

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 (2) ～直線と回転の運動方向についての拡張実験～

古賀宥摩^{†1} 石津航大^{†1} 橋口哲志^{†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、直線運動と回転運動が共存する視覚刺激を用いて LV と CV の関係について分析し、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることを示した。しかし、これは前進と Roll 回転の組み合わせに限定されており、他の直線と回転の運動方向の組み合わせについては検討の余地が残る。そこで本稿では、他の運動方向に対して LV と CV の関係について分析した。結果、運動方向が異なっても LV と CV が負の相関関係になることを示した。

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

一様に動く視覚刺激を観察することで、自分は静止しているにも関わらず、あたかも運動しているかのように感じることがある。このような、視覚によって引き起こされる運動感覚を視覚誘導性自己運動感覚 (ベクシオン) と呼び [1], 知覚する運動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 [2]。この運動感覚は、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 [3]。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がある [4][5]。これらの研究では、そのような視覚刺激で知覚するベクシオンは、LV と CV とは異なる1つの運動感覚として扱われてきた。しかし、直線運動と回転運動が共存する場合、LV と CV が複合した運動感覚とも考えられる。

そこで我々の研究グループでは、前進しながら Roll 回転する視覚刺激に対し、直線運動と回転運動の速度が知覚する LV と CV に与える影響をそれぞれ分析した [6]。結果として、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を明らかにした。これは、LV と CV のうち片方のみ知覚する条件では、視覚刺激の速度が上がるにつれ、LV または CV を強く知覚するが [7][8]、前進と Roll 回転の両方を知覚する条件において、どちらかの速度が上がる

と片方は知覚する強度が上がり、もう一方は下がるという負の相関関係があることを示した。

ここで、座標軸に沿った運動として、LV は前進だけでなく後退、上昇、下降、また右移動、左移動も考えられる。同様に、CV は Roll 回転、Yaw 回転、Pitch 回転に分けることができる。これらは同じ LV や CV として分類されるが、知覚する際の印象は大きく異なる。例えば、下降の LV を知覚する視覚刺激の場合、運動感覚だけでなく、重力が変化したような感覚が得られる。このことから、前進感覚と下降感覚は同じ LV に属してはいるが、その性質は異なると考えられる。すなわち、前進と Roll 回転の組み合わせによって得られた LV と CV の知見は、他の直線方向と回転方向の組み合わせとは異なった傾向となる可能性がある。

そこで本稿では、前進と Roll 回転以外の直線運動、回転運動の組み合わせについて、知覚される LV と CV の強さの関係が、我々の先行研究 [6] と同様の傾向になるのか確認する。実験 1 では下降と Yaw 回転の組み合わせ、実験 2 では右移動と Pitch 回転について知覚される LV と CV の強度をそれぞれ確認する。最後に、先行研究、および今回の実験を通して、直線と回転の運動方向が異なる場合の LV と CV の関係について分析・考察を行う。

2. 実験環境

2.1 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 度以上とされ [9]、ベクシオンを検討するにあたって、視野領域全域に視覚刺激を提示することが重要である [3][10]。そこで、本研究では、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を構築した。広視野ディスプレイシステムのスクリーンとして、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) を採用した。3 台のプロジェクタ (パナソニック株式会社 PT-DW6300LK) を小型ドームの壁面の高さ 2.15m の位置に設置し、3 台のプロジェクタがそれぞれ 120 度ずつ小型ド

^{†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

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 度への映像提示を実現している。構築した広視野ディスプレイシステムのイメージを図 1 に示す。このディスプレイシステムはドーム状であるため、提示面に不連続点がなく、一様な視覚刺激の提示が可能である。

ただし、我々が構築した広視野ディスプレイシステムでは、前面投影方式を採用し、全天周に映像を提示している。そこで、玉置ら [11] 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した。これにより、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。また、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。

2.2 視覚刺激

本実験には、多くのベクシオンの研究で使用され、直線運動と回転運動の双方を認識できる視覚刺激として、ランダムドットのフローを使用する。ここで、視覚刺激は、我々の先行研究 [6] に倣い、十分に長い円筒形の CG オブジェクト（直径 6.0m）の内側にランダムドットのテクスチャを投影し、円筒形を移動させることで表現した（図 2）。

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円形ドットで構成し、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（被験者の視線の高さ）とし、同一箇所視線方向を固定するために赤色の注視点を設けた。

実験 1 では、視覚刺激の直線運動は被験者の下方向から上方向へ流れるフローとし、回転運動は直線運動の移動方向に対して時計回り（Yaw 回転）とした。すなわち、被験者は下降の LV と左回転の CV を知覚する。実験 2 では、被験者の右方向から左方向へ流れるフローとし、回転運動は直線運動の移動方向に対して時計回り（Pitch 回転）とした。すなわち、被験者は右移動の LV と前転の CV を知覚する。

3. 実験 1-a: 下降と Yaw 回転において直線運動と回転運動の速度が CV に与える影響の分析

3.1 実験目的

我々の先行研究 [6] において、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件下で、視覚刺激の回転運動の速度が上がるほど、CV 強度が増加することを確認した。また、視覚刺激の直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少することも確認した。これは、回転運動の速度だけでなく、直線運動の速度も CV 強度に影響を与えることを示している。ここで、他の運動方向においても、回転運動と直線運動の速度が CV に対して同様の影響があるのか疑問が生じる。そこで、実験 1-a では、まず CV に着目し、下降の LV と Yaw 回転の CV を知覚する条件下において、回転運動の速

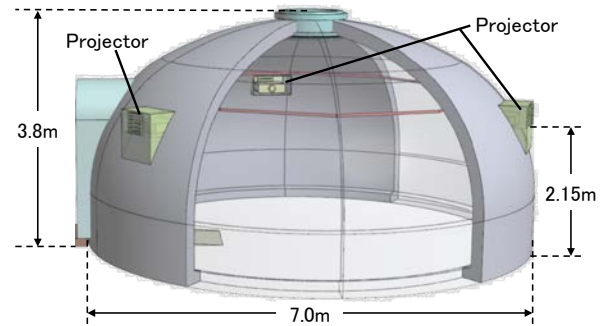


図 1 広視野ディスプレイシステムの外寸とプロジェクタの位置

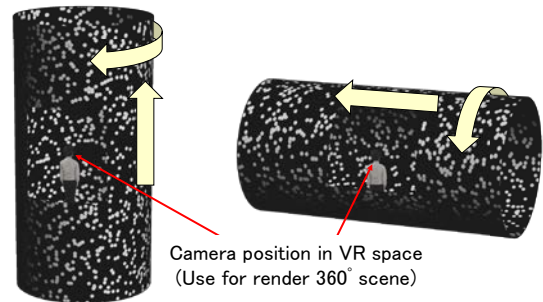


図 2 視覚刺激の生成イメージ

度が上がるほど CV 強度が増加し、直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少するのかが確認する。

3.2 実験方法

本実験では、直線運動と回転運動の両方を提示した際の CV を知覚するまでの時間（潜時）・CV を知覚している間の時間（継続時間）・知覚した CV の強さを数値で回答させた値（主観強度）を用いて分析する。潜時と継続時間の計測には、Wii Remote（任天堂製 RVL-003）を利用する。Wii Remote は、Bluetooth アダプタ（ELECOM 製 LBT-UAN04C1BK）を用いて PC と接続し、100Hz で安定してデータの送受信ができることを確認した。

分析を行うにあたって、被験者が直線運動と回転運動の両方を認識している事を担保する必要がある。そこでまず、直線運動のみの視覚刺激を提示し、LV を知覚した後に回転運動を提示する。具体的な手順としては、被験者には直線運動を提示してから LV を知覚した際に Wii Remote のボタンを押させる。そして、ボタンが押された後に視覚刺激に回転運動を加え、被験者が CV 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、直線運動を提示してからボタンが押されるまでの時間が LV の潜時となる。また、回転運動を加えてからボタンが押されるまでの時間が CV 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が継続時間となる。なお、文献 [12] に倣い、回転運動を加えた後の視覚刺激の提示時間は 40 秒とした。

その後、ベクシオンを全く知覚していない場合を 0 とし、想像できる一番強いベクシオ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。なお、被験者には実験方法を教示した上で、実験前に十分に練習させた。

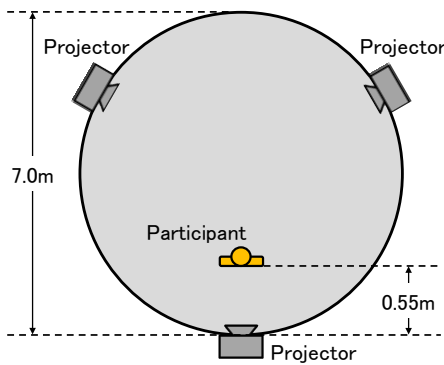


図3 被験者の観察位置

表1 CVを評価する実験の提示パターン

直線運動の速度	回転運動の速度
0.0m/s (回転運動のみ)	4.0°/s
	16°/s
1.0m/s	4.0°/s
	16°/s
4.0m/s	4.0°/s
	16°/s

3.3 実験条件

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、被験者の観察位置を図3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。

使用する視覚刺激の直線運動の速度は 0.0m/s, 4.0m/s, 16m/s とし、回転運動の速度は 4.0°/s, 16°/s とした。このとき、直線運動と回転運動が共存する際の CV 強度と、回転運動のみの CV 強度の比較も行うため、0.0m/s を条件に加えている。視覚刺激の提示パターンは、表1に示す6通りとなり、提示パターン1つにつき3回ずつ実施する。よって、被験者1人あたりの試行回数は 6×3 = 18 試行となる。

被験者は、成人 11 名（男性 9 名、女性 2 名）である。

3.4 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 表1の提示パターンのうちランダムに1つを選出する
- (2) 直線運動のみの視覚刺激を提示する
- (3) LVを知覚したときに、手元のボタンを押させる
- (4) 視覚刺激に回転運動を加える
- (5) CVを知覚している間、手元のボタンを押させる
- (6) (4) から 40 秒後に画面を暗転し、CVの強さを 101 段階 (0~100) で回答させる
- (7) 疲労による影響を排除するために十分な休憩を設ける
- (8) 画面を明転し、ドットが動いていないか（運動残効が発生していないか）確認させる
- (9) 残りの提示パターンに対して (1)~(8) を繰り返す

ここで、直線運動の速度 0.0m/s の場合、(2)(3) の手順をスキップして実験を行った。なお、被験者の負担を考慮し、提示パターン 6 試行ごとに 3 日に分けて行った。

3.5 実験結果・考察

図4に、(a) 回転運動を提示する前の LV の潜時、(b) 提示後の CV の潜時・(c) 継続時間・(d) 主観強度の結果を示す。なお、図中のエラーバーは標準誤差を表す。

図4(a)より、直線運動の速度が上がると LV の潜時が短くなることが読み取れる。また、t 検定により、有意水準 1% で有意差が認められた。これは、直線運動の速度が上がるほど、被験者が LV を強く知覚していることを示している。すなわち、視覚刺激の直線運動が上がるほど、強い下降の LV を知覚している状態で、Yaw 回転の CV の潜時・継続時間・主観強度を評価していることを意味する。

続いて、CV の潜時・継続時間・主観強度それぞれに対して、回転運動の速度 (2)×直線運動の速度 (3) の二元配列の分散分析を行った。結果として、潜時においては、有意水準 1% で、継続時間と主観強度では、有意水準 5% で交互作用の有意差が認められた。すなわち、直線運動の速度は CV に影響するが、その影響は回転運動の速度ごとに変化するということがわかった。ここで、交互作用が認められたので、各直線運動の速度における回転運動の速度についての単純主効果の検定を行った。結果として、潜時の 4.0m/s は非有意であったが、継続時間の 0.0m/s では有意水準 5% で、それ以外の条件では有意水準 1% で効果があった。このことから、下降の LV と Yaw 回転の CV を知覚する条件下においても、回転運動の速度が CV 強度に影響することがわかる。また、各回転運動の速度における直線運動の速度の単純主効果は、潜時・継続時間・主観強度すべてにおいて、有意水準 1% で有意差を確認できた。そこで、具体的にどの条件間に有意差があるのかを確認するために、それぞれの条件に下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行い、確認された有意差を図中に記載した。

図4(b)(c)(d)より、ほとんどの条件間で有意差が確認できるため、直線運動の速度が CV 強度に影響を与えていることが読み取れ、直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少することがわかる。ただし、回転運動の速度が上がると、継続時間と主観強度において、0.0m/s と 1.0m/s 間が非有意になっている。このことから、回転運動の速度が上がると、直線運動の速度が CV に与える影響力が減少することも読み取ることができる。これは、文献 [6] で前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件において視覚刺激の速度が LV に与えた影響と同様の傾向であった。

ここで、本実験では 4.0m/s と 4.0°/s を組み合わせた場合において、ほとんどの被験者が CV を知覚しなかった。また、数名の被験者から「斜め方向の LV と知覚した」というコメントが得られた。この原因として、視覚刺激の見え方が大きく影響している可能性が考えられる。前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する視覚刺激では、被験者は円筒形の CG オブジェクトの消失点を見ているため、視覚刺激の直線運動と回転運動の双方を把握しやすい。一方、下降の LV と Yaw

回転の CV を知覚する視覚刺激においては、中心視野で観察するだけでは右から左のフローと認識するため、主に水平方向の周辺視野で捉える視覚刺激のドットの動きによって回転運動であることを把握していると考えられる。つまり、前進と Roll 回転を組み合わせた場合に知覚する CV に比べて、下降と Yaw 回転を組み合わせた場合の CV は視覚刺激の回転運動が把握しにくいために、CV と LV を独立して知覚し

にくいことを示唆する結果となった。

以上をまとめると、回転運動を提示する前に知覚する LV は、直線運動の速度が上がると強く知覚すること、そして、CV の潜時・継続時間・主観強度より、直線運動の速度が小さく、回転運動の速度が大きいほど CV をより強く知覚することを確認した。これらは、LV 強度が減少するにつれて CV 強度が増加することを示している。このとき、回転運動の速度が上がるほど、直線運動の速度が CV に与える影響力が弱まる傾向も確認した。これらの結果は、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件における、視覚刺激の速度が CV に与える影響と同様の傾向であった。ただし、前進と Roll 回転の組み合わせに比べて、下降と Yaw 回転の組み合わせでは、CV を知覚しにくいことを示唆する結果となった。

4. 実験 1-b : 下降と Yaw 回転において直線運動と回転運動の速度が LV に与える影響の分析

4.1 実験目的

実験 1-a より、下降の LV と Yaw 回転の CV を知覚する条件下においても、直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少することを確認した。そこで、実験 1-a と同様の方法で、視覚刺激の直線運動と回転運動の速度が LV に与える影響について確認する。つまり、直線運動の速度が上がるほど LV 強度が増加するのか、また、回転運動の速度が上がるほど LV 強度が減少するのかを確認する。これにより、CV と LV を同時に知覚した際の LV 側の知見を得る。

4.2 実験方法

実験 1-a と同様に、直線運動を提示する前の CV の潜時と、直線運動と回転運動の両方を提示した際の LV の潜時・継続時間・主観強度を用いて LV について分析する。

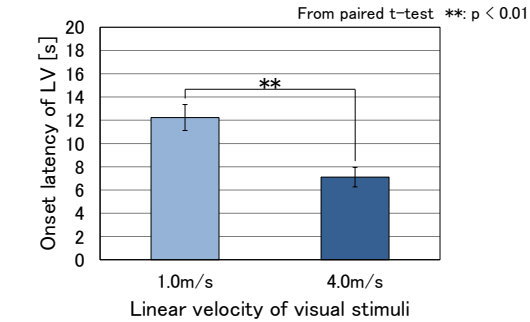
4.3 実験条件

実験 1-a と同様、直線運動と回転運動が共存する際の LV 強度と直線運動のみの LV 強度の比較も行うため、 $0.0^\circ/s$ を条件に加えた。すなわち、使用する視覚刺激の直線運動の速度は $4.0m/s$, $16m/s$ とし、回転運動の速度は $0.0^\circ/s$, $4.0^\circ/s$, $16^\circ/s$ とした。そのため、視覚刺激の提示パターンは、表 2 に示す 6 通りとなる。また、1 つの提示パターンにつき 3 回ずつ実施するため、被験者 1 人あたりの試行回数は、 $6 \times 3 = 18$ 試行となる。

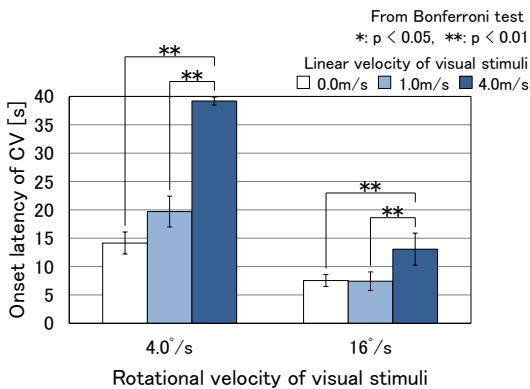
なお、被験者は、実験 1-a と同様の成人 11 名である。

表 2 LV を評価する実験の提示パターン

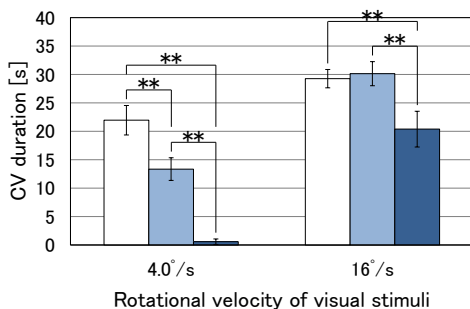
直線運動の速度	回転運動の速度
1.0m/s	$0.0^\circ/s$ (直線運動のみ)
	$4.0^\circ/s$
	$16^\circ/s$
4.0m/s	$0.0^\circ/s$ (直線運動のみ)
	$4.0^\circ/s$
	$16^\circ/s$



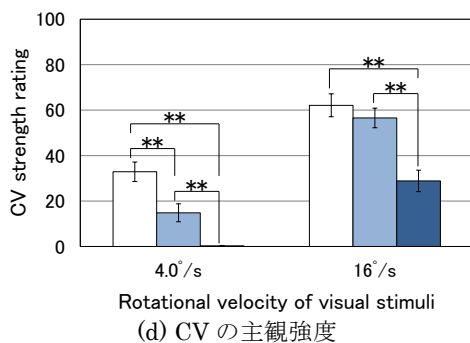
(a) 直線運動を提示する前の LV の潜時



(b) CV の潜時



(c) CV の継続時間



(d) CV の主観強度

図 4 下降+Yaw 回転における CV 側のデータ

4.4 実験手順

具体的な実験手順は以下の通りである。

- (1) 表 2 の提示パターンのうちランダムに 1 つを選出する
- (2) 回転運動のみの視覚刺激を提示する
- (3) CV を知覚したときに、手元のボタンを押させる
- (4) 視覚刺激に直線運動を加える
- (5) LV を知覚している間、手元のボタンを押させる
- (6) (4) から 40 秒後に画面を暗転し、LV の強さを 101 段階 (0~100) で回答させる
- (7) 疲労による影響を排除するために十分な休憩を設ける
- (8) 画面を明転し、ドットが動いていないか (運動残効が発生していないか) 確認させる
- (9) 残りの提示パターンに対して (1)~(8) を繰り返す

実験 1-a と同様に、回転運動速度 $0.0^\circ/\text{s}$ のパターンの場合、(2)(3) の手順をスキップして実験を行った。また、実験は被験者の負担を考慮し、提示パターン 6 試行ごとに 3 日に分けて行った。

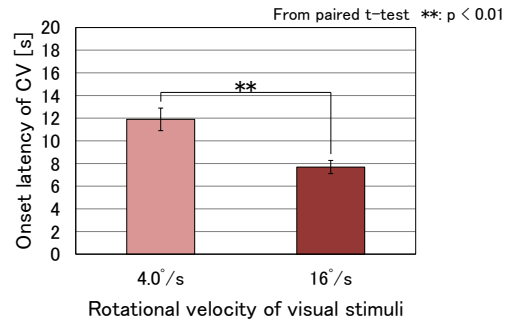
4.5 実験結果・考察

図 5 は、(a) 直線運動を提示する前の CV の潜時、(b) 提示後の LV の潜時・(c) 継続時間・(d) 主観強度の結果を示している。なお、図中のエラーバーは標準誤差を表す。

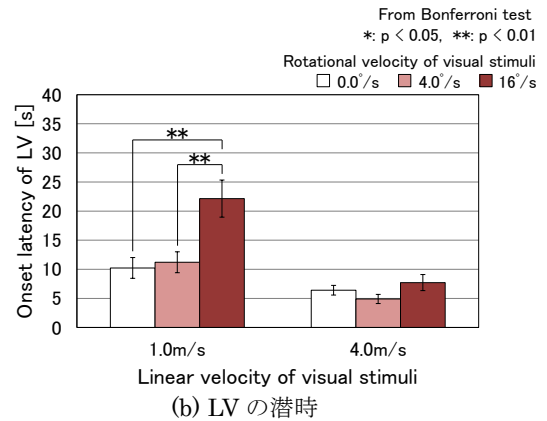
図 5 (a) より、回転運動の速度が上がるほど、CV の潜時が短くなることが確認できる。また、t 検定より条件間に有意水準 1% で有意差が認められたため、回転運動の速度が上がると CV を強く知覚していることがわかる。

続いて、LV の潜時・継続時間・主観強度に直線運動の速度 (2) × 回転運動の速度 (3) の二元配列の分散分析を行った。結果として、潜時と継続時間では有意差 1% で交互作用が認められたが、主観強度では有意差が認められなかった。そこで、潜時と継続時間に対して、各回転運動の速度における直線運動の速度の単純主効果の検定を行ったところ、潜時の $0.0^\circ/\text{s}$ では非有意であり、継続時間の $0.0^\circ/\text{s}$ では有意水準 5% で、それ以外では有意水準 1% で有意差を確認した。また、各直線運動の速度における回転運動の速度の単純主効果では、潜時については 1.0m/s において有意水準 1% で有意差を確認し、 4.0m/s において非有意であった。継続時間については 1.0m/s において有意水準 1% で、 4.0m/s において有意水準 5% で有意差を確認した。また、主観強度については直線運動の速度と回転運動の速度の両方とも主効果に有意水準 1% で有意差が認められた。ここで、具体的にどの条件間に有意差があるのかを確認するために、下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行い、確認された有意差を図中に記載した。

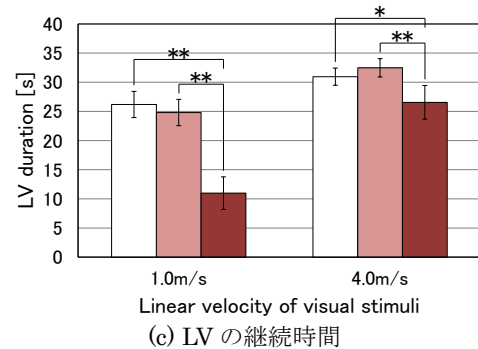
図 5 (b)(c)(d) より、回転運動の速度が上がるほど LV 強度が減少することが読み取れる。また、図 5 (b)(c) より、直線運動の速度が上がると条件間の差が減少していることから、直線運動の速度が上がると回転運動が LV に与える影響力が減少することがわかる。ただし、図 5 (d) より、



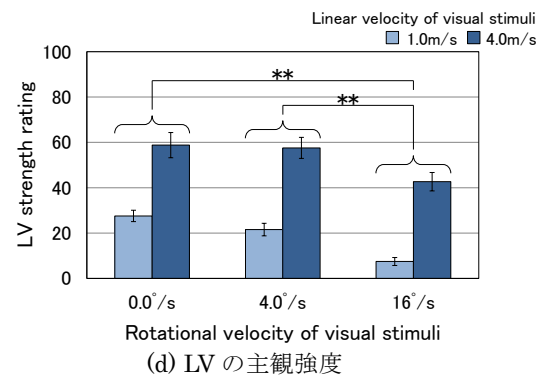
(a) 直線運動を提示する前の CV の潜時



(b) LV の潜時



(c) LV の継続時間



(d) LV の主観強度

図 5 下降+Yaw 回転における LV 側のデータ

主観強度において交互作用が非有意であったことから、被験者が主観的に違いを知覚できるほどの大きな変化ではないことが考えられる。この結果は、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件における視覚刺激の速度が LV に与える影響と同様の傾向であることを示している。ただし、前進と Roll 回転を組み合わせた場合とは異なり、「直線運

動のみの視覚刺激より低速の回転運動を加えることで LV が強くなった」と数名の被験者がコメントした。

以上をまとめると、直線運動を提示する前に知覚する CV は、回転運動の速度が上がると強く知覚すること、そして、LV の潜時・継続時間・主観強度より、直線運動の速度が大きく、回転運動の速度が小さいほど LV をより強く知覚されることを確認した。これらは、CV 強度が減少するにつれて LV 強度が増加することを示している。このとき、直線運動の速度が上がるほど、回転運動の速度が LV に与える影響力が弱まる傾向も確認した。これらの結果は、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件における視覚刺激の速度が LV に与える影響と同様の傾向であった。つまり、実験 1 の結果を合わせて考えると、直線運動と回転運動が共存する場合の下降の LV と Yaw 回転の CV の関係は負の相関関係にあることが示され、視覚刺激の運動方向を変えてもこの関係が成り立つことを示唆する結果となった。

5. 実験 2-a : 右移動と Pitch 回転において直線運動と回転運動の速度が CV に与える影響の分析

5.1 実験目的

実験 1 では、運動方向を下降移動と Yaw 回転に変えても、LV と CV が負の相関関係になることを示した。次に実験 2 では、右移動の LV と Pitch 回転の CV を知覚する条件下での、LV と CV の関係について分析する。まず実験 2-a では、実験 1-a と同様に実験を行い、回転運動の速度によって CV 強度が増加するのか、そして、直線運動の速度によって CV 強度が減少するのかを確認する。これにより、右移動の LV と Pitch 回転の CV の双方を知覚する条件下での CV 側の知見を得る。

5.2 実験方法・条件・手順

実験方法・実験条件・実験手順は、実験 1-a と同様である。つまり、回転運動を提示する前の LV の潜時と、直線運動と回転運動の両方を提示した際の CV の潜時・継続時間・主観強度を用いて CV について分析する。

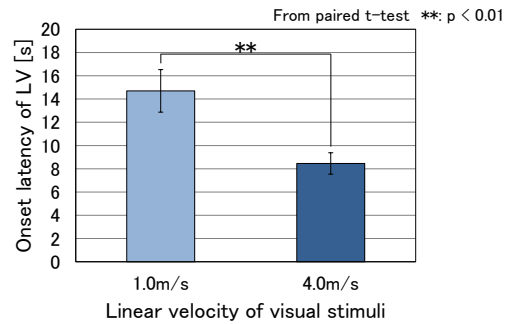
使用する視覚刺激の直線運動の速度は、0.0m/s, 4.0m/s, 16m/s の 3 段階とし、回転運動の速度は 4.0°/s, 16°/s の 2 段階とする。すなわち、視覚刺激の提示パターンは、表 1 に示す 6 通りである。また、1 人あたりの試行回数は、実験 1-a と同様の 18 試行である。

なお、被験者は、実験 1 に参加した成人 8 名である。

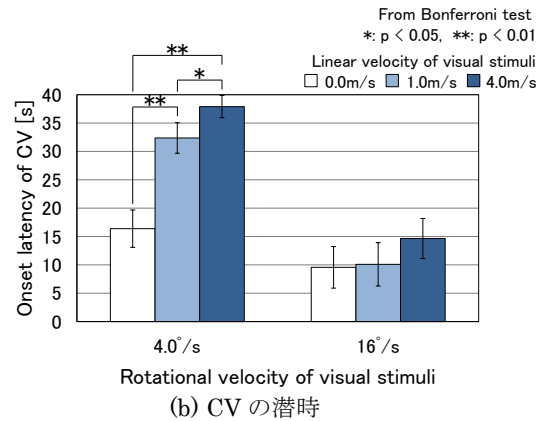
5.3 実験結果・考察

図 6 は、(a) 回転運動を提示する前の LV の潜時、(b) 提示後の CV の潜時・(c) 継続時間・(d) 主観強度の結果を示している。なお、図中のエラーバーは標準誤差を表す。

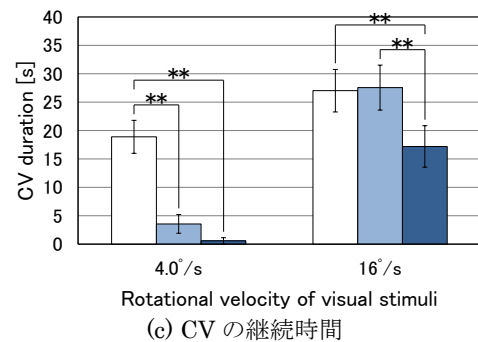
図 6 (a) より、直線運動の速度が上がると LV の潜時が短くなり、t 検定より条件間に有意水準 1% で有意差が認められていることが確認できる。つまり、直線運動の速度が上がると LV を強く知覚していることがわかる。



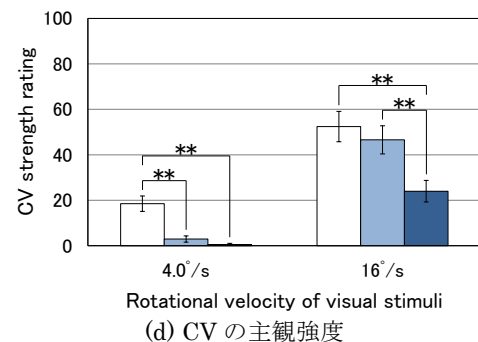
(a) 回転運動を提示する前の LV の潜時



(b) CV の潜時



(c) CV の継続時間



(d) CV の主観強度

図 6 右移動+Pitch 回転における CV 側のデータ

続いて、CV の潜時・継続時間・主観強度に回転運動の速度 (2) × 直線運動の速度 (3) の二元配列の分散分析を行い、すべてにおいて有意差 1% で交互作用が認められた。そこで、各直線運動の速度における回転運動の速度の単純主効果の検定を行ったところ、潜時と継続時間については 0.0m/s において有意水準 5% で、1.0m/s と 4.0m/s において有意水準 1% で有意差を確認した。主観強度については、

すべての条件において有意水準 1%で有意差を確認した。また、各回転運動の速度における直線運動の速度の単純主効果は、潜時の 16°/s においては有意水準 10%で有意傾向に留まったが、それ以外において有意水準 1%で有意差が見られた。ここで、具体的にどの条件間に有意差があるのかを確認するために、下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行い、確認された有意差を図中に記載した。

図 6 (b)(c)(d) より、直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少することが読み取れる。そして、図 6 (b)(c) より、回転運動の速度が上がると条件間の差が減少していることから、回転運動の速度が上がると直線運動が CV に与える影響力が減少することがわかる。これらの結果を合わせて考えると、LV 強度が減少するにつれて CV 強度が増加することを示しており、回転運動の速度が上がるほど、直線運動の速度が CV に与える影響力が弱まる傾向を確認した。

6. 実験 2-b : 右移動と Pitch 回転において直線運動と回転運動の速度が LV に与える影響の分析

6.1 実験目的

実験 2-a より、右移動の LV と Pitch 回転の CV を知覚する条件下においても、直線運動の速度が上がるほど CV 強度が減少することを確認した。そこで、実験 2-b では、直線運動の速度が上がるほど LV 強度が増加するのか、また、回転運動の速度が上がるほど LV 強度が減少するのか明らかにする。これにより、右移動の LV と Pitch 回転の CV を同時に知覚した際の LV 側の知見を得て、LV と CV の関係について分析する。

6.2 実験方法・条件・手順

実験方法・実験条件・実験手順は、実験 1-b と同様である。つまり、直線運動を提示する前の CV の潜時と、直線運動と回転運動の両方を提示した際の LV の潜時・継続時間・主観強度を用いて LV について分析する。

使用する視覚刺激の直線運動の速度は 4.0m/s, 16m/s の 2 段階とし、回転運動の速度は 0.0°/s, 4.0°/s, 16°/s の 3 段階とする。また、視覚刺激の提示パターンは、表 2 に示す 6 通りである。また、1 人あたりの試行回数は、実験 1-a と同様の 18 試行である。

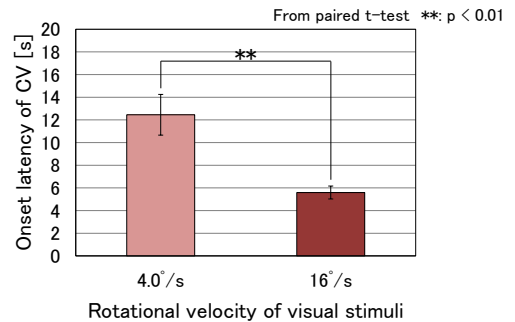
なお、被験者は、実験 2-a と同様の成人 8 名である。

6.3 実験結果・考察

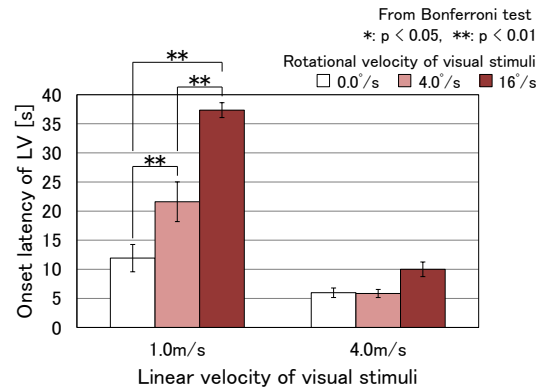
図 7 は、(a) 直線運動を提示する前の CV の潜時、(b) 提示後の LV の潜時・(c) 継続時間・(d) 主観強度の結果を示している。なお、図中のエラーバーは標準誤差を表す。

図 7 (a) より、回転運動の速度が上がるほど、CV の潜時が短くなり、t 検定より条件間に有意水準 1%で有意差が認められていることが確認できる。つまり、回転運動の速度が上がると CV を強く知覚していることがわかる。

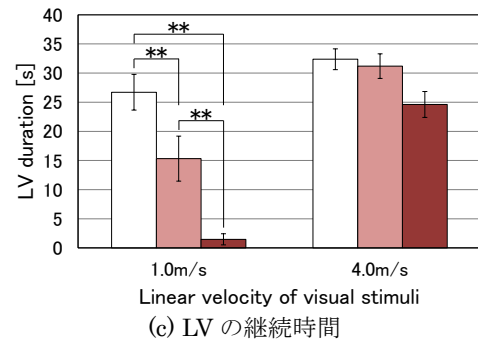
続いて、LV の潜時・継続時間・主観強度に直線運動の速度 (2)×回転運動の速度 (3) の二元配列の分散分析を行い、



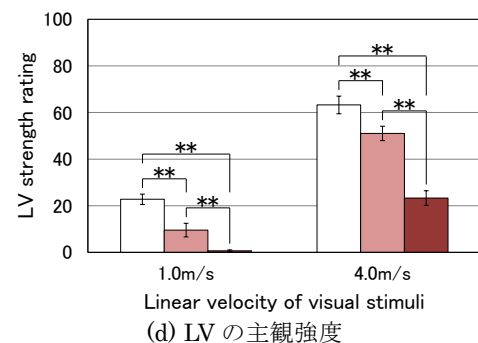
(a) 直線運動を提示する前の CV の潜時



(b) LV の潜時



(c) LV の継続時間



(d) LV の主観強度

図 7 右移動+Pitch 回転における LV 側のデータ

すべてにおいて有意差 1%で交互作用が認められた。そこで、各回転運動の速度における直線運動の速度の単純主効果の検定を行ったところ、潜時については 0.0°/s において有意水準 5%で、4.0°/s と 16°/s において有意水準 1%で有意差を確認した。継続時間については 0.0° において有意水準 10%で有意傾向に留まったが、4.0°/s と 16°/s において有意水準 1%で有意差を確認した。主観強度についてはすべて

の条件において有意水準1%で有意差を確認した。また、各直線運動の速度における回転運動の速度の単純主効果は、潜時と継続時間の4.0m/sにおいては有意水準10%で有意傾向に留まったが、それ以外の条件において有意水準1%で有意差が見られた。ここで、具体的にどの条件間に有意差があるのかを確認するために、下位検定として Bonferroni 法を用いて多重比較を行い、確認された有意差を図中に記載した。

図 7 (b)(c)(d) より、回転運動の速度が上がるほど LV 強度が減少することが読み取れる。そして、図 7 (b)(c) より、直線運動の速度が上がると条件間の差が減少していることから、直線運動の速度が上がると回転運動が LV に与える影響力が減少することがわかる。これらの結果を合わせて考えると、CV 強度が減少するにつれて LV 強度が増加することを示しており、直線運動の速度が上がるほど、回転運動の速度が LV に与える影響力が弱まる傾向を確認した。これらは、他の運動方向における実験結果と同様の傾向である。つまり、実験 2 の結果を合わせると、右移動の LV と Pitch 回転の CV を知覚する条件下においても、LV と CV の関係は負の相関関係であることを明らかにした。

以上のことから、総じて、運動方向を変えた場合においても、LV 強度と CV 強度の知覚に負の相関関係が成り立つことを確認した。これは、どのような運動方向においても、片方の運動感覚が強くなるともう一方が弱くなることを示す結果である。この原因として、人間が錯覚によって得られる感覚の強さには限界があることから、感じ方が異なる運動方向においても負の相関関係が成り立つと考えられる。

7. むすび

我々の先行研究 [6] において、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件下で、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を確認した。つまり、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件において、LV 強度と CV 強度が負の相関関係であることを示した。しかし、他の直線方向と回転方向の組み合わせによっては、この結果とは異なる可能性が考えられる。そこで本稿では、直線と回転の運動方向を変更した場合に、直線運動と回転運動の速度が LV と CV の双方に与える影響について確認し、LV と CV の関係について分析した。

実験 1 では、下降の LV と Yaw 回転の CV を知覚する運動方向に着目し、LV と CV の関係について分析した。結果として、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を確認した。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を確認した。このとき、前進の LV と Roll 回転の CV を知覚する条件下では得られていないコメントがあった。しかし、これは視覚刺激の見え方が異なるため

のものであり、LV 強度と CV 強度の関係は運動方向が異なった場合においても、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることを示した。

実験 2 では、右移動の LV と Pitch 回転の CV を知覚する条件に着目し、LV と CV の関係について分析した。結果として、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を確認した。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を確認した。これらの結果より、直線と回転の運動方向が異なった場合においても、LV 強度と CV 強度が負の相関関係にあることを示した。

参考文献

- [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, 2015.
- [2] M. H. Fischer and A. E. Kormmüller: "Optokinetisch ausgelöste bewegungswahrnehmung und optokinetischer nystagmus," *Journal für Psychologie und Neurologie*, Vol. 41, pp. 273 - 308, 1930.
- [3] 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.
- [4] J. Kim and Sieu: "A new spin on vection in depth," *Journal of Vision*, Vol. 14, No. 5, pp. 1 - 10, 2014.
- [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] 古賀宥摩, 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] T. Brandt, J. Dichgans, and E. Koenig: "Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception," *Experimental Brain Research*, Vol. 16, Issue. 5, pp. 476 - 491, 1973.
- [8] Y. Seya, T. Tsuji, and H. Shinoda: "Effect of depth order on linear vection with optical flows," *i-Perception*, Vol. 5, No. 7, pp. 630 - 640, 2014.
- [9] 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.
- [10] I. P. Howard and T. Heckmann: "Circular vection as a function of the relative sizes, distances, and positions of two competing visual displays," *Perception*, Vol. 18, No. 5, pp. 657 - 665, 1989.
- [11] 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.
- [12] 妹尾武治, 永田喜子: "没入傾向とベクション強度は相関するのか? 没入感に関する挑戦研究", 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.