等色作業中の視点の動き

正会員 篠田 博之 (京都大学)

専門会員 池田 光男 (京都大学)

Behavior of Gaze in Color Matching Task.

Hiroyuki Shinoda (Member), Mitsuo Ikeda (Fellow Member)

(Kyoto University)

ABSTRACT

The behavior of gaze in the task of color matching was studied at various stimuli separations from 6 to 120 deg. for two subjects. Eye and head positions were measured with a limbus tracker and a CCD camera attached to a pair of spectacles. Whereas the time required per match was almost constant, the number of gaze shifts decreased and the fixational duration increased with stimuli separation. This indicates a change in the strategy in the visual system. For one subject, head rotation started at 30 deg. separation and for the other at 15 deg. separation. Whenever the subjects' head rotated, vestibulo-ocular reflex (VOR) occurred after eye saccade. Moreover, at 60deg. separation or more, pre-saccade VOR and multiple saccades were observed. The time duration for gaze shifting increased with stimuli separation, but at larger separation angles the slope of the time duration increase curve became gentler.

KEYWORDS: color discrimination, color matching, stimuli separation, gaze, eye movement, and head rotation.

1. はじめに

農産物の収穫時期の判定から工業製品の品質管理に至るまで、色は製品の状態を知るための重要な情報として広く活用されている。また今日ではデザインに加え色自体が商品の売れ行きを左右する重要な付加価値となっている。したがって、どの産業においても製品の色彩を高水準に管理することは極めて重要な技術課題となっている。生産工程において、最近では熟練検査官による目視検査に替わって、測定機器による自動検査も行なわれるようになった。その場合の検査方法の一つに測定値と基準値とのずれ(色差)から合否を判定する方法があるが、色差の計算には、各産業の必要に応じてCIELABをはじめとする様々な色差式^{1)~4)}が採用されている。そのような状況の中で、色差式から計算される色差と視感色差との不一致があらためて注目されるようになった。原因としては、均等色空間自体の不均一性に加えて観察環境の違いによる影響が考えられる。特に後者の事項に関してはCIEのTC1-28⁵⁾で色差式の中の物理的パラメータの要因を検討している。

普段我々は、広範囲に分布する視覚刺激を、視点を移動しながらダイナミックに観察しており、これはCIEのTC1-28で想定している状況^{5)~8)}からは大きく外れる。したがって、CIE勧告を含めた現行の色差式および均等色空間が一般的な状況にそのまま適応されるとは考えにくい。そこで以前我々は、大きな視点移動を伴う状況での色弁別特性を調べるため、2°正方形の刺激対の間隔(中心間の距離)を6°~120°の範囲で変えて等色の繰り返し精度

を測定した⁹⁾。等色のばらつきをCIE1931(x, y, Y)色空間内の楕円体で評価したところ、120°では6°に比べて約1.3倍の精度低下が認められた。また、変化は線形ではなく6°~60°で精度低下が大きく60°以降では殆ど一定となった。結果の一例として、刺激間隔6°に対する楕円体体積比の立方根を図1に表示する。

この結果の主要因は何であろうか、網膜上の特性で説明できるのか、視点移動中の時間的なギャップが関係しているのか。また、視点移動のための諸動作(眼球運動、頭部回転運動)が影響していることも考えられる。Sanders¹⁰⁾は視野(刺激の空間分布)の大きさを変えて様々な作業効率を測定しているが、結果は視野の拡大に伴う作業効率の不連続な低下を示していた。そこでSandersは視野を、(A)視点移動を必要としない範囲、(B)眼球運動による視点移動だけで足りる範囲、(C)頭部運動による視点移動が必要な範囲、と機能的に分けることで、この現象を解釈している。

我々の実験⁹⁾においては、等色作業に特に制限時間を設けていない。また注視時間、比較回数等の制約もない。被験者は自由に観察し等色している。したがって、図1の結果を解釈し、その要因を特定するためには、等色作業中の被験者の観察条件を定量的に把握しておく必要がある。例えば比較観察時の視点移動による時間的ギャップが主要因であるかどうかを調べるには、空間条件を一定に保ち、2刺激を継時的に呈示する。そのときの時間的ギャップを、視点移動に要する時間を参考にして設定、変化させ、等色の繰り返し精度を測定すれば良い。そのためには等色作業時の視点移動に要する時間を知っておく必要がある。また、上記

Sanders¹⁰⁾のように、機能的な観点から視野を分類して色弁別能力を解釈しようとするれば、等色作業では刺激間隔がどの程度で頭部の回転が導入されるのかを知っておく必要がある。

本研究の目的は、等色作業中の眼球運動および頭部回転運動の測定を基にして視点の動きを解析し、眼球や頭部の回転量、注視時間、視点移動に要する時間、さらに等色が完了するまでの時間や比較回数等を、刺激間隔の関数として導出することにある。そしてそれらの関数と等色精度との相関を調べ、刺激間隔を広げたときの等色精度低下の要因を検討する。

図1 刺激間隔の関数としての95%等色精円体積の立方根 $V^{1/3}$ 。篠田ら⁹⁾の2人の被験者による3種類の参照刺激に対して得られた結果の平均。横軸は刺激間隔、縦軸は刺激間隔6°の値を1とした相対値を示す。○：被験者 HS、●：被験者 TI。

Figure1 Cube root of volume of 95% color matching ellipsoids $V^{1/3}$ as a function of stimuli separation.

Average values for three reference stimuli obtained by two subjects of Shinoda *et al.*⁹⁾. ○, subject HS; ●, subject TI.

2. 実験

2.1 装置

被験者は、図2に示されるようなブースの中央に固定された回転椅子に座って等色作業を行なう。ブース内は無照明、暗黒中に2つの刺激だけが呈示されるため、刺激の見えるは光源色モードになる。被験者は右側の等色刺激の色を調節して、左側の参照刺激の色に合わせる。等色刺激呈示用のバーンハム色彩計および参照刺激呈示装置は共にハロゲンランプの光源とフジフィルム社製の色フィルタにより構成されている。刺激呈示装置の光学系に関しては篠田ら⁹⁾に記述されている。刺激までの視距離は等色刺激、参照刺激ともに約50cm。左側にある参照刺激呈示装置は被験者頭上のアームに固定されており、被験者を中心とする円周上を移動することで刺激対の間隔を変えている。シャッターを開閉するボタンと色彩計をコントロールする3つのノブは色彩計の下方部に取り付けられている。

眼球運動、頭部の回転運動の測定には竹井機器製の視点位置測定装置「トークアイ」を使用した。この視点位置測定装置の検出部は、メガネの中央上部のCCDカメラ、右眼の下方部に取り付けられた眼球位置測定センサー（リンバストラッカー）により構成されている。CCDカメラは水平510×垂直490の約25万画素の解像度を有している。CCDカメラの映像は被験者正面の情景を映し出しており、画面上の対象物の位置から頭部正面の向いている方向

を知ることができる。またリンバストラッカーは強膜（白目部分）と角膜（黒目部分）の反射率の違いを利用した、強膜反射法と呼ばれる方法で眼球位置を計測している。実際には赤外LED光の、右眼の角膜輪部による反射光を、水平に並んだ2つのフォトダイオードで受光し、2つの出力の差から水平方向の眼球位置を、出力の和から垂直方向の位置を検出する。この検出器のサンプリング間隔は1フレーム、33msecである。眼球位置の測定範囲は頭部正面に対し±20°である。頭部に対する相対的な眼球位置を示す座標値およびフレームカウント（時間）は、画面の右上隅にCCDカメラの映像に重ねて表示される。その映像をビデオテープに録画し、後にビデオテープを再生して解析する。頭部位置測定のための基準対象物として、5個の赤色LEDを色刺激対と同一水平面上に、被験者から95cmの円周上で20°間隔に配置し、等色作業に障害とならない程度の明るさで点灯した。対象物の位置はモニタに固定された製図用の平行定規で測定した。

図2 実験ブースの概略図。

Figure2 Schematic diagram of experimental booth.

2.2 条件および被験者

参照刺激、等色刺激は共に2°の正方形。刺激対の間隔（2刺激の中心間の距離）は6°、15°、30°、60°、90°、120°の6間隔。参照刺激は篠田ら⁹⁾で使用している参照刺激のうちの一つ Yellow-Green で、ミノルタ社 CS-100による測光値は、輝度209.5cd/m²、CIE1931xy 色度座標(0.393,0.544)であった。

被験者は篠田ら⁹⁾の実験に参加していた HS(27才、男性)、TI(31才、男性)である。

2.3 手順

被験者は着席し、メガネを装着。視点位置測定装置の較正をした後、実験者が刺激間隔を設定して実験開始となる。被験者はボタンを押してシャッターを開き、等色作業を始める。制限時間はなく、必要に応じて眼球運動や頭部回転により視点を移動しながら、自由に観察して等色する。等色したらボタンを押して終了する。実験者が等色値を記録した後、被験者は等色を崩し、再びボタンを押して等色を開始する。この作業を5回繰り返す。終了したら眼球運動が正しく測定されているか確認し、必要ならば視点位置測定装置の再較正をする。さらに刺激間隔を変えて同様に5回の等色を行ない、1セッションの測定を終了する。刺激間隔が6条件あるので計3セッションとなる。

3. 結果と考察

3.1 等色値のばらつき

本実験の主目的は視点の動きの測定であり、このことは被験者も知っている、したがって実験に対する姿勢が前回とは異なる、つまり等色作業に対する集中度が異なる可能性がある。またメガネを装着することにより、被験者の動作に制約を与えているのではないかと懸念される。もしそうだとすれば、等色精度が低下し、ばらつきが大きくなると予想される。これを検証するために、今回のばらつきを篠田ら⁹⁾の実験で求めた95%楕円体と比較した。今回と前回の等色中心位置にはずれが観察されたため、直接比較できない。そこで中心位置を揃えて比較することにした。図3には本実験5回の等色点と、篠田ら⁹⁾の95%楕円体を、共に平均値を原点として表示した。今回と前回の等色中心位置のずれは平均で、被験者 HS では x が -0.003 , y が $+0.004$, 輝度 Y が $+13.6$ cd/m^2 , 被験者 TI では -0.007 , $+0.008$, $+11.8$ cd/m^2 であった。十分に比較が可能な範囲のずれである。各点は5回の等色点の xy 平面への射影で、特に大きなシンボルで示される等色に関しては作業中の眼球運動、頭部運動について詳細な解析を行なった。これについては3.3で説明することとする。実線の楕円は、前回の95%楕円体の、中心を通る等輝度面での断面を表している。いずれのグラフにおいても、今回の等色点は楕円の範囲にほぼ収まっている。また、ばらつきの傾向も被験者 TI の 90° 以外は前回の楕円の向きと一致している。つまり本実験の目的を被験者が知っていることやメガネを装着していることによる、等色精度の低下は起きていない。したがって、前回と同等の作業状況が実現されていると考えてよい。

3.2 等色にかかる時間と観察回数

等色中の視点位置測定装置の映像は全て録画されている。映像には頭部正面方向の景色に重ねて視点の軌跡が描かれている。また、眼球の頭部に対する相対位置座標（角度）や測定開始からのフレームカウント（1フレームは33msec）も画面右上に表示されている。

再生映像を観察して全般的に言えることは、作業前半では参照刺激を観察する時間は少なく、ノブをまわすことに専念し、大まかに調色していることである。それに対し後半は、ノブをまわすことは少なくなり、比較的じっくりと観察している。これは微調整そして最終決定の判定をしていることを示している。前後半を通して等色刺激よりも参照刺激を注視している時間の方が短い。

まず始めに等色に要した時間と等色中の視点移動回数を計測した。時間はシャッターが開いてから閉じるまでのフレーム数に33 msec を掛けた値とし、その間の視点移動の回数は映像中の軌跡から直接数えた。図4に両被験者の1回の等色に要した時間 (T_m)、1回の等色作業中の視点移動回数 (N_s)、および T_m を N_s の2分の1で割った値、つまり1回の比較にかけた時間 (T_c) を刺激間隔の関数として表示した。この図から以下の3点が示される。

グラフ (A) から

(1) 被験者 HS では刺激間隔が広がるにつれてわずかに等色に要する時間 (T_m) も増大している。逆に被験者 TI ではわずかに減少している。しかしどちらにしても変化は比較的小さく、ほぼ一定と言える。

グラフ (B) から

図3 本研究で得られた等色点と篠田ら⁹⁾の等色楕円体。

黒点：5回の等色点の xy 色度平面への投影。ただし視点の動きを解析した回の等色点を大きな点で表わした。実線：等色楕円体の中心を通る等輝度断面の楕円。5回の等色点および楕円体の中心を原点 (0,0) にとった。(A) は被験者 HS, (B) は被験者 TI。

Figure 3 Color matching points and ellipsoids of Shinoda *et al.*⁹⁾.

The dots, projection of 5 matching points to xy chromaticity plane. The large dots represent the trial in which gaze behavior was analyzed. Solid line ellipses, cross sections of ellipsoids at the constant luminance plane through the center. Coordinate (0,0) means centroid of ellipsoid and 5 matching points. (A) subject HS; (B) subject TI.

(2) 視点移動回数 (N_s) は両被験者共、間隔の増大に伴って減少している。

グラフ (C) から

(3) 両被験者とも刺激間隔が広がるにつれて、1回の観察にかかる時間 (T_c) は増大している。120°では6°の約3倍の値になっている。

低輝度刺激での弁別能力の低下¹¹⁾等に比べると、篠田ら⁹⁾では、「刺激間隔が広がると等色作業は非常に難しくなる。」という被験者の内観報告にも拘らず、等色の繰り返し精度にはあまり反映されていなかった (約1.3倍の低下)。この理由として、間隔が広がって難しくなった分、観察回数を増やし時間をかけて等色することで補っているのではないかと予想していた。しかし実際は等色にかかる時間 (T_m) はほぼ一定、また間隔が広い方が比較回数 (N_s) は少なかった。(A)、(B)において、等色開始時の色彩計の設定が統一されていないので絶対値自体は特別な意味を持たない。特に等色を崩すのは被験者に任されており、(A)、(B)で見られる被験者間の差もその影響があるだろう。しかし刺激間隔に対する相対的な変化は被験者間で一致しており、一般的な傾向を示している。右のグラフは総時間 (T_m) を視点移動回数 (N_s) の2分の1で割ることで1回の比較観察にかかるおおよその時間を知らうとしたものである。勿論これには2回分の視点移動に要する時間も含まれているし、上で述べた作業前半と後半、あるいは参照刺激と等色刺激等の違いが考慮されていない。しかしグラフ

からは、刺激間隔に応じて、無意識のうちになされる戦略(strategy) 切り替えの様子を読み取ることができる。本論文ではこの“戦略”という語を、課せられた作業を遂行するための視覚系の対応(処理)方法という意味で用いる。すなわち近いときには注視時間を短くし、頻繁に比較しているが、離れているときは1度の注視に充分時間をかけて比較している。また視点移動の頻度も少ない。この測定とは別に、被験者 HS は刺激間隔 60°以上の条件において、短い注視時間で頻繁に視点移動しながら等色を試みたが、思うように色比較ができず、ストレスの伴う作業となった。

したがって、もし刺激間隔が広がっても同じ観察方法を採用していたなら、弁別能力の低下が大きくなっていったかも知れない。しかし実際は、視覚系が戦略を変更して対応するため、作業自体は難しく感じても、それほど精度低下にはならない。作業の難易度によって注視時間が変化するという報告¹²⁾はあるが、視点移動量の大きさによって変化するという報告はない。視点移動量が大きいほど記憶における色情報の劣化が激しいとするなら、大きな視点移動時の注視中にはより多くの情報抽出、あるいは記憶への固定強化をしなければならず、注視時間が増大するのであろう。

図4 等色に要する時間 (T_m)、視点移動回数 (N_s)、1回の比較にける時間 (T_c)。左から T_m 、 N_s 、 T_c のグラフ。○：被験者 HS、●：被験者 TI。平均値を折れ線で示した。破線：被験者 HS、実線：被験者 TI。
Figure4 Time required for a color matching (T_m)、number of gaze shifts (N_s) and time duration for one comparison ($T_c = 2T_m/N_s$)。 T_m (left diagram)、 N_s (middle)、 T_c (right)。○, subject HS; ●, subject TI. Lines connect average values. Dashed lines, subject HS; solid lines, subject TI.

3.3 視点の動きの解析

3.3.1 解析方法

3.2で述べたように、前半では参照刺激を見ることは少なく、もっぱら大まかに調色している。この段階では2刺激間の色差は大きく、明らかに弁別閾上である。しかし後半になると2刺激を比較観察することが増え、調色は微調節になる。この段階では被験者は弁別閾付近の色差を観察していることが予想される。したがって、等色精度(色弁別能力)に関与しているのは後半の観察であると考えられる。そこで等色終了前の16.5秒間(500フレーム)の観察動作に対して眼球運動、頭部運動の解析を行なった。解析したのは5回の等色の内の1回で、図3の大シンボルで示されている。ビデオテープをコマ送り再生し、モニタに固定された平行定規を用いて(1)刺激またはLEDの画面上での水平位置を測定、さらに画面右上の数値から(2)頭部に対する眼球位置(E)、(3)フレーム数(時間)を記録する。視点移動中および前後は1フレーム(33 msec)毎に、注視時は必要に応じて1~10フレームの間隔で計測した。(1)の測定値から頭部正面の向いている方向(H)を計算し、頭部に対する眼球方向(E)を足して視線方向($G = H + E$)を算出する。HとGは等色刺激の位置を原点とし、参照刺激の方向、つまり被験者から見て左側を正方向にとった座標系とした。Eは同じく左側を正方向とした頭部正面からの相対座標系である。またそれぞれの速度 V_E 、 V_H 、 V_G も計算している。例えば眼球回転速度 V_E は次のように計算される。時刻 T_1 での眼球位置を $E(T_1)$ 、次の計測時刻 T_2 での眼球位置を $E(T_2)$ とするとき、時刻 $(T_1 + T_2)/2$ での速度は次式で定義される。

$$V_E \left(\frac{T_1 + T_2}{2} \right) = \frac{E(T_2) - E(T_1)}{T_2 - T_1}$$

3.3.2 眼球運動と頭部回転運動の協調動作

図5~7に両被験者の眼球位置E、頭部位置H、視点位置Gの計測結果を表示する。ここでは刺激間隔が15°、30°、90°のときの結果のみとする。いずれも上段に眼球位置E、下段に頭部位置H(太い実線)、視点位置G(細い実線)を示した。まず図5左側、被験者 HS の15°を見ると、眼球だけで視点を移動しており、頭部は10°付近からほとんど動いていないことが分かる。眼球位置Eは、注視と跳躍眼球運動(サッケード)の繰り返しからなる典型的な軌跡を描いている。視点位置Gは0°と13°付近を往復しており、刺激間隔の設定15°よりも小さい。これは測定装置の誤差に加えて、頭部の位置による影響が大きいと思われる。特に前後の移動や顎の引き加減による刺激までの視距離の変化が大きく効いている。この場合について計算すると視距離が約7 cm 後ろに下がっていたことになり、その可能性は十分にあり得る。5秒付近にスパイク状の動きが見られるがこれは瞬きを捕らえたもので、視点の移動ではない。等色刺激に比べて参照刺激を観察している時間は短い(多くは0.5秒間程度)。一方図5の右側、被験者 TI は6秒以前の視点移動において頭部を回転している(回転量は約3°)。また視点移動Gの振幅は約18°と大きく、近寄って観察していたと予想される。また3回のスパイクは瞬きである。被験者 HS に比べて視点移動回数は少なく、注視時間が長い(参照刺激で約0.7秒間)。

図6の刺激間隔30°になると被験者 HS でも頭部の回転が始ま

図5 等色作業中の眼球、頭部、視線の動き。刺激間隔は15°。
 図3中の大きな黒点で示される回の終了前16.5秒間の位置を解析した。上段グラフ：頭部方向に対する眼球の方向E、下段グラフ：等色刺激に対する頭部H（太い実線）と視点G（細い実線）の方向。いずれも等色刺激の方向を0とし、左を正方向にとった角度で示す。（A）：被験者HS、（B）：被験者TI。
 Figure5 Eye(E), head(H) and gaze(G) behavior in the color matching at the 15 deg. separation.
 Positions were analyzed in last 16.5 sec. of matching trials represented by large dots in Figure3. Top diagrams, angle of eye direction from the head direction. Bottom, angle of head(thick solid lines) and gaze(thin solid lines) directions from the matching stimulus. Positive means leftward rotation. (A) subject HS; (B) subject TI.

る（回転量は約5°）。ここでサッケード直後の反対方向への特徴的な眼球運動に注目しなければならない。これは頭部回転と同一速度、逆方向に眼球を回転することで、相殺して視点を停止させておくもので、前庭眼球反射（vestibulo-ocular reflex, VOR）と呼ばれている。VORは頭部回転を必要とする大きな視点移動時に一般的に見られる眼球運動である。また7.5秒、10秒、14秒付近で見られるVORは視点移動のエラーの修正にもなっており、Gのグラフを見ると、行き過ぎた視点が戻る様子が伺える。本実験で被験者に課せられた作業は色合わせであり、正確に視点移動することではないためか、このような視点移動のエラーはかなり多く見られた。前半は視点移動が頻繁（注視時間は約0.5秒間）で後半はじっくり（注視約1秒間）と観察している。被験者TIは被験者HSに比較して頭部の回転量が約15°と大きく、逆に視点移動回数は少ない。VORや視点移動エラーの修正運動が同様に観察されている。3秒、5秒付近のスパイクは瞬きである。

図7の刺激間隔90°ではサッケード直前のVOR¹³⁾も観察されている。頭部回転開始と同時に逆方向へ眼球が回転している。これにより頭部が動き出しても視点はもとの位置に残ることになる。特に被験者HSの、参照刺激から等色刺激への視点移動時に顕著である。それに加えて、視点移動中に、眼球の回転速度が一時的に落ちる箇所があるが、これは大きな視点移動では多段階のサッケードが起こることを示している。サッケード直後のVORは30°と同様に観察されている。一方被験者TIでは被験者HSに比べて直前のVORは小さく、頻度も少ない。視点移動中の一時的な速度低下は観察されている。また、直後のVORは等色刺激側で大きくなっているが、これは眼球が0°（頭部正面）ではなく、7°付

近を中心振幅しているためと考えられる。両被験者とも刺激間隔が15°、30°、90°と広がるにつれて視点移動回数が減少し、1回の注視時間が大きくなっている。ここでも3.2で述べた無意識下での、視覚系の戦略（strategy）の変化が示されている。

次に刺激間隔90°の場合の眼球の回転速度（ V_E ）、頭部の回転速度（ V_H ）、視点の移動速度（ V_G ）を図8に示す。速度のグラフからは、これまで説明してきた眼球と頭部の特徴的な協調動作がより明確に示されている。例えば被験者HSの V_E のグラフで、12秒付近の参照刺激から等色刺激への視点移動（負方向へのピーク）に注目すると、まずサッケードに先だつ逆方向への眼球運動（直前のVOR）があり、それから大きく負方向に動き出している。また視点移動中の速度は3つのピークからなっており、多段階のサッケードが起きていることを示している。さらに視点移動完了後のVORが逆向きの小さなピークで表されている。被験者TIでもこれらの特徴は観察されている。ただし、直前のVORは小さく、このグラフからは分かりにくい。

両被験者とも刺激間隔60°以上の条件においてはサッケード前後のVOR、多段階のサッケードが観察されている。そこで刺激間隔60°以上での等色作業時の視点移動の様子を模式的に表わすと図9になる。まず頭部Hが順方向に、同時に眼球Eが逆方向に動き出す。その時点では、このVORのために視点はまだもとの位置に残っている。次に眼球も順方向にサッケードを開始し、視点も移動し始める。眼球の回転速度は頭部に比べて大きく、頭部を追い越して先に次の場所に到着する。ただしこの時、移動量が大きいときは多段階のサッケードになる。眼球が到着した時点で視点の移動は完了している。遅れて頭部が到着するので視点を止めて

図6 等色作業中の眼球、頭部、視線の動き、刺激間隔は30°。
Figure6 Eye, head and gaze behavior in the color matching at the 30 deg. separation.

図7 等色作業中の眼球、頭部、視線の動き、刺激間隔は90°。
Figure7 Eye, head and gaze behavior in the color matching at the 90 deg. separation.

おくために逆方向に眼球が回転（VOR）し、頭部回転の終了をもってこの一連の動作を完了する。

以上の特徴的な眼球と頭部の協調運動の有無を、刺激間隔別にまとめると表1になる。表中では、観察されなかった場合を×、観察された場合を△、ほぼ毎回の視点移動時に観察されている場合を○で表現した。視点移動後のVORは頭部回転の導入と同時に始まる眼球運動であるが、直前のVORや多段階のサッケード

はより大きな移動量にならなければ起こらないことが分かる。このように、大きく視点を移動するときにはかなり複雑な眼球運動を遂行していることが分かる。しかし刺激呈示条件や被験者のタスクが変わればこの限りではない。特に刺激呈示の変化にあわせて強制的に視点を移動させる場合では、移動するタイミングや移動量が既知かどうか、またできる限り素早く視点移動する必要があるかどうかなどに大きく依存する¹³⁾。本実験では刺激は定常的

図8 刺激間隔90°での等色中の眼球(V_E)と頭部(V_H)の回転速度および視点移動速度(V_G)。

上段： V_E ，中段： V_H ，下段： V_G 。(A)：被験者HS，(B)：被験者TI。

Figure 8. Eye(V_E), head(V_H) and gaze(V_G) velocities in the color matching at the 90 deg. separation. Top diagrams, V_E ; middle, V_H ; bottom, V_G . (A) subject HS; (B) subject TI.

に呈示されており，視点移動は被験者の自由なペースに任されている。また被験者は特に視点移動自体に注意を払っているわけではない。したがって，本研究で得られた等色中の視点移動の特徴が，他の視覚作業や呈示条件での視点移動にも一般的に当てはまるかどうかは分からない。

3.3.3 視点移動量に占める眼球と頭部の回転量

図8を見て分かるように，視点移動時は V_G が0(ゼロ)から離れピークを形成する。したがって，この V_G のグラフを基にして視点移動開始時刻と終了時刻を求めることができる¹⁴⁾。今回は加速するときの， V_G の絶対値が6.1(deg/sec)を越える手前のフレームを視点移動開始時刻(T_s)とし，減速して6.1(deg/sec)以下になるフレームを移動終了時刻(T_e)とした。また視点移動のエラー修正のため V_G は0(ゼロ)付近を何回か振動することがあるが，そのような場合は修正運動を含めて最終的に視点が停止(6.1 deg/sec以下)した時点を終了時刻とした。視点移動に要する時間は $\Delta T = T_e - T_s$ となり，視点の移動量を ΔG ，視点移動における眼球および頭部の回転量をそれぞれ ΔE ， ΔH とすると $\Delta G = |G(T_e) - G(T_s)|$ ， $\Delta E = |E(T_e) - E(T_s)|$ ， $\Delta H = |H(T_e) - H(T_s)|$ と表わせる。

図10に，両被験者の眼球と頭部の回転量を視点移動量の関数と

して表示した。横軸が視点移動量で，縦軸が眼球および頭部の回転量である。 ΔE は被験者HSが○，被験者TIが●で表わされている。また ΔH は被験者HSが□，被験者TIが■で表わされている。視点移動量が十分に小さいときは眼球運動だけで足りる。しかし眼球の最大回転量 ΔE_{max} を越えると頭部を回転して補うようになる。したがって， ΔG の増大に伴って， ΔE は ΔE_{max} までは傾き1で増加してゆき， ΔE_{max} 以上では一定になるであろう。一方 ΔH の方は ΔE_{max} 以下で0(ゼロ)， ΔE_{max} 以上で傾き1の直線になると考えられる。その考え方に基づいて，最小2乗法で近似したものが図中の破線(被験者HS)および実線(被験者TI)である。 ΔE_{max} はHSで29.0°，被験者TIで22.4°であった。被験者TIのほうが早い段階で頭部回転を導入している。これは3.3.2で述べた通りである。Sanders¹⁰⁾は刺激間隔が約50°以上にならないと頭部回転が起こらないと報告している。これは彼の実験では，被験者に課せられているのは光点の数を比較する作業であり，周辺視でも充分に対応できたからと思われる。

3.3.4 視点移動に要する時間

図11に移動に要する時間 ΔT を，視点移動量 ΔG の関数として表示した。横軸が ΔG ，縦軸が ΔT である。○が被験者HS，●が被験者TIを示し，平均値を破線(被験者HS)および実線(被

表1 頭部回転, サッケード前後のVOR, 多段階サッケードの有無.
 ×: 観測されなかった場合, △: 観測された場合, ○: すべての視点移動時に観測された場合.
 Table1 Occurrence of head rotation, post-saccade VOR, pre-saccade VOR and multiple saccades.
 ×, not observed; △, observed; ○, observed in every gaze shift.

Stimuli Separation	Subject HS				Subject TI			
	Head rotation	Postsaccadic VOR	Presaccadic VOR	Multiple Saccades	Head rotation	Postsaccadic VOR	Presaccadic VOR	Multiple Saccades
6°	×	×	×	×	×	×	×	×
15°	×	×	×	×	△	△	×	×
30°	△	△	×	×	○	○	△	△
60°	○	○	○	○	○	○	△	○
90°	○	○	○	○	○	○	△	○
120°	○	○	○	○	○	○	△	○

験者 TI) の折れ線で結んだ。比較のため, Land¹⁵⁾の2人の被験者 (一点鎖線) と Sanders¹⁰⁾の2つの被験者グループ (点線) の結果も併せて表示した。両被験者とも右上がりの傾向を示しており, 視点移動量の増大に伴って ΔT が増大していることを示している。しかし線形ではなく, 飽和する傾向がある。また, Land¹⁵⁾や Sanders¹⁰⁾の結果に比べるとかなり大きな値になっている。Land¹⁵⁾は自動車運転中, それも交差点突入時のドライバーの視点移動を解析している。 ΔT は ΔG とは非常によい相関を示し, 直線で近似できる (図中の一点鎖線)。Sanders¹⁰⁾の実験では, 被験者は離れた光点群の数を比較し報告する。そしてこの作業が制限時間内に何回できるかを測定している。 ΔT と ΔG は線形の関係にあることが分かる。また両方ともサッケード直前の VOR に関する記述は特になかった。

我々の結果が Land¹⁵⁾や Sanders¹⁰⁾よりも大きな値になった理由の一つに, 視点移動エラーの修正にかかる時間も ΔT に含めていることが考えられる。また被験者の実験に臨む態度の違いが影響している可能性もある。運転時は細かい情報抽出よりも大まかな情報を短時間で広い範囲から取り入れることが要求される。したがって, 素早く視点を移動し, 注視時間も短くしなければならない。Sanders¹⁰⁾のタスクも被験者の素早い視点移動が要求されている。それに対して我々の実験では時間制限はなく, 被験者に素早い視点移動も要求していない。そのために ΔT が大きくなったとも考えられる。しかし, 視点移動に要する時間 ΔT は被験者の視覚作業の内容に依存すると理解することもできる。つまり「そもそも色弁別での ΔT は, 自動車の運転や光点数の比較作業に比べて大きい」とも解釈できる。しかしその原因が, 色弁別作業では, これ以上の ΔT の短縮ができないためなのか, ΔT の大きさがそれほど重要でないためなのかは分からない。また, 今回 ΔT が線形的ではなく, 大きい視点移動量 ΔG において上昇率が鈍っているのは, 視点移動前の VOR が働いているためである。すなわち, 頭部回転開始直後の逆向きの眼球運動により注視時間を延長し, 速度の違い頭部の代わりに速度の速い眼球の回転量を増やして ΔT を短縮しているのである。

3.4 等色精度との相関

ここでは, この実験で得られた各種の測定値と, 前回の実験⁹⁾で

図9 視点移動量60°以上での眼球と頭部の動き。
 Figure9 Schematic diagram of behavior of eye and head in a gaze shift of 60 deg. or more.

得られた等色精度との相関について検討する。右上がりの傾向を示した T_c (1回の比較にかける時間), ΔT (視点移動に要する時間), ΔE (眼球の回転量) について検討した。その結果を図12に示す。左から刺激間隔, T_c , ΔT , ΔE と並んでいる。縦軸は95%等色楕円体体積の立方根, 横軸 T_c , ΔT , ΔE は本実験で得られた測定値を被験者別に平均した値である。縦軸, 横軸とも刺激間隔6°での値を1とする相対値で表示している。両被験者あわせて12点になるが, 刺激間隔6°, つまり横軸=縦軸=1で2点が

図10 視点移動量 (ΔG) の関数としての眼球 (ΔE) および頭部 (ΔH) の回転量。
 $\circ$: ΔE 被験者 HS, $\bullet$: ΔE 被験者 TI, $\square$: ΔH 被験者 HS, $\blacksquare$: ΔH 被験者 TI. 破線 (HS) と実線 (TI) は近似直線。
 Figure10 Eye (ΔE) and head (ΔH) rotation size as a function of gaze shift size (ΔG).
 $\circ$, ΔE subject HS; $\bullet$, ΔE subject TI; $\square$, ΔH subject HS; $\blacksquare$, ΔH subject TI. Lines are fitting curves. Dashed lines, subject HS; solid lines, subject TI.

図11 視点移動量 (ΔG) の関数としての視点移動に要する時間 (ΔT).
 $\circ$: 被験者 HS, $\bullet$: 被験者 TI, 平均値を折れ線で示した。破線: 被験者 HS, 実線: 被験者 TI. 一点鎖線: Land¹⁹⁾ から2人の被験者の結果 (近似直線), 点線: Sanders¹⁰⁾ の2グループの結果 (平均値).
 Figure11 Time taken for gaze shift (ΔT) as a function of gaze shift (ΔG).
 $\circ$, subject HS; $\bullet$, subject TI. Lines connect average values. Dashed lines, subject HS; solid lines, subject TI. Dash-dotted lines, 2 subjects of Land¹⁹⁾ (linear regressions); Dotted lines, 2 groups of Sanders¹⁰⁾ (averages).

図12 刺激間隔, 1回の比較時間 T_c , 視点移動時間 ΔT , 眼球回転量 ΔE と等色精度 ($V^{1/3}$) との相関。
 縦軸の値は $V^{1/3}$, 横軸は刺激間隔 (A), 1回の比較に要する時間 T_c (B), 視点移動に要する時間 ΔT (C), 眼球の回転量 ΔE (D). 値は刺激間隔 6° の値を1とする相対値, 黒点は両被験者の結果, 実線は回帰直線を示している。
 Figure12 Correlation of stimuli separation, T_c , ΔT and ΔE with color matching repeatability ($V^{1/3}$).
 Ordinate values represent $V^{1/3}$. Abscissa values are stimuli separation (A), time duration for 1 comparison T_c (B), time duration for gaze shifting ΔT (C) and eye rotation size ΔE (D). Values are so plotted that those for the 6° separation are unity. The dots represent results for both subjects and solid lines linear regressions.

重なるので図上では11点になる。(A)は図1の横軸目盛を相対値に変えたグラフである。実線は最小2乗法による近似直線である。相関係数は ΔE が最も高く0.804, 次に刺激間隔と ΔT で各々0.718, 0.708, T_c が最も低く0.646となった。グラフからも (D) は他に比べて直線近くに分布していることが分かる。Sanders¹⁰⁾ の報告では約 50° 以上で頭部回転が観測されていたため, 本研究でも測定前は ΔE との相関が期待された, しかし色弁別では中心窩での作業となるため, かなり早く (被験者 HS で 29.0° , 被験者 TI で 22.4°) から頭部回転が始まっており, 期待されたほどの相関は得られなかった。

4. まとめ

空間的に離れた刺激を等色しているときの, 被験者の観察方法を探るために, 等色作業中の視点の動きを測定した。等色が完了するまでの時間は刺激間隔が広がってもほぼ一定, しかし観察回数は減少し, 1回の観察に要する時間は増大していた。これは無意識下での, 視覚系の戦略変化を示している。被験者 HS では 30° 以上, 被験者 TI で 15° 以上で視点移動のために頭部を回転していた。頭部回転を必要とする状況では常にサッケード直後の VOR が観察された。さらに 60° 以上ではサッケード直前の VOR や多段

階のサッケードも観察された。視点移動に要する時間は間隔に伴って増大していた。しかし、他の視覚作業に比べて値が大きく、比較的ゆっくりと視点移動していることが分かった。また、刺激間隔の増大に対して飽和してゆく非線形の形状を示した。

謝 辞

この研究は日本学術振興会特別研究員制度の援助を受けて行われた。

参 考 文 献

- (1) Alman, D. H.: CIE Technical Committee 1-29, Industrial color-difference evaluation, Color Res. Appl., 16-3, 219-220 (1991)
- (2) Clarke, F. J. J., McDonald, R. and Rigg, B.: Modification to the JPC79 colour-difference formula, J. Soc. Dyers Col., 100, 128-132 (1984)
- (3) Jay, Jr., S. L.: Color control for the leather industry - The use of the CMC color difference equation for pass-fail decision-making, J. Am. Leather Chem. Assoc., 86, 353-363 (1991)
- (4) Pattee, H. E., Giesbrecht, F. G. and Young, C. T.: Comparison of peanut butter color determination by CIELAB $L^*a^*b^*$ and Hunter color-difference methods and relationship of roasted peanut flavor response, J. Agric. Food Chem., 39-3, 519-523 (1991)
- (5) Witt, K.: CIE Technical Committee 1-28 parameters affecting colour-difference evaluation, Color Res. Appl., 17-2, 145 (1992)
- (6) Boynton, R. M., Hayhoe, M. M. and MacLeod, D. I. A.: The gap effect: chromatic and achromatic visual discrimination as affected by field separation, Optica Acta, 24-2, 159-177 (1977)
- (7) Sharpe, L. T. and Wyszecki, G.: Proximity factor in color-difference evaluations, J. Opt. Soc. Am., 66, 40-49 (1976)
- (8) Witt, K.: Parametric effects on surface color-difference evaluation at threshold, Color Res. Appl., 15-4, 189-199 (1990)
- (9) 篠田博之, 池田光男: 大きな視点移動を伴う等色作業における繰

り返し精度, 照学誌, 78-2, 76-82 (1994)

- (10) Sanders, A. F.: Some aspects of the selective process in the functional visual field, Ergonomics, 13-1, 101-117 (1970)
- (11) Brown, W. R.: The influence of luminance level on visual sensitivity to color differences, J. Opt. Soc. Am., 41-10, 684-688 (1951)
- (12) Rayner, K. and McConkie, G. W.: What guides a reader's eye movements?, Vision Res., 16, 829-837 (1976)
- (13) Zangemeister, W. H. and Stark, L.: Types of gaze movement: Variable interactions of eye and head movements, Exp. Neurol., 77, 563-577 (1982)
- (14) Morasso, P., Bizzi, E. and Dichgans, J.: Adjustment of saccade characteristics during head movements, Exp. Brain Res., 16, 492-500 (1973)
- (15) Land, M. F.: Predictable eye-head coordination during driving, Nature, 359, 318-320 (1992)

(受付日1994年3月28日/採録日1994年5月12日)

しのだ ひろあき
篠田 博之 (正会員)

昭和41年生まれ。平成元年東京工業大学理学部物理学科卒。平成3年同大学大学院総合理工学研究科物理情報工学専攻修士課程修了。現在は京都大学大学院工学研究科建築学専攻博士後期課程。専門は視覚環境、色彩、視覚情報処理。日本視覚学会会員。(京都大学工学部・建築学池田教室)

いけだ みつお
池田光男 (専門会員)

昭和30年大阪大学工学部精密工学科卒業。昭和37年米国ロッチェスター大学大学院博士課程修了, Ph D. 東京工業大学教授を経て現在京都大学工学部建築学教室教授。視覚情報処理, 色覚, 色彩工学, 色彩環境学の研究と教育に従事。応用物理学会, 日本色彩学会, 日本建築学会各会員, 日本照明委員会会長, 国際照明委員会第1部会長, 国際色彩学会副会長。(京都大学工学部・建築学教室・〒606-01 京都市左京区吉田本町)