,40) = 1.024, p = .368$ )。

観察姿勢と線状刺激の移動速度について 1 次の交互作用が有意であったため、単純主効果の分析を行った。その結果、観察姿勢の主効果は、移動速度が中速、高速のときに有意であった ( $F(1,20) > 5.115, ps < .035$ )。線状刺激の移動速度の主効果は、いずれの観察姿勢においても有意であった ( $F(2,40) > 14.436, ps < .001$ )。これより、ベクションを誘発する視覚刺激の移動速度が中速、高速では腕を前に出す姿勢の時に主観的なベクションの強度が増加することが示された。

### 3.6 考察

線状刺激の移動速度の主効果については、先行研究 [5]と同様、MR 環境でも線状刺激の移動速度が速いとベクション強度が大きくなる傾向がみられた。この傾向は、潜時、継続時間、主観強度の全てで確認された。

同様に、潜時、継続時間、主観強度の全てで、腕を前に出す姿勢でベクション強度が増加する傾向が見られた。この要因として、実験参加者の視界に腕が映り込むことにより、ベクションを誘発する線状刺激を背景として捉えやすくなったことが考えられる。ベクションは前景に比べて背景にある視覚刺激の影響が強くなることが知られている [6]。腕を前に出すことで線状刺激よりも手前に腕を視認できるようになり、それにより、線状刺激を背景と捉えやすくなり、ベクションが強まったと考えられる。一方で、ベクションは中心視野よりも周辺視野の視覚刺激の影響が強いことが我々の研究グループの先行研究 [7]より示されており、腕を前に出すと周辺視野で確認できる線状刺激の範囲が狭まる。そのため、ベクション強度が減少する可能性も考えられるが、本実験でそのような傾向は見られなかった。これについては今後検討が必要である。

また、潜時と継続時間について、腕を出す姿勢で潜時が短く、継続時間が長くなることが確認できた。また、線状刺激の移動速度が低速かつ腕を前に出す姿勢のときに、CG 球あり条件で継続時間が長くなることを確認した。本実験で行った仮想物体に触れるというインタラクションがベクション効果を強めた可能性が考えられる。その理由として、インタラクションがあることによって、上方向への自己移動に対して解釈しやすくなった可能性がある。ベクションは視覚刺激の意味によって知覚する強度が変化することが知られている。Riecke らは数種類の街並みの画像を観察者に提示した際に、町並みの中を移動しているという自然な自己移動を解釈できるほど、ベクションが強くなり、無意味な画像であるほどベクションが弱くなるということを示している [8]。参加者からのコメントに、「CG 球と一緒に上昇している感覚だった」というものがあり、CG 球に触れるインタラクションと誘発された上昇感覚が合わさり、CG 球と共に移動する感覚になり、ベクションを強く知覚した可能性が考えられる。

一方で、主観強度では同様の傾向が見られなかったことから、CG 球に触れるだけでは主観的に知覚できるほどには CG 球と一緒に上昇している感覚の促進はできなかつ

たとも考えられる。コメントで CG 球と共に移動する感覚について言及した参加者は 5 名しか見られず、CG 球を持ち上げながら上昇するという状況として解釈することが困難だった被験者もいたと考えられる。

ベクションの知覚方向と意味的な整合性が高いインタラクションを組み合わせることで、MR 空間でのベクション強度を向上させることができるのか?については、今後引き続き実験・分析が必要である。

### 4. むすび

本稿では、MR 体験における特徴として自身の身体で仮想物体と直接インタラクションできる点に着目し、現実空間に重畳描画された仮想物体に手で触れているときに知覚されるベクション効果の分析を行った。

実験の結果、潜時と継続時間について、どちらも CG 球あり、腕を出す姿勢の条件で潜時が短く、継続時間が長くなることが確認できた。継続時間では、CG 球あり、腕を出す姿勢、線状刺激の移動速度が低速または中速のときに継続時間が長く、線状刺激の移動速度が低速かつ腕を前に出す姿勢のときに、CG 球あり条件で継続時間が長くなることを確認した。これらの結果から仮想物体とのインタラクションがベクション効果を強める可能性が考えられる。一方で、主観強度に有意な差が確認されなかったことから意識的に知覚できるほどの変化ではなかったと考えられる。

### 参考文献

- [1] E. Mach: "Grundlinien der Lehre von den Bewegungsempfindungen," Leipzig, W. Engelmann, 1875.
- [2] 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.
- [3] Matsuda Y, Nakamura J, Amemiya T, Ikei Y, and Kitazaki M: "Enhancing Virtual Walking Sensation Using Self-Avatar in First-Person Perspective and Foot Vibrations," *Frontiers Virtual Real.*, Vol. 2, 2021.
- [4] 妹尾, 永田: "没入傾向とベクション強度は相関するか? 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.
- [5] 松田, 萩原, 松室, 柴田, 田村, 木村: "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.
- [6] H. Ito, I. Shibata: "Self-motion perception from expanding and contracting optical flows overlapped with binocular disparity," *Vision Res*, pp. 397 - 402, 2005.
- [7] 小西, 橋口, 木村, 柴田, 田村: "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.
- [8] B. Riecke, D. Vastfjall, P. Larsson, and J. Schulte - Pelkum: "Top-down and multi-modal influences on self-motion perception in virtual reality," *HCI International 2005*, pp. 1 - 10, 2005.