

心理学における 3 次元視研究の動向—1999—

3-Dimensional Perception in Psychology:1999 Research Trends

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

抄録：視覚心理学の領域での 3 次元視研究の動向を，運動要因による立体視，両眼立体視，絵画的要因による立体視，バーチャル・リアリティ，大きさ—距離知覚に分類して報告した。運動要視差，両眼視差の視覚情報処理のしくみについての知見が新たに加わると共に，バーチャル・リアリティ技術に資する研究も盛んになっている。

Abstract: The research papers of 3-dimensional perception in 1999 were reviewed in the fields of depth from motion cue, stereoscopic perception, pictorial cues, virtual rearality and size-distance perception. Knowledges on mechanism of the visual information processing of 3-dimensional perception were newly applied. The research which is useful for the virtual reality technology becomes also popular.

目 次

1. はじめに
2. 運動要因による立体視
 2. 1. 運動視差過程と両眼視差過程の相互作用
 2. 2. オプティク・フローと両眼立体視との相互作用
 2. 3. フリッカーにもとづく奥行出現
 2. 4. オプティク・フローと観察者の自己運動の知覚
3. 両眼立体視
 3. 1. 対応問題
 3. 2. 両眼立体視と運動視における d_{max} 値の関
 3. 3. トランジエントな両眼立体視システムにおける空間周波数と輝度コントラストの同調（チューニング）
 3. 4. 両眼視差が指示する奥行方向に対する認知的修正
 3. 5. 垂直大きさ視差（vertical size disparity）処理のために必要な空間範囲
 3. 6. 大きさ視差（size disparity）とシア視差（shear disparity）
3. 7. 両眼立体視における単眼的要因とキクロピアン要因の相互作用
3. 8. 両眼立体視における奥行恒常性（stereoscopic depth constancy）
3. 9. 両眼立体視におけるテクスチュア，照明と表面反射との関係
3. 10. 網膜的ステレオプシス（sequential stereopsis）
3. 11. 両眼立体視における動的対象の検知
3. 12. 両眼立体視と観察者の移動速度との関係
3. 13. 両眼立体視下での視力
3. 14. 両眼視差検出のためのコンピュータモデル
3. 15. 両眼立体視の神経生理的基礎
3. 16. 両眼立体視の発達
4. 絵画的要因による立体視
 4. 1. 幾何学的錯視
 4. 2. 陰影による立体視
 4. 3. ボケ（blur）要因の立体効果
 4. 4. 絵画的要因の発達
5. バーチャル・リアリティに関する研究
 5. 1. HMD（Head Mount Display）と視覚機能のダメージ

6. 大きさ—奥行距離関係の知覚

6.1. 視えの大きさ判断過程と測量的大きさ判断過程

6.2. 奥行距離知覚とV4領域のニューロン

7. おわりに

1. はじめに

本報告には、心理学における3次元視知覚の研究論文を、Psychological Abstract誌の1999年版から抽出し、目次に示した各領域に分類して紹介した。文献抽出は、DIALOGの文献抽出システムを利用し、検索語は、Distance Perception, Depth Perception, Stereoscopic Visionである。

2. 運動要因による立体視

2.1. 運動視差過程と両眼視差過程の相互作用

片眼で観察された網膜像を両眼間の隔たりの分だけ他眼へとシフトして得られたものが運動視差と考えれば、運動視差過程と両眼視差過程とは類似したしくみをもつことが推定される。今回、奥行視が成立する処理過程で運動視差過程と両眼視差過程との相互作用が存在するかが残効法を用いてしらべられた (Bradshaw & Rogers⁽¹⁾)。はじめに、運動視差で構成したパターン (波形の凹凸水平パターン corrugation) を

順応刺激として提示し、その後でテスト刺激として両眼視差で構成したパターンを提示する条件 (運動視差順応—両眼視差テスト条件)、およびこの逆の両眼視差順応—運動視差テスト条件が設定され、テストパターンで奥行が出現するまでの最小の視差が求められた。その結果、対照条件として設定された両眼視差順応—両眼視差テスト、あるいは運動視差順応—運動視差テスト条件に比較して、実験条件での最小視差の上昇は大きくなることが示された。これは、両眼視差過程、運動視差過程が、独立した過程であることを示す。そこで、両眼視差と運動視差の両要因を組み合わせて構成したパターンの奥行閾値が、両眼視差、運動視差それぞれ単独で構成されたパターンのそれと比較された。その結果、両要因組合せ条件での奥行閾値は、単独条件のそれより有意に小さいことが示された。この結果は、それぞれの過程が完全に独立しているのではなく、最終的な奥行値を計算する過程で、非線形的に相互作用していることを示唆する。

2.2. オプティク・フローと両眼立体視との相互作用

視野の中心から放射状に拡散するオプティク・フローと前額平行で横方向に流れるオプティク・フローとを重ねて提示すると (図1)、放射状に拡散するオプティク・フローの視えの

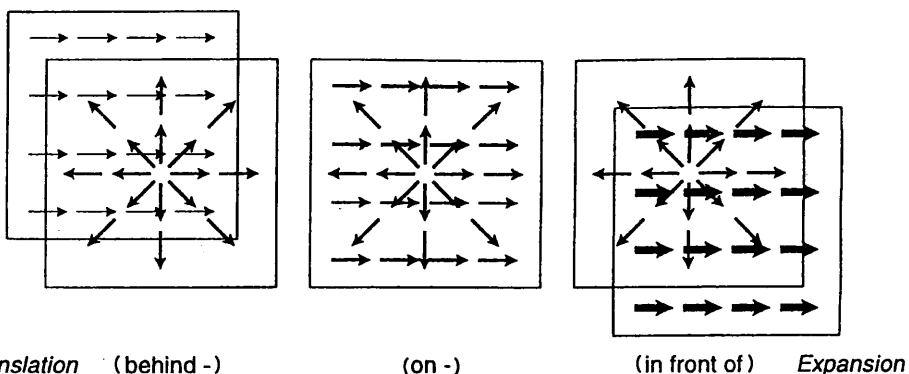


図1 視野の中心から放射状に拡散するオプティク・フローと前額平行で横方向に流れるオプティク・フローとを重ねあわせたオプティク・フロー (Grigo & Lappe 1998)。

中心は実際の中心より横方向に変位する (Duffy & Wurtz 1993, 1995). この変位は2つのオプティク・フローのベクトル計算から予測するものとは反対方向になる. このような変位が起きるのは, 前額平行で横方向のオプティク・フローを眼球の水平方向の回転にもとづく求心性信号として視覚システムが処理するためと説明されてきた. この仮説をさらに発展させて, この変位は, 眼球運動に連動して観察者の頭部の向きを規定するように働くのではないかと Grigo & Lappe⁽¹¹⁾ らによって考えられた. これを検証するために, 放射状に拡散するオプティク・フローに両眼視差をつけて, 横方向のオプティク・フローの手前あるいは後ろに見えるようにパターンを流動させる事態を考案した. もし, 観察者に対するオプティク・フローによる誘導運動が生じるのであれば, 放射状のオプティク・フローが横方向のオプティク・フローより後ろの場合の方が手前にある場合に比較して, 2つのフロー間に生起する奥行程度が大きくなるために, 誘導効果は小さいと予測される. 実験の結果, 放射状のオプティク・フローが後ろにある方が手前にある場合と比較して, 変位量は25%程度減少され, 予測を裏づけた.

2.3. フリッカーにもとづく奥行出現

ランダム・ドットで構成されたパターンの一部をフリッカーさせると, フリッカー領域は地 (グラウンド) として背後に交代し, 非フリッカー領域は図 (フィギュア) として前面に浮き出て見える (Wong & Weisstein 1987). このようなフリッカーに誘導された「地」の効果は, 6-8Hz で最大となり, 1.4Hz 以下あるいは 12.5Hz 以上になると消失する. この種の効果は, 時間一周波数チャンネル (temporal-frequency channel) の存在を仮定して説明される. 高「時間一周波数チャンネル」は, フリッカー刺激を伝達して「地」を, 低「時間一周波数チャンネル」は非フリッカー刺激を伝達して「図」を成立させる. それでは, 互いにフリッカー周期が逆転した2つのフ

リッカー領域 (フリッカーレートは同一) が存在する場合には, どのように図と地が分離するのか, Iwabuchi & Shimizu⁽¹²⁾ によって確かめられた. その結果, フリッカーレートが同一でもフリッカーフェーズが逆周期ならば, 奥行効果が生起するが, しかしどちらの領域が「地」にあるいは「図」になるかは特定できず, 個人によって相違し, また個人内でも奥行反転が起きることが示された. この結果は, 高「時間一周波数チャンネル」が「地」を, 低「時間一周波数チャンネル」が「図」を成立させるとする仮説では説明できない.

2.4. オプティク・フローと観察者の自己運動の知覚

観察者は, 自己が左あるいは右方向に回転運動したときのオプティク・フローを提示されても, そこに奥行に関する情報が存在せず, しかも網膜像以外の手がかりが与えられない場合には, 自己がどの方向に進んでいるかについて (自己運動知覚) 正確に知覚できない (Royden C.S. 1994). 一般的には, 奥行情報が提示されれば, 自己運動知覚の精度は向上することが期待される. そこで, 奥行情報の程度を変え, これが自己運動

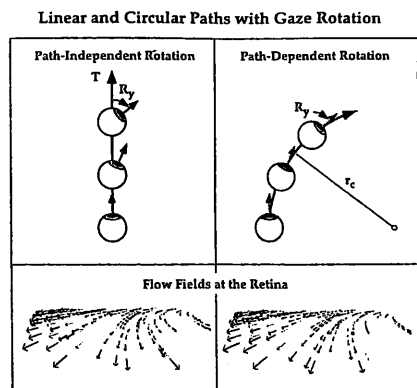


図2 観察者の自己運動知覚をしらべるための2つのオプティク・フロー シミュレーション.

観察者の進行方向と独立に眼球が回転する条件でのオプティク・フローのシミュレーション事態 (Path-Independent Rotation) と, 観察者の進行方向に依存しながら眼球が回転する条件でのオプティク・フローのシミュレーション (Path-Dependent Rotation) (Ehrlich, et, al 1998).

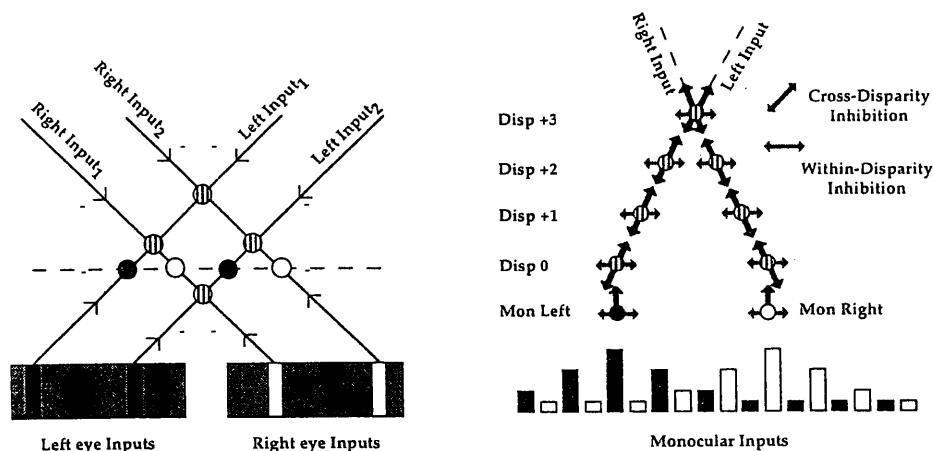


図3 両眼立体視での対応問題解決のモデル。

(a) 左と右眼からの両眼視差情報は相互に比較され、誤対応が抑制される。一方、左と右眼からの単眼情報も相互に比較され、輝度コントラストが異なる場合には抑制がかけられる、(b) 視差の対応は、左と右画像から得られたガウス関数の位相を計算し、その一致したところが視差値として求められる (McLoughlin, N.P. & Grossberg, S. 1997)。

知覚にどのような効果をもたらすかが, Ehrlich et al.⁽⁵⁾ によって検討された。実験は, 図2に示されたように, 観察者の進行方向と独立に眼球が回転する条件でのオブティク・フローのシミュレーション事態 (Path-Independent Rotation) と, 観察者の進行方向に依存しながら眼球が回転する条件でのオブティク・フローのシミュレーション事態 (Path-Dependent Rotation) とを設定し, 網膜像以外の情報は, 画面にターゲットを提示し, それをそのような事態での眼球運動にシミュレートして動かす方法で与えた。観察者は, オプティク・フローを観察した後, 画面に提示されたマーカーを操作して, 自己の進行方向を指示する。その結果, 両眼視差および単眼視での奥行き手がかり (オクルージョン, ダイナミック・オクルージョン, 対象の大きさ変化, リニアースペクティブ) が加味されても, 網膜像以外の要因のフィードバック (観察者の頭部運動とオブティク・フローとの連動) が与えられないと, 観察者の自己運動知覚は向上しないことが示された。自己運動知覚は, 観察場面での観察者の眼球追従運動によって強く規定されている。

3. 両眼立体視

3.1. 対応問題

ステレオグラムの左右画像間の視差対応を計算機論上で問題にするときには, (1) 片方の画像の1点是他方の1点とのみ対応する (ユニークネス条件), (2) 片方の黒点は他方の黒点と対応し, 白点とは対応しない (コントラスト条件), (3) 視差変化は連続する (連続性条件) という前提をおいてその解決を試みる。しかし, パナムの極限事態は, 片方の1本の線分は他方の2本の線分と対応をもつことが可能であり, また, 対象の一部が壁など他のものによって隠蔽され, 対応する領域がなくても立体視が生じるダウッチ・ステレオ視など, この拘束条件に適合しない知覚現象が存在する。そこで, McLoughlin & Grossberg⁽²⁰⁾ は, 対応問題の新たなモデル (図3) を提案した。このモデルでは, 左眼と右眼からの両眼視差情報は相互に比較され, 誤対応が抑制される。視差の対応するところについては, 左右画像から得られたガウス関数の位相を計算し, その一致したところを視差値とする。一方, 左と右眼からの単眼情報も相互に比較され, 輝度

コントラストが異なる場合には抑制がかけられる。このモデルを計算機に実装して実験したところ、パヌムの限界事態などの解決など人間の知覚と同等の結果が得られている。

視差対応問題における多義性を解決するもうひとつの前提にエピソード線の拘束条件がある。この拘束条件によれば、右眼のステレオ画像のすべての点について左眼との対応点を計算するとき、その対応点は右眼の視線が左眼の網膜に投影された線上の点に限定される。Stevenson & Schor⁽³⁰⁾ は、この拘束条件が人間の視差対応で利用されているかを検討するために、図4のような実験パラダイムを考えた。ここでは、ランダムドットで構成されたステレオグラムは中央縦線で左領域と右領域に分断されて提示され、一方の領域は左右画像で対応をなくし、他方の領域にのみ水平視差（交差，非交差とも0-60arcmin）と垂直視差（交差，非交差とも0-60arcmin）をつけて対応を設けた。被験者には、この対応をもつ領域が検出できるのか、さらに、その領域の凹凸の判断を求めた。その結果、設定された垂直視差のかなりの範囲において、左右画像で対応をもつ領域の視差検出が可能であることが示された。このことから、視差対応はエピソード線上に限定できるとする拘束条件は、人間の両眼立体視の視覚システムでは成り立たないことが明らかにされている。

これまで、水平視差は左右網膜像の水平方向の像差からのみ検出され、垂直視差は同様に垂直方向の像差からのみ検出され则认为されてきた。しかし、水平視差と垂直視差はそれぞれ独立に検出されるのではなく、水平方向での対応と垂直方向での対応が合成されて対象の両眼視差が決定され则认为されてもいる。Farell⁽⁶⁾の研究によると、図5-(a)に示されたステレオグラムを両眼立体視すると、放射状の後方に斜線が浮き出すが、ここでは、視差は図(b)に示されたように、水平方向の視差に限定されていない。同様に、図5-(c)に示したステレオグラムでは、一方の斜め方向の帯の視差はゼロ、他

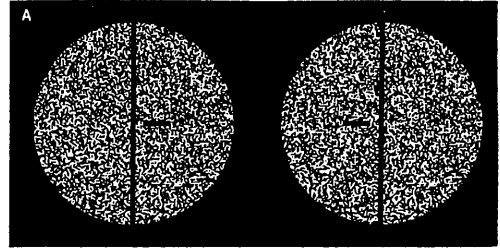


図4 中央縦線で左領域と右領域に分断されたランダム・ドット・ステレオグラム。

片方の領域は左右画像で対応をなくし、他方の領域にのみ水平視差と垂直視差をつけて対応を設定 (Stevenson & Schor 1997)。

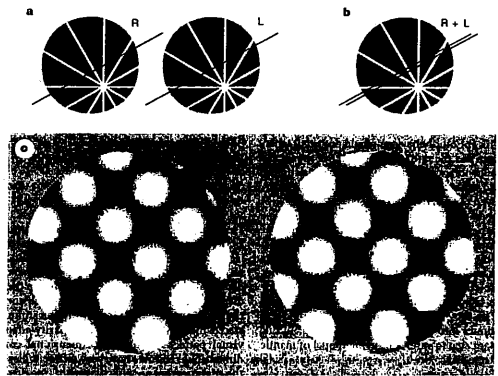


図5 水平方向の視差に限定されないステレオグラム。

(a) 両眼立体視すると放射状パターンの後方に斜線が出現、(b) 図aの左右眼像の重ね合わせ図、図(c) 一方の斜め方向の帯の視差はゼロ、他方の斜め反対方向の帯には視差が付けられていて、これを両眼立体視すると、斜め格子縞一体となって立体的に浮き出る (Farell 1998)。

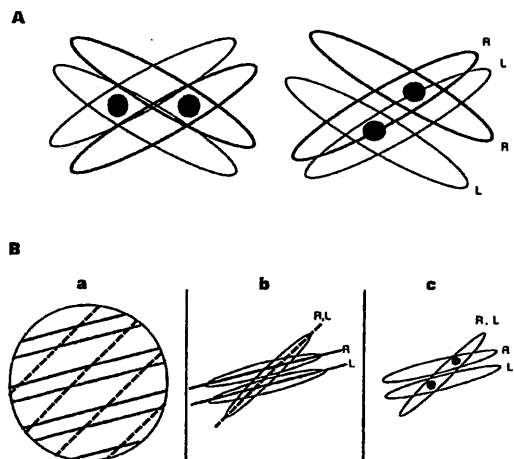


図6 視差検出のモデル、

(A) 1段階モデル、(B) 2段階モデル (Farell 1998)。

方の斜め反対方向の帯には視差が付けられているが、これを両眼立体視すると、斜め格子縞が一体となって立体的に浮き出る。一方の帯（15度）の視差をゼロにして、他方の帯（45度）を（ $+\pi/4$ ）から（ $-\pi/4$ ）の範囲で視差を変えたステレオグラムを作成して両眼立体視すると、45度の帯の視差がマイナスの視差をもつときには格子縞は手前に、プラスの時には後方に視える。しかし、45度の帯の視差をゼロとし、15度の帯の視差を変える条件では、15度の帯がマイナスの時には後方に、プラスの時には手前に視え、前後関係が逆転する。これは、要因となる視差のみでは出現する奥行の方向が決定できないことを示す。この実験結果を説明するモデルとして、1段階モデル（図6-A）と2段階モデル（図6-B）が考えられた。1段階モデルでは、2つの直交する受容野が想定され、対象の水平視差と垂直視差は、受容野の位相の和と差から復元される。2段階モデルでは、その第1段階で1次元の視差要素のみが受容野で検出され、第2段階では互いに交差する賦活した受容野から水平視差と垂直視差が、1段階モデルと同様に計算されて復元される。1段階モデルと2段階モデルの相違は、1段階モデルでは視差の対応処理以前に2次元的な形状の検出がなされるのに対して、2段階モデルでは形状検出以前に視差の対応処理がなされることである。これは順応パラダイムを用いて検討され、その結果、2段階モデルが支持されている。

3.2. 両眼立体視と運動視における d_{\max} 値の相関

d_{\max} とは、運動視において、ある数値（%）以上の判断エラーが出現するときの刺激値をいう（Braddick 1974）。具体的には、水平方向に一定の距離だけドットをシフトさせた2つ刺激パターンを連続提示し、観察者に右方向あるいは左方向に動くのかの判断をさせ、たとえば20%以上の誤判断が生じるシフト距離が d_{\max} とされる。 d_{\max} は、運動視が成立するための上限の刺激

値を意味する。同様に、両眼立体視が成立するための d_{\max} も求められる。左右のステレオグラムの水平方向視差を大きくしていき、20%以上の誤判断（ターゲット刺激が手前もしくは後ろの判断）が生じる刺激値を求めればよい。Glennester⁽⁸⁾ は、ランダム・ドット・パターンを用いて、運動視と両眼立体視の d_{\max} を、ドットの刺激密度を変化させて測定したところ、ドット密度の増大にともなう d_{\max} の変化は、運動視と両眼立体視で同一の結果（ベキ関数変化を示し、ベキ指数は -0.2 となる）となることを見いだした。この結果は、刺激要素の空間散布度が、対応問題の処理過程以前の問題として重要であることを示唆する。実験結果では、 d_{\max} はドット密度が増大するに伴って徐々に小さくなるので、対応問題を処理するときの要素は、パターンの刺激要素そのものではなく、ある範囲の空間周波数フィルターを通して得られたものにもとづくと考えられる。

3.3. トランジエントな両眼立体視システムにおける空間周波数と輝度コントラストの同調

両眼立体視システムは、サステインドなシステムとトランジエントなシステムから構成されている。サステインドなシステムは、ステレオグラムが1秒以上提示されるほど、また視差範囲が1度もしくはバヌムの融合限界以内にあるときに作用し、トランジエントなシステムは、ステレオグラムが短時間提示され、またバヌムの融合限界を越える視差条件で作用する（Harwerth & Rawlings 1977, Schor et al. 1984b, Felton, et al. 1972）。さらに、空間周波数に対する同調をサステインドなシステムとトランジエントなシステムで比較すると、トランジエントなシステムは低空間周波数に同調する（Tyler 1990）。そこで、トランジエントなシステムにおける空間周波数の同調帯域がしらべられた（Schor et al.⁽²⁹⁾）。刺激は σ が1度の狭帯域のガボール・パターンで、空間周波数は0～5 cpdの範囲内で変えられた。

提示時間は140msで、視差は6度設定された。実験に当っては、図7に示されたように、観察者に注視点とノニウス線を注視させた後、視野の上下に提示された2組のガボールパターンから構成されたステレオグラムを両眼立体視させ、どちらが注視点より手前あるいは背後にあるかを判断させる。2組のガボール・パターンの交差あるいは非交差視差は、提示ごとに換えられる。また、ガボール・パターンの左右のステレオペアの輝度コントラストは100%に固定されたが、その空間周波数については両方とも同じ

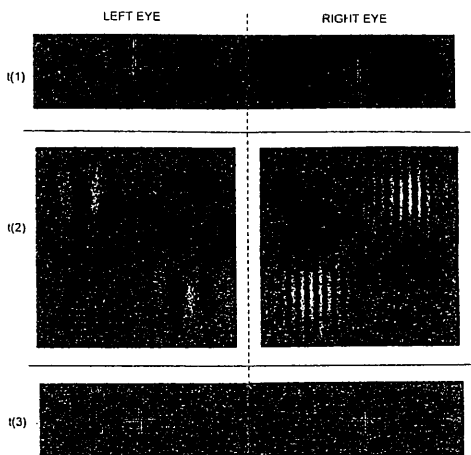


図7 ガボールパターンから構成されたステレオグラムと刺激提示順序。

はじめに、観察者に注視点とノニウス線を注視させた後 (t1)、視野の上下に提示された2組のガボールパターンから構成されたステレオグラムを両眼立体視させ (t2)、どちらが注視点より手前あるいは背後にあるかを判断させ、次いではじめに戻る (t3) (Schor, Edwards & Pope 1998)。

空間周波数 (0, 1, 2, 3, 4, 5cpd) で構成されたもの (対応空間周波数条件) と、片方を0.5cpdに固定し、他方を1, 2, 3, 4, 5cpdに変えたもの (非対応空間周波数条件) とが設けられた。さらに、輝度コントラストに対する同調もしらべられ、この場合には、左右のステレオグラムのガボール・パターンの空間周波数は0.5cpdに固定されるが、その輝度コントラスト (20, 40, 60, 80, 100%) は左右で同じコントラストをもつもの (対応輝度コントラスト条件) と、片方を100%に固定し、他方を20, 40, 60, 80, 100%に変えたもの (非対応輝度コントラスト条件) とが設けられた。実験の結果、(1) 対応空間周波数条件では、遠近の判断の正確度は設定した範囲の空間周波数内では変わらないか、もしくは1cpd以下で向上すること、(2) 非対応空間周波数条件では、遠近の判断の正確度は対応空間周波数条件より低下すること、(3) 非対応輝度コントラスト条件で片方の輝度コントラストが低くなるほど、遠近の判断の正確度は低下すること、(4) しかし、非対応輝度コントラスト条件に非対応空間周波数条件 (0.5と1.0cpd, 0.5と5.0cpd, 1.5と3.5cpd) をもちこみ、その空間周波数の組合せの中で、高い方の空間周波数の輝度コントラストを100%に固定し、低い方の空間周波数を低くすると、遠近の判断の正確度は向上すること、(5) 1.5と3.5cpdの非対応空間周波数条件の組合せで、1.5cpdの輝度コントラストを100%に固定し、3.5cpdのそれを低くしても、遠近の判断の



図8 瞳孔部分が眼球より浮き出たりあるいは凹んだりして見える人間の顔のステレオグラム (Papathomas, T.V. & Morikawa, K. 1998)。

正確度は向上しないこと、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼立体視におけるトランジエントなシステムは、低域通過型の空間周波数特性を持つ単一型チャンネルによって伝達されていて、両眼立体視のための次の過程に入る以前の段階で、出力信号強度にアンバランスがあった場合には、両眼立体視のための出力信号を弱める働きをされると考えられる。

3.4. 両眼視差が指示する奥行方向に対する認知的修正

人間の顔は、それ全体が凸面なので、例え両眼視差を操作して鼻が凹むように設定しても凹んで見えることはない。これは、両眼視差が指示する（データ駆動型）奥行方向を、経験や期待に基づくプロセス（認知駆動型）が抑制するからである。それでは、図8に示されるように、瞳孔の奥行（凹凸）はどのように知覚されるのであろうか。瞳孔の場合には、図7を両眼立体視すると知覚されるが、認知駆動型プロセスは発動せず、瞳孔が眼球から浮き出たり、あるいは

凹んだりして見える (Papathomas & Morikawa⁽²⁵⁾)。

3.5. 垂直大ききさ視差 (vertical size disparity) 処理のために必要な空間範囲

水平視差の場合には、ステレオグラムに複数の視差があれば重なる2つの面を視ることができ、視差0で周囲を囲まれた小片の傾きさえ知覚できる。しかし、垂直大ききさ視差の場合には、局所的に視差処理がなされないので、この種の重なる2つの面や小片の傾きは生起しない (Stenton et al. 1984, Kaneko & Howard 1996)。垂直大ききさ視差は、ある範囲内の視差を平均化処理することによって検出されていると考えられる。そこで、垂直大ききさ視差を検出できる最小の範囲が、Kaneko & Howard⁽¹³⁾によって求められた。垂直大ききさ視差は、ランダム・ドットで構成された面の片眼のステレオ画像に空間周波数 (0.01 cpd, 0.02 cpd, 0.04 cpd, 0.07 cpd, 0.15 cpd の5段階)を導入して設定された(図9)。垂直大ききさ視差によって出現した視えの凹凸面は、

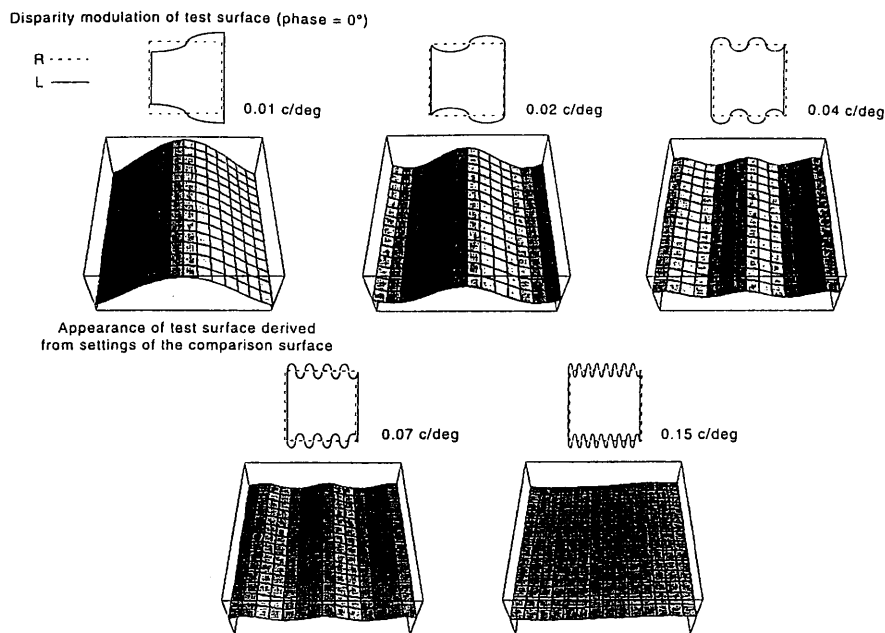


図9 垂直視差の設定とその立体面。

ランダム・ドットで構成された面の片眼のステレオ画像の垂直視差 (0.01 cpd, 0.02 cpd, 0.04 cpd, 0.07 cpd, 0.15 cpd の5段階の空間周波数を導入して設定)、とその垂直視差ステレオグラムから出現した凹凸面 (Kaneko & Howard 1997)。

水平視差を操作して提示された同様な凹凸面とのマッチングで測定された。その結果、垂直大きき視差が0.04cpdより高い空間周波数で構成された場合には、凹凸面が出現しないことが示され、結局、垂直大きき視差は視野20度の範囲の視差の平均化処理で検出されると考えられる。

3.6. 大きき視差 (size disparity) とシア視差 (shear disparity)

視野の水平方向を拡大するレンズを右眼に装着して前額平行面を両眼立体視すると、前額平行面が垂直軸に関して傾斜して見え、この場合には右視野が後退し左視野が前方に進出する(幾何学的効果geometric effect)。また、視野の垂直方向を拡大するレンズを右眼に装着して前額平行面を両眼立体視すると、同様に、前額平行面が垂直軸に関して傾斜して見えるが、この場合には左視野が後退し右視野が前方に進出する(誘導効果induced effect)。さらに、片眼の視野の前額平行面を水平軸あるいは垂直軸に回転して提示して両眼立体視すると、前額平行面が水平軸に関して傾斜して見える。これらの関係を体系化して図示すると(図10)、まず、大きき視差変化とシア視差変化に分類でき、さらにこれらの視差変化を、前者では拡散操作(divergence)、水平方向大きき変化、および垂直方向大きき変化によって生じるもの、後者は回転操作(rotation)、垂直軸を中心とした回転(垂直方向シア)、および水平軸を中心とした回転(水平方向シア)によるものにそれぞれ分類する。この操作からは前者では水平方向大きき視差と垂直方向大きき視差が、後者では水平方向シア視差と垂直方向シア視差が生成され、これらの視差から成立したステレオグラムを両眼立体視すると、前者では垂直軸に関して前額平行面が傾斜して、後者では同様に水平軸に関して傾斜して見える。この大きき視差およびシア視差にもとづく前額平行面の視えの傾斜度については、垂直軸を中心とした視えの傾斜度は水平方向大きき視差と垂直方向大きき視差の差で規定され、

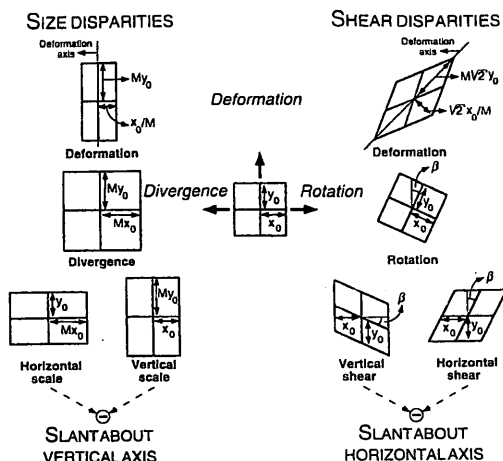


図10 大きき視差とシア視差.

大きき視差は拡散操作 (divergence)、水平方向大きき変化、垂直方向大きき変化によって、シア視差は回転操作 (rotation)、垂直軸を中心とした回転(垂直方向シア)、水平軸を中心とした回転(水平方向シア)によって生じる (Van Ee & Erkelens 1998)。

同様に水平軸を中心とした視えの傾斜度は水平方向シア視差と垂直方向シア視差の差で規定されると考えられた (Kaneko & Howard (1996), Howard & Kaneko (1997))。この仮説は、Van Ee & Erkelens⁽³³⁾ によってさらに精緻化、数式化されて提案された(図11)。3種類のいずれもリニアな処理過程が示されているが、加重過程と傾斜検出過程をどこに挿入するかで異なる(視え傾斜度の計算式も異なる)。Van Eeらは、多数の小円(直径が視角1.5°)で構成されたステレオグラムの片方の画像に、水平方向大きき変化、垂直方向大きき変化、拡散、水平方向シア変化、垂直方向シア変化、回転の6種類の操作を加え、その結果生じる視えの傾斜角変化を、スケールとして提示した2つの線分の角度で調整してマッチングさせた。実験結果からは、提案された3種類の処理仮説のいずれが妥当かまでは明らかにできていないが、基本的には、Howardらのリニアな処理過程仮説が支持されている。

3.7. 両眼立体視における単眼的要因とキクロピアン要因の相互作用

両眼立体視における単眼的要因とは、ステレ

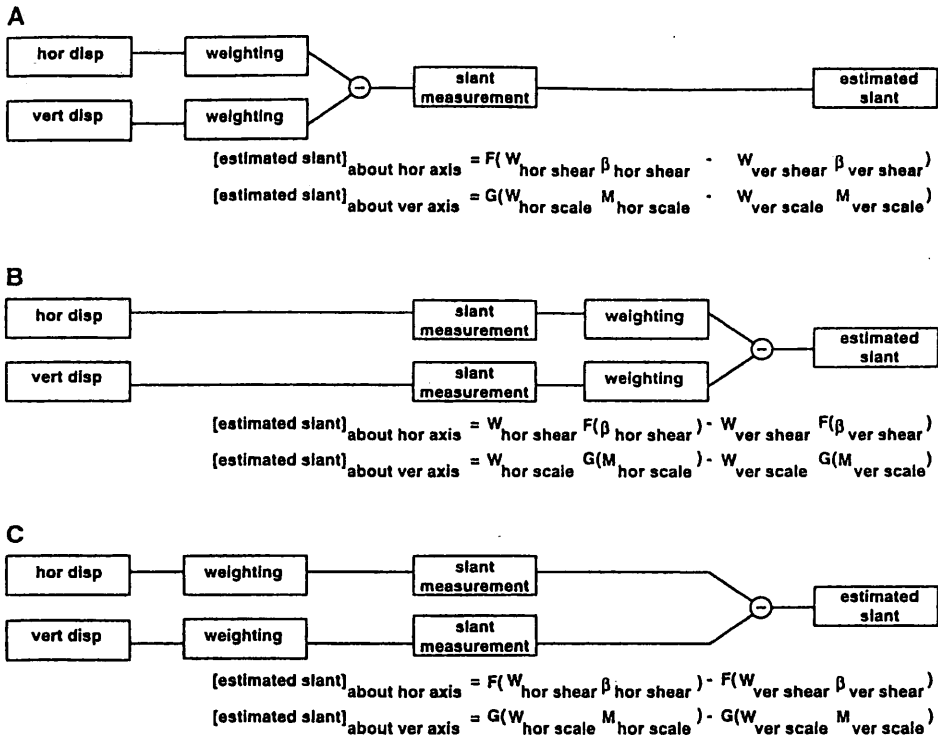


図11 大きさ視差とシア視差の処理過程についての線形仮説 (Van Ee & Erkelens 1998).

オグラムにおいて単眼でも識別できる形状要素をもつものをいい、キクロピアン要因とはRDSにみられるように、ドットですべて構成されているため、単眼で識別できる形状をもたないものをいう。Papathomas, Feher & Julesz⁽²⁶⁾は、エビングハウス錯視図形のステレオグラムを単眼的要因(図12-a)とキクロピアン要因(図12-b)とで構成し、錯視量がどのように変化するかをしらべた。錯視図形を構成する要素は、周囲の誘導円と中央のテスト円の2要素なので、誘導円、テスト円とも単眼的要因で構成したステレオグラム、誘導円とテスト円ともキクロピアン要因で構成したステレオグラム、誘導円は単眼的要因で、テスト円はキクロピアン要因で構成したステレオグラム、誘導円はキクロピアン要因で、テスト円は単眼的要因で構成したステレオグラムの4種類を作成した。錯視量は誘導円の両眼視差量を変化させた条件で定量的に測定された。その結果、(1)テスト円と誘導円

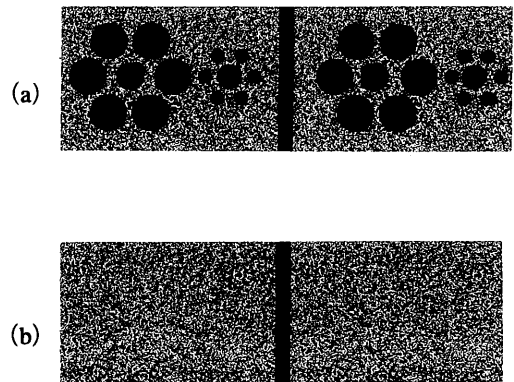


図12 エビングハウス錯視図形のステレオグラム。(a)単眼的要因から構成されたステレオグラム、(b)キクロピアン要因から構成されたステレオグラム

(Papathomas, T.V., Feher, A. & Julesz, B. 1996)

との間の奥行き量は、テスト円がキクロピアン要因で構成されているときには強い影響をもち、テスト円と誘導円が同一奥行き面にあるときに最大となり、奥行き量が大きくなると減少する。しかしテスト円が単眼的要因で構成された条件では2つの円の間の奥行き量は錯視量に影響しない

こと、(2) テスト円がキクロピアン要因で構成されているときの錯視量は、誘導円がキクロピアン要因あるいは単眼的要因のどちらでも等しいが、テスト円が単眼的要因で構成されているときの錯視量は、誘導円がキクロピアン要因で構成された条件より単眼的要因で構成された条件の方が大きくなること、などが見いだされた。このことから、キクロピアン要因で構成されたテスト円は、キクロピアン要因で構成された誘導円とのみ相互作用すると考えられる。

3.8. 両眼立体視における奥行恒常性 (stereoscopic depth constancy)

両眼視差で出現する相対的奥行量は、観察距離の二乗に反比例する。しかし、視えの奥行量は、そのような減少を示さず、恒常を維持する(奥行恒常性)。視覚システムは、何らかの方法で、観察距離と視差量との関係を計算し補正した上で、相対的奥行量を決めていると考えられる。奥行恒常性についてのこれまでの研究では、さまざまな観察条件で、その恒常度を測定してきたが、観察距離が大きい条件では恒常度が100%を示す結果もあり、一定しない(Foley 1980)。Glennester et al. (9) は、2つの観察課題を設定し、観察距離、奥行手がかりなどを同等にした条件で、奥行恒常性を測定した。観察課題のひとつは、観察距離の異なる位置(38, 57, 76, 114, 228cm)に提示された水平方向の波形の凹凸パターンの頂と底の奥行を標準距離と定められた位置(57cm)の同型のパターンの頂と底を変化させてマッチングさせるものであり、もうひとつは同様に観察距離の異なる位置に碗状の形状をもつものあるいはくさび型の形状をもつものを観察者からその底が凹むように提示し、碗形状では底までの深さと碗の口径が等しくなるように、くさび型形状ではくさびが90度になるように調整させるものである。前者の課題は、奥行を直感的に判断でき、後者では測量的な態度が必要となる。実験の結果、前者の課題では奥行恒常性が100%を示し、後者の課題ではそれ

は75%に留まった。このことから、両眼視差立体視のしくみには、直感的課題に対応する過程と測量的な課題に対応する過程とが存在すると考えられる。

3.9. 両眼立体視におけるテクスチャ、照明と表面反射との関係

照明方向と表面反射との関係は、図13-(a)に示されたように、整反射と乱反射(ランバート反射)とがある。両眼立体視において、この整反射と乱反射が立体の復元にどのように影響するかが、Todd, et al. (31) によって実験的に検討された。とくに、整反射条件では図13-(b)に明らかなように、光が照射された点の網膜への投影点が左右眼で異なるので、その融合像の位置は、実際の位置よりシフトして見える。ステレオグラムは、図13-(c)のように、テクスチャを用いたものとテクスチャのないものとで構成され、テクスチャのあるもの(c-1)の

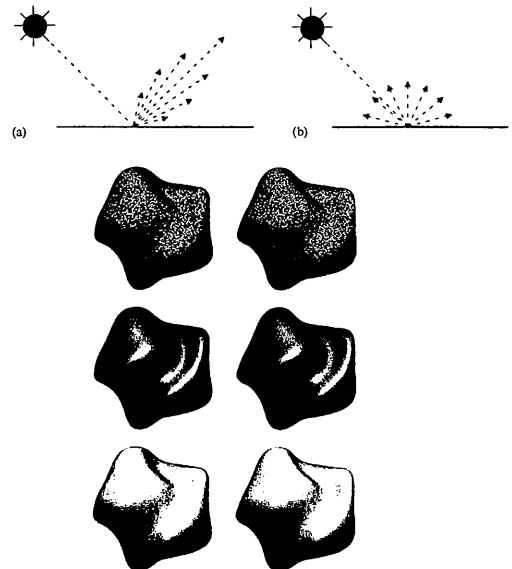


図13 照明方向と表面反射との関係を考慮したステレオグラム。

(a) 整反射, (b) 乱反射(ランバート反射)。 (c-1) 整反射が30%, 乱反射70%のテクスチャのあるステレオグラム, (c-2) 整反射30%, 乱反射40%, 包囲反射30%のテクスチャのないステレオグラム, (c-3) 乱反射70%, 包囲反射30%で整反射はゼロのテクスチャのないステレオグラム (Todd 1997)。

光反射は、整反射30%、乱反射70%、テクスチャのないもの光反射は2種類作成され、その1(c-2)は整反射30%、乱反射40%、包囲反射30%、その2(c-3)は乱反射70%、包囲反射30%で整反射はゼロである。このステレオグラムを立体視したときの立体復元の正確度が、小さな小片をプローブとして提示し、これを出現した凹凸面上に接触させるように位置させる方法で凹凸の程度を測定して求められた。その結果、立体復元の正確度は、整反射をもつテクスチャ条件でもっとも高く、次いで整反射をもつ非テクスチャ条件の順であった。整反射条件で立体復元の正確度が高いと言うことは、視覚システムは両眼立体視の処理過程で、整反射による投影変位をノイズとして処理するのではなく、復元する面の位置情報として生かしていると考えられる。

3.10. 継時的ステレオプシス (sequential stereopsis)

前額平行に置かれた2つの対象間の奥行き差を、両対象の一方のみを注視して判断するより、両対象を交互に注視して判断する方が正確になされる(Enright 1995, 1996)。これは、一方の対象の輻輳角の情報が他方の対象へと注視点を移動しても正確に保存されるしくみ(継時的ステレオプシス)のためである。この種のステレオプシスのしくみの存在を検証するために、図14に示されたように装置が、Enrightによって考案された。ここで工夫しなければならない条件は、注視点を交互に移動させたとき、2つの対象が同時には見えないようにすることである。そのために、対象の面のテクスチャに非常に細かな粒状パターン(サンドペーパー)を用い、中心視では見えるが、周辺視ではその解像度の範囲外になるように設定された。このようにすると、一方の対象を注視するとき、他方は周辺視になるので、2つの対象を同時にみることは不可能となる。Frisby, et al.⁽⁷⁾は、高空間周波数フィルター(16cpd)を利用してサンドペーパーの低空

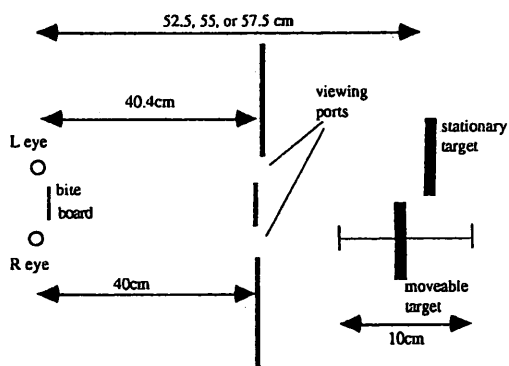


図14 継時的ステレオプシスのしくみの存在を検証するための実験装置(Frisby, et al., 1997)。

間周波数部分を除去して追試したところ、継時的ステレオプシスの存在を支持する結果が得られた。

3.1.1. 両眼立体視における動的対象の検知

生態学的には、両眼立体視の特性のひとつは混沌とした背景の中から対象を浮き上がらせることができる点にある。これは静止した背景の中で動的対象が存在すれば、容易に検知されることと同一である。それでは、両眼立体視した対象の中での動的対象の検知はどのようなであろうか。McKee, et al.⁽¹⁹⁾は、ランダム・ドットで構成したシリンダー形状のなかに斜方向に移動するひとつの動的なドットの検知を、その他のノイズとして提示したドットがランダムに運動する条件下で試みたところ、その検知能力が低いことが示された。これは2つの面を奥行き位置を隔てて提示し、その間に同様な動的なドットを提示した場合にも同様な結果であった。両眼立体視過程では時間的(トランジエント)解像能力が低いことが知られているが、ここでも多くのランダムに運動するドット(ノイズ)の処理に逐われ、ターゲットである動的なドットの検知能力が低下したと考えられる。

3.12. 両眼立体視と観察者の移動速度との関係

両眼立体視と観察者の運動速度との関係は、図15のようになる (Ziegler & Roy⁽³⁵⁾)。これによると、観察者が中央を注視している場合、観察者の移動に伴う両眼視差の移動は、注視点からはずれるほど大きくなる。そこで、実験では比較的大きな視差 ($1^{\circ} - 6^{\circ}$) を用いることにし、ドットから構成された帯状の対象を交差あるいは非交差視差で提示し、それを 20, 40, 60 deg/sec で移動させた。観察者は静止したまま、瞬間提示される運動対象を観察し、その帯状の対象が注視点の手前あるいは後ろを判断する。実験の結果は、運動速度が速くなるほど、奥行判断の正確度は上昇することが示された。これは、融合限界を超えた視差でしかも静止したステレオグラム条件では左右の視差対応は困難であるが、対象が運動する条件では、片眼へ入力された視差を他眼に時間的に遅れて入力された視差と対応させるとき、他眼に入力された視差の一部が遅れて入力されたために減殺され、結果として左右の視差が融合範囲に入るためと考えられる。

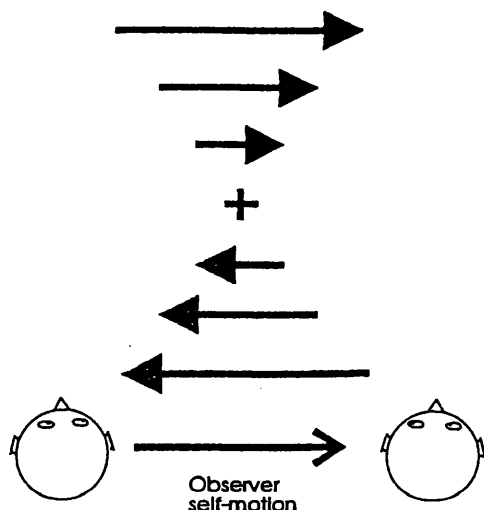


図15 観察者が移動している条件での両眼立体視。観察者が中央を注視している場合、観察者の移動に伴う両眼視差の移動は、注視点からはずれるほど大きくなる (Ziegler & Roy 1998)。

3.13. 両眼立体視下での視力

両眼立体視下での視力とは、一定の両眼視差を保ちながら融合された対象の大きさを小さくしていき、どの程度まで見ることが可能かをさす。Schlesinger & Yeshurun⁽²⁸⁾ は、ランダム・ドット・ステレオグラムの視差を一定 ($3'$ から $9'$ の間の視差を用いる) に維持し、浮かび出る対象 (矩形) の大きさ ($6'$ から $24'$ の間で $3'$ のステップで変化) を変化し、どの程度まで縮小したら見分けられなくなるかを検査した。その結果、75% の正答が得られた対象の大きさは、測定した視差範囲では、 $8'$ から $15'$ の間にあった。これは視差に依存して変化し、視差が大きくなると、視力は良くなることを示す。単眼視力がおよそ $0.5'$ から $1'$ であるのに比較して、両眼立体視下でのそれは、相当程度悪いことを示す。さらに、融合対象の網膜位置を中心窩から周辺視へと移すと、周辺視になるほど、両眼立体視下での視力は低下した。この結果から、両眼立体視は、点領域の情報が処理されるのではなく、ある範囲の領域の情報が処理されて成立するために、両眼立体視下での解像度が低下すると考えられる。

3.14. 両眼視差検出のためのコンピュータモデル

人間の両眼視差検出過程を考慮した視差検出のコンピュータモデルが Gray et al.⁽¹⁰⁾ によって提案された。そのモデルの処理の流れは、図16に示されている。はじめに、左右のステレオ画像は周波数と位相の異なる空間周波数フィルター (ガウスフィルター) で結合されて出力される。次に、その出力値は、局所的視差器 (local disparity pathway) と選択器 (selection pathway) にかけてられる。局所的視差器および選択器の X 軸は画像の位置を、Y 軸は視差を表し、局所的視差器および選択器では、最適な画像の位置と視差が抽出され、空間出力器 (space output) に出力される。このモデルを実装して、視差を 2 画素とったステレオ画像で実行した結果が、図17に示されている。ステレオ画像の右画像は、入力刺激

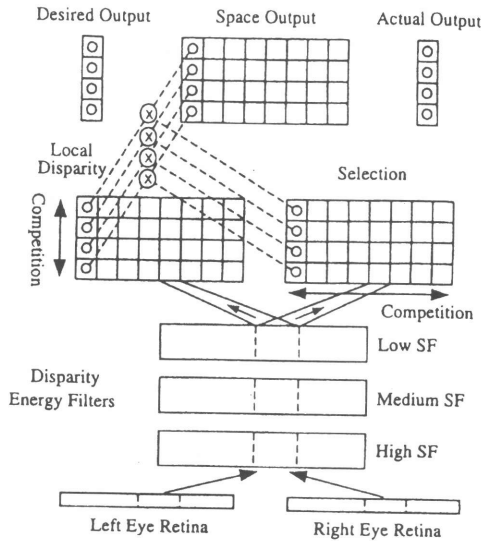


図 16 両眼視差検出のためのコンピュータモデル。はじめに、左右のステレオ画像は周波数と位相の異なる空間周波数フィルタ（ガウスフィルタ）で結合されて出力される。次いで、その出力値は、局所的視差器（local disparity pathway）と選択器（selection pathway）にかけられる。局所的視差器および選択器のX軸は画像の位置を、Y軸は視差を表し、局所的視差器および選択器では、最適な画像の位置と視差が抽出される（Gray,M.S. et al. 1998）。

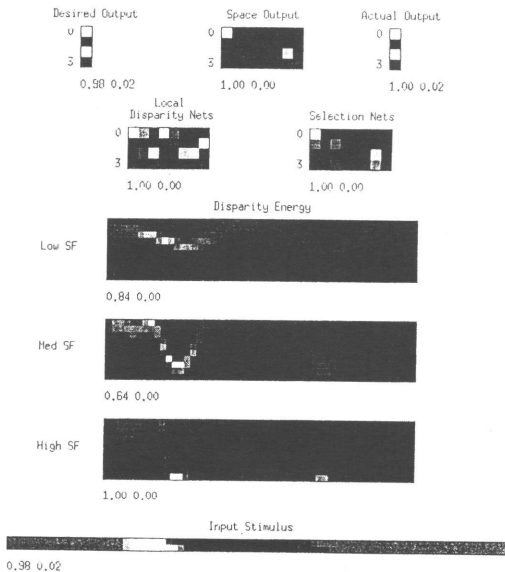


図 17 コンピュータによる両眼視差検出の実行結果（Gray,M.S. et al. 1998）。

の上方に左画像は下方に表示され、高、中、低の空間周波数フィルタを通して検出された最適な視差値が最上行の右端に示されている。

3.15. 両眼立体視の神経生理的基礎

両眼視差検出のための単純型受容野特性は、これまで、位置モデル（positional model）で説明されてきた（Hubel & Wiesel 1962, Schiller et al. 1976, Movshon, et al. 1978, Mullikin et al. 1984, Jones & Palmer, 1987）。位置モデル（図 18 - E）では、左右のステレオ画像の水平視差は、ニューロンの神経興奮のピークの位置がシフトされることで検出されると考えられた。ここでは、左右画像の視差を検出する受容野は、左右眼で同一の構造であることが仮定されているが、これはまだ確認されていない。この位置モデルに対して、位相モデル（phase model, 図 -F）が Ohzawa et al. (23) によって提唱された。このモデルによると、視差検出のための単純型受容野の構造はガボール関数でもっとも近似できる構造をもち、したがって左右ステレオ画像の水平視差は刺激の輝度変化にもとづく位相差から検出される。この位相モデルによる単純型受容野の検証が、ネコの単純型受容野の単一ニューロンで試みら

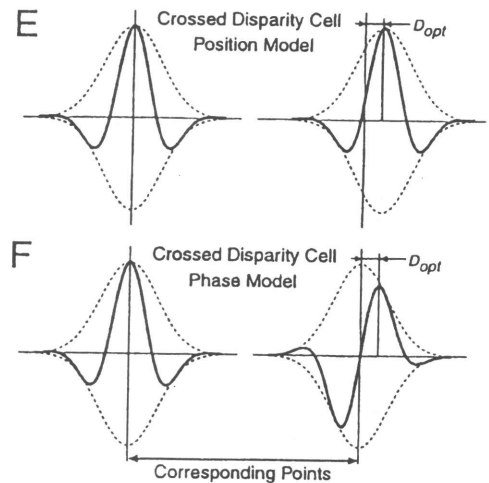


図 18 両眼視差検出に関わる単純型受容野における位置モデルと位相モデル（Ohzawa et al. 1996）。

れた。実験は、左右の眼に別々に水平視差をもち、しかも輝度の逆転した小さな矩形刺激を、視差、輝度ともランダムな順序で次々と瞬間提示(30-50 ms)し、このときの全スパイク反応を水平と垂直方向のマップ上に記録する方法(reverse correlation method)で行われた。その結果の一例が図19に示されている。左右眼の単純型受容野の構造が2次元のマップに、その位相曲線が下方にそれぞれ示され、その構造は位相モデルで予測されたものとなっている。

両眼視差に選択的に反応するニューロンがサルのV1, V2, V3, MT, MSTに広く存在するこ

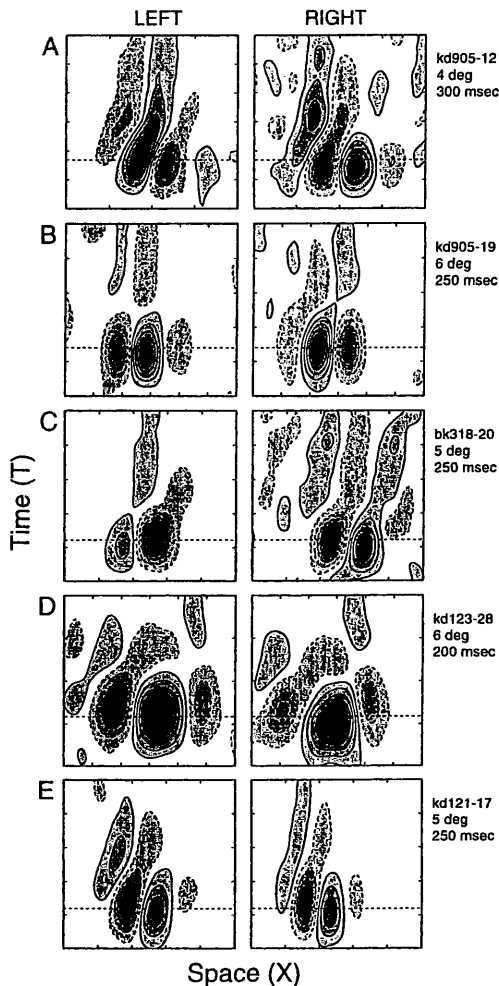


図19 reverse correlation法による単純型受容野の単一ニューロンの測定結果 (Ohzawa et al. 1996)。

とは、すでに確認されている (Hubel & Wiesel 1970, Poggio & Fisher 1977, Maunsell & Van Essen, 1983, Fellman & Van Essen 1987, Poggio et al. 1988)。この種のニューロンがすべて立体視出現に関与するかはいまだ不明である。事実、それらのニューロンの中で、輻輳の制御に関係すると考えられるものも存在する (Cumming & Parker 1997, Masson et al. 1997)。そこで、MT野の両眼視差に選択的なニューロンの働きについて DeAngelis, et al. ⁽³⁾ によって詳しく検討された。MT野には運動視に関係するニューロンが多数存在するが、その他にも両眼視差に反応するものも存在する。彼らのMT野の運動視のニューロンについての研究によれば、一群のニューロンに微小電極を通して電氣的に刺激を送ると、そのニューロンが介在する運動方向知覚にバイアスをかけることが可能である (Salzman, et al. 1992, Salzman & Newsome 1994)。同様な手法が両眼視差ニューロンの働きの分析にも使用され、一群のニューロンに電氣的なバイアスをかけ、目的の方向に遠近知覚がシフトされるか否かがサルでしらべられた。方法は、図20に示されたように、はじめに注視点が提示され、次いでRDSの提示と分析対象とするニューロンへの電氣的刺激、そして最後に注視点の上方と下方にターゲット刺激を提示して眼球運動を測定する。被

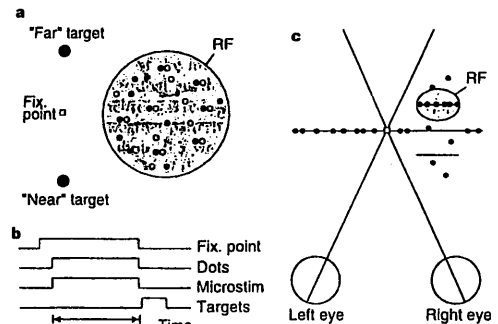


図20 MT野の両眼視差ニューロンに対するマイクロスティミュレーション

(a) ターゲット刺激とRDS, (b) 刺激提示順序, (c) 被験体から見た刺激の提示位置 (Deangelis, Cumming & Newsome 1998)

験体には、あらかじめ、注視点より遠くの対象が提示されたら眼球を上方に、注視点より近くに提示されたら下方に眼球をサッケードさせるように学習しておく。RDSが立体視されると、その半数のドットが注視点近辺に、残りの半数がそれより遠くあるいは近くに出現して見える。実験の結果、注視点より遠くあるいは近くを指示する両眼視差ニューロンに対して電氣的刺激を加えた条件では、この種の電氣的刺激を加えなかった条件に比較して、眼球のサッケード反応が電氣的操作を加えた方向に頻度多く生じることが示された。このことから、MT野においても、両眼視差に選択的に反応するニューロンが存在し、しかもそれらは立体視に連動する行動のシグナルとして機能すると考えられる。

また、図21に示されたような、両眼視差は存在するが、それに対応するドットが存在しないステレオグラム (anticorrelated random dot stereogram, A-RDS) では、左右のステレオ画像を構成するドットの輝度が逆転しているために、両眼立体視が成立しない。Cumming & Parker⁽²⁾は、A-RDSを72 Hzで新しいパターンに書き換える事態 (ダイナミック提示条件) で連続的に提示し、覚醒状態で両眼立体視中のサル (Macaca mulatta) の第1次視覚領 (V1) の単一ニューロンの反応を測定した。その結果、V1で視差に選択的な応答特性を持つニューロンは、視差を検出できることが示されたが、しかしA-RDSの視差に対するニューロンのチューニング特性は、C-RDS (correlated random dot stereogram) の視差

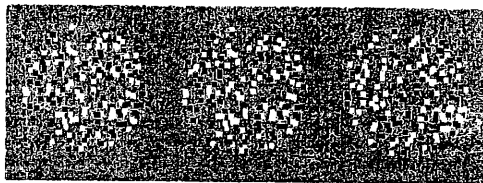


図21 A-RDS (anticorrelated random dot stereogram) とC-RDS (correlated random dot stereogram)。

図の中央のパターンと左のパターンの組合せがC-RDS、中央のパターンと右のパターンの組合せがA-RDSとなる (Cumming & Parker 1997)。

に対するそれと正反対の特性をもつことが示された。このことから、V1の視差検出ニューロンは、視差を検出できるが、両眼視差にもとづく立体を、この段階では示すことはできないと考えられる。

それでは、両眼立体視の成立過程を考えると、この種のニューロンの役割は何であろうか。A-RDSとC-RDSを提示した後に生じる両眼輻輳が、Masson, et al.⁽¹⁷⁾によって、人間とサルで測定された。その結果、C-RDSでは輻輳が、A-RDSでは逆に開散が、RDSの提示から極めて短時間 (60-80 ms) に生じることが確認された。先の結果と併せて考えると、V1における視差検出ニューロンが、両眼輻輳運動をコントロールしていると示唆される。

対象の立体性や対象間の相対的な奥行は水平視差によって、対象までの絶対的な奥行は輻輳、調節、および垂直視差によって、それぞれ担われている。対象までの絶対的奥行距離が変わると、幾何光学的には、網膜像の大きさは奥行距離に反比例し、水平視差は奥行距離の2乗に反比例するので、対象の3次元形状は平板になるはずであるが、実際には対象の形状の3次元性は維持されて見える (奥行恒常性, depth constancy)。奥行恒常性が生起するのは、多分、輻輳、調節など奥行絶対距離を伝達する手がかりが補償的に機能するからと考えられる。これを検証するために、サルのV1視覚領の単一ニューロンが水平視差と奥行絶対距離との連動によって活性化されるか否かが、Trotter, et al.⁽³²⁾によって測定された。RDSを奥行絶対距離を3段階 (20, 40, 80 cm) に変えて提示し (RDSの視角は常に一定に操作する)、このときの単一ニューロンの反応を測定する。水平視差に選択的に反応する78個のニューロンのうち77%のものが、奥行絶対距離の変化でその反応強度を大きく変えることが示された。とくに36%のニューロンは、近い距離範囲の変化で、その反応を出現もしくは消失など劇的に変化した。奥行絶対距離を変える代わりにプリズムを用いて輻輳を変化した場

合にも、輻輳角度が変わると、ニューロンの反応が絶対距離変化と同様な変化を起こすことが確認された。このことから、視覚情報処理の初期段階で網膜からの視覚情報と網膜以外から情報との統合が行われていると考えられる。

3.16. 両眼立体視の発達

人間の両眼立体視能力は3～4月齢まではあられてこないが、これ以降、5～6週で急速に発達し、成人のレベルに近づく(Held et al., 1980, Birch, et al., 1982, Birch 1993)。サル乳児の両眼立体視能力の発達は、これまでデータがないので、O'Dell & Boothe⁽²²⁾によってしらべられた。両眼立体視能力は、11個体のアカゲザルの乳児に視差のあるRDSと視差のないRDSを並べて提示し、どちらに対して注視反応が出現するかで測定された。その結果、サルの乳児は8週齢になると、1760秒程度の粗い視差に反応するようになり、13週齢になると88秒程度の細かい視差にも反応できるようになることが示された。

4. 絵画的要因による立体視

4.1. 幾何学的錯視

水平—垂直錯視は、これまで、フレーム説(Kunapas 1955, 1957)もしくはパースペクティブ説(Gregory 1963, Girgus & Coren 1975)にもとづいて説明されてきた。フレーム説では、線分の長さ判断に与える知覚的枠組の形状の影響を重視し、水平方向より垂直方向の長さが大きい枠組の場合には、水平方向に置かれた線分の方が垂直方向の線分より長く知覚され、逆に、水平方向より垂直方向の長さが小さい枠組の場合には、水平方向に置かれた線分の方が垂直方向の線分より短く知覚されるという。視野は垂直方向より水平方向に長い楕円を形作るので、垂直線分の方が長く見えることになり、水平—垂直錯視が生起する。一方、パースペクティブ説では、視野は、遠方へと伸びる奥行をもつので、

垂直方向に置かれた線分は水平方向のそれより遠くに位置すると知覚され、その結果、大きな恒常性を生起させるスケールが適用されて垂直線分の方が長く見える錯視が生じると説明する。両仮説の検証実験が再度、図22のような刺激条件で試みられた(Williams & Enns⁽³⁴⁾)。ここではフレーム条件(水平方向が垂直方向より長い条件とその逆の条件)と奥行条件(垂直方向に奥行がとられている条件と水平方向に奥行面が傾いている条件)とがそれぞれ組み合わせられた事態で、水平方向に対する垂直方向の線分の長さ判断が恒常法で求められた。その結果、フレームが水平方向で長く、奥行が垂直方向にとられた条件でもっとも錯視量が大きく、フレームが垂直方向に長く、奥行が水平方向に傾く条件でもっとも錯視量が小さくなることが示された。このことから、水平—垂直錯視は、フレーム効果と奥行効果の両要因がともに加算的に影響する現象と考えられる。

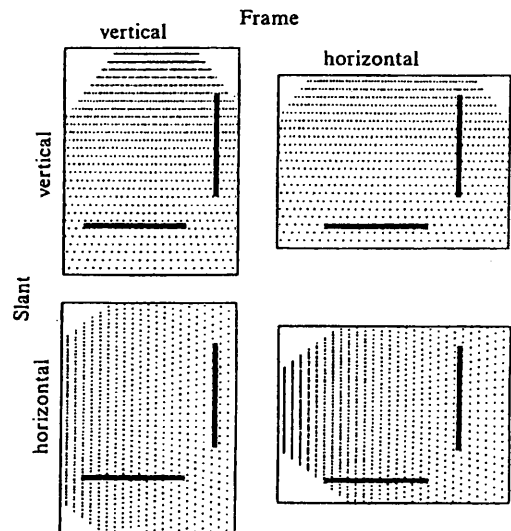


図22 水平—垂直錯視に与えるフレーム(知覚的枠組)と奥行要因の影響。

フレーム要因には、水平方向に広がりをもつものと垂直方向に広がりをもつものだが、奥行要因としては、垂直方向に面が遠のくものと左右方向に傾くものとが設定された(Williams, P.A. & Enns, J.T. 1996)。

4.2. 陰影による立体視

人間の視覚システムは、(1) 照明は上方から照射されること、(2) 照明のための光源はひとつであることを拘束条件として陰影から立体を復元する。Morris⁽²¹⁾の観察によれば、陰影を上方もしくは下方から側方へとシフトすると、奥行方向の反転や奥行出現の消失が起きるが、これらはいずれも光源がひとつであるとする拘束条件から生じることを明らかにしている。

対象の陰影を動かすことによって対象をあたかも奥行方向にシフトしたように見させることが可能なことを、Kersten, Mamassian & Knill⁽¹⁵⁾が示した。図23に示されたように、白い面対象の陰影の付け方を変えることによって、背景と

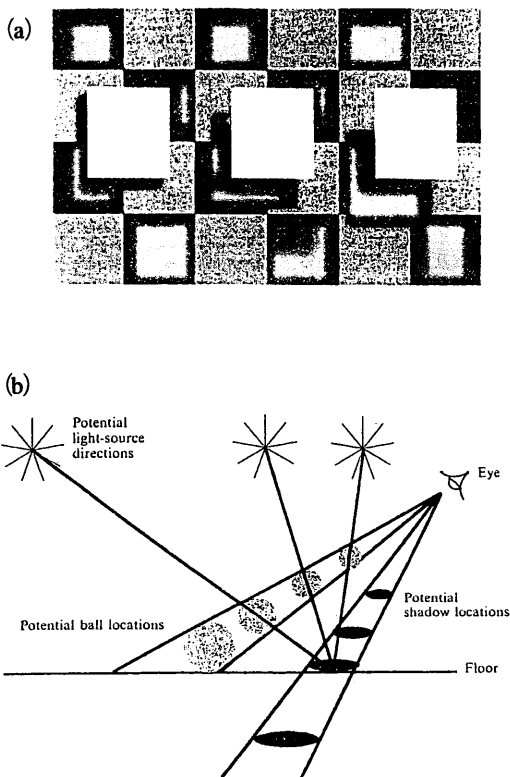


図23 (a) 陰影と立体効果。

白い面対象の陰影の付け方を変えることによって背景と白い面対象との間の奥行が異なって知覚される。

(b) 観察者の視点位置、光源位置および陰影の投影される面の位置との関係。

観察者の視点と光源位置が決まっても陰影投影面の位置は特定できない (Kersten, Mamassian & Knill 1997)。

白い面対象との間の奥行が異なって知覚さる。これを、連続的にアニメーションで提示すると、白い面対象は背景から浮き上がるように見える。一般的には、対象が作り出す陰影の位置と形状は、観察者の位置および照明方向で規定される。観察者の位置が既知であるとした場合、照明方向と陰影の位置と形状は複数通り可能である。対象の陰影をアニメーションで動かすと、光源の位置がシフトしたと知覚するのではなく、対象が奥行方向に移動したと知覚することから、人間は光源を静止していることを前提 (拘束条件) とした陰影情報処理を行うと考えられる。観察者の位置と照明方向が既知でも、対象の作り出す陰影が投影された面の位置は特定できない。図23に示されたように、陰影が投影された面の位置は、陰影の投影されるはずのフロア (floor) を透過、あるいは浮上した位置に成立した場合には、一意的には規定されなく多義的となるからである。この場合には、人間の視覚システムは、対象が置かれたフロア面と陰影が投影された面とは同一の面であるとの前提 (拘束条件) を置いて、陰影のある面の位置を特定すると考えられる。陰影から対象の奥行位置を特定するためには、観察者の視点の一般化 (一般視点)、光源の静止、フロア面と陰影投影面の一致、という3つの拘束条件を前提としなければならない。

4.3. ボケ (blur) 要因の立体効果

図24に示されたように、対象の輪郭あるいは対象の背景のボケ (blur) は立体効果をもつ。対象の輪郭のボケ範囲の半径 (s) は、次の式で規定される (Pentland 1987)。

$$d = Frv / \{rv - F(R + S)\}$$

ここで、d: 眼球から対象までの距離、F: 焦点距離、r: 瞳孔半径、v: レンズから網膜までの距離、をそれぞれ示す。いま、人間の眼球を想定して、 $r=1.5\text{mm}$ 、 $v=16\text{mm}$ 、 $F=63.5\text{D}$ (1 mの焦点距離) もしくは $F=62.75\text{D}$ (4 mの焦点距離) とすると、対象までの距離とボケ半径との関係は、図25-a、図25-bのようになる。図中、左縦

軸には対象までの距離と両眼視差量との関係が参考のために示されているが、ボケ要因は、両眼視差要因より幾分遠いところに関して有効性をもつことがわかる。

上記の公式は、対象が1点の場合にあてはま

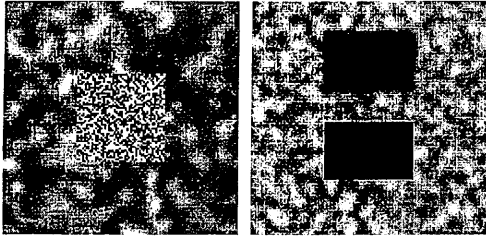


図24 ボケ (Bur) 要因による立体効果。輪郭の鮮明なものが手前に浮き出て見える (Mather, G.1997)。

るが、複数個の対象のボケについては、ガウス関数を当てはめて次のように考えることができる。

$$G(x, y) = \exp\{-(x^2 + y^2) / (2\sigma^2)\}$$

この式を適用して矩形波的明るさ変化をもつエッジに対する距離とボケ強度との関係は図25-cのようにになり、またそのエッジ部分の空間周波数に対するフーリエ振幅のスペクトラムは図25-dのように変化する。さらに、矩形波的明るさ変化をもつ単一のエッジのボケ効果とフラクタル・テクスチャのボケ効果とは、同一のフーリエ振幅スペクトルを描くので、立体効果が同じになると予測される。両刺激パターンから得られたボケ刺激の弁別閾値 (より大きく

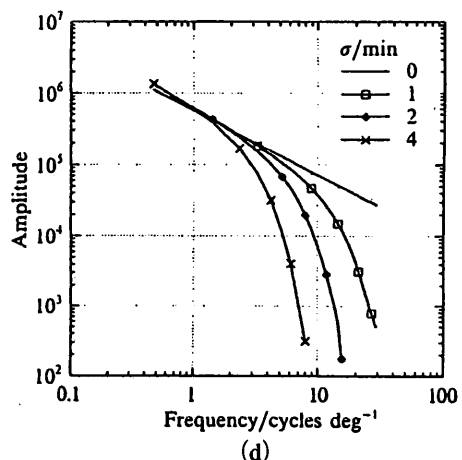
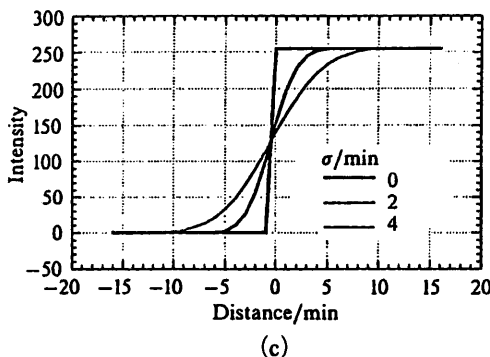
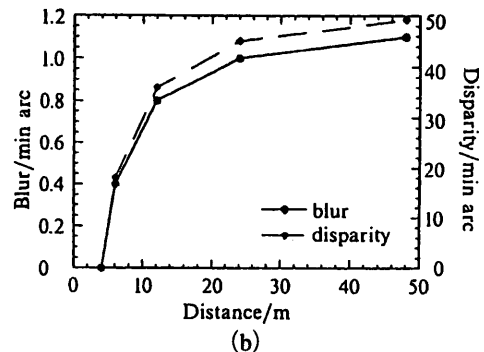
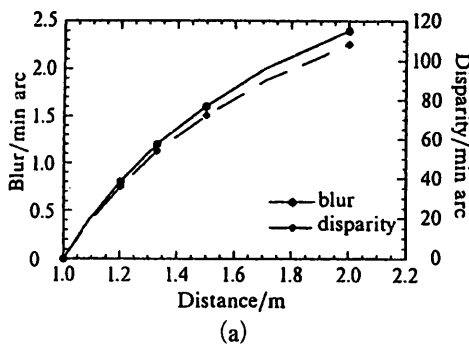


図25 (a) 対象までの距離とボケ半径、両眼視差量との関係 (焦点距離1 mの場合),
(b) 対象までの距離とボケ半径、両眼視差量との関係 (焦点距離4 mの場合),
(c) 矩形波的明るさ変化をするエッジにガウス関数を適用したときの距離とボケ強度との関係 ($\sigma=0$ 条件はガウスフィルターを通さない場合),
(d) 同様な明るさ変化をするエッジに対するフーリエ振幅のスペクトラム (Mather, G.1997)。

ボケている刺激を選択させる)を求めると、両刺激は類似した結果を示し、どちらも注視点近辺で閾値が上昇した。このことから、両眼視差とボケ要因とは相互補完的關係にあると推定される(Mather⁽¹⁸⁾)。

また、ボケと明るさコントラストの立体効果については、O'Shea, Govan & Sekuler⁽²⁴⁾によって検討された。刺激の輪郭をばかすと、必然的に明るさコントラストも減少する。ボケ要因と明るさコントラスト要因とは、どちらも絵画的奥行きがかりとなる。ここでは、ボケ要因と明るさコントラスト要因とが、それぞれ独立した手がかりであるかが検討された。実験では、標準刺激のボケ要因を一定とし、比較刺激のボケ要因と明るさコントラスト要因とをそれぞれ独立に変化させ、標準刺激に対して比較刺激がより近いにあるいはより遠いかが求められた。その結果、明るさコントラストが0.6以上の場合には、標準刺激より比較刺激がすべて手前に知覚され、しかもボケの程度が小さい場合にはこの傾向がさらに強くなること、明るさコントラストが0.4以下の場合には、標準刺激より比較刺激がすべて後ろに知覚され、しかもボケの程度が大きいほどこの傾向がさらに強まること、それぞれ示された。これらの結果から、ボケ要因と明るさコントラスト要因とは、それぞれが独立した奥行きがかりであると考えられる。

4.4. 絵画的要因の発達

人間の乳児の見る世界は2次元であるか、それとも3次元であるかは長らく論争されてきたが、最近の研究では、数ヶ月齢乳児は2次元刺激より3次元刺激をより多く注視することから、2次元刺激と3次元刺激を識別すると考えられている。しかし、乳児が奥行き関係の2次元表示を識別できるかは、いまのところ不明である。Lecuyer & Durand⁽¹⁶⁾は、3月齢乳児に、オクルージョン要因による弊—疲弊関係が識別できるかを実験した。実験場面は、対象刺激が水平方向に移動しながら壁の背後に隠れ、再度、姿をあ

らわすもので、これをハビチュエーション条件として観察させる。この後テスト条件に移行し、ここでは、壁を取り除いた場面で、対象刺激があたかも壁があるときと同様に出現、消失、再出現する場面での注視時間を測定した結果、対象刺激が移動するだけの条件に比較して注視時間が有意に長いことが示された。これは、弊—疲弊関係をもつハビチュエーション条件での慣化を通して、乳児は弊—疲弊の存在しないテスト条件での刺激対象の出現、消失を奇妙であると知覚した結果であると解釈された。しかし、乳児は、一般に、出現、消失刺激に感受性が高いので、この結果のみでは、オクルージョン要因から3次元の配置を知覚しているとはいえない。

5. バーチャル・リアリティに関する研究

5.1. HMD (Head Mount Display) と視覚機能のダメージ

HMDを装着して使用することによる視覚機能へのダメージがPeli⁽²⁷⁾によって検討された。検査項目は、視力、Fixation Disparity、両眼視力、Cover test、Phorometry、涙流出テスト、輝度コントラストテスト、および質問紙法による不快テストである。実験条件は、HMDのステレオ視、モノラル視、デスクトップ型CRTの観察で、検査はこれらを用いての30分間のゲームプレーの前後で実施された。その結果、HMD装着でのステレオ視は、デスクトップ型CRT観察と比較して、幾分不快感が高いが、しかし視覚機能への顕著な影響は示されていない。ここでの装着時間が比較的短時間であるため、今後、数時間程度の着用による影響の検討が必要とされる。

6. 大きさ—奥行き距離関係の知覚

6.1. 視えの大きさ判断過程と測量的大きさ判断過程

大きさ—奥行き距離知覚との間には、大きさ—

距離不変関係 (size-distance invariance) が成立している。これは、対象の奥行距離が大きくなると対象の視えの大きさも大きくなる現象をさす。このときの大きさ知覚は視えの大きさをいうが、実験に際しての測定では観察者は客観的な態度を保ち、網膜像の大きさにもとづいて反応しやすい。視えの大きさにもとづく大きさ判断知覚と測量的態度による大きさ判断知覚によって、大きさ判断がどのように異なるかが再検討された (Kaneko & Uchikawa⁽¹⁴⁾)。視えの大きさ判断 (linear size) では、対象をものと知覚し、ものの大きさについての判断をするように教示した。測量的大きさ判断 (angular size) では、観察者は2つの大きさを客観的、測量的な態度を保つように教示された。実験は、パースペクティブのある大空間 (456cm)、中空間 (300cm)、小空間 (222cm) 内で、標準刺激と比較刺激を提示して行われた。その結果、測量的態度による大きさ判断は網膜像の大きさに比例して変化することに対して、視えの大きさ判断は、両眼視差やパースペクティブ要因で変化する視えの奥行距離に依存することが確認された。視えの大きさ判断過程と測量的大きさ判断過程とは、別個の独立した過程とも考えられる。

6.2. 奥行距離知覚とV4領域のニューロン

奥行距離知覚に対する V1, V2, V4 領域のニューロンの反応が、サル (*Macaca fascicularis* と *Macaca mulatta*) で測定された (Dobbins, et al.⁽⁴⁾)。対象は、奥行距離 22.5cm から 360cm の間で 5 段階に位置され、また対象の大きさも 5 種類が用意された。この 5 種類の大きさは、奥行距離とともに、視角一定になるように変化する。実験は、被験体に注視点を維持するように訓練し、その位置に対象を提示して、観察中のニューロン活動が記録された。その結果、V1, V2 および V4 領域のニューロンのなかには、奥行絶対距離と対象の物理的大きさが変化してもこれとは無関係に、ある値の視角に選択的に応答するもの

が存在することが示された。しかもこのような応答特性は奥行絶対距離と関係し、奥行絶対距離が小さいときに感受性が高いもの (V1 領域)、それが大きいときに感受性が高いもの (V4 領域)、さらに奥行絶対距離とは無関係なもの (V4 領域) の 3 種類が見いだされた。

また、被験体の視野を制限した事態 (両眼視非制限視野条件、両眼視制限視野条件、単眼視非制限視野条件、単眼視制限視野条件) で、同様に、ニューロンの応答特性を測定した。視野制限は、両眼視差、パースペクティブ要因、および視野の枠組を除去する。その結果、ニューロンの応答特性は視野の制限条件を両眼視から単眼視、さらに非視野条件、制限視野条件に移すにしたがって、奥行絶対距離に対する選択的応答特性は減少したが、消失することにはなかった。このことから、奥行絶対距離は、網膜的要因と網膜外要因の両方で規定されていると考えられる。

7. おわりに

運動要因による立体視の研究領域では、以下のような知見が明らかにされた。(1) 両眼視差過程と運動視差過程は、それぞれが完全に独立しているのではなく、最終的な奥行値を計算する過程で、非線形的に相互作用している。(2) 高「時間一周波数チャンネル」が「地」を、低「時間一周波数チャンネル」が「図」を成立させるとする仮説は支持されない。(3) 観察者の自己運動知覚は、両眼視差および単眼視での奥行手がかり (オクルージョン、ダイナミック・オクルージョン、対象の大きさ変化、リニアースペクティブ) が加味されても、網膜像以外の要因のフィードバック (観察者の頭部運動とオプティク・フローとの運動) が与えられないと向上せず、観察者の眼球追従運動によって強く規定される。

両眼立体視の研究領域では、以下のことが明らかにされた。(1) 視差対応はエピポーラ線上

に限定できるとする拘束条件は、人間の両眼立体視の視覚システムでは成り立たない。(2) 水平視差は左右網膜像の水平方向の像差からのみ検出され、垂直視差は同様に垂直方向の像差からのみ検出されると考えられてきたが、水平視差と垂直視差はそれぞれ独立に検出されるのではなく、水平方向での対応と垂直方向での対応が合成されて対象の両眼視差が決定される。(3) 両眼立体視におけるトランジエントなシステムは、低域通過型の空間周波数特性を持つ単一型チャンネルによって伝達されていて、両眼立体視のための次の過程に入る以前の段階で、出力信号強度にアンバランスがあった場合には、両眼立体視のための出力信号を弱める働きをされると考えられる。(4) 垂直大きき視差は、視野20度の範囲の視差の平均化処理で検出される。(5) 両眼視差立体視の処理過程には、直感的課題に対応する過程と測量的な課題に対応する過程とが存在する。(6) 視覚システムは、両眼立体視の処理過程で、整反射による投影変位をノイズとするのではなく、復元する面の位置情報として処理する。(7) 一方の対象の輻輳角の情報が、他方対象へと注視点を移動しても正確に保存されるしくみ(継時的ステレオプシス)が存在する。(8) 両眼立体視過程では時間的(トランジエント)解像能力は低い。(9) 両眼立体視下での視力は、8'から15'の間で視差に依存して変化し、視差が大きくなると視力は良くなるが、しかし単眼視力がおよそ0.5'から1'であるのに比較して、両眼立体視下でのそれは相当程度悪い。(10) 視差検出のための単純型受容野の構造はガボール関数でもっとも近似できる構造をもち、左右ステレオ画像の水平視差は刺激の輝度変化にもとづく位相差から検出されるとする位相差モデルが、神経生理学的に検証され支持されている。(11) MT野においても、両眼視差に選択的に反応するニューロンが存在し、しかもそれらは立体視に連動する行動のシグナルとして機能する。(12) V1の視差検出ニューロンは、視差を検出できるが、両眼視差にもとづく立体形状

をこの段階では示すことはできない。(12) V1における視差検出ニューロンは、両眼輻輳運動をコントロールしている。(13) サルのV1視覚領の単一ニューロンが水平視差と奥行絶対距離との連動によって活性化されることが見いだされ、視覚情報処理の初期段階で網膜からの視覚情報と網膜以外から情報との統合が行われている。

絵画的要因による立体視領域では、(1) 陰影から対象の奥行位置を特定するためには、観察者の視点の一般化(一般視点)、光源の静止、フロア面と陰影投影面の一致、という3つの拘束条件を前提としなければならない、(2) 両眼視差とボケ要因とは相互補完的關係にあり、またボケ要因と明るさコントラスト要因とは、それぞれが独立した奥行手がかりであると考えられる、などが明らかにされた。

この他には、(1) 視えの大きさ判断過程と測量的大きさ判断過程とは、別個の独立した過程である、(2) V1, V2およびV4領域のニューロンのなかには、奥行絶対距離と対象の物理的大きさが変化してもこれとは無関係に、ある値の視角に選択的に応答するものが存在すること、しかもこのような応答特性は奥行絶対距離と関係し、奥行絶対距離が小さいときに感受性が高いもの(V1領域)、それが大きいときに感受性が高いもの(V4領域)、さらに奥行絶対距離とは無関係なもの(V4領域)の3種類が存在すること、などが新たな知見として見いだされている。

引用文献(1999)

- (1) Bradshaw, M.F. & Rogers, B.J. 1996 The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computing of depth. *Vision Research*, 36, 3457-3468.
- (2) Cumming, B.G. & Parker, A.J. 1997 Responses of primary visual cortical neurons to binocular disparity without depth perception. *Nature*, 389 (18), 280-283.

- (3) DeAngelis, G.C., Cumming, B.G. & Newsome, W.T. 1998 Cortical area MT and the perception of stereoscopic depth. *Nature*, 394 (13), 677-680.
- (4) Dobbins, A.C., Jeo, R.M., Fiser, J.J. & Allman, J.M. 1998 Distance modulation of neural activity in the visual cortex. *Science*, 281, 552-555.
- (5) Ehrlich, S.M., Beck, D.M., Crowell, J.A., Freeman, T.C.A. & Banks, M.S. 1998 Depth information and perceived self-motion during simulated gaze rotations. *Vision Research*, 38, 3129-3145.
- (6) Farell, B. 1998 Two-dimensional matches from one-dimensional stimulus components in human stereopsis. *Nature*, 395, 689-693.
- (7) Frisby, J.P., Catherall, C., Porrill, J. & Buckley, D. 1997 Sequential stereopsis using high-pass spatial frequency filtered textures. *Vision Research*, 37, 3109-3116.
- (8) Glennerster, A. 1998 d_{max} for stereopsis and motion in random dot displays. *Vision Research*, 38, 925-935.
- (9) Glennerster, A., Rogers, B.J. & Bradshaw, M.F. 1996 Stereoscopic depth constancy depends on the subject's task. *Vision Research*, 36, 3441-3456.
- (10) Gray, M.S., Puget, A., Zemel, R.S., Nowlan, S.J. & Sejnowski, T.J. 1998 Reliable disparity estimation through selective integration. *Visual Neuroscience*, 15, 511-528.
- (11) Grigo, A. & Lappe, M. 1998 Interaction of stereo vision and optic flow processing revealed by an illusory stimulus. *Vision Research*, 38, 281-290.
- (12) Iwabuchi, A. & Shimizu, H. 1997 Antiphase flicker induces depth segregation. *Perception & Psychophysics*, 59, 1312-1326.
- (13) Kaneko, H. & Howard, I.P. Spatial limitation of vertical-size disparity processing. *Vision Research*, 37, 2871-2878.
- (14) Kaneko, H. & Uchikawa, K. 1997 Perceived angular and linear size : the role of binocular disparity and visual surround. *Perception*, 26, 17-27.
- (15) Kersten, D., Mamassian, P. & Knill, D.C. 1997 Moving cast shadows induce apparent motion in depth. *Perception*, 26, 171-192.
- (16) Lecuyer, R. & Durand, K. 1998 Two-dimensional representations of the third dimension and their perception by infants. *Perception*, 27, 465-472.
- (17) Masson, G.S., Busetini, C. & Miles, F.A. 1997 Vergence eye movements in response to binocular disparity without depth perception. *Nature*, 389 (18), 283-286.
- (18) Mather, G. The use of image blur as a depth cue. *Perception*, 26, 1147-1158.
- (19) Mckee, S.P., Watamaniuk, S.N.J., Harris, J.M., Smallman, H.S. & Taylor, D.G. 1997 Is stereopsis effective in breaking camouflage for moving targets? *Vision Research*, 37, 2047-2055.
- (20) McLoughlin, N.P. & Grossberg, S. 1997 Cortical computation of stereo disparity. *Vision Research*, 38, 91-99.
- (21) Morris, R.C. 1996 Shadows and depth illusion. *Perception*, 25, 927-929.
- (22) O'Dell, C. & Boothe, R.G. 1997 The development of stereoacuity in infant rhesus monkeys. *Vision Research*, 37, 2675-2684.
- (23) Ohzawa, I., DeAngelis, G.C. & Freeman, R.D. 1996 Encoding of binocular disparity by simple cells in the cat's visual cortex. *Journal of Neurophysiology*, 75, 1779-1805.
- (24) O'Shea, R.P., Govan, D.G. & Sekuler, R. 1997 Blur and contrast as pictorial depth cues. *Perception*, 26, 599-612.
- (25) Papathomas, T.V. & Morikawa, K. 1998 A new stereoscopic illusion: Eyes popping out and sinking in. *Perception*, 27, 627-629.
- (26) Papathomas, T.V., Feher, A. & Julesz, B. 1996 Interactions of monocular and cyclopean components and the role of depth in the Ebbinghaus illusion. *Perception*, 25, 783-795.
- (27) Peri, E. 1998 The visual effects of head-mounted display (HMD) are not distinguishable from

- those of desk-top computer display. *Vision Research*, 38, 2053-2066.
- (28) Schlesinger, B.Y. & Yeshurun, Y. 1998 Spatial size limits in stereoscopic vision. *Spatial Vision*, 11, 279-293.
- (29) Schor, C.M., Edwards, M. & Pope, D.R. 1998 Spatial-frequency and contrast tuning of the transient-stereopsis system. *Vision Research*, 38, 3057-3068.
- (30) Stevenson, S.B. & Schor, C.F. 1997 Human stereo matching is not restricted to epipolar lines. *Vision Research*, 37, 2717-2723.
- (31) Todd, J.T., Norman, J.F., Koenderink, J.J. & Kappers, A.M. 1997 Effects of texture, illumination, and surface reflectance on stereoscopic shape perception. *Perception*, 26, 807-822.
- (32) Trotter, Y., Celebrini, S., Stricanne, C., Thorpe, S. & Imbert, M. 1996 Neural processing of stereopsis as a function of viewing distance in primate visual cortical area V1. *Journal of Neurophysiology*, 76, 2872-2885.
- (33) Van, Ee.R. & Erkelens, C.J. 1998 Temporal aspects of stereoscopic slant estimation: an evaluation and extension of Howard and Kaneko's theory. *Vision Research*, 38, 3871-3882.
- (34) Williams, P.A. & Enns, J.T. 1996 Pictorial depth and framing have independent effects on the horizontal-vertical illusion. *Perception*, 25, 921-926.
- (35) Ziegler, L.R. & Roy, J. 1998 Large scale stereopsis and optic flow : Depth enhanced by speed and opponent-motion. *Vision Research*, 38, 1199-1209.
- Braddick, O.J. 1974 A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, 14, 519-527.
- Cumming, B.G. & Parker, A.J. 1997 Responses of primary visual cortical neurons to binocular disparity without depth perception. *Nature*, 389, 280-283.
- Duffy, C.L. & Wurtz, R.H. 1993 An illusory transformation of optic flow fields *Vision Research*, 33, 1481-1490.
- Duffy, C.L. & Wurtz, R.H. 1995 Mechanisms of the illusory transformation of optic flow. *Vision Research*, 35, 985.
- Enright, J.T. 1995 A simple, persuasive demonstration of sequential stereopsis. *Perception*, 24, Supplement 32-33.
- Enright, J.T. 1996 Sequential stereopsis: a simple demonstration. *Vision Research*, 36, 307-312.
- Fellman, D.J. & Van Essen, D.C. 1987 Receptive field properties of neurons in area V3 of macaque monkey extrastriate cortex. *Journal of Neurophysiology*, 57, 889-920.
- Felton, T.B., Richards, W. & Smith, R.A. Jr. 1972 Disparity processing of spatial-frequencies in man. *Journal of Physiology*, 225, 349-362.
- Foley, J.M. 1980 Binocular depth perception. *Psychological Review*, 87, 411-434.
- Held, R., Birch, E.E. & Gwiazda, J. 1980 Stereoacuity of human infants. Proceedings of the National Academy of Sciences USA, 77, 5572-5574.
- Girgus, J.S. & Coren, S. 1975 Depth cues and constancy scaling in the horizontal vertical : the bisection error. *Canadian Journal of Psychology*, 29, 59-65.
- Gregory, R. 1963 Distorsion of visual space as inappropriate constancy scaling. *Nature (London)*, 199, 678-680.
- Harwerth, R.S. & Rawlings, S.C. 1977 Viewing time and stereoscopic threshold with random dot stereograms. *American Journal of Optometry*, 54, 452-457.
- Howard, I.P. & Kaneko, H. 1997 Spatial properties of

参考文献

Birch, E.E., Gwiazda, J. & Held, R. 1982 Stereoacuity development for crossed and uncrossed disparities in human infants. *Vision Research*, 22, 507-513.

- shear disparities processing. *Vision Research*,37,315-323.
- Hubel,D.H. & Wiesel,T.N. 1962 Receptive fields, binocular interaction and functional architecture in the cat's visual cortex. *Journal of Physiology*,160, 106-154.
- Hubel,D.H. & Wiesel,T.N. 1970 Stereoscopic vision in macaque monkey. Cell sensitive to binocular depth in area 18 of the macaque monkey cortex. *Nature* 225,41-42.
- Jones,J.P. & Palmer,L.A. 1987 The two-dimensional spatial structure of simple receptive fields in the cat striate cortex. *Journal of Neurophysiology*,58,1187-1211.
- Kaneko,H. & Howard,I.P. 1996 Relative size disparity and the perception of surface slant. *Vision Research*,36,1919-1930.
- Kunnapas,T. 1955 Influence of frame size on apparent length of a line. *Journal of Experimental Psychology*,50,168-170.
- Kunnapas,T. 1957 The vertical-horizontal illusion and the visual field. *Journal of Experimental Psychology*,53,405-407.
- Masson,G.S.,Busetini,C. & Miles,F.A.1997 Vergence eye movements in response to binocular disparity without depth perception. *Nature*,389,283-286.
- Maunsell,J.H. & 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.
- Movshon,J.A.,Thompson,I.D. & Tolhurst,D.J. 1978 Spatial summation in the receptive fields of simple cells in the cat's striate cortex. *Journal of Physiology*,283,53-77.
- Mullikin,W.H.,Jones,J.P. & Palmer,L.A.1984 Periodic simple cells in cat area 17. *Journal of Neurophysiology*, 52,372-387.
- Pentland,A.P. 1987 A new sense for depth of field. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*,PAMI-9 523-531.
- Poggio,G.F. & Fisher B.1977 Binocular interaction and depth sensitivity in striate and prestriate cortex of behaving rhesus monkey. *Journal of Neurophysiology*,40,1392-1405.
- Poggio,G.F.,Gonzalez,F. & Krause,F. 1988 Stereoscopic mechanisms in monkey visual cortex : binocular correlation and disparity selectivity. *Journal of Neuroscience*,8,4531-4550.
- Royden,C.S. 1994 Analysis of misperceived observer motion during simulated eye rotations. *Vision Research*,34,3215-3222.
- Salzman,C.D.,Murasugi,C.M.,Britten,K.H. & Newsome,W.T. 1992 Microstimulation in visual area MT:effects on direction discrimination performance. *Journal of Neurophysiology*,12,2331-2335.
- Salzman,C.D. & Newsome,W.T. 1994 Neural mechanisms for forming a perceptual decision. *Science*, 264,213-237.
- Schiller,P.H.,Finlay,B.L. & Volman,S.F. 1976 Quantitative studies of single cell properties in monkey striate cortex.I.Spatiotemporal organization of receptive fields. *Journal of Neurophysiology*,39,1288-1319.
- Schor,C.M.,Wood,I. & Ogawa,J.1984b Spatial-tuning of static and dynamic local stereopsis. *Vision Research*,24,573-578.
- Schor,C.M.,Wood,I. & Ogawa,J. 1984a Binocular sensory fusion is limited by spatial-resolution. *Vision Research*,24,661-665.
- Stenton,S.P.,Frisby,J.P. & Mayhew,J.E.W. 1984 Vertical disparity pooling and the induced effect. *Nature*,309,622-623.
- Tyler,C.W. 1990 A stereoscopic view of visual processing stream. *Vision Research*,30,1877-1895.
- Wong,E. & Weisstein,N. 1987 The effects of flicker on the perception of figure and ground. *Perception & Psychophysics*,41,440-448.