

運動方向の異なる視覚刺激の混在とスパイラル運動をする視覚刺激によるベクション効果の比較

萩原息吹¹ 中村仁一朗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, 運動方向の異なる視覚刺激が混在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, 各々の視覚刺激で 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, HMD を用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合, LV 強度と CV 強度に先行研究と同様の傾向が得られるか確認した. また先行研究との比較を行い, 提示する視覚刺激によるベクション効果の違いを分析した. 結果, 各々の視覚刺激で LV 強度と CV 強度は互いに影響し合い, その関係は先行研究と同様に負の相関関係であることを示した. また, 主観速度を比較することで視覚刺激の違いにより回転運動の見え方に違いが生じることを示した.

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]. この感覚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, 広視野ディスプレイシステムを用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合における 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.

さらに, 我々はその発展研究として HMD を用いて直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激を観察した場合における LV と CV の強度の関係を分析した [10]. 結果, それまでの研究と同様, 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. さらに, その中で, 提示する視覚刺激の違いによるベクション効果の違いを考察した.

しかしながら, スパイラス運動をする刺激は広視野ディスプレイシステムにより提示され [8,9], 2種類の運動方向が混在する刺激は HMD を用いて提示された [10]. そのため, 結果の差異が, 視覚刺激と実験環境のどちらに起因するかを切り分けることが困難であった.

そこで, 本稿では, 視覚刺激の差異による影響のみを調べるため, 実験環境を松田ら [10] と統制し, HMD を用いる. また, 視覚刺激も踏襲し, スパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合における, 前進 LV と Roll 回転 CV を対象としその関係を検討する.

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 [5,11]. 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.

この仮想物体を, 直進および回転運動を同時にさせることで, スパイラル運動を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/m²) の円筒形 (直径 6.1m) を重ねた.

¹ 立命館大学大学院 情報理工学研究所
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

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

視覚刺激の直線運動の速度（直進速度）と回転運動の速度（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、HMD を用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合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の総和（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。スパイラル運動を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

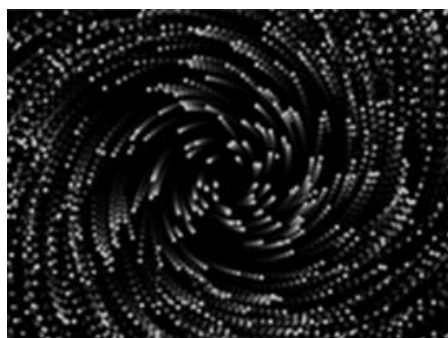


図 1 ランダムドットによる視覚刺激

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（直線運動のみ、または回転運動のみ）= 12 通りである。

3.4 手続き

実験 1a では、参加者は、スパイラル運動を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、同時に自身が回転しているように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、参加者にスパイラル運動を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。12 通りの提示パターンを 1 ブロックとし、実験 1a と 1b を 1 ブロックずつ交互に行った。実験 1a, 1b のどちらを先に行うかはカウンターバランスがとられた。

3.5 参加者

成人男性 11 名と成人女性 3 名の計 14 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、直進速度の主効果が主観強度では有意であったが ($F(2,26) = 70.020, p < .001$)、潜時と継続時間では有意でなかった（潜時： $F(2,26) = 0.746, p = .484$ 、継続時間： $F(2,26) = 0.881, p = .426$ ）。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



図 2 実験の様子

るほど LV の主観強度が増加し、LV 強度が増加したことを示された。しかし、LV の潜時、継続時間では同様の傾向を確認できなかった。これは、4.0m/s の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、スパイラル運動を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、交互作用は、潜時、継続時間では有意であったが (潜時: $F(4,52) = 3.771, p = .009$, 継続時間: $F(4,52) = 3.775, p = .009$)、主観強度では有意ではなかった ($F(4,52) = 0.827, p = .514$)。今回は、回転速度が LV に与える影響に着目しているため、回転速度の単純主効果の分析のみを行った。その結果、潜時、継続時間ともに回転速度の単純主効果は、直進速度 4.0m/s のときのみ有意であった (潜時: $F(2,78) = 14.678, p < .001$, 継続時間: $F(2,78) = 19.325, p < .001$)。多重比較の結果を図中 (図 4 (a), (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。

LV の潜時、継続時間、主観強度のすべてにおいて、直進速度の主効果が有意であった (潜時: $F(2,26) = 9.116, p = .001$, 継続時間: $F(2,26) = 13.654, p < .001$, 主観強度: $F(2,26) = 112.030, p < .001$)。前述の通り、回転速度の影響に着目しているため、直進速度の効果はこれ以上の分析を行わない。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: $F(2,26) = 7.324, p = .003$, 継続時間:

$F(2,26) = 10.907, p < .001$)、主観強度では有意傾向であった ($F(2,26) = 3.207, p = .057$)。交互作用が有意でなかった主観強度での主効果は有意傾向であったものの、その傾向を知るために多重比較を行った。結果を図 4(c)に示す。

各指標の検定の結果およびグラフの傾向を統合すると、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 回は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、全ての指標で回転速度の主効果が有意であった (潜時: $F(2,26) = 14.625, p < .001$, 継続時間: $F(2,26) = 17.656, p < .001$, 主観強度: $F(2,26) = 174.031, p < .001$)。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、視覚刺激の回転速度が上がるほど CV の潜時は減少、CV の継続時間と主観強度が増加し、CV 強度が増加したことを示された。

図 6 は、スパイラル運動を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、直進速度と回転速度の交互作用は、潜時では有意であったが ($F(2,26) = 3.148, p = .022$)、継続時間、主観強度では有意ではなかった (継続時間: $F(2,26) = 1.087, p = .373$, 主観強度: $F(2,26) = 1.062, p = .385$)。今

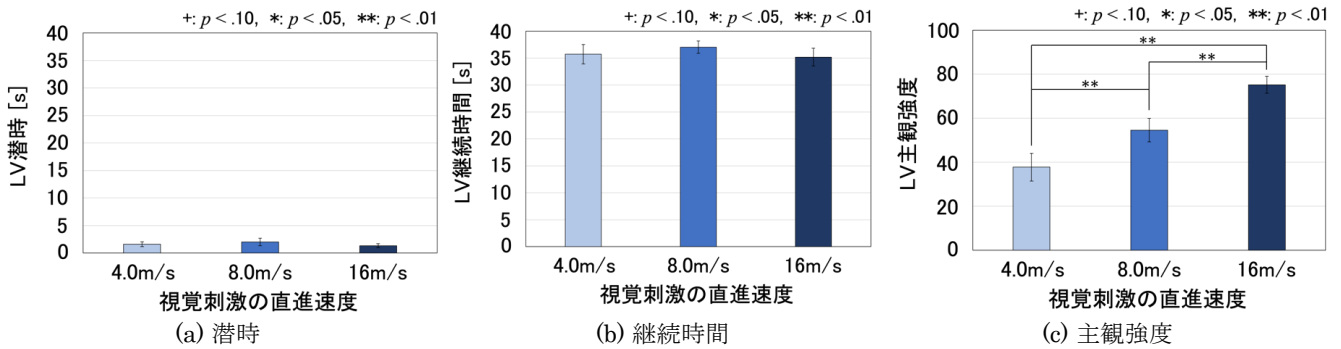


図 3 LV 強度と直進速度の関係 (直線運動のみの視覚刺激を観察した場合)

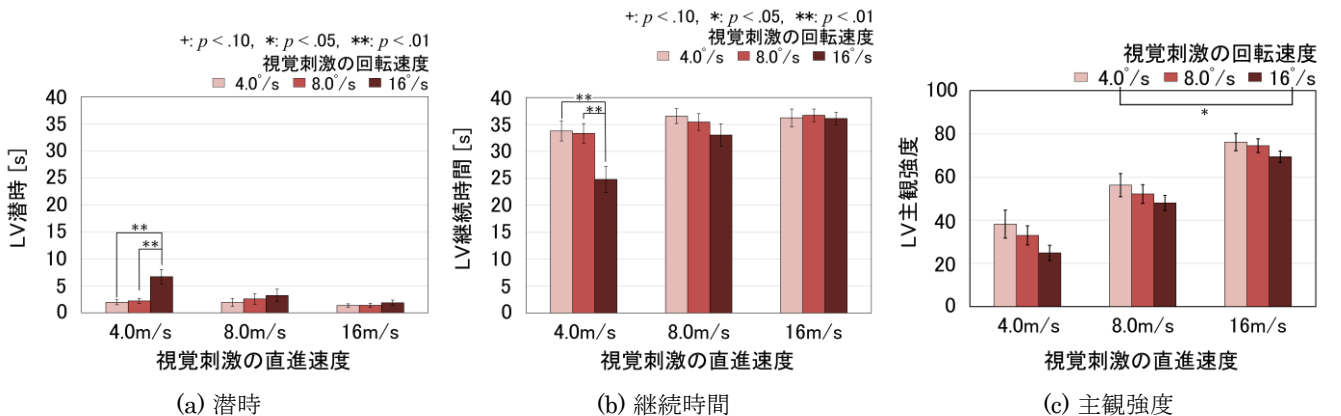


図 4 LV 強度と各運動速度の関係 (直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激を観察した場合)

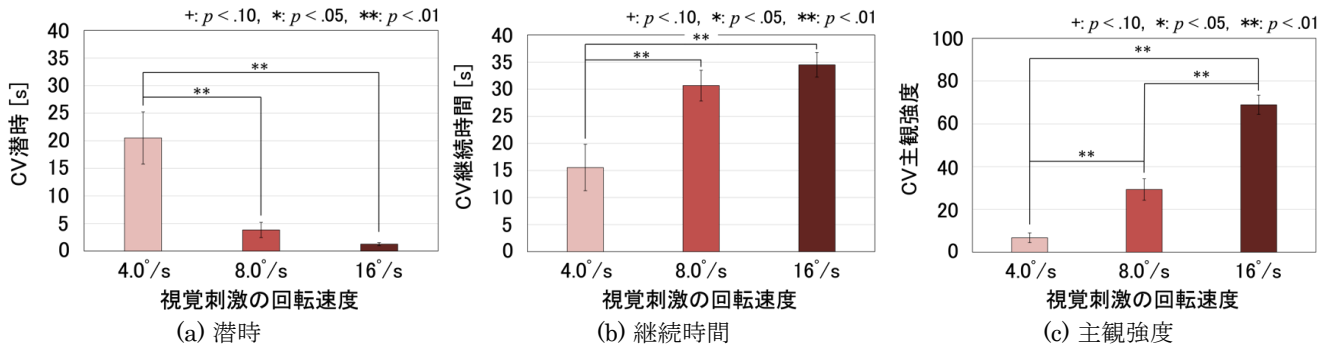


図5 CV強度と回転速度の関係（回転運動のみの視覚刺激を観察した場合）

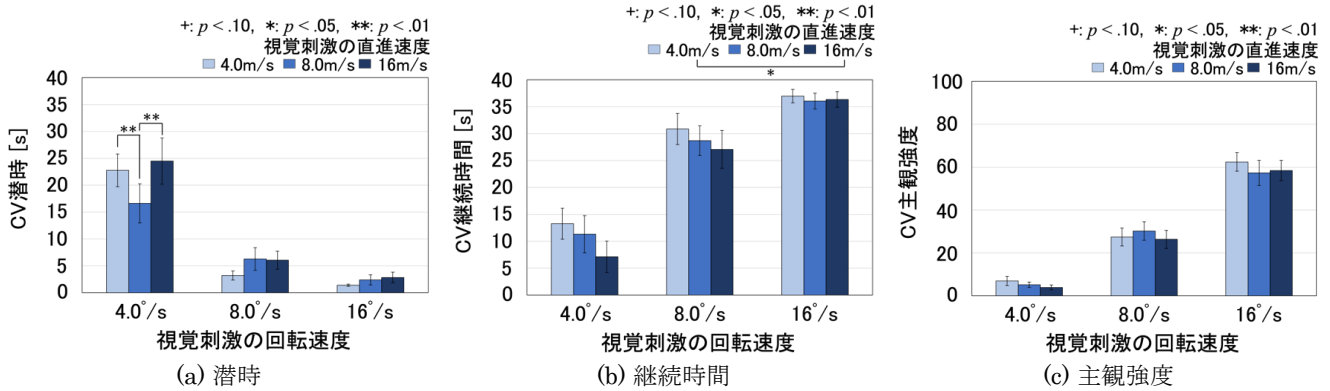


図6 CV強度と各運動速度の関係（直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激を観察した場合）

回は、直進速度が CV に与える影響に着目しているため、直進速度の単純主効果の分析のみを行った。その結果、潜時での直進速度の単純主効果は、回転速度 4.0°/s のときのみに有意であった ($F(2,78) = 6.783, p < .001$)。多重比較の結果を図 6 (a) に記載した。これより、回転速度が低速 (4.0°/s) のとき、直進速度が 8.0m/s のとき 16m/s より有意に大きくなるが、8.0m/s のとき 4.0m/s よりも有意に小さくなることから、直進速度が増加すると CV 強度が減少するという傾向は確認できなかった。CV の潜時、継続時間、主観強度のすべてにおいて、回転速度の主効果が有意であった (潜時: $F(2,26) = 36.596, p < .001$, 継続時間: $F(2,26) = 60.957, p < .001$, 主観強度: $F(2,26) = 98.896, p < .001$)。前述の通り、直進速度の影響に着目しているため、回転速度の効果はこれ以上の分析を行わない。直進速度の主効果は、継続時間で有意傾向であったが ($F(2,26) = 3.224, p = .056$)、潜時、主観強度では有意でなかった (潜時: $F(2,26) = 2.030, p = .152$, 主観強度: $F(2,26) = 0.774, p = .472$)。

回転速度 4.0°/s 条件の潜時は、これまでの研究や他条件と明らかに異なる傾向を示した。そこで、参加者のボタン押し行動を詳細に調べると、直進速度 8.0m/s の回転速度 4.0°/s 条件において、5 名の参加者が試行開始直後に極小時間のみボタンを押下し、その後はほぼ押下しなかった。これは、ベクションの強度の指標として不相当であると考えられる。それらのデータを除くとこの条件の平均潜時は 23.2 秒となり、回転速度 4.0°/s 条件の潜時はほぼ平らとなる。とはい

え、直進速度の増加に伴い CV 強度が明確に減少したのは継続時間のみであり、他の指標のグラフは直進速度の増加に対して、変化なしまたはごく僅かな CV 強度の増加を示した。

3.7 考察

実験 1a より、回転速度が上がるにつれて LV 強度が減少し、実験 1b より、回転速度が上がるにつれて CV 強度が増加することを明らかにした (図 4, 図 5)。また、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、一部の指標のみではあるが、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)。これらの結果を合わせて考えると、HMD を用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合も、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、先行研究と同じく 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が示された。ただし、本研究では LV が CV に与える影響は小さかった。

続いて、HMD を用いて直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激を提示した実験を行った先行研究 [10] の結果と比較する。先行研究と比べると、LV、CV とともに潜時が短く、継続時間が長く、主観強度が強い。つまり、全体的にベクション強度が強いという結果となった (図 4, 図 6)。

その理由として、先行研究では混在する刺激がベクションの生起を妨げたと考えられる。直線運動をする刺激と回

転運動をする刺激が混在する視覚刺激を観察する場合、直進運動をするドットと回転運動をするドットの2種類のドットが同時に提示されているため、評価する方向ではない動きをするドットへと注意が向いてしまい、評価対象のベクションが生じにくかった可能性がある。また、混在する刺激に比べ、スパイラル運動をする視覚刺激では、1つ1つのドットの単位時間に動く距離が大きいため、強いベクションが生じやすかったとも考えられる。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、HMDを用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察し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。ただし、LVがCVに与える影響は比較的小さかった。続いて、先行研究[10]に倣い、スパイラル運動を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できるかを実験2で検討する。

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[12]を採用した。実験では、まず参加者に基準刺激を提示し、スパイラル運動をするドットの直線方向と回転方向の移動速度を覚えさせる。次に、評価刺激を提示し、そのとき知覚したドットの各方向への移動速度を、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[12]に基づき、底を10とした対数変換を行い、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としたスパイラル運動を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スパイラル運動を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

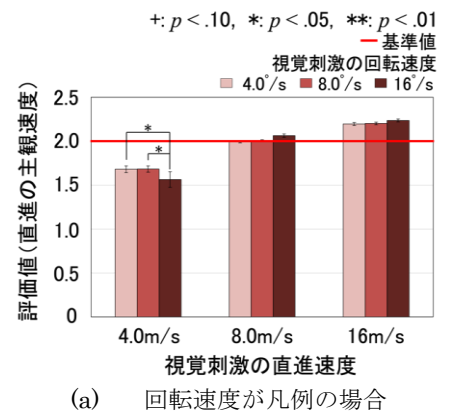
実験1にも参加した成人男性5名と成人女性3名の8名と実験1に参加していない成人男性6名の計14名が実験2に参加した。矯正を含め、全員が正常視力を有した。

4.6 結果

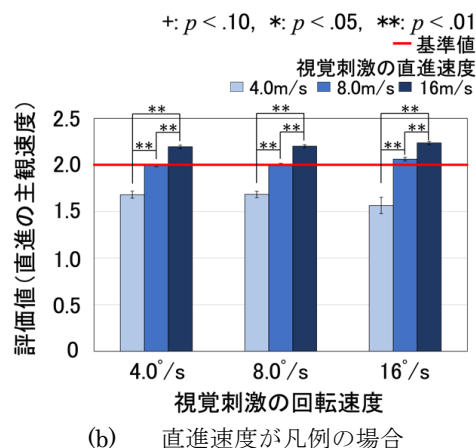
4.6.1 直線速度

図7は、スパイラル運動をする視覚刺激を提示した際の対数変換後の直線運動の速度の評価値、すなわち直進の主観速度を示す。以降、グラフ内の赤線は、基準刺激である速度の8.0m/s×8.0°/sと同じ速度であると回答した場合の評価値(基準値)を表しており、縦軸の主観速度がこれより大きいと評価刺激の速度を基準速度より速く、小さいと遅く知覚していることになる。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、回転速度の主効果は有意でなかったが($F(2,26) = 0.070, p = .933$)、直進速度の主効果($F(2,26) = 137.344, p < .001$)が有意であった。また、直進速度と回転



(a) 回転速度が凡例の場合



(b) 直進速度が凡例の場合

図7 視覚刺激の速度と直進の主観速度の関係

速度の交互作用 ($F(4,52) = 2.902, p = .031$) が有意であった。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結果、直進速度 4.0m/s でのみ回転速度の単純主効果が有意であった ($F(2,78) = 4.234, p = .018$)。多重比較の結果を図 7 (a) に記載する。低速 (4.0m/s) の直進速度では回転速度が速いと直進の主観速度は減少した。

次に、直進の主観速度への直進速度の影響を調べた結果、全ての回転速度で直進速度の単純主効果が有意であった (4.0°/s: $F(2,78) = 49.933, p < .001$, 8.0°/s: $F(2,78) = 50.885, p < .001$, 16°/s: $F(2,78) = 90.305, p < .001$)。多重比較の結果を図 7 (b) に記載する。全ての条件で、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、低速 (4.0m/s) の直進速度の場合を除いて回転速度の影響は受けなかったことを明らかにした。

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 1.7, 8.0m/s で 2.0, 16m/s では 2.3 となる。実験結果の直進の主観速度の平均値は、直進速度が 8.0m/s の時は基準値の 2.0 に非常に近いが、直進速度が 16m/s の時は 2.3 よりも 0.1 以上小さい値となった。さらに、直進速度が 4.0m/s の時は回転速度が低速 (4.0°/s) と中速 (8.0°/s) の時は基準値の 1.7 に非常に近いが、高速 (16°/s) の時のみ 1.7 よりも 0.1 以上小さい値となった。これは、4.0m/s × 16°/s で 5 名が、3 回の試行のうち 1 回以上の試行で、直進自体を知覚しなかったためである。これより、

直進速度は、8.0m/s では回転速度に関係なく正確に知覚することができるが、16m/s では遅く知覚しやすく、4.0m/s では概ね正確に知覚することができるが、回転の速度が高速 (16°/s) の場合、回転の影響を受け直進運動そのものを知覚できない参加者がいることが示された。

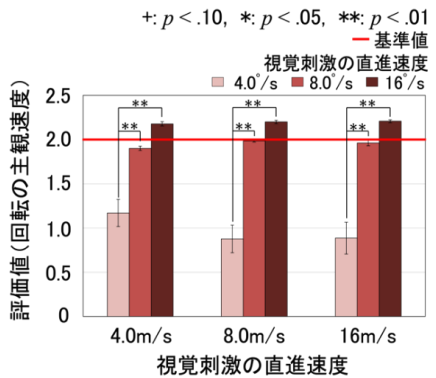
4.6.2 回転速度

図 8 は、スパイラル運動をする視覚刺激を提示した際の対数変換後の回転運動の速度の評価値、すなわち回転の主観速度を示す。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はなかったが ($F(2,26) = 0.301, p = .743$)、回転速度の主効果 ($F(2,26) = 49.106, p < .001$) は有意であった。また、両要因の交互作用 ($F(4,52) = 3.483, p = .0136$) が有意であった。

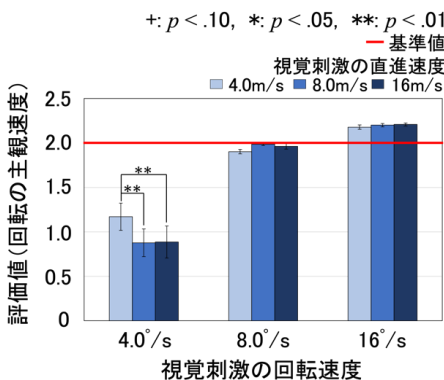
交互作用が有意であったため、単純主効果の分析を行った。回転速度に着目すると、全ての直進速度で回転速度の単純主効果が有意であった (4.0m/s: $F(2,78) = 24.277, p < .001$, 8.0m/s: $F(2,78) = 46.026, p < .001$, 16m/s: $F(2,78) = 44.915, p < .001$)。多重比較の結果を図 8 (a) に記載する。グラフの傾向と合わせ、回転速度が上がるにつれて回転の主観速度は増加したことがわかる。

次に、直進速度に着目すると、回転速度 4.0°/s でのみ直進速度の単純主効果が有意であった ($F(2,78) = 5.565, p = .006$)。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遅い時は、他に比べて回転が早く評価されたことがわかる。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かったことが示される。

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 2.0, 16°/s では 2.3 となる。実験結果の回転の平均主観速度は、回転速度が 8.0°/s の時は 2.0 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。回転速度が 4.0°/s の時は 1.7 よりも 0.5 以上小さい値となり、さらに、直進速度が、8.0m/s, 16m/s の時には 1.0 よりも小さく評価された。これは、4.0m/s × 4.0°/s では 2 名、8.0m/s × 4.0°/s では 3 名、16m/s × 4.0°/s では 4 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 ではかなり遅く知覚する上、直進速度の影響を大きく受けることを示した。



(a) 回転速度が凡例の場合



(b) 直進速度が凡例の場合

図 8 視覚刺激の速度と回転の主観速度の関係

5. 総合考察

我々は、先行研究において、HMD を用いて直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激を提示

し、そ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 [10]。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、HMD を用いてスパイラル運動をする視覚刺激を観察した場合でも同様の傾向を得られるか分析を行った。

実験 1 では、スパイラル運動を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 [10] と同様の知見を得ることができた。ただし、LV の CV への影響は小さかった。また、先行研究に比べ、全体的にベクションを強く知覚していることが示された。

実験 2 では、参加者が視覚刺激から直線運動と回転運動の速度を正確に知覚し、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、速度が低速の状態、特に回転の主観速度は、他方の運動の速度に影響され正しく知覚できないことが明らかになった。

これらの結果より、視覚刺激の主観速度は LV, CV 間の負の相関関係の原因ではないと考えられる。実験 2 の結果では、低速条件でのみ他方の運動速度が上がるにつれて主観速度が減少しており、それ以外の条件では他方の速度に関係なく正しく知覚できている。また、その傾向は回転の主観速度においてより強く現れていた。もし、主観速度の変化が LV, CV 間の負の相関を生み出すのであれば、低速、特に CV 強度の低速で負の相関関係が見られ、低速でない条件では見られないはずである。しかし実験 1 の結果では、LV 強度においてはその傾向が比較的に見られたものの、CV 強度においてはあまりその傾向がなく、負の相関が弱かった。よって、主観速度の変化が負の相関を引き起こしている可能性は低い。

本研究、先行研究ともに LV と CV の強度の間に負の相関関係が見られた。ただし本研究では LV の CV への影響は比較的小さかった。つまり、LV 強度と比較すると CV 強度は他方に影響されにくかった。これは古賀らの実験結果 [8]、および松田らの実験結果 [10] とは異なる結果である。このことから、LV, CV がそれぞれに及ぼす影響の程度は、実験環境、提示する視覚刺激の特徴により異なると考えられる。この点については、今後の検討が必要である。

6. むすび

本稿では、スパイラル運動をする視覚刺激を用いて LV と CV の強度の関係について分析を行い、先行研究での、直線運動をする刺激と回転運動をする刺激が混在する視覚刺激の場合との比較をした。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。しかし、先行研究と異なり、CV 強度へ LV 強度が及ぼす影響は小さかった。続く実験では、各方向への運動速度をどのように知覚しているか主観速度を測定した。主観速度の変化とベクションの強度の変化は一致しておらず、負の相関関係は主観速度の変化に起因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, No. 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] 松田あゆみ, 萩原息吹, 松室美紀, 柴田史久, 田村秀行, 木村朝子: "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.
- [11] 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.
- [12] 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.