

心理学における 3 次元視研究の動向 —2001—

The Trends in the Research of 3-Dimensional Perception in 2001

林 部 敬 吉
Keikichi HAYASHIBE

抄録：視覚心理学における 3 次元視研究の動向を運動要因による 3 次元視，両眼立体視，絵画的要因による 3 次元視，視空間構造，その他の 3 次元視に分類して報告した。とくに，両眼立体視の研究領域での対応問題，立体視処理における持続系と過渡系の役割，背反する輝度対応での立体視問題などの研究で着実な進展がみられている。

Abstract: The papers of 3-dimensional visual perception in 2001 were reviewed in the fields of depth from motion cue, stereoscopic vision, pictorial cues and virtual reality. There was the steady progress of the research in the regions of the correspondense problem, the physiological role of sustained and transient pathway, and anti-correlated stereogram problem in stereoscopic vision.

序. はじめに

本報告には，3 次元知覚に関連した論文を，Psychological Abstract 誌の 2000 年版と 2001 年版から抽出し，3 次元視研究の各領域に分類して紹介する。

1. 運動要因による 3 次元視

1.1. 運動視差のための空間周波数チャンネル

運動視差のための空間周波数チャンネルの選択特性がどのようなものかが，マスク刺激法を用いて，Hogervorst et al⁽⁸⁾ によってしらべられた。方法は，図 1 に示されたように，観察者の頭部運動と連動させて提示すると，サイン波状の凹凸が出現するシグナル刺激条件，およびこれにノイズ刺激を加算したノイズ・シグナル加算条件とを設定し，ノイズとノイズ間の距離（ノイズギャップ）を変化させた時，どこでサイン波状の凹凸知覚が崩れるか，その閾値を測定した。空間周波数は，0.33, 0.87c/d の 2 条件であ

る。実験の結果，閾値はノイズギャップが小さくなるに伴い直線的に増大することが示され，また 0.33, 0.87c/d の 2 種類の空間周波数のそれぞれで，ノイズ効果が消失する帯域幅は 1.4 オクターブであることが示された。運動視差は狭い

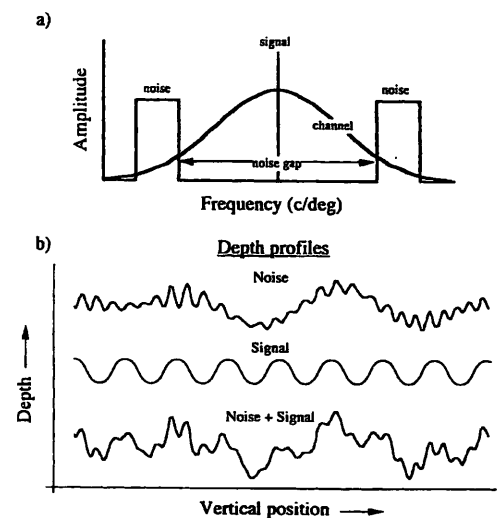


図 1

観察者の頭部運動と連動させて提示すると，サイン波状の凹凸が出現するシグナル刺激条件，およびこれにノイズ刺激を加算したノイズ・シグナル加算条件。ノイズ量はノイズとノイズ間の距離（ノイズギャップ）で操作する（Hogervorst, M. A, et al 2000）。

帯域幅を持つ複数のチャンネルで伝達されていて、これは両眼視差のそれと一致している。

1.2. 運動視差と両眼視差の課題依存型ストラトジー

従来、運動視差、両眼視差、パースペクティブ要因など奥行きがかりが豊富になるほど、絶対的あるいは相対的奥行き距離知覚は正確になると考えられている。Bradshaw et al⁽³⁾は、知覚される奥行き距離の正確さは、奥行きがかりの種類に依存するのではなく、相対的奥行き距離に関わる課題に依存するのではないかと考えた。そこで、相対的奥行き距離課題として、(1)ある等しい奥行き距離に設定された2つのターゲットの中央にテストターゲットを配置し、テストターゲットを奥行き方向に移動させ、3つのターゲットが前額に平行になる位置を求める課題、(2)3つのターゲットが観察者から見て三角形を形成するように配置し、別に同様な3つのターゲットを用意し、頂点の一つを移動させて同一の三角形になるように調整させる課題、(3)3つのターゲットが観察者から見て三角形を形成するように配置し、前額に平行に配置した底辺の距離と三角形の高さが等しくなるように、頂点に当たるひとつのターゲットを移動させる課題がそれぞれ設定された。奥行きがかり条件は、頭部運動を伴う単眼視条件、頭部運動を伴わない両眼視条件、頭部運動を伴う両眼視条件である。実験の結果、奥行きがかり条件による差は出現せず、課題の種類による差が生じた。このことから、視覚システムは課題ごとにそのストラトジーを変えていると考えられる。

1.3. テクスチャ要因と運動視差要因間の手がかり優位性

テクスチャ要因と運動視差要因間の手がかり優位性については、これまで、運動視差要因が優位であるとされてきた(Braunstein 1968, Young et al 1993)。O'Brien & Johnston⁽¹⁴⁾は、図2に示されたような水平、垂直、格子状の3種類のサイ

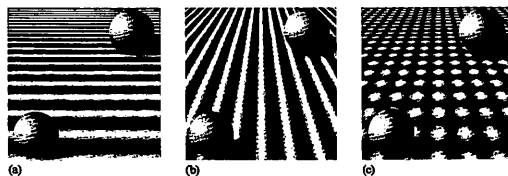


図2 テクスチャ要因と運動視差要因の奥行きがかり優位性。

水平、垂直、格子状の3種類のサイン波形の空間周波数パターンで奥行き傾斜面が作成された。ただし、球は実験場面では提示されない(O'Brien, J. & Johnston, A. 2000)。

ン波形の空間周波数パターンを使用して、テクスチャによる奥行きと運動視差による奥行きを作成し、どちらの要因が奥行き傾斜面の知覚に対して手がかり優位性があるかをしらべた。実験は、基準となる奥行き傾斜面(45°)を提示し、次にテスト傾斜面を提示し、どちらが傾斜して知覚されるかを求める「継時的恒常法」で行われた。その結果、視えの奥行き傾斜面は、テクスチャ要因によって優位に規定されていることが示された。Braunsteinらの結果とこの結果との不一致は、テクスチャパターンの相違に求められている。O'Brienらの実験では、テクスチャとしてレイトレースされたパターンが使用されているので、大きさや密度勾配が奥行き傾斜について一定であるため、奥行き効果が大きいと考えられる。

1.4. 運動立体視(kinetic depth)による奥行きキャプチャ(depth capture)

運動立体視と両眼立体視(stereopsis)は、共通の現象や特性をもつ。たとえば、神経生理学的領域では、霊長類の視覚領は、両眼視差と運動方向に特異的に反応するニューロンが存在することが報告されている(Mauunsell & Van Essen 1983, Bradley et al 1995, DeAngelis et al 1998)。視覚心理学的領域では、運動立体視、両眼立体視ともに、明瞭な運動立体要因や両眼視差要因が存在しないのに、内挿によって立体や奥行きが知覚される(Saidpour et al 1992)。Kham & Blake⁽¹⁰⁾は、ステレオキャプチャ(両眼視差が存在しない領域が両眼視差のある領域に囲まると、そ

の部分)が視差領域に捉えられて立体的に知覚される現象)と同様な現象が運動立体視でも生じることを図のような刺激条件で明らかにした。図3(a)と(b)の左図では、中央の円筒形が運動立体視によって3次元的に知覚され、中央の水平の帯も円筒の湾曲面にまきついて湾曲して見える。図(a)と(b)の右図では、帯が垂直に配置されているためにキャプチャは生じない。これらの観察結果から、運動立体視と両眼立体視は、ともに共通のメカニズムを持つことが確認される。

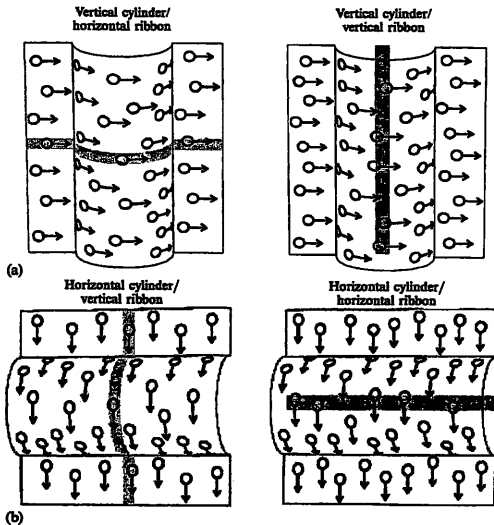


図 3

図(a)と(b)の左図では、中央の円筒形が運動立体視によって3次元的に知覚されるため中央の水平の帯も円筒の湾曲面にまきついて湾曲して見える。図(a)と(b)の右図では、帯が垂直に配置されているために立体キャプチャは生じない(Kham,K. & Blake R. 2000)

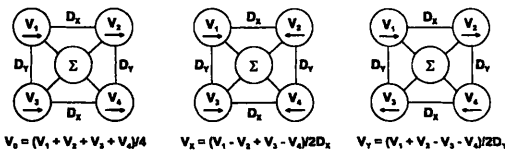


図 4 運動からの立体視を可能にする3種類の運動図式。

V_1 から V_4 までの局所的な個々の速度から V_0 (トランスレーションの平均), V_x (水平方向の速度勾配), V_y (垂直方向の速度勾配)を算出(Todd,J.T. & Perotti,V. 1999)。

1.5. オプティカル・モーションによる対象の面の奥行についての知覚

3次元空間における前額に平行な表面は、次の式で表すことができる。

$$Z(x,y) = Z_0 + x \sin \tau \tan \sigma + y \cos \tau \tan \sigma$$

(ここで、 σ (slant) は視線と前額平行面との間の角度, τ (tilt) は前額平行面の垂直軸からの逸脱角度, Z_0 は対象表面からイメージ化された面までの視線上の奥行距離をそれぞれ示す)

上式は、対象の表面上のすべての点のイメージ化された面についての奥行 (Z) が、水平方向の位置と垂直方向の位置の簡単な関数式で表すことができることを示している。Ullman (1977) は、もし、正射影条件下で前額に平行な面が垂直軸を中心として回転するとき、対象のイメージ面上のすべての点の速度 (V) は、次の式で与えられることを示した。

$$V(x,y) = \omega(Z_0 + x \sin \tau \tan \sigma + y \cos \tau \tan \sigma)$$

(ここで、 ω は3次元空間内の角速度を示す)

上式から X 軸方向、あるいは Y 軸方向のイメージ上の各点の速度は、

$$V_x = \omega \sin \tau \tan \sigma, \quad V_y = \omega \cos \tau \tan \sigma$$

で表される。これを変形すると、

$$\tan \tau = V_x / V_y, \quad \tan \sigma = \sqrt{(V_x^2 + V_y^2)} / \omega$$

が得られる。この式によれば、tilt (τ) は2種類の速度勾配から確定できるが、slant (σ) は、角速度勾配 (ω) が不明なので確定できない。これを確定する一つの方法は、図4に示されたように、 V_1 から V_4 までの局所的な個々の速度から V_0 (運動速度の平均), V_x (水平方向の速度勾配), V_y (垂直方向の速度勾配)を算出すれば、tilt (τ) は一義的に決まり、また slant (σ) がある既定値をとると仮定すれば、 $\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}$ に比例して増大すると予測される。

Todd & Perotti (23) は、図5のようなパターンで V_1 から V_4 の部分の速度を変化して楔形状を提示し、その tilt と slant の角度を測定した。その結果、tilt は正確に知覚判断されたが、slant の知覚判断には大きな誤差が生じることが示されている。

2. 両眼立体視

2.1. 対応する要素が存在しない領域の 両眼対応問題と立体出現

ステレオグラムの左右の対応する領域を構成する刺激要素の輝度が反対である場合には、両眼立体視における対応が原理的には存在しないのに、立体印象が生じることが報告されている (Nakayama & Shimojo 1990, Anderson 1994, Liu, et al 1994). この問題は、実際の世界では、対象は遮蔽されて隠されることが多いので、この部分が両眼間で対応しない領域となり、しかもこの部分は対象間の奥行関係を規定する手がかりなると考えられている。これに対して、Tsai & Victor⁽²⁴⁾ は、図6に示されたように、観察者と対象との間に遮蔽物があり、その遮蔽物を通して対象を観察する場合、遮蔽物が両眼のこめかみ側の視野を隠すので、左右眼には全く異なった網膜像が投影されることが幾何光学的には生起する。この場合、遮蔽物に注視点があれば、遠くの対象の左右の網膜への投影点は左右で対応する (a と a' , b と b')。 a , b (a' , b') のなす角度は遮蔽物の水平方向の間隔距離に等しくなるので、この全く対応を持たない領域と遮蔽物との間の相対的奥行距離は遮蔽物の水平方向の間隔距離に拘束されることになる。この仮説を検証するために、図7に示されたステレオグラムが考案された。このステレオグラムの周辺領域は額縁のような遮蔽物を構成し、それを通して小さなタイルを張り付けた面が設定されているが、この個々のタイルの輝度は左右のステレオグラムで背反 (anti-correlated) している。これを両眼立体視すると、対応を持たない領域が遮蔽物より手前に浮き出て見える。この種の立体視は、水平両眼視差でも、また生態光学的な遮蔽効果でも説明ができない新しい現象の発見と考えられる。



図5 運動からの立体復元に使用された運動パターン。(Todd, J.T. & Perotti, V. 1999).

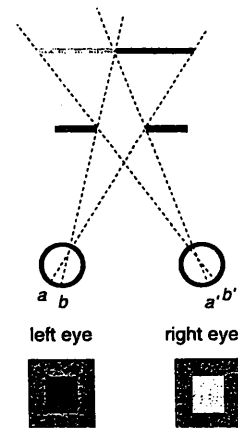


図6 左右のステレオグラムで対応が存在しない事態が生じる幾何光学的条件。

観察者と対象との間に遮蔽物があり、その遮蔽物を通して対象を観察する場合、遮蔽物が両眼のこめかみ側の視野を隠すので、左右眼には全く異なった網膜像が投影されることが幾何光学的には生起する (Tsai, J.J. & Victor, J.D. 2000)。

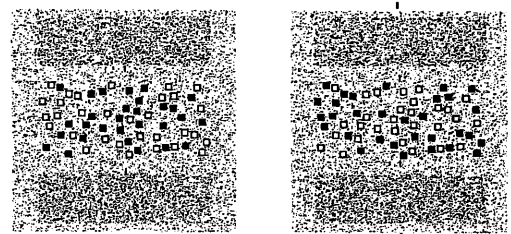


図7 左右領域で対応をもたないステレオグラム。このステレオグラムの周辺領域は額縁のような遮蔽物を構成し、それを通して小さなタイルを張り付けた面が設定されているが、この個々のタイルの輝度は左右のステレオグラムで反対 (anti-correlated) となっている (Tsai, J.J. & Victor, J.D. 2000)。

2.2. ガボールパターンステレオグラムの対応問題

1次元のガボールパターンから構成されたステレオグラムの対応問題が, Prince & Eagle⁽¹⁸⁾によって詳しくしらべられた. 使用されたステレオグラムは, 図8にあるような1次元のガボールプロフィールから構成され, そのコントラスト・エンベロープの大きさ(σ)が変えられた. 実験では, 同量の両眼視差をもつが, その奥行出現方向はそれぞれ反対を示す(交差視差または非交差視差)2種類のステレオグラムを提示し, その正答率を求めた. 実験の結果, (1)コントラスト・エンベロープの大きさが大きいときには($\sigma=2.0\text{deg}$), 奥行方向の正答率は両眼視差量(phase disparity)が 45° , 90° , 135° と 405° , 450° , 495° で高く, 225° , 270° , 315° と 585° , 630° , 675° で低く, このように正答率と両眼視差量とは循環的に変化すること, (2)コントラスト・エンベロープの大きさが小さいときには($\sigma=0.49\text{deg}$), 奥行方向の正答率は両眼視差量に関係なく高いこと, (3)コントラスト・エンベロープの大きさが中程度のときには($\sigma=0.98\text{deg}$), 奥行方向の正答率は両眼視差量(315° 以下)が小さいときには循環的に変化し, これより視差量が大きいときには正答率は常に高いこと, (4)奥行方向の正答率は, 両眼視差量が $0-180^\circ$, $360-540^\circ$, $720-900^\circ$ の範囲では常に正しく, これ以外の視差範囲で, しかもコントラスト・エンベロープが大きいときには, 悪くなること, などが示された. 奥行方向の正答率が高いということは, 左右ステレオグラムの対応が正しく行われることを意味するので, 対応問題には両眼視差量とコントラスト・エンベロープの大きさとが相互に影響していることを示す.

2.3. パーナムの半端なステレオグラム問題 (limiting case)

パーナムの半端なステレオグラム問題(limiting case)とは, 図9のように片眼のステレオグラムには2本の線分, 他眼のそれには1本の線分か

ら構成されたもので, 両眼立体視すると2本の線分が奥行位置を異にして見える. この現象を説明する仮説として, 二重融合仮説とカモフラージュ仮説(Howard & Ohmi 1992)がある. 二重融合仮説(図a)とカモフラージュ仮説(図b)とは, 片眼の1本の線分が他眼の2本の線分の両方と融合する点では一致しているが, 二重融合仮説では対応点をもたなくても擬似的に融合する線分は鼻側と仮定するのに対して, カ

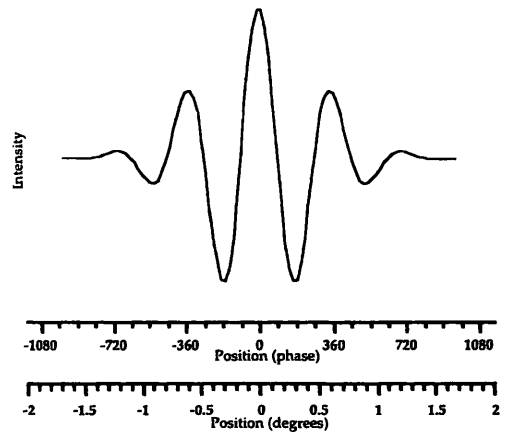


図8 1次元のガボールプロフィール.

ステレオグラムでは, 両眼視差は phase disparity で操作され, またコントラスト・エンベロープの大きさ(σ)が変えられた(Prince, S.J.D. & Wagle, R.A. 2000).

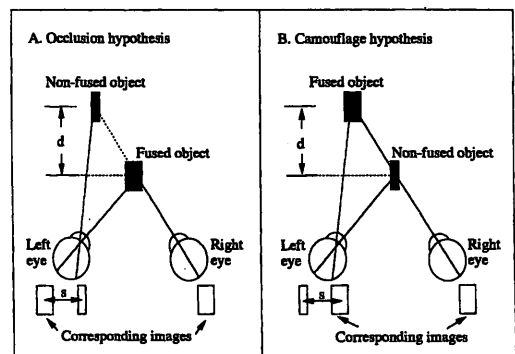


図9 二重融合仮説(図a)とカモフラージュ仮説(図b).

両仮説とも片眼の1本の線分が他眼の2本の線分の両方と融合する点では一致しているが, 二重融合仮説では対応点をもたなくても擬似的に融合する線分は鼻側と仮定するのに対して, カモフラージュ仮説ではそれをこめかみ側と仮定する(Shimono et al 1999).

モフラージュ仮説ではそれをこめかみ側と仮定する。したがって、図9にも明示されているように、二重融合仮説では擬似的融合線分は、対応点をもつ融合線分の背後に定位されると仮定するが、カモフラージュ仮説ではそれを手前に定位されると仮定する。また、どちらの仮説も片眼の2本線分のステレオグラムの線分間の間隔距離に比例して融合線分と擬似的融合線分との見えの奥行距離が増大することを予測する。Shimono, Tam & Nakamizo⁽²⁰⁾ は、2つの仮説のいずれが正しいかを、疑似的融合線分と融合線分との奥行関係、2本線分のステレオグラムの線分間距離と奥行距離量との関係を検討した結果、二重仮説条件では融合線分は擬似的融合線分の手前に、カモフラージュ仮説では融合線分と擬似的融合線分とは同一の奥行距離に定位されて知覚されること、また2本線分のステレオグラムの線分間距離が増大しても融合線分と擬似的融合線分との奥行量は変化しないことが示

された。この結果は、二重融合仮説では融合線分と擬似的融合線分の奥行定位関係は支持するが、2本線分のステレオグラムの線分間隔距離と奥行量との関係は支持せず、またカモフラージュ仮説では融合線分と擬似的融合線分の奥行定位関係、並びに2本線分のステレオグラムの線分間隔距離と奥行量との関係の両方を支持していない。そこで、Shimono 達は、新たな仮説を提示し検証した。それによれば、片眼の2本の線分のいずれかは他眼の1本の線分と融合して定位されるが、他方の線分は対応線分をもたず擬似的融合しない。そして融合線分は刺激面に定位されて知覚されるが、非融合線分は輻輳面に定位されると仮定する(図10参照)。この「誤った輻輳による奥行定位説」を実験的に検証するために、両眼視差は融合線分(視差はゼロ)と実際の輻輳面との間にくるように操作し、融合線分と他の非融合線分との奥行位置関係、および輻輳誘導に伴う両眼視差と融合線分-非融合線分との間の奥行定位量を二重融合仮説条件とカモフラージュ仮説条件布置のステレオグラムでそれぞれ測定した。その結果、二重融合仮説条件とカモフラージュ仮説条件のステレオグラムとも、融合線分と非融合線分の見えの奥行位置関係、および片眼の2本線分のステレオグラムの線分間距離と奥行量との関係は、予測された通りの結果を示した。このことから、パーナムの半端なステレオグラム問題には、ステレオグラムの刺激布置、片眼の2本線分のステレオグラムの線分間距離に加えて、輻輳に誘導された両眼視差要因がともに関係していることが明らかにされ、この新たな仮説が支持されている。

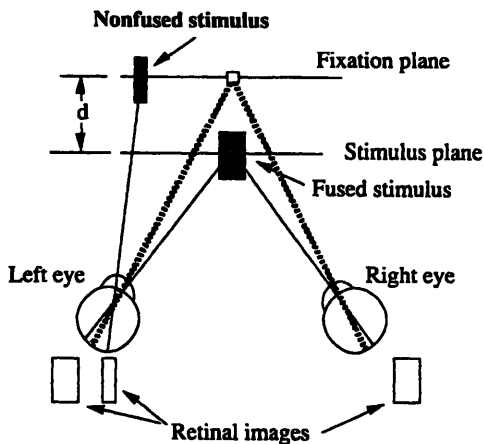


図10 パーナムの半端ステレオグラム問題についての新たな仮説。

片眼の2本の線分のいずれかは他眼の1本の線分と融合して定位されるが、他方の線分は対応線分をもたず擬似的にも融合しない。融合線分は刺激面に定位されて知覚されるが、非融合線分は輻輳面に定位されると仮定し、また融合線分と非融合線分との間の奥行定位量は輻輳に誘導された両眼視差量(融合線分と輻輳面との間の視差量)とともに増減すると予測する(Shimono et al 1999)。

2.4. 左右網膜上での対応する位置に投影された対象の見え方

Wheatstone (1838) の古典的論文には、左右の網膜上での非対応な位置に投影された対象は両眼融合され、あるひとつの奥行位置に定位して見えること、また左右の網膜上での対応する位置に投影された対象は相異なる奥行位置に定位

されて見えることを定式化した。Ono et al⁽¹⁵⁾は、とくに左右網膜で対応する部分が相異なる位置に定位して知覚されることを検証するために、図11の上図ようなRDSを作成した。このステレオグラムでは、垂直な破線で表示した対象が、左右の網膜上で対応する。図の下図は、このステレオグラムの2つの可能な見え方を示す。下図の左は網膜上で対応する部分が2つの相異なる位置(方向)に見えるWheatstoneの定式にそった知覚的解決を示し、右はどちらかの網膜上の対象の方向が全体の見えの方向を優位に規定するという考え方にそった知覚的解決を示す。観察の結果、Wheatstoneの定式にそった見えが生じることが確認された。

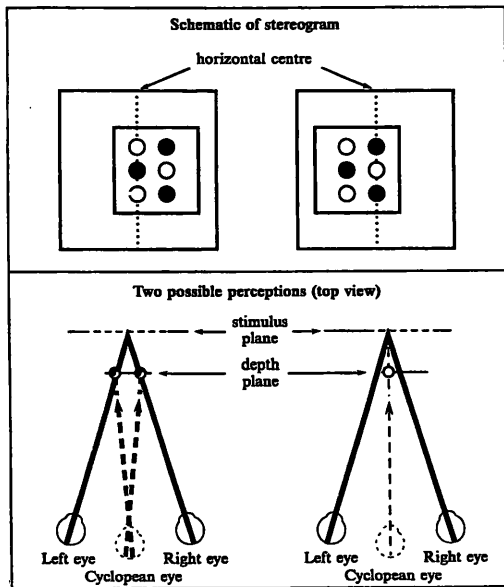


図11

上図: このステレオグラムでは、垂直な破線で表示した対象が、左右の網膜上で対応する位置に投影される(実際はランダム・ドット・ステレオグラムである)。下図: このステレオグラムの2つの可能な見え方を示す。下図の左は網膜上で対応する部分が2つの相異なる位置(方向)に見えるWheatstoneの定式にそった知覚的解決を示し、右はどちらかの網膜上の対象の方向が全体の見えの方向を優位に規定するという考え方にそった知覚的解決を示す(Ono, et al 2000)

2.5. 対極コントラストで作成されたステレオグラムの立体視

片眼用のステレオグラムが黒色、他眼のそれが白色で作成されたステレオグラム(対極コントラストのステレオグラム)を両眼立体視すると、それがフィギュラルステレオグラムの場合には立体視が成立するが、RDSでは立体視は成立しないことが確認されている(Julesz 1971, Stuart et al 1992)。フィギュラルな対極コントラストステレオグラムで立体視が可能なのは、対極コントラストの輪郭についての対応が可能だからではなく、対極コントラストに近似した輪郭が、実際には検出されるからと考えられた。RDSタイプの対極コントラストステレオグラムで立体視が不能なのは、輪郭の検出がフィギュラルタイプに比較して複雑すぎるからと説明される。

そこで、Pope et al⁽¹⁷⁾は、コサイン波形と矩形波形の輝度変化をもつ対極コントラストステレオグラムで、左右ステレオグラムのコントラスト比を40%、60%、80%、100%の4段階、刺激提示時間を0.2、0.5、1、2、4秒の5段階に設定し、正しい立体視の生起頻度を求めた。その結果、(1)低コントラスト条件では、刺激提示時間が短い場合にのみ、立体視が可能となること、(2)しかし、高コントラスト条件でも、コサイン波形のステレオグラムの刺激提示時間を長くすると立体視が可能であること、(3)低コントラスト条件で、矩形波形のステレオグラムの刺激提示時間を長くすると立体視が可能となること、などが見いだされた。これらの結果から、両眼立体視には、トランジエントとサステインドの2つのメカニズムが存在し、前者は対極コントラストステレオグラムで輪郭を検出できるが、後者は検出できないと考えられる。

2.6. 生態光学的に無効な単眼領域とRDS立体視

刺激対象を立体視するとき、その大きさが眼球間距離より大きい場合には、各眼で固有の相

互に対応のない遮蔽領域ができる。ステレオグラムで対象を水平方向にシフトして水平視差を作り出した場合、ステレオグラムのそれぞれの対象のこめかみ側には両眼間で対応の無いこの種の遮蔽領域が必ずできる。これまで、この種の領域は両眼間で対応を持たないため、両眼立体視の成立を困難にすると考えられてきたが、RDSの左右の対象のこめかみ側に単眼遮蔽領域を設定すると、その立体出現の潜時が短くなることが示された (Gillam & Borsting 1988)、生態光学的に生起する単眼遮蔽領域は両眼立体視の成立を促進すると考えられてきた。

これに対して、Grove & Ono⁽⁷⁾ は、Gillamらの研究と同様に、左右のステレオグラムの一方の単眼遮蔽領域を空白にした条件、それを立体出現する対象や背景にあるドットパターンと同一にした条件、それを立体出現する対象や背景にあるドットパターンと相違した条件の3種類のRDSを作成し、その立体出現までの潜時を測定したところ、Gillamらの結果とは相違し、単眼遮蔽領域にパターンが存在することによる立体視促進効果は得られなかったという。ただ、単

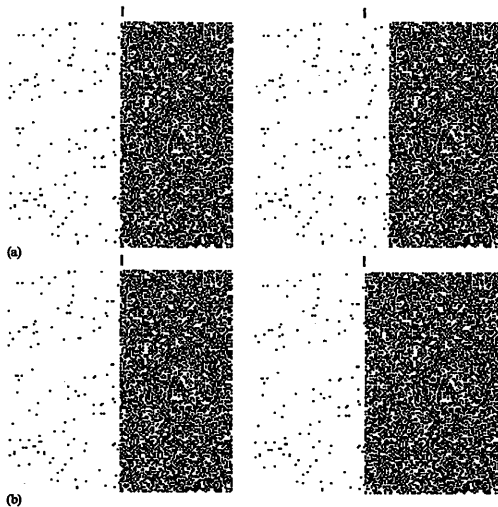


図 12

交差視差で両眼融合した場合、右側のパネルが左側のパネルより近くに出現して見えるRDSで、その単眼遮蔽領域のドット密度を粗／密に変化して、生態光学的に適切な条件 (a) と不適切条件 (b) を設定してある (Grove, P.M. & Ono, H. 1999)。

眼遮蔽領域が立体出現する対象や背景にあるドットパターンと同一のRDSと、それが相違する条件では、後者の方が立体出現の潜時は有意に長くなった。そこで、単眼遮蔽領域に付加するパターンに生態光学的に適切な条件と不適切条件 (立体出現する対象の遠／近に対して単眼遮蔽領域に付加したパターンの密度を変化し生態光学的適切性を操作) を設定したRDSを作成し (図12)、その潜時を測定したところ、生態光学的に適切条件のRDSは不適切条件より有意に短いことが示された。このことから、単眼遮蔽領域が両眼立体視に影響する要因であるかを論じる場合には、その領域が生態光学的に適切なパターンが設定されているかどうかの観点から検討する必要性が示唆されている。

2.7. 背反する輝度対応

(anti-correlated)条件の立体視と運動視における対応問題

左右のステレオグラムから立体を復元するには、左右パターンのどれとどれが対応するかを解決しなければならない。この対応問題は、2つのフレームにまたがるドット・パターンから特定のパターンを復元するときにも同様に生じる。立体視のシステムと運動からのパターン復元のシステムとの間には、明るさ対比感受性、立体視や運動からのパターン復元に関わる閾値である D_{max} と D_{min} 、ランダム・ドットの密度とドットの大きさについての視覚特性が類似することが明らかにされている (Glennerster 1998)。さらに、この2つのシステムの間には、空間周波数チャンネル特性が神経生理学的、あるいは精神物理学的に類似する (Eagle 1997, Prince et al 1998, Yang & Blake 1991)。しかし、背反する輝度対応条件については、両システムはその特性が異なる。背反輝度ステレオグラムの場合、ドット密度が粗い場合には、立体視が正しく生起するが (Cogan et al 1995)、ドット密度が濃い場合には、立体視は成立しない (Julesz 1971, Cumming et al 1998)。運動視の場合には、映画のように1

フレームごとに背反する輝度からなるドット・パターンを提示しても、奥行方向の反転が起きるものの、明瞭な運動が知覚できる (Anstis 1970, Sato 1989). Read & Eagle⁽¹⁹⁾ は、背反輝度ステレオグラム (anti-correlated stereogram) と背反輝度キネマトグラム (anti-corelated kinematogram) とを作成し、立体出現時の奥行方向 (交差/非交差) もしくは運動出現時の運動方向 (右方向/左方向) の判断を被験者に求め

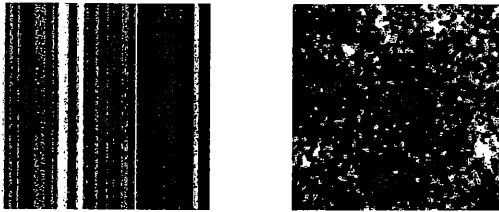


図13 背反輝度ステレオグラムと背反輝度キネマトグラムで使用された刺激パターン。右側の図は1次元(垂直方向)のパターン、左側は2次元パターン (Read, J.C.A. & Eagle, R.A. 2000)。

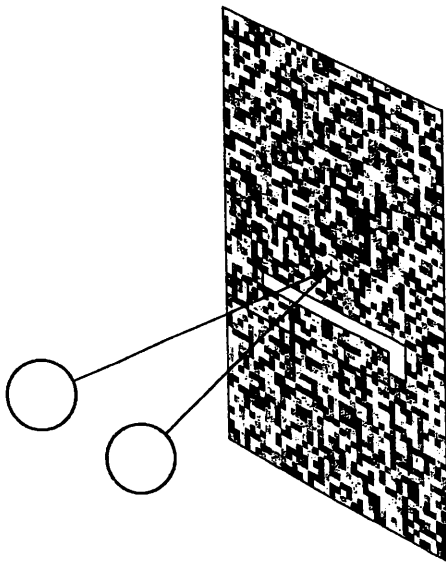


図14 ダイナミック・ランダム・ドットから構成され、そのドットに持続系、過渡系のそれぞれに適した変調をかけたステレオグラム。

実験では、テスト刺激として設定した矩形の太さと視差を操作して、それがダイナミック・ランダム・ドットで構成された背景の手前に見えるか、背後に見えるかがしらべられた (Kontsevich, L.L. & Tyler, C.W. 2000)。

た。刺激は、フーリエ空間で、1次元(垂直方向)と2次元の画像パターンが作成された (図13)。実験の結果、1次元パターン条件では、背反輝度ステレオグラムと背反輝度キネマトグラムとも、奥行方向と運動方向の弱い反転を伴うものの、立体視と運動視が生じたが、2次元パターン条件では、背反輝度キネマトグラム条件では反転を伴う運動視が明瞭に知覚されたが、背反輝度キネマトグラム条件では、立体視は生じなかった。このような相違は、視覚システムが対応問題の解決を試みるとき、方向が異なる空間周波数情報の統合の問題に関係して生起すると論じられている。

2.8. 両眼立体視処理過程における持続系 (sustained pathway) と過渡系 (transient pathway)

外側膝状体には、大細胞層 (magnocellular pathway) と小細胞層 (parvocellular pathway) があり、前者は比較的大きな受容野をもち、過渡的な刺激に対して感受性が高いが、一方、後者は高解像度特性があり、しかも持続的な刺激に感受性をもつ。これまで、サルを対象とした研究から、両眼立体視処理は大細胞層で行われていると考えられてきた (Hubel & Livingston 1987, Livingston & Hubel 1987)。しかし、大細胞層は外側膝状体ニューロンの10%程度しかないと考えると、両眼立体視という大容量の情報処理を担っているとは考えにくい。神経生理学的には、大細胞層は、両眼立体視処理の中の解像度の低いしかしダイナミックなレベルの処理に適し、小細胞層は解像度の高いしかも静止刺激の処理に適している。Kontsevich & Tyler⁽¹¹⁾ は、ダイナミック・ランダム・ドットから構成されたステレオグラムを作成し、そのドットに持続系、過渡系のそれぞれに適した変調をかけて提示した。実験では、図14に示されたように、テスト刺激として設定した矩形の太さと視差を操作して、それがダイナミック・ランダム・ドットで構成された背景の手前に見えるか、背後に

見えるかがしらべられた。矩形の太さと視差とのトレードオフは、大細胞層の場合と小細胞層の場合とで、図15のように異なると予想される。実験の結果は、この予想を支持し、両眼立体視は、持続系で処理されていると結論されている。

2.9. 対応問題とトランジェント系

ステレオグラムにおいて左右眼のどの部分が対応をもつかは、両眼立体視の処理過程を考え

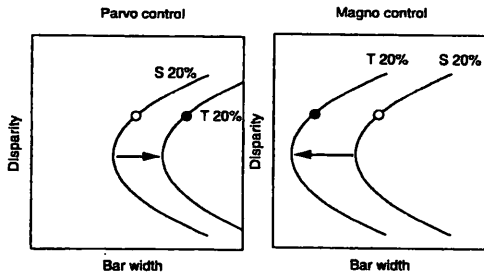


図15 矩形の太さと視差とのトレードオフ。大細胞層の場合と小細胞層の場合とでは、それらの関係は異なると予想される (Kontsevich, L.L. & Tyler, C.W. 2000)。

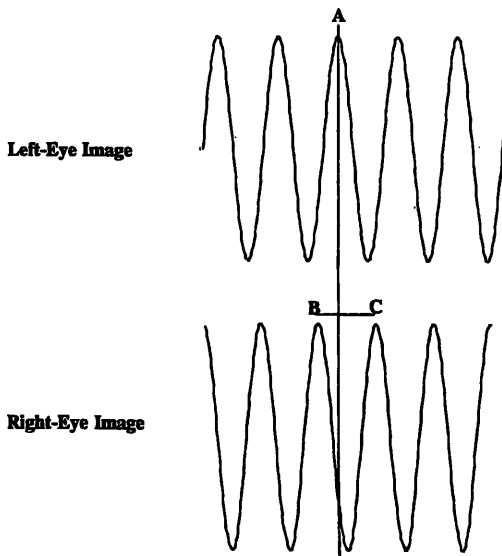


図16 サイン波形の空間周波数から作成されたステレオグラム。

この対応問題を考えるとき、左眼のステレオグラムのA点ともっとも対応する可能性が高いのは、右眼のステレオグラムのB点(90°の分離)とで、次がC点との対応(360°-90°で270°)である (Edwards, M & Schor, C.M. 1999)。

るとき基本的問題である。いま、図16のようなサイン波形の空間周波数から作成されたステレオグラムの対応問題を考えるとき、左眼のステレオグラムのA点ともっとも対応する可能性が高いのは、右眼のステレオグラムのB点(90°の分離)とで、次がC点との対応(360°-90°で270°)である。このステレオグラムを使用し、ステレオグラムの大きさを15°と30°の2段階、空間周波数を0.3, 0.6, 1.8cpdの3段階、刺激提示時間を0.4秒と9秒の2段階をそれぞれ設定して、実際にはどのような対応が選択されるかがしらべられた (Edwards & Schor⁽⁵⁾)。その結果、(1)刺激時間が短時間な場合には最適対応(A-B対応)と次善対応(A-C)対応が生じるが、それが長い場合には最適対応しか生じないこと、(2)両眼視差を小さくすると次善対応が生じにくくなること、(3)最適対応に関係する両眼視差は空間周波数における位相要因が重要であること、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼視差に同期する検出器のモデルが提案された(図17)。ここでは、2つの検出器が仮定され、一つは狭帯域に同期するもの(実線で表示)、他は広帯域に同期するもの(破線で表示)で、前者は小さい視差に対応し、後者は大きい視差に対応する。実験で使用されたステレオグラム

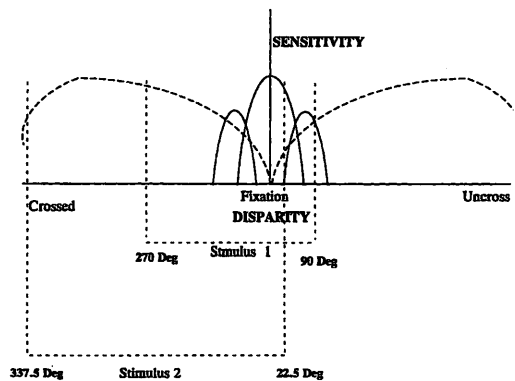


図17 両眼視差に同期する検出器のモデル。ここでは、2つの検出器が仮定され、一つは狭帯域に同期するもの(実線で表示)、他は広帯域に同期するもの(破線で表示)で、前者は小さい視差に対応し、後者は大きい視差に対応する (Edwards, M & Schor, C.M. 1999)。

(stimulus1) では、最適対応は 90° 、次善対応は 270° に設定されていたので、狭帯域検出器は最適対応を検出するが、次善対応は狭帯域外なので検出しない。しかし、検出感度は広帯域検出器によるものの方が大きい。対応が 22.5° と 337.5° のステレオグラムのケース (stimulus2) も同様に説明できる。

2.10. 両眼立体視下で面の形状知覚を不能にする最大両眼視差量の大局的規定要因

大局的両眼立体視で出現させた面の形状が識別できなくなる最大両眼視差量の規定要因として、空間周波数視差 (disparity spatial frequency) と視差勾配 (disparity gradient) とが挙げられている。視差勾配とは、水平方向視差量とキクロピアン距離の比をいい、キクロピアン距離とは立体視出現時の2つの対象間の距離をさす。これまでに、視差勾配の値が1を越えると両眼融合が不能となること、立体視が可能なサイン波形の最大振幅は空間周波数と反比例の関係にある理由を視差勾配で説明できること (Burt & Julesz 1980) などが明らかにされている。Ziegler et al.⁽²⁸⁾ は、この視差勾配で両眼立体視された面の形状の識別が不能になる最大視差量を説明できるかを検討した。ステレオグラムは台形波形、三角波形、サイン波形、矩形波形で構成し、その振幅を操作して、立体視が不能となる最大視差振幅 (d_{max}) を測定した。その結果、大局的両眼立体視下での面の形状知覚を不能にする最大両眼視差は、視差勾配によって規定されていることが確認されている。

2.11. 観察者中心記述と対象中心記述

対象の認知の研究では、対象が心的に2次元で記述されているか (観察者中心記述)、それが3次元であるか (対象中心記述) が問題となる。Phinney & Siegel⁽¹⁶⁾ は、最初に提示した対象から形成される内的表象を、次に提示する対象から形成された内的表象と照合できるかを検討す

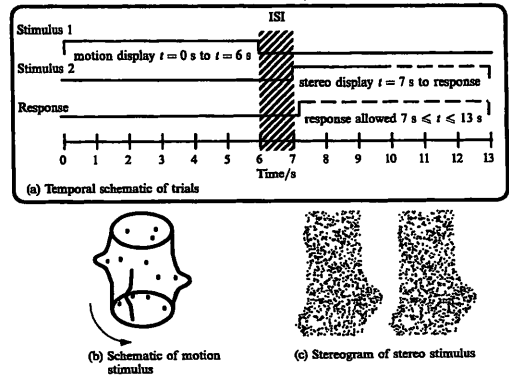


図 18

(a) 運動からの対象復元手法で作成して提示した対象。これをはじめに観察させ、引き続き2次元の手がかり単独、3次元の手がかり単独、2次元の手がかりと3次元の手がかりの両方で成立している対象を提示し、最初の対象を正しく識別できるかをテストする。(b) 運動からの対象復元手法で作成された対象と両眼視差からの対象復元手法で作成された対象 (Phinney, R.E. & Siegel, R.M. 1999)。

るために、まず運動からの対象復元手法で作成した対象を観察させ、引き続き2次元の手がかり単独、3次元の手がかり単独、2次元の手がかりと3次元の手がかりの両方で成立させた対象を提示し、最初の対象を正しく識別できるかを検討した。この手続きでは、対象についての2次元の手がかりを全く欠く運動刺激から形成した対象の内的表象を、2次元の手がかり (ドットで構成される輪郭やシルエット)、3次元の手がかり (両眼視差)、あるいは両方の手がかりで示された対象と照合させることができるかが試された。実験で使用した手続きと対象図形は図18に示されている。実験の結果、2次元の手がかり単独条件、3次元の手がかり単独条件、2次元の手がかりと3次元の手がかり加算条件のいずれにおいても正しいマッチングが行われることが示された。人間の視覚システムは、対象の内的記述とのマッチングでは、3次元の手がかり単独でも正しい結果を出すことができることを示したことから、観察者中心記述モデル、あるいは対象中心記述モデルのいずれにおいても、3次元の手がかりにもとづく内的記述が利用可

能なモデルでなければならない。

2.12 両眼視差情報と単眼的奥行情報の統合

両眼でものを見ると、両眼視差情報と単眼的奥行情報とが統合され、ひとつの矛盾しないシーンが知覚される。ここでの問題は両眼視差情報がどのようにして単眼情報をも統合するのかそのしくみを明らかにすることである。このような統合についての研究が、Ninio⁽¹³⁾によって図19のようなステレオグラムで行われた。このステレオグラムでは、凹あるいは凸に視える半球を背景に、2本の円弧が配置され、そのうち1本は湾曲して視えるように両眼視差を付けてあり、他は前額に平行に視えるように視差をつけてあるかもしくは単眼的要因となっている。

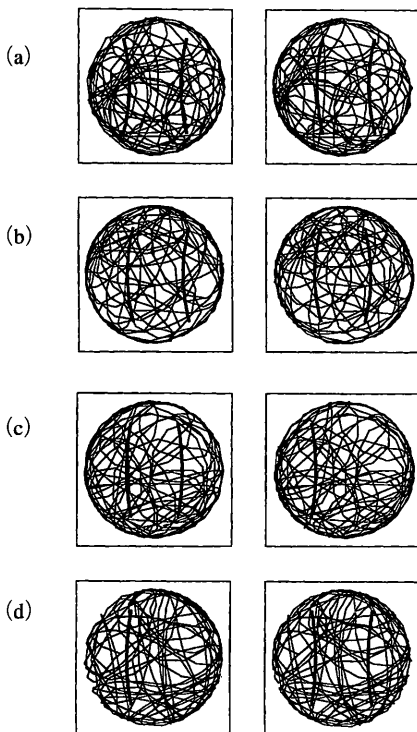


図19

このステレオグラムでは、凹あるいは凸に視える半球を背景に、2本の円弧が配置され、そのうち1本は湾曲して視えるように両眼視差を付けてあり、他は前額に平行に視えるように視差をつけてあるか、もしくは単眼的要因となっている (Ninio, J. 2000)。

これらのステレオグラムを、交差条件、非交差条件で観察させた結果、(1)両眼視差のある円弧の奥行方向について15%の誤りが生じ、その誤りの60–80%が視差の指示する奥行方向が半球に対して凸で円弧に対して凸の条件で、円弧が凹という誤りが生じること、(2)視差の指示する円弧が前額平行条件でも、それを凹とする誤りが幾分優勢に生じること、(3)単眼的要因の円弧でも、60%以上で視えの湾曲反応が生じ、さらにこの湾曲反応は、半球が凸の背景でしかも円弧が鼻側に配置した条件で生起すること、(4)円弧が鼻側に位置ししかもその向きが内側にある場合には凸に知覚され、逆に円弧の向きが外側にある場合には凹に知覚されるのは、ステレオグラムの視差を非交差条件と仮定すると幾何学的推論と一致すること、などが明らかにされた。とくに、片眼に捉えられた鼻側の刺激は、他眼の鼻側と対応を持ちやすいという偏向が示され、このことから視差の対応過程は鼻側の刺激要素から開始されることが示唆される。

2.13. 奥行関係を規定する基準面と両眼立体視の中の奥行関係

Gibson (1950) は、その生態光学的奥行理論のなかで、対象の奥行関係を規定する基準面は人間が行動する地上面などの「表面」であることを強調した。たとえば、中程度の奥行距離の知覚では、対象までの視えの絶対的奥行距離は、基準となる「表面」が利用できる事態でもっとも精確となる。He & Ooi⁽⁹⁾ は、近距離の奥行手がかりである両眼視差に規定されたステレオグラムにおける2つの対象の奥行定位において、この種の「表面」が基準枠となるかについて、図20のようなステレオグラムで検討した。ここでは、テストディスプレイ (a)、比較ディスプレイ (b)、統制刺激ディスプレイ (c) の3種類のステレオグラムが用意されていて、両眼立体視時の視え方は、図の右の欄に示されている。2つのテスト線分の奥行の差は、比較ディスプレイと統制ディスプレイに比較してテストディスプレイ

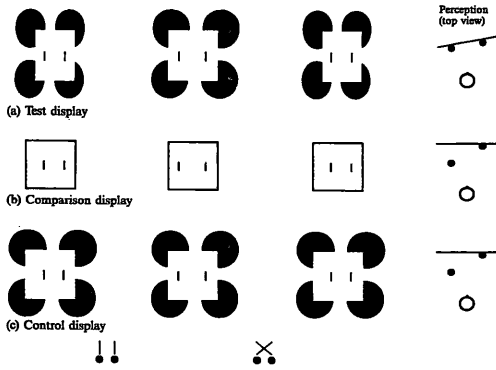


図 20

ステレオグラムにおける2つの対象の奥行定位問題で使用されたステレオグラム。ここでは、テストディスプレイ (a)、比較ディスプレイ (b)、統制刺激ディスプレイ (c) の3種類のステレオグラムが用意されていて、両眼立体視時の見え方は、図の右の欄に示されている (He Z.E. & Ooi, T.L.2000)。

で小さい。これらのステレオグラムを観察した結果、(a)ではテスト線分の見えの相対的な奥行差は(b)、(c)に比較して小さくなり、また新たにパースペクティブ条件を加えると、それは大きくなる。これらの結果は、テスト線分の奥行位置を規定する「表面」がどのように知覚されるかに依存していて、(a)では「表面」の見えの奥行傾斜が過小視され、パースペクティブを追加すると、それが過大視されるためと考えられる。このことから、ステレオグラムの両眼立体視事態でも「表面」が対象の奥行関係を規定する基準面となることを示す。

2.14. ステレオグラム立体視条件下での形状補完 (completion)

図21の(a)では、遮蔽物が顔形状の前にあるために、形状が補完されるが、(b)では遮蔽物が顔形状の後ろにあるために補完されず顔を知覚できない。一方、楕円状に穴の空いたものを、図22のように、その穴を通して円盤の一部が見えるように回転させながら観察させると、楕円状の遮蔽輪郭が見える時には円盤がリジッドに知覚されるが、遮蔽輪郭を見えないようにするとやはり円盤には見えなくなる (Takeuchi, H. 1999)。

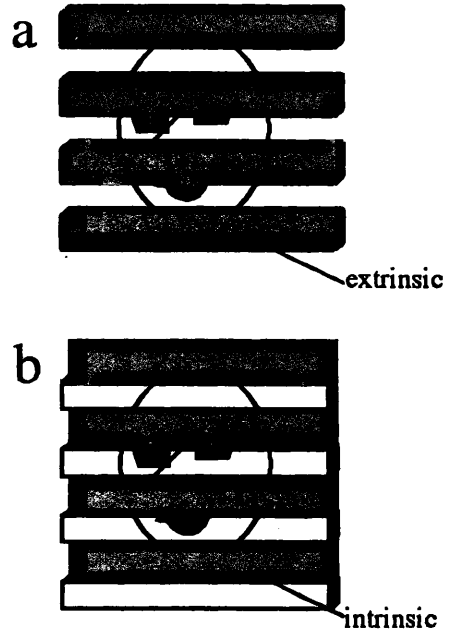


図 21

(a)では、遮蔽物が顔形状の前にあるために形状が補完されるが、(b)では遮蔽物が顔形状の後ろにあるために補完されず顔を知覚できない (Takeuchi, H.1999)。

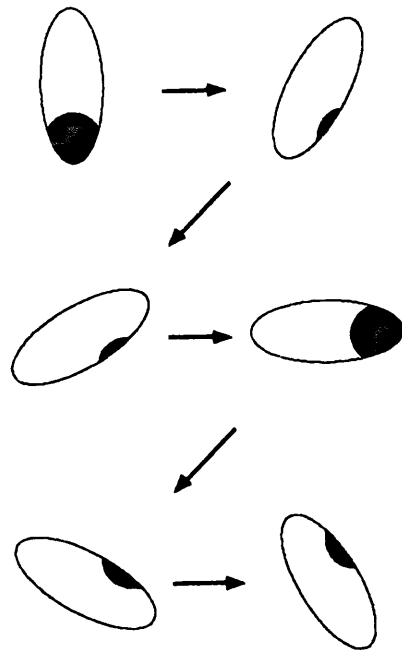


図 22

穴の空いた楕円を通して円盤の一部が見えるように回転させながら観察させると、楕円状の遮蔽輪郭が見える時には円盤がリジッドに知覚されるが、遮蔽輪郭を見えないようにするとやはり円盤には見えなくなる (Takeuchi, H. 1999)。

にすると、もはや円盤は見えなくなる。これは、形状知覚システムが遮蔽物に属する輪郭と被遮蔽物（円盤）に属する輪郭とを識別し、被遮蔽物の輪郭を補完するためと考えられる。遮蔽物の輪郭が視えない場合には、遮蔽物が被遮蔽物より手前に知覚されたのと同じとなり、被遮蔽物の形状補完が失われると考えられる。このように考えると、両眼視差による奥行が存在するか否かは、形状補完とは直接には関係しない。Takeuchi⁽²²⁾は、被遮蔽物に人間の顔を、遮蔽物は穴形状を持つ楕円を回転させながら、顔に両眼視差をつけて楕円よりは手前あるいは背後に視えるように設定して、顔のマッチングを求めた。その結果、被遮蔽物である顔が遮蔽物である楕円の手前あるいは背後に視えることと、顔のマッチングとは無関係なことが示された。このことから、両眼視差による立体視が形状補完に決定的な役割を持っていないことが示されている。

2.15. パーチャルに提示した3次元形状湾曲面の触運動的方法による測定

3次元形状の楕円面や双曲面（馬の背形状）は、次式（Euler）の定式、de Vries（1994）で記述できる。

$$K_N = K_{\max} \cos^2 \alpha + K_{\min} \sin^2 \alpha$$

（ K_{\max} と K_{\min} は基本曲率の最大と最小を示し、 α は K_{\max} と当該の曲線との間になす角度をいう）

上記の数式で記述された3次元形状楕円面や双曲面をRDS（図23）で作成し、これを両眼立体視させたものの視えの3次元形状がWatanabe et al⁽²⁵⁾によって測定された。奥行手がかりは、両眼視差のほかに、テクスチャ、陰影（full cue）とし、この条件からテクスチャを除いた条件を設定した。視えの3次元形状の測定は、先端に赤外線ダイオードのペンでパーチャルに知覚されている湾曲面をなぞらせる触運動的方法で行われた。その結果、(1)人間の視覚システムは、Eulerの定式で記述した3次元形状湾曲面を、この種の触運動的方法で正しく再現できること、

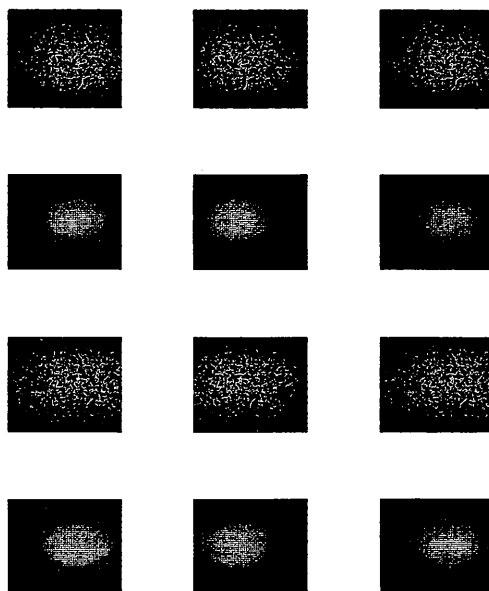


図23

RDSで作成された3次元形状楕円面（上の2種類）や双曲面（下の2種類）で、それぞれ上からテクスチャありとテクスチャ無し条件である（Watanabe, H. et al 1999）。

(2)3次元湾曲面が十分に大きいときには、最大の湾曲面と最小の湾曲面がどの方向に位置するか、その方向を正しく知覚できるが、ゼロ湾曲面は正しく知覚できないこと、(3)テクスチャ要因は3次元湾曲形状の知覚に影響していること、(4)触運動的方法による3次元形状の知覚と視覚的判断（凹あるいは凸を判断させる）によるそれとは、結果が相違すること、(5)単独で提示された3次元曲線と湾曲面に埋め込まれた3次元曲線では、知覚的形状が異なること、などが明らかにされている。

2.16. 両眼立体視におけるシーンの水平と垂直方向の大きさの歪み

図24のステレオグラム（A）を両眼立体視し、中央の黒色円盤（オクルーダ）の左右の水平の縁間の大きさと左右の垂直の縁間の大きさを、背景に配置した方眼紙の升目でカウントすると、水平方向の距離には8個の升目があり、垂直方向のそれは9個の升目がある。これは水平

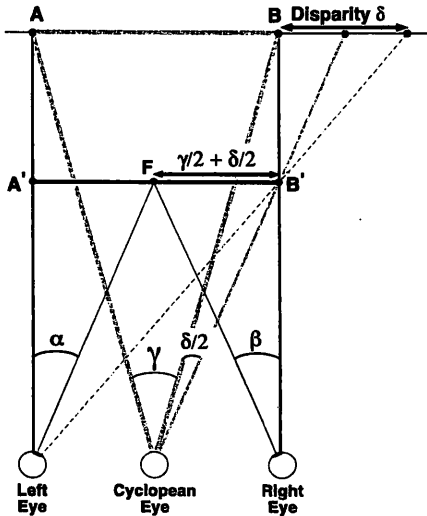
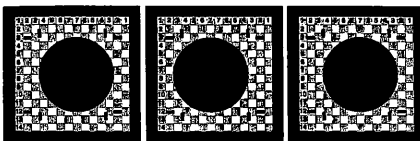


図 24

図 (A) を両眼立体視し、中央の黒色円盤 (オクルーダ) の左右の水平の縁間の大きさとして左右の垂直の縁間の大きさを、背景に配置した方眼紙の升目でカウントすると、水平方向の距離には 8 個の升目があり、垂直方向のそれは 9 個の升目がある。(B) のステレオグラムで同様に、黒色矩形で遮蔽された背景領域の左右の水平方向の縁間距離と垂直方向の上下間の縁間の距離を升目でカウントすると、水平方向の距離は遮蔽物の左右ともそれぞれ升目で 6 個あり、遮蔽物の横幅が 3 個なので総計 15 個となる (Ee, van E. & Erkelens, C.J. 2000)。

(A) Occluder Shape



(B) Background Shape

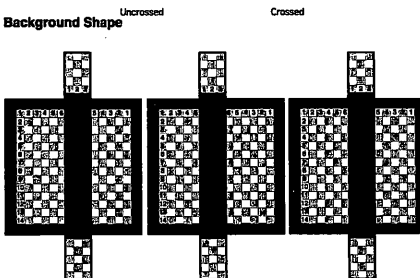


図 25 遮蔽物と遮蔽された背景、および両眼の視方向との関係。

両眼で F を注視するとき、遮蔽物 A'B' の背後にある視野の左端 (A) と右端 (B) は、遮蔽物によって隠され、A 点は左眼のみで、B 点は右眼のみで知覚されるので、A と A', B と B' は、あたかも同一直線上にあるように見える (Ee, van E. & Erkelens, C.J. 2000)。

方向より垂直方向の方が広く知覚されることを示すが、実際には中央の黒色円盤は楕円ではなく円盤に視える。一方 (B) のステレオグラムで同様に、黒色矩形で遮蔽された背景領域の左右の水平方向の縁間距離と垂直方向の上下間の縁間の距離を升目でカウントすると、水平方向の距離は遮蔽物の左右ともそれぞれ升目で 6 個あり、遮蔽物の横幅が 3 個なので総計 15 個となるが、垂直方向のそれは 14 個なので、ここでは垂直方向より水平方向の方が広く知覚されることを示すが、実際には背景の矩形は正方形に視える。このように、遮蔽物の水平方向と垂直方向の両端間の大きさ比の変化、あるいは遮蔽物の背景領域の同様な大きさの比の変化がなぜ起きるのかについて、Erkelens et al (1996) は次のような仮説を提示した。すなわち、図 25 に示されたように、両眼で F を注視するとき、遮蔽物 A'B' の背後にある視野の左端 (A) と右端 (B) は、遮蔽物によって隠され、A 点は左眼のみで、B 点は右眼のみで知覚されるので、A と A', B と B' は、あたかも同一直線上にあるように視える。ここで、

$$A'B' = \alpha + \beta = \gamma + \delta$$

$$\gamma = \alpha + \beta - \gamma$$

となる。前景の遮蔽物の水平方向の距離を S とすれば、背景の前景に対する比は、

$$\text{background/foreground} = (S - \delta) / S$$

で表される。もし、遮蔽物と背景間の両眼視差 (δ) が 0.5° とし、前景の水平方向の大大きさが 5.2° とすれば、背景の前景に対する比は

$$4.7/5.2 = 0.9$$

となるので、背景領域の水平方向の大きさが垂直方向より縮小されて視えることになる。

一方、両眼立体視条件ではなく単眼視条件でも遮蔽物の背景領域の水平、垂直方向の大きさの比が変化する錯視が存在する。図 26(A) の上図では、Kaniza の矩形圧縮錯視で、遮蔽物の背後の矩形の水平方向の大きさは圧縮されて過小視され、下図では垂直方向が圧縮され過小視されて知覚される。図 26(B) はボゲンドルフ錯視

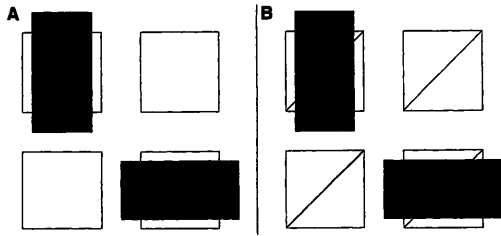


図 26

図 (A) の上図は Kaniza の矩形圧縮錯視。ここでは遮蔽物の背後の矩形の水平方向の大きさは圧縮されて過小視され、下図では垂直方向が圧縮され過小視されて知覚される。図 (B) はポゲンドルフ錯視。ここでは遮蔽物の背後にある直線が遮蔽の前後で逸脱して見える (Ee, van E. & Erkelens, C.J. 2000)。

で、ここでは遮蔽物の背後にある直線が遮蔽の前後で逸脱して見える。Erkelens et al (1966) の仮説によれば、遮蔽形状の水平、垂直方向の大きさの比は、遮蔽物と遮蔽された背景間の距離、凝視点までの奥行距離に比例して変化すると予測されるが、Ee & Erkelens⁽⁶⁾ の実験では予測は支持されなかった。さらに、Kaniza の矩形圧縮錯視とポゲンドルフ錯視をステレオグラムで提示し両眼立体視すると、錯視が消失することが明らかにされた。これらの結果から、Erkelens et al (1966) の仮説は否定され、3次元空間の水平、垂直方向の大きさの比を規定するメカニズムと、遮蔽物の左右両端が左眼あるいは右眼の網膜上での方向から形状の歪みを規定するメカニズムとは、それぞれ別個のしくみであることが示唆される。

2.17. 眼球間の位相差とモーショーンステレオ視

プルフリッチ (Pulfrich) 現象は、左右の眼球間の刺激入力に時差を生じさせ、これが水平視差を誘導して立体効果が生じると説明されてきた。しかし、両眼にストロボ的に刺激を与え、両眼間の時差がほとんど存在しない条件でも立体視が生じることが報告されている (Lee 1970, Morgan & Thompson 1975)。Morgan & Fahle⁽¹²⁾ は、個々の要素の輝度がサイン波形状に、しか

もある一定の速度で点滅 (フリッカ) して変化するダイナミック・ランダム・ドット・パターンを液晶シャット眼鏡を通して各眼に別々に提示した。この時、両眼に入力される刺激パターンの対応する要素に位相差を導入すると、垂直軸を中心として回転する透明なテクスチャ面をもつ円筒が立体的に知覚されることが示された。この種のモーショーンステレオ視をもたらす最小の位相差は $5 - 10^\circ$ の範囲であること、またこの最小の位相差は、眼球間の遅延に置き換えることが可能であり、しかもこの眼球間の遅延はフリッカ頻度を増大させると縮小できることも示された。この結果から、モーショーンステレオ視においては、眼球間遅延要因よりは位相差要因が重要であると考えられる。モーショーンステレオ視を可能にする最適な位相差は $60 - 90^\circ$ の範囲である。

2.18. 奥行手がかり間のコンフリクトに及ぼす時間要因

両眼視差とパースペクティブ要因とがそれぞれ背反する奥行方向を指示した場合 (コンフリクト条件) に、どちらの要因が優位になるかが、ステレオグラムが提示されてから安定的な奥行が成立するまでの時間的経過のなかでしらべられた (Allison & Howard⁽²⁾)。提示された奥行面は、垂直軸を中心とした傾き (スラント, slant) と水平軸を中心とした傾き (インクリネーション, inclination) で、スラントは水平大きさ視差で、インクリネーションは水平剪断視差で、それぞれの傾きが操作された。パースペクティブ要因は、格子状パターンと不規則なテクスチャパターンで操作され、前者ではパースペクティブ要因が強く、後者は弱く作用するように企図された。時間的要因は、ステレオグラムを静止して提示する条件と、ステレオグラムが指示する奥行面が前額平行から最大奥行傾斜角までの間をサイン波形に振幅 (オシレート) して提示する条件とを設定した。両眼視差とパースペクティブ要因との奥行手がかり間条件は、両眼視

差単独有効条件, パースペクティブ単独有効条件, 両眼視差とパースペクティブ要因とが同方向の奥行を指示する一致条件, そして両眼視差とパースペクティブ要因とが背反する奥行方向を指示するコンフリクト条件である. 視えの奥行傾斜面の測定は, 両眼立体視された奥行傾斜面を, これとは別に提示した実傾斜面の角度を回転操作して行うマッチングによった. 実験の結果, (1)コンフリクト条件では, パースペクティブ要因の方が両眼視差要因より, 優位に奥行方向を規定すること, (2)この傾向は, 静止条件よりオシレート条件で強く現れること, (3)両眼立体視の観察時間経過での奥行手がかりの優位については, パースペクティブ要因の優位は観察初期 (0.1秒から1秒前後) に強いこと, などが明らかにされた. このことから, 複数の奥行手がかりがコンフリクト条件に存在する場合の知覚的解決には, その解決過程の初期にパースペクティブ要因が奥行方向を規定していると考えられる.

3. 絵画的要因による3次元視

3.1. 2次元画像における対象の面の形成に及ぼす奥行要因

図27の (a) をみると2つの楕円形があり, それらの面は同方向を示すが, これを (b) のような2つの組み合わせられた立方体のある面に組み入れると, それらの面の示す方向は, (a) とは異なって見える. このように, 2次元画像における

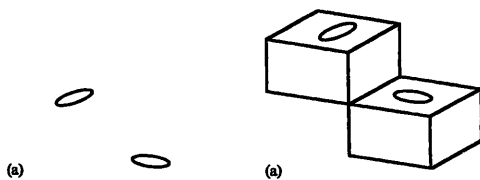


図27

(a) 2つの楕円形があり, それらの面は同方向を示す.
 (b) 2つの組み合わせられた立方体のある面に (a) を組み入れると, それらの面の示す方向は (a) とは異なって見える (Albert, M.K. 1999).

対象の面形成は, 面, 線, エッジ, 頂点などの間で生じる奥行関係を曖昧なものにしないという内的拘束の枠内で処理されていると, Albert⁽¹⁾ は主張する. もし, 2次元画像の奥行関係で複数の解釈が可能なときには, 次の諸点からシーン理解が選択される. (1)2つの対象が奥行関係で近接しているほどシーン解釈上で選択される (近接性). (2)形成された面が平面的で滑らかであるほどシーン解釈上で選択される (スムーズ性). (3)形成された面が前額平行な面, あるいは地面に近似しているほどシーン解釈上で選択される (前額平行面もしくは地面選択性). (4)観察者の関心, あるいは注視点はシーン解釈上で選択される. シーン理解に関する研究は, 人間の知覚ばかりでなくコンピュータ・ビジョンの上からも重要である.

3.2. 視点と遠近法における投影点

写真はある撮影点からのシーンを写し取るが, この撮影点は投影の中心点となる. したがって, これ以外の視点に対しては, その写真は幾何学的に変形したシーンを構成しなおさなければならない. 人間の視覚システムは, 他の多くの視点から見た変形されたパースペクティブ・シーンを正しく知覚することができ, これはパースペクティブに対する強靱性 (robustness of perspective) と呼ばれる. この強靱性は, 人間の視覚システムが, あたかも投影の中心点から見たシーンであるかのようにシーン構造を知覚するように補償するからと説明される (パースペクティブの強靱性についての補償理論 compensation theory of perspective robustness). 図28は, 観察者の視点が変わると, どのように対象の見え方が変化するかを図解したものである. 記号 O は投影点, P は投影面, O' は位置変化した投影点である. (a) は投影点からのシーン構造, (b) は投影点を投影面により近づけた場合と遠ざけた場合, (c) は投影点を片側に寄せた場合をそれぞれ示す. ここでは $d(O'A')/d(O'P)$ は一定に, $d(O'P)/d(OP)$ は最大比/最小比を示す.

パースペクティブ強靱性の補償理論については、対象の面が視えているときには、対象の傾き (Rosinski, et al 1980), シーンの空間的構造 (Goldstein 1987), 箱形状の長方形の程度 (Perkins 1973) をそれぞれ正しく知覚できることが支持された。しかし対象の面が視えないときには、この種の知覚的補償が作用しないこと、また、投影点を片側にずらすのではなく、投影

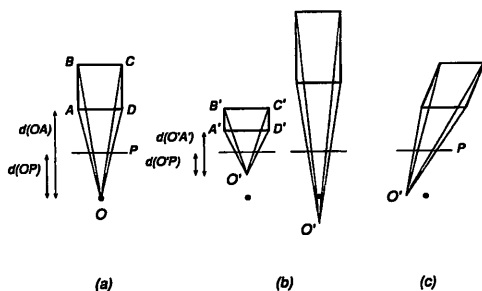


図 28

観察者の視点が変化することによってパースペクティブが変化した場合、どのように対象の見え方が変化するかを図解したもの。記号 O は投影点、P は投影面、O' は位置変化した投影点である。(a) は投影点からのシーン構造、(b) は投影点を投影面により近づけた場合と遠ざけた場合、(c) は投影点を片側に寄せた場合をそれぞれ示す (Yang, T. & Kubovy, M. 1999)。

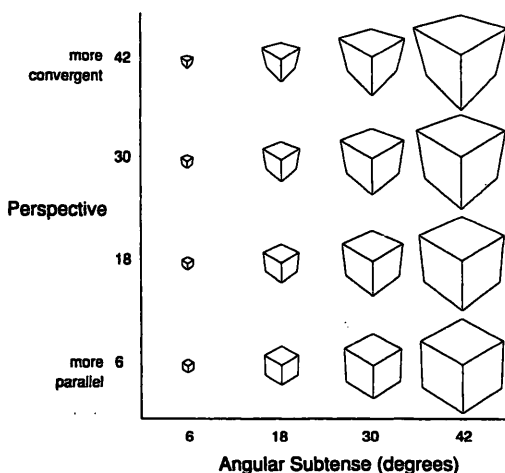


図 29

図中、X 軸は投影点と投影面とのなす角度 (視角) を、Y 軸は対象のパースペクティブ・コンバージェンス角をそれぞれ示す、実験ではどの条件でもっとも立方体らしく知覚されるかがしらべられた (Yang, T. & Kubovy, M. 1999)。

点までの距離を変えた条件では、このパースペクティブの強靱性についての補償理論を支持しない結果も報告されている。Yang & Kubovy (26) は、パースペクティブの強靱性についての補償理論を検証するために、投影点までの奥行距離を変えたときに対象の面の形状の知覚は、どの程度正しくなされるか、さらに還元スクリーンを使用して視野を制限することによって対象の面が視えない条件下では対象の面の形状の知覚は、どの程度正しくなされるかを検討した。使用した刺激は図 29 に示されている。図中、X 軸は投影点と投影面とのなす角度 (視角) を、Y 軸は対象のパースペクティブ・コンバージェンス角をそれぞれ示す。実験では、どの条件でもっとも立方体らしく知覚されるかがしらべられ、その結果、視角とコンバージェンス角とが対応している場合に、もっともそれらしい知覚が得られた。また還元スクリーンを使用し対象の面の知覚を制限した場合には、単眼視、還元スクリーン無し、暗視野条件は、両眼視、還元スクリーン無し、明視野条件に比較してパースペクティブの強靱性の補償がなされなかった。このことから、対象の面が視えない条件では、パースペクティブの強靱性は補償されないこと、しかし対象の面が視える条件では、それは十分に補償されることが明らかにされた。

4. 視空間構造

4.1. 能動的、受動的な自己受容情報とエンメルトの残像法則

エンメルトの残像法則とは、残像の視えの大きさは残像投影面までの視えの奥行距離に比例するというものである。この法則によれば、残像の視えの大きさは、残像の投影面までの奥行手がかりが変化すれば、その大きさも変化することを意味する。暗室内で視覚の手がかりが見えなければ、非視覚の手がかりが視えの大きさに影響することも、Gregory (1959) によって見いだされている。Bross (4) は、暗室内で被験者

の手および手に持たせた対象に対して陽性の残像を形成し、その手を視線にそって能動的あるいは受動的に移動させた後、視えの大きさを測定したところ、それはエンメルトの法則に従って変化することが示された。興味深いことには、手の残像は、ある大きさ以下には小さくならないことも明らかにされた。視覚システムには、手については一定の大きさを維持するしくみがあることが示唆される。

5. その他

5.1. 面の質的類似性と奥行分離

図と地の問題解決を行うとき、図を規定するのはエッジと面である。エッジがどの形状に属するかは、ゲシタルト要因の中の良い連続の要因によって規定される。一方、面がどの形状に属するかは、面上の質的類似性によって規定される。面の質的類似性とは、色、明るさ、テクスチャの類似性を指し、これらが類似しているものはひとつのまとまった形状として知覚される。たとえば、図30の (a) はエッジの連続性と面の質的類似性によって、(b) はエッジの連続性のみによって、(c) は面の質的類似性のみによって、それぞれ遮蔽するものと遮蔽されるもの

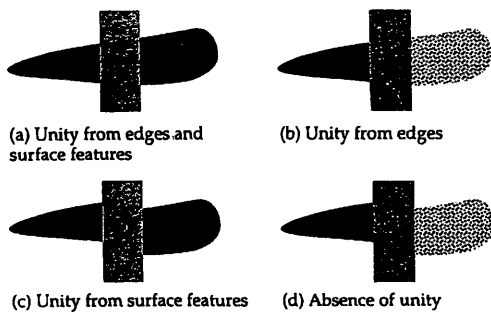


図 30

(a) はエッジの連続性と面の質的類似性によって、(b) はエッジの連続性のみによって、(c) は面の質的類似性のみによって、それぞれ遮蔽するものと遮蔽されるものに分離して知覚されるが、(d) ではエッジの連続性、面の質的類似性の両方が存在しないために形状の知覚的統合は生じない (Yin, C., Kellman, P.J. & Shipley, T.F. 2000)。

のに分離して知覚されるが、(d) ではエッジの連続性、面の質的類似性の両方が存在しないために形状の知覚的統合は生じない。Yin et al⁽²⁷⁾ は、面の質的類似性が存在すれば、まとまりのある形状として知覚的に統合される傾向をしらべるために、刺激パターンをステレオグラムで提示し、両眼視差による奥行的分離と面の質的類似性による知覚的統合をコンフリクトさせる方法で、その傾向の強度を測定したところ、両眼視差の指示する奥行的分離に抵抗して面の質的類似性による形状の知覚的統合を維持する力が存在することが示されている。

5.2. 図-地分離に対応する脳部位

fMRIを用いて、図-地分離を担う脳部位の同定が、Skiera et al⁽²¹⁾ によって試みられた。使用した刺激図形は、図31に示されたようなパターンで、実験では図-地分離が生じない等質なパターンから図-地分離が生じるパターンに連続

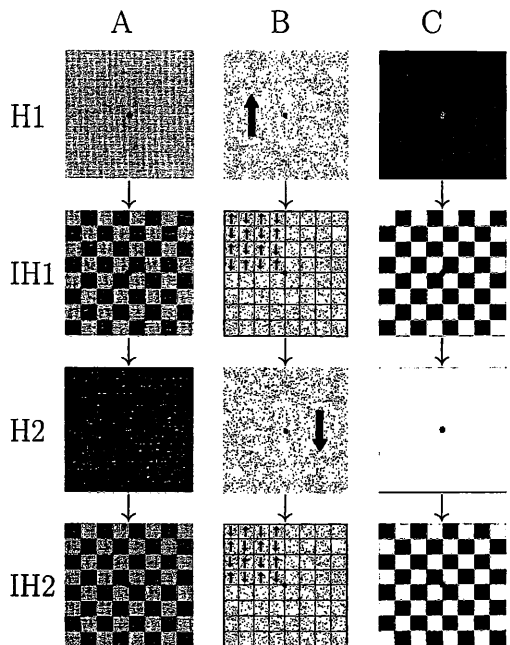


図 31 図-地分離を担う脳部位の同定のための刺激図形。

等質なパターンから図-地パターンへと連続的に変化させる (Skiera, G. et al 2000)。

的に変化させ、その間の脳部位の反応がしらべられた。その結果、両側のV1領域が顕著に図一地分離対応して応答すること、またV2領域も若干の応答があることが明らかにされた。このことから、図一地分離は、視覚情報処理の初期の段階で行われると考えられる。

6. おわりに

運動要因にもとづく3次元視の研究領域で新たに得られた知見は、(1)運動視差は狭い帯域幅を持つ複数のチャンネルで伝達されていて、これは両眼視差のそれと一致していること、(2)視覚システムは、奥行に係わる知覚判断課題が変わると、それに利用する主たる奥行手がかりを変えている、すなわちそのストラテジーを変えていると考えられること、(3)テクスチャ要因と運動視差要因間の手がかり優位性については、これまで、運動視差要因が優位であるとされてきたが、視えの奥行傾斜面はテクスチャ要因によって優位に規定されること、(4)ステレオキャプチャと同様な現象が運動立体視でも生じることから、運動立体視と両眼立体視は、ともに共通のメカニズムを持つこと、(5)オプティカル・モーション事態では、tiltは正確に知覚判断されたが、slantの知覚判断には大きな誤差が生じること、などである。

両眼立体視に関する領域では、(1)ステレオグラムの左右の対応する領域を構成する刺激要素の輝度が反対である場合には、両眼立体視における対応が原理的には存在しないが、観察者と対象との間に遮蔽物があり、その遮蔽物を通して対象を観察する場合には、対象の輝度は左右のステレオグラムで背反(anti-correlated)していても、これを両眼立体視すると、対応を持たない領域が遮蔽物より手前に浮き出て見えること、(2)対応問題には両眼視差量とコントラスト・エンベロープの大きさとが相互に影響していること、(3)パヌームの半端ステレオグラム(lomiting case)問題に対して、新たな仮説であ

る「誤った輻輳による奥行定位説」が提案されたこと、(4)両眼立体視にはトランジエントとサステインドの2つのメカニズムが存在し、前者は対極コントラストステレオグラムで輪郭を検出できるが、後者は検出できないこと、(5)フリーエ空間で、1次元(垂直方向)と2次元の画像パターンを使用して背反輝度ステレオグラムと背反輝度キネマトグラムとを作成すると、1次元パターン条件では、背反輝度ステレオグラムと背反輝度キネマトグラムとも、奥行方向と運動方向の弱い反転を伴うものの、立体視と運動視が生起したが、2次元パターン条件では背反輝度キネマトグラム条件では反転を伴う運動視が明瞭に知覚されたが、背反輝度キネマトグラム条件では立体視は生じないこと、(6)サルを対象とした研究から、両眼立体視処理は大細胞層で行われていると考えられてきたが、人間を対象とし、ダイナミック・ランダム・ドットから構成されたステレオグラムのドットに持続系、過渡系のそれぞれに適した変調をかけた実験から、両眼立体視は、持続系で処理されていること、(7)大局的両眼立体視下での面の形状知覚を不能にする最大両眼視差は、視差勾配によって規定されていること、などが新たに明らかにされた。

この他に、fMRIを用いて、図一地分離を担う脳部位の同定が試みられ、両側のV1領域が顕著に図一地分離対応して応答すること、またV2領域も若干の応答があることが明らかにされ、図一地分離は、視覚情報処理の初期の段階で行われていることが確認されている。

2001年度文献

- (1) Albert, M.K. 1999 Surface formation and depth in monocular scene perception. *Perception*, 28, 1347-1360.
- (2) Allison, R.S. & Howard, I.P. 2000 Temporal dependencies in resolving monocular and binocular cue conflict in slant perception. *Vision Re-*

- search*,40,1869-1886.
- (3) Bradshaw,M.F.,Andrew,D.P. & Glennerster,A. The task-dependent use of binocular disparity and motion parallax information. *Vision Research*,40,3725-3734.
 - (4) Bross,M. 2000 Emmert's law in the dark:active and passive proprioceptive effects on positive visual afterimages. *Perception*,29,1385-1391.
 - (5) Edwards,M. & Shor,C.M. 1999 Depth aliasing by the transient-steropsis system. *Vision Research*,39,4333-4340.
 - (6) Ee,van E. & Erkelens,C.J. 2000 Is there an interaction between perceived direction and perceived aspect ratio in stereoscopic vision. *Perception & Psychophysics*,62,910-926.
 - (7) Grove,P.M. & Ono,H. 1999 Ecologically invalid monocular texture leads to longer perceptual latencies in random-dot stereogram. *Perception*,28,627-639.
 - (8) Hogervorst,M.A.,Bradshaw,M.F. & Eagle,R.A. 2000 Spatial frequency tuning for 3-D corrugations from motion parallax. *Vision Research*, 40,2149-2158.
 - (9) He,Z.J. & Ooi,T.L. 2000 Perceiving binocular depth with reference to a common surface. *Perception*,29, 1313-1334.
 - (10) Kham,K.&Blake R.2000 Depth captures by kinetic depth and by stereopsis. *Perception*,29, 211-220.
 - (11) Kontsevich,L.L. & Tyler,C.W. 2000 Relative contributions of sustained and transient pathways to human stereoprocessing. *Vision Research*,40,3245-3255.
 - (12) Morgan,M.J.& Fahle,M. 2000 Motion-stereo mechanisms sensitive to inter-ocular phase. *Vision Research*,40,1667-1675.
 - (13) Ninio,J. 2000 Curvature biases in stereoscopic vision: A nasotemporal asymmetry. *Perception*,29,1219-1230.
 - (14) O'Brien,J. & Johnston,A. 2000 When texture takes precedence over motion in depth perception. *Perception*,29,437-452.
 - (15) Ono,H.,Shimono,K. Saida,S. & Ujike,H. 2000 Transformation of the visual-line value in binocular vision: Stimuli on corresponding points can be seen in two different directions. *Perception*,29,2000,421-436.
 - (16) Phinney,R.E. & Siegel,R.M. 1999 Stored representation of three-dimensional objects in the absence of two-dimensional cues. *Perception*,28,725-737.
 - (17) Pope,D.R.,Edwards,M. & Schor,C.F. 1999 Extraction of depth from opposite-contrast stimuli:transient systemcan, sustained can't. *Vision Research*,39,4010-4017.
 - (18) Prince,S.J.D. & Wagle,R.A. 2000 Stereo correspondence in one-dimensional Gabor stimuli. *Vision Research*,40,913-954.
 - (19) Read,J.C.A. & Eagle,R.A. 2000 Received stereo depth and motion direction with anti-correlated stimuli. *Vision Research*, 40,3345-3358.
 - (20) Shimono,K.,Tam,W.J. & Nakamizo,S. Wheatstone-Panum limiting case: Occlusion, camouflage, and vergence-induced disparity cues. *Perception & Psychophysics*, 61,445-455.
 - (21) Skiera,G.,Petersen,D.,Skalej,M. & Fahle,M. 2000 Correlates of figure-ground segregation in fMRI. *Vision Research*, 40,2047-2056.
 - (22) Takeuchi,H. 1999 The effects of stereoscopic depth on completion. *Perception & Psychophysics*, 61,144-150.
 - (23) Todd,J.T. & Perotti,V. 1999 The visual perception of surface orientation from optical motion. *Perception & Psychophysics*,61,1577-1589.
 - (24) Tsai,J.J. & Victor,J.D. 2000 Neither occlusion constraint nor binocular disparity accounts for the perceived depth in the 'sieve effect'. *Vision Research*, 40, 2265-2276.
 - (25) Watanabe,H.,Pollick,F.E.,Koenderink,J.J. & Kawato,M. 1999 Using motor tasks to quantita-

- tively judge 3-D surface curvatures. *Perception & Psychophysics*, 61, 1116-1139.
- (26) Yang, T. & Kubovy, M. 1999 Weakening the robustness of perspective: Evidence for a modified theory of compensation in picture perception. *Perception & Psychophysics*, 61, 456-467.
- (27) Yin, C., Kellman, P.J. & Shipley, T.F. 2000 Surface integration influences depth discrimination. *Vision Research*, 40, 1969-1978.
- (28) Ziegler, L.R., Hess, R.F. & Kingdom, F.A.A. 2000 Global factors that determine the maximum disparity for seeing cyclopean surface shape. *Vision Research*, 40, 493-502.
- Influence of surface attitude and curvature scaling on discrimination of binocularly presented curved surfaces. *Vision Research*, 34, 2409-2423.
- Eagle, R. 1997 Independent processing across spatial frequency in moving broadband patterns. *Perception*, 26, 961-976.
- Erkelens, C.J., Muijs, A.J.M. & van Ee R. 1996 Binocular alignment in different depth planes. *Vision Research*, 36, 2141-2147.
- Gibson, J.J. 1950 *The Perception of the Visual World* (Boston, M.A. Houghton Mifflin)
- Gillam, B. & Borsting, E. 1988 The role of monocular regions in stereoscopic displays. *Perception*, 17, 603-608.
- Glenster, A. 1988 dmax for stereopsis and motion in random dot displays. *Vision Research*, 38, 925-935.
- Goldstein, E.B. 1987 Spatial layout, orientation relative to the observer, and perceived projection in pictures viewed at an angle. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 13, 256-266.
- Howard, I.P. & Ohmi, M. 1992 A new interpretation of the role of dichoptic occlusion in stereopsis. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 33, 1370.
- Hubel, D.H. & Livingstone, M. 1987 Segregation of form, color and stereopsis in primate area 18. *Journal of Neuroscience*, 7, 3378-3415.
- Julesz, B. 1971 *Foundations of cyclopean perception*. Chicago; University of Chicago Press.
- Lee, D.N. 1970 A stroboscopic stereophenomenon. *Vision Research*, 10, 587-593.
- Livingstone, M. & Hubel D.H. 1987 Psychophysical evidence for separate channels for perception of form, color, movement and depth. *Journal of Neuroscience*, 7, 3416-3468.
- Liu, L., Stevenson, S.B. & Schor, C.W. 1994 Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence, *Nature*, 367, 66-68.

参考文献

- Anderson, B.L. 1994 The role of partial occlusion in stereopsis. *Nature*, 367, 365-368.
- Burt, P. & Julesz, B. 1980 Modifications of the classical notion of Panum's fusional area. *Perception*, 9, 671-682.
- Bradley, D.C., Quan, N. & Andersen, R.A. 1995 Integration of motion and stereopsis in middle temporal cortical area of macaques. *Nature (London)*, 373, 609-611.
- Braunstein, M.L. 1968 Motion and texture as sources of slant information. *Journal of Experimental Psychology*, 78, 247-253.
- Cogan, A.L., Kontsevich, L.L., Lomakin, A.J., Halpern, D.L. & Blake, R. 1995 Binocular disparity processing with opposite contrast stimuli. *Perception*, 24, 33-47.
- Cumming, B.G., Shapiro, S.E. & Parker, A.J. 1998 Disparity detection in anti-correlated stereograms. *Perception*, 27, 1367-1377.
- DeAngelis, G.C. & Cumming, B.G., & Newsome, W.T. 1998 Cortical area MT and the perception of stereoscopic depth. *Nature (London)*, 394, 677-680.
- de Vries, S.C., Kappers, A.M. & Koenderink, J.J. 1994

- Morgan, M.J. & Thompson, P. 1975 Apparent movement and the Pulfrich effect. *Perception*, 4, 3-18.
- Maunsell, J.H.R. & Van Essen, D.C. 1983 Functional properties of neurons in middle temporal visual area of the macaque monkey. II Binocular interactions and sensitivity to binocular disparity. *Journal of Neurophysiology*, 49, 1148-1167.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. 1990 da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, 30, 1811-1825.
- Perkins, D.N. 1973 Compensating for distortion in viewing pictures obliquely. *Perception & Psychophysics*, 14, 13-18.
- Prince, S.J., Eagle, R.A. & Rogers, B.J. 1998 Contrast masking reveals spatial-frequency channels in stereopsis. *Perception*, 27, 1345-1355.
- Rosinski, R.R., Mulholland, T., Degelman, D. & Farber, J. 1980 Picture perception: An analysis of visual compensation. *Perception & Psychophysics*, 28, 521-526.
- Saidpour, A., Braunstein, M.L. & Hoffman, D.D. 1992 Interpolation in structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 51, 105-117.
- Stuart, G.W., Edwards, M. & Cook, M.L. 1992 Colour inputs to random-dot stereopsis. *Perception*, 21, 717-729.
- Yang, Y. & Blake, R. 1991 Spatial frequency tuning of human stereopsis. *Vision Research*, 31, 1177-1189.
- Young, M.J., Landy, M.S. & Maloney, L.T. 1993 A perturbation analysis of depth perception from combination of texture and motion cues. *Vision Research*, 33, 2685-2696.