両眼立体視でのオーバーラップおよびステップエッジパターンにおける奥行き識別と統計的効率¹

宇都宮大学² 薬師神玲子 ・ お茶の水女子大学 石口彰

Statistical efficiency of depth discrimination in stereoscopically overlapped and step-edge patterns

Reiko Yakushijin (Department of Information Science, Faculty of Engineering, Utsunomiya University, Yoto, Utsunomiya 321-8585) and Akira Ishiguchi (Department of Psychology, Ochanomizu University, Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112-8610)

We compared observers' statistical efficiencies of depth discrimination for two stereoscopic patterns: an overlapped pattern where two planes are overlapped at different depths, and a step-edge pattern where two planes are arranged side by side. In both patterns, elements in one plane were differentiated from those in the other plane by color (red vs. green) or orientation (45 deg vs. -45 deg). In the experiment, subjects were required to determine which plane was in front when Gaussian disparity noise was added to both of the elements' disparity values. The results showed that efficiencies were the same level for both patterns when the elements were differentiated by color. On the other hand, efficiencies were lower for the overlapped pattern than the step-edge pattern when the elements were differentiated by orientation regardless of the set size of elements. The patterns which we used were so sparse that the differences between the color and orientation conditions should arise from the process after matching.

Key words: stereopsis, color, orientation, ideal observer, efficiency.

ランダムドットステレオグラムにおいて、二つの視差値が同一の2次元領域内に混在しているとき、奥行き方向に重なり合う2枚の平面が知覚される。このとき、手前の面は透明に見える。このような3次元ドットパターンは、オーバーラップパターンと呼ばれることが多い。

Akerstrom & Todd (1988) は、オーバーラップパターンの知覚は奥行きの異なる領域が隣接するパターン(ステップエッジパターン)の知覚よりも時間がかかり、難しいことを示している。これは、前者の処理が後者よりも負荷が大きく、また処理過程での情報損失が大きいためと考えられる。Harris & Parker (1992) は、ステップエッジパターンにおける奥行きの識別課題にかかわる処理には、①要素のマッチング、②要素の視差の算出、③要素群内の視差統合および奥行き表現の形成、の3段階が含まれると考えた。この3段階の処理は、そのままオーバーラップパターンにおける面形成にもあてはめることができる。すなわち、上記の3段階の処理いずれかにおいて、オーバーラップパターンの処理でステップエッジパターンの処理よりも多くの情報損失が生じると考えられる。た

とえば①のマッチング過程に関して、オーバーラップパターンではパターンの全領域で視差値の異なる要素が混在するので、複数のマッチングが生起する確率が高まり、その結果、オリジナルの視差情報が失われる可能性がある。また、②の視差算出過程では、近隣の要素同士の視差値が近いステップエッジパターンに比べて、オーバーラップパターンでは、視差値の分散が大きくなり、その結果内部ノイズが増大し、オリジナルの視差情報が相対的に小さくなる可能性がある。さらに、③の視差統合および奥行き表現形成が生じるためには、それ以前に同じ平面に属する要素が群化される必要がある。この際、ステップエッジパターンでは要素の群化に位置手がかりを利用できるのに対して、オーバーラップパターンでは二つの面を構成する要素が2次元投影面上で混在している。そのため位置手がかりを利用できず、群化される要素の欠落を生じる可能性がある。

マッチング過程におけるパターン間の情報損失の違いは、オリジナルの3次元配置とは異なるマッチングが生じないような粗いパターンを用いることによって、最小限に抑えることができるだろう。本研究では、このような粗いパターンを用いて、オーバーラップパターンとステップエッジパターンの比較をとおして、マッチング過程よりも後の処理段階での情報損失の特性と原因について検討を行う。そのための指標と

¹ 本研究は、文部省科学研究費基盤研究C(課題番号07610069 研究代表者 石口彰)の援助のもとに行われたものである。

² 現所属：名古屋大学大学院人間情報学研究科。

しては、処理系の情報損失量を反映する統計的効率を用いる。

統計的効率とは、理想的観察者の成績と人間の課題成績とを比較することによって得られる指標である。理想的観察者は、与えられた情報と事前確率とをすべて有効に用いて課題遂行を行う理論的な存在であり、その課題成績は当該課題の統計的上限となる。すなわち、統計的効率は、当該課題においてどのくらいの割合の情報を課題遂行者（被験者）の処理系が利用できたかを示す指標といえる。より具体的に表現すると、統計的効率は提示要素数に対するサンプリングされた要素数の割合としてとらえることが可能である（Bergess & Barlow, 1983; Harris & Parker, 1992）。サンプリングは、システム内部にその課題に適したフィルタが存在するとき、最も良好に行われる（Geisler, 1989）。したがって、さまざまな課題に対する統計的効率を算出することによって、視覚系内に存在が仮定されるフィルタ（受容野・検出器など）の特性を推測することが可能となる。

ところで、仮に要素の群化過程でオーバーラップパターンとステップエッジパターンにおける情報損失量が異なるならば、その理由は、要素の群化に位置手がかりを利用できるか否かにあると推測される。したがって、位置手がかりの代わりとなる群化の手がかりを与えれば、オーバーラップパターンにおける情報低下の度合いは変化するかもしれない。

本研究では、手前の面を構成する要素と背後の面を構成する要素（ドットまたは線分）が、視差以外の属性次元で異なるオーバーラップパターンを用いる。設定した属性次元は、線分の方位（i.e., 右上り45度と左上り45度）と色（i.e., 赤と緑）との2種類である。たとえば色条件における刺激（外部ノイズ混入前）は、赤いドットからなる平面の手前に緑のドットからなる平面が重なっているように（あるいはその逆に）知覚される。課題は、どちらの属性値（i.e., 赤 or 緑）の要素から形成される面が手前にあるかという、平面間の奥行き識別課題である。なお実験では、理想的観察者の課題遂行成績を算出するために、パターンを構成する各要素に視差ノイズを加えた。そのため、実際に用いられたパターンでは、2平面というよりもむしろ、奥行きにばらつきのある2枚のボードが重なっているように見える。

Akerstrom & Todd (1988) は、2枚の平面を構成する要素（ドット・線分）が色や傾きで区別してある場合について、知覚される平面の分離の度合いが、要素がすべて単一色のドットである場合と異なるかどうかを検討した。その結果は、2枚の平面を構成するドットの色が異なるときには、単一色のドットの場合よりも平面が分離して知覚されやすいのに対して、二つの平面が要素線分の傾きで区別されている場合には、単

一色のドットの場合と平面の分離に違いがみられないというものであった。

色は、視覚的探索課題においても非常に強いポップアウトを生じる（Nakayama & Silverman, 1986）のに対して、垂直方向に対して互いに対称な方位関係にある線分は、比較的類似したものとして知覚されることが指摘されている（Wolfe & Friedman-Hill, 1992）。したがって、色と線分の方位とは、要素の群化手がかりとしての有効性に関しては異なる強度をもつと予想される。以下の実験では、このような二つの群化手がかりを与える条件を設定し、オーバーラップパターンとステップエッジパターンにおける奥行き識別効率の違いを調べる。そして、群化手がかり条件間で、両パターンに対する効率の関係を比較することによって、オーバーラップパターンに特有な情報損失と原因を明らかにする。

方 法

被験者 著者2名。両名ともに、両眼立体視実験および効率実験に参加した経験が豊富で、十分慣れている。1名は裸眼、1名は矯正視力で良好な視力を持っている。

装置 刺激は、Macintosh Quadra 800で作成し、2台のTOTOKU 17" Color CRT ディスプレイ上に提示した。被験者は、2組の表面鏡と上記の2台のモニターからなる両眼立体視装置を用いて刺激を観察した。観察距離は368.5 cmであった。なお、この観察距離での立体視装置の最小解像視差は0.25分である。被験者の頭部は、顎台を用いて緩やかに固定した。

刺激 刺激は、縦横ともに視角2.0度の正方形の領域に提示される、粗い要素からなるステレオグラムであった。ステレオグラムを構成する要素は、“色”条件、“方位”条件で異なる。“色”条件では、パターンは赤または緑の視角1分×1分のドットによって構成される。赤ドットの輝度は両被験者ともに10 cd/m²、緑ドットの輝度については、あらかじめ上下法による明るさのマッチング実験を行い、10 cd/m²の赤色と同じ明るさとなる緑色の輝度を被験者ごとに測定した（AI: 25 cd/m²; RY: 28 cd/m²）。“方位”条件では、視角0.5分×3分の線分を構成要素として用いた。線分の方位は、鉛直方向を0度としたときの+45度（右上り）または-45度（左上り）であり、各線分の輝度は約30 cd/m²であった。なお、両条件において背景は約0.02 cd/m²であった。

すべての刺激は、属性値の異なる2種類の要素（色：赤と緑、方位：±45度）を同数ずつ含む。パターン条件としては、オーバーラップ、ステップエッジパターンの2種を設けた。後者には、要素の配置によってさらに二つの下位グループを設定した。以下は、ノイズを加える前の各刺激パターン（Figure 1(a),

(c), (e)) の説明である。なお、実験に用いられたパターンは、これらに視差ノイズを加えたパターン (Figure 1(b), (d), (f)) である。

1. オーバーラップ (Figure 1(a)) : 刺激全体に、二つの視差が混在するパターン。同じ色のドット、あるいは同じ方位の線分に対しては、同じ視差値が与えられている。したがって、両眼融合すると、二つの奥行き異なる平面が重なって知覚され、各平面はそれぞれ単一の色のドット、または単一の方位の線分から形成される。

2-A. ステップエッジ (ミックス) (Figure 1(c)) : 刺激の左領域と右領域で、要素の視差は異なるが、個々の領域内には赤と緑のドット、あるいは二つの方位の線分が同数ずつ混在するパターン。左右に異なる奥行きの平面が並んでいるように見えるが、単眼像はオーバーラップパターンと類似している。

2-B. ステップエッジ (シングル) (Figure 1(e)) : 刺激の左領域と右領域で、要素の視差は異なり、さらに要素の色や方位も異なるパターン。このパターン

は、同一の属性値をもつ要素が一つの平面を形成するという意味では、オーバーラップパターンに対応している。

刺激パターンの上下には“+”型 (クロス) が付けられる。クロスの縦線はステップエッジ刺激中央の奥行きエッジの延長上に設定されており、観察者はこれによってエッジの位置を知ることができる。

なお、色条件では、パターンに赤と緑のドットが含まれるが、このとき、色収差のためにドットの視差が赤ドットと緑ドットで微妙に変化する可能性がある。しかし、オーバーラップ条件とステップエッジ (シングル) 条件では、ともに同色のドットのみによって単一の平面が構成されるため、少なくともこの二つの条件間の比較を行う限りにおいては、色収差の影響は無視できる。

実験に用いた、単一平面を構成する要素の個数は、8個、16個、32個、64個の4段階である (パターン全体では、上記の2倍)。要素の配置は、提示領域を等面積の正方形のセルに分割し、各セルの中に一つの

Figure 1. The stimuli in the line-orientation condition: (a) and (b) overlapped patterns, (c) and (d) step-edge (mixed) patterns, and (e) and (f) step-edge (single) patterns. (a), (c) and (e) are the original patterns without Gaussian disparity noise while (b), (d) and (f) are the stereograms with noise added. In the experiment, the latter patterns were used. In the color condition, red-green dot patterns were used instead of oriented line patterns.

要素を配置する方法で行った。セルの1辺の長さは、要素数8のときに視角30分（セル数16：4×4）、要素数16および32のときに15分（セル数64：8×8）、要素数64のときに7.5分（セル数256：16×16）である。パターン全体の要素数がこのセルの数に等しい場合にはすべてのセルのなかに、1/2の場合には要素数だけランダムに選んだセルのなかに要素を配置する。このとき、セルは左右の領域で同数ずつ選択した。オーバーラップおよびステップエッジ（ミックス）パターンでは、同じ属性値（色または方位）の要素が隣接しないように、また、左右の各領域内での二つの属性値の要素数が等しくなるように要素を配置した。セル内での要素の位置は、一つの属性値の要素は右上りの対角線上に、他方の属性値の要素は左上りの対角線上に要素の中心が置かれるように配置されるが、各要素の対角線上での位置は、対角線の中心から対角線の長さの2/3の範囲でランダムにずらされた。この、対角線上での位置のずれは、左眼用、右眼用画像の対応する要素で等しくなるように設定された。

なお、ステップエッジ（シングル）パターンでは、提示要素数64条件において同属性値の要素間の水平距離が小さくなり、各要素に視差ノイズを加えると、単眼画像で同じ属性値の要素同士で水平位置の逆転が生じる可能性があった。このとき、オリジナルとは異なるマッチングが生じる危険性が非常に高くなるため、このパターンについては、要素数64の条件は設定しなかった。他の刺激パターンでは、提示要素数64条件でも、上記のような位置の逆転は生じない。

二つの平面の基準視差（ノイズを加える前の視差）は、パターン上下のクロスを視差0分として、±0.25、±0.5、±0.75、±1.0、±1.25分の5段階に設定した。視差ノイズは、平均0分、標準偏差3.5分の正規分布に従うものとした。ただし、極端な視差の値を避けるために、ノイズは±3標準偏差内の値に限って使用した。これらの基準視差およびノイズの標準偏差は、被験者の d' がほぼ0.4–3.0の間に含まれるように、あらかじめ予備実験を行い設定したものである。なお、視差は、左眼用、右眼用の画像をそれぞれ基準視差＋ノイズ視差の半分ずつ、反対方向へずらす方法で与えられた。

Figure 1には示されていないが、刺激パターンの外側で、6.0度×6.0度の範囲内の領域は、左右で非対応なドットあるいはラインパターンで埋められた。要素の属性値や密度は刺激パターンと同じであり、単眼では周辺領域と刺激領域は区別できない。周辺領域は視野闘争により奥行きが一定とならないので、周辺領域と刺激パターンの外縁要素との奥行きの違いを、識別に用いることはできない（Harris & Parker, 1992）。また、Figure 1中のパターンを囲む外枠は、実験では提示されなかった。

手続き 被験者は、パターンを構成する二つの要素群のうち、どちらが手前にあるかを回答する。すなわち、オーバーラップ条件では、どちらの属性値（赤 vs. 緑あるいは右上り vs. 左上り）の要素群が手前にあるか、ステップエッジ条件では左右どちらの要素群が手前にあるかをキー押しによって答える（2者択一強制選択法：2AFC）。‘0’キーを押すとパターンが提示され、刺激は反応するまで提示される。誤答の際には、ピープ音によるフィードバックが行われる。反応後、‘0’キーを押すと次の試行が開始される。なお、反応時間は分析の対象とはしなかったが、すべての条件で1秒程度であった。刺激提示中、被験者は特にクロスを注視するようには求められず、自由にパターンを観察するよう教示された。

実験は、2種の属性（色・方位）×3種のパターン［オーバーラップ、ステップエッジ（ミックス）、ステップエッジ（シングル）］の6条件についてそれぞれ、5ブロックずつ行われた。1ブロックは160試行［ステップエッジ（シングル）では120試行］からなるサブブロックを五つ含んでいる。サブブロックの内訳は、4種の提示要素数［ステップエッジ（シングル）では3種］×5種の視差×繰り返し数8回である（刺激提示は、各ブロック内でランダム）。したがって、1ブロック内では提示要素数×視差の各条件につき40試行の識別実験が行われ、これらが5回（5ブロック）繰り返されたことになる。各ブロックの成績をもとに d' 、閾値および統計的効率が算出された。これらの指標の算出方法は、以下の項で説明する。データ収集に先立ち、各被験者は十分な練習試行（100試行程度）を行った。なお、一つのサブブロックの所要時間は約10分であった。

分析方法

統計的効率は、各ブロックで得られた閾値をもとに算出された。その手順は、以下のとおりである。

観察者の d' (d_e') の算出 ブロックごとに、各要素数×視差条件のそれぞれについて識別可能性 d' を算出した。 d' は、ブロック内の正答率（PC）から換算された（Green & Swets, 1966）。

理想的観察者の d' (d_i') の算出 理想的観察者の成績は、視差ノイズの分布に基づく理論的計算によって算出することができる。理想的観察者は、各要素が帰属すべき平面を正確に知っており、また、視差情報を完全に利用できるものとする。各要素に与えられた視差ノイズの標準偏差を σ_{add} とすると、各平面上の要素の平均視差の標準偏差 σ は、各平面の要素数を n とすると、

$$\sigma = \frac{\sigma_{add}}{\sqrt{n}} \quad (1)$$

となる。したがって、理想的観察者の識別可能性 d_i'

は、 Δ を標本平均の分布の平均値間の距離 [i.e., 二つの平面間の相対視差] とすると、

$$d'_i = \frac{\Delta}{\sigma} = \frac{\Delta\sqrt{n}}{\sigma_{\text{add}}} \quad (2)$$

で求められる。

なお、本実験では、パターンに加えられた視差ノイズは、 ± 3 標準偏差以内の値のみとした。このとき、理想的観察者の実際の d' は、式(2)で与えられる理論的な値よりも、全体としてごく少量ずつ上昇する。しかし、この上昇率が非常に小さいこと、およびパターン条件間で理想的観察者の d' が全く同じとなることから、本研究における統計的効率は、式(2)の、範囲を設定しない場合の d'_i を用いることとする。

閾値の算出 本実験では、人間および理想的観察者の閾値は、識別可能性 $d'=1$ が得られる相対視差とした。この値は、五つの相対視差値に対する d' から、 d' の視差値に対する回帰直線を最小 2 乗法によって求め、この式を用いて算出した。これは、式(2)より、 d' と相対視差 Δ とが線形関係にあることが示唆されるからである。

統計的効率(F)の算出 本実験においては、統計的効率は、実際の観察者の識別閾 (Th_e) と理想的観察者の識別閾 (Th_i) から、以下の式で求められる。

$$F = \left(\frac{Th_i}{Th_e} \right)^2 \quad (3)$$

結 果

各属性条件におけるオーバーラップパターンとステップエッジパターンの比較 Figure 2 は色条件、Figure 3 は方位条件における、提示要素数の変化に応じた効率の変化を表したグラフである。図より、提示要素数の増加にともなって、効率が低下することがわかる。この結果は、Harris & Parker (1992) の、ステップエッジパターンにおける奥行き識別効率に関する結果と一貫したものである。また、両被験者ともに、色条件 (Figure 2) ではパターン間の差がそれほどないのに対して、方位条件 (Figure 3) ではオーバーラップパターンの効率が 2 種のステップエッジパターンの効率に比べて低い傾向がみられる。

以下に記す統計的検定の結果も、上記の傾向を支持している。まず、色条件についての結果である。すべてのパターンに対して設定された三つの視差条件のデータを用いてパターン×要素数 (各領域を構成する要素数 $n=8, 16, 32$) の 2 要因の分散分析を行ったところ (要素数のみ対応あり)、両被験者ともにパターンの有意な効果はみられなかった [被験者 AI: $F(2, 12) = .16, p = .85$; 被験者 RY: $F(2, 12) = .65, p = .54$]。一方、提示要素数の主効果に関しては、両被験者について有意な効果がみられた [被験者 AI: $F(2, 24) = 42.47, p < .001$; 被験者 RY: $F(2, 24) = 23.77, p < .001$]。提示要素数についてテューキーの HSD 検定を行った結果、“要素数 8” 条件と他の条件の間に有意な差がみられ、被験者 RY では“要素数 16” と

Figure 2. Results of the color condition. This figure shows the efficiencies as a function of number of elements. Open circles indicate efficiency values for the overlapped patterns, and half-filled squares indicate those for the step-edge patterns.

“要素数 32”の間にも有意な差がみられた ($p < .01$)。なお、視差に関して四つの条件が設定されたオーバーラップ条件とステップエッジ (ミックス) 条件のデータをもちいて、パターン (オーバーラップ・ステップエッジ (ミックス) × 要素数 ($n=8, 16, 32, 64$)) の 2 要因の分散分析 (要素数については対応あり) を行った結果においても、同様な効果が示された [パターンの主効果 AI: $F(1, 8) = .001, p = .97$; RY: $F(1, 8) = .84, p = .37$ 提示要素数の主効果 AI: $F(3, 24) = 40.10, p < .001$; RY: $F(3, 24) = 39.36, p < .001$]。

次に、方位条件について、同様に 2 種の検定を行ったところ、色条件とは異なり、パターン間に効率の差があることが示唆された。すべてのパターンに対して設定された三つの視差条件のデータを用いたパターン × 要素数 ($n=8, 16, 32$) の 2 要因の分散分析 (要素数のみ対応あり) では、パターン間には、1 名の被験者については有意な差が認められ、他方の被験者についても、傾向差がみられた [被験者 AI: $F(2, 12) = 3.71, p < .06$; 被験者 RY: $F(2, 12) = 11.02, p < .01$]。有意差の得られた被験者 RY についてチューキーの HSD 検定で各パターン間の差を検討した結果、オーバーラップパターンと両ステップエッジパターンとの間 ($p < .01$) には有意な差がみられたが、ステップエッジパターン同士には有意な差はみられなかった。Figure 3 より、他方の被験者 AI についても、同様の傾向が読みとれる。一方、要素数についても、両被験者ともに有意な効果がみられた [被験者 AI: $F(2, 24) = 16.36, p < .001$; 被験者 RY: $F(2, 24) =$

18.07, $p < .001$]。オーバーラップ条件とステップエッジ (ミックス) 条件のデータを用いた 2 要因の分散分析 (要素数については対応あり: 要素数 4 条件) の結果においても、パターン [AI: $F(1, 8) = 5.53, p < .05$; RY: $F(1, 8) = 18.00, p < .005$]、要素数 [AI: $F(3, 24) = 17.65, p < .001$; RY: $F(3, 24) = 25.15, p < .001$] 両主効果ともに有意であった。

以上の分析の結果より、重なり合う 2 枚の平面 (オーバーラップパターン) が色という属性で分離されている場合、その平面に関する奥行き識別課題の統計的効率は、ステップエッジパターンにおける奥行き識別課題の効率と同程度であるのに対して、これらの平面を分離する属性が要素の方位であるときには、ステップエッジパターンと比較して効率は低下することが示された。

要素数とサンプルの大きさの関係 効率を提示要素数に対するサンプリングされた要素数の割合としてとらえると、提示要素数 N と効率 F を掛け合わせるによって、被験者が課題を遂行するためにサンプリングを行った要素数が得られることになる。

$$\text{The size of sampling} = N \times F \quad (4)$$

Harris & Parker (1992) は、上記のような方法でサンプルの大きさを算出し、ステップエッジパターンにおける奥行き識別課題では、提示要素数にかかわらず、ほぼ一定数 (5 個未満) の要素の情報のみが用いられていると示唆した。仮に、提示要素数 (N) にかかわらず、サンプルの大きさが C_s で一定ならば、式 (4) より

$$\log F = \log C_s - \log N \quad (5)$$

Figure 3. Results of the line-orientation condition. Efficiency values are plotted as a function of number of elements. As Figure 2, open circles indicate efficiency values for the overlapped patterns, and half-filled squares indicate those for the step-edge patterns.

となる。すなわち、効率と提示要素数の関係を2重対数座標系にプロットすると、傾き-1の直線に適合する。

Figure 4は、色条件で得られた効率を2重対数座標系にプロットし直したものである。なお、色条件については、パターン間に有意な差がみられなかったことから、Figure 4では、すべてのパターンについて得られた効率の平均値を用いた。エラーバーは標準偏差を示している。Figure 4(a)の2本の点線は、各被験者について、標準偏差の2乗の逆数を重みづけ係数とした加重最小2乗法によって得られた傾き-1の直線を示している。データはこの直線に適合しているかのようであるが (AI: $R^2=0.91$; RY: $R^2=0.91$)、データを結んだ実線を見ると、要素数8から32にいたるまでの変化率と要素数32から64までの変化率とが異なる様子がうかがえる。ブロックごとに、隣接する要素数条件間の効率の対数の差（すなわち、対数座標系における傾き）をとり、これに対して対応のある分散分析を行った結果、両被験者ともに有意な効果が得られた [AI: $F(2, 18)=8.44, p<.001$; RY: $F(2, 18)=11.83, p<.001$]。チューキーのHSD検定の結果は、要素数32から64にいたる変化率は、その他の要素間の変化率よりも大きいことを示している ($p<.01$)。要素数8と16、16と32の変化率の間には、有意な差はみられなかった。

Figure 4(b)は、要素数8、16および32の条件のデータのみを用いて求めた、2重対数座標系における直

線（指数関数）である。この直線の傾きは、両被験者ともに約-0.6となった [AI: $-0.60, R^2=0.92$; RY: $-0.63, R^2=0.99$] が、これは、これらの要素数条件のサンプルの大きさが、提示要素数の約0.4乗に比例して上昇することを示している。なお、方位条件に関しても、各パターン条件のデータをそれぞれ2重対数座標系にプロットしたところ、被験者AIのステップエッジ（シングル）条件（傾き約-0.4）を除き、y切片は異なるものの、適合直線の傾きはすべての条件で約-0.6となった。

考 察

本研究では、粗いドットおよびラインステレオグラムを用いて、オーバーラップパターンとステップエッジパターンにおける奥行き識別効率を算出し、これを比較することによってオーバーラップパターンにおけるマッチング過程以降の情報損失の特質と原因を検討した。実験の結果は、以下の3点にまとめられる。①2枚の平面の要素が色属性によって分けられている場合、オーバーラップパターンにおける奥行き識別効率はステップエッジパターンのものと変わらない。②これに対して、要素が線分の方位という属性で分けられている場合には、オーバーラップパターンにおける奥行き識別効率は、ステップエッジパターンにおけるものよりも、全体的に劣る。③両パターンともに、効率は提示要素数の増加とともに減少する。この減少をサンプリングされる要素数との関係で考えると、少なく

Figure 4. Efficiencies in the color condition are plotted in the log-log coordinates. As the differences among the three pattern conditions are not significant, the mean efficiency values across the three conditions are plotted in this figure. Broken lines in (a) are the regression lines calculated from all the data. On the other hand, solid lines in (b) are the regression lines calculated exclusive of the 64-element condition. Filled squares show the efficiencies of subject AI, and open circles indicate those of subject RY.

とも提示要素数 32 までは、サンプルの大きさは提示要素数の約 0.4 乗に比例して増加する。

序論でも述べたように、色と方位という二つの属性は、要素の群化に対する有効性が異なると考えられる。群化に対する有効性が高いと思われる色条件で、両パターンの効率間に差がなく、低いと思われる方位条件で効率間に差がみられたということは、方位条件におけるオーバーラップパターン処理の情報損失のほとんどが、要素の群化過程でのサンプルが小さくなることによることを示している。さらに、効率から推定されたサンプルの大きさの提示要素数にともなう推移が、オーバーラップ、ステップエッジ両パターンで同様であった（i.e., 提示要素数の約 0.4 乗に比例）ということは、群化過程でのサンプル数の減少は、提示要素数にかかわらず一定割合で生じていたことを示している。

Akerstrom & Todd (1988) は、すべての要素が同一色のドットであるオーバーラップパターンと、各平面を構成する要素が方位によって分離されている、本研究の方位条件のようなパターンとでは、その知覚の難易度が変わらないことを示している。このことから、おそらく、同一色のドットからなるオーバーラップパターンにおける面の奥行き知覚の効率も、方位条件の結果と類似したものであると推察される。

色条件で、オーバーラップパターンとステップエッジパターンとの間に差がみられなかったことから、オーバーラップパターンに特異的に生じる群化過程における情報損失は、重なり合う面が異なる色の要素によって構成されているとき、この色という属性によって補償されると考えられる。Akerstrom & Todd (1988) は、色情報によって平面の要素が分離されているとき、オーバーラップパターン内の 2 枚の平面が分離して見えやすくなることを示した。彼らは、この原因を、マッチング過程において、異なる色の要素間には抑制作用が働くことにあると考えた。Jordan, Geisler, & Bovik (1990) は、色が対応問題解決に非常に有効に用いられることを示しており、Akerstrom & Todd (1988) にみられた、色によって要素が分離されたステレオグラムの知覚しやすさの一つの要因は、確かにマッチング過程にあるのかもしれない。しかしながら、本研究においては、少なくとも提示要素数 32 までは、色・方位条件ともにオリジナルと異なるマッチングが生じる可能性が非常に少ない刺激を用いており、したがって本研究における方位に対する色の優越は、マッチングよりも後の、群化の過程に起因すると考えられるのである。おそらく、Akerstrom & Todd (1988) においても、同様な群化の過程に起因する要因も働いていたのではないかと推察される。

ただし、ここで注意すべき点は、本研究の提示要素数 64 の条件において、方位条件よりもむしろ色条件

でオーバーラップパターンの効率の低下が著しかったことである。前述のように、この提示要素数 64 の条件では、左眼用画像と右眼用画像で、隣接する要素の水平位置が入れ替わる場合があり、他の要素数条件に比べて、意図しないマッチングが生じる可能性が大きかった。上記の結果は、この意図しないマッチングが実際に生じたことによるのかもしれない。方位条件では異なる属性値の要素（ $+45^\circ$ と -45° ）の形態が異なるが、色条件では同じ大きさのドットであるため、このようなマッチングがより多く生じたとも考えられる。先に述べたように、Jordan et al. (1990) は、色が対応問題解決に非常に有効に用いられること、特に本研究で用いた刺激のように、暗背景上に明るい要素が提示される場合には色の効果は大きいことを示している。しかしながら、彼らが扱った刺激は、いわゆる wall-paper パターンであった。wall-paper パターンにおいては、たとえば同じ色同士の要素の対応が他の対応に比べてわずかでも強い興奮作用をもてば、周囲の同様な対応からの興奮性の刺激に支えられて、他の対応を駆逐することが可能になる。これに対して、オーバーラップパターンでは、同じ視差値をもつ要素は空間的に、ある程度、離れた距離にしかないため、周囲からの支持が弱く、他の対応を駆逐することができないのかもしれない。さらに、本研究で用いたパターンのように、個々の要素の視差値が視差ノイズの混入によってかなり異なっている場合には、周辺からの支持がさらに少なく、異なる属性値間の対応が生じるとも考えられる。ただし、Ramachandran, Rao, Sriram, & Vidyasagar (1973) は、非対応なドット（ノイズ）の中に、色のついたドットを混入させたときには、同色のドット同士が対応して、ノイズの影響を駆逐することを示した。この結果は、仮に周囲に同じ視差値の対応が少なくても、同色の対応が他を駆逐することを示しているととらえることができる。彼らの課題では、同色の対応を取り囲むドットが非対応なノイズであるのに対して、本研究の課題では、すべての要素が課題遂行上重要なものであり、注意をどちらか一方の色に向けることが困難である。あるいはこのことが予期しないマッチングを引き起こしたとも考えられるが、この点に関しては、改めて検討する必要があるだろう。

次に、本実験課題でのサンプリング特性について考えてみる。前述③の、サンプルの大きさが提示要素数の約 0.4 乗に比例するかたちで上昇するという結果は、両パターンに共通してみられたものである。したがって、群化過程とは独立な処理に起因するものであると考えられる。どのような機構あるいは処理方略が、このような提示要素数と効率の関係の原因なのかは、本研究の結果からは不明であり、今後の検討課題である。③は、ステップエッジパターンにおける奥行き識別課題の効率を測定した先行研究、Harris &

Parker (1992) とほぼ一貫した結果である。Harris & Parker (1992) は、サンプルの大きさは提示要素数にかかわらず一定値 (5 以下) であると示唆したが、彼らのデータをみても、提示要素数が少ないときには、サンプルの大きさの推定値 (提示要素数 $\times$ 統計的効率) は、2 乗根よりもやや緩やかな曲線を描いて一定値に収束するように見受けられる。彼らのデータでは、その後、提示要素数が増えると、サンプルの大きさの推定値は徐々に低下するが、その主たる要因は、彼らが後の研究で示したとおり、マッチング過程において意図しないマッチングが成立することにある (Harris & Parker, 1994a, b)。仮に、このような提示要素数の多い条件でも、意図しないマッチングが生じなければ、効率は、提示要素数と一定の関係、すなわち、サンプルの大きさが提示要素数の約 0.4 乗に比例するかたちで上昇するという関係が成立するのではあるまいか。この場合、この上昇率は、ステップエッジ・オーバーラップ両パターン知覚に共通して関与する、両眼立体視システム内のフィルタの特性を反映するものととらえることができよう。なお、この提示要素数と効率との関係は、二つの領域の輝度平均を識別する実験での要素数と効率との関係 (Legge, Gu, & Luebker, 1989) と非常に類似している。輝度情報も視差情報とともに、エッジ検出に大きく関与していること等を考えると、両処理系に類似した機構が存在する可能性も考えられる。

日常の視覚環境において、オーバーラップ平面は多く存在する。そのなかで、個々の物体を知覚するためには、群化は、必要不可欠な段階である。本研究では、両眼視差に基づく群化を行う際に、色情報が有効な補助となりうることが示唆された。このような、群化を助ける特徴として考えられるものには、色や方位のような局所的な特徴だけでなく、対称構造のような大域的な特徴も考えられるが、現在のところその有効性は示されていない (Ishiguchi & Yakushijin, 1999; Yakushijin & Ishiguchi, 1999)。群化過程において、どのような情報が、どのような有効性をもつのかという問題は、群化過程の処理方略とともに、現在検討中である。

引用文献

- Akerstrom, R. A., & Todd, J. T. 1988 The perception of stereoscopic transparency. *Perception and Psychophysics*, **44**, 421-432.
- Burgess, A. E., & Barlow, H. B. 1983 The efficiency of numerosity discrimination in random dot images. *Vision Research*, **23**, 811-829.
- Geisler, W. S. 1989 Sequential ideal-observer analysis of visual discrimination. *Psychological Review*, **96**, 267-314.
- Green, D. M., & Swets, J. A. 1966 *Signal detection theory and psychophysics*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- Harris, J. M., & Parker, A. J. 1992 Efficiency of stereopsis in random-dot stereograms. *Journal of the Optical Society of America A*, **9**, 14-24.
- Harris, J. M., & Parker, A. J. 1994a Constraints on human stereo dot matching. *Vision Research*, **34**, 2761-2772.
- Harris, J. M., & Parker, A. J. 1994b Objective evaluation of human and computational stereoscopic visual systems. *Vision Research*, **34**, 2773-2785.
- Ishiguchi, A., & Yakushijin, R. 1999 Does symmetry structure facilitate the depth separation between stereoscopically overlapped dot planes? *Perception and Psychophysics*, **61**, 151-160.
- Jordan, J. R., III, Geisler, W. S., & Bovik, A. C. 1990 Color as a source of information in the stereo correspondence process. *Vision Research*, **30**, 1955-1970.
- Legge, G. E., Gu, Y., & Luebker, A. 1989 Efficiency of graphical perception. *Perception and Psychophysics*, **46**, 365-374.
- Nakayama, K., & Silverman, G. H. 1986 Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, **320**, 264-265.
- Ramachandran, V. S., Rao, V. M., Sriram, S., & Vidyasagar, T. R. 1973 The role of color perception and 'pattern' recognition in stereopsis. *Vision Research*, **13**, 505-509.
- Wolfe, J. M., & Friedman-Hill, S. R. 1992 On the role of symmetry in visual search. *Psychological Science*, **3**, 194-198.
- Yakushijin, R., & Ishiguchi, A. 1999 The effect of noise plane on discrimination of mirror-symmetry in different depth plane. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **25**, 162-173.

—1998. 9. 25 受稿, 2000. 3. 4 受理—

Akerstrom, R. A., & Todd, J. T. 1988 The percep-