



跳躍眼球運動時の等輝度刺激の変位検出閾

石田泰一郎・篠田 博之・池田 光男

京都大学工学部建築学教室 〒606-01 京都市左京区吉田本町

(1992年8月24日受付, 1992年10月9日受理)

Displacement Detection Thresholds for Isoluminant Stimuli during Saccades

Taiichiro ISHIDA, Hiroyuki SHINODA and Mitsuo IKEDA

Department of Architecture, Faculty of Engineering,
Kyoto University, Sakyo-ku, Kyoto 606-01

(Received August 24, 1992; Accepted October 9, 1992)

This study examined the contribution of luminant edges to the process of integrating visual information across saccades. Subjects observed an isoluminant or a luminant chromatic square (red, green or blue), while their eye movements were monitored. The square was displaced by a certain size either to the left and right every time subjects made saccades. Isoluminance between the chromatic squares and white background were calibrated with flicker photometry. Displacement detection thresholds were measured in the isoluminant and luminant condition. It was shown that displacement detection thresholds for isoluminant squares were equal to those for luminant squares. This result suggests that the trans-saccadic integration can be mediated by not only luminance-defined edges but also chromatic-defined edges.

1. ま え が き

人間の視覚にとって眼球運動は必要不可欠なものである。とりわけ跳躍眼球運動 (saccadic eye movement) は、注視点を新たな対象に移動するための眼球運動であり重要な役割を担っている。風景を観察する、物を探す、本を読むといった日常的な場面において、われわれは跳躍と注視、すなわち眼球の急速な回転と停止という動作を繰り返し行うことによって、外界の視覚情報を取り入れているのである。

ところで、この跳躍眼球運動時の視野安定の問題が視覚研究では重要な課題の一つとして取り上げられてきた¹⁻⁹⁾。それは通常次のような形で問題提起される。「跳躍眼球運動によって網膜像には急速な変化が生じ、その結果、大脳に送られる視覚情報は時間的・空間的に分断されたものになっているはずである。しかしながらわれわれが知覚する世界は連続で安定している。視覚系はどのような機構によって跳躍前後の視覚情報を統合して安定した視野を形成しているのだろうか。」

この機構の特性を調べるためにわれわれは以前、被験者が観察している刺激 (風景のスライド写真など) を、跳躍眼球運動が生じるたびに変位させる実験を行い、変位量がある範囲 (閾値約 1°) までは、被験者は刺激の動きを知覚しないということを明らかにした⁹⁾。またその際、刺激の動きを知覚する変位量の閾値は、刺激の特徴によって影響を受け、明確な輪郭を持ち周囲から目立って見える対象物は変位が知覚されやすく、反対に曖昧で単調なパターンよりなる部分については変位が検出され難いことが示された。この結果は跳躍時の統合機構についてある示唆を与えてくれる。すなわち、跳躍前後の視覚情報の統合は、視野内の対象物の視覚情報のある特徴に基づいて行われるのではないかということである。

そこで今回の研究では跳躍前後の視野統合過程における輝度差情報の寄与を問題とした。視覚系内で輝度と色が異なった過程を経て処理されているらしいことは多くの研究によって明らかにされている。例えば、等輝度で色度差のみの刺激にした場合、動きの知覚が劣化することが知られている¹⁰⁻¹²⁾。刺激の輝度差情報が跳躍時の統

合過程において有効に利用され必要不可欠なものであれば、等輝度の刺激の統合は通常の処理が行えず、輝度差がある対象物と比較して異なった結果を示すはずである。本研究は、跳躍眼球運動時に刺激を変位させたとき、その動きを被験者が検出できる変位量を等輝度刺激と輝度差をもつ刺激について測定しその差を検討することにより、跳躍時の視野統合機構に輝度情報がどのように寄与しているかどうか調べることを目的とした。

2. 実験方法

2.1 実験原理

Fig. 1 は実験原理を示す概略図である。円形の視野内の白色の背景上に正方形が呈示される。この正方形は赤、緑、青のいずれかの色である。被験者はこの正方形の両端間で視点を動かし正方形を観察する。特に固視点は設けておらず、被験者はある程度自由に観察できる。このとき同時に被験者の眼球運動を検出して、跳躍が生じるたびに正方形の位置を水平方向にある一定量 Δd だけ変位させる。変位方向は左右交互である。ここで、 Δd を十分大きくとれば、被験者には眼を動かすたびに正方形が動いて見えるはずである。一方、 Δd をある大きさ以下に設定すれば、被験者は跳躍中の正方形の変位を知覚しないことが期待できる。そのときの Δd の大きさが

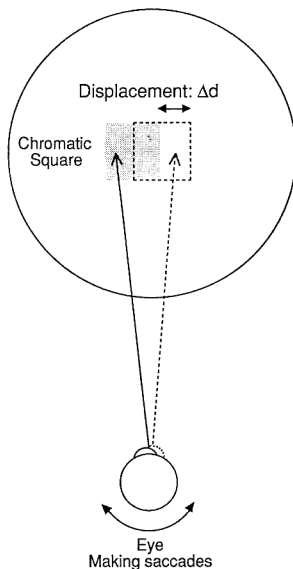


Fig. 1 Illustration how square was displaced across saccades: Subjects observed a chromatic square with shifting their gaze horizontally, while the square was displaced to the right or to the left alternately by a certain size Δd every time subjects made a saccade.

跳躍時の変位検出閾である。今回の実験では、正方形と背景が等輝度の場合と輝度差をもつ場合の二つの刺激条件の下に変位検出閾を測定し両者を比較する。もし対象物の輝度差が跳躍前後の視野を統合する過程に必要な情報であるとすれば、刺激が等輝度の場合は輝度差がある場合と比較して、変位検出閾が異なった値となることが予想される。刺激の変位は跳躍眼球運動の開始時(SAC), および注視開始後 75 ms (FIX 75) の時点でを行い、それぞれの条件での変位検出閾を測定する。FIX 75 の条件では通常の動きの知覚がなされると考えられるので、SAC の条件との比較のために行う。

2.2 実験装置

実験装置の概略を Fig. 2 に示す。被験者(S)は歯形を噛むことによって頭部を固定し、左眼で刺激を観察する。眼球運動は被験者の右眼より角膜反射法によって測定する。まず、ハロゲンランプからの光を赤外線フィルターを通した後被験者の右眼に照射し、角膜表面からの反射光を半導体位置検出素子(PSD)上に結像させる。PSDからは受光面に入射している光の強度分布に応じた電流が、水平方向、垂直方向独立に取り出すことができる。今回の実験では眼球位置の水平成分の信号のみを取り出し、その信号を増幅することによって眼球の水平位置を示す信号を得た。そしてこの眼球位置の信号をアナログ回路で微分し跳躍眼球運動の発生を検出する。この装置での跳躍眼球運動発生時の検出遅れ時間は約

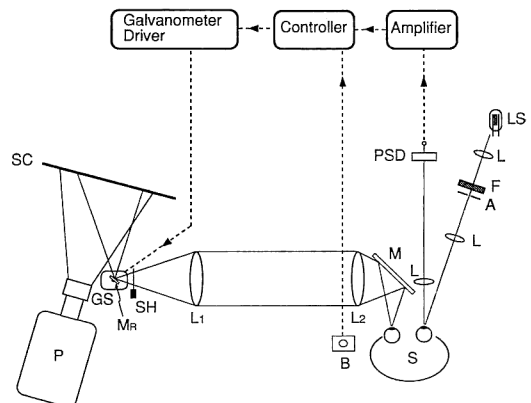


Fig. 2 A schematic diagram of the experiment apparatus: A subject (S) observed the stimulus through an optical system, while the eye movements were monitored using the reflection light from the cornea. A mirror (M_R) was rotated precisely by a galvanometer scanner (GS) to produce horizontal displacement of the square at the beginning of a saccade or 75 ms after the end of a saccade.

5 ms, また眼球位置検出の空間的な精度は $\pm 1^\circ$ 程度であった。

刺激は 35 mm のカラーズライドによって製作し、プロジェクター (P) によってスクリーン (SC) 上に投影される。被験者は直径 26° の円形の視野を与える光学系を通してスクリーン上の正方形を観察する。この光学系には焦点距離の等しい二枚のレンズ (L_1, L_2) が平行に配置しており、その間隔は焦点距離の和に等しくしてある。このレンズ系の一方の焦点に被験者の左眼が位置するように歯形台の位置を調節し、もう一方の焦点位置には 1.5 cm 角の正方形のミラー (M_R) を設置する。被験者はこのミラーを介してスクリーンを観察することになる。また、このミラーはレンズ系の光軸に対して垂直に設置されたガルバノメーター (GS) (General Scanning社, GT 325 D) の回転軸に固定してあり、高速度で精度よく回転させることが可能となっている。したがって、ガルバノメーター駆動制御装置 (日本テレコム社, Mm-PIC 20 A) に適当な電圧を入力してミラーをステップ状に回転させると、被験者が観察する正方形が水平方向に変位することになる。ただし、このミラーの回転によって視野の外枠の位置は動かない。ミラーの回転に要する時間は約 3 ms であり、刺激の変位は跳躍中に十分完了している。刺激の変位をこのような装置の構成で実現することによって、変位させるべき刺激を自由に選ぶことができ、また時間的・空間的に非常に高い精度の刺激変位が可能となっている。

実験の目的である跳躍時の刺激変位を実現するためには、跳躍が検出されるたびにガルバノメーターに適当な大きさのステップ信号を入力すればよいことになる。入力するステップ電圧の大きさとミラーの回転角、すなわち刺激の変位量 Δd が決定される。また信号を跳躍の検出と同時に入力すれば刺激は SAC の条件で変位し、跳躍終了後 75 ms の時点で信号を入力すれば、刺激は FIX 75 の条件にしたがって変位することになる。

2.3 刺 激

被験者が観察する刺激を Fig. 3 に示す。視野は直径 26° の円形であり、背景は白色である。視野の中心部に 6.5° 角の正方形が配置してあり、色は赤、緑、青のいずれかである。刺激用のスライドを製作するために、まずコンピュータのグラフィックモニター上に正方形を呈示した。その際、背景は白色で一定の輝度とし、正方形の輝度を低輝度から段階的に多数設定し、それらを 35 mm のカラーズライドで撮影した。実験で用いる等輝度刺激は、各被験者について各スライドごとに交照法を行

うことによって決定した。交照法は視野サイズを 2° とし、ミラー M_R を 20 Hz で周期的に回転させることにより、視野内に背景と正方形の部分が交替して呈示されるように設定して行った。このようにして各被験者ごとに、赤、緑、青の刺激それぞれについて背景と正方形が等輝度となるスライドを決定した。背景の輝度は約 $70\text{ (cd/m}^2\text{)}$ である。また、各色について、およそ -0.6 の輝度コントラスト、すなわち、 $(L_s - L_b)/(L_s + L_b) = -0.6$ となるようなスライドを輝度差をもつ刺激として選択した。ただし L_s は正方形の輝度、 L_b は背景の輝度である。この輝度差をもつ刺激を輝度差刺激と呼ぶことにする。各色の等輝度刺激、輝度差刺激の CIE 1931 xy 色度座標を Table 1 にまとめてある。

2.4 実験手順

実験では各色の等輝度刺激および輝度差刺激について

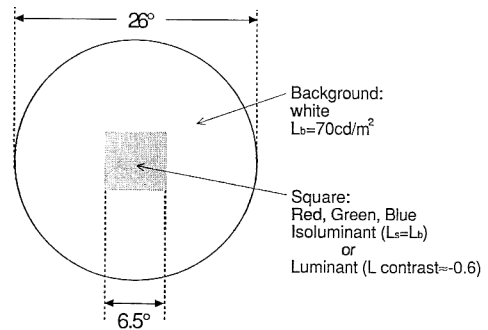


Fig. 3 Stimulus specification: Stimuli were made of 35mm color slide and were projected on the screen. The isoluminance between the square and the background was found by flicker photometry at a rate of 20 Hz with 2 deg visual field. The stimulus with -0.6 luminance contrast (i. e. the square was darker than the background) was selected as a luminant stimulus for each color.

Table 1 The 1931 CIE chromaticity coordinates (x, y) of stimuli.

Isoluminant square	
Red	(0.55, 0.41)
Green	(0.37, 0.54)
Blue	(0.26, 0.35)
Luminant square	
Red	(0.55, 0.37)
Green	(0.34, 0.55)
Blue	(0.20, 0.24)
Background	
	(0.36, 0.42)

て、SAC, FIX 75 の各条件における閾値を恒常法によって測定した。

実験開始前に眼球運動検出装置の調整を行い、水平方向の跳躍眼球運動が確実に検出できるようにする。眼球運動検出器の調整は実験中も定期的に行う。実験の試行は次のような手順で行われる。まず、被験者が手元のボタンを押すとシャッターが開き、スクリーン上の刺激が被験者に呈示される。被験者は眼をほぼ水平方向に動かしながら正方形を観察する。跳躍のための固視点は用いていないので、被験者が正方形のどの部分を観察するかはある程度自由である。刺激観察時間は3秒間であり、その後直ちにシャッターが閉じる。刺激呈示の終了後、被験者は正方形が動いて見えただろうかについて、“yes”あるいは“no”で答える。

1回のセッションでは三色の刺激のうち一色を選択し、その色の等輝度刺激と輝度差刺激について、SAC, FIX 75 の各条件における刺激変位の検出を測定する。各条件および変位量 Δd について実験試行は無作為な順序で行った。このようなセッションを各色の刺激について5回ずつ、合計一人の被験者当たり15セッション行うことによって結果を得た。

被験者は20歳代の男性、TI, HSの二名であり、色覚、視力は正常である。

3. 実験結果

Fig. 4 に実験結果を示す。グラフは二人の被験者について、3色の刺激ごとにプロットしてある。横軸は正方形の変位量 Δd であり、縦軸は正方形の動きを知覚した確率である。各シンボルが刺激の条件および刺激変位時点の条件を表しており、等輝度刺激—SAC (□), 輝度差刺激—SAC (■), 等輝度刺激—FIX 75 (△), 輝度差刺激—FIX 75 (▲) の各条件に対応している。各点は20回の試行から得られた知覚確率であり、曲線はプロビット解析によってデータに回帰した累積正規分布曲線を表す。

まず、全体的な傾向としては、正方形を跳躍中に変位させる SAC の条件では、知覚確率 50% となる閾値は HS で 0.7° , TI で 0.8° 程度とかなり大きな値に達していることがわかる。それに対して、正方形を注視開始から 75 ms 後に変位させる FIX 75 の条件での閾値は 0.1° 以下であり、被験者は高い感度で刺激の変位を検出できている。この結果は、跳躍時に生じた刺激の変位については、それがかなり大きな量であっても、被験者はそれを動きとして検出せず、静止した刺激として知覚

できるという以前の実験結果と合致している^{5,9)}。

さて本実験の主要な点は、等輝度刺激と輝度差刺激の間で、跳躍時の刺激変位の検出に差があるかどうかということにある。今回の結果の示すところでは、両者の間には明確な差は見られなかった。二人の被験者とも等輝度刺激と輝度差刺激のグラフはほとんど重なっており、両刺激の間で変位の検出に差が見られなかったことを示している。唯一被験者 HS の赤の刺激の SAC の条件で差が見られたが、それ以外では全体の傾向として等輝度刺激と輝度差刺激の結果には系統的な差は見られない。また FIX 75 の条件においても、等輝度刺激と輝度差刺激のグラフはほとんど重なっており両者間の差は得られなかった。**Fig. 5** に回帰曲線より計算した二人の被験者の各条件での閾値を示す。横軸に各条件をとり、縦軸にその閾値をとったもので、誤差棒はプロビット解析の標準誤差を表している。このプロットからも、SAC の条件で等輝度刺激と輝度差刺激での閾値に明確な差が見られなかったことが見てとれる。また、各色の刺激についてもほぼ同じ閾値となっており、色による特定の傾向

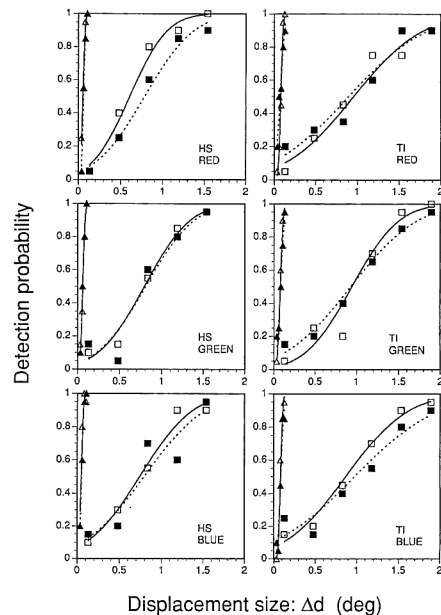


Fig. 4 Experiment results: Detection probabilities of square movements plotted as a function of displacement size. Subjects HS and TI. Open square (□), isoluminant-SAC; filled square (■) luminant-SAC; open triangle (△), isoluminant-FIX 75; filled triangle (▲) luminant-FIX 75. Curves represent psychometric functions fitted to each data series. Solid line, SAC; broken line, FIX 75.

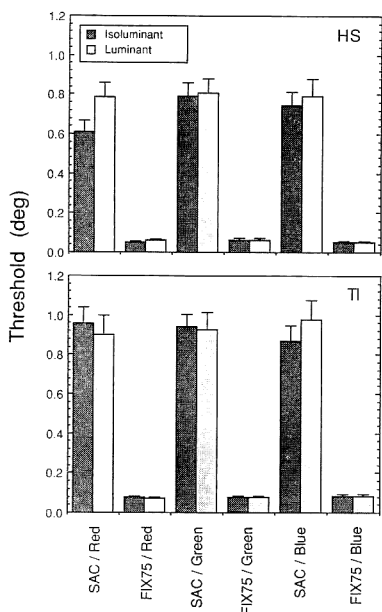


Fig. 5 Threshold displacement size for each condition: Subjects HS and TI. Error bars indicate 1 standard error calculated by probit analysis.

は見られなかった。

4. 考 察

本研究では、跳躍眼球運動時の視覚情報を統合する過程において、輝度情報がどのように用いられているか調べるために、跳躍時に等輝度の刺激と輝度差を持つ刺激を変位させる実験を行った。その結果、刺激が等輝度であっても輝度差を持つものであっても、変位検出の閾値に明らかな差は見られなかった。

この結果は、跳躍時の変位の知覚に関して、今回の実験で用いた等輝度刺激は輝度差刺激と同じ効果を有していたことを示している。すなわち、対象物の輝度差情報は跳躍時の視覚情報の統合において必要不可欠なものではないと解釈することができる。Fig. 4に示されたSACの条件での結果は、輝度差の有無、刺激の色にかかわらず、すべてほぼ一つの曲線に一致している。この一致は本実験での刺激変位の検出に各刺激について共通した決定要因があったことを示しているのではないか。その共通した要因として正方形の形の情報が考えられる。境界線の見えはその両側が等輝度になると条件によってあいまいとなるが、今回の実験で用いた等輝度刺激では、境界線の見えの明確さは弱くなるものの、正方形としての形はどの色の刺激についても知覚することができた。す

なわち、跳躍時の視野統合過程においては、外界の対象物の輝度差情報それ自体が重要な役割を持つのではなく、境界が輝度差で形成されていても色度差で形成されていたとしても、対象物の形が有効な情報源として利用されていると推測することができる。

ただし、跳躍時の視覚情報の統合における対象物の輝度差情報、および色情報の役割を結論づける前に今後確認すべきことがいくつか考えられる。まず第一に、輝度差の有無による効果の違いを検証する実験では、等輝度の設定中にわずかに残存する輝度差に注意する必要がある。今回の実験では刺激としてスライドを用いたため、交照法によって求めた等輝度刺激前後の輝度比を細かく設定することができなかった。今回の刺激にわずかに残存輝度差があったとして、それが実験結果にどのように影響したのか今後検討する必要がある。第二に、今回の実験では正方形を刺激として採用したが、そのような明確な形状を持つ刺激では等輝度の場合と輝度差がある場合で、動きの知覚に関して差がでないという指摘がある¹⁰⁾。確かに今回の実験において、FIX 75の条件でも等輝度刺激と輝度差刺激の結果は一致しており動き知覚に関して差は見られなかった。低い空間周波数より構成される画像やランダムドットなどを刺激として用いれば、跳躍時の刺激変位の知覚に関して、等輝度の場合と輝度差のある場合で結果に差がでる可能性も考えられる。

現在、跳躍時の視覚情報の統合についての研究は、跳躍前後にわたってどのような情報が保持され、統合に関与しているのかという課題に取り組んでいる¹³⁻¹⁵⁾。今回輝度差情報自体がその重要な要因である可能性については否定的な結果が得られたが、統合機構における対象物の色・輝度情報、あるいは形の情報の役割について、今後さらに研究を重ねて検証する必要があるだろう。

文 献

- 1) R. W. Sperry: "Neural basis of the spontaneous optokinetic response produced by visual inversion," *J. Comp. Physiol. Psychol.*, **43** (1950) 482-489.
- 2) E. Holst: "Relations between the central nervous system, the peripheral organs," *Br. J. Anim. Behav.*, **2** (1954) 89-94.
- 3) A. Mack: "An investigation of the relationship between eye and retinal image movement in the perception of movement," *Percept. Psychophys.*, **8** (1970) 291-298.
- 4) D. M. MacKay: "Visual stability," *Invest. Ophthalmol.*, **11** (1972) 518-524.
- 5) B. Bridgeman, D. Hendry and L. Stark: "Failure to detect displacement of the visual world during saccadic eye movements," *Vision Res.*, **15** (1975)

- 719-722.
- 6) B. Bridgeman: "Cognitive factors in subjective stabilization of the visual world," *Acta Psychol.*, **48** (1981) 11-121.
 - 7) 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.
 - 8) J. K. O'Regan and A. L. Schoen: "Integrating visual information from successive fixations: Dose trans-saccadic fusion exist?," *Vision Res.*, **23** (1983) 765-768.
 - 9) 石田泰一郎, 池田光男: "サッケード前後の視野統合可能変位量", *光学*, **19** (1990) 673-681.
 - 10) V. S. Ramachandran and R. L. Gregory: "Does colour provide and input to human motion perception?," *Nature*, **275** (1978) 55-57.
 - 11) P. Cavanagh, C. W. Tyler and O. E. Favreau: "Perceived velocity of moving chromatic gratings," *J. Opt. Soc. Am. A*, **1** (1984) 893-899.
 - 12) T. Troscianko and M. Fahle: "Why do isoluminant stimuli appear slower?," *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 871-880.
 - 13) D. E. Irwin, J. S. Brown and J-S. Sun: "Visual masking and visual integration across saccadic eye movements," *J. Exp. Psychol. Gen.*, **117** (1988) 276-287.
 - 14) D. E. Irwin: "Information integration across saccadic eye movements," *Cognitive Psychol.*, **23** (1991) 420-456.
 - 15) M. Hayhoe and J. Lachter: "Integration of form across saccadic eye movements," *Perception*, **20** (1991) 393-402.