

シグマ運動の知覚速度に及ぼすパーシュート 眼球運動方向と刺激要因の効果

米村 朋子*・中溝 幸夫**

* 九州大学大学院 人間環境学府

** 九州大学大学院 人間環境学研究院

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-19-1

(受付：2004年5月25日；改訂稿受付：2004年9月10日；受理：2004年9月25日)

Effects of Pursuit Eye Movement and Stimulus Factors on Perceived Velocity of ‘Sigma-Movement’

Tomoko YONEMURA* and Sachio NAKAMIZO**

* Graduate School of Human-Environment Studies, Kyushu University

** Faculty of Human-Environment Studies, Kyushu University

1-19-6 Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

(Received 25 May 2004; Received in revised form 10 September 2004; Accepted 25 September 2004)

‘Sigma-movement’ is an illusory motion caused by pursuit eye movements. Three experiments examined the perceived velocity of sigma-movement by using the method of magnitude estimation. Stimuli were checkerboard patterns presented stroboscopically. In Experiment 1, we examined the effect of direction of pursuit eye movement on the perceived velocity, and found that vertical movement was perceived faster than horizontal one (anisotropy of velocity perception). In Experiment 2, we examined the effect of luminance and color (equiluminance), and found that the perceived velocity for the color stimulus was almost equal to that for the luminance stimulus. In Experiment 3, we examined the effect of stimulus size, and found that the perceived velocity increased as the size decreased. The results of Experiments 2 and 3 also confirmed the anisotropy found in Experiment 1. We discussed that the anisotropy of velocity perception of the sigma-movement is caused in the eye-head system of velocity perception.

1. はじめに

本研究は、パーシュート眼球運動 (pursuit eye movement, 以下パーシュート運動) に依存して起こる運動錯視の一種であるシグマ運動の知覚速度に及ぼすパーシュート運動の方向、刺激面の輝度・色、および刺激の大きさの効果を調べた実験の報告である。米村・中溝・川畑 (2003)¹⁾ は、実際運動する点刺激をパーシュートした時の知覚速度をマグニチュード推定法を用いて測定し、知覚速度とパーシュート刺激 (点刺激) の速度との関係を検討した。その結

果、物理的運動速度が 12.5°/s 以下の速度条件において、パーシュート刺激を正確にパーシュート運動しているにもかかわらず、知覚速度は水平方向よりも垂直方向にパーシュート運動した場合のほうが有意に大きかった。この事実は、パーシュート運動時の知覚速度に異方性 (anisotropy) があることを意味している。Gregory (1998)²⁾ によると、パーシュート運動条件における運動視は眼-頭系 (eye-head system) によって媒介されている。従って、米村ら (2003)¹⁾ が観察した事実は、眼-頭系による速度知覚に、異方性を生み出す何らかの原

因があることを示唆している。もしこの予測が正しいならば、パーシュート運動に“依存して”起こるシグマ運動においても異方が観察されるはずである。本研究の主たる目的は、この予測を検証することであった。

従来の運動視研究において、運動対象の速度知覚には2つの異なる運動検出システムが存在すると言われており、それぞれ像-網膜系 (image-retina system) と眼-頭系と呼ばれてきた。ある1点を固視することによって眼球が“比較的”静止している場合には、網膜座標に相対的な対象の運動を検出することによって速度知覚が生じる。これが像-網膜系による速度知覚である。一方、連続的に位置を移動するような運動対象を眼で追いかける (パーシュートする) 場合は、網膜上での対象像の動きはほとんどなく、対象網膜像は中心窩にほぼ固定されるので、像-網膜系による運動検出とは異なる系が必要になる。このように運動対象を追視する場合の眼球運動がパーシュート運動であり、視覚系は、頭部座標に相対的な眼球の運動情報を“利用して”速度知覚を生み出していると考えられている。これが眼-頭系における速度知覚である²⁾。

2つのシステムは、運動対象の網膜像が網膜上で運動しているかまたは静止しているかによって区別されている。前者では、網膜座標系での像の運動速度を検出し、後者では、頭部座標系での眼球の運動情報を利用して知覚速度が決定されていると考えられる。本研究で検討したシグマ運動は、パーシュート運動に“依存して”起こる運動視であるため、頭部座標に対して相対的な、眼球の運動情報を用いた眼-頭系によって速度知覚が行われているといえる。

シグマ運動 (sigma-movement) とは、垂直線分からなるグレーティングやチェッカーボードパターンのような空間的周期性をもつパターンが、一定の時間周期でフリッカー呈示される画面上をパーシュート運動することによって知覚される刺激面全体の、パーシュート運動方向への滑らかな運動のことをいう³⁻⁵⁾。シグマ運動を

はじめて紹介したのは、Lamontagne (1973)⁶⁾ で、ストロボ呈示されるドット列の静止パターンが眼球運動と同じ方向へ動くように知覚されるという新しい仮現運動を発見した。Grüsser, Pause and Schreier (1979)³⁾ と Behrens and Grüsser (1979)⁴⁾ はこの現象をシグマ運動と命名し、この現象を生み出す刺激条件と眼球運動を明確化した。Behrens et al. (1979)⁴⁾ は、垂直グレーティングの静止パターンがストロボ呈示された時に起こる視運動性眼振 (optokinetic nystagmus, 以下 OKN) のパーシュート運動成分である緩徐相 (slow phase) がパターンの運動印象を生起させていると考え、この仮現運動をシグマ運動、知覚時の眼球運動をシグマ-OKN (sigma-OKN)、シグマ-パーシュート運動 (sigma-pursuit movement) と命名した。さらに、彼らはパーシュート運動速度と刺激の空間周波数 (パターン周期) と時間周波数 (ストロボ頻度) との間に線形関係があることを示した^{*1)}。

これまでの研究⁷⁾ によれば、シグマ運動の生起は、パーシュート運動の制御システム内で生じる遠心性コピー信号 (efference copy signal) と網膜からの求心性信号との相互作用によると説明されている。また、シグマ運動の脳内基盤が MST 野 (medial superior temporal area) であることを示唆する生理学的知見もある⁷⁾。MST 野は、パーシュート運動時の知覚の脳内基盤でもあると言われているので^{8,9)}、これらの研究から、シグマ運動知覚にはパーシュート運動の制御機構が強く関与していることが示唆される。しかし、遠心性コピー信号と網膜からの求心性信号とがどのように相互作用した結果、シグマ運動が生起するのか、詳細ははまだ明らか

*1 空間的周期性をもつパターンの極性を反転させた2枚の画像を高速転換 (フリッカー) 呈示した場合にも、フリッカー面上をパーシュート運動するとシグマ運動が観察される⁴⁾。フリッカー面上のある場所を注視した場合には、単なるちらついた画像しか知覚されないため、シグマ運動はパーシュート運動に依存した現象であることがわかる。

ではない。

本研究では、シグマ運動の知覚速度に及ぼすパーシュート運動の方向の効果および刺激の輝度・色や刺激の大きさの効果を、マグニチュード推定法を用いて調べることによってシグマ運動の特性を検討した。実験1ではパーシュート運動方向の効果、実験2では、刺激パターンの輝度・色の効果を、実験3では刺激面の大きさの効果を調べた。通常の運動刺激においては、運動閾¹⁰⁾や知覚速度¹¹⁾に水平・垂直方向の差があることが示されており、またパーシュート運動時の速度知覚にも水平方向より垂直方向のほうが速いという異方性が観察されている¹⁾ので、パーシュート運動に依存した運動錯視であるシグマ運動でも同様の異方性が観察されることが期待される。また、通常の運動刺激において輝度・色¹²⁾や大きさ^{11, 13, 14)}が速度知覚に影響するという知見が得られているので、シグマ運動でも同様の効果が得られることが期待される。

2. 実験1：パーシュート運動方向の効果

2.1 方法

2.1.1 被験者

正常な視力（矯正を含む）を有する大学生・大学院生7名が実験に参加した。

2.1.2 実験装置

2台のモニター（Iiyama HM 204D）を用いて刺激を呈示した（図1）。被験者から57.3 cmの距離の前額平行面上にモニター1を設置し、シグマ運動生起用のフリッカー刺激（図2）を呈示し、コンピュータ（IBM Netvista A30P）で制御した。刺激制御にはアプリケーションソフト（Delphi 5.0）を用いた。モニター1の画面に対してモニター2の画面が直角になるように設置し、パーシュート刺激を呈示し（図3）、コンピュータ（Fujitsu FMV-BIBLO NE5/600R）で制御した。刺激制御にはアプリケーションソフト（HSP 2.5）を用いた。2台のモニター画面はハーフミラーを用いて被験者の前額平行面視野に等距離に見えるように重ねて呈示された。

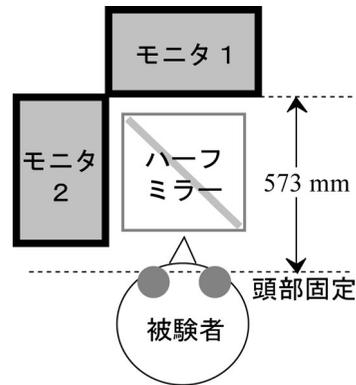


図1 実験装置の概略図。詳細は本文を参照。

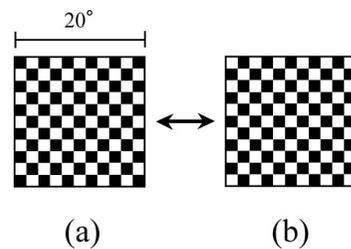


図2 本研究で用いたシグマ運動生起用のフリッカー刺激パターン。極性の異なる2枚の静止パターンを高速転換（フリッカー）呈示した画面上をパーシュート運動すると、パーシュート運動方向にパターン全体が運動して知覚される。(a) 黒白のチェッカーボードパターン。(b) (a)の極性を反転させたチェッカーボードパターン。モニター1に呈示された。

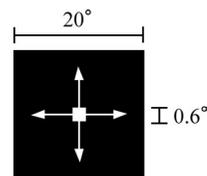


図3 指標用のパーシュート運動刺激。白色正方形が各初期位置（本文参照）から上下左右のどれか1方向へ直線運動する。この刺激はモニター2に呈示され、ハーフミラーによってフリッカー刺激（図2）と同時に知覚された。

2.1.3 実験刺激

刺激は、黒白（平均輝度 45 cd/m^2 ）極性の異なる2枚のチェッカーボード（視角 $20 \times 20^\circ$ 、各格子サイズ視角 $0.5 \times 0.5^\circ$ ）を用い（図2）、フ

リッカー呈示した。フリッカーの周波数は 16.7, 25, 50 Hz のいずれかであった。

パーシュート刺激は、黒背景上の白い正方形（視角 $0.6 \times 0.6^\circ$ ）で、水平または垂直に視角 20° の距離を一定方向に等速運動した。被験者の正中面上、眼の高さのモニタ画面中央から上下左右に視角 10° 離れた 4 つの点のいずれかを運動の初期位置とした。パーシュート刺激の運動速度は 7.5, 12.5, $25^\circ/\text{s}$ を用いた。これらの値は、予備実験に基づいて設定した。予備実験 ($N=3$) では、フリッカー周波数 16.7, 25, 50 Hz のチェッカーボード刺激上を水平移動する光点を指標にパーシュート運動し、光点の速度を被験者に調節させ、シグマ運動が最もよく知覚されるパーシュート刺激の運動速度を求めた。その結果、各フリッカー周波数 16.7, 25, 50 Hz 時のシグマ運動知覚に最適なパーシュート速度は、それぞれ 7.5, 12.5, $25^\circ/\text{s}$ であることがわかった。3 つのパーシュート刺激は、本実験で各フリッカー周波数条件のチェッカーボード刺激上に重ねて同時呈示した。

2.1.4 手続き

パーシュート刺激の速度条件を 3 水準（7.5, 12.5, $25^\circ/\text{s}$ ）、方向条件を 4 種類（L-R, R-L, DOWN, UP）設けた。パーシュート刺激速度と方向の両条件とも被験者内条件であった。これまでの研究結果から、本実験で用いた刺激速度の範囲においては刺激の速度と、パーシュート運動の速度とがほぼ一致する¹⁵⁾ことがわかっている。また、米村・中溝（2003）¹⁶⁾は、この刺激速度におけるパーシュート運動中の眼球運動をモニタした結果、パーシュート刺激の速度とパーシュート運動の速度とが、ほぼ一致することを確認した。これらの研究にもとづいて、本研究では被験者への眼球運動装置の装着による不快さ、煩雑さからパーシュート運動をモニタすることはせず、練習試行において運動刺激に対するパーシュート運動を十分に行った。

実験は室内照明下で行われた。被験者はチンレストによって頭部を固定し、両眼視でパーシュート刺激をパーシュート運動の指標として

注視および追視し、知覚された刺激面の運動速度を絶対マグニチュード推定法¹⁷⁾で答えた。速度推定のための基準は与えられず、被験者は、最初に観察したシグマ運動速度に対する主観的感覚量を 1 以上 100 未満の整数を用いて自由に数値化し、被験者個人の基準値（モデュラス）とした。次に被験者は観察した刺激の運動速度が、この基準値に対して相対的にどのくらいの値であるかを判断するように教示された。被験者は、実験試行前にパーシュート運動ならびにシグマ運動知覚のための練習試行を行なった。

1 試行の流れを図 4 に示す。刺激面中央に凝視点が呈示（1 s）された後、パーシュート刺激が上下左右いずれかの初期位置に呈示され、被験者はパーシュート運動を開始した。刺激は視角 20° の距離を移動した後、再び初期位置に戻り、同じ運動を最大 5 回繰り返した。その後、中央に凝視点が再呈示され、被験者は閉眼した状態で、推定した知覚速度を数字で口答報告した。各被験者は、パーシュート刺激速度 $3 \times$ 方向 4 の 12 条件を 1 ブロックとして、3 回繰り返した合計 36 試行を行った。試行順序は最初の刺激も含めて被験者間でカウンタバランスされた。

2.2 結果と考察

絶対マグニチュード推定法によって得られた知覚速度値は、被験者間で数値レベルが異なるため、各被験者の最小・最大値を指標に判断の比率関係を保ったまま、全被験者の値の範囲をそろえるデータ修正を行った。その後、被験者別に知覚速度の幾何平均を下位条件ごとに求め、対数変換した値を分析の単位とした。2 要因分散分析（パーシュート刺激速度 $3 \times$ 方向 4）を行った結果、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 12)=42.511, p<.001$]、方向の主効果 [$F(3, 18)=11.398, p<.001$]、及びパーシュート刺激速度と方向の交互作用 [$F(6, 36)=2.781, p<.05$] が有意であった。多重比較の結果、パーシュート速度条件（7.5, $12.5^\circ/\text{s}$ ）において水平方向（L-R, R-L）よりも垂直方向（DOWN, UP）が有意に大きいことがわかった。それぞれ

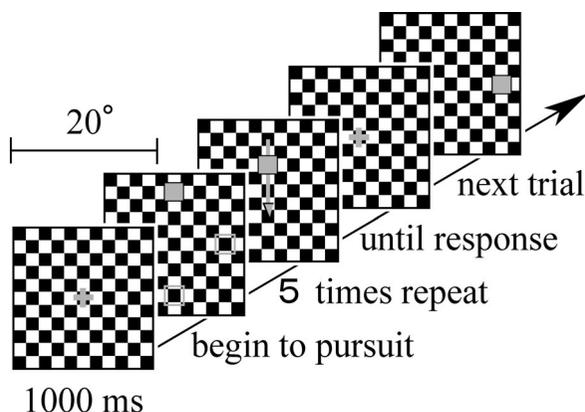


図4 実験1の刺激表示の流れ。刺激面は視角 $20 \times 20^\circ$ の正方形であった。

の方向内で有意な差はみられなかった。図5は、知覚速度の平均対数値をパーシュート刺激速度の関数として下位条件別にプロットしたものである。パーシュート刺激速度の主効果は、棒の長さの変化に、方向の主効果は白色と黒色の棒の長さの差に表れている。

統計的分析結果および図5から、 $7.5^\circ/s$ および $12.5^\circ/s$ の速度条件において、シグマ運動の知覚速度が水平方向よりも垂直方向が速いことがわかった。これはパーシュート運動の方向（水平・垂直）によって知覚される速度が異なるという速度知覚の異方性が、シグマ運動にも観察されたことを示している。本実験で示されたシグマ運動の速度知覚の異方性は、実際運動する点刺激をパーシュート運動した時の知覚速度を調べた米村ら（2003）¹⁾が見出した速度知覚の異方性と同様の結果であると考えられる。すなわち実験1の結果と先行知見¹⁾は、一般的にパーシュート運動時には物理的に同じ速度の刺激でも垂直方向のほうが水平方向より速く動くように知覚されることを示している。

シグマ運動は注視時には観察されず、パーシュート運動に固有の現象であることから、眼一頭系による速度処理過程のどこかで、その異方性が生み出されていることを示唆している。パーシュート運動における速度信号は、外眼筋の自己受容器からのフィードバック信号（いわゆるinflow）と動眼中枢から眼筋に送られる運

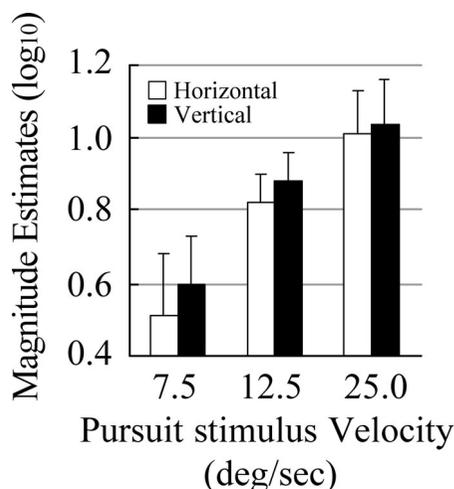


図5 実験1においてパーシュート運動速度の関数としてプロットされたシグマ運動の知覚速度の平均対数値（ $N=7$ ）。誤差棒は標準偏差を示す。

動信号のコピー（いわゆる efference copy）のいずれか、あるいは両方に基づくと考えられているので^{4, 18, 19)}、それらの速度信号に水平垂直差があることが示唆される。この問題については総合考察で議論する。

3. 実験2：輝度・等輝度色刺激の効果

シグマ運動の知覚速度に及ぼす刺激の輝度・色の効果を調べた。従来^{3, 5, 6)}用いられてきたシグマ運動知覚を生起させる刺激は、輝度で定義されるパターンがほとんどであり、色のみで定義された等輝度色刺激を用いた研究はまだな

い。通常の運動刺激の速度知覚については、等輝度色刺激よりも輝度刺激のほうが速く知覚されるという知見¹²⁾があるので、シグマ運動の速度知覚にも同様の効果が観察されるかもしれない。この予測を調べることが実験2の目的であった。

3.1 方法

3.1.1 被験者

正常な視力（矯正を含む）を有する大学生・大学院生が、輝度・色刺激の2条件についてそれぞれ6名ずつランダムに割り当てられ、合計12名が実験に参加した。

3.1.2 実験装置

実験1と同じであった。

3.1.3 実験刺激

刺激は、輝度・色の2種類であった。極性の異なる2枚のチェッカーボード（視角 $20\times 20^\circ$ 、各格子サイズ視角 $0.4\times 0.4^\circ$ ）は、黑白（平均輝度 45cd/m^2 ）の輝度刺激、および赤緑の主観的等輝度色刺激（以下、色刺激）を用いた。色刺激は、被験者ごとにフリッカー交照法で求めた等輝度色を用いて作成した（作成手続きについては手続きの項を参照）。シグマ運動刺激のフリッカー周波数は12.5, 16.7, 25 Hzで、それぞれパーシュート刺激の運動速度5, 10, 15°/sに対応していた。その他は実験1と同じであった。

3.1.4 手続き

刺激の輝度・色条件を2種類、パーシュート刺激の速度条件を3水準（5, 10, 15°/s）、方向条件を4種類設けた。輝度・色条件は被験者間、パーシュート刺激速度と方向は被験者内条件であった。

実験は準暗所下で行われた。輝度条件の被験者は、暗順応後に実験試行を開始した。色条件の被験者は、実験に先だてて交照法による色刺激を作成した。交照法では、赤緑色のチェッカーボード（視角 $10\times 10^\circ$ 、各格子サイズ視角 $0.4\times 0.4^\circ$ ）を用い、赤色の輝度（輝度 15cd/m^2 ）を固定し、緑色の輝度（被験者平均輝度 9.8cd/m^2 ）を調節することによって等輝度刺激を決定した。極性の異なる2枚の赤緑チェッ

カーボードを高速転換させた画面を呈示し、被験者はちらつき感が最も小さくなるように緑刺激の輝度を調節し（12試行）、得られた緑輝度の平均値を用いて、各被験者のシグマ運動観察に用いる色条件刺激とした。

本試行において、被験者は、シグマ運動知覚時の面全体の速度をマグニチュード推定法¹⁷⁾で答えた。速度推定の基準値（モデュラス）には、輝度条件におけるパーシュート刺激の速度 $10^\circ/\text{s}$ で、左から右方向に運動する刺激（方向L-R条件）を用いた。モデュラスと速度判断用の実験条件刺激は継時的に呈示した。被験者は基準値を10として、実験条件刺激の運動速度が、この基準値に対して相対的にどのくらいであるかを判断するように教示された。1試行では、先にモデュラスを3回、後に実験条件刺激を最大5回繰り返した。他の刺激呈示については実験1とほぼ同様であった。各被験者は、各輝度・色条件において、パーシュート刺激速度 $3\times$ 方向4の12条件を1ブロックとして、3回繰り返した合計36試行を行った。試行順序は被験者間でカウンタバランスされた。

3.2 結果と考察

各被験者の知覚速度の幾何平均値を分析の単位とした。3要因分散分析（輝度・色 $2\times$ パーシュート刺激速度 $3\times$ 方向4）を行った結果、輝度・色条件の主効果は有意ではなかった [$F(1, 10)=0.309, n.s.$] (図6) パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 20)=93.337, p<.0001$] と方向の主効果 [$F(3, 30)=7.904, p<.001$] は有意であった。全ての条件間における交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、全てのパーシュート刺激速度条件において水平方向（L-R, R-L）よりも垂直方向（DOWN, UP）が有意に大きいことがわかった。それぞれの方向内で有意な差はみられなかった。図6は、知覚速度の平均をパーシュート刺激速度の関数として輝度・色条件別にプロットしたものである。輝度、色条件の主効果が有意でなかったことは、図6において白色と黒色の棒の長さにほとんど差が無いことに示されている。パーシュート刺激

速度の主効果は、棒の長さの変化に示されている。

輝度と色条件についてそれぞれ2要因分散分析（パーシュート刺激速度3×方向4）を行った。輝度条件においては、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 10)=43.303, p<.0001$] と方

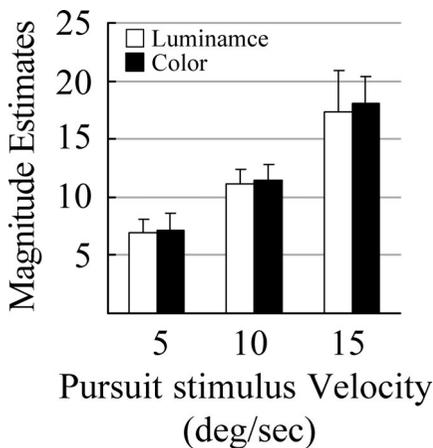


図6 実験2においてパーシュート運動速度の関数としてプロットされたシグマ運動の知覚速度の平均値（輝度、色条件：各 $N=6$ ）。誤差棒は標準偏差を示す。

向の主効果 [$F(3, 15)=6.692, p<.01$] は有意（図7a）で、交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、全てのパーシュート刺激速度条件において水平方向（L-R, R-L）よりも垂直方向（DOWN, UP）が有意に大きいことがわかった。水平方向内、垂直方向内それぞれの間に有意な差はみられなかった。一方色条件においては、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 10)=50.240, p<.0001$] のみ有意で、方向の主効果 [$F(3, 15)=1, 567, n.s.$] と交互作用は有意ではなかった。図7は、輝度・色条件それぞれの被験者6名の平均値をパーシュート刺激速度の関数としてプロットしたものである。

統計的分析結果および図6から、色刺激をフリッカーさせたシグマ運動の知覚速度が、輝度刺激でのシグマ運動とほぼ同じであることがわかった。この結果は通常の運動刺激を用いて色運動と輝度運動の知覚速度の差を示した先行研究¹²⁾と異なっている。このことは、シグマ運動の知覚と通常の運動知覚との違いを示唆していると同時に、眼-頭系の速度検出機構が、等輝度色刺激の影響をほとんど受けないことを意味しているのかもしれない。

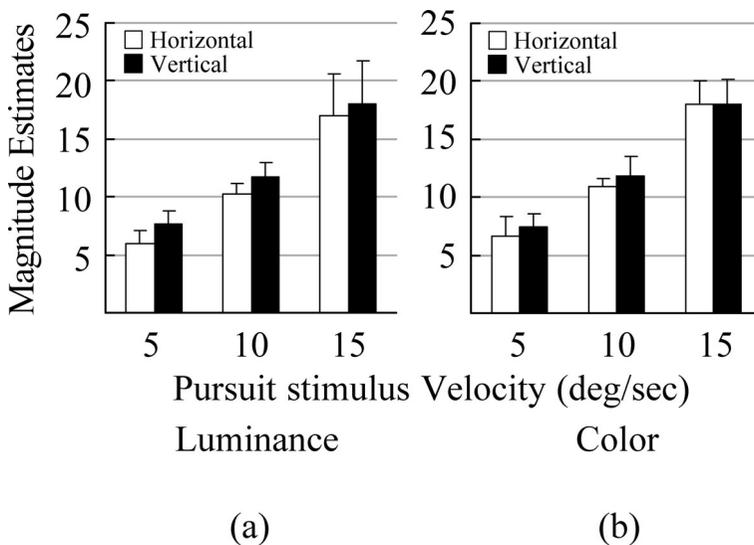


図7 実験2において輝度・色条件別にパーシュート運動速度の関数としてプロットされたシグマ運動の知覚速度の平均値。誤差棒は標準偏差を示す。(a) 輝度条件における知覚速度値 ($N=6$)。 (b) 輝度条件における知覚速度値 ($N=6$)。

4. 実験3：刺激の大きさの効果

シグマ運動の知覚速度に及ぼす刺激の大きさの効果を調べた。パーシュート運動時の知覚速度は、刺激が小さくなると過大評価される^{11,13,14)}という知見が得られているので、シグマ運動の速度知覚にも同様の効果が観察されるかもしれない。この予測を調べるのが実験3の目的であった。

4.1 方法

4.1.1 被験者

正常な視力（矯正を含む）を有する大学生・大学院生が刺激の大きさの3条件についてそれぞれ7名ずつランダムに割り当てられ、合計21名が実験に参加した。

4.1.2 実験装置

実験1と同じであった。

4.1.3 実験刺激

刺激は、実験2の輝度条件で用いた黒白極性の異なる2枚のチェッカーボード（格子サイズは視角 $0.4 \times 0.4^\circ$ で固定）を用いた。刺激面の大きさは一辺視角10, 20, 30° の正方形の3種類であった（図8）。パーシュート刺激の移動距離は、全ての大きさ条件において視角 20° に固定された。その他の刺激条件は実験2と同じであった。

4.1.4 手続き

刺激の大きさ条件が3水準、パーシュート刺激の速度条件が3水準（5, 10, $15^\circ/s$ ）、方向条件を4種類設けた。大きさ条件は被験者間、パーシュート刺激速度条件と方向条件は被験者内条件であった。1試行の内容は、全て実験2の輝度条件と同じであった。パーシュート刺激の移動距離が視角 20° であるため、被験者は大きさ 10° 条件では刺激をまたぐ形で、大きさ 30° 条件では刺激内の一部分でパーシュート運動を行った。各被験者は、各大きさ条件において、パーシュート刺激速度 $3 \times$ 方向4の12条件を1ブロックとして、3回繰り返した合計36試行を行った。試行順序は被験者間でカウンタバランスされた。

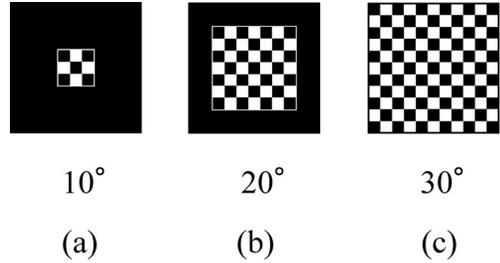


図8 実験3で用いた大きさ条件の刺激例。(a) 10° 条件の刺激例。刺激面は視角 $10 \times 10^\circ$ の正方形であった。(b) 20° 条件の刺激例。刺激面は視角 $20 \times 20^\circ$ の正方形であった。(c) 30° 条件の刺激例。刺激面は視角 $30 \times 30^\circ$ の正方形であった。

4.2 結果と考察

各被験者の知覚速度の幾何平均値を分析の単位とした^{*2}。3要因分散分析（大きさ $3 \times$ パーシュート刺激速度 $3 \times$ 方向4）を行った結果、大きさの主効果 [$F(2, 18) = 4.801, p < .05$]、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 36) = 179.869, p < .0001$]、方向の主効果 [$F(3, 54) = 12.207, p < .0001$] は統計的に有意であった。全ての条件間の交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、全ての速度条件において水平方向（L-R, R-L）よりも垂直方向（DOWN, UP）において知覚速度が有意に大きいことがわかった。それぞれの方向内で有意な差はみられなかった。図9は、知覚速度の平均をパーシュート刺激速度の関数として大きさ条件別にプロットしたものである。大きさの主効果は、各速度条件において大きさの違いを表す3本の棒の相対的な長さの差に表れている。

大きさ条件のそれぞれについて2要因分散分析（パーシュート刺激速度 $3 \times$ 方向4）を行った。大きさ 10° 条件においては、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 12) = 81.052, p < .0001$] は有意で、方向の主効果 [$F(3, 18) = 2.648, p < .10$] には有意傾向がみられ、交互作用は有意ではなかった。全ての速度条件にお

*2 大きさ 20° 条件の分析は、実験2の輝度条件データ（ $N=6$ ）に被験者1名のデータを加えた計7名の幾何平均値を用い、他の大きさ条件と比較した。

いて水平方向 (L-R, R-L) よりも垂直方向 (DOWN, UP) が大きい傾向にあった。大きさ 20° 条件においては、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 12)=36.697, p<.0001$] と方向の主効果 [$F(3, 18)=5.203, p<.01$] は有意で、交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、全ての速度条件において水平方向よりも垂直方向において知覚速度が有意に大きいことがわ

かった。大きさ 30° 条件においては、パーシュート刺激速度の主効果 [$F(2, 12)=88.247, p<.0001$] と方向の主効果 [$F(3, 18)=11.535, p<.0005$] は有意で、交互作用は有意ではなかった。多重比較の結果、全ての速度条件において水平方向よりも垂直方向において知覚速度が有意に大きいことがわかった。大きさ 3 条件いずれも、各方向内で有意な差はみられなかった。図 10a, b, c は、大きさ 3 条件別にそれぞれの被験者 7 名の平均値をパーシュート刺激速度の関数としてプロットしたものである。

統計的分析結果および図 9 から、実験 3 においても実験 1, 2 で得られた速度知覚の異方性が確認された。さらにまた、刺激が小さいほど知覚速度が速くなることがわかった。この結果は運動刺激が小さくなると速度が過大評価されることを示した先行研究^{11,14)} と一致した。パーシュート運動の距離は視角 20° に固定されていたので、得られた知覚速度の差は、刺激の大きさの違いによって生み出されたと考えられる。このことは、実際運動の場合と同様に、刺激の大きさがシグマ運動の速度知覚に影響を与えたことを示している。

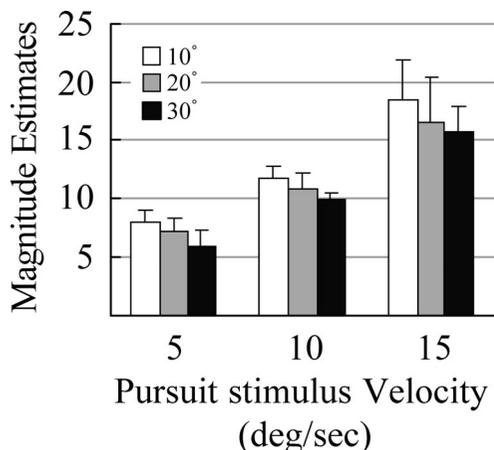


図 9 実験 3 においてパーシュート運動速度の関数としてプロットされたシグマ運動の知覚速度の平均値 (10, 20, 30° 条件: 各 $N=7$)。誤差棒は標準偏差を示す。

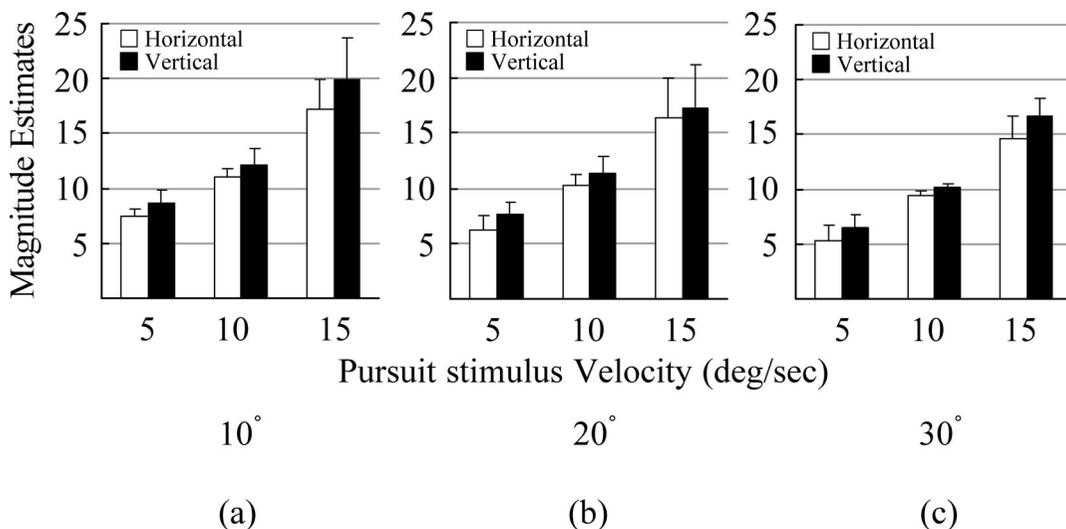


図 10 実験 3 において大きさ条件別にパーシュート運動速度の関数としてプロットされたシグマ運動の知覚速度の平均値。誤差棒は標準偏差を示す。a) 10° 条件における知覚速度値 ($N=7$)。b) 20° 条件における知覚速度値 ($N=7$)。c) 30° 条件における知覚速度値 ($N=7$)。

5. 総合考察

5.1 パーシュート運動時の速度知覚における異方性

本研究の主たる目的は、シグマ運動において速度知覚の異方性が生起するという予測を検証することであった。この予測は、実際運動する刺激をパーシュート運動したときの速度知覚に異方性が観察されたという結果に基づいている。シグマ運動は、パーシュート運動依存の運動錯視なので、おそらくシグマ運動でも知覚された運動速度に異方性が反映されるはずである。実験の結果、予測どおり、シグマ運動においても先行研究^{1,11)}で観察された実際運動と同様の異方性が確認された。この事実は、パーシュート運動に基づく運動知覚にはある速度範囲において、水平方向と垂直方向の知覚速度に差（速度知覚の異方性）が生じるということが一般的に主張できることを意味する。

パーシュート運動時の知覚速度の異方性はどこで生まれるのだろうか。本実験結果からこの問題の直接的解答を得ることはできないが、パーシュート運動時の運動知覚のメカニズムを考察することによって、異方性の原因を推測することができる。

われわれの知る限り、これまで速度知覚の研究対象として主流であった像-網膜系による速度知覚において異方性が観察されたという報告はないので^{*3}、異方性は眼-頭系²⁾による速度知覚に限定されて生じる現象であると言える。例えば、米村ら（2003）¹⁶⁾は、実際運動する（2.5~25°/s）刺激の知覚速度を固視条件とパーシュート条件で比較した。その結果、固視条件では異方性は観察されず、パーシュート条件でのみ異方性が観察された。異方性が眼-頭系による運動知覚に限定されるということは、眼-頭系で生み出される速度信号に方向による差が

^{*3} ただし運動知覚全体で言えば、閾値¹⁰⁾で異方性が報告されている（水平方向よりも垂直方向の運動に対する閾値は低い）、また速度知覚では統計的有意差はないが異方性の存在を示唆している報告がある¹¹⁾。

生じていることを示唆する。

パーシュート運動が非常に正確である（つまりパーシュート運動中、運動対象の網膜像が中心窩に固定されている）と仮定すると、パーシュート運動において生み出される運動対象の速度信号には2つの選択肢がある。1つは、遠心性運動信号のコピー（efference copy）であり^{8, 20, 21)}、もう1つは動眼筋から中枢にフィードバックされる自己受容感覚信号（proprioceptive sensory signal）である²¹⁾。前者は、眼-頭系による運動視を説明する流出仮説（outflow theory）が仮定する速度信号であり、後者は流入仮説（inflow theory）が仮定する速度信号である^{2, 21)}。本研究や米村ら（2003）^{4, 16)}が観察した知覚速度の異方性は、これらのどちらかの信号、あるいは両方の信号に水平方向と垂直方向で差があることを示唆している^{*4}。

流出説あるいは流入説のどちらか、あるいは双方がともに正しいかどうかにかかわらず、水平方向のパーシュート運動と垂直方向のそれとの間では、駆動される眼筋が異なっており、そのことが速度信号の差を生み、速度知覚の異方性の1つの原因になっていることも推測される。水平方向の眼球運動では内直筋と外直筋が、一方、垂直方向の眼球運動では上直筋と下直筋が使われている^{18, 19)}。これらの眼筋の収縮・伸張を駆動する遠心性コピー信号、もしくはこれらの眼筋から知覚中枢に送られるフィードバック信号において、それぞれの直筋の間で速度信号に差が生じていることが推測できる。

上の推測の直接的証拠は、まだ得られていないが、従来の神経生理学的研究結果から、間接的証拠が示されている。例えば、Mulligan（2003）²²⁾は、運動対象を追視する時の眼筋電図のインパルス応答に方向差があることを見いだしている。また、‘眼球運動系の中枢神経機構は、水平系と垂直系の2つの系からなっている（p. 472）’ことが示されている¹⁸⁾。これらの

^{*4} シグマ運動に関しては、パーシュート運動時の遠心性コピー信号が用いられていることを示唆する研究がある^{4, 6, 7)}。

知見は、水平方向と垂直方向の間で、パーシュート運動時の速度信号に違いがあることを強く示唆している。

しかし最近、パーシュート運動時の速度知覚には眼-頭系と像-網膜系の両方が関与しているという考えが提案された。Turano and Massof (2001)²³⁾は、速度知覚における眼球速度信号(眼-頭系)と網膜信号(像-網膜系)の関係を非線形モデルで説明できることを示した。パーシュート刺激とパーシュート運動がわずかでもずれると、眼-頭系に加え像-網膜系による速度信号が速度知覚に関与してくると考えられる。ただ、シグマ運動の速度知覚はパーシュート運動に依存して生起することが明らかなので、本研究で得られた異方性は、像-網膜系というよりも眼-頭系の影響だけを受けている可能性が非常に高い。

5.2 速度知覚における刺激要因：輝度・色と大きさ

実験2, 3の結果から、シグマ運動の知覚速度は、1) 輝度・色刺激の間で等しかったこと、2) 刺激が大きくなるほど遅くなることがわかった。これらの結果について考察する。

色刺激と輝度刺激の間で、知覚された速度に差が得られなかったという結果は、シグマ運動と実際運動の差を反映していることを示唆している。従来の研究では物理的に等速度の場合、色運動の知覚速度のほうが輝度運動よりも小さいという結果が得られている^{12, 24)}。この結果は、運動の輝度情報と色(等輝度)情報が独立した経路で処理される^{24, 25)}ことを意味していると解釈されている。しかし、パーシュート運動時に限定されて起こるシグマ運動の知覚速度において、色刺激と輝度刺激の間で差が得られなかったという結果は、色・輝度の運動視に及ぼす影響が、眼-頭系と像-網膜系で異なることを示唆している。この予測については、現在当研究室で検討中である。

刺激の大きさが増加するにつれて知覚速度が減少したという結果は、シグマ運動と実際運動との共通性を反映している。実際運動の知覚に

関する研究^{11, 14, 26)}は、運動刺激と周辺情報(例えば、刺激が呈示される枠組み)との相対の大きさが知覚速度に影響することを示している²⁷⁾。例えば、運動刺激の呈示枠が大きくなると知覚速度が遅くなるという知見¹¹⁾とが得られている。本実験でも、刺激要素(チェッカーボードの格子)の大きさは一定であったので、刺激全体の大きさ(刺激呈示枠の大きさで定義)が増加すると刺激全体の運動に対する刺激を構成する要素の相対的な大きさの比が減少する。このことが、知覚速度の減少を生み出したと推測される。

従来の研究で、運動刺激の呈示枠が大きくなると知覚される運動距離や時間が長くなるために知覚速度が減少したという報告¹¹⁾がある。本実験でも、刺激が大きくなるとシグマ運動が知覚された距離・時間が増加した。このことが知覚速度の減少を生み出した可能性は大きいと考えられる。いずれにしても、これら刺激の大きさが知覚速度に与える影響は、像-網膜系だけでなく眼-頭系の速度知覚とも共通していることが明らかになった。

また、本実験で見いだされた刺激の大きさの効果は、速度知覚における速度情報の大域的(global)な処理過程と、局所的(local)な処理過程の差を反映しているのかもしれない。速度知覚における大きさの影響はより大域的な速度処理過程で生じていると考えている。本実験ではシグマ運動知覚時の要素(格子)の運動量はどの大きさ条件でも同じであるので、局所的な運動情報量は同じであるといえる。しかし、運動領域全体の運動量は大きさ条件によって異なっていた。この大域的な運動情報量の差が知覚速度の差を生み出したと推測できる。

本研究で得られた刺激要因の影響は、シグマ運動がパーシュート運動依存の現象であるために、主に眼-頭系における速度知覚特性であるといえる。知覚速度が刺激条件によってどのように異なるか、そのメカニズムを解明するためには、今後、パーシュート運動自体が刺激特性によってどのように変化するかについて調べ

ていく必要があると考えられる。

謝辞 有意義なコメントを頂いた査読者に深く感謝致します。シグマ運動現象については、鹿児島大学教育学部の川畑秀明氏に、実験2の等輝度色刺激の設定については、九州大学大学院芸術工学研究院の須長正治氏に、実験プログラム作成については九州大学文学部心理学研究室技官の黒木大一郎氏に助言を頂きました。また研究室の皆さんからも多くの助言と協力を頂きました。深く感謝致します。

本研究は、文部科学省21世紀COEおよび情報通信研究機構(NICT)による国際共同研究および文部科学省科学研究費基盤研究C(2)[課題番号14510100 研究代表者中溝幸夫]から研究助成を受けた。

文 献

- 1) 米村朋子, 中溝幸夫, 川畑秀明: シグマ運動の知覚速度に関するパーシュート眼球運動方向の効果. *日本心理学会第67回大会発表論文集*, 519, 2003.
- 2) R. L. Gregory: *Eye and Brain: The psychology of seeing* (5th ed). Oxford University Press. 1998.
- 3) O.-J. Grüsser, M. Pause and U. Schreier: Three methods to elicit Sigma-optokinetic nystagmus in Java monkeys. *Experimental Brain Research*, **35**, 519–526, 1979.
- 4) F. Behrens and O.-J. Grüsser: Smooth pursuit eye movements and optokinetic nystagmus elicited by intermittently illuminated stationary patterns. *Experimental Brain Research*, **37**, 317–336, 1979.
- 5) C. Lamontagne, F. Gosselin and R. T. Pivik: Sigma smooth pursuit eye tracking: constant k values revisited. *Experimental Brain Research*, **143**, 130–132, 2002.
- 6) C. Lamontagne: A new experimental paradigm for the investigation of the secondary system of human visual motion perception. *Perception*, **2**, 167–180, 1973.
- 7) F. Behrens, O.-J. Grüsser and L.-R. Weiss: Sigma-optokinetic nystagmus in squirrel monkeys elicited by stationary stripe patterns illuminated by regular and random-interval flash sequences. *Experimental Brain Research*, **124**, 455–468, 1999.
- 8) W. T. Newsome, R. H. Wurtz and H. Komatsu: Relation of cortical areas MT and MST to pursuit eye movements. II. Differentiation of retinal from extraretinal inputs. *Journal of Neurophysiology*, **60**, 604–620, 1988.
- 9) H. Komatsu and R. H. Wurtz: Relation of cortical areas MT and MST to pursuit eye movements. I. Localization and visual properties of neurons. *Journal of Neurophysiology*, **60**, 580–603, 1988.
- 10) W. T. Pollock: The visibility of a target as a function of its speed of movement. *Journal of Experimental Psychology*, **45**, 449–451, 1953.
- 11) T. Oyama: The visually perceived velocity as a function of aperture size, stripe size, luminance, and motion direction. *Japanese Psychological Research*, **12**, 163–171, 1970.
- 12) P. Cavanagh, C. W. Tyler and O. E. Favreau: Perceived velocity of moving chromatic grating. *Journal of the Optical Society of America*, **A1**, 893–899, 1984.
- 13) J. F. Brown: The visual perception of velocity. *Psychologische Forschung*, **14**, 199–232, 1931.
- 14) J. E. Raymond: The interaction of target size and background pattern on perceived velocity during visual tracking. *Perception and Psychophysics*, **43**, 425–430, 1988.
- 15) R. A. Williams and D. H. Fender: Velocity precision in smooth pursuit eye movements. *Vision Research*, **19**, 343–348, 1979.
- 16) 米村朋子, 中溝幸夫: 速度知覚におけるパーシュート眼球運動の効果の有無と方向の効果. *基礎心理学研究*, **22**, 237 (大会発表要旨), 2003.
- 17) G. A. Gescheider: *Psychophysics: The*

- fundamentals (3rd ed). Lawrence Erlbaum Associates, 1997. 宮岡 徹 (監訳) : 心理物理学 (上巻). 北大路書房. 2002.
- 18) 篠田義一 : 眼球運動系. 伊藤正男 (監) : 脳神経科学. 三輪書店, 471-487, 2003.
- 19) G. K. von Noorden: Binocular vision and ocular motility: theory and management of strabismus. Mosby, St. Louis, 1980.
- 20) 古賀一男 : 眼球運動実験ミニ・ハンドブック. 労働科学研究所出版, 1998.
- 21) S. Yasui and L. R. Young: Perceived visual motion as effective stimulus to pursuit eye movement system. *Science*, **190**, 906-908, 1975.
- 22) J. B. Mulligan: Anisotropy in the eye-movement correlogram. *Perception*, **32** (supplement), 23, 2003.
- 23) K. A. Turano and R. W. Massof: Nonlinear contribution of eye velocity to motion perception. *Vision Research*, **41**, 385-395. 2001.
- 24) 吉澤達也 : 色情報の運動視への寄与. *Vision*, **15**, 17-23, 2003.
- 25) K. T. Mullen and J. C. Boulton: Absence of smooth motion perception in color vision. *Vision Research*, **32**, 483-488, 1992.
- 26) O. W. Smith: Effects of window size and two conditions of judgment on the perception of objective velocity. *Journal of Experimental Psychology*, **55**, 416-422, 1958.
- 27) I. Rock: An introduction to perception. Macmillan, New York, 1975.