3次元対称構造の検出¹

お茶の水女子大学 薬師神玲子・石口 彰

The detection of three-dimensional mirror-symmetry

Reiko Yakushijin and Akira Ishiguchi (*Department of Psychology, Ochanomizu University, Otsuka, Bunkyo-ku, Tokyo 112*)

We conducted two experiments in order to examine abilities of the human visual system to detect three-dimensional mirror-symmetry. In Experiment 1, three kinds of three-dimensional stimulus patterns were presented: (a) three-dimensionally mirror-symmetrical patterns (3-D symmetry), (b) patterns with mirror-symmetry in the frontal plane, but not symmetrical with regard to depth (2-D symmetry), and (c) random patterns. Subjects were required to discriminate among them. Both the reaction time and the discriminability index (d') were measured to estimate the detectability. The results indicate that the visual system can detect three-dimensional mirror-symmetry less easily than two-dimensional symmetry. In Experiment 2, we examined the effects of noise (i.e., asymmetrical constituents of the stimulus display) on the detection of three-dimensional mirror-symmetry. The results show that the detectability increases non-linearly with increase of the SN ratio.

Key words: stereopsis, symmetry, sagittal plane, signal detection, reaction time, discriminability (d').

我々をとりまく3次元空間の世界には、数多くの構造が見られる。対称構造も、その一つである。人工的な建造物はもちろん、自然の造形物や生物の形態などにも対称構造は多い。人間は長い期間、種として、個体として、これら物体の形態を知覚し、認知してきている。その過程には、対称構造をもつ物体を認知するのに適したメカニズムが獲得されてきたとも考えられる。

実際の研究では、対称構造は、観察者の注意を喚起し、視覚系が行うその後の処理を減らすこと(Locher & Nodine, 1973, 1989),あるいは、形態の中心の検出や、形態再認のための参照系を決定する際に有効であること(Davi, Doyle, & Proffitt, 1992; Palmer, 1985; Quinlan, 1991)などが示唆されている。

対称構造の知覚に関するこれまでの研究は、主として2次元平面における線対称パターンを対象としたものである(Barlow & Reeves, 1979; Corballis & Roldan, 1975; Jenkins, 1983; Locher & Wagemans, 1993; Palmer & Hemenway, 1978; Wagemans, Van Gool, & d'Ydewalle, 1990)。

Barlow & Reeves(1979)は、ランダムドット鏡映パターンを用いて、2次元対称構造に関する視覚系の検出能力を検討する詳細な実験を行った。ランダムドット鏡映パターンとは、仮想の中心線(彼らは、中心線の方位をいろいろな角度に設定した)の両側に、ランダムドットパターンとその鏡映像を配置したパターンである。この実験の結果、人間の視覚系は完全な2次元対称構造(垂直軸に関して左右対称なパターン)を容易に検出できること、また、ノイズの混在の度合い、すなわちSN比の度合いに応じて、2次元対称構造検出の度合いがほぼ線形に上昇することが示された。また、刺激の提示時間が短くても、単眼への提示であっても、軸が垂直でなくても、あるいは視野の中心に提示されなくても、2次元対称構造は検出可能であることも併せて示された。すなわち、2次元対称構造の知覚メカニズムは、かなり融通の効くものであることがわかった。彼らはまた、理想的観察者(ideal observer)との比較で、2次元対称構造検出の統計的効率を算出しているが、その結果、2次元対称構造の検出効率はかなり良いことが示された。

しかし、人間が通常生活している世界は3次元空間であり、形態を知覚し、認知することが必要とされる物体もまた、3次元の、奥行きを伴う物体である。確かに、網膜上に投影された3次元パターンは、2次元

¹ 本研究は、文部省科学研究費一般研究c(課題番号05610058 代表者石口彰)および、重点領域(課題番号04236109 代表者辻三郎)の援助のもとで行われた。

としての性質を有するが、空間知覚の観点からすれば、対称構造に関する研究も、2次元平面に止まらず、3次元空間へと展開していくことが求められよう。本研究は、奥行き手がかりの中でも、特に両眼視差によって形成される3次元空間における対称構造に関し、視覚系の特性を検討するものである。

Locher & Smets(1992)は、3次元空間内の対称構造の知覚を扱う、先駆的な研究を行った。彼らは、2次元および3次元のランダムドット鏡映パターンを用いて、対称構造の検出に及ぼす奥行きの影響を調べている。

彼らの研究目的は、奥行きや運動の次元を加えることによって、対称構造の知覚が向上するか、すなわち、対称構造の検出の度合いが向上するかを検討することであった。結果は、奥行きを加えても検出の度合いは変わらず、運動を加えると検出の度合いが低下するというものであった。しかし、彼らの研究では、3次元対称構造の検出システムを独立に検討している訳ではない。

彼らの設定した3次元条件は、“完全3D対称パターン(矢状平面(sagittal plane)に関して左右対称)”，“非対称パターン(2次元投影面上でも、矢状平面に関しても非対称)”，“不完全3D対称パターン(1/3のドットが2次元投影面(額面平行面)上でも、矢状平面に関しても非対称)”である(矢状平面は、正中面(median plane)と同義である)。すなわち、3次元対称性の度合いを、2次元投影面における2次元対称性の度合いと一致させている。彼らの意図するところは、前述のように、奥行きや運動といった次元を増やすことが、対称構造の知覚に及ぼす影響を見ることにあった。

そこで、本研究では、特に3次元対称構造(矢状平面に関する対称構造)の検出において、視覚系がどのような特性を示すかを検討する。すなわち、3次元空間内において、矢状平面に関して左右対称なパターン(3D対称)と、矢状平面に関しては対称でないが、2次元投影面(額面平行面)上では左右対称なパターン(2D対称)との識別を問題とする。Figure 1は、この3D対称および2D対称を示したものである。

更に、3次元対称構造の検出に、ノイズがどのような効果を及ぼすかを検討することも、目的の一つである。2次元対称構造の検出の度合いは、SN比の度合いに応じてほぼ線形に変化する(Barlow & Reeves, 1979)が、3次元対称構造の検出の度合いは、どのように変化するのか。これについては、実験2で検討する。

なお、本研究では、前述のBarlow & Reeves(1979)、Locher & Smets(1992)と同様、ランダムド

ット鏡映パターンを刺激として用いた。この理由は、先行研究との比較を容易にするという利点のほか、対称構造以外の形態および構造情報を排除するという点である。これは、両眼立体視を厳密に検討するために、単眼形態情報の効果を除去する操作が行われた(Julesz, 1971)ように、3次元対称構造の検出システムを検討する上でも、単眼形態情報を統制する必要があると考えたからである。

実 験 1

目 的

実験1では、3次元対称構造を、人間の視覚系がどの程度検出できるかを検討する。矢状平面に関して左右対称なパターン(3D対称)と、2次元投影面(額面平行面)では垂直軸に関して左右対称であるが、各ドットのもつ両眼視差はランダムであるパターン(2D対称)を用い、この両パターンを識別する際の反応時間および d' を算出する。この両パターンは、ともに2次元投影面上では2次元対称であるが、矢状平面に関しては、対称 vs 非対称を示す。従って、この両者を識別する度合いを検討することで、人間の視覚系の、3次元対称構造の検出能力を推定できる。

実験1ではまた、上記の両パターンと、2次元投影面においても、矢状平面に関しても、ともにランダムなパターンとを比較することによって、奥行き情報が2次元対称構造の検出に及ぼす影響に関しても、検討を加える。Locher & Smets(1992)の結果は、3D対称

Figure 1. Left and right images of (a) the 3-D symmetry and (b) the 2-D symmetry patterns. Twenty-dot patterns were used in the experiments, though ten-dot patterns are presented for clarity in this figure.

vs ランダムパターンの識別は、2次元平面における2次元対称 vs ランダムパターンの識別と差がないことを示している。実験1において、3D対称 vs ランダムパターンの反応時間および d' と、2D対称 vs ランダムパターンの反応時間および d' が異なるという結果が得られたならば、2次元対称構造と矛盾する奥行き情報(2D対称における奥行き情報)が、2次元対称構造の検出に影響を与える可能性が考えられる。

方 法

被験者 筆者2名(AIとRY)²。両者はともに、観察距離において、正常な視力(矯正も含む)、および正常な立体視能力を有する。後者は、ランダムドットステレオグラムで、中央の矩形部位(視差 $-16'$ から $+16'$ まで変化)の奥行きを評定させる方法で測られた。

装置 刺激パターンは、コンピュータ(Macintosh Quadra 800)によって作成され、2台のCRT(Apple-Color High-Resolution RGB Monitor)上に提示された。被験者は、顎台によって顔面を固定され、2組の表面鏡からなる両眼立体視装置を用いてCRTを観察した。観察距離は232 cmであった。

提示刺激 明背景(29 cd/m²)上に20個の暗ドット(5 cd/m²)が提示された。ドットは、36×36のグリッドの右半分・左半分にそれぞれ10ドットずつ配置された。個々のドットは、三つの奥行き平面(両眼視差 $-4'$, $0'$, $+4'$)のいずれかに置かれた。刺激パターンは次の3通りの3次元パターンであった。

1. 3D対称パターン(3D対称)：矢状平面に関して左右対称なパターン。
2. 2D対称パターン(2D対称)：矢状平面に関しては左右対称ではないが、2次元投影面上では、垂直軸に関して左右対称なパターン。
3. ランダムパターン(ランダム)：2次元投影面上の位置、各ドットの両眼視差ともにランダムなパターン。

従って、2D対称および3D対称では、10対のドットとなる。刺激の提示範囲は視角にして $2.1^\circ \times 2.1^\circ$ 、個々のドットの大きさは、 $2.5' \times 2.5'$ であった。

課題 被験者は、提示されるパターンが上記の3パターンのいずれにあたるか、識別するよう要求された。

手続き 各被験者に対し、次の四つの実験条件が課せられた。条件の順序は、被験者AIが条件1・条件2・条件3・条件4の順、RYが条件1・条件4・条件3・条件2の順であった。条件内における試行は、連

続してランダム順に行われた。

条件1：3D対称 vs 2D対称 vs ランダム	150 試行
条件2：3D対称 vs 2D対称	100 試行
条件3：3D対称 vs ランダム	100 試行
条件4：2D対称 vs ランダム	100 試行

但し、条件1は予備的なものであり、条件2以降で安定した結果を得るために設定された。従って、識別の傾向を見るだけで、具体的な分析は行わない。

条試行において、刺激提示の前には、刺激パターンの提示される領域の中心に注視点(視角 $5' \times 5'$)が500 ms提示された。

被験者は、各条件において刺激の識別を行った。反応は、キイ押しによって行われた。刺激は、被験者が反応するまで提示されたが、反応時間を測定するため、被験者はなるべく速く正確に反応するよう求められた。反応の正誤はビープ音によってフィードバックされたため、被験者は自分の回答を常にチェックすることができた。反応の正誤および反応時間は、コンピュータによって記録された。

なお、実験セッションは、相当数の練習の後に行われた。実験時間は各被験者に対し、約1時間であった。

結 果

条件1(3D対称 vs 2D対称 vs ランダム)に関しては、各被験者はいずれも高い正答率を示した(AI：3D対称 98.0%，2D対称 82.0%，ランダム 100%；RY：3D対称 98.0%，2D対称 100%，ランダム 100%)。また、平均反応時間は、AI：3D対称 1.745 s，2D対称 1.470 s，ランダム 0.805 s；RY：3D対称 1.297 s，2D対称 0.993 s，ランダム 0.812 sとなった。

パターンを対にして比較した条件2，3，4の結果の分析から、上記条件1で見られた識別能力の傾向をより詳細に検討することができる。但し、この場合には、2群間の比較であることも考え、正答率に代わり、 d' を算出した。 d' は、信号検出理論において、信号・ノイズ両分布が、等分散の正規分布であるとの仮定の上で算出したものである(Egan, 1975)。刺激の提示時間が一定ではないので、得られた d' は、通常はあまり意味をもたない。しかし、反応時間を求めるという制約のもとでは、被験者の識別能力の指標として、単なる正答率より多くの情報を提供することが考えられよう。但し、統計的検定に関しては、反応時間のみを対象とする。

Figure 2は、条件2(3D対称 vs 2D対称)、条件3(3D対称 vs ランダム)、条件4(2D対称 vs ランダム)において得られた、各被験者の平均反応時間ならびに

² 実験1の被験者数が2名と少ないが、両者が両眼立体視に関し、十分訓練を積んだ者であり、かつ、安定したデータを提供している点を考えれば、信頼できると考える。

d' である。条件2, 3, 4から得られた反応時間について、被験者ごとに1要因の分散分析を行ったところ、ともに有意な差が見られた(AI: $F(2, 297) = 298.50, p < .01$; RY: $F(2, 297) = 265.38, p < .01$)。チューキー法による多重検定の結果、両被験者ともに、条件2(3D対称 vs 2D対称)と条件3(3D対称 vs ランダム)、条件2と条件4(2D対称 vs ランダム)の間に有意な差が見られた(ともに $p < .01$)。しかし、条件3と条件4の間には、有意な差は見られなかった。すなわち、対称パターン(3D対称, 2D対称)とランダムパターンとの識別はかなり早く、一方対称パターン間の識別、すなわち3D対称と2D対称との識別は、それと比較して遅いことが示された。 d' のデータもまた、対称パターンとランダムパターンとの識別はかなり優れ、対称パターン間の識別は、それと比較してやや劣ることを示唆している。反応時間および d' のデータから得られた結果を併せて考えると、対称パターンとランダムパターンとの識別の方が、対称パターン間の識別よりも容易であることがわかる。

考 察

3D対称と2D対称パターンは、ともに3次元パターンであるが、矢状平面に関する3次元対称性は異なる。一方、2次元平面に投影した場合、すなわち、2次元投影面(額面平行面)上では、ともに垂直線に関して対称という共通点をもつ。この両者をランダムパターンとの識別における反応時間に差が見られなかったことから、奥行き情報の違いは、2次元投影面における2次元対称構造の検出には影響しないことがわかる。

Locher & Smets(1992)は、3D対称 vs ランダムパターンの識別と、2次元平面における2次元対称 vs ランダムパターンの識別との間に差がないことを示唆

している。これと実験1の結果とを併せて考えると、2次元平面から3次元空間への拡張に伴う奥行き情報の参入は、2次元対称構造の検出に影響を与えないと推察される。

一方、条件1における正答率および条件2(3D対称 vs 2D対称パターン)の識別)における反応時間および d' から、少なくとも視差ステップサイズ4' ほどの3段階のパターンにおいては、人間の視覚系はある程度容易に3次元対称構造を検出することが可能であることがわかる。条件2の平均反応時間は約1000 ms から2000 msの間にあり、これは、個人差の問題はあるものの、並列的処理が行われると考えられる3次元空間内の視覚的探索課題の反応時間とほぼ等しい(Nakayama & Silverman, 1986)。従って、この3次元対称構造の検出能力は、低いとは言えないであろう。

但し、この3次元対称構造の検出は、2次元対称構造の検出(条件4、およびBarlow & Reeves(1979))よりも難しいことが示唆された。このような検出能力の違いは、3次元対称構造に関する処理が、2次元対称構造に関する処理よりも、より高次の過程で行われていることに起因するのかもしれない。3次元対称構造の知覚は、本実験では両眼視差情報をもとになっており、両眼立体視成立以前には形成されない。従って、本実験の結果は、2次元対称構造表現の形成は、両眼情報の統合以前に行われているという主張(Locher & Nodine, 1989; Locher & Wagemans, 1993)を、間接的に支持していると言えよう。

次に、3次元対称構造に対する視覚系の検出システムの特性をより詳細に検討するために、実験2を行った。

実 験 2

目 的

実験1の結果、人間の視覚系が、3次元対称構造をある程度容易に検出できることが示唆された。これを受けて、実験2では、3次元対称構造の検出とノイズとの関係を検討する。ここで用いられる方法は、前述のBarlow & Reeves(1979)が2次元対称構造の検出システムの特性の検討に用いたものを、3次元対称構造に応用したものである。

Barlow & Reeves(1979)は、ランダムドット鏡映パターンを用いて、視覚系の、2次元対称構造の検出とノイズとの関係を検討した。彼らは、ノイズ(非対称パターン要素)の含まれる比率が異なる2種類の刺激の識別実験(例 20% vs 40%線対称)を行い、ノイズ混在率10%ごとの d' の値を算出した。その結果、2

Figure 2. Results of Experiment 1: (a) the reaction time and (b) the discriminability index (d') obtained in each condition for two subjects (AI and RY).

次元対称構造の検出の程度とSN比との関係は、U字型の傾向はあるものの、かなり線形に近いことが示された。

本研究における実験2では、2次元投影面(額面平行面)上では対称な刺激のみを用いて、Barlow & Reeves(1979)の方法を3次元に拡張することにより、3次元対称構造の検出とSN比との関係を含め、3次元対称構造の検出システムの特性を検討する。

なお、実験2では、視覚系の、3次元対称構造の検出能力を検討するために、刺激の提示時間を一定(1秒間)にした。この1秒間という提示時間が適切なものか否かは現在のところ定かではなく、ここで得られた d' の値が、3次元対称構造に対する視覚系の絶対的な感度を測定していると考えすることはできない。しかし、3次元空間内でのドット間の距離判定の研究(Harris & Morgan, 1993)でも提示時間は1秒間とされたこと、また、並列的処理が行われると考えられる3次元空間内の視覚的探索課題の反応時間が1000 msから1800 msほどである(Nakayama & Silverman, 1986)ことを考えても、1秒という提示時間は、個々の刺激パターンについて詳細に吟味することが可能なほど長くはないと思われる。よって、刺激提示時間を1秒間として得られる実験2の d' の値から、3次元対称構造に対する視覚系の検出能力について、ある程度の推測は可能と考える。実験2では、この d' と反応時間を併せて、3次元対称構造の検出システムの特性を検討する。

方 法

被験者 筆者を含む4名。筆者以外の2名は、実験の目的について知らされていない。全員、観察距離において、正常な視力(矯正も含む)、および正常な立体視能力を有する。

装置 実験1と同じ装置を用いた。

提示刺激 実験1と同様、10対のドットがモニター上に提示された。但し、背景の輝度は4 cd/m²、ドットの輝度は17 cd/m²である。すなわち、実験2では、実験1と異なり、暗背景上に明ドットが配置された。実験1と輝度を変えたのは、トータルの観察時間が長時間に及ぶため、全体の輝度を落として被験者の負担を軽減するためである。ドットは、実験1と同様、36×36のグリッドのいずれかを占めるように配置された。また、実験1では、ドットは三つの奥行き平面のいずれかに配置されたが、実験2では、五つの奥行き平面(両眼視差-4', -2', 0', +2', +4')のいずれかに配置された。

提示される刺激パターンは、2次元投影面上では、すべて垂直軸に関し対称なパターンであった。矢状平

面に関しどの程度対称であるかによって、0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%の6種類に分類された。0%パターンとは、奥行きに関し、すべてのドットが非対称なパターン。20%パターンとは、矢状平面に関し、20%のドット、すなわち2組のドットは対称であり、80%のドットは非対称なパターン。以下、同様に矢状平面に関して対称なドットの割合によって、40%, 60%, 80%, 100%パターンと呼ぶ。従って、0%と100%パターン以外は、ノイズ(ここでは矢状平面に関し非対称なドット対)中に信号(ここでは対称なドット対)が混在することになる。

課題 組み合わせされた二つの刺激パターン(例 0% vs 40%)を識別した。

手続き 上記6種のパターンから2種を組み合わせた九つの実験条件(0% vs 40%, 0% vs 60%, 0% vs 80%, 0% vs 100%, 20% vs 100%, 40% vs 100%, 60% vs 100%, 20% vs 60%, 40% vs 80%)において、それぞれ100試行の識別課題を行った。反応は、キー押しによって行われた。モニター上には、はじめに注視点(視角5'×5')が提示され(500 ms)、500 msのブランクの後、刺激が1秒間提示された。反応後5秒経つと、次の系列に移る。実験1と同様、反応の正誤はビーブ音によってフィードバックされ、反応の正誤および反応時間は、コンピュータによって記録された。九つの実験条件は、被験者ごとにランダム順に課せられた。

各被験者は、相当数の練習後、実験セッションに参加した。実験は、被験者一名につき約3時間、3回のセッションに分割して行われた。

結 果

各被験者のデータから得られた d' ならびに平均反応時間を各条件ごとにまとめたものが、Figure 3および、Figure 4である。Figure 3は、完全3D対称パターン(100%)あるいは完全ノイズパターン(0%)と、ノイズ中に対称構造が混在するパターンとの識別を行う実験条件のデータを、Figure 4は、ノイズの混在の度合いが40%異なる実験条件のデータをまとめた図である。

Figure 3では、0% vs 100%の実験条件のデータを中心として、3次元対称性の差が20%ずつ減じるように、実験条件のデータを左右に配置した。図からも明らかのように、0% vs 100%条件で、大きな d' が得られ($d'=3.53$)、また、反応時間も短かった(891 ms)。先に述べたように、この d' の値は、提示時間1秒、視差ステップサイズ2'という条件のもとでの視覚系の3次元対称構造に対する検出能力をある程度反映していると考えられる。また、Figure 3より、含

まれる信号の量(ここでは, 3次元対称性の度合い)の差が大きいほど, 識別が向上することもうかがえる。

ところで, 信号量の差が同じでも, 識別する相手が0%パターンと100%パターンとでは, 3次元対称構造の識別は異なるであろうか。 d' (Figure 3-a)についての分散分析の結果は, 含まれる信号の量の差は同じ(例えば, 0% vs 80%条件と20% vs 100%条件では, 比較する相手とはともに80%の信号量の差がある)であるにもかかわらず, 完全3D対称パターン(100%)とノイズ中に対称対が混在するパターンとの識別(20% vs 100%, 40% vs 100%, 60% vs 100%)の方が完全ノイズパターン(0%)とノイズ中に対称対が混在するパターンとの識別(0% vs 80%, 0% vs 60%, 0% vs 40%)より, d' が大きいことを示している ($F(1, 3) = 25.84, p < .05$)。 反応時間(Figure 3-b)については, 分散分析では有意な結果は得られなかったが, 図を見ると, 同様な傾向が読みとれる。 また, d' についての分散分析の結果, 含まれる信号量の効果につい

ても有意な差が見られた ($F(2, 6) = 13.02, p < .01$)。 テューキー法による多重検定の結果, 各信号量の間に有意な差があることが認められた ($p < .01$)。

次に, ノイズの混在の程度に応じた識別の度合いの変化を見る。 Figure 4で, どの条件で得られたデータも, 同程度の d' および反応時間を示したならば, ノイズの混在の変化に応じて識別の度合いが線形に変化すると言えるが, 実際は異なった。 d' (Figure 4-a)について分散分析を行ったところ, 条件の効果が有意であったため ($F(3, 9) = 3.21, p < .05$)。 テューキー法による多重検定を行った。 その結果, 60% vs 100%条件は他の3条件よりも d' が高く, また0% vs 40%条件は20% vs 60%条件よりも高かった ($p < .01$)。 反応時間についての分散分析では, 有意な差は得られなかったが, Figure 4-bを見ると, 同様の傾向があることがうかがえる。 これらの結果から, 60% vs 100%の実験条件での識別の度合いが他よりも高く, 次に, 0% vs 40%条件での識別となるようである。

考 察

上記の結果より, 人間の視覚系は, 3次元対称構造の検出をある程度容易に行うことができることが確かめられた。 実験2の0% vs 100%条件から得られた d' の値と実験1の条件2(3D対称 vs 2D対称)から得られた d' の値が同程度 ($d' = 3-3.5$) であることも意味深い。 この値は, 刺激が1秒以上提示されるとき, 反応時間を求めるという制約のもとでは, 視覚系の3次元対称構造に対する, ある程度普遍的な検出能力を示しているとも考えられる。

更に, 視覚系による, 3次元対称構造の検出の度合いは, 2次元対称構造の検出の度合い(Barlow & Reeves, 1979)と同様, ノイズの減少に伴って, 悉無的にではなく, 連続的に上昇することが示唆された。 Barlow & Reeves(1979)は, 2次元対称構造の脳内表現が連続的なものである可能性を示唆した。 本研究においては, 信号量の等しい条件間の比較(Figure 4 および d' についての分散分析の結果)より, 3次元対称構造に関する限りは, 少なくともこの“連続的”は, 線形ではないことがうかがえる。

しかしながら, Figure 3, Figure 4のような結果が生じたのは, 被験者の用いた方略が影響した可能性もある。 完全3D対称パターン(100%)あるいは完全ノイズパターン(0%)とノイズ混在パターンとを識別するには, ノイズ, あるいは対称対を一つだけ検出すればよい。 しかし, ノイズ混在パターン間の識別の際には, このような方略をとることができず, 純粋に, 3次元対称性に関する脳内表現間の比較が必要であろう。 被験者が, 上記のような方略を用いていたとする

Figure 3. Results of Experiment 2: (a) the discriminability index (d') and (b) the reaction time obtained in each condition. See text for details of the condition.

Figure 4. Results of Experiment 2: (a) the discriminability index (d') and (b) the reaction time obtained in four conditions of 40% difference in the SN ratio.

ならば、SN比に応じて3次元対称性の脳内表現がどのように変化するかについて、より詳しい検討が必要であろう。

一方、Figure 3および d' についての分散分析の結果に見られるように、同じ信号量の差ならば、完全3D対称パターンとの識別の方が、完全ノイズパターンとの識別より優れていることがわかった。これは、視覚系が、対称構造の中にわずかなノイズを検出する方が、ノイズの中にわずかな対称構造を検出するよりも優れていることを意味しており、このことは、完全3D対称構造の知覚像の頑健性(robustness)、すなわち、完全3D対称に関し、脳内に強固な表現が存在することを示唆しているのではなかろうか。

同様のことは、2次元平面の対称構造に関しても言える。Barlow & Reeves (1979)の実験においても、分析は行われていないが、2次元ランダムパターンとノイズの混在する不完全2次元対称パターンとの識別よりも、完全2次元対称と不完全2次元対称パターンとの識別の方が、 d' が高い傾向があることが読みとれる。

全体的考察

実験1、実験2より導かれることは、以下にまとめられる。

1. 人間の知覚系は、3次元対称構造(矢状平面に対する左右対称)をある程度検出できると推測される。
2. しかしながら、3次元対称構造の検出は、2次元対称構造の検出に比べ、やや難しい。
3. 両眼視差による奥行き情報は、2次元対称構造の検出には影響しない可能性が高い。
4. 3次元対称構造の検出の度合いは、ノイズの減少に伴って、連続的に変化するが、その変化は線形的ではない。
5. ノイズの混在するパターンとの識別は、完全ノイズよりも完全3D対称の方が容易である。

人間の視覚系は、3次元対称構造よりも2次元対称構造に対しやや高い検出感度を備え、しかも両眼視差による奥行き情報が2次元対称構造の検出には影響しないと考えられる。このことは、2次元対称構造の検出が、視覚処理のかなり早い段階で行われているというこれまでの研究(Locher & Nodine, 1989; Locher & Wagemans, 1993)と共通性を有する。視覚情報処理の初期段階では、各モジュールごとに個別に処理が行われていると考えられている(Marr, 1982; Wagemans, 1988)。従って、Locher & Smets (1992)も述べているとおり、両眼視差情報が2次元対称構造とは独立に処理されている可能性は高い。

Locher & Wagemans (1993)は、2次元対称構造は、

前注意的に、フル・プライマル、スケッチを構築する群化過程と同様の過程によってコード化されると示唆している。おそらく、2次元対称構造の脳内表現は、両眼視差情報が統合される以前に、上記のような粗い表現素から形成されるのではなかろうか。

では、3次元対称構造の脳内表現は、どのように形成されるのであろうか。

Pettigrew (1990)は、両眼視差の基本的役割は、奥行きの判断よりもむしろ、不連続な視差勾配から得られるエッジの検出である(Julesz, 1971)という説を強調し、単眼情報と両眼視差情報の統合が、形態知覚処理以前に行われることを主張している。もし、単眼情報である2次元対称構造と両眼視差情報が統合してから形態知覚が行われるならば、両眼視差情報は、偽2次元対称構造の除去の役割を担っているのであろう。

偽2次元対称構造、すなわち、2次元投影面では対称だが、3次元的には対称ではないパターンは、実際の3次元世界には無数に存在する。これを除去して、効率のよい強固な完全3D対称構造表現を脳内に構築していくのに、両眼視差情報が有効に活用される可能性がある。

一方、これは観察者中心(viewer center)の、いわゆる $2 \cdot 1/2$ D知覚の世界であるが、オブジェクト中心(object center)の3D知覚においてはどうかであろうか。例えば、顔を斜めから観察したときには、観察者中心の座標系では2次元的にも3次元的にも対称ではない。しかし、オブジェクト中心の座標系では、対称なパターンとなる。このような脳内表現がどのように構築されるかに関しては、これからの課題であろう。

引用文献

- Barlow, H. B., & Reeves, B. C. 1979 The versatility and absolute efficiency of detecting mirror symmetry in random dot displays. *Vision Research*, **19**, 783-793.
- Corballis, M. C., & Roldan, C. E. 1975 Detection of symmetry as function of angular orientation. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **1**, 211-230.
- Davi, M., Doyle, M. A. T., & Proffitt, D. R. 1992 The role of symmetry in determining perceived centers within shapes. *Perception & Psychophysics*, **52**, 151-160.
- Egan, J. P. 1975 *Signal detection theory and ROC analysis*. New York, Academic Press.
- Harris, J. M., & Morgan, M. J. 1993 Stereo and motion disparities interfere with positional averaging. *Vision Research*, **33**, 309-312.
- Jenkins, B. 1983 Component processes in the per-

- ception of bilaterally symmetric dot texture. *Perception & Psychophysics*, **34**, 433-440.
- Julesz, B. 1971 *The foundations of cyclopean perception*. Chicago IL: University of Chicago Press.
- Locher, P. J., & Nodine, C. F. 1973 Influence of stimulus symmetry on visual scanning patterns. *Perception & Psychophysics*, **13**, 408-412.
- Locher, P. J., & Nodine, C. F. 1989 The perceptual value of symmetry. *Computers & Mathematics with Applications*, **17**, 475-484.
- Locher, P. J., & Smets, G. 1992 The influence of stimulus dimensionality and viewing orientation on detection of symmetry in dot patterns. *Bulletin of Psychonomic Society*, **30**, 43-46.
- Locher, P. J., & Wagemans, J. P. 1993 Effects of element type and spatial grouping on symmetry detection. *Perception*, **22**, 565-587.
- Marr, D. 1982 *Vision*. San Francisco, CA: W. H. Freeman.
- Nakayama, K., & Silverman, G. H. 1986 Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. *Nature*, **320**, 264-265.
- Palmer, S. E. 1985 The role of symmetry in shape perception. *Acta Psychologica*, **59**, 67-90.
- Palmer, S. E., & Hemenway, K. 1978 Orientation and symmetry: Effects of multiple, rotational, and near symmetries. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, **4**, 691-702.
- Pettigrew, J. D. 1990 Is there a single, most-efficient algorithm for stereopsis? In C. Blakemore (Ed.), *Vision: Coding and efficiency*. Cambridge, UK: Cambridge University Press. Pp. 283-290.
- Quinlan, P. T. 1991 Differing approaches to two-dimensional shape recognition. *Psychological Bulletin*, **109**, 224-241.
- Wagemans, J. P. 1988 Modules in vision: A case study of interdisciplinarity in cognitive science. *Acta Psychologica*, **67**, 59-93.
- Wagemans, J. P., Van Gool, L., & d'Ydewalle, G. 1990 Visual search in dot-patterns with bilateral and skewed symmetry. In D. Brogan (Ed.), *Visual search*. London UK: Taylor & Francis. Pp. 99-114.

——1994. 3. 14 受稿, 1994. 7. 2 受理——