

## 研究

## サッカード前後の視野統合可能変位量

石田泰一郎・池田 光男

東京工業大学大学院総合理工学研究科 〒227 横浜市緑区長津田町 4259

(1990年3月13日受付, 1990年7月24日受理)

## Tolerable Displacement Size for Integrating Visual Information Across a Saccade

Taiichiro ISHIDA and Mitsuo IKEDA

Department of Information Processing, Tokyo Institute of Technology, Graduate School,  
4259, Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 227

(Received March 13, 1990; Accepted July 24, 1990)

We measured the threshold displacement size tolerable for perceiving a stable world from successive fixations. Two experiments were conducted in which the picture projected on a screen was displaced laterally with a certain amount every time a subject made a saccadic eye movement, while the subject was observing the picture. In experiment 1, the threshold displacement size was measured when the displacement was done at the beginning of a saccade (SAC) or at a certain delay from the end of a saccade (FIX). It was found that the threshold displacement size was about  $1^\circ$  with SAC condition, while it was less than  $0.1^\circ$  with FIX condition. In experiment 2, threshold displacement size for twenty various stimulus was measured with SAC condition. It was also shown that the threshold displacement size was fairly large with SAC condition but its value varied with the stimulus.

## 1. はじめに

人間は頻りに眼球を動かすことによって外界の認識を行っている。なかでもサッカード(跳躍)はわれわれが外界を観察したり文章を読むときなど、最も一般的に生じる眼球運動であり、きわめて重要な役割を担っている。サッカードが生じると眼球はある位置から次の位置に向かって急速に回転する。そしてサッカードが終わると眼球はその位置で停止することになる。この眼球が停止している間を注視と呼び、通常200から300msの間続く。人間はこのように眼球の停止と急速な回転、すなわち注視とサッカードという動作を1秒間におよそ3から4回の割合で繰り返すことによって、外界の情報を収集し認識しているのである。ところでサッカードが生じると、その度に視覚系の情報の入力源である網膜像も変化することになる。仮にわれわれの知覚している世界が網膜像の直接の反映であるならば、サッカードが生じる度に外界が跳びはねて見えるはずである。しかし通

常の場合そのような知覚はまったくなく、われわれが見ている世界は連続でかつ安定している。したがって視覚系にはサッカードによって次々と変化する網膜の情報から、外界の安定した知覚を形成するための機構が備わっていると考えられる。

その機構では、まずサッカード中の急速に流れる網膜像を知覚しないようにすることが必要であると考えられる。このことに関しては、サッカード中の入力が抑制されて知覚されないことが多くの研究によって明らかにされている<sup>1-7)</sup>。この現象は跳躍時抑制(saccadic suppression)と呼ばれており、視覚マスキングのメカニズムが大きく寄与しているとする考えが有力である。次にサッカードによって時間的、空間的に分断された網膜からの情報を統合して、一つの安定した外界の知覚を形成することが必要となる。この問題に関しても多くの研究が行われている<sup>8-13)</sup>。代表的なものとしては、Sperryら<sup>8)</sup>が提案したサッカードによる網膜像の変化を、眼球の変化量を与える遠心性の信号によって補正するという

ものがある。また MacKay<sup>11)</sup>は視覚系は、眼球が動いているか否かを判断し、眼球運動が生じたときの網膜像の変化は、外界の動きとして知覚しないという考えを提案した。最近 Shioiri ら<sup>13)</sup>は、サックード時の網膜像の移動が動きとして知覚されないことを、ランダムドットパターンを用いることにより明らかにし、サックード時の動きの知覚が抑制されることで、視野の安定を保つという考えを提案している。このようにサックード前後の視野の統合の問題に対していくつかの説が提案されているが、視野の安定がどのようなメカニズムで、あるいはどのような情報を用いて保たれているのか、未だ不明な点が残されている。

本研究では、被験者が刺激を自由に観察している間サックードが生じる度に、刺激をある大きさだけ移動させる実験を行う。仮に視覚系がサックード前後の視野を統合する際に、刺激の網膜座標上での正確な位置の情報を必要としているならば、このような実験操作を行うことによって、視野の統合ができなくなり、外界の刺激の動きが知覚されるはずである。一方、サックード前後の視野の統合に刺激の厳密な位置情報が必ずしも必要でなく、ある程度の許容範囲があるとするれば、その範囲内の刺激の移動に対しては統合が可能となり、外界は静止して知覚されるはずである。つまり本研究の目的は、サックード前後の刺激の移動量がどのくらいの範囲内であれば、外界を静止したのと同じく知覚することができるのかその範囲を測定し、サックード前後の視野の統合の特性を検討することである。

## 2. 実験方法

### 2.1 実験原理

Fig. 1 は実験方法の説明図である。被験者はスクリーンに投影された図のような刺激を自由に観察する。そして被験者がサックードを行うと、ただちにスクリーン上の刺激の位置を水平方向にある量  $\Delta\theta$  だけ移動させる。即ち被験者がサックードを行う度にスクリーン上の刺激を、Fig. 1(a)から Fig. 1(b)に、あるいはその反対に切り替えることにより、右あるいは左に  $\Delta\theta$  移動させるのである。これによってサックード後に視覚系に入力される視覚情報の網膜座標上の位置は、サックード前に予期された位置に比べて、水平方向に  $\Delta\theta$  だけずれることになる。このような操作を行い  $\Delta\theta$  を十分大きく取れば、被験者には眼を動かす度に、スクリーン上の刺激が水平方向に移動して見えるはずである。一方、 $\Delta\theta$  がある範囲内であれば、被験者はその動きを知覚しない

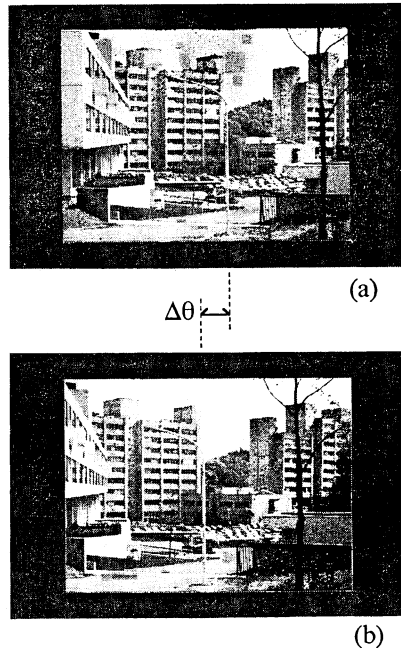


Fig. 1 An example of a test stimulus and a displacement size  $\Delta\theta$ .

可能性がある。そしてこのときの  $\Delta\theta$  の大きさを求めれば、その値は視覚系がサックード前後の視野を統合する際に、許容して統合することが可能な網膜上での位置のずれの量と考えることができる。この量のことを統合可能変位量と呼ぶことにし、記号  $\delta$  で表現する。

本研究は二つの実験からなっている。実験1では、サックードの開始時に刺激を動かした条件 (SAC) と、眼が静止している注視時に刺激を動かした条件 (FIX) での動きの知覚閾を測定し、それらを比較検討した。実験2では統合可能変位量がどのような刺激の特徴によって影響されるか検討するために、サックードの開始時に刺激を動かす条件について、風景などの20枚のスライド写真を刺激として用い、それぞれの刺激について動きの知覚閾を測定した。

### 2.2 実験装置

上に述べた実験を行うために製作した装置の概略を Fig. 2 に示す。この装置の主要な点は、眼球運動の検出と刺激を切り替える光学系にある。まず眼球運動を検出するために、光源 LS (ハロゲンランプ) からの光をレンズ L1、赤外線透過フィルター F を通して、被験者 SUB の右眼に照射し、角膜表面での反射レンズ L2 を通して半導体位置検出素子 PSD 上に結像させる。この PSD からはセンサー上に入射している光の強度分布の水平、垂直成分が独立に出力されるので、これらを増幅

すれば眼球の水平位置 (X), 垂直位置 (Y) に対応した信号を得ることができる. 今回の実験ではサッケードの開始, および終了を検出し刺激の切り替えを行う必要があるため, サッケードの開始と終了の検出を次のような方法で行った. 被験者の眼球の水平位置, 垂直位置の信号をそれぞれ微分回路によって微分し, 眼球運動の水平成分の速度と垂直成分の速度の信号を得る. そしてこの信号が一定のレベルを越したときサッケードの開始と判断し, 再びこのレベルより小さくなったときサッケードの終了と判断する. 実際にはコンパレータ回路によってレベルを設定しサッケードの開始と終了を検出する.

PSD の増幅回路からコンパレータ回路まではオペアンプを中心としたアナログ回路で製作した. 眼球運動検出器の調整は次のような方法で行った. まずスクリーン上に基準座標を呈示し, 被験者が中心, 右, 左, 上, 下

の基準点を固視したときに, 眼球運動検出器の出力が適当な電圧となるように, 水平, 垂直それぞれのゲインとゼロ点を調節する. 次にコンパレータによる検出レベルの設定は, 被験者が固視した状態で検出レベルを最小から徐々に高くしていき, 眼球運動検出器の光学系および電気系のノイズのレベルを越えたところに設定する. PSD の出力を増幅した眼球位置の信号と, コンパレータによるサッケード検出信号の例を Fig. 3 (a) (b) 上に示す. 上側の記録が眼球運動の記録であり, 下側の記録がコンパレータの出力で, レベルが下がっている間がサッケードとして検出された部分である. この立上りと立下りの部分をサッケードの開始信号と終了信号として用いた. 今回の装置での実際に眼球が動き始めてからサッケード開始を検出するまでの遅れは約 5 ms 以内である.

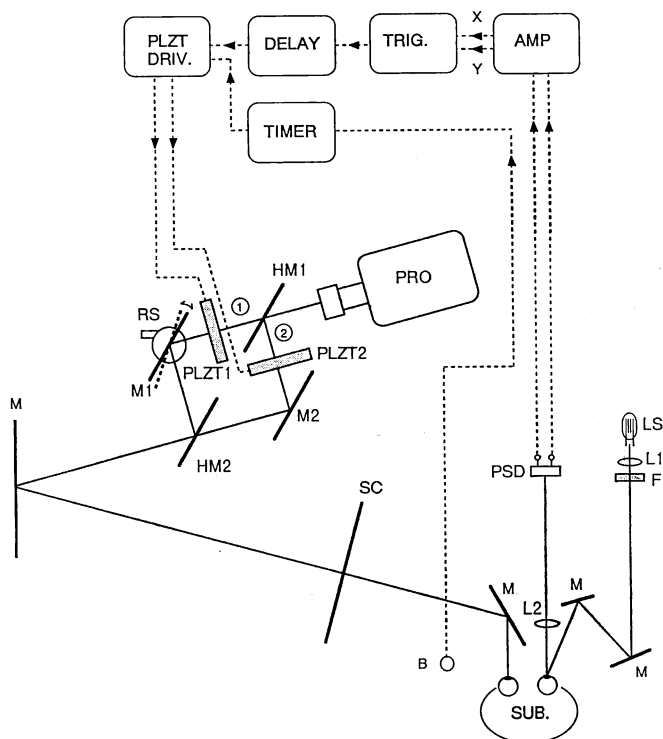
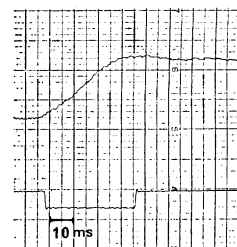
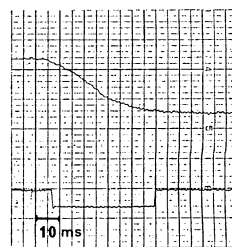


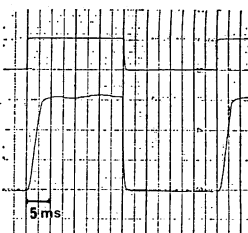
Fig. 2 Schematic view of the apparatus. F: infrared filter, HM: half mirror, L: lens, LS: light source, M: mirrors, PLZT: optical shutter, PRO: projector, PSD: position sensitive detector, RS: rotating stage, B: button, SUB: subject.



(a)



(b)



(c)

Fig. 3 (a)(b) Records of a saccadic eye movement (upper) and the comparator signal (lower) which detected the saccadic eye movement. (c) Records of the input signals (upper) and the responses of PLZT (lower) measured by a phototransistor.

刺激はすべて 35 mm のカラーライドであり、それをプロジェクター PRO によりリアスクリーン SC 上に投影する。スクリーンの大きさは視角で横 25°, 縦 18° である。まずプロジェクターの光をハーフミラー HM1 によって二つの光路 1 および 2 に分ける。それぞれの光路には高速シャッター PLZT が挿入してあり、電圧を印加することによって光学的に光路 1 あるいは光路 2 を開閉することができるようになっている。また光路 1 のミラー M1 は回転ステージ RS の上に固定してあり、その角度を微調節することによって、スクリーン SC 上での刺激の水平方向の位置を正確に変えることが可能である。ミラー M1, M2 を経たそれぞれの光はハーフミラー HM2 によって再び同一の光路に戻され、被験者が左眼で観察するリアスクリーン上に投影される。したがってサッケード開始の信号を用いて PLZT を駆動し光路 1 と光路 2 を交互に開閉すれば、サッケードが生じる度にスクリーンに投影される刺激は、光路 1 から光路 2 に、あるいはその反対に切り替えられることになる。そしてこのときミラー M1 の角度を調節して、光路 1 のスクリーンでの位置を光路 2 に対して  $\Delta\theta$  だけずらしておけば、サッケードが生じるとただちにスクリーンに投影されている刺激が、Fig. 1 に示したように右あるいは左に  $\Delta\theta$  移動することになる。

PLZT の反応時間を測定するために、実際にスクリーンの位置にフォトトランジスタを置き、光路の切り替えに要する時間を測定した。結果例を Fig. 3(c) に示す。上側の記録が PLZT の駆動信号であり、下側の記録が PLZT の応答を示すフォトトランジスタの出力である。この記録から PLZT による光路の切り替えに要する時間は約 2 ms 程度であることがわかる。したがってサッケードの検出の遅れ時間と合わせて、サッケードが生じてから実際に刺激を切り替えるまでの遅れ時間は約 5 ms から 7 ms 程度である。この程度の遅れであれば、

刺激の切り替えがサッケード中に完了するので、今回の実験では問題はないと考えられる。

### 2.3 刺 激

本実験では刺激として現実の風景や建物のカラーライドを用いた。その理由は刺激をできるだけ現実の画像に近いものにするによって、被験者が自然な観察を行えるようにし、視覚系が通常行っている処理の特性を調べるためである。

## 3. 実 験 1

### 3.1 実験方法

実験 1 では刺激を移動する時間を、サッケードの開始時 (SAC)、注視の開始時 (FIX0)、注視開始後 25 ms (FIX25)、注視開始後 50 ms (FIX50) の 4 条件を設定し、それぞれについて刺激の動きに対する知覚閾を測定した。サッケード前後の視野の統合が、かなり大きな統合可能変位量をもって行われているとすれば、SAC の条件での動きの知覚閾は他の条件と比べてかなり大きな値になるはずである。実験 1 では、SAC の条件での閾値と、FIX の条件での閾値を比較することによって、統合可能変位量が存在するか否かを確かめることになる。

本実験では恒常法を用いて閾値の測定を行った。刺激の移動量  $\Delta\theta$  としては、あらかじめ予備的な実験によってほとんど刺激の動きを知覚できない  $\Delta\theta$  と、十分動きを知覚できる  $\Delta\theta$  を調べ、その範囲内でいくつかの値を設定した。まず実験を開始する前に眼球運動検出器の調整を行う。また実験の途中でも定期的に基準座標を呈示し、被験者が基準点間でサッケードを行い眼球運動検出の精度を点検し再調整する。そして装置の調整や条件の設定などの準備が完了すると実験の試行の開始である。

1 回の試行の時間的な概略を Fig. 4 に示す。

被験者が手元のボタン (Fig. 2 の B) を押すことによって実験の試行が開始される。被験者はスクリーンに

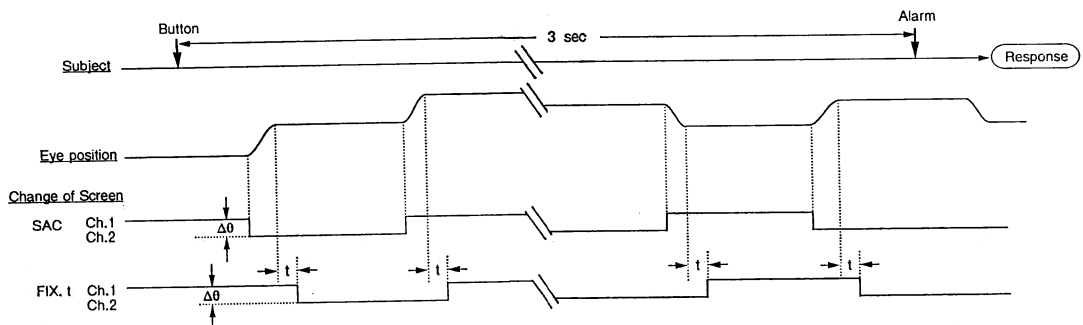


Fig. 4 The schematic representation of a single trial showing the sequence of eye movements and the changes of a screen in SAC condition or FIX.t condition.

投影されている刺激を自由に観察する。そしてボタンを押してから3秒経過すると音の合図があり、被験者の観察は終了する。このボタンを押してからアラームが鳴るまでの間、被験者がサックードを行うたびに、刺激が Ch. 1 から Ch. 2, あるいはその反対に切り替わり、それによって刺激の位置があらかじめ設定された量  $\Delta\theta$  だけ水平方向に移動することになる。図に示したように SAC の条件ではこの切り替えがサックードの開始時に起こり、FIX.t の条件ではサックードの終了時から  $t$  ms 後に光路が切り替えられることになる。そしてアラームが鳴った後、被験者は刺激の動きに気がついたか否かを “Yes” または “No” の二者択一で応答する。これで1回の試行が完了し、実験者は別の条件を設定し次の試行に移る。

1回のセッションでは SAC あるいは FIX.t の4呈示条件のうちから2条件を選択し、それぞれの条件について設定されたおのおのの  $\Delta\theta$  について各10回の試行をランダムな順序で行った。このようなセッションを6回行うことにより、SAC, FIX0, FIX25, FIX50の各呈示条件のおのおのの  $\Delta\theta$  について合計30回の試行の結果から知覚確率を求めた。

刺激には5種類のスライドを用いた。これらはすべて大学のキャンパスの建物や風景を写したものである。実験ではそれぞれの刺激を取り替えながら同じ回数だけ使用したが、結果の集計ではそれらを一緒にして処理した。被験者は HK, TI, TT の3名でいずれも大学院生である。

### 3.2 実験結果

Fig. 5 に3人の被験者の実験結果を示す。三つのグラフは上から被験者 HK, TI, TT の結果である。横軸は刺激の移動量  $\Delta\theta$  の視角でとったもので、縦軸は刺激の動きを知覚した知覚確率である。そして各シンボルが刺激を動かす時間の条件、SAC (○), FIX0 (□), FIX25 (△), FIX50 (×) にそれぞれ対応している。プロットした各点は30回の試行から得られた知覚確率  $p$  である。

結果を見てみると、各条件とも右上がりの形状をしており、刺激の移動量が小さいときは、あまり動きを知覚できないが、移動量が大きくなると動きを知覚する確率も高くなっていくことがわかる。しかし各条件の結果を比較してみると、条件によって刺激を知覚できる移動量が大きく異なっていることが見て取れる。たとえば、HK について見てみると、注視時に刺激を移動した条件 FIX25, FIX50 では  $0.2^\circ$  程度の小さな移動量でも知

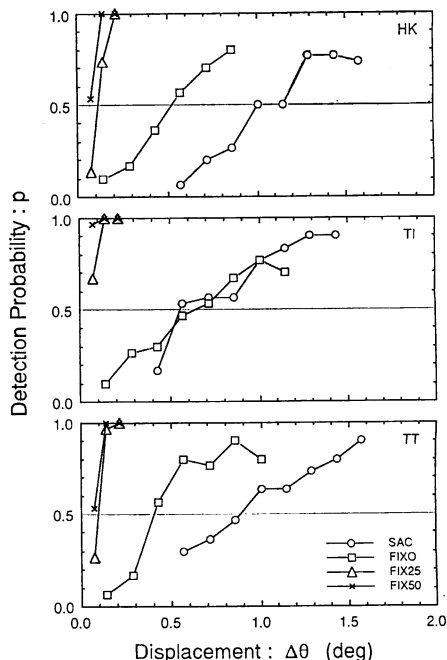


Fig. 5 Detection probability  $p$  as a function of the displacement size  $\Delta\theta$  for four experimental conditions. Subjects: HK, TI and TT.

覚確率は1.0であり、刺激の動きを100%知覚できている。それに対してHKのサックードの開始時に刺激を移動させた条件SACでは、 $\Delta\theta$ が $0.57^\circ$ であっても刺激の動きをほとんど知覚できず、 $\Delta\theta$ を $1^\circ$ にしても知覚確率は0.5であり、明らかに注視時に刺激の移動を行った条件とは、刺激の移動に対する見えが異なっている。つまりSACの条件ではかなり大きく移動させても、刺激の動きを知覚できないことがわかる。またHKの注視の開始時に刺激を移動させた条件(FIX0)では、FIX25, FIX50の条件とSACの条件の中間的な値になっている。このような傾向は三人の被験者ともに見られるが、TIのFIX0の条件についてはSACの条件とほぼ同じ知覚確率となっており、他の被験者と異なった結果となっている。

FIX25, 50の条件で刺激の移動に対する感度が高いという結果は、注視開始後25ms程度の時間であっても、通常の動きの知覚が行われていることを示している。一方、SACの条件では刺激の移動が視覚系の情報入力に抑制されているサックード中に行われており、サックード前後の刺激の位置のずれが、動きとして知覚されることなく一つの視野に統合されると考えることができる。またFIX0の結果は、注視の開始時では情報入力に感度が十分回復しておらず、刺激の移動を動きとして知覚す

ることが十分行われていないことを示していると考えることができる。

刺激の動きに対する知覚確率が50%となる刺激の移動量を閾値とすると、サッケードの開始時に刺激を移動させたSACの条件では、閾値は視角にして約 $1^\circ$ であり、注視時に刺激を移動した条件FIX25, FIX50での閾値( $0.1^\circ$ 以下)に比べて非常に大きな値である。したがって、覚覧系は約 $1^\circ$ というかなり大きな統合可能変位量をもってサッケード前後の視野の統合を行っていることが明らかとなった。

ここで被験者の内観報告について述べておく。実験中に実験者がスクリーンを見れば、被験者のサッケードの発生頻度、すなわち1秒間に3回程度の頻度で、刺激が左右に動いている様子が観察される。一方、その動きが自分のサッケードに同期して生じている被験者にとっては、閾下であればその動きはまったく知覚できない。被験者がNOと答えたときは、刺激は静止して見えているのである。 $\Delta\theta$ を閾値より大きくしていくと、被験者は刺激の動きを知覚することができるようになる。ただしこのとき知覚される刺激の動き方は、注視時に刺激を動かした条件のときの見えとは異なっている。FIX25, 50の条件では画面全体が左右に動いて知覚されるのに対して、SACの条件の場合、移動量 $\Delta\theta$ が閾値近くであれば、まずスクリーン内の刺激のある部分が動いたり、歪むように見えるのである。また実験1では刺激ごとに閾値を測定することは行わなかったが、被験者の内観では、刺激によって動きがわかりやすいものとわかりにくいものがあることが報告された。被験者の内観で動きを知覚しやすいとされた刺激は、たとえば建物を中心としたものであり、建物と背景の空の垂直方向の境界の部分がよく動いて見えるという報告がなされている。それに対して、動きが知覚しづかった刺激は、全体的に木が多く、建物にあるような直線的な部分は少ないものであった。このように、サッケード前後の統合可能変位量は刺激の視覚情報に依存することが示唆された。

## 4. 実験 2

### 4.1 実験方法

実験1からはサッケード前後の統合可能変位量 $\delta$ が、約 $1^\circ$ というかなり大きな値をもって存在することが明らかになった。また、被験者の内観によって $\delta$ が刺激の視覚情報に依存して変化することが示唆された。実験1では刺激を区別せずに動きの知覚閾を測定したが、 $\delta$ が刺激に依存するのであれば、刺激ごとに $\delta$ を測定する必

要がある。そこで実験2では、多くの多様な風景を用いて刺激ごとに $\delta$ を測定し、視覚系がどの程度の許容量をもって視覚情報の統合を行っているのかについて調べ、刺激による視野統合可能変位量の差を検討する。

実験2の実験手順は実験1とほとんど同じである。ただし、実験2では20種類の刺激を用い、刺激ごとに $\delta$ を測定する。また、刺激を移動する時間の条件はサッケードの開始時(SAC)のみ行い、他の条件では行わない。

実験2では1セッションで20枚の刺激について測定を行う。一つの刺激について、あらかじめ設定した $\Delta\theta$ について各1回ずつの試行を終えると次の刺激に移り、刺激の順序は無作為に行った。このようなセッションを一人の被験者について合計20セッション行うことにより、各刺激の各 $\Delta\theta$ について20回の判断を得て、それにより知覚確率を求めた。実験2の被験者はHK, MIの2名の男性であり、HKは実験1にも被験者として参加している。MIは53歳の男性である。

実験2で用いる刺激にはできるだけ多様なものを選び、風景、建物、人物、生物、絵などがある。そのうちの6例をFig. 6に示す。刺激は左側上から(a), (b), (c), 右側上から(d), (e), (f)とし、すべてカラー画像である。(a)あるいは(d)の刺激は人物や白鳥がかなり明確な対象として存在している。(b)には奥行き感を生じさせる情報が含まれている。また(c)の刺激は一面草木で覆われており単調なパターンであるのに対して、(e)あるいは(f)の刺激では建築物などの直線的

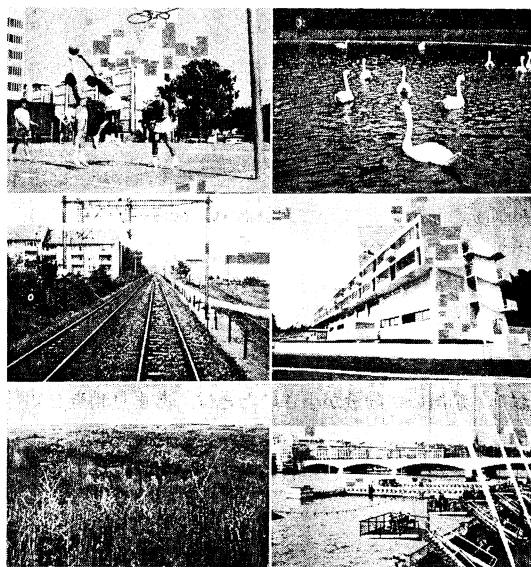
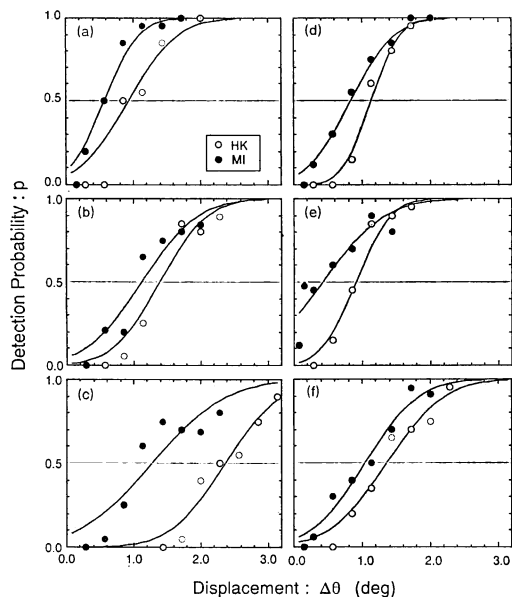


Fig. 6 Six examples of the pictures used in the experiment 2.



**Fig. 7** Detection probability  $p$  as a function of displacement size  $\Delta\theta$  for pictures shown in Fig. 6. Subjects HK and MI.

な境界線が多く含まれている。

**4.2 実験結果**

Fig. 6(a)~(f)に例として挙げた6種類の刺激の結果を Fig. 7のグラフ(a)~(f)に示す。グラフの見方は、横軸が刺激の移動量  $\Delta\theta$  であり、縦軸が動きを知覚した確率  $p$  である。そして、各シンボルが HK (○), MI (●)の被験者に対応している。各測定点は20回の判断から得られた結果であるが、測定した範囲の両端近くの  $\Delta\theta$  については、試行を行わなかったセッションがあったり、逆に  $\Delta\theta$  を追加して行ったセッションがあったりしたので、試行回数が20回に達していない点もある。

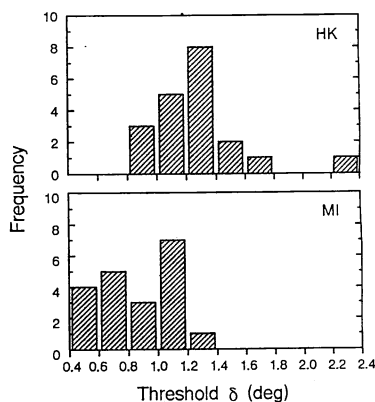
これらの結果は、 $\Delta\theta$  の値を大きくしていくと徐々に刺激の動きを知覚する確率  $p$  も高くなり、知覚確率曲線に典型的な右上がりの曲線を示している。図の実線は Muller-Urban 法によって、結果にあてはめた累積正規分布曲線である。この方法では、各測定点に信頼度に応じた重み付けと試行回数に比例した重み付けを行って回帰してあるので、試行回数が違う問題は閾値を求める際には解決されている。この曲線が  $p=0.5$  と交差する点の  $\Delta\theta$  の動きの知覚閾、すなわち統合可能変位量  $\delta$  として求めることができる。

個々の刺激について結果を見てみると、各刺激とも移動量  $\Delta\theta$  がある量以下であれば、刺激の動きを知覚でき

ない範囲があることが明らかである。たとえば(d)の白鳥の刺激の場合の結果を見てみると、HK では刺激の移動量  $\Delta\theta$  が  $0.6^\circ$  であっても知覚確率は0であり、まったく刺激の動きを知覚できていないことがわかる。知覚確率が50%となる刺激の移動量、すなわち統合可能変位量  $\delta$  は  $1.13^\circ$  であった。被験者 MI の場合は、HK よりも小さな  $\Delta\theta$  で刺激の動きを知覚できているが、 $\Delta\theta$  が  $0.6^\circ$  のときでも知覚確率は0.3であり、やはりかなり大きく移動しないと刺激の動きを知覚できなかったことになる。MI の場合の  $\delta$  は  $0.84^\circ$  であった。実験2の結果からも SAC の条件ではかなり大きな  $\Delta\theta$  に対して、刺激の動きを知覚できないことが確かめられた。

刺激間の結果を比較してみると、実験1の被験者の内観から推測されたように、刺激によって視野統合可能変位量  $\delta$  の大きさにはかなり差があるようである。 $\delta$  が最も大きかった刺激、つまり動きを最も知覚しづらかった刺激は(c)の紅葉の平原の刺激であり、 $\delta$  の値は HK で  $2.37^\circ$ , MI で  $1.27^\circ$  となっている。反対に  $\delta$  が最も小さく、動きを知覚しやすかった刺激は、(e)の建物の刺激であり、 $\delta$  の値は HK で  $0.90^\circ$ , MI で  $0.42^\circ$  となっている。(a)のバスケットの刺激の  $\delta$  の値も小さく、HK で  $0.93^\circ$ , MI で  $0.57^\circ$  であった。このような刺激による  $\delta$  の大きさの違いについては後で検討することとする。

HK と MI について、実験に使用した20枚の全刺激の  $\delta$  の分布をヒストグラムにした結果を Fig. 8 に示す。横軸には  $\Delta\theta$  について  $0.4^\circ$  から  $2.4^\circ$  まで  $0.2^\circ$  間隔に10の区間を設定した。縦軸はその区間に含まれる  $\delta$  をもつ刺激の数である。これを見ると HK では  $0.8^\circ$  から  $2.4^\circ$  の区間に  $\delta$  の分布はおよび、 $1.2^\circ$  から



**Fig. 8** Histograms of the threshold displacement size  $\delta$  for twenty stimuli from subjects HK and MI.

1.4°の間にピークが見られる。 $\delta$ の値が最も大きく、他と離れた値をとっているのが、(c)の平原の刺激である。またMIはHKより $\Delta\theta$ が小さいところに分布しており、0.4°から1.4°の区間に $\delta$ の分布が見られ、1.0°から1.2°の区間に $\delta$ が多く分布している。各被験者で全刺激の $\delta$ の平均値はMIについては0.85°、HKについては1.31°であった。被験者によるこのような閾値の差の原因としては、視野統合の特性、すなわち統合可能変位置そのものが異なる、刺激の観察方法の違いによる、あるいは刺激の動きに対する判断基準の差によるなどが考えられるが、今回の実験からそれらを特定することはできない。実験2から視野統合可能変位置がおおよそ1°前後の大きさをもっていること、およびその値は刺激に依存してかなり変化することが明らかになった。

## 5. 考 察

今回の実験により視覚系はサッケード前後で、刺激の水平方向の位置を1°程度移動させてもそれを外界の動きとは知覚せずに、静止した外界として知覚できることが明らかになった。したがって視覚系はサッケード前後の視覚情報を統合する際に、刺激の外界での位置、あるいは網膜上での位置に関する正確な情報は必要としないと考えることができる。つまりサッケード時の視野の統合には統合可能変位置 $\delta$ が存在し、その大きさは約1°であるということが出来る。またこの統合可能変位置は被験者が観察する刺激によって異なるという結果も得られた。 $\delta$ が小さな値となった代表的な刺激は(e)の建物を写したのや、(a)の人間がバスケットボールを行っている刺激であった。このように $\delta$ が小さい値をとった刺激には、建物などに見られる垂直方向の直線的な境界をもつものや、周囲に比べてかなり明確な対象物が含まれているという特徴を挙げることができる。逆に $\delta$ が大きな値となった例としては、一面草木に覆われた(c)の刺激がある。このような刺激は、全体的に単調なパターンから構成されているという特徴をもっている。ただし今回の実験では刺激の移動方向が水平方向のみに限られているため、刺激による特異性がかなり顕著に現れている可能性を考慮する必要がある。つまり(c)のような刺激であっても、移動方向を垂直方向にして実験を行えば、 $\delta$ の値が小さくなることが考えられる。しかしながら、刺激によって視野統合可能変位置 $\delta$ の大きさが変化することは間違いないようであり、今後、刺激の定量的な特性を押さえて検討しなければならない問題である。

ここでサッケード時に視覚系がどのような仕組みで視野の統合を行っているのか考えてみることにする。眼球の網膜に映じた外界の像は電気信号に変換され、外界の視覚認識を行うための情報として高次レベルに送られる。この段階では外界の情報は網膜座標系上に分布しており、かなりの高次レベルまで網膜座標系に依存した形で、情報が送られていることが明らかにされている。しかし、われわれが安定した外界を知覚していることを考えると、視覚系のあるレベル以上では、外界の絶対座標系(あるいは自分の位置との相対座標系)に対応した形で外界が表現されていると推論できる。つまり外界の物体の絶対的な位置が何らかの形で表現された空間が視覚系内で形成されていると考えるのである<sup>14)</sup>。ここではこの空間のことを視空間と呼ぶことにする。そして眼球が動いても、視空間の座標系は不変であると考えられる。網膜座標系上の視覚情報はいずれかの段階で、この視空間に変換されるはずである。つまりサッケード時の視野の統合の問題は、サッケードが生じたときに新たな注視で得られた網膜座標系の視覚情報を、視空間上の対応した位置にどのようにして変換するかということになる。今回の実験結果はこの変換過程で、外界の情報が網膜座標上で予期した位置とある程度ずれていても、視覚系はそれらを視空間の対応した位置に変換できることを示していると解釈することができる。

視覚系はサッケードが生じると、まず網膜座標系を視空間のどの位置に対応させるのか、その対応関係の切り替えを行う必要がある。この網膜座標系と視空間との対応関係も、それほどの精度は必要とはしないであろう。サッケードが次におおよそどの位置に向かって行われるのか、その情報が得られればこのような切り替えは可能である。つまり、新たに注視する位置を中心として、新たに得られた網膜座標系上の視覚情報を視空間上に変換するのである。この変換の過程では、視野周辺部の粗い情報を新たに得られた詳細な情報で置き換えるか、その逆に中心部の詳細な情報を粗い情報で置き換えるという変換が行われていると考えられる。したがってこの点からもある程度の許容範囲があると考えることができる。そしてこの許容範囲は刺激のもつ位置の精度が高いほど小さくなり、もともとあいまいな位置情報しかもちえない刺激であれば、変換の際の許容範囲は大きくなるであろう。このようにして、サッケードが生じると網膜座標系と視空間の対応が切り替えられ、視空間上の視覚情報は新たな注視で得られた視覚情報によって更新されることになる。



以上のように考えると今回の実験結果もうまく説明できるようである。もちろんここでわれわれが提案した考え方は推測の域を出ないものである。しかしながらサッケード時の視野の統合がかなりの柔軟性をもって行われていることは、実験結果からも明らかなことである。今後、刺激による視野統合可能変位量の差、刺激の移動方向との関係、サッケードの大きさとの関係などの検討とともに、ここで提案したような考えを裏付けるための研究を進めていく必要があると考えられる。

#### 文 献

- 1) P. L. Latour: "Visual thresholds during eye movements," *Vision Res.*, **2** (1962) 261-262.
- 2) F. C. Volkman: "Vision during voluntary saccadic eye movement," *J. Opt. Soc. Am.*, **52** (1962) 571-578.
- 3) F. C. Volkman, A. M. L. Schick and L. A. Riggs: "Time course of visual inhibition during voluntary saccades," *J. Opt. Soc. Am.*, **58** (1968) 562-569.
- 4) F. W. Campbell and R. H. Wurtz: "Saccadic omission: Why we do not see a grey-out during a saccadic eye movement," *Vision Res.*, **18** (1978) 1297-1303.
- 5) S. B. Stevenson, F. C. Volkman, J. P. Kelly and L. A. Riggs: "Dependence of visual suppression on the amplitudes of saccades and blinks," *Vision Res.*, **26** (1986) 1815-1824.
- 6) F. C. Volkman: "Human visual suppression," *Vision Res.*, **26** (1986) 1401-1416.
- 7) T. Ishida and M. Ikeda: "Temporal properties of information extraction in reading studied by a text-mask replacement technique," *J. Opt. Soc. Am. A*, **6** (1989) 1624-1632.
- 8) R. W. Sperry: "Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion," *J. Comp. Physiol. Psychol.*, **43** (1950) 482-489.
- 9) B. Bridgeman, D. Hendry and L. Stark: "Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movement," *Vision Res.*, **15** (1975) 719-722.
- 10) B. Bridgeman: "Cognitive factors in subjective stabilization of the visual world," *Acta Psychol.*, **48** (1981) 111-121.
- 11) D. M. MacKay: "Visual stability," *Invest. Ophthalmol.*, **11** (1972) 518-524.
- 12) 後藤敏行, 池田光男: "跳躍眼球運動時の視野安定機構", *光学*, **10** (1981) 35-40.
- 13) S. Shioiri and P. Cavanagh: "Saccadic suppression of low-level motion," *Vision Res.*, **29** (1989) 915-928.
- 14) R. A. Andersen, G. K. Essick and R. M. Siegel: "Encoding of spatial location by posterior parietal neurons," *Science*, **230** (1985) 456-458.