

直線運動と回転運動が共存する場合のベクシオン効果に関する分析と考察 (3) ～強度一定仮説と単純合算仮説の検証実験の結果～

古賀宥摩^{†1} 松室美紀^{†1} 柴田史久^{†1} 田村秀行^{†2} 木村朝子^{†1}

概要：視覚誘導性自己運動感覚は、知覚する運動方向の違いから直線運動感覚 (Linear Vection; LV) と回転運動感覚 (Circular Vection; CV) の2つに分けられる。我々の先行研究では、視覚刺激の直線運動と回転運動の速度が LV と CV の双方に影響することを確認し、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることを示した。すなわち、LV と CV が統合された場合、LV と CV がそのままの強度で知覚されないということを明らかにした。この結果を踏まえ、本稿では、LV と CV を切り分けずに1つの運動感覚として扱った際のベクシオン強度に着目し、統合的なベクシオンと LV, CV 強度の関係性について検討する。まず我々は、一方の視覚刺激の速度が変化しても、LV 強度と CV 強度が相殺することで統合的なベクシオン強度が一定になるという強度一定仮説と、統合的なベクシオン強度は視覚刺激の速度ごとに知覚した LV と CV の強さを合算したものになるという単純合算仮説を立てた。本研究では、これら2つの仮説を検証すべく、視覚刺激の速度が統合的なベクシオン強度に与える影響について実験を行った。結果として、どちらの仮説も棄却され、統合的なベクシオン強度は LV と CV の強い方に引きずられることを示唆する結果となった。

キーワード：視覚誘導性自己運動感覚、直線ベクシオン、回転ベクシオン、広視野ディスプレイ

1. はじめに

停車している電車の中から、向かい側の電車が動き出す様子を観察した際に、あたかも自分の乗っている電車が動き出したかのように感じる現象 [1] を経験したことはないだろうか。このような、視覚情報によって引き起こされる錯覚の運動感覚を視覚誘導性自己運動感覚 (ベクシオン) と呼び [2]、知覚する運動方向の違いから直線運動感覚 (Linear Vection; LV) と回転運動感覚 (Circular Vection; CV) の2つに分けられる [3]。この運動感覚を強く知覚する条件であるほど、映像コンテンツの臨場感、没入感が高まることが知られている [4]。そのため、ベクシオンの発生傾向やメカニズムの解明は、人工現実感 (Virtual Reality; VR) におけるコンテンツへの応用に期待されている。

ベクシオンに関するほとんどの研究では、LV と CV がそれぞれ独立に分析されてきた。一方で、回転しながら直進する視覚刺激を観察した場合に知覚する運動感覚に着目した研究もある。Palmisano ら [5] は、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激によって引き起こされるベクシオンを、LV と CV とは異なる1つの運動感覚として扱っている。しかし、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激により生じるベクシオンは、LV と CV が統合されることによって引き起こされる感覚であるとも考えられる。

そこで我々は、これまでに、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激によって引き起こされるベクシオンを LV と CV に切り分けて評価するという方法で、視覚刺激の速度

が LV と CV を知覚する強さに与える影響について分析してきた [6][7]。その中で、視覚刺激の直線運動の速度が上がるにつれて、LV 強度が増加し CV 強度が減少すること、そして、回転運動の速度が上がるにつれて、CV 強度が増加し LV 強度が減少することが明らかになった。つまり、LV と CV の双方を知覚する条件において、各方向の視覚刺激の速度変化に対する LV 強度と CV 強度は、負の相関関係にあることを示した。

一方で、視覚刺激の直線運動と回転運動の速度によって、LV と CV を切り分けずに1つの運動感覚として扱った際のベクシオン強度がどのように増減するのかについては検討の余地が残る。そこで本稿では、次のステップとして、上記先行研究の結果を踏まえ、統合的なベクシオン強度と LV, CV 強度の関係性について検討する。これにより、LV と CV の両方を知覚し得る、直線運動と回転運動が共存する映像表現を含む VR コンテンツの設計指標として大きく貢献することができると思われる。

2. 仮説

我々は、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激によって引き起こされるベクシオンは、LV と CV の統合により知覚され、その強度は、LV 強度と CV 強度に準ずると考えた。そこで LV, CV 強度と、その統合的なベクシオン強度の関係性に対して、以下の2つの仮説を立てた。

我々の先行研究において、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることが明らかになった。このことから、視覚刺激の速度が上がっても、LV 強度と CV 強度が相殺し、統合的なベクシオン強度が一定になっているという強度一定仮説が立てられる。つまり、片方の視覚刺激の速度を上げることにより、対応するベクシオン強度が増加しても、他方

^{†1} 立命館大学大学院 情報理工学研究科
Graduate School of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University
^{†2} 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology,
Ritsumeikan University

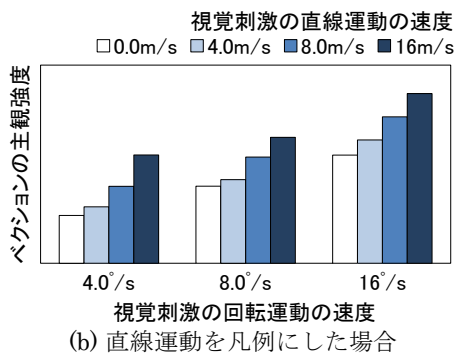
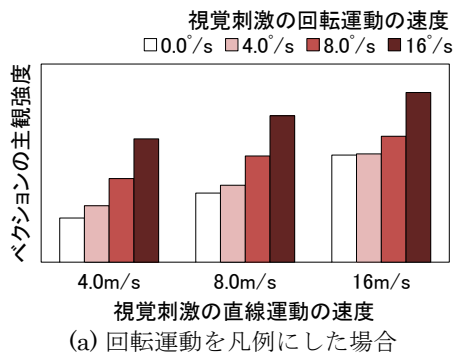


図 1 単純合算仮説におけるベクション強度の増減予測

のベクション強度がその分減少するのであれば、最終的に統合されたベクション強度は概ね一定になると予測できる。

一方、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激によって引き起こされるベクションは、LV と CV の統合により知覚され、その強度が LV 強度と CV 強度に準ずるのであれば、統合されたベクションの強度は、視覚刺激の速度ごとに知覚された LV 強度と CV 強度を単に合算した傾向になるという単純合算仮説も立てられる。各速度の組み合わせにおける、LV 強度と CV 強度は先行研究で取得されているため、この仮説が正しければ、統合的なベクション強度はそれらの主観評価を合算した強度になると考えられる。ここで、LV の主観強度 (付録 図 A) と CV の主観強度 (付録 図 B) を合算した様子を図 1 に示す。図 1 を見ると、すべての条件において、視覚刺激の直線運動と回転運動の速度が上がるほど、統合的なベクション強度が増加している。つまり、片方の強度が増加し、他方の強度が減少しても、増加量が減少量よりも上回るということがわかる。このことから、単純合算仮説が正しい場合、合算した際の強度自体は増加すると予測される。

3. 実験環境

3.1 広視野ディスプレイシステム

一般的に、人間の視野は水平方向 180°以上とされ [8]、ベクションを検討するにあたっては、視野領域の全域に視覚刺激を提示することが重要である [4]。そこで、本実験では、被験者の視野領域の全域に視覚刺激を提示すべく、広視野ディスプレイシステム (図 2) を利用した。同システムでは、直径 7.0m、高さ 3.8m の小型ドーム (ジャパンドームハウス株式会社 7000 型ドームハウス) の壁面高さ

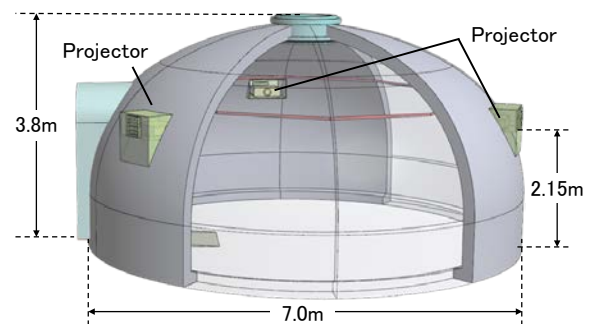


図 2 広視野ディスプレイシステムの外寸とプロジェクタの位置

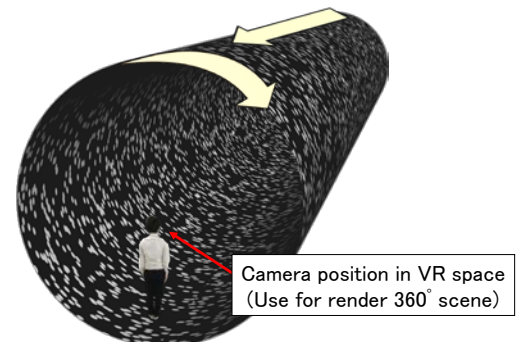


図 3 視覚刺激の生成イメージ

2.15m の位置に、3 台のプロジェクタ (パナソニック株式会社 PT-DW6300LK) が設置され、それぞれ 120°ずつ小型ドームの内壁面に映像を投影することで、天井を含む被験者の周り 360°への映像提示を実現している。提示面には不連続点がなく、一様な視覚刺激の提示が可能であるが、前面投影方式を採用して全天周に映像を提示しているため、プロジェクタから放射された光が被験者の目に差し込み、被験者が眩しく感じる可能性が考えられる。そこで、玉置ら [9] の手法に倣い、プロジェクタの座標系における被験者の頭部に黒色を投影することで対処している。黒色を投影することで被験者の顔の部分に光が放射されないため、実験中にプロジェクタの光を眩しく感じる事がなくなる。なお、実験を行う際は、被験者の影がスクリーンに映り込まないように観察位置を設定した。

3.2 視覚刺激

多くのベクションに関する研究で使用され、直線運動と回転運動の双方を認識できるランダムドットのフローを用いる。ここで、ベクション強度は視覚刺激の速度以外に、奥行き情報にも影響されることが報告されている [5]。そこで、知覚する奥行き情報を統一するために、円筒形の仮想物体を用いて視覚刺激を生成した。具体的には、十分に長い円筒形の仮想物体の内側にランダムドットのテクスチャをマッピングし、VR 空間内で移動させた。円筒形の直径は、我々の先行研究と同様の 6.0m とした。この円筒形の仮想物体を平行移動させることで直線運動の視覚刺激を、円筒を回転させることで回転運動の視覚刺激を表現することができる。本稿では、視覚刺激の直線運動は被験者の前方から後方へ流れる

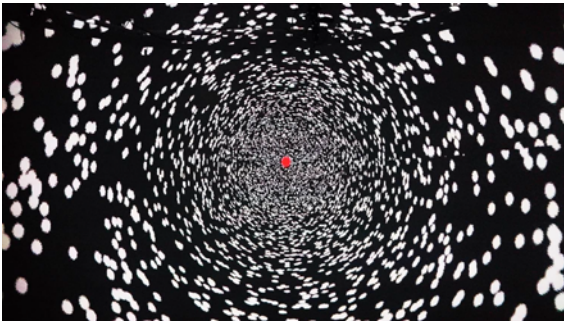


図4 小型ドームの内壁面に投影した視覚刺激

フローとし、回転運動は直線運動の移動方向に対して反時計回り (Roll 回転) とした (図 3). すなわち、被験者は前進の LV と反時計回りの CV の双方を知覚できる. この円筒内部 (VR 空間内の観察位置) からの観察映像を 3 方向 (水平方向に 120° ずつ) に分割し、対応する各プロジェクタから小型ドームの内壁面に投影することで、被験者に対して全周囲の視覚刺激提示を実現している.

ランダムドットのテクスチャは、黒色の一様背景に白色のドットで構成し、白色が占める密度を 20% とした. このとき、ドットの大きさ (直径) は、被験者の真横に配置されるドットが、視野角に換算して 2.0° となるように設定した. また、視覚刺激の消失点は、小型ドームの床面から高さ 1.6m の位置 (被験者の目線の高さ) とし、同一箇所に視線方向を固定するために赤色の注視点を設けた. 実際に被験者が観察する視覚刺激の例を図 4 に示す.

4. 実験 1: 視覚刺激の速度がベクション強度の主観指標に与える影響の分析

4.1 実験目的

2 章で立てた仮説を検証するため、視覚刺激の直線運動の速度 (直進速度) と回転運動の速度 (回転速度) を変化させ、主観的なベクション強度を測定した. その結果から、統合的なベクション強度が増加するか否かを確認した.

4.2 実験条件

本実験には、視覚刺激の直進速度と回転速度の 2 要因を設定した. 使用する視覚刺激の速度は、我々の先行研究の実験条件を踏襲し、直進速度を 0.0m/s, 4.0m/s, 8.0m/s, 16m/s の 4 段階、回転速度を 0.0°/s, 4.0°/s, 8.0°/s, 16°/s の 4 段階とした.

このとき、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激を観察した際に知覚するベクション強度と、回転運動のみの視覚刺激で知覚する CV 強度を比較するため、0.0m/s を条件に加えている. 同様に、直線運動のみの視覚刺激で知覚する LV 強度を比較するため、条件に 0.0°/s を加えている. しかし、0.0m/s と 0.0°/s を組み合わせた場合、ベクションが発生しないため、視覚刺激の提示パターンは、直進速度 4 段階と回転速度 4 段階の組み合わせから 0.0m/s × 0.0°/s 条件を除いた $4 \times 4 - 1 = 15$ 通りとなった (表 1).

表 1 実験 1 の提示パターン

		直進速度 [m/s]		
		4.0m/s	8.0m/s	16m/s
回転速度 [°/s]		×0.0°/s	×0.0°/s	×0.0°/s
	0.0m/s	4.0m/s	8.0m/s	16m/s
	×4.0°/s	×4.0°/s	×4.0°/s	×4.0°/s
	0.0m/s	4.0m/s	8.0m/s	16m/s
	×8.0°/s	×8.0°/s	×8.0°/s	×8.0°/s
	0.0m/s	4.0m/s	8.0m/s	16m/s
	×16°/s	×16°/s	×16°/s	×16°/s

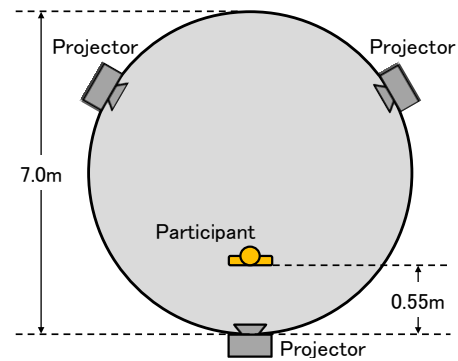


図5 被験者の観察位置

4.3 実験課題

本実験では、LV, CV を区別せず、自身が動いたと感じる強さを評価させた. 具体的には、我々の先行研究 [6][7] と同様、ベクションを知覚するまでの時間 (潜時)、ベクションを知覚している間の時間 (継続時間)、知覚したベクションの強さを数値で回答させた値 (主観強度) を測定した. 潜時と継続時間の測定には、Wii Remote (任天堂製 RVL-003) を利用した. Wii Remote は、Bluetooth アダプタ (ELECOM 製 LBT-UAN04C1BK) を用いて、潜時、継続時間の測定用 PC と接続し、広視野ディスプレイシステム内において 100Hz で安定してデータの送受信ができることを確認した.

被験者の観察位置は、視覚刺激の提示面に被験者自身の影が映り込むことを避けるため、図 5 に示すように設定した. また、被験者の姿勢は直立姿勢とした. 実験中、視覚刺激を提示してから、被験者が移動感覚を知覚している間、Wii Remote のボタンを押し続けさせた. ここで、視覚刺激が提示されてからボタンが押されるまでの時間がベクションの潜時、視覚刺激の提示終了までにボタンを押していた時間の総和が継続時間となる. その後、ベクションを全く知覚していない場合を 0 とし、想定できる一番強いベクションを知覚した場合を 100 とした 101 段階で主観強度を回答させた. また、視覚刺激の提示時間は 40 秒とした. 被験者には実験方法を教示したうえで、実験前に練習用の提示パターン (2.0m/s × 2.0°/s) を用いてボタンの押し方や回答方法を十分に練習させた.

4.4 被験者

成人 13 名 (男性 10 名, 女性 3 名) が実験 1 に参加した。矯正を含め, 全員が正常視力を有した。

4.5 実験手順

実験は以下の手続きで行われた。

- (1) ドットのフローを提示し, 移動感覚の潜時と継続時間を測定する
- (2) 口頭により移動感覚の強さを取得する

以上を 1 試行とし, 各提示パターンにつき 3 回の試行を実施した。よって, 被験者 1 人あたりの試行回数は $15 \times 3 = 45$ 試行であった。実験は被験者の負担を考慮し, 提示パターン 15 試行ごとに 3 日に分けて行った。

なお, 各試行間では, 疲労による影響を排除するために十分なインターバルを設けた。また, 被験者にドットが動いていないかを報告させ, 運動残効が発生していないことを確認した。

4.6 実験結果

他の被験者に比べて, 全条件の潜時が極端に短い 3 名の被験者データは実験結果から除外した。図 6, 図 7 は, (a) ベクシヨンの潜時, (b) 継続時間, (c) 主観強度の平均値を示す。図 6 は直線運動の速度を横軸, 回転運動の速度を凡例とし, 直線運動のみの視覚刺激 ($0.0^\circ/s$ 条件) と直線運動と回転運動が共存する視覚刺激で知覚するベクシオン強度の結果を表している。同様に, 図 7 は回転運動の速度を横軸, 直線運動の速度を凡例とし, 回転運動のみの視覚刺激 ($0.0m/s$ 条件) と直線運動と回転運動が共存する視覚刺激で知覚するベクシオン強度の結果を表している。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

$0.0m/s \times 0.0^\circ/s$ 条件が存在しないため, 図 6 に関しては, ベクシヨンの潜時, 継続時間, 主観強度それぞれに対して, 直進速度 (3; $0.0m/s$ 以外) \times 回転速度 (4) の二元配置の分散分析を行った。結果として, 潜時, 継続時間, 主観強度のすべてにおいて, 直進速度の主効果 (潜時: $F_{(2,9)} = 9.506, p = .0015$, 継続時間: $F_{(2,9)} = 13.460, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,9)} = 26.182, p < .001$), 回転速度の主効果 (潜時: $F_{(3,9)} = 8.100, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,9)} = 3.435, p = .0309$, 主観強度: $F_{(3,9)} = 60.835, p < .001$), 交互作用 (潜時: $F_{(6,9)} = 3.251, p = .0084$, 継続時間: $F_{(6,9)} = 2.853, p = .0173$, 主観強度: $F_{(6,9)} = 8.455, p < .001$) が有意であった。

図 6 では, 回転速度がベクシオン強度に与える影響について確認するため, 各直進速度における回転速度の単純主効果の検定を行った。その結果, 潜時と継続時間は, 直進速度 $4.0m/s$ (潜時: $F_{(3,9)} = 13.330, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,9)} = 6.649, p < .001$) の単純主効果が有意であり, $8.0m/s$ (潜時: $F_{(3,9)} = 2.659, p = .0538$, 継続時間: $F_{(3,9)} = 2.397, p = .0742$) は有意傾向に留まった。主観強度においては, $4.0m/s$ ($F_{(3,9)} = 47.338, p < .001$) と $8.0m/s$ ($F_{(3,9)} = 21.368, p < .001$) に回転速度の単純主効果が有意であった。潜時, 継続時間, 主観強度に下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行った。そして, 各結果において確認された有意差を図中に記載した。図 6(a)~図 6(c) より, $16^\circ/s$ 条件に関しては他の回転速度よりベクシオン強度が大きいことが示された。しかし, $4.0m/s$ 条件の潜時以外では, 回転速度の増加とベクシオン強度の増加関係は明確に示されなかった。さらに, $16m/s$ 条件においては, ベクシオン強度の増加が認められなかった。

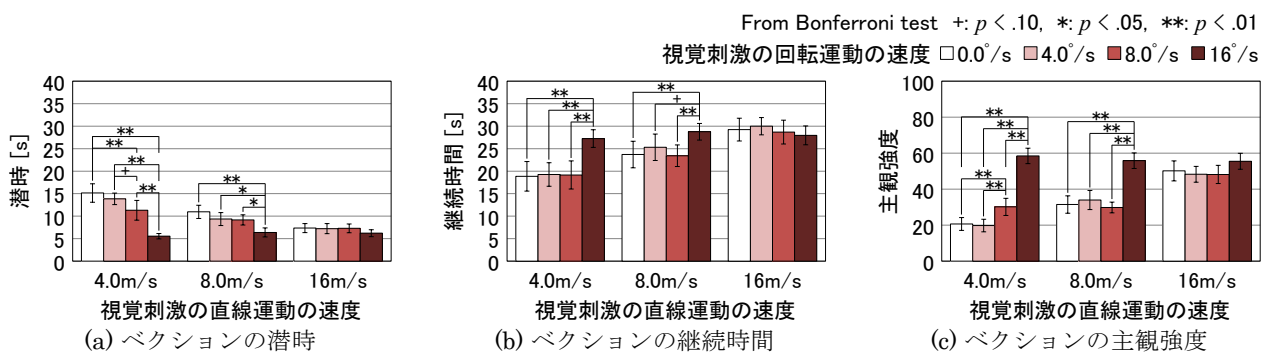


図 6 視覚刺激の速度とベクシオン強度の関係 (回転運動を凡例にした場合)

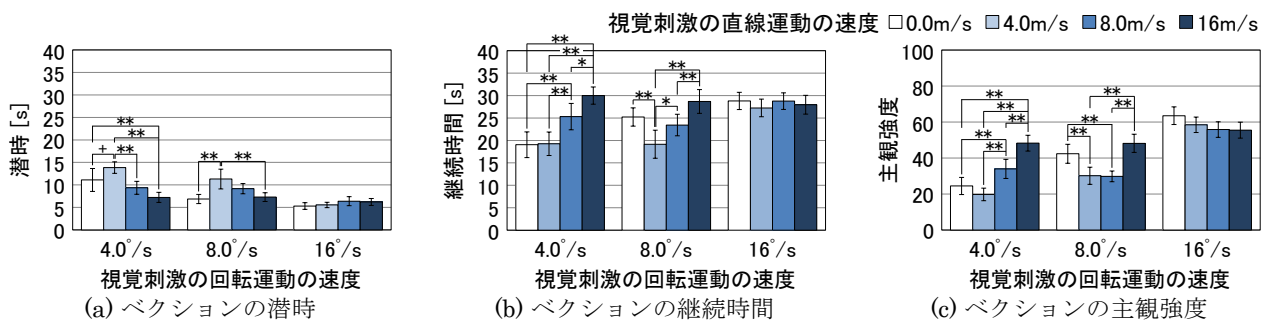


図 7 視覚刺激の速度とベクシオン強度の関係 (直線運動を凡例にした場合)

図7においては、ベクションの潜時、継続時間、主観強度それぞれに対して、直進速度(4)×回転速度(3; 0.0°/s以外)の二元配置の分散分析を行った。結果として、潜時、継続時間、主観強度のすべてにおいて、直進速度の主効果(潜時: $F_{(3,9)} = 3.097, p = .0435$, 継続時間: $F_{(3,9)} = 5.567, p = .0042$, 主観強度: $F_{(3,9)} = 8.749, p < .001$), 回転速度の主効果(潜時: $F_{(2,9)} = 24.439, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,9)} = 12.946, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,9)} = 132.475, p < .001$)が有意であった。また、交互作用において、潜時は有意傾向に留まり、継続時間、主観強度は有意であった(潜時: $F_{(6,9)} = 2.025, p = .0780$, 継続時間: $F_{(6,9)} = 3.551, p = .0049$, 主観強度: $F_{(6,9)} = 7.398, p < .001$)。

図7では、直進速度がベクション強度に与える影響について確認するため、各回転速度における直進速度の単純主効果の検定を行った。結果として、潜時は、4.0°/s ($F_{(3,9)} = 4.687, p = .0045$)に単純主効果が有意であり、8.0°/s ($F_{(3,9)} = 2.459, p = .0686$)は有意傾向に留まった。継続時間と主観強度は、4.0°/s (継続時間: $F_{(3,9)} = 8.509, p < .001$, 主観強度: $F_{(3,9)} = 14.751, p < .001$)と8.0°/s (継続時間: $F_{(3,9)} = 4.823, p = .0039$, 主観強度: $F_{(3,9)} = 7.815, p < .001$)に直進速度の単純主効果が有意であった。ここで、潜時、継続時間、主観強度に下位検定としてBonferroni法を用いて多重比較を行った。そして、各結果において確認された有意差を図中に記載した。図7(a)~図7(c)より、回転運動の視覚刺激に低速(4.0m/s)の直線運動が加わるとベクション強度が減少することがわかる。そのため、回転速度が上がるほど統合的なベクション強度が増加するとは言えない。また、16°/s条件では増加傾向を確認することができなかった。

4.7 考察

実験1の結果は、視覚刺激の回転運動と直線運動のうち片方の速度が上がることにより、ベクション強度は変動するが、単純な増加は生じないことを示す。そのため、LV強度とCV強度が相殺し、統合的なベクション強度は変動しないという強度一定仮説、片方の視覚刺激の速度が上がるほど、統合的なベクション強度は増加するという単純合算仮説はともに棄却される。

そこで、被験者の主観強度の結果に基づき、新たに、統合的なベクション強度は、LV強度とCV強度の合算とはならない可能性について考えた。ここで、LV強度とCV強度のうち大きい強度を統合的なベクション強度として知覚するという仮説を立てる。この仮説に基づき、LVの主観強度(付録図A)とCVの主観強度(付録図B)のうち、視覚刺激の速度の組み合わせが同じ条件を比較し、主観強度の数値が高い方をプロットしたグラフを作成した(図8)。図6(c)と図8(a), 図7(c)と図8(b)をそれぞれ比較したところ、新たな仮説に基づいて予測した結果と図6, 図7で有意差が認められた箇所において、矛盾が生じていないことがわかる。特に、図6(c)と図8(a)では、4.0m/sと8.0m/s

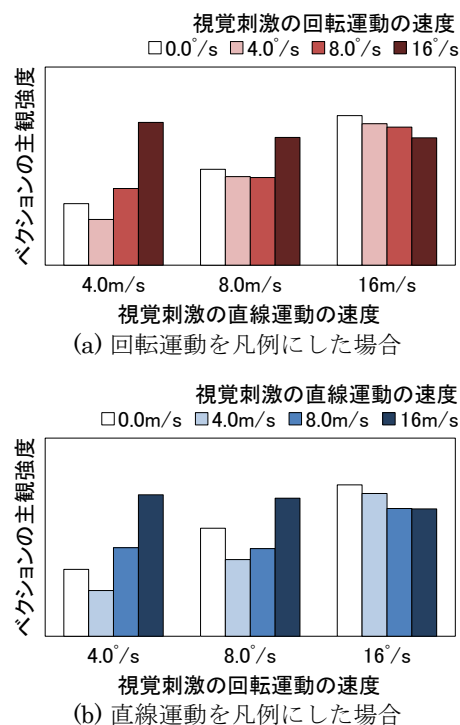


図8 強度が大きい方に引きずられている場合のベクション強度の増減予測

において、16°/s条件でベクション強度が急激に増加している点が一一致する。図7(c)と図8(b)においては、回転運動の視覚刺激に低速(4.0m/s)の直線運動が加わるとベクション強度が減少すること、そして16°/s条件で減少傾向に近い結果となっている点が一一致する。このことから、統合的なベクション強度はLVとCVの強い方に引きずられることを示唆する結果となった。

これは、LVとCVが綺麗に混ざり合い、螺旋状の運動感覚を知覚しているかが定かではないことを意味している。つまり、被験者は奥行き方向と前後左右方向の視覚刺激を同時に処理できず、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激を観察した際には、LVとCVのどちらか片方ずつを交互に知覚した可能性を示唆している。その結果、最終的により強く感じられたベクション強度が報告されたと考えられる。

5. 実験2: 視覚刺激の速度がベクション強度の客観指標に与える影響の分析

5.1 実験目的

一度に直線運動と回転運動の視覚刺激を処理できない可能性について検討するために、客観指標のデータを収集し観測した。その結果から、LV, CVと統合的なベクションに傾向の違いが現れるのか確認した。

5.2 実験条件

実験1と同様、視覚刺激の直進速度と回転速度の2要因を設定した。実験条件も同様に、直進速度を0.0m/s, 4.0m/s, 8.0m/s, 16m/sの4段階、回転速度を0.0°/s, 4.0°/s, 8.0°/s, 16°/sの4段階とした。

表 2 実験 2 の提示パターン

		直進速度 [m/s]			
		0.0m/s	4.0m/s	8.0m/s	16m/s
回転速度 [°/s]	0.0°/s	0.0m/s ×0.0°/s	4.0m/s ×0.0°/s	8.0m/s ×0.0°/s	16m/s ×0.0°/s
	4.0°/s	0.0m/s ×4.0°/s	4.0m/s ×4.0°/s	8.0m/s ×4.0°/s	16m/s ×4.0°/s
	8.0°/s	0.0m/s ×8.0°/s	4.0m/s ×8.0°/s	8.0m/s ×8.0°/s	16m/s ×8.0°/s
	16°/s	0.0m/s ×16°/s	4.0m/s ×16°/s	8.0m/s ×16°/s	16m/s ×16°/s

実験 2 では、客観指標を観測するため、ベクシオンが発生しない基準となる条件も計測しておく必要がある。そこで、0.0m/s×0.0°/s を実験条件に加えた。そのため、視覚刺激の提示パターンは、直進速度 4 段階と回転速度 4 段階の組み合わせである 4×4=16 通りとなった (表 2)。

5.3 計測方法

市川ら [10] は、ベクシオン強度と重心動揺には相関があることを示している。そこで実験 2 では、客観指標として、視覚刺激を観察した際の重心動揺を観測した。また、知覚するベクシオンの種類によって、重心位置の変位方向が異なることが知られている。例えば、前進の LV を知覚した際には、重心位置が前後方向に変位する [10]。また、Roll 回転の CV を知覚した際には、重心位置が左右方向に変位し、Pitch 回転の CV を知覚した際には、重心位置が前後方向に変位する [11]。本実験では、前進の LV と Roll 回転の CV が知覚されるため、前後方向の重心動揺で LV を、左右方向の重心動揺で CV を分析できると考えられる。なお、全体的な評価には重心動揺の大きさ (総軌跡長) を用いた [4]。

重心動揺計測装置として、据え置き型ゲーム機 Wii の板状ゲームコントローラである Wii Balance Board (任天堂製 RVL-021) を利用した。川井田ら [12] は、Wii Balance Board と高価な重心動揺計測装置で計測した重心動揺に相関があるかを評価している。結果として、前後方向、左右方向ともに相関係数は 0.989 であり、Wii Balance Board は高価な重心動揺計測装置とほとんど同じ機能を有していることを示している。これより、Wii Balance Board は重心動揺計測装置として十分な精度を備えていることがわかる。実験 2 で用いる Wii Balance Board は、Bluetooth アダプタ (ELECOM 製 LBT-UAN04C1BK) を用いて、重心動揺の計測用 PC と接続し、広視野ディスプレイシステム内において 100Hz で安定してデータの送受信ができることを確認した。

実験 1 と同様の観測位置に Wii Balance Board を置き、被験者をその上に Romberg 姿勢で立たせた [11]。Wii Balance Board に乗った後、停止状態 (0.0m/s×0.0°/s) の視覚刺激を 30 秒間観察させ、重心位置を安定させた。その後、選出した提示パターンの視覚刺激を提示し、重心動

揺を計測した。視覚刺激の提示時間は実験 1 と同様の 40 秒とした。なお、実験 1 と同様に主観強度の取得を行った。被験者には実験方法を教示したうえで、実験前に練習用の提示パターン (2.0m/s×2.0°/s) を用いて、立ち方や回答方法を十分に練習させた。

5.4 被験者

実験 1 に参加した 13 名のうち、データを採用した 10 名 (男性 7 名、女性 3 名) を対象に実施した。

5.5 実験手順

実験は以下の手続きで行われた。

- (1) 静止状態のドットを 30 秒間提示する
- (2) ドットのフローを提示し、重心動揺を計測する
- (3) 口頭により移動感覚の強さを取得する

以上を 1 試行とし、各提示パターンにつき 3 回の試行を実施した。また、実験前と実験後の重心動揺が大幅に変化していないか確認するため、最初の試行と最後の試行には 0.0m/s×0.0°/s 条件を提示した。そのため、被験者 1 人あたりの試行回数は 18×3=54 試行であった。実験 1 と同様、実験は被験者の負担を考慮し、提示パターン 18 試行ごとに 3 日に分けて行った。

なお、各試行間では、疲労による影響を排除するために十分なインターバルを設けた。また、被験者にドットが動いていないかを報告させ、運動残効が発生していないことを確認した。

5.6 実験結果・考察

他の被験者に比べて、全体的に総軌跡長が非常に長かった 1 名の被験者データを実験結果から除外した。ベクシオンの主観強度の結果を図 9 に、総軌跡長の結果を図 10 に示す。図 9(a)、図 10(a) は回転速度による影響を観測するため直線運動の速度を横軸、回転運動の速度を凡例としたグラフである。同様に、図 9(b)、図 10(b) は直進速度による影響を観測するため、回転運動の速度を横軸、直線運動の速度を凡例としたグラフである。図中のエラーバーは標準誤差を示す。

主観強度と総軌跡長それぞれの結果に対して、直進速度 (4) × 回転速度 (4) の二元配置の分散分析を行った。結果として、総軌跡長の直進速度の主効果は有意ではなかったが、主観強度の直進速度の主効果 (主観強度: $F_{(3,8)} = 7.824$, $p < .001$) は有意であった。また、主観強度と総軌跡長両方とも、回転速度の主効果 (主観強度: $F_{(3,8)} = 80.203$, $p < .001$, 総軌跡長: $F_{(3,8)} = 5.934$, $p = .0035$)、交互作用 (主観強度: $F_{(9,8)} = 21.700$, $p < .001$, 総軌跡長: $F_{(9,8)} = 3.304$, $p = .0020$) が有意であった。各直進速度における回転速度の単純主効果の検定を行った結果、主観強度はすべての直進速度で単純主効果が有意であった (0.0m/s: $F_{(3,8)} = 111.455$, $p < .001$, 4.0m/s: $F_{(3,8)} = 52.422$, $p < .001$, 8.0m/s: $F_{(3,8)} = 21.742$, $p < .001$, 16m/s: $F_{(3,8)} = 3.984$, $p = .0101$)。また、総軌跡長においては、0.0m/s ($F_{(3,8)} = 9.475$, $p < .001$)

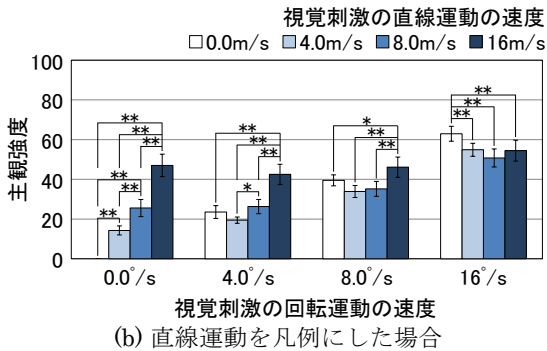
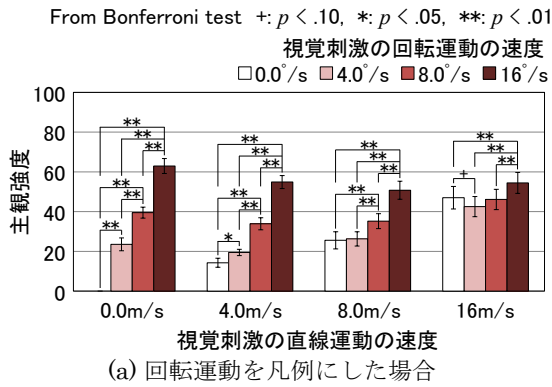


図9 視覚刺激の速度と主観的なベクシオン強度の関係

と 4.0m/s ($F_{(3,8)} = 5.222, p < .001$) では単純主効果が有意であったが, 8.0m/s ($F_{(3,8)} = 2.404, p = .0722$) は有意傾向に留まった. 各回転速度における直進速度の単純主効果の検定を行った結果, 主観強度は, 0.0°/s ($F_{(3,8)} = 34.577, p < .001$) と 4.0°/s ($F_{(3,8)} = 8.970, p < .001$) において有意な単純主効果が認められ, 8.0°/s ($F_{(3,8)} = 2.665, p = .0522$) と 16°/s ($F_{(3,8)} = 2.329, p = .0793$) は有意傾向に留まった. 総軌跡長は, 0.0°/s ($F_{(3,8)} = 3.823, p = .0123$) と 4.0°/s ($F_{(3,8)} = 4.609, p = .0047$) に有意な単純主効果があった. 下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行った. そして, 各結果において確認された有意差を図中に記載した.

図 9(a) と図 6(c), 図 9(b) と図 7(c) より, 実験 1 で測定した主観強度と同様の傾向を得られたことがわかる. なお, 実験 1 と検定結果に違いが現れた原因としては, 検定を掛けた条件数や実験課題が異なることが考えられる. 図 10(b) より, 0.0m/s × 4.0°/s 条件と 4.0m/s × 4.0°/s 条件を比較したとき, 直進速度が高い 4.0m/s × 4.0°/s 条件の総軌跡長が短くなっていることが読み取れる. このことから, 総軌跡長の結果は主観指標のデータと同様の傾向を持つことがわかった. ただし, 総軌跡長は全体評価のみであるため, 前後方向, 左右方向の重心動揺の評価を鑑みて分析する必要がある. そのため, 今後これらの点を考慮して更なる分析を重ねる予定である.

続いて, 図 11 に重心位置の軌跡の一部を示す (被験者 1 名分). 重心位置の (0.0, 0.0) は Wii Balance Board の中央を示す. 前後方向は数値が上がるほど前に, 左右方向は数値が上がるほど右に重心位置が変位していることを表す. なお,

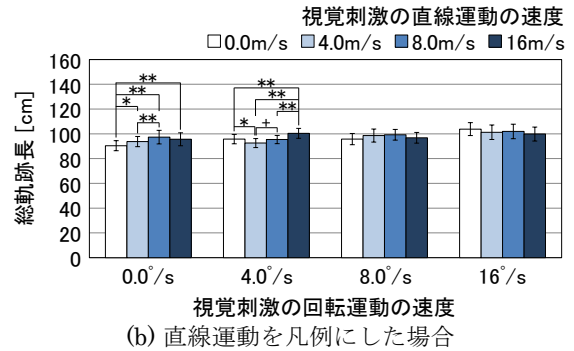
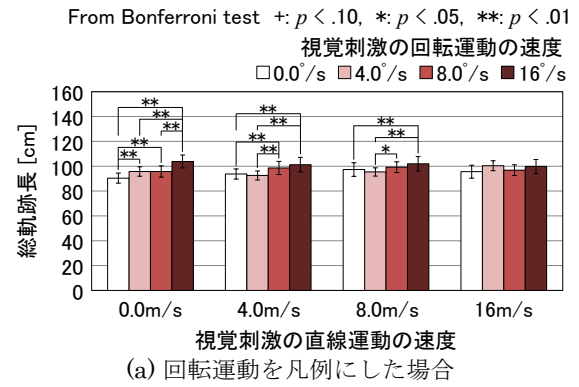


図10 視覚刺激の速度と総軌跡長の関係

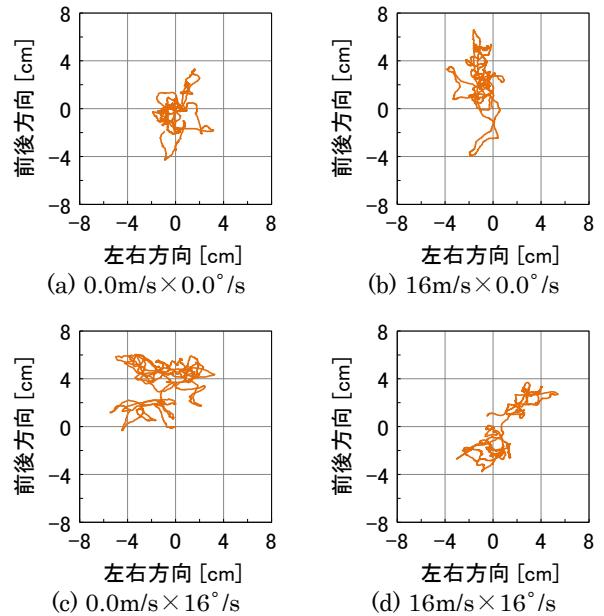


図11 被験者1名の重心位置の軌跡

条件間で重心位置の軌跡を比較するため, 重心動揺の初期位置が (0.0, 0.0) になるように各重心位置を補正した.

0.0m/s × 0.0°/s 条件を基準とした場合 (図 11(a)), 直線運動の視覚刺激を観察した際には, 前後方向に重心動揺が大きくなり (図 11(b)), 回転運動の視覚刺激を観察した際には, 左右方向に重心動揺が大きくなることを読み取れる (図 11(c)). これは先行研究 [11] から妥当な重心動揺であることがわかる. また, 直線運動と回転運動が共存する視覚刺激を観察した際には, 斜め方向の重心動揺が確認できる (図 11(d)). そのため, 螺旋状の運動を知覚した場合には斜め方

向への重心動揺が起こると考えられる。これは、LV と CV が綺麗に混ざり合っていることを示唆する結果である。しかし、全被験者の重心動揺の傾向を考慮して分析する必要があるため、これについても今後分析を重ねていく予定である。

6. むすび

我々は、先行研究において、LV と CV の双方を知覚する条件においては、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることを示した。本稿では、次なるステップとして、視覚刺激の直線運動と回転運動の速度によって、LV と CV を切り分けずに1つの運動感覚として扱った際のベクション強度がどのように増減するのかを確認し、統合的なベクションと LV, CV の関係性について検討した。

まず我々は、統合的なベクション強度は一定になるという強度一定仮説と、統合的なベクション強度は先行研究で報告された各ベクション強度を単純に合算した強度となり、視覚刺激の速度が片方でも上がるとベクション強度が増加するという単純合算仮説の2つの仮説を立てた。

実験1では主観的なベクション強度を取得し、統合的なベクション強度について検討した。結果としては、どちらの仮説も棄却され、LV と CV の強い方の強度に引きずられる可能性を示唆する結果となった。これは一度に片方の運動方向の視覚刺激しか処理できない可能性を示唆する。

そこで、実験2では客観指標データを収集し、実験1とは異なる視点から統合的なベクションについて検討した。その結果、重心動揺の総軌跡長は実験1の主観評価と類似した傾向になることを確認した。また、特徴的な被験者の重心位置の軌跡を確認したところ、統合的なベクションは LV と CV 双方の影響を同時に受けていることを示唆する軌跡となっていた。ただし、実験2の分析は一部のデータに依るところが多いため、今後、様々な点を考慮して更なる分析を重ねる予定である。

謝辞

本研究の実験の一部を担当した坂平鷹哉氏（立命館大学情報理工学部所属）に感謝の意を表す。

参考文献

[1] T. Seno, and H. Fukuda: "Stimulus meanings alter illusory self-motion (vection) - experimental examination of the train illusion," *Seeing and Perceiving*, Vol. 25, No. 6, pp. 631 - 645, 2012.

[2] 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, pp. 1 - 15, 2015.

[3] M. H. Fischer and A. E. Kormmüller: "Optokinetisch ausgelöste bewegungswahrnehmung und optokinetischer nystagmus," *Journal für Psychologie und Neurologie*, Vol. 41, pp. 273 - 308, 1930.

[4] 柳在鎬, 橋本直己, 佐藤誠: "没入型ディスプレイにおける視覚誘導自己運動の分析", 電子情報通信学会技術研究報告, MVE, Vol. 103, No. 107, pp. 63 - 68, 2003.

[5] S. Palmisano, S. Summersby, R. G. Davies, and J. Kim: "Stereoscopic advantages for vection induced by radial, circular, and spiral optic flows," *Journal of Vision*, Vol. 16, No. 14, pp. 1 - 19, 2016.

[6] 古賀有摩, 石津航大, 橋口哲志, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: "直線運動と回転運動が共存する場合のベクション効果に関する分析と考察", 情報処理学会研究報告, Vol. 2017-HCI-175, No. 16, pp. 1 - 8, 2017.

[7] 古賀有摩, 石津航大, 橋口哲志, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: "直線運動と回転運動が共存する場合のベクション効果に関する分析と考察 (2) ~直線と回転の運動方向についての拡張実験~", 情報処理学会研究報告, Vol. 2018-HCI-176, No. 4, pp. 1 - 8, 2018.

[8] 三橋哲雄, 矢野澄男, 畑田豊彦: "画像と視覚情報科学 (映像情報メディア基幹技術シリーズ)", コロナ社, p. 172, 2009.

[9] 玉置純也, 村上和人: "眩しくないプロジェクタシステムの提案", 情報処理学会研究報告, CVIM 研究会報告 2008, No. 36, pp. 43 - 46, 2008.

[10] 市川真澄, 渡邊悟: "直立姿勢に対する視覚情報の影響", バイオメカニズム学会誌, Vol. 15, No. 2, pp. 59 - 64, 1991.

[11] 竹田仰, 金子照之: "広視野映像が重心動揺に及ぼす影響", テレビジョン学会誌, Vol. 50, No. 12, pp. 1935 - 1940, 1996.

[12] 川井田豊, 福留清博, 上嶋明, 西智洋, 松下寿史: "バランス Wii ボードの重心動揺計としての利用", 第44回日本理学療法学会大会抄録集, Vol. 36, No. 2, 2009.

付録

我々の先行研究では [6][7], 直線運動と回転運動が共存する場合の視覚刺激を観察した際に知覚する LV と CV をそれぞれ評価し、回転速度が上がるほど LV 強度が減少し、直進速度が上がるほど CV 強度が減少することを示した。図 A, B に、本稿の仮説で用いる、前進 LV と反時計回り CV における主観強度の結果を掲載する [6]。

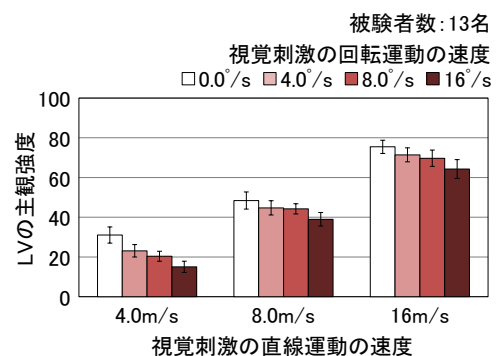


図 A 視覚刺激の速度と LV 強度の関係

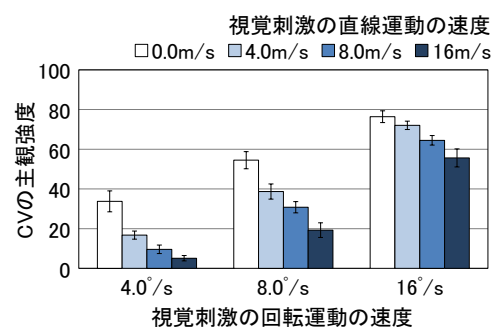


図 B 視覚刺激の速度と CV 強度の関係