

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

松田あゆみ^{†1} 萩原息吹^{†2} 松室美紀^{†2} 柴田史久^{†1} 木村朝子^{†1}

概要：視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) 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、LV と CV を同時に引き起こす、回転しながら直進、つまり、スパイラル運動する視覚刺激を用いて、LV 強度と CV 強度を測定した。その結果、LV 強度と CV 強度は互いに影響し合い、その関係は負の相関関係であることを示した。そこで、本研究では、直進運動をする視覚刺激と回転運動をする視覚刺激を同時に提示し、LV 強度と CV 強度に先行研究と同様の傾向が得られるか分析した。結果、その強さに違いはあるものの、先行研究と同様の負の相関関係があることを明らかにした。さらに、同様の視覚刺激を観察させ、主観的な速度を回答させたところ、ベクション強度において観察された負の相関関係は生じなかった。このことから、ベクション強度において負の相関関係が生じたのは、2種類の運動の相互作用によって知覚される速さが変化したためではないことが示された。

キーワード：視覚誘導性自己運動感覚、直線ベクション、回転ベクション、Head Mounted Display

1. はじめに

視覚誘導性自己運動感覚 (ベクション) とは、一様に運動する視覚刺激を観察することで生起する運動感覚のことである [1,2]。例えば、止まっている電車の中で、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こともある [3]。この現象をベクションと呼び、視覚刺激の移動方向とは逆方向の運動感覚が発生する。

ベクションは発生する運動方向によって、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 [4]。さらに、それらを合成した回転しながら直進 (以下、スパイラル運動) する視覚刺激を提示した際に引き起こされるベクションに着目した研究もある [5-7]。例えば、Palmisano ら [5] は直線運動、回転運動、スパイラル運動をする視覚刺激の提示方法による影響を検討した。

我々は、スパイラル運動する視覚刺激で生起する LV と CV の強度の関係を分析してきた [8,9]。結果、直進速度と回転速度のどちらか一方が上がるにつれ、対応するベクション強度が増加し、もう一方が減少する、つまり、LV 強度と CV 強度が負の相関関係であることを明らかにした。

一方、ベクション研究の中には、異なる直線運動成分、もしくは回転運動成分を持つ視覚刺激を混在して提示した研究もある [10-12]。川島ら [10] は、直進速度の異なる2種類の刺激を同時に提示した際の LV について検討した。その結果、刺激の速度差が小さい場合は、2つの平均速度の視覚刺激を観察した際と同等の LV が知覚されること、そして、刺激の速度差が大きい場合は、低速の刺激が提示された際と同等の LV が知覚されることを示した。

本稿では、直線運動をする刺激と回転運動をする刺激の2種類を同時に提示する視覚刺激 (以降、直線と回転が混在する視覚刺激) における、LV と CV の関係について検討する。2つの運動方向を合成するとスパイラル運動となるため、我々の先行研究同様、LV と CV の強度の間に負の相関関係が成り立つ可能性がある。一方で、川島らの研究に基づくと、2つの運動は独立に処理され、注意を向けた方向のベクションしか生じない可能性もある。この場合、負の相関関係は成り立たないであろう。まずは先行研究同様 [8]、前進 LV と Roll 回転 CV から検討を開始する。

2. 実験準備

2.1 Head Mounted Display

実験では視覚刺激の提示に使用する Head Mounted Display (HMD) として、Oculus 社の Quest を採用した。Quest は、110度という比較的に広範な視野角を有する。また、映像の生成には、ゲームエンジン Unity を利用し、Quest と Unity を連携することで映像提示を行う。

2.2 視覚刺激

視覚刺激として、図1に示したようなランダムドットのフローを使用した。ベクション強度には観察者から刺激までの距離である奥行き情報が影響することがわかっている [5,13]。そのため、刺激の奥行き情報を統一する必要がある。そこで、十分に長い円筒形の仮想物体 (直径 6.0m) の内側に白色 (10.2cd/m²) のランダムドットのテクスチャをマッピングし、その内部に観測者の視点位置を置くことにより、ドットが観察者の位置から等距離となるようにした。

直線運動と回転運動の2種類の視覚刺激を提示するため、2つの円筒形を用意する。この2つの円筒形を同位置に配置し、それぞれ水平移動および回転運動をさせることで、直線運動と回転運動が混在する映像を生成する。視覚刺激の直線の移動方向は参加者に対して後退方向とし、回転方向は直線の移動方向に対して時計回り (Roll 回転) とした。すなわち、参加者は前進の LV と反時計回りの CV を知覚

^{†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 情報理工学部
College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

する。また、背景を生成するため、2つの円筒形に十分に長い黒色 (0.74cd/m^2) の円筒形 (直径 6.1m) を重ねた。

視覚刺激は、黒色の一様背景に白色のドットで構成している。ドットの量は、運動方向にかかわらず全てのドットを合わせた際に白色の占める密度が全体の 20%となるように設定した。また、円筒形の中心に視線方向を固定するため赤色の注視点を設けた。

3. 実験 1: LV 強度と CV 強度の関係の分析

3.1 目的

視覚刺激の直進速度と回転速度が LV 強度と CV 強度に与える影響を観測し、これら 2つのベクションの関係について分析する。

実験 1a では、視覚刺激の直進速度と回転速度を変化させた場合の LV 強度を測定し、実験 1b では、CV 強度を測定する。そして、実験 1a, 1b より LV 強度と CV 強度が互いに影響し合うのかについて分析し、直線と回転が混在する視覚刺激でも負の相関関係が成り立つかを確認する。

3.2 評価方法

ベクション強度を評価する方法として、我々の先行研究 [8,9] 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、100Hz で安定してデータの送受信ができることを確認した。主観強度においては、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 段階で強度値を回答させた。

3.3 条件

視覚刺激の直進速度と回転速度を操作した。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 4.0m/s, 8.0m/s, 16m/s の 3 段階とし、回転速度を 4.0°/s, 8.0°/s, 16°/s の 3 段階とした。直線と回転が混在する

視覚刺激の提示パターンは、3 (直進速度) × 3 (回転速度) の 9 条件である。そして、実験 1a では直線運動のみの視覚刺激を提示し、直進速度を変更する 3 条件を、実験 1b では回転運動のみの視覚刺激を提示し、回転速度を変更する 3 条件を加えた。つまり、実験 1a, 1b の全提示パターンはそれぞれ $9 + 3$ (直線のみ, または回転のみ) = 12 通りである。

3.4 手続き

実験 1a では、参加者は、直線と回転が混在する視覚刺激を観察した際に引き起こされる LV 強度を評価した。実験中、参加者は指定された着座姿勢を維持した状態で評価を行なった (図 2)。自身が前方へと移動しているように感じている間、同時に回転運動を感じているかどうかに関わらず、手元のボタンを押し続けさせた。視覚刺激の提示からボタンが押されるまでの時間を潜時、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を継続時間とした。そして、40 秒後に画面を暗転し、LV の主観強度を回答させた。以上を 1 試行とし、各提示パターンにつき 3 試行、参加者 1 人あたり $12 \times 3 = 36$ 試行を行わせた。

実験 1b では、参加者に直線と回転が混在する視覚刺激を観察した際に引き起こされる CV 強度を評価させた。実験 1a と同様の手続きで、CV の潜時、継続時間、主観強度を測定した。

実験 1 は、 $36 \times 2 = 72$ 試行を 2 日に分けて行った。

3.5 参加者

成人男性 13 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。

3.6 結果

3.6.1 実験 1a

図 3 は、直線運動のみの視覚刺激を提示した際の (a) LV の潜時、(b) 継続時間、(c) 主観強度を示す。それぞれに対して、参加者内分散分析を行った結果、主観強度では直進速度の主効果が有意であった ($F_{(2,24)} = 10.244, p < .001$)。そこで多重比較を行い、有意な差異があったペアを図中に記載した。検定の結果とグラフの傾向より、視覚刺激の直進速度が上がるほど LV の主観強度が増加し、LV 強度が増加したことが示された。一方、潜時と継続時間では直進速度の主効果

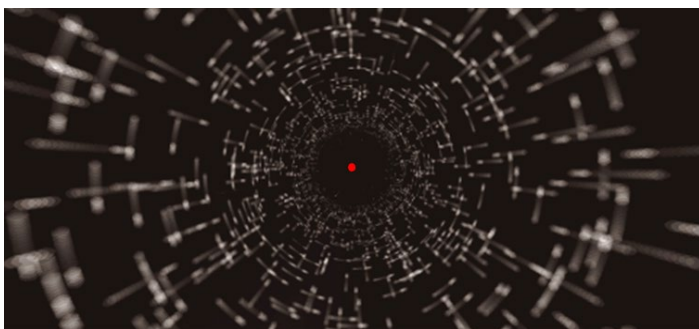


図 1 視覚刺激のイメージ

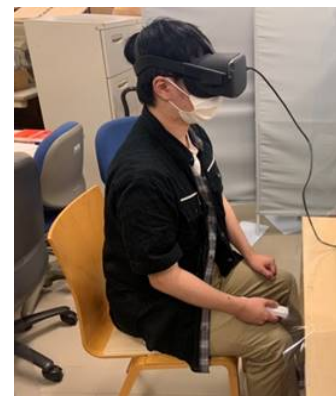


図 2 実験のイメージ

は有意でなかった (潜時: $F_{(2,24)} = 0.810, p = .457$, 継続時間: $F_{(2,24)} = 1.178, p = .190$). これは, 4.0m/s 条件で既に潜時は十分に短く, 継続時間は十分に長かったためだと考えられる.

図 4 は, 直線と回転が混在する視覚刺激を提示した際の (a) LV の潜時, (b) 継続時間, (c) 主観強度を示す. それぞれに対して, 直進速度 (3) × 回転速度 (3) の参加者内分散分析を行った. その結果, LV の潜時, 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: $F_{(2,24)} = 28.919, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,24)} = 36.836, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,24)} = 72.183, p < .001$) が有意であった. 回転速度の主効果は, 潜時, 継続時間では有意であったが (潜時: $F_{(2,24)} = 5.648, p = .001$, 継続時間: $F_{(2,24)} = 4.252, p = .026$), 主観強度では有意でなかった ($F_{(2,24)} = 1.945, p = .165$). 交互作用は, 継続時間は有意であったが ($F_{(4,48)} = 2.569, p = .050$), 潜時では有意傾向 ($F_{(4,48)} = 2.184, p = .085$), 主観強度では有意でなかった ($F_{(4,48)} = 1.286, p = .289$).

LV の継続時間において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, 直進速度の単純主効果はすべての回転速度で有意であった ($F_{(2,72)} \geq 8.059, ps < .001$). 回転の単純主効果は, 直進速度 4.0m/s のときのみ有意であった ($F_{(2,72)} = 8.444, p < .001$). 今回は, 回転速度が LV に与える影響に着目しているため, 回転速度の効果の多重比較結果のみを図中 (図 4 (b)) に記載した. これより, 低速 (4.0m/s) の直進速度では回転速度が上がると, LV 強度が減少したことがわかる.

次に, 前述の通り, 回転速度の影響に着目しているため, 回転速度の主効果に関して, さらに分析を行った. 潜時は回転速度が 4.0°/s のとき, 他の速度より有意に短く ($ps < .050$), 8.0°/s と 16°/s の差は有意ではなかった. 各指標の

検定の結果およびグラフの傾向から, 回転速度が上がることにより, LV 強度が減少していたことが示される.

3.6.2 実験 1b

図 5 は, 回転運動のみの視覚刺激を提示した際の (a) CV の潜時, (b) 継続時間, (c) 主観強度を示す. それぞれに対して参加者内分散分析を行った結果, 回転速度の主効果が有意であった (潜時: $F_{(2,24)} = 41.919, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,24)} = 40.153, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,24)} = 41.919, p < .001$). そこで多重比較を行い, 有意な差異があったペアを図中に記載した. 図 5 より, 視覚刺激の回転速度が上がるほど CV の潜時は減少, 継続時間と主観強度は増加している, つまり CV 強度が増加したことが示された.

図 6 は, 直線と回転が混在する視覚刺激を提示した際の (a) CV の潜時, (b) 継続時間, (c) 主観強度を示す. それぞれに対して, 直進速度 (3) × 回転速度 (3) の参加者内分散分析を行った. その結果 CV の潜時, 継続時間, 主観強度のすべてにおいて, 回転速度の主効果 (潜時: $F_{(2,24)} = 17.067, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,24)} = 27.427, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,24)} = 39.370, p < .001$) が有意であったが, 交互作用 (潜時: $F_{(4,48)} = .345, p = .846$, 継続時間: $F_{(4,48)} = .321, p = .863$, 主観強度: $F_{(4,48)} = 1.932, p = .120$) は有意でなかった. 直進速度の主効果は, 潜時, 主観強度では有意であったが (潜時: $F_{(2,24)} = 5.142, p = .014$, 主観強度: $F_{(2,24)} = 4.456, p = .023$), 継続時間では有意でなかった ($F_{(2,24)} = 2.033, p = .153$).

交互作用が有意ではなく, 回転の主効果が有意であった CV の潜時, 主観強度への直進速度の影響を調べるため, さらに分析をおこなった. 潜時は, 直進速度が 4.0m/s のとき 16m/s より有意に短く ($p < .050$), 8.0m/s は 16m/s より短い傾向 ($p < .100$) であったが, 4.0m/s と 8.0m/s の差は有

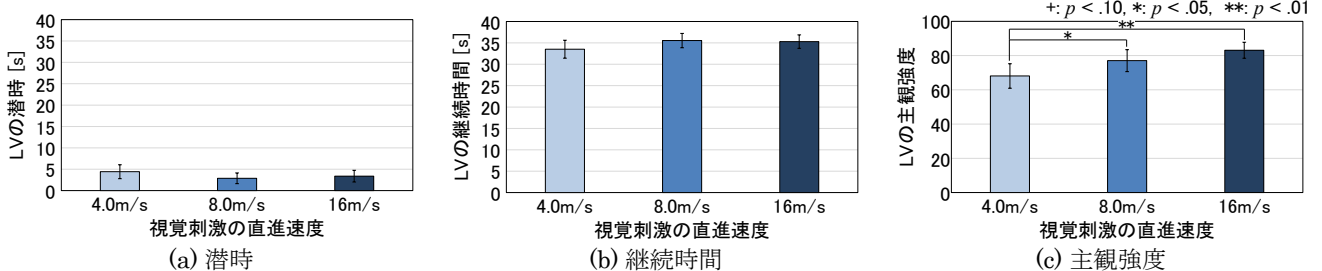


図 3 LV 強度と直進速度の関係 (直線運動のみの視覚刺激を観察した場合)

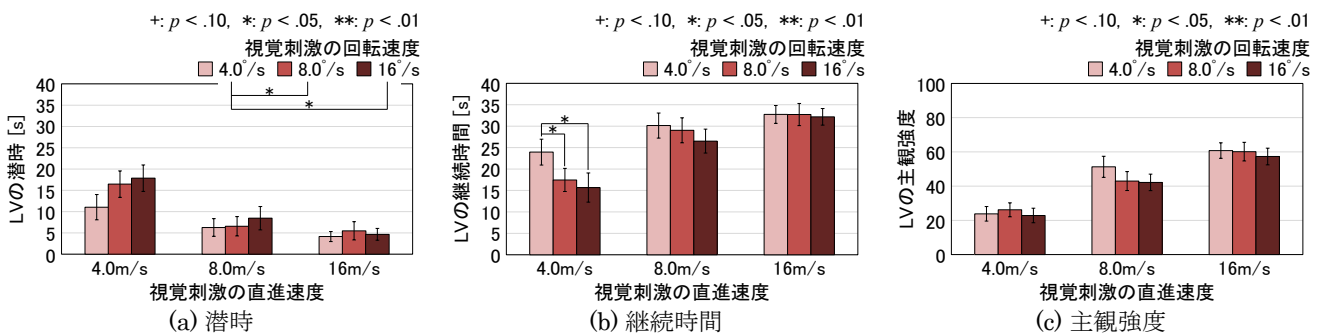


図 4 LV 強度と各運動速度の関係 (直線と回転が混在する視覚刺激を観察した場合)

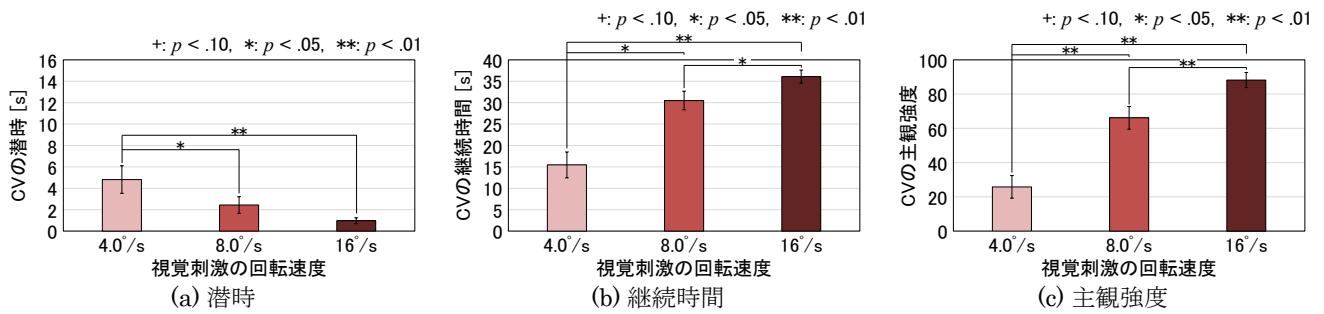


図 5 CV 強度と回転速度の関係 (回転運動のみの視覚刺激を観察した場合)

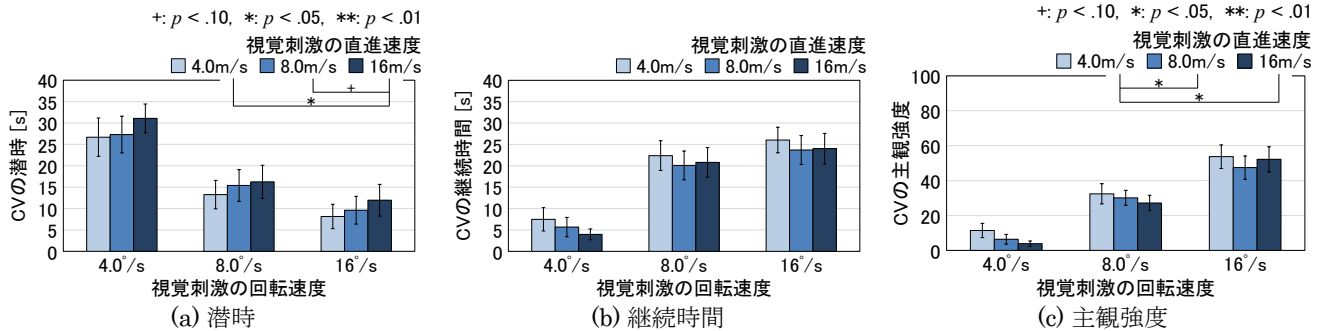


図 6 CV 強度と各運動速度の関係 (直線と回転が混在する視覚刺激を観察した場合)

意ではなかった。主観強度は、直進速度が 4.0m/s のとき、他の速度より有意に高い ($ps < .050$) が、8.0m/s と 16m/s の差は有意ではなかった。これより、直進速度が上がるにつれて、CV 強度は減少することが示された。しかし、継続時間ではこの傾向を確認することができなかった。以上から、継続時間では明確な差異が現れなかったものの、検定の結果やグラフの傾向から、直進速度が上がるにつれ、CV 強度が減少していたことが示される。

3.7 考察

実験 1a より、直進速度が上がるにつれて LV 強度が増加すること、実験 1b より、直進速度が上がるにつれて CV 強度が減少することが示された (図 3, 図 6)。また、回転速度が上がるにつれて LV 強度が減少し、CV 強度が増加することを明らかにした (図 4, 図 5)。これらの結果を合わせて考えると、直線と回転が混在する視覚刺激を観察するとき、CV 強度が増加するほど LV 強度が減少し、LV 強度が増加するほど CV 強度が減少することを表している。すなわち、LV 強度と CV 強度は互いに影響し合い、その関係は負の相関関係にあることを示した。

続いて、スパイラル運動する視覚刺激を用いて同様の実験を行った先行研究 [8] の結果と比較する。回転運動のみを提示した際の CV 潜時に関しては大きな差は見られなかった (図 5)。しかし、直線運動のみを提示した際の LV 潜時は、先行研究に比べると、本研究では全体的には短く、さらに、先行研究で見られた直進速度の影響も観察されなかった。つまり直進速度に関わらず、全体的に LV 強度が強いという結果となった (図 3)。

また、先行研究のスパイラル運動する視覚刺激での LV

強度と本研究の直線と回転が混在する視覚刺激での LV 強度に関しては、大きな差異はない (図 4)。しかし、CV 強度に関しては、先行研究に比べ、全体的に弱かった (図 6)。これは、LV を強く知覚したため CV を知覚することが困難であったためであると考えられる。

LV を強く知覚した理由として、実験環境の違いが考えられる。先行研究では、広視野ディスプレイシステムを用いたのに対し、本実験では HMD を用いて視覚刺激を提示している。広視野ディスプレイシステムで刺激を観察する場合、視野領域の一部には地面が見えおり、そこにはドットが提示されていなかった。また、HMD に比べ、ディスプレイ、つまり刺激との距離が遠く (最長 6m)、刺激が自身の方へ向かってくる感覚が弱かったと考えられる。さらに、参加者は、先行研究では広視野ディスプレイシステム内を直立姿勢で視覚刺激を観察したのに対し、本実験では HMD を被り着座姿勢で観察している。直立姿勢では、ベクション知覚によって身体が動くのを崩すのを防ぐため、身体のバランスを保つことに注意が向けられ、刺激の処理への注意配分が少なくなった可能性が考えられる。そのため、視覚刺激の観察に十分意識を向けることができる着座姿勢では強くベクション知覚したのではないかと考える。これらに関しては、さらなる検討が必要である。

以上の差異はあるものの、直線と回転が混在する視覚刺激を用いた本実験においても、先行研究と同様に負の相関関係が生じた。その理由として、混在する視覚刺激から直線運動と回転運動それぞれの速度を正確に知覚することが困難であった可能性がある。つまり、一方の速度が増加したことにより、もう一方の速度が遅くなったように知覚し

てしまい、LV 強度と CV 強度の間に負の相関が生じたと考えられる。この点に関して、続く実験 2 で検討を行う。

4. 実験 2: 視覚刺激で知覚する主観速度の分析

4.1 目的

実験 2 では、視覚刺激から直線運動と回転運動の速度を正確に知覚可能か、つまり、一方の運動の速度の変化が、もう一方の運動の速さの知覚に影響していないか分析を行う。そのため、参加者の直進速度、回転速度の主観的な速度（主観速度）を測定する

4.2 評価方法

主観速度を評価する方法として、マグニチュード推定法 [14] を採用した。実験では、まず参加者に基準刺激を提示し、直線ドットと回転ドットの移動速度を覚えさせる。このときに覚えた移動速度が基準となる。次に、評価刺激を提示し、そのとき知覚したドットの移動速度を、基準刺激を 100 とした場合の数値で回答させる。例えば、評価刺激が基準刺激の 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、というように回答させる。また、刺激が止まっているように感じた場合は 0 と回答させる。このとき、得られた評価値をフェヒナーの法則 [14] に基づき、対数変換を行い、比例尺度を得た。

4.3 条件

実験 2 では、基準刺激と評価刺激の 2 種類を用意した。基準刺激は、直進速度を 8.0m/s、回転速度を 8.0°/s とした直線と回転が混在する視覚刺激である。また、評価刺激は、複数の直進速度と回転速度を組み合わせた直線と回転が混在する視覚刺激である。直進速度を 4.0m/s、8.0m/s、16m/s の 3 段階とし、回転速度を 4.0°/s、8.0°/s、16°/s の 3 段階とした、3（直進速度）× 3（回転速度）の 9 通りである。

4.4 手続き

実験参加者にはまず、基準刺激を 15 秒間提示した。その後画面を 5 秒間暗転し、評価刺激を提示した。そして、15 秒後に画面を暗転させ、基準刺激に対して評価刺激の直進速度、回転速度がどの程度であったかをそれぞれ回答させた。参加者の姿勢は実験 1 と同様である。

以上を 1 試行とし、各提示パターンにつき 3 試行、参加者 1 人あたり 9 × 3 = 27 試行を行わせた。実験は、提示パターン 9 試行ごとに 3 日に分けて行った。

4.5 参加者

実験 1 とは異なる成人男性 13 名が実験 2 に参加した。矯正を含め、全員が正常視力を有した。

4.6 結果

4.6.1 直線速度

図 7 は、直線と回転が混在する視覚刺激を提示した際の直進の対数変換後の評価値、すなわち主観速度を示す。図 7 (a) は直進速度を横軸、回転速度を凡例とし、図 7 (b) は、同じ

データで回転速度を横軸、直進速度を凡例としている。直進速度 (3) × 回転速度 (3) の参加者内分散分析を行った。その結果、直進速度の主効果は有意であったが ($F_{(2,24)} = 167.007, p < .001$), 回転速度の主効果は有意傾向 ($F_{(2,24)} = 3.171, p = .060$), 交互作用は有意でなかった ($F_{(4,48)} = 0.120, p = .975$).

本実験は一方の運動をする刺激の他方の運動の主観速度への影響を検討対象としているため、有意傾向ではあったが、直進の主観速度への回転速度の影響を調べるためさらに分析を行った。その結果、4.0°/s における主観速度は 8.0°/s より遅い傾向があったが ($p < .100$), その他のペアの差は有意でなかった。これより、回転速度が変化しても直進の主観速度は影響されなかったことが示される。

次に、直進の主観速度への直進速度の影響を調べるためさらに分析を行った結果、すべてのペアの差が有意であった ($ps < .010$). つまり、直進速度が上がるにつれて、直進の主観速度は増加した。

以上より、直進の主観速度は直進速度が上がるにつれて増加するが、回転速度の影響は受けないことが明らかとなった。また、正確に直進速度を知覚することができていれば、直進の主観速度は 4.0m/s では 1.7, 8.0m/s では 2, 16m/s では 2.3 となる。実験結果の直進の主観速度は、直進速度が 8.0m/s の時は基準値の 2 に非常に近く、直進速度が 4.0m/s の時は 1.7 に近い値となった。しかし、直進速度が 16m/s は、2.3 よりも 0.1 以上小さい値となった。これより、直進速度は、概ね正確に知覚することができるが高速の直進速度では遅く知覚しやすいことが示される。

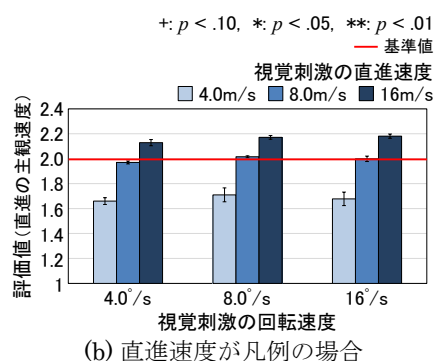
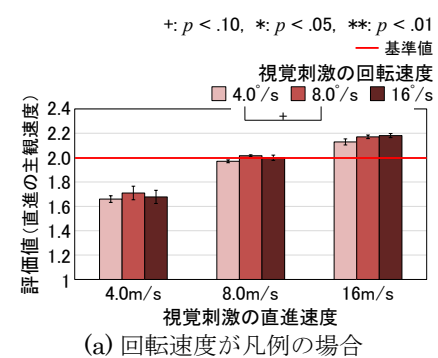


図 7 視覚刺激の速度と直進の主観速度の関係

4.6.2 回転速度

図 8 は、直線と回転が混在する視覚刺激を提示した際の回転の対数変換後の評価値、すなわち主観速度を示す。図 8 (a) は直進速度を横軸、回転速度を凡例とし、図 8 (b) は、同じデータで回転速度を横軸、直進速度を凡例としている。直進速度 (3) × 回転速度 (3) の参加者内分散分析を行った。その結果、直進速度の主効果は有意でなかったが ($F_{(2,24)} = 1.256, p = .303$), 回転速度の主効果 ($F_{(2,24)} = 34.842, p < .001$) と、交互作用 ($F_{(4,48)} = 5.464, p = .001$) は有意であった。

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。回転速度に着目し検定を行った結果、全ての直進速度で回転速度の単純主効果が有意であった (4.0m/s: $F_{(2,72)} = 10.099, p < .001$, 8.0m/s: $F_{(2,72)} = 30.751, p < .001$, 16m/s: $F_{(2,72)} = 35.929, p < .001$)。多重比較の結果を図 8 (a) に記載する。グラフの傾向と合わせ、回転速度が上がるにつれて回転の主観速度は増加したことがわかる。

次に、直進速度に着目した結果、回転速度 4.0°/s のみ直進速度の単純主効果が有意であった ($F_{(2,72)} = 11.045, p < .001$)。多重比較の結果を図 8 (b) に記載する。これより、低速 (4.0°/s) の回転速度では直進速度が上がるにつれて回転の主観速度は減少した。

以上から、回転の主観速度は回転速度が上がるにつれて増加するが、低速 (4.0°/s) の回転速度の場合を除いて直進速度の影響は受けないことが示される。また、正確に回転速度を知覚することができていれば、回転の主観速度は 4.0°/s で 1.7, 8.0°/s で 2, 16°/s では 2.3 となる。実験結果の回転の主観速度は、回転速度が 8.0°/s の時は 2 に近いが、

回転速度が 16°/s の時は 2.3 よりも 0.1 以上小さい値となった。さらに、回転速度が 4.0°/s の時は直進速度が上がるにつれて 1.7 よりも小さな値となった。これは、8.0m/s×4.0°/s では 2 名、16m/s×4.0°/s では 3 名が、回転自体を知覚しなかったことが影響を与えた可能性が考えられる。以上より、回転速度は、8.0°/s では直進速度に関係なく正確に知覚することができるが、16°/s では遅く知覚しやすく、4.0°/s では直進速度の影響を大きく受け正確に知覚できなくなる参加者がいたことが示される。

回転運動を知覚しなかった参加者により、主観速度が影響されてしまった可能性が高いため、それら 3 名の参加者を除いた結果の分析を行う。図 9 は、図 8 から回転を知覚しなかった参加者データを除いた場合の回転の主観速度を示す。これに対して、直進速度 (3) × 回転速度 (3) の参加者内分散分析を行った。その結果、回転速度の主効果は有意であったが ($F_{(2,16)} = 67.617, p < .001$), 直進速度の主効果は有意でなく ($F_{(2,16)} = .126, p = .882$), 交互作用は有意傾向であった ($F_{(4,32)} = 2.589, p = .055$)。

回転の主観速度への回転速度の影響を調べるためさらに分析を行った結果、すべてのペアの差が有意であった ($ps < .010$)。つまり、回転速度が上がるにつれて、回転の主観速度は増加した。また、低速回転 (4.0°/s) における、8.0m/s, 16m/s 条件では、図 8 に比べ 1.7 に近い値となっているが、やはり 1.7 よりも小さな値となっている。これより、回転運動を知覚しなかった参加者を除くと、回転速度が低速である場合の主観速度がやや上昇するものの、依然として、特に直進速度が速いとき、低速の回転運動を正確に知覚するのが困難であると言える。

4.7 考察

実験 2 の結果より、直進の主観速度は、視覚刺激の直進速度と回転速度が変化しても概ね正しく知覚できることが明らかになった。それに対し、回転の主観速度は、概ね正しく知覚することができるが、回転速度が低速の状態でも直進速度が増加すると正しく知覚できなくなっていった。

これはドットの回転運動そのものが知覚しにくくなったためであると考えられる。13 名中 3 名の参加者では回転運動を知覚できない試行があった。さらに、多くの参加者が「回転ドットが逆方向に動いているように感じた」とコメントした。過去のベクション研究 [15] では、複数の視覚刺激を同時に提示した際に、視覚刺激の移動方向と同方向に自己運動を知覚する「逆転ベクション」が発生するとされている。このコメントはそのような現象と一貫しており、回転運動 (方向) がうまく知覚できず、それが主観速度を遅く評価することへつながったと考えられる。

以上より、低速の回転運動ではその知覚に困難が生じたものの、直線運動と回転運動の速度はそれぞれ他方の運動速度に影響されことなく、概ね正確に知覚されていた。なお、両運動とも高速時には遅く評価されがちであったの

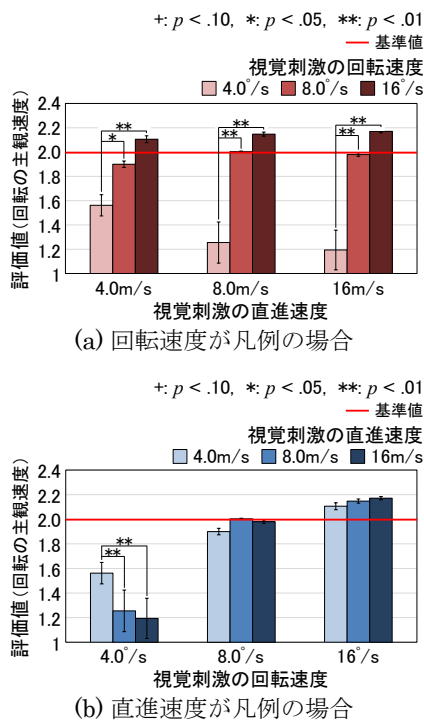


図 8 視覚刺激の速度と回転の主観速度の関係

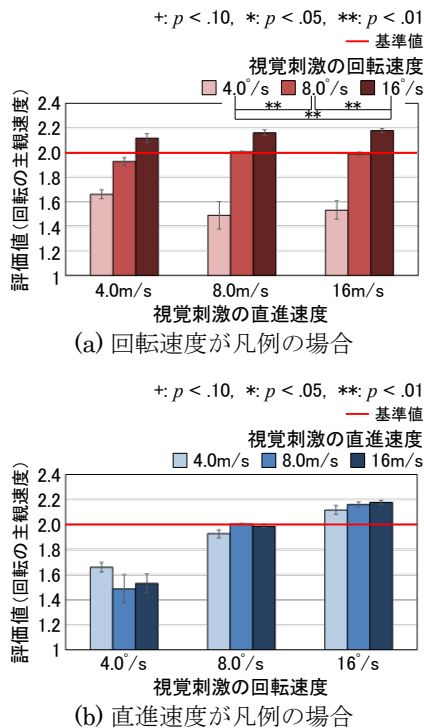


図9 視覚刺激の速度と回転の主観速度の関係
 (回転を知覚しなかった参加者を除いた場合)

は、評価の基準値が100であったため、大きな値の回答を躊躇した可能性がある。

5. 総合考察

我々は、先行研究において、スパイラル運動する視覚刺激の直進速度と回転速度を変更することで、その際に発生するLVとCVの強度を測定した。結果、LV、CV強度は互いに影響し合い、負の相関関係であることを示した。そこで、本稿では、直線と回転が混在する視覚刺激でも同様の傾向を得られるか分析を行った。

実験1では、直線と回転が混在する視覚刺激の各速度を変更し、発生するLV、CV強度を測定し、互いに影響し合うか分析した。その結果、LV強度とCV強度は互いに影響し合い、その関係は負の相関関係にあるという先行研究[8]と同様の知見を得ることができた。また、先行研究に比べ、LVを強く知覚しCVに影響を与えていることが示唆された。

実験2では、参加者が視覚刺激から直線運動と回転運動を正確に知覚でき、一方の運動の速度の変化が、もう一方の運動の速さの知覚に影響していないかを確認するため、直進と回転の主観速度を測定した。その結果、直進の主観速度は、視覚刺激の速度が変化しても概ね正しく知覚できるが、回転の主観速度は、回転速度が低速の状態では直進速度を変化すると正しく知覚できないことが明らかになった。

実験2より、直進速度と回転速度を概ね正確に知覚できていることが示唆された。これより、実験1において生じた負の相関関係は、それぞれの主観速度が他方の運動速度

に影響され変化したためではないことが示された。古賀ら[8]は、刺激の速度と注意の分配の関係を、負の相関関係が生じる原因の他の可能性として挙げている。この点については、今後の検討が必要である。

実験2では、回転速度が低速の状態では、回転の主観速度を遅く知覚する、または知覚できていなかった。多くの参加者が逆方向の回転を知覚し、速度の評価は困難であった。このような回転知覚の難しさが、実験1での回転速度が低速の状態における、非常に低いCV強度につながったと考えられる。川島ら[10]の研究では、刺激に速度差がある場合は、低速の刺激に基づくベクションが知覚されたが、本研究では、高速の直進運動とともに提示された低速の回転運動からはベクションを知覚しにくい結果となった。この結果の差異は、運動方向が同じか直交するかで、視覚刺激の速度の影響が異なる可能性を示唆する。

本研究と先行研究ともに、負の相関関係が発生した。このことは、負の相関が、知覚したスパイラル運動を2つの直交成分に分解することや、直交運動をする刺激がもう一方の刺激の処理の妨害となったことに起因したのではないことを示す。両研究の視覚刺激は、合成方法が異なるが直線成分と回転成分の両方が含まれるという点で共通している。よって、直線成分と回転成分を持つ刺激が存在し、LVとCVの双方を知覚する状況では、負の相関関係が生じると言える。

6. むすび

先行研究では、スパイラル運動する視覚刺激を用い、本稿では、直線と回転が混在する視覚刺激を用いてLVとCVの関係について分析を行った。その結果、どちらの視覚刺激でも、LVとCVの強度は負の相関関係であることを示した。負の相関関係が生じた理由として、主観速度が関係すると考え、検証を行った。しかし、直線と回転が混在する視覚刺激での負の相関関係には主観速度が影響していないことが示された。負の相関関係が生じた理由に関しては、今後さらなる検討が必要である。

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, pp. 1 - 15, 2015.
- [2] J. Dichgans, T. Brandt: "Visual-vestibular interactions: effects on self-motion perception and postural control," *Perception. Handbook of Sensory Physiology*, Vol. 8 (Held, R., Leibowitz, H. W., Teuber, H. L. eds.), Springer, Chap.25, 1978.
- [3] 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.
- [4] M. H. Fischer and A. E. Kornmüller: "Optokinetisch ausgelöste bewegungswahrnehmung und optokinetischer nystagmus," *Journal für Psychologie und Neurologie*, Vol. 41, pp. 273 - 308, 1930.

- [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] S. Pitzalis, S. Sdoia, A. Bultrini, G. Committeri, F. D. Russo, P. Fattori, C. Galletti, and G. Galati: "Selectivity to translational egomotion in human brain motion areas," *PLoS ONE*, Vol. 8, Issue. 4, pp. 1 - 13, 2013.
- [7] J. Kim and Sieu: "A new spin on vection in depth," *Journal of Vision*, Vol. 14, No. 5, pp. 1 - 10, 2014.
- [8] 古賀宥摩, 石津航大, 松室美紀, 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", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 24, No. 1, pp. 31-41, 2019.
- [9] 松田あゆみ, 古賀宥摩, 松室美紀, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: "様々な直線運動と回転運動の共存時の視覚誘導性自己運動感覚に関する考察", ヒューマンインタフェース学会論文誌, Vol. 22, No. 2, pp. 101 - 112, 2020.
- [10] 川島祐貴, 福田一帆, 金子寛彦, 内川恵二: "異なった速さを持つ 2 種類のオプティカルフローにより生起するベクションの速さ評価", 視覚の科学, Vol. 33, No. 4, pp. 152 - 163, 2012.
- [11] 伊藤裕之: "ベクション生起の方向選択性", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 9, No. 1, pp. 35 - 40, 2004.
- [12] 寺本渉, 梅村浩之, 渡邊洋, 松岡克典, 喜多伸一: "上/下視野拮抗運動刺激を用いたヴェクションの検討", 電子情報通信学会技術研究報告, Vol. 101, No. 424, pp. 39 - 44, 2001.
- [13] I. P. Howard, 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.
- [14] 犬飼幸男: "感覚計測とデータ処理 (1)", 繊維製品消費科学, Vol. 29, No. 6, PP. 221 - 226, 1988.
- [15] 中村信次: "視覚誘導性自己運動知覚の実験心理学", 北大路書房, p. 169, 2006.