

蛇の回転錯視に随意性追従眼球運動が及ぼす効果

矢嵩 翠・一川 誠

千葉大学 文学部

〒263-8522 千葉市稲毛区弥生町 1-33

michikawa@chiba-u.jp

(受付：2015年6月29日；受理：2015年11月9日)

Effects of Voluntary Smooth Pursuit upon the Illusory “Snake Rotation”

Midori YAJIMA and Makoto ICHIKAWA

Faculty of Letters, Chiba University

1-33 Yayoicho, Inage, Chiba, Chiba 263-8522, Japan

(Received 29 June 2015 ; Accepted 9 November 2015)

In order to examine how the voluntary smooth pursuit eye movement and other factors, such as retinal slip, which is caused by stimulus movement, affect the illusory snake rotation (Kitaoka, 2005), we conducted three experiments in which observer voluntarily pursuit a moving fixation point. Results of the experiments showed that the smooth pursuit, which is larger than 5.0 deg, facilitates the illusory rotation. However, because the afterimage could generate the substantial illusory rotation, the eye movement, or retinal slip which is caused by stimulus or eye movement, is not the necessary to obtain the illusory rotation. Based upon the results of the present study, we proposed an observation method that would enable to obtain a vivid illusory rotation even for the observer who had difficulty to obtain the illusory rotation in viewing the category of the Fraser–Wilcox illusion with the normal observation.

1. はじめに

暗から明のグラデーションの繰り返しパタンの観察で運動錯視が生じる。たとえば、このグラデーションパターンを円状に配置すると、その円内に回転運動が見える錯視が生じる。この運動錯視はフレーザー・ウィルコックス錯視と呼ばれる¹⁾。また、運動錯視は無彩色での輝度変調のみでも生じるが、色彩を用いた場合により顕著な運動錯視が生じる。特に、白、黄、黒、青の順で配列された要素を同心円的に配列したもの (Fig. 1) は強い回転運動の錯視が生じることが知られており、「蛇の回転錯視」と呼ばれる^{2,3)}。ただし、この錯視図形に関して、運動

錯視が見えにくい観察者がいることが知られている。本研究は、この錯視の成立過程について理解を深めるとともに、多くの観察者にとって、この錯視を観やすくなる条件を明らかにすることを目的とした。

「蛇の回転錯視」に関しては、種々の眼球運動がその成立に重要な役割を果たしていることが先行研究から示唆されている。たとえば、Otero-Millan, Macknik and Conde⁴⁾の研究では、錯視生起のタイミングとマイクロサッカーの発生頻度に正の相関が見られた。また、回転錯視の生じない輝度要素パターンからなる図形の観察と、錯視を生じる輝度要素パターンからなる図形の観察とでマイクロサッカーの発生頻

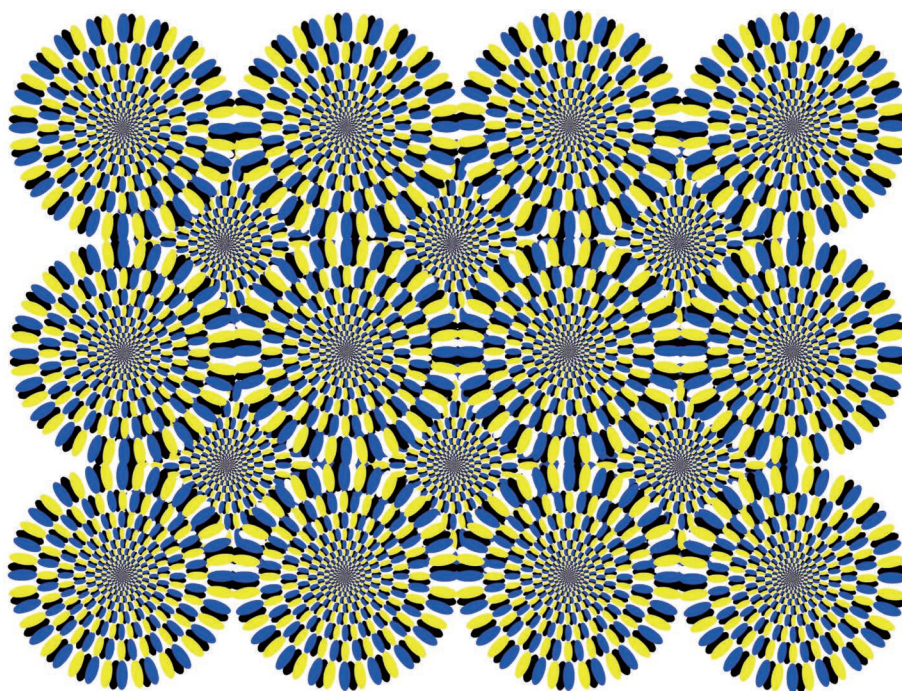


Fig. 1. Rotating Snake Illusion. The same figure was used in Experiments 1 and 3.

度に有意差が見られた。これらの結果から、彼らは、マイクロサッカーが回転錯視を引き起こしている可能性を指摘した。マイクロサッカーは、0.03～5.0秒の時間間隔で発生する10min以下で速度10deg/s以上の、小さく高速の不随意性の跳躍的眼球運動である^{5,6)}。他方、Beer, Heckel and Greenlee⁷⁾は、注視点の固視がより不安定になる条件で蛇の回転錯視が見えやすくなったことから、別の不随意性眼球運動であるドリフトが回転錯視を引き起こしている可能性を指摘した。ドリフトは、1秒に1min程度の割合で発生する平均5min程度のゆっくりした不随意性の眼球運動である⁸⁾。これらの先行研究は、マイクロサッカーやドリフト等の不随意性の眼球運動により生じる刺激図形の網膜像のスリップから得られる運動信号が回転錯視を成立させている可能性を示唆している。

一方、随意性の眼球運動についても、蛇の回転錯視への寄与が指摘されている。Kuriki, Ashida, Murakami and Kitaoka⁹⁾のfMRIを用いた研究では、この回転錯視による回転運動の

知覚において、自発的で随意的な、刺激領域内を視点が移動するような随意性の眼球運動を行わせたときにhMT+の活動が活発になったことが示された。ただし、この実験では、随意性の眼球運動の頻度や大きさが各被験者に任されており、具体的にどの程度の大きさの随意性の眼球運動が回転錯視に寄与したのかについては検討されなかった。

蛇の回転錯視については、上述したように、錯視量だけではなく、そもそもこの錯視の成立自体に大きな個人差がある。この錯視が見えにくい観察者であっても錯視を成立させる方法を探すことは本研究の主要な目的の一つである。どの観察者にとってもこの錯視の成立を可能にする観察方法を得ることを考えた場合、錯視の成立に眼球運動が関わっているのであれば、不随意性の眼球運動より随意性の眼球運動の方が利用しやすいだろう。そこで、本研究では、随意性の眼球運動として、移動する注視点に対する追従眼球運動(Smooth Pursuit)に着目し、随意性の追従眼球運動が蛇の回転錯視に及ぼす効

果を調べた。追従眼球運動とは、両眼が同じ方向に運動対象を視線で追うときに発生する滑らかで連続的な随意性の眼球運動である。追従眼球運動の大きさや速度などは追視する対象の運動に依存するが、その開始や継続、終了は随意的に観察者が決めることができる。随意性の眼球運動の有無や、その大きさが、回転錯視の成立にどのように寄与するのか検討するため、3つの実験を行った。

2. 実験 1

実験1では、随意的な追従眼球運動の有無が蛇の回転錯視の成立にどのような影響を及ぼすのか検討した。特に、固定した注視点を固視した場合にはこの錯視が成立し難い観察者にとって、移動する注視点に対する追従眼球運動が錯視の成立にどのような影響を及ぼすのか調べた。

随意的な眼球運動中には不随意的なマイクロサッカドやドリフトが抑制される可能性がある^{10, 11)}。マイクロサッカドやドリフトによって生じる網膜像のスリップがこの運動錯視の成立に重要な役割を果たしているのであれば、移動する注視点を追視することによって、回転錯視がむしろ抑制されるかもしれない。その場合でも、刺激図形の網膜上での不随意的な位置移動があれば、錯視は成立するかもしれない。この可能性についても検討するため、これらの不随意性の眼球運動によって生じる刺激網膜像を模した網膜画像の位置移動が、追従眼球運動による錯視への影響や、この錯視の成立自体に及ぼす影響についても調べた。

2.1 方法

2.1.1 実験参加者

大学生22名（男性6名、女性16名、 $M=21.4$, $SD=1.53$ ）が実験に参加した。参加者は、矯正視力を含め、全員が正常な視力を有していた。

2.1.2 刺激と装置

実験は暗室で参加者別に行われた。CRTモニター（MITSUBISHI RD17S, 1152×870, 75.1Hz）

を用いてディスプレイに刺激画像を提示した。観察距離を37.5 cmに固定するため、顎台を用いた。参加者の目の高さはおおよそ画面の中心に合わせた。

刺激図形はKitaoka and Ashida¹²⁾の輝度配置に沿って作成した。刺激図形を構成する4色のうち、白のCIE色度座標は $x=0.286$, $y=0.318$, 輝度は 70.18 cd/m^2 , 黄のCIE色度座標は $x=0.397$, $y=0.512$, 輝度は 61.24 cd/m^2 , 黒のCIE色度座標は $x=0.279$, $y=0.182$, 輝度は 0.24 cd/m^2 , 青のCIE色度座標は $x=0.145$, $y=0.073$, 輝度は 7.37 cd/m^2 であった。基本の円盤図形とそれを180度反転させた図形を交互に配置した。基本の円盤図形は時計回りに、反転させた図形は反時計回りに回転錯視が生じる構成であった。白色背景上に直径5 degの円盤図形を横4×縦3で並べた（Fig. 1）。刺激全体のサイズは $20 \text{ deg} \times 15 \text{ deg}$ であった。注視点として $23.9 \times 23.7 \text{ arc min}$ の十字を用いた。刺激画像上でも注視点を見やすくするため、その中心から約48 arc minの正方形の範囲内は白色とした。

2.1.3 手続き

各試行で刺激図形は15.5秒間提示された。実験条件として、追従眼球運動（有無）×画像移動（画像静止、低速画像移動、高速画像移動）の6条件を用意した。追従眼球運動無条件では、各試行は白色画面の中心に注視点を提示することから始められた。観察の準備ができたなら参加者がスタートキーを押し、その266.7 ms後に15.5秒間の刺激提示が開始された。追従眼球運動有条件では、各試行は白色画面中心より右7.5 degの位置に注視点が提示されることから始められた。観察の準備ができたなら、参加者がスペースキーを押し、その266.7 ms後に刺激提示が開始された。画像提示開始500 ms後に、注視点が速度 10 deg/s の定速で左方向に移動を開始し、中心から左右7.5 degの位置に達したところで折り返し、2回往復運動した。参加者には注視点を目で追試し続けるように教示した。

画像移動条件のうち、画像静止条件では、

刺激画像は画面上に固定された。他方、低速画像移動条件では、画像提示開始から633.3, 3750, 7500, 11250ms後の4回、速度1min/sで2507ms間、垂直方向に画像が位置移動した。この移動距離と頻度は、上述したドリフトの特性に対応して設定された。高速画像移動条件では、画像提示開始から1793.3, 3750, 7500, 11250ms後の4回、速度0.5deg/sで186.7ms間、垂直方向に刺激画像が位置移動した。この移動距離と頻度は、マイクロサッカードに関する先行研究¹³⁾をもとに設定されたが、この値は上述のマイクロサッカードの特性よりは低速度であった。

各試行において、刺激画像の観察中、参加者には、回転運動が見えた際にはjキーを、運動が見えなくなった際にはkキーを押すよう教示した。いったん回転運動が見えなくなっても、再び回転運動が見えればjキーを押すこと、また、刺激画像のどれか1つでも回転して見えたらjキーを押すことを教示した。

15.5s間の刺激画像の提示後、刺激画像は消え、白色画面上に注視点のみ提示された。参加者には、回転運動の強度について、「動かない」を0、「はっきりとよく動く」を5とする6段階評定で評定させた。少しでも動いた場合は1を選択するよう教示した。また、一試行の観察中に運動の見え方が変動した場合には、最もよく動いて見えた際の見え方について答えるよう教示した。

各条件につき5回ずつ繰り返したため、1人あたりの試行数は全30試行となった。1人あたりの観察を、追従眼球運動の有無条件別にブロック化した。各ブロック内の提示順序はランダムであった。各参加者がどちらのブロックを先に行うかについてはカウンターバランスを行った。本試行に入る前に、それぞれの条件のブロックの前に、実験手続きに慣れるまで複数回の練習試行を実施した。

2.2 結果と考察

各参加者の評定値からの平均値 (Fig. 2) から、追従眼球運動があると評定値が大きくなる

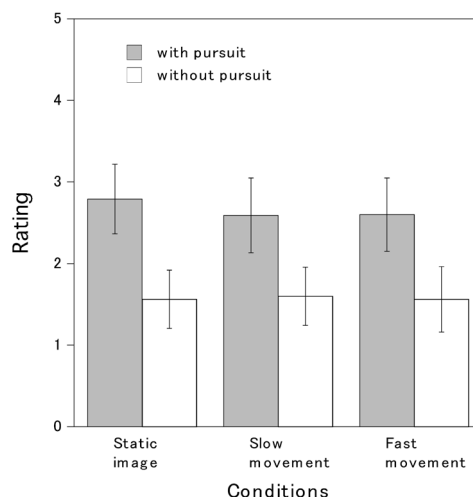


Fig. 2. Results of rating in Experiment 1. Gray and white bars respectively show the means of the with-pursuit and without-pursuit conditions. We presented 95% confidence intervals as error bars to examine the discrepancies between the scale values and means of rated values for those conditions.

のに対し、画像移動条件による変動は小さかったことがわかる。実際、この値について、追従眼球運動(2)×画像移動(3)の2要因の繰り返しのある分散分析を行った結果、追従眼球運動の主効果のみ有意であった [$F(1, 21)=23.862$, $p<.0001$]。各参加者のキー押しの結果から画像提示中の累積回転時間を算出した。±2SDから外れた参加者1名のデータは分析から除外し、平均値を求めた (Fig. 3)。Fig. 3からは、追従眼球運動があると回転錯視が見える時間も長くなること、画像移動条件による変動は小さかったことがわかる。この値について、追従眼球運動(2)×画像移動(3)の2要因の被験者内分散分析を行ったところ、追従眼球運動の主効果のみが有意であった [$F(1, 20)=37.266$, $p<.0001$]。これらの結果は、画像移動によって生じる微細な刺激網膜像の位置移動より、追従眼球運動によって生じる大きな刺激網膜像の移動の方が、回転錯視の成立に大きな効果を及ぼすことを意味している。

もともと錯視が生じやすい人とそうでない人で実験条件の影響に差があるか検討するため

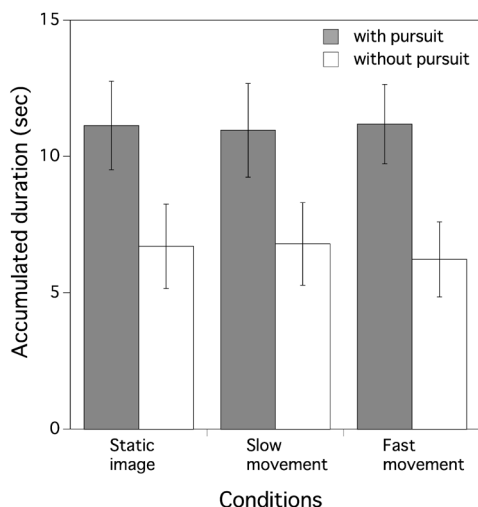


Fig. 3. Accumulated duration of the illusory rotation in Experiment 1. Gray and white bars respectively show the means of the with-pursuit and without-pursuit conditions. Error bars show 95% confidence intervals.

に、参加者を追従眼球運動無×画像静止条件の評定値によって、高群（評定値1.8～3.4）7名、中群（同1.2～1.6）8名、低群（同0.0～1.0）6名の3群に分けた（Fig. 4）。Fig. 4からは、どの観察者群においても、追従眼球運動によって評定値が大きくなったこと、この追従眼球運動による効果は、高群において他の2群より相対的に小さいことが見て取れる。評定値について3要因〔群(2)×追従眼球運動(2)×画像移動(3)]の混合分散分析を行ったところ、参加者群の主効果 [$F(2, 19)=6.703, p=.0063$], 追従眼球運動の有無の主効果 [$F(1, 19)=20.938, p=.0002$], 3要因の交互作用 [$F(4, 38)=3.042, p=.0286$] が有意であった。3要因の交互作用に関してRyan法による下位検定を行い、追従眼球運動無×画像静止条件において高群-低群間、高群-中群間の差が有意であり、追従眼球運動も画像移動もない場合は高群と他2群との間に有意差があることを確認した ($p<.05$)。また、低群の画像静止条件において、追従眼球運動の有無間に有意差があり ($p<.001$)、画像が静止していても、追従眼球運動があれば錯視が生じやすくなることが示された。中群でも、画像

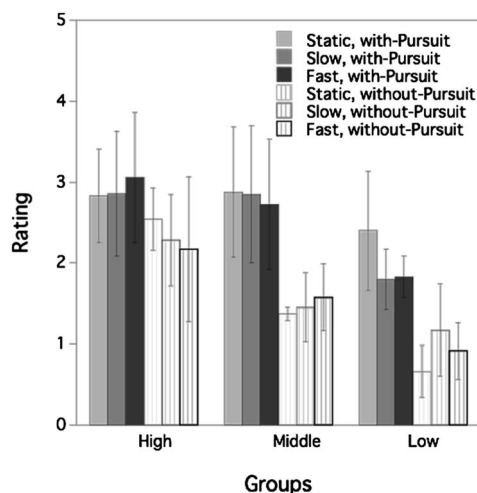


Fig. 4. Mean rating for each condition by observer groups in Experiment 1. We presented 95% confidence intervals as error bars to examine the discrepancies between the scale values and means of rated values for those conditions.

静止条件、低速画像移動条件においてそれぞれ追従眼球運動の有無間に有意差が見られた ($p<.005$)。さらには、高群でさえ、画像静止条件、中群の高速画像移動条件、低群の高速画像移動条件において追従眼球運動の有無間に有意差が見られた ($p<.05$)。これらの結果は、どの群においても、追従眼球運動がなされればより大きな錯視が生じやすくなることを示す。ただし、追従眼球運動有×高速画像移動条件において高群-低群間に、追従眼球運動無×高速画像移動条件において高群-低群間に有意差が見られ ($p<.05$)、追従眼球運動があっても、群間に有意な差があることが示された。

累積回転時間（Fig. 5）からも、追従眼球運動がある方が、より長い時間にわたって回転錯視が見えたことがわかる。この値についても同様の分散分析を行った。追従眼球運動の主効果が有意 [$F(1, 18)=45.272, p<.0001$] で、2要因（群×追従眼球運動）の交互作用については $F(2, 18)=3.012, p=.0744$ との結果が得られた。どの群においても、追従眼球運動あり条件での累積時間は追従眼球運動なし条件のそれよりも長かった。評定値および累積回転時間にお

けるこれらの結果は、もともとの回転錯視の見えやすさにおける個人差に関わらず、追従眼球運動しながら観察する条件に回転錯視を促進させる効果があったことを示している。

回転錯視が生じたタイミングと画像移動開始のタイミングとの対応を見るため、画像が移動する2つの条件について、参加者の全試行において、画像移動中と画像静止中の回転錯視の生起時期に偏りがあったのか検討した (Table 1)。

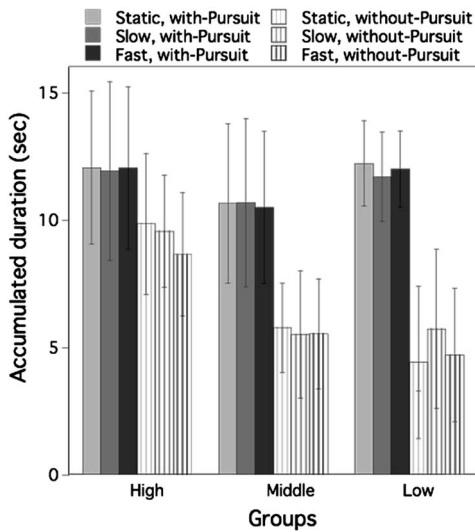


Fig. 5. Mean accumulated duration of the illusory rotation by each of observer groups in Experiment 1. Error bars show 95% confidence intervals.

すなわち、低速画像移動条件については4回の2507ms (189フレーム) にわたる画像移動中の回転錯視開始の頻度、高速画像移動条件については4回の186.7ms (15フレーム) にわたる画像移動中の回転錯視開始の頻度と、画像が静止していた間 (低速画像移動条件で5480ms, 407フレーム、高速画像移動条件で14760ms, 1103フレーム) の回転錯視開始の頻度が、どのタイミングでも均等に錯視が開始された場合の予測頻度 (それぞれの条件で、回転錯視開始の総数を総フレーム数1163フレーム数で割った値から、運動中の189フレームもしくは15フレームと、静止中の407フレームもしくは1103フレームに対応した頻度を計算し、予測値とした) と乖離するかを検討した。追従眼球運動有×低速画像移動条件 [$\chi^2(1)=6.766, p=.0093$], 追従眼球運動無×低速画像移動条件 [$\chi^2(1)=3.297, p=.0694$]であったのに対し、追従眼球運動有×高速画像移動条件 [$\chi^2(1)=0.001, p=.9748$], 追従眼球運動無×高速画像移動条件 [$\chi^2(1)=0.046, p=.8302$]であった。低速画像移動条件でのみ、回転錯視の開始のタイミングの非均等性を見出したこれらの結果は、低速での画像運動によって生じる刺激網膜像の移動が回転錯視の開始を促していることを示唆している。

Table 1. Frequency of beginning of the illusory rotation during the stimulus movement and during the period of the static stimulus presentation. Numbers for each condition show the measured frequency (upper row) and expected frequency (lower row) under the hypothesis that the illusory rotation would begin with equal frequency, regardless of the stimulus movement with 75 Hz display (1163 frames).

Conditions	Repetition of the stimulus movement				Static stimulus	Sum
	1	2	3	4		
Low speed movement						
With pursuit	65	17	15	15	37	149
	24.2	24.2	24.2	24.2	52.1	149.0
Without pursuit	42	26	28	23	83	202
	32.8	32.8	32.8	32.8	70.0	202.0
High speed movement						
With pursuit	7	1	1	0	164	173
	2.2	2.2	2.2	2.2	164.1	173.0
Without pursuit	1	3	5	1	197	207
	2.7	2.7	2.7	2.7	196.3	207.0

なお、Table 1は、高速画像移動条件での固視の条件をのぞく他のすべての条件で、第1回目の画像運動のタイミングで予測頻度より高頻度で回転錯視が開始されたことを示す。この結果は、一度生じた回転錯視の持続時間が比較的長く、2回目以降の画像運動でもまだ最初の錯視が持続していたことが多かったことによるものと思われる。すなわち、1試行15秒間であるのに対し、回転錯視の持続時間の平均は、追従眼球運動有×低速画像移動条件で13.301s、追従眼球運動有×高速画像移動条件で12.562s、追従眼球運動無×低速画像移動条件で6.400s、追従眼球運動無×高速画像移動条件で5.594sであった。これらの結果から、観察期間の初期に画像運動がきっかけで回転錯視が生じた場合、それが2回目やそれ以降の画像運動の期間にもわたって回転錯視が持続していたため、1回目の画像運動のタイミングでの錯視開始の頻度が他の画像運動の期間中より高くなったものと考えられる。

3. 実験 2

実験1では、随意的な追従眼球運動しながら観察することで、どの観察者群でも蛇の回転錯視が強められることが示された。追従眼球運動の回転錯視を強める効果の基礎について、2つの可能性が考えられる。先行研究では、マイクロサッカー⁴⁾やドリフト⁷⁾などの不随意的な眼球運動によって刺激の網膜像から運動信号が得られることが回転錯視を成立させていることが示唆されている。随意的な追従眼球運動でも刺激の網膜像から運動信号が得られるので、それが回転錯視を成立させている可能性が考えられる。あるいは、眼球運動を引き起す眼筋の制御信号に回転錯視を強める効果がある可能性も考えられる。

刺激網膜像の位置移動から得られる運動信号が回転錯視の強調に寄与しているのか検討するため、刺激の残像を利用した実験を行った。残像を用いて錯視図形を提示した場合、眼球運動が生じたとしても、残像の位置は変わらないた

め、網膜上に運動信号は生じない。網膜上での運動が回転錯視に必要であれば、残像の観察においては、回転錯視がまったく生じないことが予想される。また、残像と移動する注視点に対する追従眼球運動を組み合わせることで、追従眼球運動のための眼筋の制御信号が回転錯視に及ぼす効果も検討した。

実験2では、追従眼球運動(有無)×刺激(静止画像、運動画像、残像)の6条件を設けた。運動画像条件では、画像が水平方向に往復移動した。刺激画像の網膜上での移動が回転錯視成立を可能にするのであれば、眼球運動がなくても、画像自体が移動することで錯視が成立するだろう。また、眼球運動があったとしても、刺激画像と注視点とが同じように移動する場合、回転錯視は生じにくくなるだろう。

3.1 方法

3.1.1 実験参加者

大学生25名(男性4名、女性21名、 $M=21.6$, $SD=1.48$)が実験に参加した。そのうち10名は実験1にも参加していた。

3.1.2 装置と刺激

ディスプレイ(Eizo T560-I, 1152×870, 75.1 Hz)を変えた以外は、実験1と同じ装置を用いた。実験1と同様の円盤図形を横3×縦3で白色背景上に並べて刺激を作成した。刺激を水平方向に往復移動させるため、刺激の横幅を実験1で用いたものより小さくした(15 deg×15 deg)。注視点も実験1と同じであった。

3.1.3 手続き

追従眼球運動(2)×刺激(3)の6条件を設けた。静止画像・運動画像と残像条件とをそれぞれ別のブロックにして実験を実施した。ブロック順についてはカウンターバランスを行った。

静止画像条件の各試行では、画像中央に注視点が表示された。参加者がスタートキーを押すと、刺激画像が画面中央に提示された。追従眼球運動有条件では、注視点と、画像提示500ms後に速度10 deg/sで、画面中央から左右それぞれ5 degの範囲内で水平方向に等速往復移動した。追従眼球運動無条件では、注視点も刺激も

画面中央で固定された。刺激提示開始から10秒で刺激画像が消され、白色背景上に注視点のみ提示された。

運動画像条件では、画像提示500ms後に刺激画像が速度10deg/sで、画面中央から左右それぞれ5degの範囲内で水平方向に等速往復移動した以外は静止画像条件と同様の観察が行われた。追従眼球運動有条件では、注視点と刺激画像はまったく同じ動きであった。

残像条件では、画像に対する5s間の順応によって残像を生じさせ、その残像を刺激として用いた。追従眼球運動有条件では、刺激画像消失と同時に注視点の移動が開始された。注視点の移動は、静止画像条件、運動画像条件と同様であった。追従眼球運動無条件では、注視点画面中央で固定された。

6条件それぞれ5回ずつランダムに繰り返し提示したので、全30試行となった。追従眼球運動有条件では、参加者には注視点を目で追いつけるように教示した。各試行において、刺激図形が消えた後、参加者は、見えた回転運動について、0（止まって見える）、1（動いているような気がする）、2（動いて見える）、3（確実に動いて見える）の4段階の評定尺度法を用いて口頭で報告した。それぞれの条件のブロックの本試行の前に、参加者が実験手続きに慣れるまで、練習試行が行われた。

3.2 結果と考察

残像条件で残像自体が観察されなかった5名の参加者の評定値データを分析から除外した。残り20名分のデータを分析した。Fig. 6に、全参加者の評定の平均値と95%信頼区間を示す。評定値の平均値は、全体的に実験1よりも小さめであった。しかしながら、評定値の95%信頼区間が全条件で0.0（「静止していた」評定に対応）以上であったため、すべての条件で回転錯視が見えていたと言えよう。この結果は、眼球運動がなく網膜上のスリップがない場合でも回転錯視が生じること、つまり、網膜上の運動信号は蛇の回転錯視の成立にとっての必要条件ではない可能性を示唆している。ただし、追

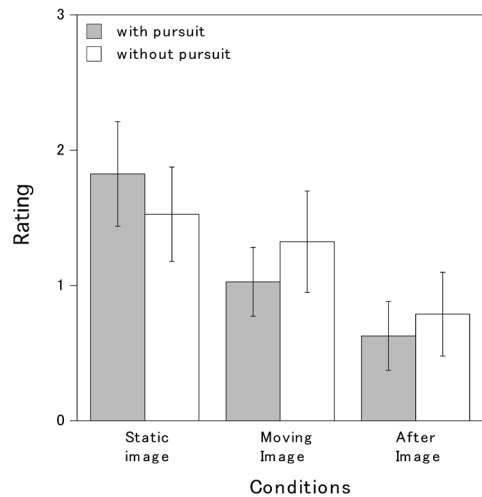


Fig. 6. Results of rating in Experiment 2. Gray and white bars respectively show the means of the with-pursuit and without-pursuit conditions. We presented 95% confidence intervals as error bars to examine the discrepancies between the scale values and means of rated values for those conditions.

従眼球運動有×残像条件では、評定平均値と信頼区間の示す範囲が1（「動いているような気がする」評定）より有意に小さかった ($p < .05$) ので、この条件では極めて弱い回転錯視しか生じなかったものと言える。

実験1同様、画像が静止していても、移動する注視点を追従眼球運動する条件で最も大きな回転錯視が生じた (Fig. 6)。評定平均値のデータについて、2要因 [追従眼球運動 (2) × 刺激 (3)] の被験者内分散分析を行った結果、刺激の主効果が有意 [$F(2, 16) = 9.986, p = .0015$] で、2要因 (追従眼球運動 × 刺激) の交互作用については $F(2, 32) = 2.635, p = .0872$ となった。刺激の主効果について Ryan 法で下位検定を行ったところ、静止画像-残像間 ($p < .001$)、静止画像-運動画像間、運動画像-残像間 ($p < .05$) で有意差がみられた。

網膜像上での動きが追従眼球運動によるものか刺激画像の移動によるものかで違いがあるか判断するため、追従眼球運動有×静止画像条件と追従眼球運動無×運動画像条件との結果について対応のある t 検定を行い、有意差を見出し

た [$t(19)=2.16, p=.0438$]. 同様の網膜上の運動距離と頻度であっても、眼球運動によって生じた運動の方がより強い回転錯視を生じることが示された。

追従眼球運動のための眼筋制御性の信号に回転錯視に及ぼす効果があるか検討するため、残像条件の追従眼球運動有条件と追従眼球運動無条件との差についても対応のある t 検定を実施したが、2条件間には有意差が見られなかった [$t(19)=-1.22, p=.2374$]. この結果は、追従眼球運動のための眼筋制御性の信号が影響を及ぼすのは、眼球運動が網膜上での刺激画像の移動と組み合わせられた場合に限られることを示している。

追従眼球運動無×静止画像条件と追従眼球運動有×画像運動条件では、どちらも、網膜上の動きは小さかったものと考えられる。追従眼球運動に関わる眼筋制御性の信号に回転錯視を強める効果があるか検討するため、これらの条件の間の差分について対応のある t 検定を行い、むしろ、追従眼球運動無×静止画像条件で、追従眼球運動有×画像運動条件より有意に強い回転錯視が得られたことを認めた [$t(19)=2.18, p=.0420$].

実験2では、実験1では認められた追従眼球運動の有意な効果は認められなかった。追従眼球運動の効果について実験1と実験2との間の違いが生じた理由として考えられる要因は2つある。第1に、2つの実験の間の追従眼球運動の大きさの違いである。注視点の動く幅は、実験1 (15deg) より実験2 (10deg) で小さかった。実験で用いられた追従眼球運動の距離が短かったため、実験2で追従眼球運動の効果が小さくなった可能性が考えられる。第2に、それぞれの実験で用いられた刺激サイズの違いである。実験1で使用した刺激サイズは視角 20×15 deg であったのに対して、実験2で使用した刺激サイズは視角 15×15 deg であった。実験2において追従眼球運動の効果の大きさが小さくなっている原因が、用いられた刺激のサイズが小さくなったためである可能性も考えられる。

これらの要因の効果について検討するために、実験3を実施した。

4. 実験 3

実験2では、静止画像条件の場合のみ、追従眼球運動無条件よりも追従眼球運動有条件の方が強い回転運動が評定された。これは実験1と一致した傾向であり、静止画像において追従眼球運動が回転錯視を強める効果があることを示す。

しかしながら、実験1では、追従眼球運動の有無の主効果が有意であったのに対し、実験2では、追従眼球運動の有無の主効果が有意でなく、全体的に追従眼球運動の効果が小さかった。追従眼球運動の効果について実験1と実験2との間の違いが生じた理由として考えられる要因として、2つの実験の間の追従眼球運動の大きさの違いと、刺激のサイズが考えられる。そこで、実験3では、追従眼球運動の大きさが回転錯視に及ぼす影響を調べるために、注視点の動く幅に、実験1、実験2それぞれと同様の条件 (15deg, 10deg 条件) と、実験2よりもさらに小さな条件 (5deg 条件) を設けた。

また、実験3では、刺激サイズの効果についても検討するため、実験1と実験2それぞれと同じ大きさの刺激 ($20 \text{ deg} \times 15 \text{ deg}$, $15 \text{ deg} \times 15 \text{ deg}$) を用意した。

実験1では、追従眼球運動によってより強い回転錯視が生じるという結果は、もともと回転錯視が生じにくい低群の参加者から回転錯視が生じやすい高群の参加者まで一貫していた。そこで、実験3では、注視点の動く幅が異なった場合にも、もともと回転錯視の生じやすさにかかわらず、一貫した追従眼球運動の有無の効果が認められるのかについても検討した。

4.1 方法

4.1.1 実験参加者

大学生25名 (男性8名, 女性15名, $M=21.1, SD=0.92$) が実験に参加した。そのうち8名は実験1, 実験2のどちらかにも参加していた。

4.1.2 装置と刺激

用いた装置は実験2と同様だった。刺激は、実験1、実験2で用いたものと同様のものをそれぞれ大条件、小条件として使用した。

4.1.3 手続き

刺激サイズ（大小）×注視点の移動距離（0, 5, 10, 15 deg）の8条件を用いた。注視点の移動0 deg条件では、注視点が画面中央に固定して提示された。その他の条件では、画像提示500 ms後に注視点が速度10 deg/sで、画面中央から左右それぞれの条件の範囲内で水平方向に等速往復移動した。注視点が動く条件では、参加者に注視点を目で追いつけるように教示した。

各試行では、まず、画面中央に注視点が提示された。参加者がスタートキーを押すと、そこから15.5秒間刺激画像が提示された。また、実験1と同様の方法で回転錯視観察の累積時間が計測された。

15.5秒間の画像提示後、再び注視点のみの画面に切り替わった。このとき、参加者には、回転運動の見えについて、実験1と類似の6段階の評定尺度法で報告させた。少しでも動いて見えた場合は1を選択するように教示した。また、1試行の観察中に運動量の変動した場合には、最もよく動いた見えについて答えさせた。

刺激提示は刺激サイズ条件ごとにブロック化し、ブロック順についてはカウンターバランスを行った。各条件につき5回ずつ繰り返し、全30試行となった。それぞれの条件において、本試行に入る前に参加者が実験手続きに慣れるまで練習試行が行われた。

4.2 結果と考察

評定平均値のデータが $\pm 2SD$ を外れた参加者1名のデータを分析から除外した。残り22名分の平均値と95%信頼区間をFig. 7に示す。Fig. 7からは、回転錯視が、注視点の移動距離が大きいほど顕著になるものの、刺激サイズによる違いは大きくないことを示している。また、Fig. 7において、平均値と95%信頼区間の示す範囲がすべての条件で0.0よりも有意に大きく

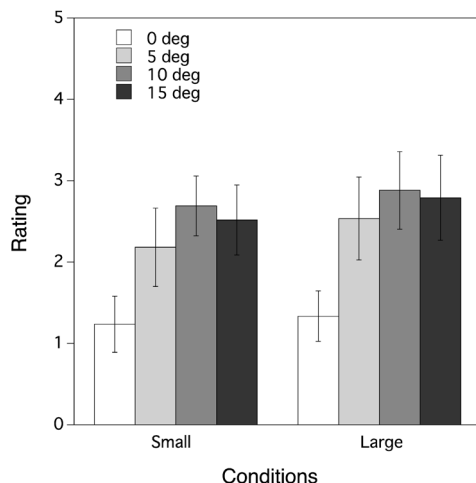


Fig. 7. Results of rating in Experiment 3. We presented 95% confidence intervals as error bars to examine the discrepancies between the scale values and means of rated values for those conditions. Error bars show.

($p < .05$), どの条件でも有意に回転錯視が生じていたと言える。また、注視点10 deg条件で最も回転して見えると評定された。

注視点の移動距離による影響を確認するため、0 deg条件以外の3水準の注視点の移動距離条件の評定値について、2要因 [刺激サイズ(2)×注視点の移動距離(3)] の被験者内分散分析を行った。その結果、注視点の移動距離の主効果が有意であった [$F(2, 42) = 3.796, p = .0305$]。注視点の移動距離の主効果についてRyan法の下位検定を行ったところ、5-10 deg間に有意差がみられた($p < .05$)。

累積回転時間の平均値(Fig. 8)も、注視点の移動距離が大きくなるほど長くなるものの、刺激サイズによる違いは小さかった。累積回転時間についても、0 deg条件以外の3水準の注視点移動距離条件の結果を用いて2要因 [刺激サイズ(2)×注視点の移動距離(3)] の被験者内分散分析を行った。その結果、刺激サイズの主効果が有意 [$F(1, 21) = 6.302, p = .0203$] で、注視点の移動距離の主効果については $F(2, 42) = 3.008, p = .0601$ となった。累積回転時間については、刺激サイズの影響が見られ、刺激が大き

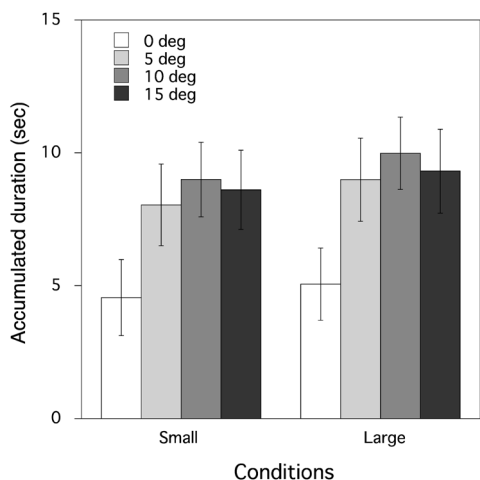


Fig. 8. Accumulated duration of the illusory rotation in Experiment 3. Error bars show Standard errors of the mean.

い方がより長く回転錯視が見えることが示された。

回転錯視についての評定でも累積回転時間でも、注視点の移動距離の有意な主効果が得られた。この結果は、注視点の移動距離がある程度大きいほど、回転運動錯視が生じやすいことを意味している。また、実験1と実験2で追従眼球運動の効果が異なっていたのは、追従眼球運動の大きさの違いによるところが大きいことを示唆している。

回転錯視についての評定では刺激サイズの主効果や、この要因が関係した交互作用は認められなかった。ただし、累積回転時間では刺激サイズ要因に有意な主効果が得られた。これらの結果は、刺激サイズが、回転錯視の見えの印象に影響を与えるという実験前の予想を否定していること、しかしながら、回転錯視が見える時間の長さに顕著な影響を及ぼすことを意味している。参加者には、どこか1カ所でも回転しているように見えたらキーを押すように教示していた。大条件では、円盤図形の数が小条件よりも多かったため、回転錯視が見える部位が多かったことになり、その結果として、キー押しの頻度が増え、累積回転時間が長くなったものと考えられる。

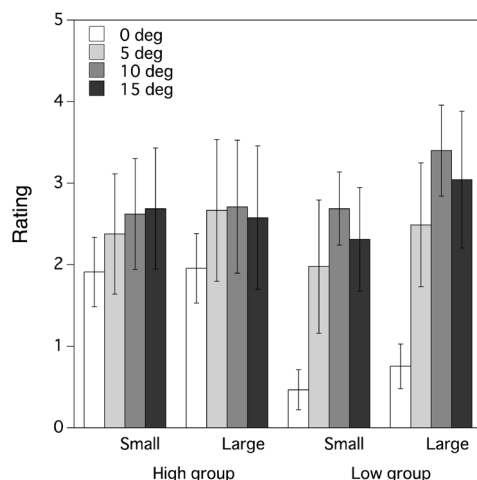


Fig. 9. Results of rating for each of the observer groups in Experiment 3. We presented 95% confidence intervals as error bars to examine the discrepancies between the scale values and means of rated values for those conditions. Error bars show.

もともと回転錯視が生じやすい人とそうでない人で実験条件の効果に違いがあるかを検討するため、参加者を注視点移動距離0deg条件の評定平均値によって、高群と低群のグループに分けた (Fig. 9)。注視点移動距離0deg条件の評定平均値が高かった参加者9名を、回転錯視が生じやすい高群 (評定値1.5~3.5) とし、注視点移動距離0deg条件において評定平均値が低かった9名を、回転錯視が生じ難い低群 (同0.1~1.0) とした。どちらの群にも属さない4名のデータは分析に用いなかった。Fig. 9からは、注視点移動距離0deg条件の評定平均値が小さな参加者でも、注視点の移動があれば、評定平均値が大きくなることが示されている。評定平均値について3要因の混合分散分析 [群(2) × 刺激サイズ(2) × 注視点の移動距離(4)] を行ったところ、刺激サイズの主効果 [$F(1, 16) = 5.197, p = .0367$], 注視点の移動距離の主効果 [$F(3, 48) = 17.856, p < .001$], 群 × 注視点の移動距離の交互作用 [$F(3, 48) = 4.840, p = .0176$] が有意であった。

注視点の移動距離の主効果について、Ryan法の下位検定を行ったところ、注視点の移動距

離0degとその他の3つの移動距離条件間に有意差がみられた($p<.001$). また、2要因(グループ×注視点の移動距離)の交互作用についても注視点の移動距離0deg条件において高群と低群間に有意差がみられた($p<.01$). また、低群において、0degとその他の3つの注視点の移動距離条件間それぞれに有意差がみられた($p<.001$). これらの結果から、もともと回転錯視が生じ難い参加者であっても、移動する注視点を追視する条件においては、その眼球運動の大きさにかかわらず、静止した注視点を固視する条件より顕著な回転錯視が生じるものと考えられる。

累積回転時間の平均値(Fig. 10)についても、注視点移動距離0deg条件で短時間しか回転錯視が生じなかった参加者でも、注視点の移動があれば、回転錯視が見える時間が長くなることが示されている。この値についても、評定平均値と同様の分散分析を行った。刺激サイズの主効果 [$F(1, 16)=7.001, p=.0176$], 注視点の移動距離の主効果 [$F(3, 48)=23.456, p<.0001$], 群×注視点の移動距離の交互作用が有意 [$F(3, 48)=9.201, p<.0001$] で、群×刺激サイズの交互作用については $F(1, 16)=3.658, p=.0739$ となった。有意となった注視点の移動距

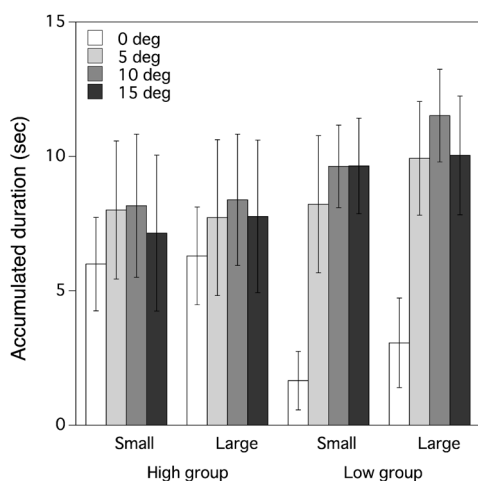


Fig. 10. Results of accumulated duration for each of the observer groups in Experiment 3. Error bars show Standard errors of the mean.

離の主効果に関するRyan法において0degとその他3条件の間に有意差が見られた($p<.001$). また、群×注視点の移動距離の交互作用の分析では、注視点の移動距離0deg条件において高群—低群間に有意差がみられた($p<.05$). さらに、低群において、0degとその他3条件との間に有意差が見られた($p<.001$). もともと回転錯視が生じにくい低群では、注視点動く条件において、注視点の移動する幅の距離の違いにかかわらず、固視している0deg条件よりも有意により強く回転錯視が生じたと言える。また、図からもわかるように、高群より低群の方が刺激サイズによる効果が大きかった。

5. 総合考察

5.1 残像観察における回転錯視の成立

実験2では、刺激画像の網膜上のスリップがない陰性残像の観察でも微弱ながら回転錯視が生じることが示された。陽性残像ではフレージャー・ウィルコックス錯視が生じないという報告¹⁴⁾があるが、実験2の結果は、陰性残像の観察ではフレージャー・ウィルコックス錯視が成立することを示している。この結果は、網膜上の運動信号が「蛇の回転錯視」を始めとするフレージャー・ウィルコックス錯視の成立にとって必要条件ではない可能性を示唆している。

Backus and Oruc¹⁵⁾は、輝度差がコントラストの高低差につながり、それに対する順応によって速度知覚が生じ、回転錯視が起きていると主張した。この先行研究と本研究における実験結果を合わせて考えると、輝度差がある要素が特定のパタンで配置されていれば、網膜上の運動や眼球運動制御に関する筋運動信号がなくても、回転錯視が成立するものと考えられる。

ただし、もともと回転錯視が生じ難い参加者だけ見ると、その評定値と95%信頼区間が示す範囲は、「静止している」評定と対応する0.0を含むこともあった。すなわち、実験2の参加者のうち、追従眼球運動無×静止画像条件の評定値の平均値が0.2~1.0であった5名(平均値は0.56, 95%信頼区間は0.275)に関しては、

残像条件の追従眼球運動無条件の評定平均値が0.72, 95%信頼区間が0.839であり, その範囲は0.0を含んでいた。これらの結果は, 陰性残像の観察でも安定した回転錯視が成立する観察者が多いものの, もともと回転錯視が生じにくい参加者については, 刺激画像の観察だけでは錯視は生じにくいことを示している。また, 陰性残像の観察において, 回転錯視が見える参加者と見えにくい参加者がいたという結果は, 刺激画像の網膜像中の輝度差がある要素配置から運動信号を検出する過程における個人的特性が, この錯視観察における個人差の原因の一つであることを示唆している。

なお, 実験2において, 本当にフレイザー・ウィルコックス錯視が見えたのか, あるいは, 陰性残像として錯視図形のようなものが見えたので, 回転運動錯視が見えたような気になってしまったという, 構えの効果があつた可能性も否定できない。実際に陰性残像の観察でフレイザー・ウィルコックス錯視が生じたのか, あるいは構えの効果として動きの見えが報告されたのか明確にするためには, 刺激要素の色彩の配列順序を変え, 回転運動錯視を生じない刺激画像も加え, 運動の観察の報告が, 白, 黄, 黒, 青の順の配列の刺激による陰性残像に限られるのかを調べる実験の実施が有効だろう。

5.2 追従眼球運動による回転錯視強調の基礎

実験2の結果から, 追従眼球運動が蛇の回転錯視の見え方を強調するのは, 刺激画像の網膜上での移動と組み合わせられた場合に限られることがわかった。実験3の結果からも, もともと回転錯視が生じにくい参加者であっても, 幅5deg以上の追従眼球運動があれば, さらに顕著な回転錯視を得るのに効果的と言える。

網膜像上での動きに追従眼球運動が加わることによってより強い回転錯視が生じたことの原因の可能性として, 追従眼球運動によって強制的に刺激画像の網膜像上での移動が生じたことが考えられる。追従眼球運動に関する研究では, 追従眼球運動が正確であるとは限らず, 対象の運動速度と眼球の運動速度との間には差が

生じて, 網膜上を対象の像が移動することが指摘されている¹⁶⁾。しかしながら, 実験2において, 追従眼球運動無×静止画像条件のほうが, 追従眼球運動有×画像運動条件よりも強い回転錯視が生じたことは, 追従眼球運動有条件において, 追従眼球運動が正確に行えなかった場合に生じる, 網膜像上での刺激画像の移動は, 回転錯視を強めるほどのものではなかったことを示唆している。

今までにはマイクロサッカード⁴⁾やドリフトが回転錯視を引き起こしていると主張する研究⁷⁾があり, これらの不随意眼球運動が錯視を引き起こしているものと考えられてきた。しかし, 本研究の実験1, 3では, 随意性の眼球運動である追従眼球運動によってこの錯視が強調されるという結果が得られた。この結果は, 自由な随意的眼球運動が回転錯視を強めたという先行研究での報告⁹⁾とも一致しており, 蛇の回転錯視では, 不随意眼球運動だけでなく, 随意的な眼球運動も重要な役割を果たしているものと言える。

実験3の評定平均値についての分析の結果, 注視点の移動の大きさ5-10deg間に有意差がみられ, 注視点の移動の大きさ10deg条件に回転錯視が最も顕著になるピークがあることがわかった。蛇の回転錯視は周辺視野で起きる錯視である¹²⁾。注視点の移動の大きさ5deg条件よりも10deg条件の方がより画面の端まで目を動かすため, 周辺視野にまともって位置する円盤図形の数が増えた可能性が考えられる。

注視点の移動の大きさ15deg条件ではなく, 10deg条件がピークとなった理由については, 周辺視野では解像度が落ちるため, より画面の端まで注視点が動く15deg条件では回転の有無の判断が難しくなったのかもしれない。また, 視覚15deg周辺で桿体が最も多くなり, その桿体系の視覚系では色識別が不可能となる¹⁷⁾。15deg条件では色識別が難しくなり, 輝度差の知覚が難しくなった可能性も考えられる。

5.3 画像運動と眼球運動が回転錯視に及ぼす影響

なお、実験3において、もともと回転錯視が生じにくい低群では、幅5deg以上の注視点の動きがあれば、回転時間も長くなり、見えの印象の回転も強くなるという追従眼球運動の効果が示された。全参加者の場合では、追従眼球運動の幅が10degという条件が回転錯視を強調するうえで重要であったが、もともと回転錯視が生じにくい低群であれば、幅が5deg以上という点が重要と言える。Otero-Millan et al.⁴⁾やBeer et al.⁷⁾では、マイクロサッカードもしくはドリフトによって刺激網膜像上に運動信号が生じ、そのことが回転錯視の成立を可能にしていると考察された。また、Murakami, Kitaoka and Ashida¹⁴⁾では、蛇の回転錯視量と個人のマイクロサッカードの頻度の間には有意な相関がみられなかったものの、ドリフトの大きさとの間に正の相関関係が認められた。これらの先行研究を基に考えると、通常は蛇の回転錯視の観察において、低群の参加者は、結果的に回転錯視を引き起こすマイクロサッカードやドリフトという不随意眼球運動があまり起こっていない可能性が考えられる。すなわち、蛇の回転錯視の通常観察では、マイクロサッカードやドリフトという不随意的な眼球運動の発生頻度に関する個人差が、蛇の回転錯視の見え方の個人差のもう一つの原因と考えられる。研究によって、蛇の回転錯視との相関がある微小眼球運動の種類が異なっていることは、個人によって、それぞれの微小眼球運動が錯視成立に影響を及ぼす影響が異なる可能性を示唆している。微小眼球運動による効果にこうした個人差があったとしても、本研究において、追従眼球運動無条件では錯視が生じにくかった観察者でも、追従眼球運動有条件では錯視が生じやすくなるという結果は、5deg以上の随意的な追従眼球運動が錯視を成立させる効果があることを示している。

実験2では、追従眼球運動有×静止画像条件と追従眼球運動無×画像運動条件の比較の結

果、同様の網膜上の運動であっても、眼球運動によって生じた運動の方が、画像運動によって生じた運動より有意に強い回転錯視を生じることが示された。この結果は、追従眼球運動を引き起している眼筋の緊張に関わる情報が、回転錯視の強調に寄与していることを示唆している。

しかしながら、実験2における追従眼球運動無×静止画像条件と追従眼球運動有×画像運動条件の比較では、追従眼球運動無×静止画像条件でより有意に強い回転錯視が得られた。また、画像運動条件と残像条件では追従眼球運動をした方がしないよりむしろ回転錯視が弱かった。これらの結果は、追従眼球運動のための眼球運動における眼筋運動の信号自体には回転錯視を強める効果はないこと、眼球運動であれ刺激の移動であれ、網膜上での刺激画像の大きな移動が明確な回転錯視の成立を可能にしていることを示唆している。

なお、実験1において、刺激画像の網膜上での移動と回転錯視が生じたタイミングとのタイミングの対応を検討したところ、錯視がどのタイミングでも等しい頻度で運動錯視が生じるという仮説での予測からは有意に乖離する結果が得られた。すなわち、低速画像移動条件では、追従眼球運動の有無によらず、錯視が一樣なタイミングで生じるとした場合の予測からの有利な乖離やその傾向が見られた(Table 1)。これらの結果は、画像移動や眼球運動によって生じる、比較的長い時間かけた小さな刺激網膜像の移動が運動錯視の成立を促進することを示唆している。刺激網膜像の移動は、単に回転錯視のトリガーとなるだけでなく、その移動から生じる運動信号が、持続的な回転錯視の成立に寄与していることが考えられる。

5.4 錯視の観察法の提案

最後に、フレーザー・ウィルコックス錯視にもとづく回転錯視を見やすくする観察方法について提案する。マイクロサッカードやドリフトという不随意的な眼球運動の発生が少なく、おそらくはその結果として、錯視を体験しにくい

観察者であっても、追従眼球運動のような随意性の眼球運動を行うことによって、回転錯視が強められると考えられる。たとえば、刺激画像の表面上を10 deg/s程度の定速で、視角にして5 deg以上の距離にわたって移動する人差し指などを追視することで、明確な回転錯視が得られるものと期待できる。実際、実験前の自由観察では、あまり顕著な回転錯視が見えていなかった観察者数名が、実験中、移動する注視点を追従しながら観察することでとても顕著な回転錯視が得られたこと、実験後、目を動かしながら観察することできわめて強い回転錯視が得られるようになったことを報告していた。また、3つの実験結果からは、同様の観察方法は、もともと回転錯視が見えていた観察者にとっても、錯視を強調するのに有効であることが期待される。さらに、同様の観察方法は、刺激要素が同心円状に配置されることで生じる回転錯視ばかりではなく、その他の刺激要素配置²⁾におけるフレーザー・ウィルコックス錯視の強調における有効性も期待できる。

謝辞 本研究はの科学研究費補助金 [基盤(B)25285197, 26285162] の補助を受けた。

文 献

- 1) A. Fraser and K. J. Wilcox: Perception of illusory movement. *Nature*, **281**, 565–566, 1979.
- 2) 北岡明佳: トリック・アイズ グラフィクス, カンゼン, 2005.
- 3) A. Kitaoka: Color-dependent motion illusions in stationary images and their phenomenal dimorphism. *Perception*, **43**, 914–925, 2014.
- 4) J. Otero-Millan, S. L. Macknik and S. Martinez-Conde: Microsaccades and blinks trigger illusory rotation in the “rotating snakes” illusion. *Journal of Neuroscience*, **32**, 6043–6051, 2012.
- 5) W. Bair and L. P. O’Keefe: The influence of fixational eye movements on the response of neurons in area MT of the macaque. *Visual Neuroscience*, **15**, 779–786, 1998.
- 6) D. M. Snodderly, I. Kagan and M. Gur: Selective activation of visual cortex neurons by fixational eye movements: Implications for neural coding. *Visual Neuroscience*, **18**, 259–277, 2001.
- 7) A. L. Beer, A. H. Heckel and M. W. Greenlee: A motion illusion reveals mechanisms of perceptual stabilization. *PLoS ONE*, **3**, e2741, 2008.
- 8) J. Krauskopf, T. N. Cornsweet and L. A. Riggs: Analysis of eye movements during monocular and binocular fixation. *Journal of the Optical Society of America*, **50**, 572–578, 1960.
- 9) I. Kuriki, H. Ashida, I. Murakami and A. Kitaoka: Functional brain imaging of the Rotating Snakes illusion by fMRI. *Journal of Vision*, **8**, 16, 2008.
- 10) Y. Izawa, H. Suzuki and Y. Shinoda: Suppression of smooth pursuit eye movements induced by electrical stimulation of the monkey frontal eye field. *Journal of Neurophysiology*, **106**, 2675–2687, 2011.
- 11) M. Watanabe, Y. Matsuo, L. Zha, D. P. Munoz and Y. Kobayashi: Fixational saccades reflect volitional action preparation. *Journal of Neurophysiology*, **110**, 522–535, 2013.
- 12) A. Kitaoka and H. Ashida: Phenomenal characteristics of the peripheral drift illusion. *Vision*, **15**, 261–262, 2003.
- 13) A. A. Skavenski, R. M. Hansen, R. M. Steinman and B. J. Winterson: Quality of retinal image stabilization during small natural and artificial body rotations in man. *Vision Research*, **19**, 675–683, 1979.
- 14) I. Murakami, A. Kitaoka and H. Ashida: A positive correlation between fixation instability and the strength of illusory motion in a static display. *Vision Research*, **46**, 2421–2431, 2006.
- 15) B. T. Backus and I. Oruç: Illusory motion from change over time in the response to

- contrast and luminance. *Journal of Vision*, 5, 10, 2005.
- 16) 米村朋子：パーシュート眼球運動情報に基づく速度知覚. 九州大学心理学研究, 8, 143-154 (2007).
- 17) 重野 純：心理学 [第4版]. 鹿取廣人・杉本敏夫・鳥居修晃（編）：5章 感覚・知覚, 東京大学出版会, pp.101-166, 2012.