視覚対象の形態によって誘導される飛越眼球運動

北海道大学¹ 安 達 潤

Saccadic eye movement guided by the visual form

Jun Adachi (*Department of Psychology, Faculty of Education, Hokkaido University*)

This report describes an experiment in which was measured the onset latency of the saccade to the peripheral target under three conditions of visual cues for the target location. In the central cue condition (the C-condition), the cue was an arrow presented in the central visual field. In the peripheral cue condition (the P-condition), the cue was the form in which the target was presented in the peripheral visual field. In the one-sided cue condition (the O-condition), the cue was the target itself. The saccade latency was measured by means of electro-oculography. The results were; (1) the saccade latencies in the three conditions were significantly different from each other, (2) the latency was longest in the C-condition and shortest in the O-condition, (3) the difference in latency between the P and C-conditions was three times as large as that between O and P-conditions, (4) the latency variance was significantly larger in the C-condition than in the other conditions, (5) the difference in the variances was not significant between the O and P-conditions. The results were interpreted in terms of (a) cognitive processing of visual form and (b) the characteristics of the saccade system.

Key words: saccadic eye movements, latencies, peripheral targets, preattentive processes, focal attention.

飛越眼球運動(以下、眼球運動)の役割は周辺視野に存在する視覚対象を中心窩で捕捉することである。刺激野内の目標対象を中心窩で捉える場合、刺激野が一定の空間構造を有し、目標対象の位置がその構造に対して安定した関係を保つならば、観察者は刺激野構造に基づいて眼球運動を制御し、目標対象を選択することができる(Noton & Stark, 1971)。これは高次認知系が関与する内因性の眼球運動制御と捉え得る。一方、刺激野が一定の構造を持たなかったり、一定の構造があってもその構造に対する目標対象位置の関係が安定的でなければ刺激野各部を順次中心窩で捕捉して目標対象を確認することが必要となる。しかし刺激野内の対象間に色や形、大きさ等の視覚的特性差があればその差異検出が可能な視野範囲内で目標対象である可能性を持つ対象をある程度限定または特定化し得る(Williams, 1966)。これは視覚入力による外因性眼球運動制御と捉えることができ、視覚的特性の周辺視処理によって達成されると考え得る。

眼球運動の内因性制御と外因性制御は、眼球運動と空間注意移動の関係を検討した研究で実験的に取り扱われたことがある(Posner, 1980; Remington, 1980)。そこでは目標刺激の呈示位置を先行手がかりによって被験者

に予め与えるという技法を利用し、中心視野に矢印を呈示して目標刺激位置を指示すること(中心視手がかり)で内因性制御を、目標刺激呈示位置に課題無関連な刺激を呈示すること(周辺視手がかり)で外因性制御を実現している。しかし、この実験設定では中心視手がかりが矢印の形態処理を被験者に要請するのに対して、周辺視手がかりは形態処理を要請しないため、条件間に課題負荷差があると思われる。さらに眼球運動が外因性に制御される場合、通常は視野内に複数の対象があるが、先の周辺視手がかりはこの事態とは異なる。本研究の目的はこれらの問題点を考慮した実験状況で眼球運動の外因性制御と内因性制御とを比較検討することである。そのために本研究では従来の周辺視手がかり条件を若干変更した。変更は互いに形態差を持つ複数刺激を周辺視野に同時呈示し、形態差に基づく対象選択を被験者に課するという形で行なった。設定条件は上述の周辺視手がかり(Peripheral cue)条件(以下、P条件)と中心視手がかり(Central cue)条件(以下、C条件)である。また今回の実験のP条件とPosner(1980), Remington(1980)が使用したタイプの周辺視手がかり条件とを比較するために、補足条件として片側視野に呈示される単一対象に対して眼球運動を行なう条件を設定した。この条件は片側手がかり(One-sided cue)条件(以下、O条件)と呼ぶ。中心視手がかりと周辺視手がかりが眼球運動制御に及ぼす影

¹ 現所属、旭川児童院。(Asahigawa Jidoin Children's Hospital, Gionchisaki, Okayama 703)

響に関して従来の研究は、周辺視手がかりに比べて中心視手がかりの眼球運動潜時が約 100 ms 長くなることを示している (Remington, 1980). 本研究が選択した条件間比較測定は課題刺激が呈示されてから飛越眼球運動が起こるまでの眼球運動潜時であり、Remington (1980) が見いだした条件間眼球運動潜時差が今回の実験設定でも観察されるか否かを検討する。なお今回の実験では手がかりと眼球運動目標を同時呈示し、手がかり処理開始時点からの眼球運動潜時を測定した。

実 験

被験者 大学生 10 名。平均年齢 21.0 歳。矯正視力 0.2 以下の 1 名を除いた 9 名の矯正を含む両眼視力は 1.0 前後。これら 9 名のデータを分析した。

刺激と課題設定 Figure 1a, b はそれぞれ P 条件と C 条件で用いた課題刺激の一例である。図中に被験者から見た刺激の大きさを点線と数値で示す。点線と数値は課題刺激の中に含まれない。P 条件の課題刺激は課題刺激呈示前の凝視位置から離心度 10 度で左右対称に配置した文字枠 (二重丸と二重四角) と枠内文字から構成され、C 条件の課題刺激は同じく離心度 10 度で左右対称に配置した文字枠 (2 つの二重四角) と枠内文字、矢印から構成される。O 条件の課題刺激は、離心度 10 度で片側視野に配置した単一文字枠 (Figure 1 の二重四角と同一のもの) と枠内文字から構成される。P 条件の課題は二重四角枠内の判断文字に視線を移し、枠内文字の WM 判断を行なうことである。C 条件の課題は矢印が指示する方の二重四角枠内の判断文字に視線を移し、文字判断を行なうことである。O 条件の課題は呈示された二重四角枠内の判断文字に視線を移し、文字判断を行なうことである。判断結果は W ならば手中のボタンを押す、M ならば押さないことで報告させた。

手続きと実験環境 実験実施に関して、O 条件は他の 2 条件と課題負荷が異なるため、他条件の実施後、別の日に単独で行なった。P, C 両条件は 1 セッション 40 試行を各条件 3 セッション行ない、第 1 セッションは練習として分析から除外した。1 セッション内全試行で一方

の枠に W、もう一方の枠に M を置き、その構成は 36 試行で指示枠内文字が W、4 試行で M であった。後者 4 試行は指示枠への視線移動を被験者が怠らないためのダミーである。O 条件では 20 試行の練習を行なった後、1 セッション 40 試行 (4 試行のダミーを含む) を 2 セッション行なった。練習試行は分析から除外した。全条件で 1 セッション内の手がかり指示方向は左右でカウンターバランスし、ダミー試行は適度に分散して配置した。P, C 条件の実施順序は被験者間でカウンターバランスした。実験の説明は事前に文書と図版で行なった。遂行の正誤に関するフィードバックは行っていない。実験は防音と電氣的遮蔽を施した暗室で、暗順応下で行なった。刺激は暗室外に設置したスライド投映機で透過窓を通じて透過型スクリーンに投映した。被験者は歯科用の安楽椅子に座り、スクリーン中央が眼前 1.5 m にくるように位置調整した。椅子の構造上、ヘッドレストが使用不能であったため眼球運動時の頭部運動抑制を繰り返し指示した²。全条件共通の刺激呈示手続きは以下の通り。視角で 2.8 度離して水平に配置した 2 光点の中心 (スクリーン中央に一致) を被験者が凝視している状態で警告刺激の pip 音を 100 ms 呈示した後、900 ms の時間間隔で課題刺激を凝視用 2 光点に重ねて 4000 ms 呈示した。被験者には 1 試行終了毎に 2 光点中心を凝視することを教示し、ペン書き記録の EOG 波形が変動しないことを視察で確認することをもって被験者が凝視状態にあるとの判定を下した。通常の単一凝視点を使用しなかったのは、C 条件で視野中央に矢印が呈示されるために凝視点との重なりで矢印同定が妨害されないためである。全条件で同一の凝視点を使用し、条件間統制を図った。

刺激制御と遂行測定 課題刺激の投映にはスライド投映機 (OMNIGRAPHIC 300, (株) ELMO 社) を使用し、刺激呈示には電子シャッター (T.K.K. 270b, 竹井機器 (株)) とシャッタードライバー (T.K.K. 270c, 竹井機器 (株)) を使用した。シャッターの開閉時間は 5.0 ms である。pip 音はファンクションジェネレーター (FG-330, 岩崎通信機 (株)) を使用して発生させた。反応時間 (課題刺激呈示から被験者の文字判断後ボタン押し迄の時間) の測定にはデジタルストップウォッチ (T.K.K. 413, 竹井機器 (株)) を使用した。これらの機器の制御にはタイムプログラマー (T.K.K. 419, 竹井機器 (株)) を使用した。眼球運動の測定は水平垂直 2 成分を EOG 法で行なった。使用電極は Ag-AgCl 電極 (ベックマン

Figure 1. Examples of the task stimulus in the peripheral cue condition (a) and the central cue condition (b). Figures with dotted lines represent the stimulus dimensions in degrees of the visual angle.

² 頭部運動はモニターしていないので、頭部運動の影響を検討することはできない。しかし Trevvarthen (1968) によれば中心窩から約 15 度以内の視野範囲では、眼球運動のみが作動する。本報告ではこの記述に従い、眼球運動視標位置を 10 度とした。

社)である。電極装着部位は左右外眼窩と左眼上下で、電極糊と外科用テープで装着した。EOG の増幅には、生体電気直流増幅ユニット(1169, 日本電気三栄(株))を使用し、その出力を多用途脳波計(EEG1A94, 日本電気三栄(株))の外部入力を通じて脳波用紙上にペン書き記録し、さらに脳波計出力を磁気テープレコーダー(SR-70, TEAC(株))を使用して磁気テープ上に記録した。

データ分析 各被験者の EOG ペン書き記録から各試行の眼球運動を視察し以下の試行を分析除外対象とした。1つは本研究で設定した凝視状態から水平2光点の一方へ凝視が移ったことの反映と推測される非常に小さな振幅を持つ眼球運動波形を認めた試行である。除外理由は刺激呈示後にこれが起こると目標対象への眼球運動潜時に影響する可能性があるためである。また眼球運動エラーとして 1) 第1眼球運動が指示の反対方向へ動いた試行、及び 2) 二重眼球運動が起こった試行を除外した。2) は全て undershoot であった。眼球運動エラー同定は、第1眼球運動振幅が2光点の一方の光点凝視によると推測される眼球運動の振幅よりも視察上大きいことを基準とした。被験者の疲労や眠気のため EOG 波形が極端に乱れた試行、課題刺激呈示後 60 ms 以前に眼球運動が起こった試行も除外した。基準時間の 60 ms は Boch & Fischer (1986) に従った。磁気テープ上の EOG 信号はミニコンピュータシステム(HP1000, ヒューレットパッカード社)を使って毎秒 256 点で AD 変換し、試行毎にファイル化した。そのデータを自作の眼球運動分析プログラムで分析し、眼球運動潜時と終了時点を算出した³。測定値の有意差検定は分散比の検定と平均値の差の検定で行なった。有意水準を 0.05 とした。ダミー試行は眼球運動潜時の分析対象とはしたが、反応時間に関しては被験者がボタン押しをしていないので、分析対象とはならなかった。

³ 今回の実験では眼球運動測定に関して、同一眼球運動振幅に対する EOG 振幅の厳密な較正を行っていないので、眼球運動開始の基準は被験者間で若干異なっている。眼球運動解析プログラムは眼球運動角速度を検出基準として利用しているので、いま O 条件で得られた各被験者の平均振幅値を 10 度飛越眼球運動振幅値と見なすと、眼球運動開始検出基準は平均で 97.3 ± 13.1 度/秒 (range=[75.5, 116.3]) となる。ただし 10 度飛越眼球運動経過の中でこれらの角速度が達成される時点を Yarbus (1967) に記述されている等式から逆算すると平均 5.6 ± 0.8 ms (range=[4.3, 6.8]) となり、被験者間の眼球運動検出時点のずれは最大でも 2.5 ms に過ぎない。さらに、同一被験者内で検出基準は変動していない。よって本報告は、ここに示された眼球運動開始時点の変動性が今回の実験で得られた条件間潜時差に対して影響を及ぼしていないと考える。

結 果

除外試行 データ分析の項目で述べた基準に従って分析対象から以下の試行を除外した。P, C 両条件の 1440 試行 (9 subjects $\times$ 80 trials $\times$ 2 条件) 中、除外した試行は、方向エラー 100 試行、二重眼球運動エラー 15 試行、先行エラー 6 試行、小振幅眼球運動生起 58 試行である。O 条件の 720 試行中、除外した試行は、二重眼球運動エラー 6 試行、先行エラー 8 試行、小振幅眼球運動生起 9 試行、疲労、眠気による波形の乱れ 2 試行である。

眼球運動潜時 眼球運動潜時は課題刺激呈示後眼球運動開始までの時間である。各条件各被験者毎に算出した値で平均値から 2 SD (標準偏差の 2 倍) 範囲外のは検定対象から除いた。眼球運動潜時の総被験者平均 (以下、総平均) とその標準偏差を条件別に Figure 2 に示す (C 条件: 総平均=301.7 ms, 標準偏差=42.2 ms; P 条件: 総平均=213.5 ms, 標準偏差=21.4 ms; O 条件: 総平均=182.1 ms, 標準偏差=20.1 ms)。最初に各条件間の眼球運動潜時値に対して分散比の検定を行なった。検定は P, O 条件間には有意差を示さず ($F_{(8,8)} = 1.14, p > .05$), C, P 条件間, C, O 条件間には有意差を示した (Cvs. P: $F_{(8,8)} = 3.8, p < .05$; Cvs. O: $F_{(8,8)} = 4.40, p < .05$)。次に各条件間の眼球運動潜時に対して平均値の差の検定を行なった。検定は全ての条件間に有意差を示した (Pvs. C: $t_{(11,9)} = 5.27, p < .01$; Ovs. P: $t_{(16)} = 3.02, p < .01$; Ovs. C: $t_{(10,9)} = 7.24, p < .01$)⁴。

Figure 2. Saccade latency in ms and standard deviation (SD). For each of the three conditions, the grand mean saccade latency across nine subjects is shown with a vertical bar along with the SD. The left ordinate shows saccade latencies in ms and the three conditions are shown on the abscissa.

⁴ 分散が異なる条件間の検定の場合は、肥田野・瀬谷・大川(1961)に記述されている計算方式に従った。

反応時間 反応時間は眼球運動終了時点から被験者のボタン押し迄の時間である。反応時間の分析は P 条件と C 条件のみで、平均値から $2SD$ 範囲外にあるものを除いて行なった (P 条件: 総平均=409.1 ms, 標準偏差=95.1 ms; C 条件: 総平均=374.8 ms, 標準偏差=71.0 ms)。分散比の検定, 平均値の差の検定共に有意差を示さなかった ($F_{(8,8)}=1.79, p>.05$; $t_{(16)}=0.82, p>.05$)。

考 察

C 条件, P 条件, O 条件の眼球運動潜時は 3 条件相互間に有意差を示した。しかし眼球運動潜時差は, P, C 条件間 (88.2 ms) が O, P 条件間 (31.4 ms) の約 3 倍であった。一方, 眼球運動潜時の分散値は P, O 条件間に有意差がなく, C 条件は P, O 条件よりも有意に大きかった。今回の実験結果は Remington (1980) が見落とした条件間課題負荷差を低減するために周辺視手がかり条件に形態弁別課題を導入した状況で得られた。本研究が示したことは, 外因性制御事態に形態処理を導入しても外因性制御事態と内因性制御事態との眼球運動潜時差が解消されないということである。そして周辺視手がかり条件は相対的に片側手がかり条件と類似した結果であった。以下, 今回設定した 3 条件の眼球運動潜時差に関する考察を 2 つの視点から行なう。その 1 つは手がかりの形態処理水準に関連し, もう 1 つは眼球運動系の作動特性に関連するものである。

形態処理水準 今回の実験で形態処理が要請されるのは C 条件と P 条件である。両条件の形態処理は 2 つの選択肢から一方を選択するという意味では同一だが, 比較されるもう一方の選択肢との関係が異なっている。C 条件の右矢印, 左矢印は同一の局所の特徴 (水平線分 1, 斜線分 2) から構成されているため, それら特徴間の空間位置関係の処理を必要とする。一方 P 条件の二重四角と二重丸は同一の局所の特徴を共有していないため, 角と直線という局所の特徴だけの処理で課題遂行が可能となる。C, P 条件間形態処理差は焦点的注意過程と前注意過程 (Neisser, 1967) の差として捉え得る。Julesz (1981a) は視覚的精査なく成立する前注意的 texture 分凝を支える texture 要素の局所の特徴を *texton* と呼んだ。Texture 間で *texton* が異なったり, *texton* 密度に差があると前注意的 texture 分凝が成立する (Julesz, 1981b)。今回の C, P 条件間形態処理差は *texton* 差に基づく遂行が可能か否かの問題であり, C 条件では *texton* 差を利用し得ず, P 条件では *texton* 差を利用し得る。よって C 条件は焦点的注意を要請するが, P 条件は前注意過程のみで遂行可能となる。P 条件で得られた殆どの言語報告は“四角が目飛び込んでくる”という内容を持ち, “努力を要さない知覚”という前注意的

texture 分凝の特徴を示した。以上の論議に基づけば, C, P 条件間に観察された眼球運動潜時差は前注意過程が焦点的注意に先行する (Neisser, 1967) ことの反映と考え得る。Sagi & Julesz (1985) は *texton* 差の存否を操作した視覚探索課題を設定し, 目標刺激の検出がその同定に先行することを示している。よって C, P 条件間の眼球運動潜時差は矢印同定と四角枠検出の時間差の反映である可能性がある。だが今回の実験では矢印同定時間と四角枠検出時間を独立して測定していない。この可能性の実験的確認は今後の検討課題となろう。ところで O 条件を以上の論議の下で検討すると, この条件は前注意過程のみで遂行可能である。O 条件の手がかりは視野面の輝度変化と捉えることができ, 明らかな輝度差を持つ 2 つの texture は視覚的精査なしで分凝する。以上の論議に基づけば眼球運動潜時と分散に関して今回得られた結果は眼球運動潜時に対応する時間帯で P, O 両条件では前注意過程が, C 条件では焦点的注意過程が作動した可能性を支持する。だが P, O 条件間眼球運動潜時差は有意であった。この潜時差は視野の輝度変化に基づく前注意過程と刺激の *texton* 差に基づく前注意過程との処理時間差の反映である可能性があるが, これは今回確認されていない。

眼球運動系の作動特性 本研究における条件間課題刺激構成の差は 2 つの点で眼球運動潜時に影響を及ぼす可能性がある, それらは 1) 左右視野呈示と片側視野呈示の差, 2) 眼球運動開始に至る経過で対象凝視が要求されるか否かである。1) に関しては刺激を視野の左右両側へ呈示すると片側呈示に比して眼球運動潜時が増大するという報告があり (Findlay, 1981), それは脳幹眼球運動回路が左右間で相互抑制結合を実現している (Fuchs, Kaneko, & Scudder, 1985) ことで説明され得る。O 条件の眼球運動潜時が他条件よりも短かったという結果にも同様の説明が可能である。しかしこれ単独では C, P 条件間の眼球運動潜時差を説明しない。2) は C 条件の眼球運動潜時増大に関わり, 2 通りの影響の可能性が考えられる。その 1 つは, a) 対象凝視状態が脳幹眼球運動回路に及ぼす抑制効果であり, もう 1 つは b) 眼球運動開始に先行して小飛越眼球運動 (small saccade) が起こったことである。a) については, 眼球運動開始に至る経過で対象凝視を必要としたのは C 条件だけであり, 対象凝視状態で上丘を電気刺激した時の眼球運動生起率が特に課題を課されていない状態に比べて低いという報告がある (Sparks & Mays, 1983)。これは C, P 条件間眼球運動潜時差に凝視状態の存否が関与した可能性を示している。b) は C 条件で矢印同定の際に小飛越眼球運動が生じた可能性 (Kowler & Steinman, 1977) である。小飛越眼球運動が生じたとすれば, それが引き起こす眼球運動不応期のために後続運動開始が遅れたことが考

え得る (Saslow, 1967).

以上, 今回の実験で得られた眼球運動潜時差を説明する2つの可能なメカニズムを論議した. 今後の研究でこれらの説明を実験的に検討することが必要であろう.

引用文献

- Boch, R., & Fischer, B. 1986 Further observations on the occurrence of express-saccade in the monkey. *Experimental Brain Research*, **63**, 487-494.
- Findlay, J.M. 1981 Global visual processing for saccadic eye movements. *Vision Research*, **22**, 1033-1045.
- Fuchs, A. F., Kaneko, C.R.S., & Scudder, C. A. 1985 Brainstem control of saccadic eye movements. *Annual Review of Neuroscience*, **8**, 307-337.
- 肥田野 直・瀬谷正敏・大川信明 1961 心理教育統計学 培風館
- Julesz, B. 1981a Textons, the elements of texture perception, and their interactions. *Nature*, **290**, 91-97.
- Julesz, B. 1981b A theory of preattentive texture discrimination based on first-order statistics of textons. *Biological Cybernetics*, **41**, 131-138.
- Kowler, E., & Steinman, R.M. 1977 The roll of small saccades in counting. *Vision Research*, **17**, 141-146.
- Neisser, U. 1967 *Cognitive psychology*. New York: Appleton-Century-Crofts.
- Noton, D., & Stark, L. 1971 Scanpaths in saccadic eye movements while viewing and recognizing patterns. *Vision Research*, **11**, 929-942.
- Posner, M.I. 1980 Orienting of attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, **32**, 3-25.
- Remington, R. W. 1980 Attention and saccadic eye movements. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **6**, 726-744.
- Sagi, D., & Julesz, B. 1985 "Where" and "What" in vision. *Science*, **228**, 1217-1219.
- Saslow, M.G. 1967 Effects of components of displacement-step stimuli upon latency for saccadic eye movement. *Journal of the Optical Society of America*, **57**, 1024-1029.
- Sparks, D.L., & Mays, L. E. 1983 Spatial localization of saccade target. I. Compensation for stimulus induced perturbations in eye position. *Journal of Neurophysiology*, **49**, 45-63.
- Trevarthen, C. B. 1968 Two mechanisms of vision in primates. *Psychologische Forschung*, **31**, 299-337.
- Williams, L. G. 1966 The effect of target specification on objects fixated during visual search. *Perception and Psychophysics*, **1**, 315-318.
- Yarbus, A. L. 1967 *Eye movements and vision*. New York. Plenum press.

——1990. 4. 25. 受稿, 1992. 1. 18. 受理——