

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 (5) ～統合的なベクシオン強度についての拡張実験～

松田あゆみ^{†1} 古賀宥摩^{†1†2} 松室美紀^{†3} 柴田史久^{†1} 田村秀行^{†4} 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、前進運動のLVとRoll回転のCVを同時に引き起こす視覚刺激を用いて、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統合的なベクシオン強度を測定した。その結果から、統合的なベクシオン強度は、同様の視覚刺激でLVとCVを切り分けて測定した際のLV強度とCV強度のベクトル和の傾向と一貫していることを示した。そこで、本研究では、同一直線上のLV方向を変化させた後退運動のLVとRoll回転のCVの組み合わせ、視覚刺激の特徴が異なる右移動のLVとPitch回転のCV、下降のLVとYaw回転のCVの組み合わせでも同様の傾向が得られるか分析した。その結果、知覚するLVとCVの組み合わせに関わらず、統合的なベクシオン強度は、それぞれ切り分けて測定した際のLV強度とCV強度のベクトル和の傾向と一貫していることが明らかにされた。

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

止まっている電車の中で、向かい側の電車が動き出した際に、あたかも自分が乗っている電車が動き出したかのように感じる現象がある [1]。このような、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を視覚誘導性自己運動感覚 (ベクシオン) と呼び [2]、視覚刺激の移動方向とは逆方向の運動感覚が発生する。

ベクシオンを利用することで、実際の移動や運動を伴わずに運動感覚の表現が可能となるため、数多くの映像コンテンツにはベクシオンを誘発させる工夫が施されている [3]。そのため、ベクシオンに関する研究で得られた知見は、映像コンテンツへの設計指標として応用が期待される。

ベクシオンは発生する運動によって、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]。回転しながら直進 (以下、スパイラル運動) する視覚刺激によって、これら2方向の運動感覚を同時に生起させる研究は未だ多くない。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。しかし、スパイラル運動における直線運動と回転運動の速度変化が、ベクシオン知覚にどのような影響を与えるかは検討されていない。

そこで我々は、これまでに、スパイラル運動する視覚刺激によって生起するベクシオンをLVとCVに切り分けて評価し、LVとCVが互いに影響し合うのか分析してきた [6-8]。

結果、直進速度と回転速度のどちらか一方の速度を上昇させると、対応する方向のベクシオン強度が増加したが、もう一方の強度は減少した。つまり、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。また、この関係は、前進LVとRoll回転CV、後退LVとRoll回転CV、右移動LVとPitch回転CV、下降LVとYaw回転CVの組み合わせで認められた。

さらに、先行研究と同一の前進運動とRoll回転運動を組み合わせた視覚刺激を用いて、LVとCVを切り分けずに1つの運動感覚として扱った“統合的なベクシオン強度”を測定し、切り分けて測定した際のLV、CV強度との関係について分析した [6]。そこから、刺激の速度変化に対する統合的なベクシオン強度の変動傾向は、同一の視覚刺激において測定されたLV強度とCV強度のベクトル和の変動傾向と同様であることを明らかにした。そこで、本稿では、同一直線上のLV方向を変化させた後退LVとRoll回転CVの組み合わせ、刺激の特徴が異なる右移動LVとPitch回転CV、下降LVとYaw回転CVの組み合わせにおいて刺激の速度による統合的なベクシオン強度の変動傾向を確認する。また先行研究同様、LV強度とCV強度のベクトル和と同様の傾向が得られるか分析する。

2. 実験準備

2.1 広視野ディスプレイシステム

人間の視野は水平方向 180°以上とされているため [9]、ベクシオンを検討するにあたって、視野全域に視覚刺激を提示することが重要である。そこで、本実験では、実験参加者の広範な視覚領域に刺激を提示すべく、広視野ディスプレイシステム (図 1) を利用した。本システムは、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) の内壁面に、3 台のプロジェクタ (パナソニック株式会社 PT-DW6300LK) が 120°ずつ映像を投影すること

†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 現在、パナソニック株式会社
Panasonic Corporation

†3 立命館大学 情報理工学部
College of Information Science and Engineering,
Ritsumeikan University

†4 立命館大学 総合科学技術研究機構
Research Organization of Science and Technology,
Ritsumeikan University

で、参加者の周囲 360°への映像提示を実現している。なお、実験を行う際は、参加者の影が映り込まないように図2に示す位置で視覚刺激を観察させた。

2.2 視覚刺激

視覚刺激として、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刺激を採用した。ベクシオン強度は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[10]。そこで、知覚する奥行き情報を統一するために、十分に長い円筒形の仮想物体(直径 6.0m)を用いて刺激を生成した。そ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。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刺激を、回転させることで回転運動の刺激を表現可能にした。

各実験で用いる視覚刺激のフローを図3に示す。実験1では、刺激の直線運動は参加者の後方から前方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(Roll回転)とした(図3(a))。すなわち、この刺激を提示することで、参加者に後退のLVと反時計回りのCVを知覚させた。実験2では、図3(b)に示すような直線運動と回転運動の刺激を提示し、参加者に右移動のLVと前転(Pitch回転)のCVを知覚させた。実験3では、図3(c)に示すような直線運動と回転運動の刺激を提示し、参加者に下降運動のLVと左回り(Yaw回転)のCVを知覚させた。

ランダムドットは、黒色(0.74cd/m²)の均一背景に白色(10.2cd/m²)のドットで構成し、白色が占める密度を20%とした。また、実験1における刺激の消失点は、小型ドームの床面から高さ1.6mの位置とし、同一箇所注視点を設けた。実験2,3の注視点位置は実験1と同様である。な

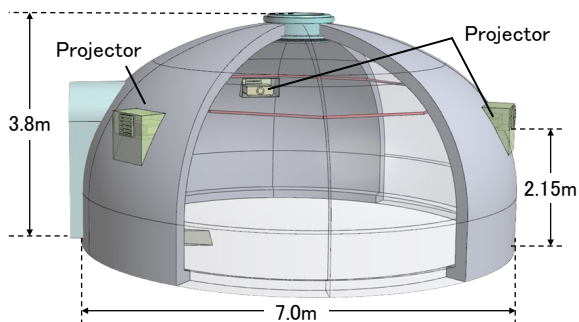


図1 広視野ディスプレイシステムの外寸

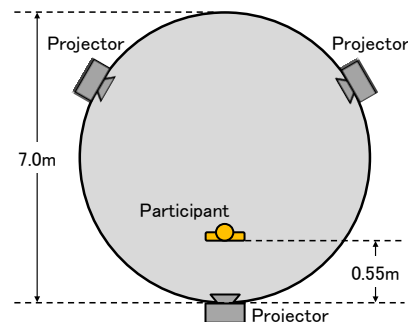
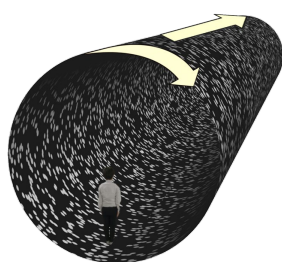
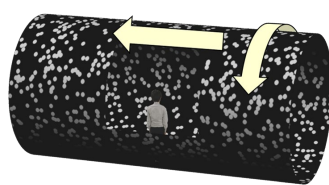


図2 参加者の観察位置



(a) 実験1の場合



(b) 実験2の場合



(c) 実験3の場合

図3 シミュレートされた視覚環境

お、実験中は指定の直立姿勢を維持させた。

2.3 評価指標

我々の先行研究[6-8]と同様、ベクシオンを知覚するまでの時間(潜時)、ベクシオンを知覚している間の時間(継続時間)、知覚したベクシオ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。主観強度においては、ベクシオ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オ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. 実験1: 後退とRoll回転の組み合わせでの統合的なベクシオンの分析

3.1 目的

視覚刺激の直進速度と回転速度を変化させ、後退LVとRoll回転CVを区別しない統合的なベクシオン強度を測定する。そして、先行研究である前進運動とRoll回転運動の場合と同様に、統合的なベクシオン強度の変動は、LVとCVを切り分けて測定した際の後退LV強度とRoll回転CV強度のベクトル和と同様の傾向になるのか分析する。

3.2 条件

本実験では、LVを変化させる要因として視覚刺激の直進速度、CV強度を変化させる要因として回転速度の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。0.0m/s × 0.0°/s 条件の場合、バクシオ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 × 4 - 1 = 15 通りとした。

3.3 手続き

実験 1 では、後退 LV と Roll 回転 CV を区別せず、スパイラル運動をする刺激を観察した際に知覚する統合的なバクシオンを評価させた。スパイラル運動をする視覚刺激を提示し、参加者にはバクシオンを知覚している間、手元のボタンを押し続けさせた。視覚刺激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、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 15 × 3 = 45 試行を行わせた。実験は、提示パターン 15 試行ごとに 3 日に分けて行った。

3.4 参加者

成人 12 名 (男性 9 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。

3.5 結果

一部の条件でバクシオンを知覚しなかった 1 名のデータを実験結果から除外した。図 4, 図 5 は、(a) 後退と Roll 回転の統合的なバクシオンの潜時、(b) 継続時間、(c) 主観強度の平均値を示す。図 4 は直進速度を横軸、回転速度を凡例とし、図 5 は回転速度を横軸、直進速度を凡例としている。以降、図中のエラーバーは標準誤差を示す。

はじめに、回転速度の効果を確かめるため、図 4 で示した各指標に対して、3 (直進速度: 0.0m/s 以外) × 4 (回転速度) の参加者内分散分析を行った。その結果、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: $F_{(2,20)} = 20.370, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,20)} = 20.026, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,20)} = 27.242, p < .001$) と交互作用 (潜時: $F_{(6,60)} = 6.872, p < .001$, 継続時間: $F_{(6,60)} = 6.398, p < .001$, 主観強度: $F_{(6,60)} = 14.291, p < .001$) が有意であった。回転速度の主効果は、潜時と主観強度では有意であったが (潜時: $F_{(3,30)} = 4.478, p = .010$, 主観強度: $F_{(3,30)} = 6.915, p = .001$), 継続時間では有意でなかった ($F_{(3,30)} = 1.949, p = .143$)。

回転速度が統合的なバクシオン強度に与える影響を確認するため、実験結果に対して回転速度の単純主効果の検定を行った。結果、潜時と継続時間は 4.0m/s (潜時: $F_{(3,90)} = 14.809, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,90)} = 10.880, p < .001$) で回転速度の単純主効果が有意であった。主観強度はすべ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: $F_{(3,90)} = 28.125, p < .001$, 8.0m/s: $F_{(3,90)} = 2.750, p = .047$, 16m/s: $F_{(3,90)} = 3.025, p = .034$)。Bonferroni 法による多重比較でその差が有意であったペアを図中に記載した (図 4)。

図 4 より、4.0m/s 条件では高速の回転を加えることにより統合的なバクシオン強度が増加するという関係が確認される。主観強度においては、8.0m/s 条件で、4.0m/s 条件と同様の結果が得られたが、他の条件では回転速度の変化と統合的なバクシオン強度の変化に明確な関係は確認できなかった。

次に、直進速度の効果を確かめるため、図 5 の各指標に対して、4 (直進速度) × 3 (回転速度: 0.0°/s 以外) の参

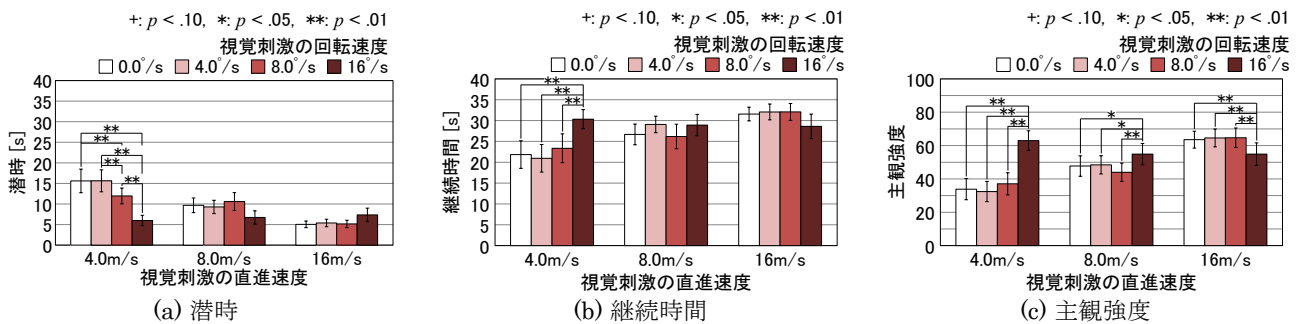


図 4 後退 × Roll 回転の統合的なバクシオン強度の評価 (凡例: 回転速度)

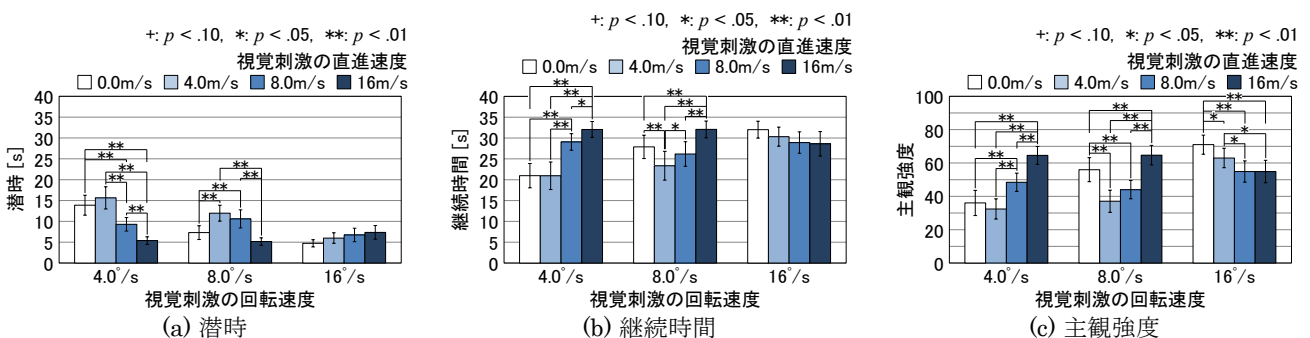


図 5 後退 × Roll 回転の統合的なバクシオン強度の評価 (凡例: 直進速度)

加者内分散分析を行った結果、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: $F_{(3,30)} = 8.316, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,30)} = 10.194, p < .001$, 主観強度: $F_{(3,30)} = 10.918, p < .001$), 回転速度の主効果(潜時: $F_{(2,20)} = 19.613, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,20)} = 9.243, p = .001$, 主観強度: $F_{(2,20)} = 34.383, p < .001$), 交互作用(潜時: $F_{(6,60)} = 7.069, p < .001$, 継続時間: $F_{(6,60)} = 10.174, p < .001$, 主観強度: $F_{(6,60)} = 15.764, p < .001$) が有意であった。

直進速度が統合的なベクション強度に与える影響を確認するため、直進速度の単純主効果の検定を行った。その結果、潜時、継続時間において、 $4.0^\circ/\text{s}$ (潜時: $F_{(3,90)} = 15.018, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,90)} = 20.514, p < .001$) と $8.0^\circ/\text{s}$ (潜時: $F_{(3,90)} = 6.742, p < .001$, 継続時間: $F_{(3,90)} = 8.487, p < .001$) で直進速度の単純主効果が有意であった。主観強度は、すべての回転速度において直進速度の単純主効果が有意であった ($4.0^\circ/\text{s}$: $F_{(3,90)} = 20.174, p < .001$, $8.0^\circ/\text{s}$: $F_{(3,90)} = 14.479, p < .001$, $16^\circ/\text{s}$: $F_{(3,90)} = 5.714, p = .001$)。そこで、下位検定として Bonferroni 法による多重比較によりその差が有意であったペアを図中に記載した。

図 5 より、回転速度 $4.0^\circ/\text{s}$ 条件で高速 (8, 16m/s) の直線運動が加わるとベクション強度が増加することが読み取れる。また、 $8.0^\circ/\text{s}$ 条件では、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し、そこから直線運動の速度を上げるとベクション強度が増加していくことが示された。これより、回転速度 $4.0^\circ/\text{s}$ 条件では直進速度が上がるにつれて統合的なベクション強度が増加すること、回転速度が速い場合は強度が単調に増加はしないことを確認した。

以上の結果から、統合的なベクション強度は刺激の運動速度が増加しても、単調に増加しないことが示唆される。

3.6 考察

統合的なベクション強度が後退 LV 強度と Roll 回転 CV 強度のベクトル和と同様の傾向であるか分析する。先行研究において取得したデータを用い、視覚刺激の速度ごとに、後退 LV の主観強度と、Roll 回転 CV の主観強度の二乗和平方根を算出した (図 6)。

まず、回転速度の効果を確かめるため、算出された主観強度の二乗和平方根に対して、3 (直進速度: 0.0m/s 以外) \times 4 (回転速度) 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 ($F_{(2,22)} = 15.927, p < .001$), 回転速度の主効果 ($F_{(3,33)} = 12.957, p < .001$), 交互作用 ($F_{(6,66)} = 7.110, p < .001$) が有意であった。回転速度の単純主効果の検定を行った結果、直進速度 4.0m/s ($F_{(3,99)} = 20.523, p < .001$) と 8.0m/s ($F_{(3,99)} = 10.742, p < .001$) において、回転速度の単純主効果が有意であった。下位検定として Bonferroni 法による多重比較によりその差が有意であったペアを図中に記載した (図 6 (a))。

続いて、直進速度の効果を確かめるため、図 6 (b) に対

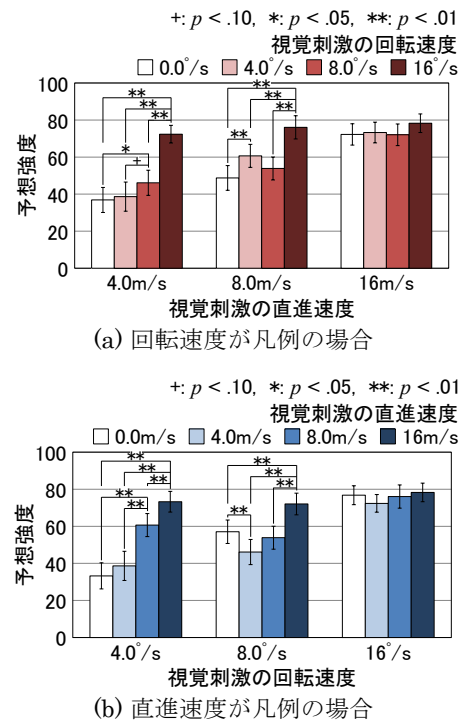


図 6 後退 LV と Roll 回転 CV 強度の二乗和平方根

して、4 (直進速度) \times 3 (回転速度: $0.0^\circ/\text{s}$ 以外) の参加者内分散分析を行った結果、直進速度の主効果 ($F_{(3,33)} = 10.146, p < .001$), 回転速度の主効果 ($F_{(2,22)} = 31.478, p < .001$), 交互作用 ($F_{(6,66)} = 9.463, p < .001$) が有意であった。直進速度の単純主効果の検定を行った結果、 $4.0^\circ/\text{s}$ ($F_{(3,99)} = 21.873, p < .001$) と $8.0^\circ/\text{s}$ ($F_{(3,99)} = 7.342, p < .001$) において直進速度の単純主効果が有意であった。下位検定として Bonferroni 法による多重比較を行い、確認された有意差を図中に記載した (図 6 (b))。

図 4 (c) と図 6 (a), 図 5 (c) と図 6 (b) をそれぞれ比較したところ、有意差が認められた箇所において、矛盾は生じておらず、両者は強い正の相関関係にあった ($r = 0.906, p < .001$)。特に、図 6 (b) は、図 5 (c) において観察された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し、高速 (16m/s) の直線運動が加わると増加するという特徴を十分に再現している。したがって、後退 LV と Roll 回転 CV の組み合わせにおいても、統合的なベクション強度は、各条件において知覚される LV 強度と CV 強度のベクトル和と同様の傾向になることが示された。

4. 実験 2: 右移動と Pitch 回転の組み合わせでの統合的なベクションの分析

4.1 目的

視覚刺激の直進速度と回転速度を変化させ、知覚する右移動 LV と Pitch 回転 CV を区別しない統合的なベクション強度を測定する。この状況では、視覚刺激の提示に用いた円筒形の側面を注視するため視覚刺激の特徴が先行研究、

実験 1 とは異なる。この特徴の違いが、統合的なベクシオン強度と LV 強度, CV 強度の関係性に影響するのか、それとも、実験 1 と同様にベクトル和と一貫した傾向になるのかを分析する。

4.2 条件

実験 2 では、参加者は刺激の消失点ではなく、側面を観察する。そのため、実験 1 に比べて、視覚刺激の速度を高く意識するため、直進速度のパラメータを調整し、直進速度を 0.0m/s, 1.0m/s, 4.0m/s の 3 段階、回転速度を 0.0°/s, 4.0°/s, 16°/s の 3 段階とした。0.0m/s × 0.0°/s 条件の場合、ベクシオ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 3 段階と回転速度 3 段階の組み合わせから 0.0m/s × 0.0°/s 条件を除いた 3 × 3 - 1 = 8 通りとした。

4.3 手続き

実験 2 では、実験 1 と同様の手続きを用いた。

4.4 参加者

実験 1 とは異なる成人 11 名（男性 9 名、女性 2 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。

4.5 結果

一部の条件でベクシオンを知覚しなかった 2 名のデータを実験結果から除外した。図 7, 図 8 は、(a) 右移動と Pitch 回転の統合的なベクシオンの潜時、(b) 継続時間、(c) 主観強度の平均値を示す。図 7 は直進速度を横軸、回転速度を凡例とし、図 8 は回転速度を横軸、直進速度を凡例としている。

回転速度の効果を確かめるため、図 7 で示した各指標に対して、2 (直進速度: 0.0m/s 以外) × 3 (回転速度) の参加者内分散分析を行った。その結果、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: $F_{(1,8)} = 13.763, p = .006$, 継続時間: $F_{(1,8)} = 13.253, p = .007$, 主観強度: $F_{(1,8)} = 18.551, p = .003$), 回転速度の主効果 (潜時: $F_{(2,16)} = 12.105, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,16)} = 7.268, p = .006$, 主観強度: $F_{(2,16)} = 14.896, p < .001$), 交互作用 (潜時: $F_{(2,16)} = 5.304, p = .017$, 継続時間: $F_{(2,16)} = 4.851, p = .023$, 主観強度: $F_{(2,16)} = 19.358, p < .001$) が有意であった。

回転速度が統合的なベクシオン強度に与える影響について確認するため、実験結果に対して回転速度の単純主効果の検定を行った。結果として、潜時と継続時間と主観強度すべてにおいて、1.0m/s でのみ回転速度の単純主効果が有意であった (潜時: $F_{(2,32)} = 15.349, p < .001$, 継続時間: $F_{(2,32)} = 10.767, p < .001$, 主観強度: $F_{(2,32)} = 30.499, p < .001$)。Bonferroni 法による多重比較を行った結果、差が有意であったペアを図中に記載した。図 7 より、直進速度 1.0m/s 条件において、回転速度の高い 16°/s で統合的なベクシオン強度が増加することが示された。ただし、直進速度の 4.0m/s 条件では、統合的なベクシオン強度の増減傾向を確認することができなかった。

次に、直進速度の効果を確かめるため、図 8 の各指標に対し、3 (直進速度) × 2 (回転速度: 0.0°/s 以外) の参加

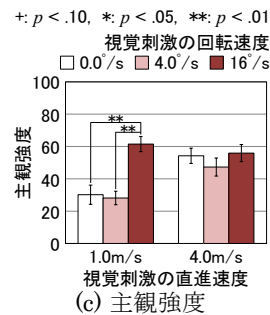
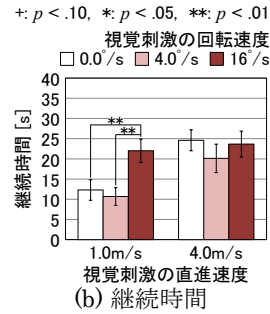
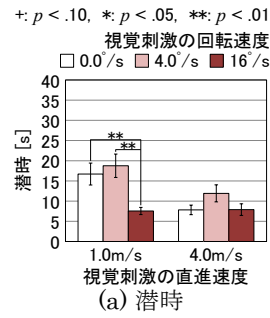


図 7 右 × Pitch の評価 (凡例: 回転速度)

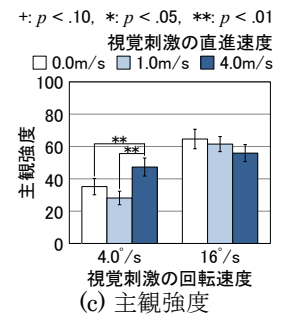
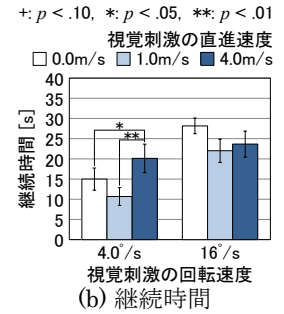
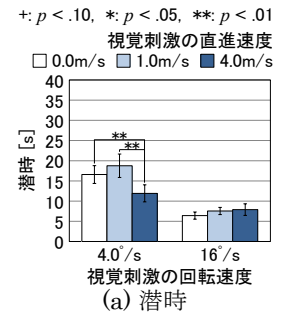


図 8 右 × Pitch の評価 (凡例: 直進速度)

者内分散分析を行った。その結果、潜時、継続時間、主観強度において、回転速度の主効果 (潜時: $F_{(1,8)} = 26.079, p < .001$, 継続時間: $F_{(1,8)} = 24.241, p = .001$, 主観強度: $F_{(1,8)} = 23.849, p = .001$) と交互作用 (潜時: $F_{(2,16)} = 5.992, p = .011$, 継続時間: $F_{(2,16)} = 4.078, p = .037$, 主観強度: $F_{(2,16)} = 10.049, p = .001$) が有意であった。直進速度の主効果に関しては、継続時間は有意傾向に留まり ($F_{(2,16)} = 2.722, p = .096$), 潜時と主観強度は有意ではなかった (潜時: $F_{(2,16)} = 2.131, p = .151$, 主観強度: $F_{(2,16)} = 1.847, p = .190$)。

直進速度が統合的なベクシオン強度に与える影響について確認するため、直進速度の単純主効果の検定を行った。その結果、潜時、継続時間、主観強度において、4.0°/s (潜時: $F_{(2,32)} = 6.545, p = .004$, 継続時間: $F_{(2,32)} = 4.325, p = .022$, 主観強度: $F_{(2,32)} = 8.406, p = .001$) で直進速度の単純主効果が有意であった。Bonferroni 法による多重比較によりその差が有意であったペアを図中に記載した。図 8 より、回転速度 4.0°/s 条件では、刺激に高速 (4.0m/s) の直線運動が加わると、統合的なベクシオン強度が増加することを示した。

以上の結果から、直進、回転速度が低速の際は、もう一方の運動速度が上がると、統合的なベクシオン強度は増加

することが示唆される。しかし、直進、回転速度が高速の際は、もう一方の運動の速度による影響はない。

4.6 考察

視覚刺激の速度ごとに、右移動 LV の主観強度と Pitch 回転 CV の主観強度の二乗和平方根を算出し、その傾向を観測した (図 9)。まず、図 9 に対して、実験 2 と同様の検定を行う。回転速度の効果を確かめるため、図 9 (a) に対して、2 (直進速度: 0.0m/s 以外) × 3 (回転速度) の参加者内分散分析を行った。結果として、直進速度の主効果 ($F_{(1,7)} = 179.347, p < .001$)、回転速度の主効果 ($F_{(2,14)} = 10.320, p = .002$)、交互作用 ($F_{(2,14)} = 410.956, p < .001$) が有意であった。回転速度の単純主効果の検定を行った結果、直進速度 1.0m/s ($F_{(2,28)} = 77.898, p < .001$) と 4.0m/s ($F_{(2,28)} = 32.645, p < .001$) の両方において、回転速度の単純主効果が有意であった。下位検定として Bonferroni 法による多重比較を行い、その差が有意であったペアを図中に記載した。

続いて、直進速度の効果を確かめるため、図 9 (b) に対して、3 (直進速度) × 2 (回転速度: 0.0°/s 以外) の参加者内分散分析を行った。結果として、直進速度の主効果 ($F_{(2,14)} = 9.040, p = .003$)、回転速度の主効果 ($F_{(1,7)} = 145.141, p < .001$)、交互作用 ($F_{(2,14)} = 220.332, p = .011$) が有意であった。直進速度の単純主効果の検定を行った結果、4.0°/s ($F_{(2,28)} = 77.290, p < .001$) と 16°/s ($F_{(2,28)} = 29.070, p < .001$) の両方において、直進速度の単純主効果が有意であった。下位検定として Bonferroni 法による多重比較を行い、その差が有意であったペアを図中に記載した。

図 7 (c) と図 9 (a)、図 8 (c) と図 9 (b) をそれぞれ比較したところ、実験 2 の主観強度と LV 強度と CV 強度の二乗和平方根は、非常に強い正の相関を示しており ($r = 0.940, p < .001$)、図 7 (c) と図 9 (a) の 4.0m/s 条件を除き、概ね矛盾は生じていない。特に、直進、回転速度が遅い時、もう一方の運動速度が小さいとベクション強度が減少し、もう一方の運動速度が大きいとベクション強度が増加している点が一一致する。

図 7 (c) と図 9 (a) の 4.0m/s 条件で、グラフの傾向が異なる理由として、視覚刺激の見え方と人間の視野特性が影響した可能性が考えられる。前進 LV (後退 LV) と Roll

回転 CV の実験では、参加者は円筒形の仮想物体の消失点を見ているため、刺激の直線運動と回転運動の双方を把握しやすい。一方で、右移動 LV と Pitch 回転 CV を知覚させる視覚刺激においては、中心視野のみで観察した場合、ドットの Pitch 回転は下から上へのフローと認識される。人間の垂直方向の視野角は水平方向に比べて狭く、参加者が視覚刺激の Pitch 回転を回転運動ではなく下から上への直線運動として認識した可能性が高い。

実際に、先行研究の CV 測定では、回転速度 4.0°/s に直線運動が加わった際、多くの参加者が CV を知覚していなかった。数名の参加者からは「斜め方向の LV を知覚した」とのコメントを得た。以上から、先行研究の回転感覚のみの評価では、ドットの Pitch 回転のフローが直線運動と捉えられ、CV が生じにくかったことが示唆される。

一方、実験 2 では、評価させる運動感覚を指定せず、参加者には自身が動いたと感じる強さを評価させた。そのため、統合的なベクションの評価には、主に LV 強度が反映された可能性が高い。この違いにより、先行研究で測定した LV 強度と CV 強度の主観強度から算出した二乗和平方根 (図 9 (a)) と、実験 2 で測定した主観強度 (図 7 (c)) に誤差が生じたと考えられる。

しかし、それ以外のグラフは一貫しており、強い正の相関が観察されたことから、右移動 LV と Pitch 回転 CV の統合的なベクション強度の傾向も、各条件において知覚される LV 強度と CV 強度のベクトル和の傾向と同様であったと言える。

5. 実験 3: 下降と Yaw 回転の組み合わせでの統合的なベクションの分析

5.1 目的

実験 3 では、視覚刺激の直進速度と回転速度を変化させ、知覚する下降 LV と Yaw 回転 CV を区別しない統合的なベクション強度の変動傾向を観測する。また、実験 2 と同様、視覚刺激の見え方の違いが結果に影響するののかについても分析、考察する。

5.2 条件

実験 2 と同様の視覚刺激の速度を用いる。視覚刺激の提示パターンも同様に、 $3 \times 3 - 1 = 8$ 通りとした。

5.3 手続き

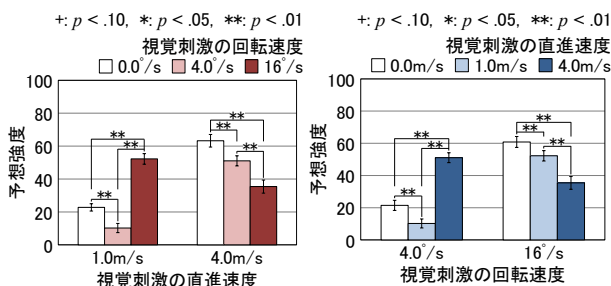
実験 3 では、実験 1, 2 と同様の手続きを用いた。

5.4 参加者

実験 2 と同様の成人 11 名 (男性 9 名, 女性 2 名) が実験 3 に参加した。矯正を含め、全員が正常視力を有した。

5.5 結果

一部の条件でベクションを知覚しなかった 2 名のデータを結果から除外した。図 10, 図 11 は、(a) 下降と Yaw 回転の統合的なベクションの潜時、(b) 継続時間、(c) 主観強度の平均値を示す。図 10 は直進速度を横軸、回転速度を凡例



(a) 回転速度が凡例の場合 (b) 直進速度が凡例の場合
 図 9 右移動 LV と Pitch 回転 CV 強度の二乗和平方根

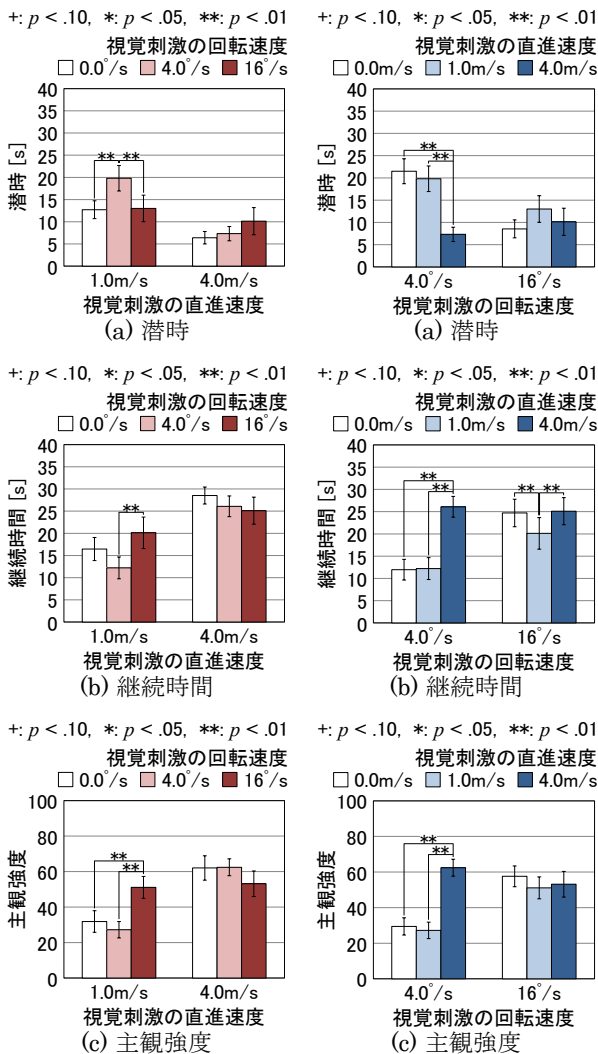


図 10 下降 × Yaw の評価
 (凡例：回転速度)

図 11 下降 × Yaw の評価
 (凡例：直進速度)

とし、図 11 は回転速度を横軸、直進速度を凡例としている。
 はじめに、回転速度の効果を確かめるため、図 10 で示した各指標に対して、2 (直進速度：0.0m/s 以外) × 3 (回転速度) の参加者内分散分析を行った。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： $F_{(1,8)} = 35.996, p < .001$, 継続時間： $F_{(1,8)} = 35.461, p < .001$, 主観強度： $F_{(1,8)} = 48.663, p < .001$) と交互作用 (潜時： $F_{(2,16)} = 7.208, p = .006$, 継続時間： $F_{(2,16)} = 7.876, p = .004$, 主観強度： $F_{(2,16)} = 14.934, p < .001$) が有意であり、回転速度の主効果は有意でなかった (潜時： $F_{(2,16)} = 1.341, p = .289$, 継続時間： $F_{(2,16)} = 1.198, p = .327$, 主観強度： $F_{(2,16)} = 0.746, p = .490$)。

回転速度が統合的なベクシオン強度に与える影響について確認するため、実験結果に対して回転速度の単純主効果の検定を行った結果、潜時、継続時間、主観強度のすべてにおいて、直進速度 1.0m/s で回転速度の単純主効果が有意であった (潜時： $F_{(2,32)} = 4.226, p = .024$, 継続時間： $F_{(2,32)} = 3.996, p = .028$, 主観強度： $F_{(2,32)} = 6.597, p = .004$)。Bonferroni 法による多重比較を行った結果、その差が有意

であったペアを図中に記載した。図 10 より、直線運動が低速 (1.0m/s) のとき、回転速度が上がると統合的なベクシオン強度が増加することがわかる。ただし、直進速度の 4.0m/s 条件では、ベクシオン強度の増減傾向を確認することができず、回転速度とベクシオン強度の明確な関係性は示されなかった。

続いて、直進速度の効果を確かめるため、図 11 で示した各指標に対して、3 (直進速度) × 2 (回転速度：0.0°/s 以外) の参加者内分散分析を行った。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： $F_{(2,16)} = 13.084, p < .001$, 継続時間： $F_{(2,16)} = 18.334, p < .001$, 主観強度： $F_{(2,16)} = 16.239, p < .001$)、回転速度の主効果 (潜時： $F_{(1,8)} = 7.930, p = .023$, 継続時間： $F_{(1,8)} = 10.280, p = .012$, 主観強度： $F_{(1,8)} = 9.8, p = .014$)、交互作用 (潜時： $F_{(2,16)} = 12.601, p < .001$, 継続時間： $F_{(2,16)} = 16.291, p < .001$, 主観強度： $F_{(2,16)} = 29.388, p < .001$) が有意であった。

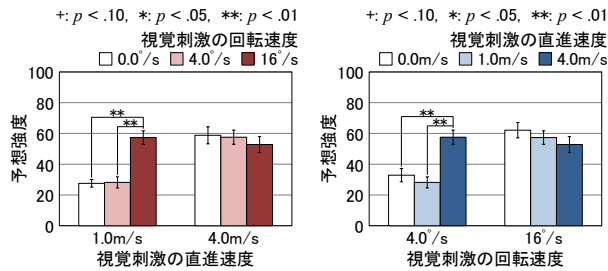
直進速度が統合的なベクシオン強度に与える影響について確認するため、直進速度の単純主効果の検定を行った。その結果、潜時と主観強度では、回転速度 4.0°/s で直進速度の単純主効果が有意であった (潜時： $F_{(2,32)} = 23.669, p < .001$, 主観強度： $F_{(2,32)} = 41.287, p < .001$)。継続時間では、4.0°/s と 16°/s で直進速度の単純主効果が有意であった (4.0°/s： $F_{(2,32)} = 31.511, p < .001$, 16°/s： $F_{(2,32)} = 3.692, p = .036$)。Bonferroni 法による多重比較を行い、その差が有意であったペアを図中に記載した。図 11 より、4.0°/s 条件でのみ、回転運動に高速 (4.0m/s) の直線運動が加わると統合的なベクシオン強度が増加することが示された。

以上の結果から、直進、回転速度が低速の際は、もう一方の運動速度が上がると、統合的なベクシオン強度は増加することが示される。しかし、直進、回転速度が高速の際は、もう一方の運動の速度による影響はない。

5.6 考察

視覚刺激の速度ごとに、下降 LV の主観強度と Yaw 回転 CV の主観強度の二乗和平方根を算出し、その傾向を観測した (図 12)。図 12 に対して、実験 3 と同様の検定を行う。まず、回転速度の効果を確かめるため、図 12 (a) に対して、2 (直進速度：0.0m/s 以外) × 3 (回転速度) の参加者内分散分析を行った。結果、直進速度の主効果 ($F_{(1,10)} = 27.196, p < .001$)、回転速度の主効果 ($F_{(2,20)} = 15.619, p < .001$)、交互作用 ($F_{(2,20)} = 23.259, p < .001$) が有意であった。回転速度の単純主効果の検定を行った結果、直進速度 1.0m/s において、回転速度の単純主効果が有意であった ($F_{(2,40)} = 38.830, p < .001$)。下位検定として Bonferroni 法による多重比較を行った結果、その差が有意であったペアを図中に記載した。

続いて、直進速度の効果を確かめるため、図 12 (b) に対し、3 (直進速度) × 2 (回転速度：0.0°/s 以外) の参加者



(a) 回転速度が凡例の場合 (b) 直進速度が凡例の場合

図 12 下降 LV と Yaw 回転 CV 強度の二乗和平方根

内分散分析を行った。結果、直進速度の主効果 ($F_{(2,20)} = 4.165, p = .031$), 回転速度の主効果 ($F_{(1,10)} = 66.384, p < .001$), 交互作用 ($F_{(2,20)} = 30.430, p < .001$) が有意であった。直進速度の単純主効果の検定を行った結果、回転速度 $4.0^\circ/s$ において直進速度の単純主効果が有意であった ($F_{(2,40)} = 19.756, p < .001$)。下位検定として Bonferroni 法による多重比較を行い、その差が有意であったペアを図中に記載した。

図 10 (c) と図 12 (a), 図 11 (c) と図 12 (b) をそれぞれ比較したところ、同じ箇所有意差が認められ、実験 3 の主観強度と LV 強度と CV 強度の二乗和平方根の間には極めて強い正の相関が存在した ($r = 0.977, p < .001$)。以上から、統合的なベクション強度は、各条件において知覚される LV 強度と CV 強度のベクトル和と同様の傾向になることが示される。

相関係数が極めて高い値となった理由として、Yaw 回転の運動を認識するためには水平方向の視野領域が重要であることが関係していると考えられる。人間の視野特性は水平方向に視野領域が広く、より多くの情報を得ることが可能である。そのため、視覚刺激の回転、直線運動を正確に捉えることができ、切り分けて評価された CV と LV の強度の単純なベクトル和が統合的なベクション強度を最もよく説明したと考えられる。

6. むすび

我々は、先行研究において、スパイラル運動をする視覚刺激の直進速度と回転速度を操作することによって、その際に発生する前進と Roll 回転が組み合わさった統合的なベクション強度の変動傾向を観測した。そして、その傾向は、同様の刺激を提示した際に発生する LV, CV 強度のベクトル和の傾向と一貫していることを示した。そこで、本稿では、次のステップとして、様々な直線運動と回転運動の組み合わせにおいて同様の傾向が得られるか分析した。

実験では、後退 LV と Roll 回転 CV, 右移動 LV と Pitch 回転 CV, 下降 LV と Yaw 回転 CV が発生する視覚環境を構築し、各視覚刺激を提示した際に発生する統合的なベクション強度を測定し、変動傾向を確認した。その結果、刺激の一方向の運動が低速である際は、他方の運動が高速となると統合的なベクション強度は増加したが、刺激の一方

向の運動が高速である際は、統合的なベクション強度は他方の運動の速度に影響されないことが示された。これは、統合的なベクションの回答において、方向性を指定しなかったため、より強いベクションの強度が回答に反映されやすかったためであると考えられる。

また、我々の先行研究 [7,8] で測定した LV, CV 強度との関係性を分析した結果、どの組み合わせにおいても、刺激の速度によって変動する統合的なベクション強度の傾向は、LV 強度と CV 強度のベクトル和の変動傾向と同様であることを示した。この傾向は、人間の視野特性に基づき、刺激の回転情報がより受け取りやすい運動方向において強かった。直進、回転情報の知覚の容易さが異なる状況では、単純なベクトル和ではなく、受け取りやすい情報への重み付けが必要になると考えられる。

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] 徳永康祐, 小川将樹, 池畑諭, 増田知尋, 妹尾武治: "日本のアニメーション作品に見られるベクションシーンのデータベース作成と、心理実験による評価", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 21, No. 1, pp. 35 - 47, 2016.
- [4] M. H. Fischer and A. E. Kormmüller: "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] 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.
- [7] 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 (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] 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: "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 (4) -前進運動と後退運動の比較-", 情報処理学会第 81 回全国大会講演集, Vol. 6ZD-05, pp. 4-239 - 4-240, 2019.
- [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] 妹尾武治, 清水隆哉: "単眼・両岸観察及び利き目・非利き目観察とベクション強度の関係", 日本バーチャルリアリティ学会論文誌, Vol. 22, No. 4, pp. 553 - 556, 2017.