

非視覚対象への眼球運動を用いた逆転ベクションの成立機序の分析

中 村 信 次

日本福祉大学 情報社会科学部

An Analysis of Perceptual Mechanism Underlying Inverted Vection
Using Eye-Movement toward Non-Visual Target

Shinji Nakamura

Faculty of Social and Information Sciences, Nihon Fukushi University

Abstract: Slowly moving foreground presented in front of fast orthogonal background can induce inverted vection in the same direction. In this study, performances of eye-movement tasks during observer's perceiving inverted vection were analyzed. Results indicated that saccade to the non-visual targets in inverted vection situation was shifted to the same direction as the foreground motion. This result supported our hypothesis in which we assumed that inverted vection occurs in accordance with mis-registered information about eye-movement.

Keywords: self-motion perception, vection, foreground, eye-movement

1. はじめに

視野の大部分を占めるような巨大な視覚パターンの規則的な運動を観察した場合に、観察者は視覚パターンの運動とは反対方向への自己身体運動を知覚する。この現象は視覚誘導性自己運動知覚、もしくはベクションと呼ばれ、視覚情報が自己運動知覚に大きな役割を果たしていることの証拠として、様々な研究者により取り上げられてきた⁽¹⁾による総説を参照のこと。

多くの心理物理実験の積み重ねにより、ベクション知覚生起に影響を及ぼす視覚刺激要因が明らかになっている。それらの中でも、特にベクションに対し決定的な影響を持つとされる要因として、刺激奥行き構造の効果に関し多くの研究がなされてきた。従来の研究においては、ベクション知覚はより遠くに呈示される背景刺激によって支配されており、観察者のより近くに呈示される前面刺激はベクション知覚になんら影響を及ぼし得ないとされてきた(例えば、^{2) 3)}。

しかしながら、筆者らの一連の研究により、これまで自己運動知覚とは無関係であるとして無視されてきた前面刺激が、ある特殊な刺激状況下においては、ベクション知覚に非常に重大な影響を及ぼすことが明らかとなった⁴⁾。さらに、Nakamura & Shimojo (2000)では、直交方向に運動する背景刺激の手前で、前面刺激をごく低速度(5deg/sec程度)で運動させると、前面刺激と同方向への自己身体運動知覚が誘導されることを明らかにした⁵⁾。この逆転ベクション(inverted vection)と名付けた現象は、前面刺激運動が、背景刺激とは異なった様式で自己運動知覚に影響を及ぼすことを端的に示す。

この逆転ベクションには、知覚中枢における眼球運動に関する情報の錯誤が密接に関連していることが示唆されている^{6) 7)}。すなわち、逆転ベクションが生起する状況においては、前面刺激の運動が、刺激運動方向への観察者の反射的な眼球運動(OKN)を引き起こそうとする。しかしながら、注視点への持続的な注視により、反射的

眼球運動が抑制されることとなる。この反射的眼球運動の意識的な抑制が、反対方向への眼球運動と錯誤され、眼球運動情報が誤登録されることとなる*。誤登録された眼球運動情報に基づいて自己運動が解釈された結果、誤登録された眼球運動とは反対方向、すなわち前面刺激運動方向への自己運動知覚が生起する（逆転ベクション生起における眼球運動情報の関与に関する詳細な議論については⁶⁾⁷⁾を参照のこと）。

しかしながら、上記の眼球運動情報を用いた逆転ベクション知覚生起の説明は仮説に過ぎず、実証的な根拠を持たない。そこで本研究は、観察者に眼球運動課題を課すことにより、逆転ベクション知覚中に眼球運動情報の誤登録が生じているか否かを検討する。ここで、通常的眼球運動課題の様に、視覚対象へのサッケード(saccadic eye-movement; 急速眼球運動)を課題として用いることには問題がある。視覚対象へのサッケードは、観察者の眼球がどのような状態にあるときでも、知覚情報処理過程に登録された眼球運動情報とは関係なく、視覚対象間の網膜上での位置の差、すなわち網膜座標系における対象の位置情報に基づいて実施することができる。すなわち、視覚対象の網膜上での位置（離心度と方位）が得られるのであれば、その対象を中心窩に収めるために必要な眼球運動の方位と量は、観察者の眼球運動課題実施時の実際の視方向や知覚情報処理過程に登録されている眼球運動情報とは無関係に、眼球運動の制御を司る動眼中枢によって容易に算出可能となる。

その様な課題では、知覚情報処理過程に登録された眼球運動情報を検討することは不可能である。したがって、その検討のためには、視覚対象以外の位置情報に基づく眼球運動を必要とする課題を設定しなければならない。本研究においては、その試みの一つとして、自己の正中方向への眼球運動（実験1）、および、不可視の音源への眼球運動（実験2）を課題とした。

もし、知覚情報処理過程において眼球運動情報の誤登録が生じているならば、上記の様な非視覚対象への眼球運動を実施する際には、正中方向や音源位置といった非視覚対象への視線方向変位に必要な眼球運動に加え、誤登録された眼球運動情報を相殺するために必要な眼球運動が生起するはずである。図1に上に述べた本研究における作業仮説を図示した。

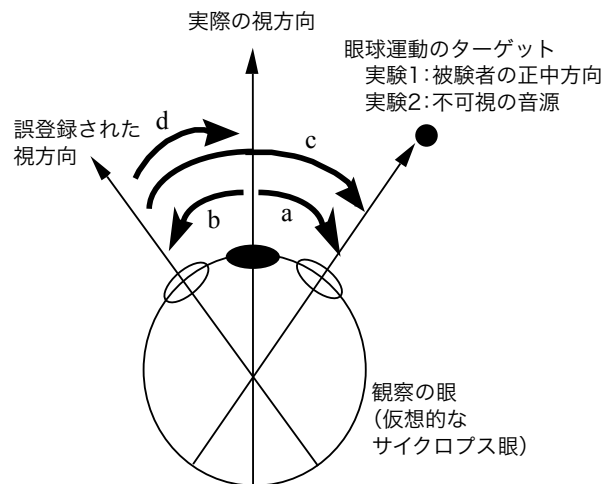


図1 本研究における作業仮説

- a 被験者に課された眼球運動課題
- b 誤登録された眼球運動情報
- c 予測される被験者の眼球運動
- d 課題状況における眼球運動誤差
(図の詳細な説明は本文参照のこと)

仮に、観察者の眼球（仮想的なサイクロプス眼）が正中方向に向いており、右方に非視覚情報により定義された眼球運動ターゲットが呈示されたとする。この場合、被験者に課された眼球運動課題の正しい遂行結果は図中aで示される角度となる。この状況において、前面刺激運動により眼球運動情報が刺激運動方向に誤登録されているとする(b)。非視覚対象への眼球運動は、知覚情報処理過程に登録された眼球運動情報(視方向)に基づいてなされるので、このような状況下においては、観察者の眼球運動課題遂行結果は、cで表される角度となる。この際、眼球運動課題の誤差は $d = c - b$ で示され、誤登録された眼球運動とは反対方向への誤差が生じると予測される。

2. 方法

2.1 刺激

視覚刺激は、前面刺激、背景刺激、注視点からなっていた。前面刺激と背景刺激は共にランダムドットパターンであった。前面刺激はスクリーン手前15cmに、背景刺激はスクリーン奥15cmに位置して知覚される様、両眼視差が与えられた。両刺激とも後述する刺激条件に従って前額平行面上を運動した。刺激はグラフィクスコンピュータ(Silicon Graphics IRIS320VGX)により描画され、縦115cm、横210cmのスクリーン上に、時分

割式立体画像を投影可能なビデオプロジェクタを用いて呈示された（装置の詳細については⁵⁾を参照）。観察距離は1mであったため、刺激呈示領域は縦60deg、横90degとなった。刺激輝度は12.4cd/m²、ドット密度は0.02dots/deg²であった。図2に実験に用いた刺激の模式図を示す。

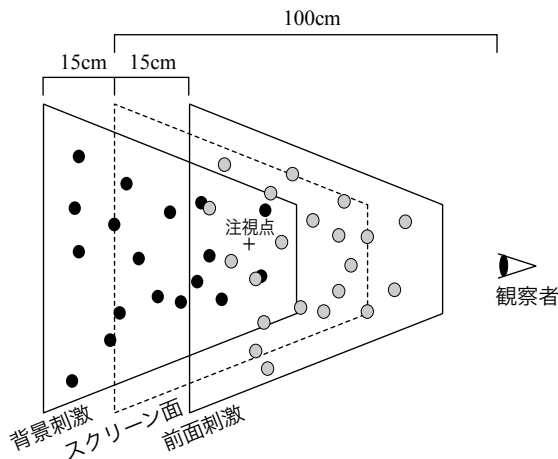


図2 実験に用いた刺激の模式図

2.2 手続き

被験者は、顔面固定器によって頭部を固定した状態で運動刺激を観察し、自己の身体が運動して感じられた場合にボタン押しによって反応した。ボタンが5秒以上連続して押された場合に、警告音を呈示すると共に注視点を消した。被験者は警告音の呈示に従って、実験毎に設定された眼球運動課題を行った。60秒を過ぎても5秒以上の連続した反応が生じない場合には、60秒経過後に注視点を消し、眼球運動課題を実施した。注視点消失後、10秒間運動刺激および警告音を呈示し続け、その間被験者は眼球運動課題により偏位させた注視を持続した。

注視点は、実験1ではスクリーン中央から左右10deg以内のランダムに決定された場所に、実験2ではスクリーン中央に呈示された。警告音を呈示するスピーカは、スクリーンの背後に設置された（スクリーンの中央、左右10deg、左右20degの計5台）。実験1では常に中央のスピーカから警告音が呈示されたが、実験2では警告音が呈示されるスピーカが試行毎にランダムになる様にプログラムされた。警告音の呈示は、グラフィクスコンピュータによって制御され、その音圧レベルは各被験者に容易に音源方向が特定可能な水準に設定された。被験者は、注視点が消えると同時に、実験1では自分の頭

部の真正面にあると思われる方向へ、実験2では警告音を発しているスピーカがその背後にあると思われるスクリーン上の場所へ、眼球運動を実施した。事前の予備実験によって、運動刺激を呈示しない場合には、自己の頭部の正中方向、および上記範囲に設定された不可視の音源への眼球運動は、すべての被験者においてほぼ正確に実施可能であることが確認されている。正常な視力を有し、バクシオン実験への参加経験を持つ、4名の成人被験者が実験1・2に参加した。

2.3 眼球運動の記録

試行中の被験者の水平方向の眼球運動をEOG(Electro Oculo-Graph)法によって記録した。被験者の両外側眼窩に電極糊を満した脳波用Ag-AgCl電極を装着し、網膜角膜電位差を計測、ポリグラフ（日本光電WEE6114）によって交流増幅（時定数3.3秒）した後、A/D変換ボード（VME Microsystems VMIVME3118）を介してグラフィクスコンピュータにサンプリング周期200Hzで取り込んだ。各実験セッション開始前、終了後にEOGのキャリブレーションを行った。

眼球運動データの解析に当たっては、まずキャリブレーションデータに基づき、電圧値と眼球運動量（角度）との変換を行った。さらに、刺激条件設定に基づき要求される眼球運動と、実際に被験者の行った眼球運動との差異を算出し、その値を当該試行における眼球運動誤差とした（データ処理に際しては、右方向への眼球運動誤差に正の値を与えた）。

2.4 刺激条件

前面刺激と背景刺激の組み合わせにより、以下の3刺激運動条件を設定した。

- 1) 前面／背景直交運動条件（M/M条件）：前面刺激は右方向へ、背景刺激は上方向へ運動した。右方向への逆転バクシオンが生起すると予測される。
- 2) 前面静止／背景運動条件（S/M条件）：前面刺激は静止、背景刺激は右方向へ運動した。左方向への通常バクシオン（背景刺激により誘導されるパターン運動とは反対方向への自己運動知覚）が生起すると考えられる。
- 3) 前面運動／背景静止条件（M/S条件）：前面刺激は右方向へ運動、背景刺激は静止していた。静止背景刺激によるバクシオン抑制のため、自己運動知覚は

有効には誘導されないと予測される⁴⁾。

また運動速度条件として、5deg/sec（低速条件）と25deg/sec（高速条件）の2種類を設定した。先行研究により、5deg/secで運動する前面刺激が最も効率よく逆転ベクションを誘導する一方、25deg/secの前面刺激運動ではほとんど逆転ベクションが誘導されないことが確かめられている⁵⁾。また、M/M条件の背景刺激運動速度は常に25deg/secとし、M/M・M/S両条件における前面刺激速度およびS/M条件における背景刺激速度を上記速度条件に基づいて設定した。またボタン押しによる自己運動知覚の報告に際し、M/M条件においては、観察者は前面刺激と平行な水平方向への自己運動にのみ、すなわち逆転ベクション成分にのみ注意し、それとは直交する垂直方向への自己運動（通常ベクション）は無視した。S/M条件およびM/S条件においては、試行中に経験されたような自己運動感覚も報告の対象とした（ただしS/M、M/S両条件において、垂直方向の自己運動が誘導されることはなかった）。実験1、2ともに各条件20試行の眼球運動課題をランダムな順序で実施した。

3. 結果と考察

ボタン押しによる被験者の反応およびその内省報告から、各刺激条件において上述した予測通りの自己運動知覚が生起していたことが確認された。M/M低速条件およびS/M条件においては、ほぼすべての試行において設定した観察時間（60秒）内に5秒以上の連続した自己運動の生起が報告された。すなわち、M/M低速条件では右方向への逆転ベクションが、S/M条件では左方向への通常ベクションが観察された。これらの条件において自己運動の生起が認められなかった例外的な試行のデータは分析から除外した（全試行の約3%）。またM/M高速条件の大多数の試行（約90%）、およびM/S条件の全試行においては、観察時間内に5秒以上の連続したボタン押しがなされることはなかった。

眼球運動誤差に関しては、実験に参加したすべての被験者の間で共通した結果が得られたので、条件ごとの被験者間平均値を算出した。図3に実験1における、図4に実験2における眼球運動課題の誤差を、運動条件ごとに示す。

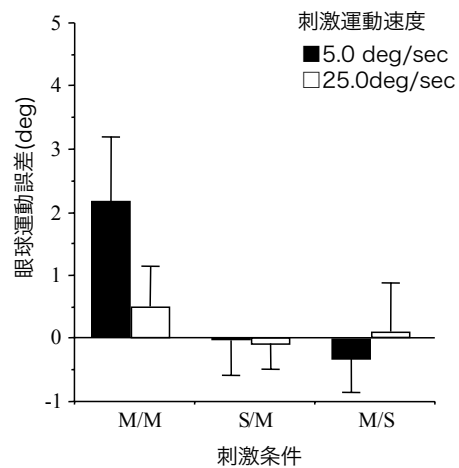


図3 各条件における眼球運動誤差（実験1）

M/M条件：前面刺激と背景刺激が直交運動（逆転ベクション生起）
 S/M条件：背景刺激のみ運動（通常ベクション生起）
 M/S条件：前面刺激のみ運動（ベクション生起せず）
 エラーバーは1/2SDを示している

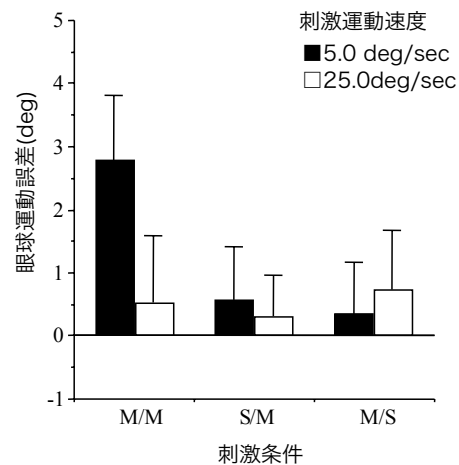


図4 各条件における眼球運動誤差（実験2）

M/M条件：前面刺激と背景刺激が直交運動（逆転ベクション生起）
 S/M条件：背景刺激のみ運動（通常ベクション生起）
 M/S条件：前面刺激のみ運動（ベクション生起せず）
 エラーバーは1/2SDを示している

観察者の正中方向への眼球運動を実施した実験1と、音源位置への眼球運動を実施した実験2とで、M/M低速条件において右方向への眼球運動の誤差が生じるが、それ以外の諸条件においては明瞭な眼球運動誤差が生じないという一貫した結果が得られた。刺激運動条件

(M/M,S/M,M/S の3水準) ×速度条件(低速, 高速の2水準) の2要因分散分析の結果, 実験1, 実験2の両実験結果とも, 刺激運動条件と刺激運動速度の有意な交互作用が認められた(実験1: $F(2,6)=16.21, p<.01$, 実験2: $F(2,6)=21.23, p<.01$). LSD法による多重比較の結果, M/M条件においてのみ速度条件間(低速・高速)で有意な差異が認められた(実験1: $Mse=5.16$, 実験2: $Mse=6.86, \alpha=.05$).

本研究では, 逆転ベクションが生起している状況(M/M低速条件)においてのみ, 前面刺激運動方向と同方向(右方向)への眼球運動の誤差が生じることが示された. 前述した様に, 対象の網膜上での位置情報によらない眼球運動課題の誤差は, 誤差が生じた方向と反対方向(ここでは左方向)への眼球運動情報の誤登録が生じていたことの根拠となり得る. したがってこの結果は, 逆転ベクションが生起する刺激条件においては, 前面運動方向とは逆方向への眼球運動情報の誤登録が生じていたことを示しており, 前面刺激運動による眼球運動情報の誤登録が逆転ベクションの成立要因であるとする我々の仮説を支持するものとなる.

一方, 通常ベクションが生起する条件(S/M条件)では, 自己運動が生じない条件(M/S条件)と同様, 眼球運動の誤差は生じておらず, これらの条件における刺激観察時には眼球運動情報の誤登録は生じていなかったと考えることができる. したがって, 逆転ベクションとは異なり, 通常ベクションの生起には眼球運動情報の変化は随伴しないと結論することができる. 藤田・星(1998)は, 通常ベクションを知覚している際の観察者の視覚対象へのサッケードを分析し, 通常ベクション生起方向へのサッケードはアンダースhootしやすく(眼球運動が目標対象の手前で停留してしまう), 反対方向へのサッケードはオーバースhootしやすい(眼球運動が目標対象を行き過ぎてしまう)という結果を導いている¹⁰⁾. 通常ベクション知覚は眼球運動課題に影響を及ぼさないとする本実験の結果と藤田らの結果との差異は, 観察者のサッケードが非視覚対象へのものか(本実験), 視覚対象へのものか(藤田ら)の差異によるものであろう.

比較的高速で運動する背景刺激の手前に, ごく低速度(5deg/sec程度)で運動する前面刺激を呈示した場合に, 前面刺激と同方向への自己身体運動知覚が誘導される. 逆転ベクションと名づけられたこの錯覚現象は, Nakamura & Shimojo(2000)において初めて発見され⁵⁾,

背景刺激が誘導する反対方向への通常ベクションとは異なる成立機序を持つ知覚現象であることが後続の実験で明らかにされている(たとえば⁶⁾⁷⁾). これらの研究では, 前面刺激による反射的眼球運動がより効率的に誘発される刺激条件において, 逆転ベクションがより強く生起することが確かめられており, 逆転ベクション生起に観察者の眼球運動が深く関与していることが示唆されていた. 本研究では, 観察者に実際の眼球運動課題を課すことにより, 逆転ベクション生起時に知覚情報処理過程に登録される眼球運動情報を直接検討することを試み, 逆転ベクション知覚状況においてのみ特異的な眼球運動誤差が生じることを明らかにした. これらの逆転ベクションに関する研究の結果は, 我々の環境への行動的適応に必要な不可欠な空間認識に, 眼球運動が不可分に関連しているとする他の研究(たとえば¹¹⁾など)と整合するものである. 今後は, 自己運動知覚にとどまらず, 知覚情報処理全般と眼球運動との関連を記述し得る論理的枠組みを構築するために, さらに多様な知覚現象を対象とした検討を進める.

4. まとめ

二重運動面を持つ各種の運動刺激パターンを呈示した際の被験者の眼球運動課題における誤差を分析した実験により, 逆転ベクションが生起する刺激条件においては, 逆転ベクション方向(前面刺激運動方向)への誤差が生じるが, 通常ベクションが生起する条件においては, 自己運動知覚が誘導されない条件と同じく, 系統的な眼球運動誤差は認められなかった. この結果は, 逆転ベクション生起に眼球運動に関する情報が関与していると考える我々の仮説と整合するものであり, 眼球運動情報の関与という側面から, 逆転ベクションと通常ベクションとが異なる生起メカニズムを持つことを示唆するものである.

謝辞

本研究の遂行に当たっては, 放送文化基金, 堀情報科学振興財団, 科学研究費補助金(課題番号15730342)の助成を受けた.

脚注

- * 眼球運動中には, 網膜像運動情報から外界における真の対象運動を決定することはできず, 網膜像運動情報を眼球運動に関する情報を用いて補正するこ

とにより、初めて安定した空間知覚が可能となる。知覚情報処理において、このような比較相殺過程 (cancellation process) の存在を仮定する考えは古く Helmholtz(1866) までさかのぼることができ⁸⁾、知覚情報処理に眼球運動情報が大きな影響を及ぼしていること、さらには眼球運動情報が誤登録されることにより運動知覚の錯誤 (運動錯視) が生じる事が多くの研究により示されている (Mack[1975] の総説を参照のこと⁹⁾).

視標に向かう急速眼球運動の偏り. 電子情報通信学会技術報告書,NC97-128, pp.207-213 (1998)

- 11) C. S. Royden, M. S. Banks & J. A. Crowell: The perception heading during eye movements. *Nature*, 360, pp.583-585 (1992)

引用文献

- 1) W. H. Warren: Self-motion: Visual perception and control. *Perception of Space and Motion* (Eds W. Epstein, S. Rogers) San Diego: Academic Press (1995)
- 2) M. Ohmi, I.P. Howard and J.P. Landolt: Circular vection as a function of foreground-background relationships. *Perception*, 16, pp.17-22 (1989)
- 3) M. Ohmi and I.P. Howard: Effect of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display. *Perception*, 17, pp.5-12 (1988)
- 4) S. Nakamura and S. Shimojo: Critical role of foreground stimuli in perceiving visually induced self-motion (vection). *Perception*, 28, pp.893-902 (1999)
- 5) S. Nakamura and S. Shimojo: A slowly moving foreground can capture an observer's self-motion – a report of a new motion illusion: inverted vection. *Vision Research*, 40, pp.2915-2923 (2000)
- 6) S. Nakamura and S. Shimojo: Sustained deviation of gaze direction can affect "inverted vection" induced by the foreground motion. *Vision Research*, 43, pp.745-749, (2003)
- 7) S. Nakamura: Effects of spatial arrangement of visual stimulus on inverted self-motion perception induced by the foreground motion: examination of OKN-suppression hypothesis. *Vision Research*, 44, pp.1951-1960 (2004)
- 8) H. von Helmholtz: *Handbuch der Physiologischen Optik*. (English translated by J.P.C. Southall. Wisc: Optical Society of America) (1866)
- 9) A. Mack: Perception during pursuit eye movements. *Psychologia*, 18, pp. 51-62 (1975)
- 10) 藤田昌彦, 星規久美: 視覚誘導性の自己回転感覚の下での