

3 次元視研究の動向—1995—

3-Dimensional Perception : 1995 Research Trends

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

目 次

1. 運動要因による 3 次元視
 1. 1. 運動による立体視 (Kinetic Depth, KD) における剛体性問題
 1. 2. オプティック・フローと頭部方向の知覚
 1. 3. 観察者の頭部運動と 3 次元形状の識別
 1. 4. ダイナミック・ヴィジュアル・ノイズ (Dynamic visual noise DVN) による立体視
 1. 5. オキュラー・オクルージョン (ocular occlusion)
2. 両眼立体視のメカニズム
 2. 1. ステレオグラムにおける位置要素と方向要素の効果
 2. 2. 方向視差の役割
 2. 3. 2 重像下での両眼立体視
 2. 4. 両眼立体視過程での方向特性についての応答選択性
 2. 5. 両眼立体視運動残効 (stereoscopic motion aftereffect)
 2. 6. 両眼立体視対応と異眼間マスキング
 2. 7. 両眼立体視過程と単眼視過程
 2. 8. 左右逆転視野と両眼立体視
 2. 9. ステレオブラインドとプルフリッチ現象
 2. 10. 視野闘争と両眼立体視
 2. 11. ステレオ・キャプチャ
 2. 12. 両眼立体視での奥行残効と視差勾配 (Disparity Gradient)
 2. 13. 両眼立体視での時空的補間 (Spatio-Temporal Interpolation)
 2. 14. ステレオモーション (stereomotion) のメカニズム
 2. 15. 両眼立体視での単眼的要因の抑制
 2. 16. ステレオグラムの対応部分の明るさコントラストの逆転条件での両眼立体視
 2. 17. 両眼立体視能力を欠いた者の出現頻度
 2. 18. 両眼立体視を担う神経生理学的過程
 2. 19. 3 次元表示のための有効な方法
3. 複数の奥行手がかりの統合
 3. 1. 運動要因と肌理要因の統合
 3. 2. 網膜像視差と運動要因

3. 3. 両眼立体視過程と運動要因による立体視過程は同一のメカニズムによるか
4. 絵画的要因による3次元視
 4. 1. テクスチャからの形状の知覚
 5. その他の3次元視研究
 5. 1. 螺旋運動残効
 5. 2. 手動水平位置固持操作と誘導運動
 6. おわりに

1. 運動要因による3次元視

1. 1. 運動による立体視(Kinetic Depth, KD)における剛体性問題

2次元上を運動する要素から3次元形状を復元する問題を計算理論で考えるとき、その解は無数あることになり、何らかの拘束条件を設定しない限り解けない。剛体性(Rigidity)とは、物体は運動あるいは移動しても、その大きさや形状を変えないというものである。人間の知覚でも、2次元上での運動要素から3次元形状を復元する際には、同様な知覚傾向をもつと仮定される。さらに、このとき、どの要素同士が時間的変化にともなって対応するか(対応問題)も解決されていなければならない。ここに、ひとつの問題が生じる。すなわち、対応がとれやすいということと3次元形状の復元とは独立した過程なのか、あるいは相互に関連した過程なのであろうか。Ganis, Casco & Roncato (11) は、図1に示された螺旋状の3次元形状を4個のドットでシミュレートし、隣接するドットのサイン波軌道の差(ϕ)、および1フレームごとの回転角度(R)を操作して、剛体性を評価させた。 ϕ については、図1-aに示されたように、この値を小さくするとドットのパターンは、棒状の螺旋(側面図)となり、またこの値を大きくすると、奥行が深い螺旋となる。棒状の螺旋をつくる場合には、ドットは円形に配されるので対応がとられやすいが、奥行の深い螺旋をつくる場合には、ドットは不規則に配されるので対応がとりにくい。フレーム数を3回に限定して実験したところ、剛体性のあるKDは ϕ が72°以上で R が25-30min/arc以下の条件で、剛体性のないKDは ϕ が72°以下の条件(R は無関係)でそれぞれ生じた。

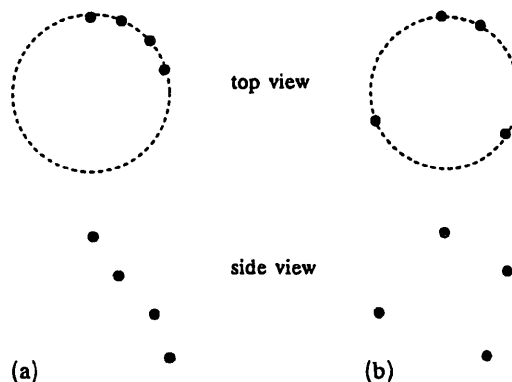


図1 4点でラセン形状をシミュレート。(a)隣接したドット間のフェーズの差18°、(b)隣接したドット間のフェーズの差126°。(Ganis, G., Casco, C. & Roncato, S. 1993)

1. 2. オプティック・フローと頭部方向の知覚

観察者が動き廻ると、網膜投影像はそれにつれて流動(optic flow)する。この種の流動パターンには、観察者が前進したときに生じるフローと観察者が頭部（眼球、身体）を回転したときに生じるフローとを区別することができ、前者はトランスレイトリー・フロー(Translatory flow)、後者はローティショナル・フロー(rotational flow)と呼ばれる。トランスレイトリー・フローは、凝視点を中心としての放射状の流動であり、ローティショナル・フローは、水平方向への流動である。いま、図2に示されたように、地点Hに頭部を向けて歩いているときに眼球を地点Fに動かしたとすると、トランスレイトリー・フローとローティショナル・フローとが生じるので、観察者は自己の頭部の向きを求められれば、全体のオプティック・フローからトランスレイトリー・フローを検出しなければならない。このとき、2通りのモデルが考えられる。ひとつは、フローの網膜上での速度差を手がかりとする理論である。ローティショナル・フローは網膜上での横方向へのシフトなので、対象の奥行距離が異なることによる速度差が生じないが、トランスレイトリー・フローでは、この意味での速度差が生じる。このモデルによれば、観察者は隣接した対象の速度差を手がかりとして自己の頭部方向を知覚することになる。一方、もうひとつのモデルによれば、水平線のような視野の枠組となる要素が自己の身体方向を知覚する重要な手がかりと主張される。なぜなら、この点は、トランスレイトリー・フローのなかではシフトしない部分として存在するからである。もし、このように観察者が自己の定位をしているならば、水平線、パースペクティブやテクスチャなどの静止した奥行情報を流動するオプティック・フローと結合させて定位していることになる。もしこのようであれば、可視可能な水平線までの奥行距離が縮小されれば、観察者は自己の頭部の方向定位を正確には行えなくなると予測される。Van den Berg & Brenner(34)は水平線、面および観察者の運動をドットを用いてシミュレートし、観察者が自己の頭部方向を何を手がかりとして知覚するかをしらべた。その結果、可視できる地面の範囲が縮小されると、頭部方向の知覚は凝視点よりに歪めれること、また、オプティック・フローのみでは、ノイズに対して十分な対応ができなく視覚以外の眼筋的手がかりの関与がみとめられることが明らかにされた。

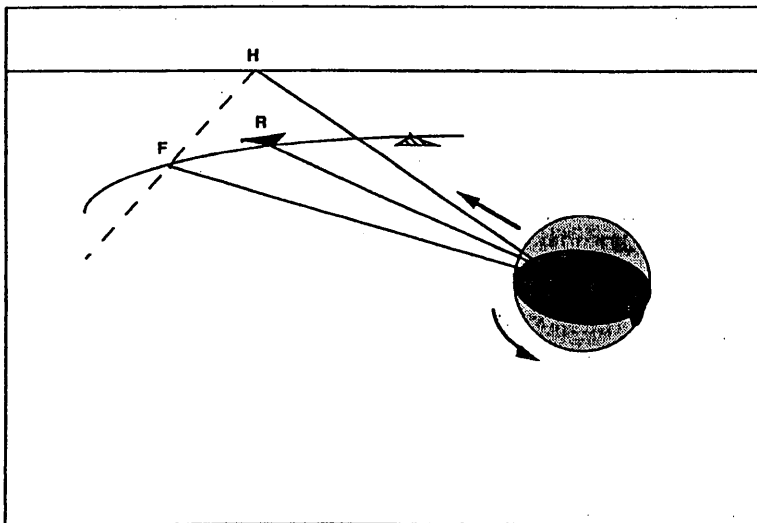


図2 トランスレイトリー・フローとローティショナル・フロー。地点Hに頭部を向けて歩いているときに眼球を地点Fに動かしたときに生じるトランスレイトリー・フローとローティショナル・フロー。(Van Den Berg, A. V. & Brenner, E. 1994)

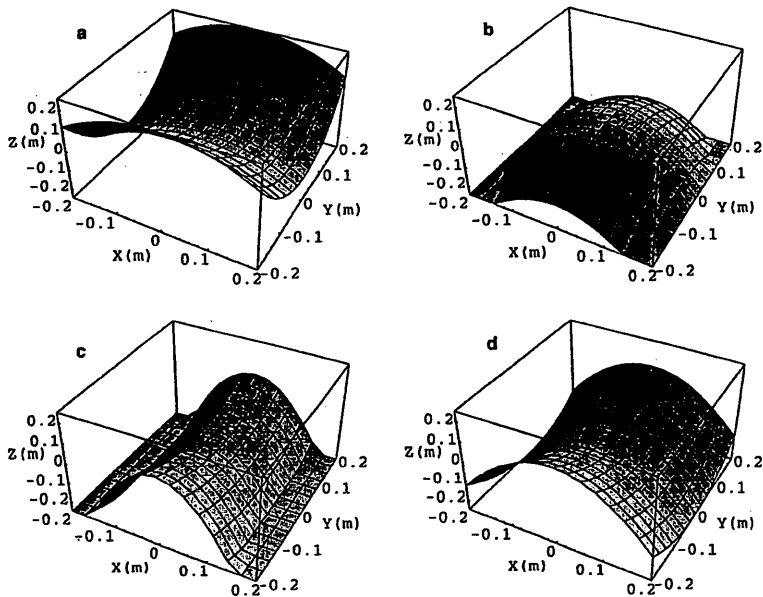


図3 運動視差による3次元形状の識別のための刺激パターン。各パターンを構成するドットは、割当てられた速度差をもって観察者の頭部運動と連動してシフトする。
(Van Damme, W. J. M. & Van De Grind, W. A. 1993)

1. 3. 観察者の頭部運動と3次元形状の識別

運動視差で提示された3次元形状を人間はどの程度正確に識別しているのかについて、Van Damme & Van De Grind(33)によって検討された。3次元形状はランダム・ドットでCRTに提示され、観察者が頭部を運動させながら観察すると、それに連動して各ドットは割り当てられた速度でシフトする。3次元形状は、図3に示されたように、凹面あるいは凸面をもつ双曲面と放物面を8段階的に変化させて提示し、それに対応する8種類のカテゴリーを用意して類同判断を求めた。その結果、人間は凹あるいは凸いずれの放物面をよく識別できるが、双曲面の識別は難しいこと、また、この3次元形状の識別には形状の曲率に関係しないことが見いだされた。

1. 4. ダイナミック・ヴィジュアル・ノイズ (Dynamic Visual Noise DVN) による立体視

両眼立体視と運動による立体視 (Kinetic Depth, KD) とは、共通の神経生理学的基盤をもつことを示唆する研究が多くなっている。例えば、両眼立体視で順応させると、KDにバイアスがかかること (Smith 1976, Nawrot & Blake 1989)、両眼立体視とKDからの手がかりとが立体をつくるのに加算的に働いていること (Tittle & Braunstein, 1990)、さらにダイナミック・ステレオプシスとKDとは、ある条件下では区別ができないこと (Narot & Blake 1993)、などである。これらの結果を説明するために、運動方向と相対的奥行に選択的に反応するユニット群 (ネットワーク) を考え、もし、異なる方向に運動する一群の刺激要素があれば、それらのユニット群はその異なる運動方向にもとづいて異なる奥行を指示するユニットに分離し、これがKDとして知覚されると仮定された (Nawrot & Blake(24))。TVの空チャンネルのようにあらゆる方向に無秩序に運動するドット (DVN)があるときには、このネットワークは特定の活動パターンを示さず、したがってKDも生

じない。しかし、ある方向に運動する刺激に順応させておけば、ユニットはその方向には反応しにくくなるので、このときには、順応されていないユニットが DVN に対してある運動方向をもつようにセットされると考えられる。

この仮説は、ステレオスコピック・アダプティションを順応手続とし、DVN を左右眼に別々にしかも眼球間遅延 (15もしくは30ms) を設けて提示するダイナミック・ステレオヴィジョンをテスト刺激として検証された。順応手続としたステレオスコピック・アダプティションは、左右方向に運動するドットから構成され、これを両眼立体視すると、厚さのある透明なシートの前面と後面上のドットがそれぞれ反対方向に運動して見える。テスト刺激として提示したダイナミック・ステレオヴィジョンでは、DVN を左右眼間に遅延を設けて提示すると、円筒が回転しているように見えるが、DVN を左右眼に同時に提示すると、不規則、無秩序に運動するドットしか視えない。もし、ステレオスコピック・アダプティションに順応させ、次いで遅延を設定しないダイナミック・ステレオヴィジョンを提示したとき、視かけの奥行が報告されれば、ここに KD が生じたと考えることができる。実験の結果、順応刺激が時計廻り方向へ運動する場合には反時計廻りの運動をもつ KD が、順応刺激が反時計廻りでは時計廻りの KD が出現した。ここでは、仮説が支持されるとともに、両眼立体視と KD とが共通の基盤をもつことを示唆する。

1. 5. オキュラー・オクルージョン (ocular occlusion)

対象注視点と眼球運動の回転の中心は一致していない(図4)。この間の距離は約11mm ので、頭部を動かさずに眼球を回転させたときには、わずかに視差が生起する。これは、オキュラー・パララックス(ocular parallax)あるいはオキュラー・オクルージョン(ocular occlusion)とよばれ、これは、簡単に確かめることができる。いま、頭部を動かさないようにして左眼を閉じ、顔面から2-3 cm のところで左手にもった鉛筆を鼻先近く右眼でみえるところまで左から右方向に動かして止め、その位置を確認し、次いで右眼の視線をまっすぐに直すと、鉛筆は、消失する。この種の視差は、対象が眼球から数センチメートルの範囲におかれているときには効果的であることが指摘されている。奥行距離30cm にある対象と観察者の鼻との間に成立するオキュラー・パララックスは、鼻の形と大きさによって異なるが、おおよそ10度である (Mapp & Ono, 1986)。オキュラー・パララックス (α) は、次式で求められる。

$$\alpha = \arctan [E + y \sin \beta / L_2 - y \cos \beta] - \arctan [y \sin \beta / L_2 - y \cos \beta]$$

ここで、E は次式で規定される。

$$E = (L_2 - L_1) y \sin \beta / L_1 - y \cos \beta$$

Bingham, G. P. (2)は、前面(200, 300, 400mm)と後面(240-1000mm)の間で12段階)の奥行距離が

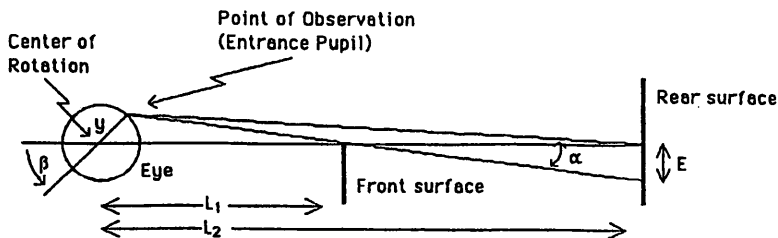


図4 オキュラー・オクルージョン。対象注視点と眼球運動の回転の中心とは一致しないので、頭部を動かさずに眼球を回転させるとわずかに視差が生じる。(Bingham, G. P. 1993)

変わるとき、この種の視差が予測通りに出現するかを調整法と強制選択法で測定した。測定は、後面を赤領域と白領域に縦に等分し、頭部を固定し、赤領域が前面に隠されるところをまず求め、次いで眼球を20度、30度、あるいは40度のいずれかに回転させ、このときに、後面の赤領域が出現して視えた場合には、その赤領域の範囲を後面を左右に移動させることによって（この場合には、赤領域が再度見えなくなる点）を測定した。その結果、強制選択法によって得られた値が理論値と一致することが示された。さらに、このオキュラー・オクルージョンが、奥行の手がかりとなるかについても検討された。この手がかり以外の奥行手がかりを除いた状態で、前面と後面の奥行識別を、頭部を固定し、眼球のみを中央から周辺に何回か回転させながら求めたところ、奥行順序については不正確なものの、前面と後面の奥行識別は可能であった。このことから、オキュラー・オクルージョンが奥行手がかりとして機能すると考えられる。

2. 両眼立体視のメカニズム

2. 1. ステレオグラムにおける位置要素と方向要素の効果

ステレオグラムの画素にドットではなく短線分を用いると、その配置（規則的／不規則的(i)）、方向（水平(H)、垂直(V)、あるいは不規則(R)）、傾斜（対応部分で傾斜に関して同角度(-)あるいは異角度(+)）を操作することができる。図5に示されたように、たとえば、方向が不規則な短線分でその対応部分の傾斜が異角度の画素からできたステレオグラムを作成し、両眼立体視すると出現した立体表面に画素線分が滑らかに張り付いて見える。また、同様な画素でその対応部分の傾斜が同角度にすると、画素は前額に平行となり出現した立体面に突き刺さるように見える。Herbomel & Ninio(14)は、これらの3要因に十字字形(c)を加えて組み合わせ、16種類のステレオグラム(R+, R-, CR+, CR-, V+, V-, Vi+, Vi-, H+, H-, Hi+, Hi-, C+, C-, Ci+, Ci-)を作成し、立体出現の容易なものはどの条件のものかをしらべた。その結果、対応部分の線分角度が同角度でしかも線分が規則的に配置されている条件を除くと、垂直線分画素のほうが水平のそれより立体視が容易であること、また、配置の不規則性は誤った対応を抑制すること、さらに対応部分の線分角度が相互に異角度な場合には立体視が安定的であることが示された。これらのことは、安定的な立体視のためのステレオグラムを作成する要素が何かを示唆する。

2. 2. 方向視差の役割

方向視差とは、対応する画素での角度差をいう。図6-aは、左右で方向を反対方向に傾けてあるので、両眼立体視すると水平軸を中心として傾斜して見える。図6-bは、左右で縮小あるいは拡大してあるので、両眼立体視すると垂直軸を中心として傾斜して見える。これは左右で方向視差をつけてあるためである。図7に示されたように、いま、一方の格子を歪めたとすると、垂直方向と対角線方向とに方向視差が生まれる。垂直方向から対角線方向を経て水平方向までの間で、方向視差がどのように生じるかは、図8に示されている。ここでは、水平あるいは垂直軸を中心としてある面が1度傾いているとき、線分の方角に対して方向視差がどのように変化するかが図示され、水平軸での傾き条件では方向視差はS字上の変化をするのに対して、垂直軸での傾き条件でのそれは山型の変化をする。この図から、水平軸中心の傾きでの方向視差は、垂直軸中心のそれより、(1)最大方向視差については2倍であること、(2)0度から90度までの方向視差の平均については57%大きいこと、(3)方向が45度のときは両方の方向視差は同一であること、が予測される。Cagenello & Rogers(3)は、位置視差を固定し、方向視差を操作したステレオグラムを作成し、傾きが変わって見えるところの閾値を測定したところ、予測通りの結果が得られることを見出した。視覚システムは方向視差を利用している。

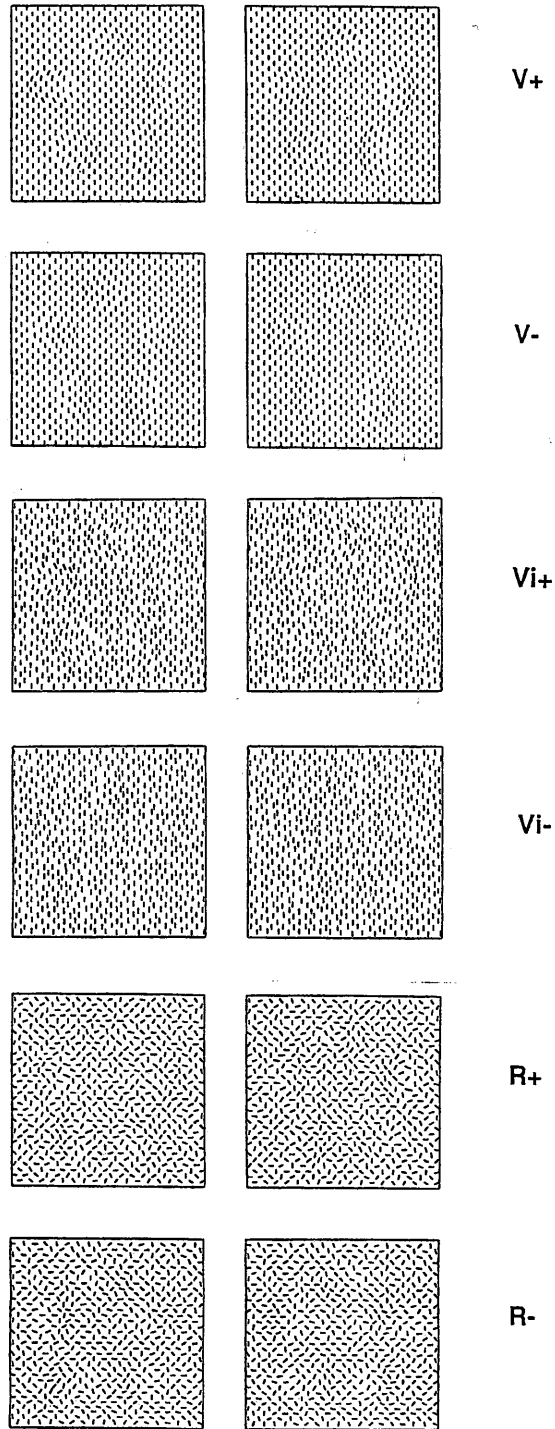


図5 短線分を画素とするステレオグラム。図中、Rは短線分の角度が不規則なことを、Hはそれが水平なことを、Vはそれが垂直なことを、また(+)は対応部分の線分が左右で同角度であることを、(-)はそれが異角度であることを、さらに(i)は線分の配置が不規則であることを各々示す。(Herbomel, P. & Ninio, J. 1993)

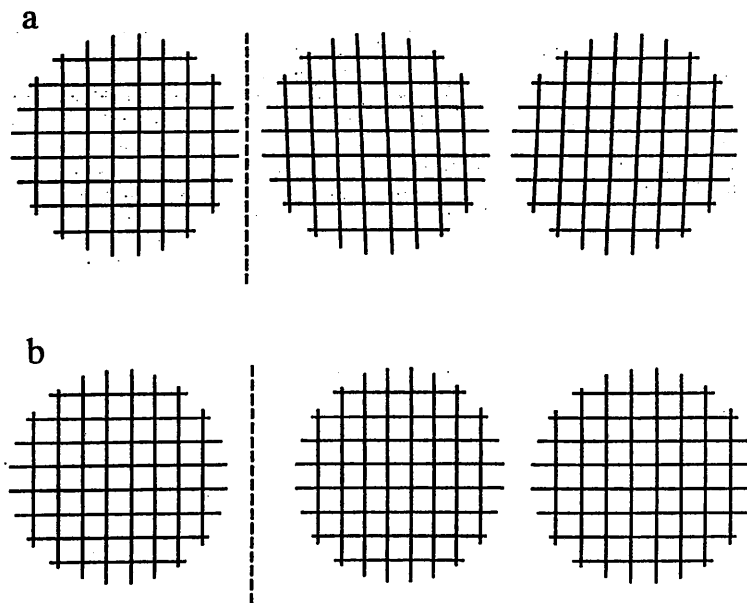


図6 方向視差の有効性を検証するためのステレオグラム。(a)左右で方向が異なるステレオグラムで、両眼立体視すると水平軸を中心とした傾きが生じる。(b)左右で水平方向の大きさが異なるステレオグラムで、両眼立体視すると垂直軸を中心とした傾きが生じる。(c)左右で水平あるいは垂直軸を中心として1度傾斜した面に生じる方向視差を表わす。水平軸を中心として傾いている場合には、0度(水平)から90度(垂直)までの線分に対する方向視差はS字型の変化を示すのに対して、垂直軸中心のそれは45度を頂点とする山型の変化をする。(Cagnello, R. & Rogers, B. J. 1993)

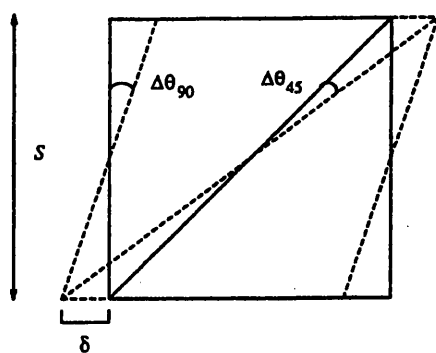


図7 方向視差の原理。矩形を一方向に歪めると、元の矩形との間で垂直方向($\Delta\theta_{90}$)と対角線方向($\Delta\theta_{45}$)とに方向視差が生じる。(Cagnello, R. & Rogers, B. J. 1993)

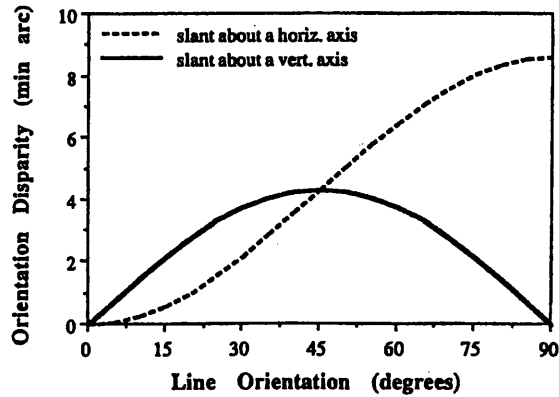


図8 方向視差の勾配。水平（点線）あるいは垂直軸（実線）を中心として1°傾いたある面の方向視差が面上の線分角度とともにどのように変化するのが示されている。（Cagnello, R. & Rogers, B. J.1993）

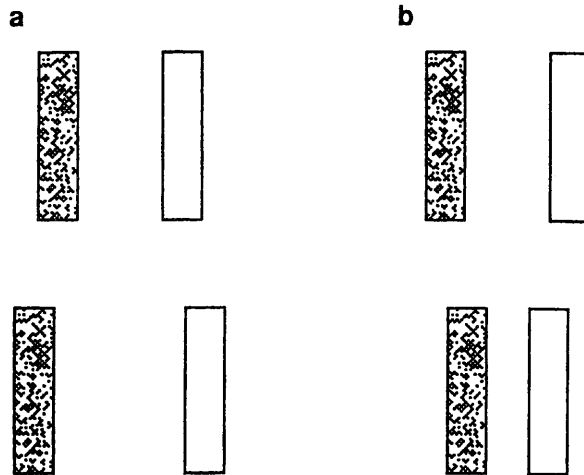


図9 2重像下での両眼立体視融合。(a)ドット矩形を右眼に白色矩形を左眼に提示すると、両眼融合が起きないにもかかわらず上段と下段のペアは交差視差をつくるため下段の方が手前に見える。(b)同様に左右眼に別々に提示すると、上段と下段のペアは非交差視差をつくるため下段の方が遠くに見える。（Siderov, J. & Harwerth, R. S. 1993）

2. 3. 2重像下での両眼立体視

図9-aのドットで埋められた矩形を右眼に、白色の矩形を左眼に提示し、上段（標準刺激）と下段（検査刺激）のステレオペア間の奥行を報告させると、両眼視融合が起きないにもかかわらず、上段に較べて下段のステレオペアは、交差視差となっているためより手前に、一方、図9-bでは、下段のペアが非交差視差であるため、上段のペアより遠くに見える。このような条件で、標準刺激の視差を凝視点をゼロとして変化させると（pedestal disparity）、奥行弁別閾値は、この pedestal disparity の増大とともに指数関数的に大きくなることが示されていた（Ogle 1953, Blakemore 1970, Krekling 1974）。近年、DOG 関数（ガウス関数の差）刺激で刺激提示し、この関係を測定し

たところ、pedestal disparity が 2 min までは単調増加し、それ以降は平準化することを示し、凝視点近辺での視差処理過程と凝視点から離れた位置でのそれとは異なることが示唆された (Badcock & Schor 1985, McKee, Levi & Bowne 1990)。Siderov & Harwerth (29) は、2 種類の視差処理過程が働いているような結果が生じたのは、標準と検査刺激を構成する刺激対の間の間隔距離の違いが手がかりとして働いているためと考えた。そこで、この種の手がかりを消すために、各眼に別々の刺激を継時提示できるビデオハプロスコープとオプティカル・シャッターシステムとを組み合わせた装置を用いて、検査刺激の各刺激を継時的に提示したところ、pedestal disparity と奥行弁別閾値とは単調増加の指数関数となることが示された。両眼立体視過程での奥行弁別は、ホロプターから離れるにしたがい悪くなっている。

2. 4. 両眼立体視過程での方向特性についての応答選択性

両眼立体視過程では、空間周波数特性についての応答選択性が存在することは、順応法やマスキング法などで確認されているが、方向特性については、いまだに、その存在が不確定である。ランダム・ライン・ステレオグラムを用い、その一方の線分を回転させ、両眼間におよそ 40 度を超える方向差が生じると、立体視は損なわれた (Frisby & Roth 1971, Frisby & Julesz 1975)。また、各眼に 1 本の短線分を両眼間で直交するように提示し、その線分の長さを大きくすると、ある長さ (視角約 5 分) を超えると両眼立体視力が落ちた (Mitchell & O'Hagen 1972)。これらは、いずれも方向についての選択的応答特性を示唆するが、両眼間で刺激の方向を変えたり、長さを変えたり、そのこと自体が奥行の出現程度を低下させるので、方向の選択的応答特性を一義的に説明できない。とくに、ランダム・ライン・ステレオグラムを用いると、線分の断端で大きな明さコントラストが生じるので、たとえ、効果が出現しても、それが線分検出メカニズムに帰属するものか、あるいは等方向性のドット検出メカニズムによるかは決められない。Mayhew & Frisby (1978) は、RDS を 2 方向性 (0 度と 90 度) のフィルターで帯域通過し、そのステレオグラムの片方に刺激方向性を操作したマスキングノイズをかけたところ、マスク刺激の方向性がステレオグラムのそれと同等あるいは異なっても、立体視は成立するものの、不良となり、方向の選択的応答特性が存在しないことを示唆した。

Mansfield & Parker (20) は、ターゲットである矩形が立体出現する RDS を 0 度の方向性フィルター (垂直のテクスチャが得られる) あるいは 90 度の方向性フィルター (水平のテクスチャが得られる) で帯域通過し、さらに左右のステレオペアのそれぞれに 0 度から 180 度のマスクノイズを左右が対応しないようにして付加し、ターゲットとなる刺激の明さコントラストを変化させ、マスキングにもかかわらずターゲットとなる立体が明瞭に識別できるところを求めることによって方向の選択的応答特性の再検討を試みた。その結果、ターゲットとマスクとの方向性が等しい (0 度) 近辺で、コントラストを強めないと立体の奥行識別ができず、マスク効果が大きいことが示された。これは、両眼立体視過程でも方向についての選択的応答特性があることを示している。

2. 5. 両眼立体視運動残効 (stereoscopic motion aftereffect)

両眼立体視運動残効とは、両眼立体視提示した刺激パターンを網膜像視差を固定したまま左右に連続的に変化させることによって生じた運動対象への順応効果をいう。この種の運動残効が本当に出現するかについては不確定であった。Patterson, et al. (25) は RDS を用いて単眼視手がかりを除去した条件で、両眼立体視すると運動する縦縞が出現する順応刺激を用いて検討した。その結果、(1) 順応時間が 20 秒程度で 2 - 3 秒の運動残効が、120 秒の順応では 9 秒程度の残効が出現すること、(2) 運動速度が 2 deg/sec で約 2 秒の、31.4 deg/sec で約 8 秒の残効が生じること、(3) 残効は、

順応刺激の運動方向で差が生じるが(左右方向より上下の運動方向で大きい)、しかし、空間周波数あるいは網膜像視差には影響を受けないこと、(4)この種の残効には、転移効果、すなわち、両眼立体視運動に順応させ、次いで明るさ残効の検査刺激で検査すると、明るさ残効が生じること、またこの逆の場合にも同様な残効が生じることが明らかにされた。とくに、両眼立体視と明るさ過程間の2つの異なる領域間に知覚的残効が生じることが、この両過程が同一の神経組織によって媒介されている可能性を示唆する。

2. 6. 両眼立体視対応と異眼間マスキング

異眼間マスキングとは、図10-aに示されたように、検査刺激とマスク刺激とを別々の眼に提示す

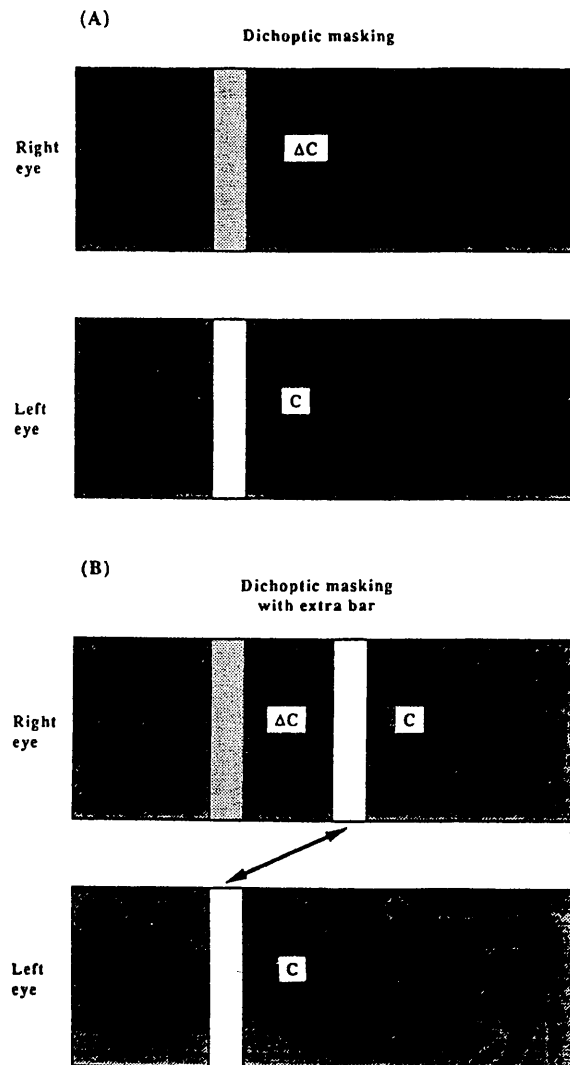


図10 異眼間マスキングのパラダイム。(a)左眼にマスク刺激、右眼に検査刺激が提示される。(b)左眼にマスク刺激、右眼には検査刺激の他に別のマスク刺激が追加される。(McKee, S. P. et al. 1994)

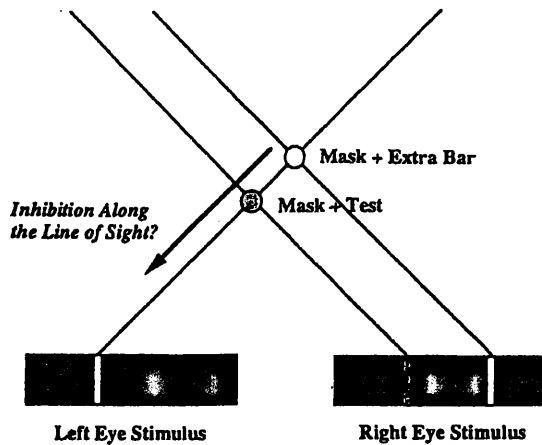


図11 左眼のマスク刺激と右眼の検査刺激、追加刺激との対応関係。マスク刺激は検査刺激と追加刺激の両方に対応する可能性を持つ。(McKee et al, 1994)

るものであり、単眼マスクングや両眼マスクング条件より、ターゲット刺激の閾値は上昇することが知られている。Legge(1984 a, b)は、単眼あるいは両眼マスクングより異眼間マスクングのコントラスト閾値が上昇することを、2乗和モデルで説明しようと試みた。2乗和モデルは、各眼の刺激入力、両眼間の結合がなされる以前に、2乗のエネルギーをもち、最終的な出力は2乗和に近似するというものである。McKee et al. (21)は、図aに示された異眼間マスクングパラダイムで、検査刺激のコントラスト閾値を測定したところ、マスク刺激のコントラストの増大にともなって比例的に上昇することが確認された。そこで、図11-bに示されたように、マスク刺激を網膜像視差をつけて付加し、同様なコントラスト閾値を測定したところ、マスク刺激と付加刺激との間の視差が20 min以内にあれば、閾値の上昇は消失することが示された。これは、次のように考えられる。このステレオグラムでの左右の対応は、図11に示されたように、左眼のマスク刺激は右眼の検査刺激と付加刺激の両方に対応する可能性をもつ。このとき、左右のステレオペアの要素は互いに一つの対応しかとれないというユニークネス条件を受け入れ、さらに視線方向の対応は抑制されるとすれば、左眼のマスク刺激は右眼の付加刺激とのみ対応をもつので、マスク刺激の効力は失われることになる。そこで、付加刺激のコントラストを変えてマスク効果を測定したところ、付加刺激のコントラストがマスク刺激のその1/5になると、検査刺激の閾値が上昇することが示された。この結果は、両眼立体視の対応には、対応する刺激対の間のコントラスト閾値が重要で、5倍以上コントラストが相違すれば、対応は成立しないことを示唆する。

2. 7. 両眼立体視過程と単眼視過程

Julesz の RDS は、両眼視過程と単眼視過程を分離し、単眼での形態知覚と両眼立体視とが別々の過程であることを示した。これは RDS で作成された幾何学的錯視図形でも同様で、両眼融合させてはじめて錯視が生起する(Papert 1961)。このことから、錯視は両眼立体視の成立後に生じると考えられた(Julesz 1971)。これに対して、Glennerster & Rogers(12)は、図12に示されたように、付加線分が外向のミュラーリエル図形を片眼に、他眼には内向の付加線分をもつ図形を提示し、両眼立体視させたところ、その付加線分が短い場合にはミュラーリエル図形は前額平行には見えず、奥行方向に傾いて見える(y軸を中心として傾いて見える)ことを示した。これは、両眼立体視での幾何学的誘導効果(線分の長さが若干異なるものを左右眼に別々に提示し両眼融合させると、奥行

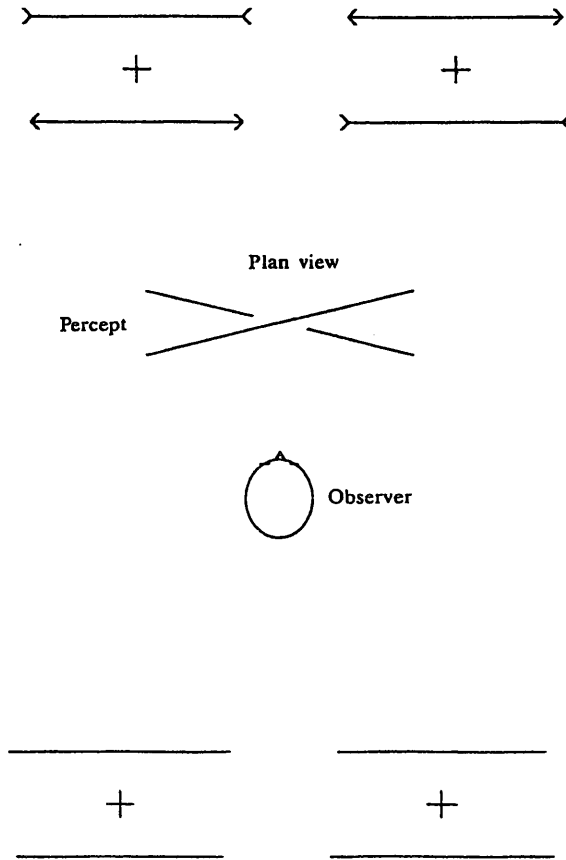


図12 (a)両眼立体視すると、y 軸を中心として奥行方向に傾いて見えるミュラーリエル錯視図形。ここでは、主線分が等しいにも関わらず、錯視によって大きさ誘導効果が生じている。(b)ミュラーリエル錯視図形のフィルター(ガウス関数の粗い尺度のラプラシアン)処理結果。ここで、(a)は22.5分の空間定数(c)で、(b)は45分の空間定数(d)で処理された。(Glennerster, A. & Rogers, B. J.1993)

方向に傾いて見える)を応用したもので、ミュラーリエル図形でこの種の誘導効果が生じるということは、主線分の長さは客観的には等しいので、線分の視かけの長さによって奥行方向の傾きが生じることになる。ここでは、両眼立体視が成立する以前に長さ錯視が生じている。Glennersterらは、両眼立体視過程と単眼錯視過程とを別個に想定し、どちらが先行するかを考えるのではなく、各眼に入力された線分の長さあるいは図形特性を Δ^2G フィルターの粗いスケールで処理する過程を導入した。両眼立体視はこのようなして処理された各眼の図形特性の差異にもとづくと考えた。RDSで作成されたミュラーリエル図形を Δ^2G フィルターの粗いスケールで処理すると、内向図形より外向図形の方が主線分の長さが長くなる。このように、粗いスケールでの Δ^2G フィルター処理過程を導入すると、2次元刺激、3次元刺激(フィギュラル・ステレオグラム)そしてキクロピアン刺激(RDS)の結果がすべて説明できるという。

2. 8. 左右逆転視野と両眼立体視

左右逆転眼鏡を10-11日間装着させ、その間の両眼立体視の出現方向がしらべられた(Ichik-

awa & Egusa (16))。左右視野を逆転させると、交差視差では凸に、非交差視差では凹になるが、しかし、運動視差、オクルージョンや線遠近法的関係は従来の関係を維持する。両眼立体視は、RDS、フィギュラル・ステレオグラムの両方でテストされた。その結果、RDSを含めて装着5日頃までは、視差と奥行方向の関係の逆転が、装着の終期では視差と奥行方向の関係の再逆転（ノーマルな関係への復帰）が示された。この再逆転時に、2つの対象を奥行位置を違えて提示し、その遠近をテストすると、正しい奥行判断がなされていた。このことから、装着当初は、網膜像視差とその他の奥行手がかりが抗争状態となり、網膜像視差の指示する奥行関係が優勢となるが、順応が進むとともに運動視差など他の手がかりが優勢となるような複数の手がかり間の統合が行われると考えられる。この実験では、RDSでも視差と奥行方向との関係の逆転が起きている点が注目される(Shimojo & Nakajima(1981)によれば、RDSではこの種の逆転は生じないと報告されている)。

2. 9. ステレオブラインドとプルフリッチ現象

Thompson & Wood(20)は、ステレオブラインドの者を対象として、プルフリッチ現象の有無をしらべたところ、これらの者はRDS立体視と異眼間運動残効が生じないにもかかわらず、プルフリッチ現象は生じていることを明らかにした。ステレオブラインド者はある程度の両眼立体視力を残存している。これは、高精度の立体視力をもつ小細胞処理系の両眼立体視機能は失われているが、粗い精度の大細胞系のそれは機能していることを示唆する。

2. 10. 視野闘争と両眼立体視

両眼立体視の直前に視野闘争を挿入すると、立体視の成立は阻害されるであろうか。図13に示された実験パラダイムで、Harrad et al, (13)によってこの問題が検討された。このパラダイムでは、まず、左眼にターゲット刺激、右眼に6本の斜線分を提示して視野闘争を起こして左眼を抑制し、その後で右眼にもターゲット刺激（左眼のそれとは網膜像視差をつくる）を重ねて提示し、両眼立体視が成立しターゲット刺激の奥行方向の判断ができるまでの潜時が測定される。実験では、図14

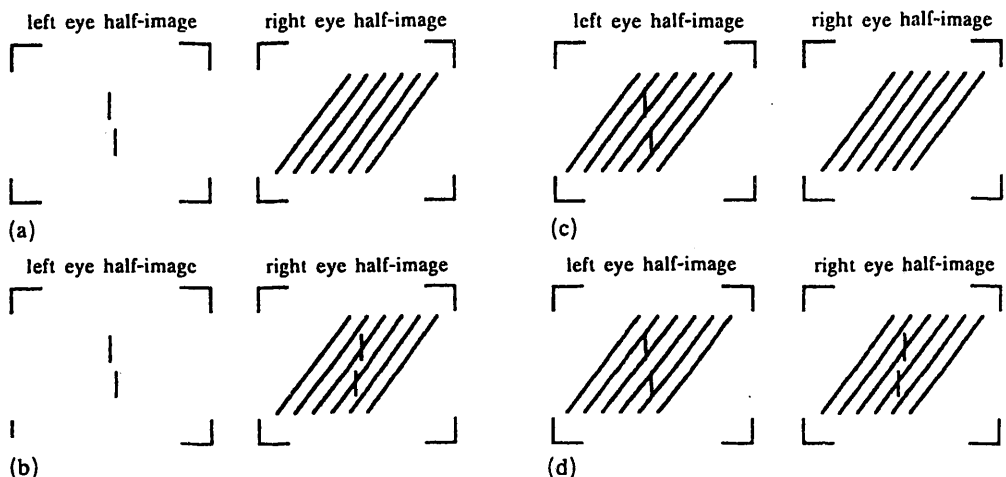


図13 視野闘争条件とマスキング条件での実験パラダイム、(a)視野闘争条件での誘導刺激、(b)視野闘争条件でのターゲット刺激、(c)マスキング条件での誘導刺激、(d)マスキング条件でのターゲット刺激。(Harrad, R. A., McKee, S. P., Blake, R. & Yang, Y. 1994)

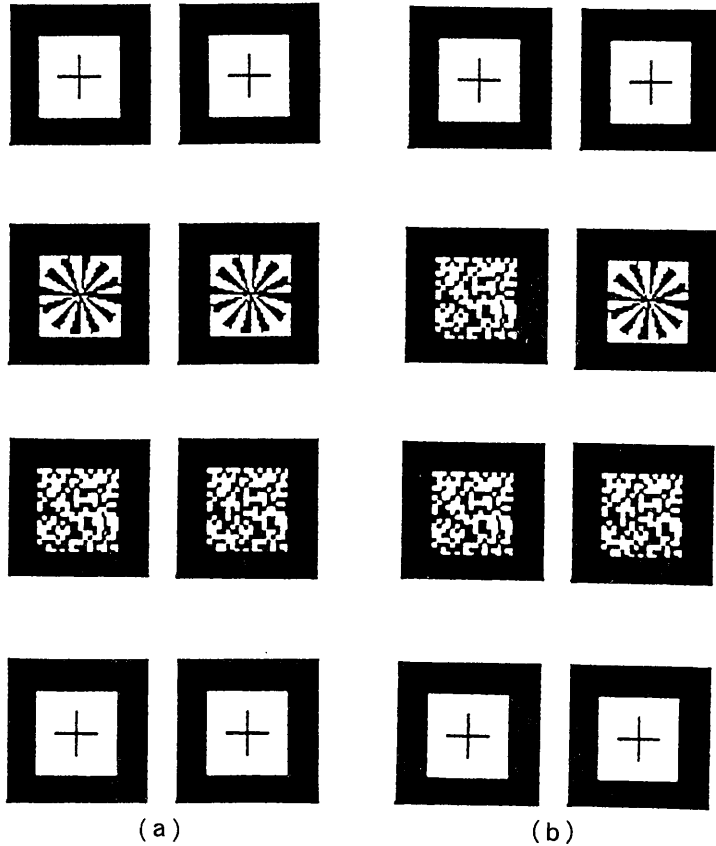


図14 両眼立体視に与えるマスキングと視野闘争の効果。(a) RDS 提示の直前に視差をもたないマスク刺激が提示される(十字形は注視刺激)。(b) RDS の直前に視野闘争パターンが導入される。(Harrad, R. A. et al. 1994)

に示された手続とパターンが用いられ、また統制条件として、ターゲット刺激が単独で提示される条件とマスキング条件が導入された。視野闘争条件では、統制条件と比較して、両眼立体視が成立するまでの潜時は、約150–200ms 程度長くなることが示された。これは、マスク効果ではなく、視野闘争の結果としての抑制によるものである。同様な実験パラダイムで副尺視力をターゲット刺激とした実験でも、副尺視力判断までの潜時は一層長くなった。さらにターゲット刺激に RDS を用いた場合には、視野闘争抑制条件ではマスキング条件と比較して、RDS 立体視での奥行判断の成立までの潜時が有意に長くなった。これらの結果から、両眼立体視は視野闘争の抑制効果を終わらせるので、より優位な機能として位置づけられるが、しかし視野闘争による抑制は両眼立体視の成立を 200–300ms の範囲で阻害することがわかる。

2. 11. ステレオ・キャプチャ

ステレオ・キャプチャとは、交差視差のステレオグラムを両眼立体視したとき、ステレオグラムの「地」を構成する規則的なパターンが、それ自体には視差がないのに立体面にとらわれて見えることをいう。この現象は、はじめ、主観的輪郭図形のステレオグラムでみつけられ(Ramachandran & Cavanagh 1985, Ramachandran 1986)、次いで実輪郭図形でも確認された(Mather 1989)。

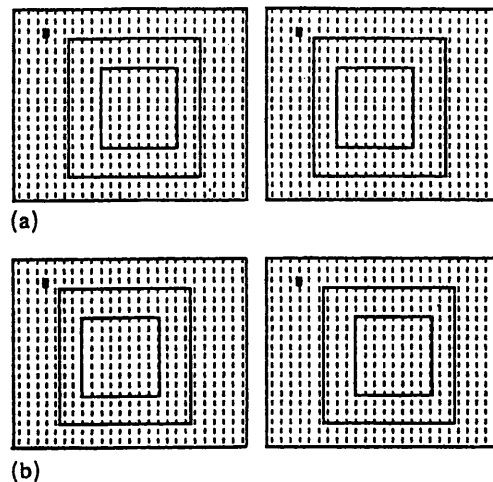


図15 ステレオキャプチャのためのステレオグラム。(a)内側と真ん中の矩形とは交差視差を、また、真ん中と外側とは交差視差をなす。(b)内側と真ん中の矩形とは非交差視差を、また、真ん中と外側とは非交差視差をなす。(Ishigushi, A. & Wolfe, J. M. 1993)

このステレオ・キャプチャでは、交差と非交差視差で現象の現われ方が異なり、非交差視差ではパターン要素が立体面に密着せず、背景もしくは立体図形を含むひとつの面にすべて載って見える。Ishigushi & Wolfe(17)は、この違いを説明するために、交差視差では、その効果が1方向に広がるのに対して、非交差視差では、それがあらゆる方向へと拡散するからではないかと考えた。交差視差は対象の立体性や凸性を、非交差視差は陥没や凹性のへの視差拡散は、妥当なものといえる。図15のようなステレオグラムをいくつか作成し観察させたところ、交差視差にのみステレオキャプチャが生じることの多いことが確認された。

2. 12. 両眼立体視での奥行残効と視差勾配(Disparity Gradient)

両眼立体視で提示された奥行傾斜面に順応させ、次いで前額に平行な面を提示すると、反対方向に奥行傾斜する残効が単眼視条件下と同様に生じる。Ryan & Gillam(28)は、奥行傾斜面の残効量が網膜像視差によって規定されるのではなく、視差勾配によって規定されていると考えた。視差勾配とは、2つの対象のキクロピアン距離と網膜像視差量の比をいい、この値が1を超えると両眼視融合が困難となるもので、両眼融合域の指標として用いられる。Ryanらは、2つの対象間の網膜像視差を固定したまま、水平距離を変えたとき、奥行残効がどのようになるか検討した。奥行残効が視差にのみ規定されているならば、残効量は順応刺激の対象間の水平距離とは無関係となるが、視差勾配に規定されるならば、それは順応刺激の水平間距離に反比例すると予測される。2つの対象間で固定した視差をもち、同時にその水平距離が変えられるステレオグラムを順応刺激として90秒間順応させた後に、視差ゼロのテスト刺激を提示し、視かけ上、それが前額に平行になる位置を求めたところ、残効量は、水平間距離に反比例することが示された。この結果は、奥行傾斜面の残効が網膜像視差ではなく、視差勾配に規定されることを裏づける。

2. 13. 両眼立体視での時空的補間(Spatio-Temporal Interpolation)

仮現運動提示でも、そこに滑らかな運動が知覚されるのは、視覚システムがその時空間隙を補間

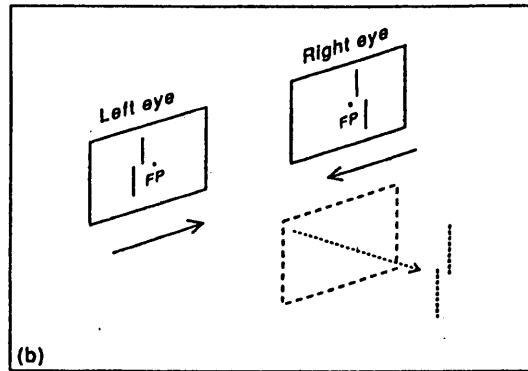


図16 時空的補間をしらべるための刺激パターン。各眼の上線分と下線分が垂直に提示され、その線分は時差をもって提示されるとともに、両眼で反対方向にシフトされる。
(Fahle, M. & De Luca, E. 1994)

するからである。Pulfrich 現象は、片眼に装着したデンスティ・フィルタのため両眼間に入力時差が生じ、結果として網膜像視差が生まれるためであるが、ここでも時空的補間が働く。Pulfrich 現象では、両眼に入力される刺激は共に同方向に運動しているが、共に反対方向でも同様な補間が生じ立体視が可能になるであろうか。もし可能なとき、この補間は単眼過程と両眼過程のいずれで起きているのであろうか。Fahle & De Luca (10)は、図16のように、各眼に上線分と下線分を間隙をあけて提示し、それを両眼で反対方向となるように継時的にシフトさせる。同時に各眼の上線分と下線分に時差を設けて提示する。このような空間の間隙と時差とが単眼処理過程で補間されれば、上線分と下線分からなるパターンは、全体として奥行方向に運動して視えると同時に上線分と下線分のどちらかが手前に見えるはずである。実験では、上線分と下線分の長さ、線分間の間隙、線分間の時差、線分のシフト距離、線分の運動速度が変えられ、各条件下での上線分と下線分の奥行識別の閾値が求められた。その結果、奥行閾値は、(1)線分の長さが長いと小さくなること、(2)線分間の間隙が5–20min arcで最小となること、(3)線分のシフト距離が1.5–3 min arcで最小となること、(4)線分の運動速度が0.5–0.8deg/secで最小となることが見い出された。これらのことから、時空的補間は両眼過程よりは単眼過程で行われ、しかもこの補間は刺激が両眼で反対方向にシフトしても可能であり、さらに各眼で処理されたものが両眼過程で対応され、立体視されると考えられる。

2. 14. ステレオモーション(stereomotion)のメカニズム

ステレオモーションとは、単眼的奥行手がかりが無い条件での奥行方向の運動視をいう。この事態では、(1)連続的な網膜像視差の変化と(2)両眼間での網膜像の速度差がステレオモーションの手がかりとなる。この2つの手がかりが、どのように処理されるかについては2通りを考えることができる。ひとつは、両眼間の網膜像速度差と網膜像視差とがそれぞれ独立に処理されると仮定するもので、ステレオモーションは各眼で検出された速度の差分にもとづく。他は、両眼での速度差が網膜像視差処理過程で検出されると考えるものである。この関係は図17に示されている。ステレオモーションについての精神物理学および神経生理学的研究が行われてきているが、明確な結論は得られていない。それは、両眼間の網膜像速度差と網膜像視差とが分離して提示されていないためである。Cumming & Parker (9)は、ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム (DRDS) を用いて、この2つのメカニズムのいずれが正しいかをしらべた。DRDS では、視差が増大あるいは

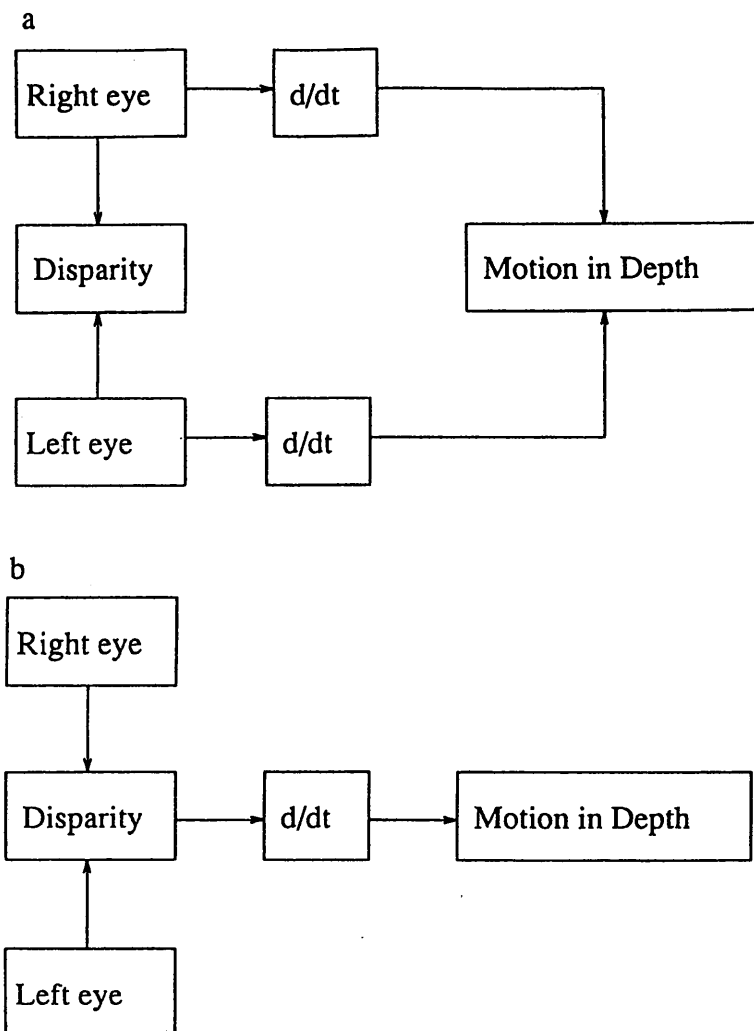


図17 ステレオモーションのメカニズム。(a)両眼間の網膜像速度差と網膜像視差とがそれぞれ独立に処理されると仮定され、ステレオモーションは各眼で検出された速度の差分にもとづく。(b)両眼での速度差が網膜像視差処理過程で検出されると仮定される。(Cumming, B. G. & Parker, A. J. 1993)

は縮小されるが、ドットはフレームごとに新しくされるので前のフレームとの対応がなく、したがって単眼的な運動視の手がかりは存在しない。DRDS と RDS（ここでは、同一のランダム・ドットがフレームごとに視差は変わるものの、そのパターンを変えないで提示される）でのステレオモーションの閾値をしらべてみると、DRDS の方が若干低いことが示された。

これまでの研究では、ステレオモーションがどちらのメカニズムによって検出されているかが明らかにできていない。それは、刺激の設定に際して網膜像視差と両眼での網膜像速度差とが明瞭に分離されていないためである。そこで、Cumming らは、ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム (DRDS、RDS で提示されるがフレームごとにドットパターンが書き換えられるので時間的対応関係は存在しない。ただし、網膜像視差は増大あるいは縮小される) と RDS（ここでは視差

は増大あるいは縮小されるが、ドットパターンはフレームごとに書き換えられないので時間的対応は関係づけられる) とを用い、ステレオモーションの閾値を測定したところ、DRDSの方が小さくなることをみつけた。また、運動視の単眼の手がかりは存在するが、両眼立体視のための時間的分解能力を超えた条件(時間的周期を操作し、両眼立体視の成立を妨げる)を設定したところ、ステレオモーションは不成立であった。両眼立体視のための空間的分解能力を妨げる条件(空間周波数を操作する)でも、同様であった。これらのことから、ステレオモーションは、網膜像視差の時間的变化をはじめに検出することによって成立することが示されている。

Cornilleau-Peres & Droulez (6) も、両眼間の網膜像速度差の要因をモーション・ディスパリティ (Motion disparity) と名づけて、奥行や立体の手がかりとなるかを検討した。観察者に前額に平行になるように球面をシミュレートし、各眼に別々に提示するが、このとき各眼に入力したドットは左右で対応しないように設定された。この刺激事態で、「運動視差+モーション・ディスパリティ」条件と「運動視差」条件を設けて、球面/平面の選択を課したところ、知覚判断の正確度については両条件では違いが生じなかった。これは、モーション・ディスパリティが手がかりとして有効に利用されていないことを示す。

2. 15. 両眼立体視での単眼的要因の抑制

健全な両眼立体視能力をもつものは、ステレオグラムのなかの単眼的要因を抑制する傾向をもつ。これはフュージョナル・サプレッション (fusional suppression) とよばれる。たとえば、図18に示

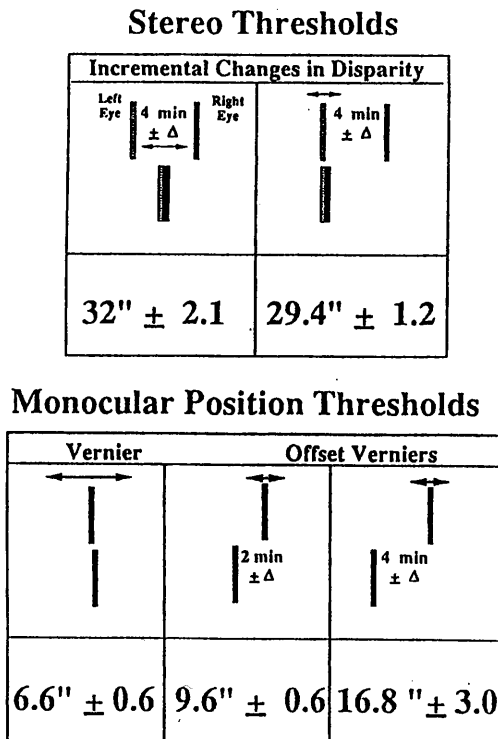


図18 両眼立体視条件下で副尺視的位置変化をしらべるための実験パラダイム。上図は両眼立体視条件下での刺激条件を、下図はそれと対応する単眼視条件の刺激条件を示す。(McKee, S. P. & Harrad, R. A. 1993)

されたような両眼立体視および単眼視の両条件で、副尺視力的位置変化を起すのには線分の方をどの程度動かしたらよいかを測定してみると、両眼立体視条件ではそれがかなり大きい値をとる。単眼視条件では、これは副尺視力測定に相当するので、両眼立体視条件では、単眼的位置情報が抑制されていると考えられる。この現象を利用して、両眼立体視能力を欠く者の視覚特性がしらべられた (McKee & Harrad (22))。図18に示したように、左眼に副尺視力を測定するテスト線分を、右眼にはそれと両眼立体視的対応をもつ刺激パターンが提示された。ステレオグラムの左右対が左右対称であれば、上線分と下線分は奥行が異なるだけで上下は重なるように見える。このとき、上線分の方をどの位シフトすれば、ズレて見えるか、その副尺視力的閾値が測定された。上線分の視差は0から60minの範囲で変えられ、また下線分は常に両眼の中心窩に位置対応するように提示された。副尺の閾値は、健常な両眼立体視能力をもつものでは、視差が20minまでは上昇し、融合限界 (40-60min) を超えるに従い下降を示した。副尺視力的閾値を測定するテスト刺激を左あるいは右眼のいずれに提示しても、健常な両眼立体視能力をもつものでは、このフュージョナル・サプレッション傾向は、左右眼で対称的变化をした。一方、両眼立体視能力に異常のあるステレオアノマリーなものは、このフュージョナル・サプレッションが左右眼で非対称であった。すなわち、テスト刺激を片眼に提示し、そのときのフュージョナル・サプレッションをみると、健常者と同一の結果を示すが、テスト刺激を他眼に提示して測定すると、フュージョナル・サプレッションは生じなかった。これらの結果から、両眼立体視を担うユニットは、単眼の刺激位置情報を担うユニットより強い反応をもち、この単眼的ユニットを抑制していると考えられる。ステレオアノマリーの場合、単眼の手がかりに特異的に反応するユニットは、常に片眼からの情報が優位になるように限定されているので、この種のテスト刺激が優位眼に提示された場合には、他眼の視差情報からは影響を受けないが、劣位眼にテスト刺激が提示されたときには、他眼に提示された視差情報に抑制され、結果として劣位眼の副尺視力が弱くなると説明される。

2. 16. ステレオグラムの対応部分の明るさコントラストの逆転条件での両眼立体視

図19のステレオグラムをみると、対応部分の明るさが逆転している。これを両眼立体視すると、(a)のヘルムホルツのステレオグラムと(c)のRDSステレオグラムでは、立体視が不可能であるが、(b)のランダム・ドットの密度を減じたステレオグラムでは可能である。Cogan, Lomakin & Rossi (4) は、図20に示したような実験パラダイムでこの問題を検討した。それは、明るさ対応をもつRDSステレオグラムと明るさ対応をもたないRDSステレオグラムを左右眼に提示するとき、時間的遅延を設定して提示することであった(刺激は常にフラッシュ提示される)。このようにすると、明るさ対応のあるRDSステレオグラム(ドット密度50%)では、左右眼への入力遅延が45msec以上になると立体視は失われるのにたいして、明るさ対応のないRDSステレオグラムでは、60msecの入力遅延で逆に明瞭な立体視が生じた。一方、ドット密度が1-2%の明るさ対応のないステレオグラムでは、左右入力に遅延を設けなくても立体視が可能であった。このとき、ドット密度を高めると立体視は消失した。明るさ対応のあるRDSステレオグラムでは、入力遅延が長くなるとフラッシュ提示されているので陰性残像が生じ、したがって対応部分の明るさが逆転するが、明るさ対応のないRDSステレオグラムでは逆に陰性残像が生じることによって明るさ対応ができるようになる。これらの結果から、局所的立体視過程では明るさ対応のないステレオグラムを処理できるのに対して、大局的立体視過程ではそれが不可能であること、またドット密度が小さいときは局所的過程で、そして密度が高くなると大局的過程で処理されることが示唆される。

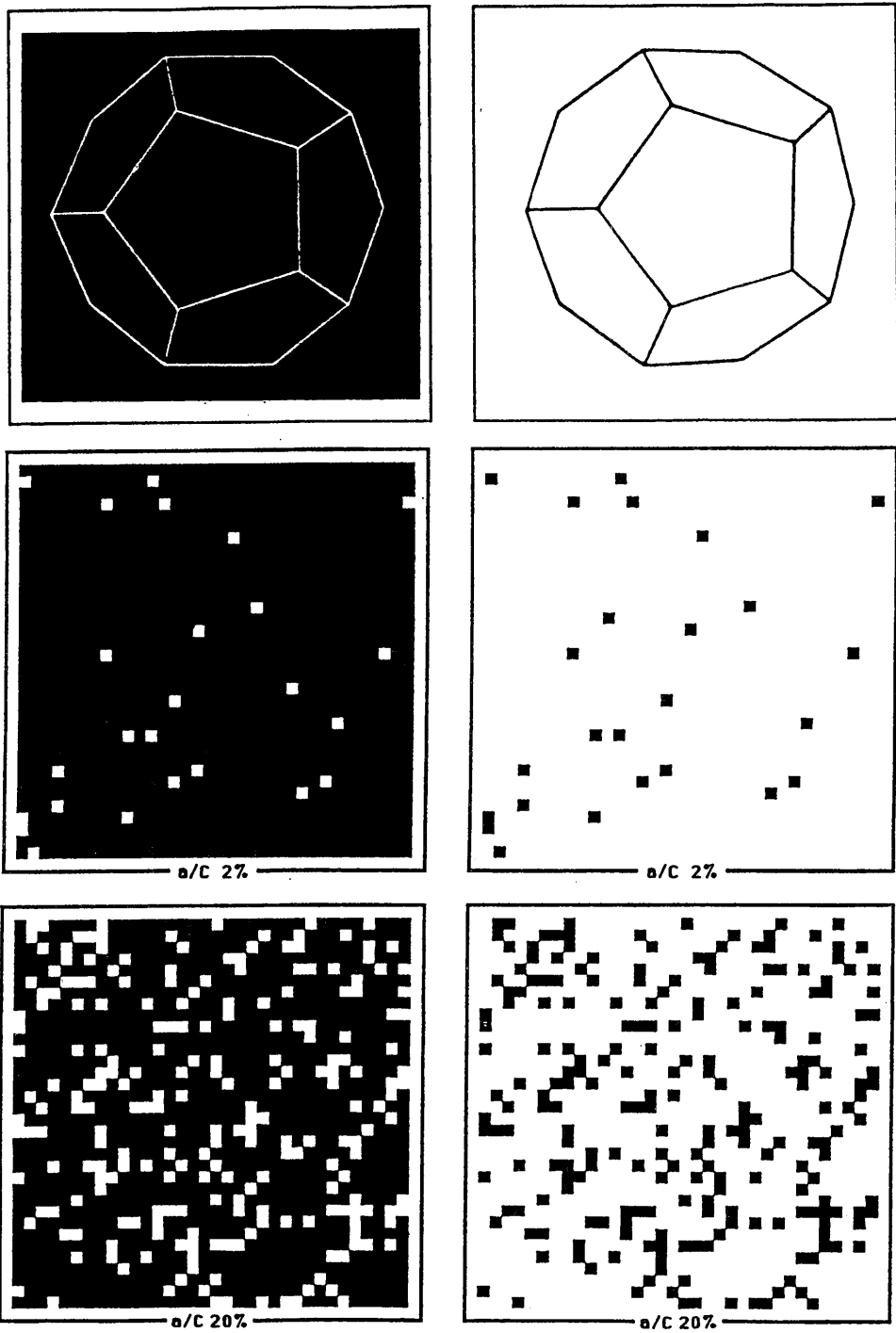


図19 対応部分の明るさコントラストが逆転しているステレオグラム (Cogan, A. I., Lomakin, A. J. & Rossi, A. F. 1993)

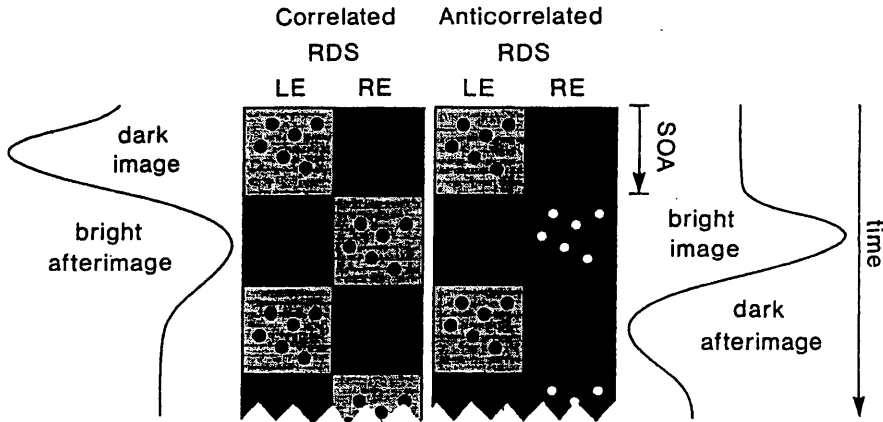


図20 明るさコントラストが左右で逆転した RDS の立体視実験のパラダイム。左右眼へは刺激遅延を設定して入力する。明るさコントラストが左右で対応する RDS では 45msec 以上の遅延で両眼立体視は不能となるが、明るさコントラストが左右で逆転した RDS では60msec 以上の遅延で明瞭な立体視が成立する。(Cogan, A. I., Lomakin, A. J. & Rossi, A. F. 1993)

2. 17. 両眼立体視能力を欠いた者の出現頻度

両眼立体視能力を欠いた者の出現頻度がしらべれた (Coutant & Westheimer (7))。検査は、Key-stone plate stereo test と Hexagon dot stereotest が用いられた。前者は 6 行 5 列の位置に様々な形状のパターンが提示され、各行のなかで最も浮き出ているものを答えさせるテストであり、後者は星状に配置されたドットに対して中央のドットの奥行を判断させるテストである。188名の無作為に抽出した学生を対象として検査したところ、97.3%のものは2.3min 以下の視差を検出できること、また少なくとも80%の者は30sec の視差を弁別できたという。

2. 18. 両眼立体視を担う神経生理学的過程

両眼立体視は、交差視差、非交差視差および注視面のそれぞれを検出する神経ユニットに担われていると考えられてきた。これは、交差あるいは非交差に特異的に反応しないステレオアノマリーの発見 (Richards1970,1971)、およびサル V 1 と V 2 の単一神経細胞での同様な 3 種類の視差に特異的に応答するユニットの発見 (Poggio & Fisher 1977) にもとづいていた。しかし、最近、このような 3 種類の視差ユニット仮説を否定する研究があらわれた (LeVay. & Voight 1989)。すなわち、ネコの視覚領の神経ユニットをしらべたところ、3 種類の明確に区別されるユニットがあるのではなく、ひとつの連続した視差ユニットが存在しているという。

そこで、Cormack, Stevenson & Schor (5) は、精神物理学的に視差ユニットをしらべた。視覚の神経生理的過程を精神物理学的にしらべるには、順応法、マスキング法があるが、ここでは、刺激閾下加重法 (subthreshold summation) が用いられた。この方法は、図21-a に示されたように、ひとつの刺激がひとつのチャンネルに対応している場合には、刺激強度が一定の値を超えれば反応が出現する。このとき、第 2 刺激が追加されれば刺激の加重効果が生じるので、そのチャンネルは半分の刺激強度で反応する (図21-b)。さらに、この追加された第 2 刺激が別のチャンネルを活性化すれば、そのときの刺激強度は、単一刺激条件 (図21-a) の場合と刺激加重条件の間の刺激強度でそのチャンネルが反応すると予測できる。刺激にはダイナミック・ランダム・エレメント・

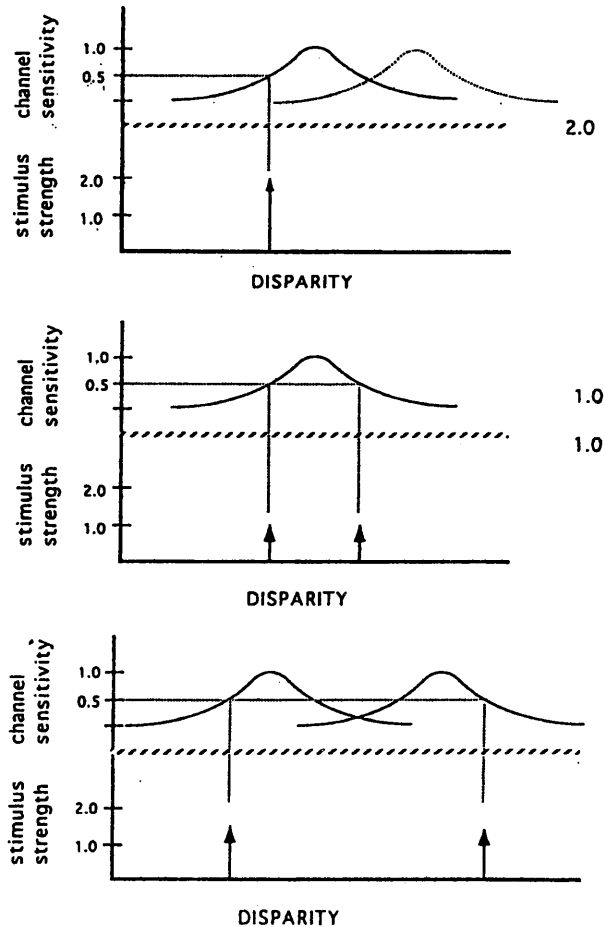


図21 刺激閾下加重法の原理。図 a. ひとつの刺激がひとつのチャンネルに対応している場合には、刺激強度が一定の値を超えれば反応が出現する。図 b. 第 2 刺激が追加されると、刺激の加重効果が生じるので、そのチャンネルは半分の刺激強度で反応する。図 c. 追加された第 2 刺激が別のチャンネルを活性化すれば、それは単一刺激条件 (図 a) の場合と刺激加重条件の間の刺激強度で反応する。(Cormack, L. K., Stevenson, S. B. & Schor, C. M. 1993)

ステレオグラムが用いられ、刺激強度としては左と右のステレオグラムの対応度が変わえられた (対応度 50% から 100% の間で変化)。単一面が表出する条件と 2 つの奥行面が表出する条件とで立体視出現するのに必要な刺激強度 (左右ステレオグラムの対応度) が測定された。その結果、刺激加重は提示された 2 つの視差間の程度によって変化することが示された。刺激加重は、2 つの視差間の差がゼロあるいはほとんど類似しているときに最大となり、その差が増大するに連れて減少し、さらに増大すると逆に抑制が生じた。網膜像視差に同期するチャンネルは、相互抑制あるいは中心一周辺型特性をもつと考えられる。

サルを対象とした電気生理学的研究によれば、V 1 と V 2 が局所的立体視に強く関係し、また大局的立体視にも若干関係していることが報告されている。また、V 1 と V 2 を除去すると両眼立体視力は悪くなるが、大局的立体視は健常なまま残されるのに対して、inferotemporal cortex を両側

とも除去すると大局的立体視が失われる。これは、両側の posterior cortex に損傷を受けた患者が両眼立体視力を失うことから裏付けられている。一方、側頭葉を失った患者、とくに右半球のそれを失った患者は局所的立体視は健常なままに残るが大局的立体視は損なわれる。そこで、PET (Positron Emission Tomography) を利用して両眼立体視を担う大脳部位がしらべられた (Ptito, et al, (26))。実験では、被験者に RDS を観察させ、奥行判断をしている最中の血流変化が、両眼立体視を伴わない 2 次元形状知覚条件あるいは無刺激条件と比較された。その結果、血流の増加は、右半球の 17、18 野で観察され、逆に血流の減少は、右の inferotemporal cortex でみられた。このことから、両眼立体視は右半球の視覚領の後部, striate cortex および prestriate cortex で処理が開始されること、また網膜像視差の処理は右半球にかたよっていることが示唆されている。

また、ネコの両側の lateral suprasylvian cortex のいろいろな部位を除去し、単眼と両眼奥行視への影響がしらべられた (Kruger, Kiefer, & Groh (19))。奥行視は跳躍法でテストされ、その結果、lateral suprasylvian visual area (LSA) と領域 7 が両眼奥行視に関係していることが明らかにされた。とくに、LSA を除去すると両眼の手がかりによる奥行視は残存できるが、単眼の手がかりによる奥行視は大きく損なわれ、領域 7 を取り除くと両眼奥行視は回復されないことが明らかにされている。

2. 19. 3 次元表示のための有効な方法

人間がディスプレイ上に表現された立体形状や奥行配置を容易に識別するためには、コンピュータによる 3 次元表示技法を工夫する必要がある。3 次元表示のためには、人間が 3 次元属性を知るための主たる奥行手がかりである網膜像視差や運動視差をディスプレイ上に提示しなければならない。網膜像視差を提示する技法には、左右眼に視差をもつ刺激を提示する方法 (ディスプレイに左右像を交互に提示し、それと同期するシャッターをもつ眼鏡を装着する技法、あるいはディスプレイに左右像を交互に提示し、ディスプレイの前面にシャッターを設置し、偏光グラスをかけて見る方法などがある)、ディスプレイに網膜像視差 (水平視差あるいは垂直視差のいずれか) をもつ左右像を交互に提示し、それを両眼同時観察させる技法 (autostereoscopic technique or alternating parallax technique)、および Purfrich 効果を利用する技法 (片眼にデンスティ・フィルタを装着させる) がある。運動視差は、形状を構成する要素を観察者からの奥行程度に応じて速度差を設定して提示される。Adelson et al. (1) は、これらの 3 次元表示技法のなかで、いずれが形状や奥行配置を識別するために効果的かをしらべた。その結果、奥行位置の正確度とその反応時間を指標として手がかりの有効性をみると、網膜像視差、運動視差が効果的であること、alternating parallax 技法は前面と後面の識別に有効ではあるが奥行を直感させる手がかりとはならないことなどが示された。このことから、奥行識別のためには網膜像視差が、形状認知のためには網膜像視差と運動視差が有効であることがわかる。

3. 複数の奥行手がかりの統合

3. 1. 運動要因と肌理要因の統合

奥行や立体を知るための手がかり要因は、通常、複数個存在し、それらを統合して 3 次元視が成立する。このとき、複数の要因がどのようにして統合されるかについて、手がかりの弱い統合モデル (weak fusion model) と手がかりの強い統合モデル (strong fusion model) が考えられている (Clark & Yuille 1990)。手がかりの弱い統合モデルとは、その場面に存在するいくつかの手がかりがそれぞれ独立したモジュールで処理され、次いで、それぞれで算出された奥行が結合法則にもとづいて統合されると考えるものである。手がかりの強い統合モデルは、それぞれの手がかりから

の情報が協調的に処理されてひとつの奥行を算出すると考える。奥行手がかりが複合している場合、それらの手がかりは非線形の相互作用をしていると手がかりの強い統合モデルは予測するが、手がかりの弱い統合モデルではこのような相互作用は排される。2つの奥行手がかりを抗争させた結果は、その統合が複雑なことを示した。そこで、手がかりの弱い統合の修正モデル (modified weak fusion model) が提唱された (Maloney & Landy 1989)。ここでは、それぞれの奥行手がかりは、単独で処理されてそれぞれに奥行を算出し、次いでそれらの奥行が重みづけされて加算されると仮定される。個々の手がかりにつけられた重みづけは、その手がかりの視かけの信頼性という意味をもつ。いま、仮に肌理(d_t)と運動要因(d_m)という2つの奥行手がかりがあるとすれば、奥行(d)は、

$$d = \alpha_t d_t + \alpha_m d_m$$

で示される。ここで α_t 、 α_m は肌理と運動要因の重みづけを表わす。ここで、 α_t と α_m は、

$$\alpha_t + \alpha_m = 1$$

の関係をもつ。

d_m を固定し、 d_t を変化させて奥行 (d) を測定すると、

$$d_1 = \alpha_t d_{t1} + \alpha_m d_m$$

$$d_2 = \alpha_t d_{t2} + \alpha_m d_m$$

が得られ、したがって、

$$\alpha_t = (d_2 - d_1) / (d_{t2} - d_{t1}) = \Delta d / \Delta d_t$$

が求められる。

同様にして、 α_m も求めることができる。

Young, Landy & Maloney (36) は、図22に示したように、円筒の肌理勾配と円筒の傾き運動要因 (x 軸を中心に $-15^\circ \sim +15^\circ$ の間で運動する) の2要因の中、一方を固定し (奥行6.6cm)、他方を変化させて (奥行4.4–8.8cm) 円筒の奥行を判断させた。円筒の奥行判断は、2要因がともに6.6cmの奥行を示すパターンを標準としてそれよりも「深い」かあるいは「浅い」かの強制選択によった。測定された奥行は、2つの奥行手がかりの重みづけられたものの加算的総和と一致した。また、肌理要因もしくは運動要因にノイズをかけて、同様に奥行を求めたところ、ノイズのある手がかりの重みづけは低下し、逆にノイズの無い要因の重みづけは増大した。これらの結果から、手がかりの弱い統合の修正モデルが支持された。

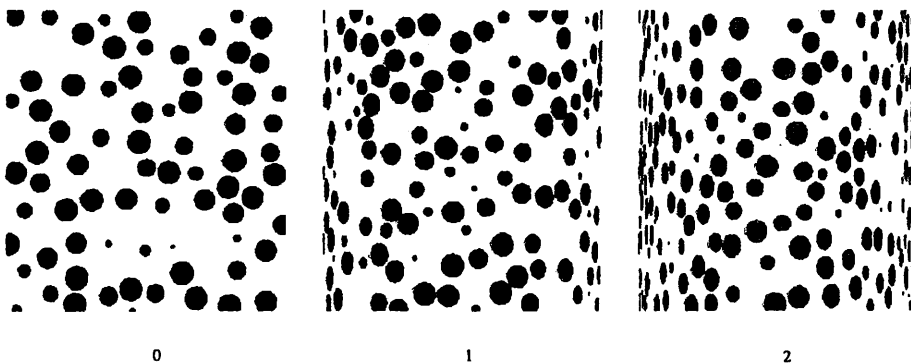


図22 肌理と運動の2要因を操作したパターン。ここでは円筒の直径の大きさに対応して肌理がどのように変わるかが示されている。運動要因は x 軸についてある角度の範囲で反復運動させる。下段の数字は同筒の丸みの程度 (深さ/幅) を表す。(Young, M. J., Landy, M. S. & Maloney, L. T. 1993)

3. 2. 網膜像視差と運動要因

複数の奥行手がかりがどのように統合されるかについては、次のようにまとめることもできる。一つは、ある強力な手がかりが他の弱い手がかりの上にたち、一方的に奥行あるいは立体形状を規定するというものである(否認型、Veto Type)。奥行手がかり間に抗争事態が起きているときには、ある手がかりが他の手がかりより優位になることによって奥行や立体形状がきめられる。二つめは、奥行や立体形状が複数の手がかりのそれぞれに重みづけがなされた上で、その総和で規定されるという考え方(加算型、Accumulation Type)である。ここでは、それぞれの手がかりは独立したモジュールで処理されることを前提とする。三つめは、奥行や立体形状が得られる以前に複数の手がかり間での協調を認めるものである(協調型、Cooperation Type)。ここでは、ある手がかりが不十分なときには他の手がかりがそれを補完あるいは助長することができる。Johnston, Cumming & Parker(18)は、図23に示されたように、網膜像視差とテクスチャとを操作して奥行手がかり間の統合過程をしらべたところ、(1)テクスチャが網膜像視差によって否認されてしまうということは起きないこと、(2)それよりは重みづけをもつ加算的総和で説明されうること、(3)このとき、テクスチャに低い重みづけしか割り当てられないが、観察距離が200cm程度になるとテクスチャに対する重みづけが増大することなどを明らかにした。

一方、複数の奥行手がかりの統合での4番目の考え方として、奥行曖昧性解消型(Disambiguation

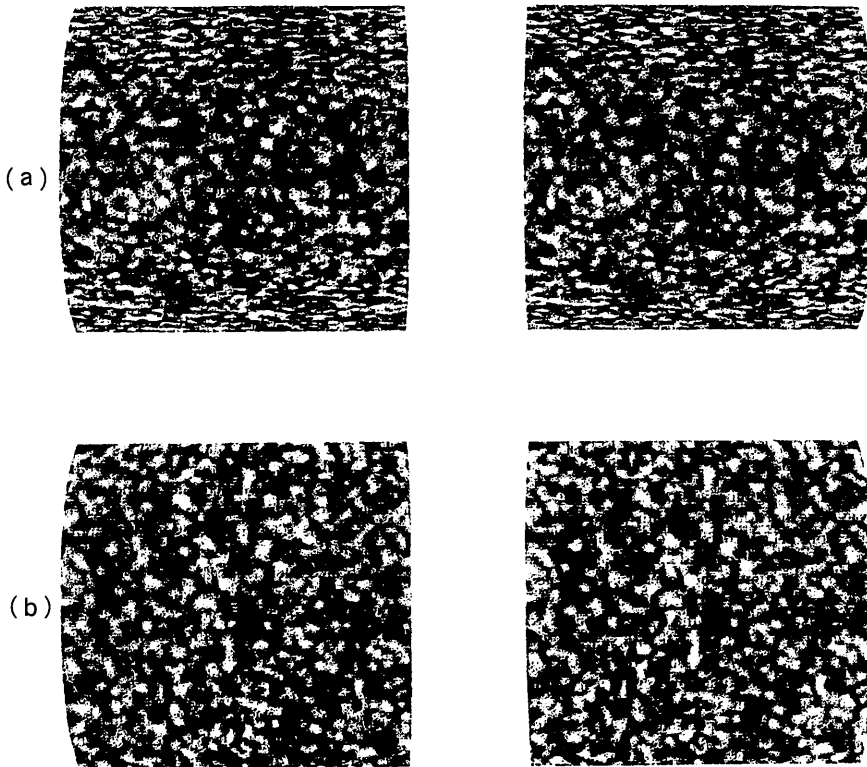


図23 テクスチャを操作したステレオグラム。(a)適切なテクスチャ勾配をもつステレオグラムで、両眼立体視すると水平方向位置におかれた円筒が出現する。被験者には円筒の幅に対する奥行の比を報告させる。(b)前額平行面でのテクスチャをもつステレオグラム。(Johnston, E. B., Cumming, B. G. & Parker, A. J. 1993)

Type)が提唱されている (Andersen & Braunstein 1983)。これによると、それぞれの奥行手かかりはそれらに固有な奥行曖昧性を解消しあう。例えば、運動からの形状知覚 (Structure From Motion, SFM) は知覚された対象間の奥行位置関係は曖昧にしか指示しないが、これに網膜像視差による情報が加わればこの曖昧性が解消される (Richards 1985)。Tittle & Braunstein (31) は、この複数の奥行手かかり間の統合過程を網膜像視差要因と SFM とに限定して検討した。刺激には、水平軸を中心として回転する透明な円筒 (表と裏側の両面が表示される) を SFM と網膜像視差を用いて構成し、ドットでシミュレートしたものを用いた。運動要因については、SFM 情報が存在するように設定した条件 (ローテーション条件、円筒の表面形状が表示されるようにドットを操作した条件、円筒は水平軸を中心として回転して見える) と SFM 情報が存在しないように正射影投影でドットを操作した条件 (トランスレーション条件、ドットは円筒の表側と裏側で常に反対方向で横に等速度並進する。ここには円筒の表面の奥行や形状を指示するものは存在しない) とが設定された。円筒の半径に対する奥行の視かけの割合を求めたところ、ローテーションおよびトランスレーション条件とも、網膜像視差単独条件よりはヴェリディカルな立体が知覚された。SFM 情報が存在しないトランスレーション条件でも立体視が増進したことから、SFM 情報が単独で網膜像視差の奥行曖昧部分を解消していると考ええるよりは、SFM 情報は両眼立体視を促進するように働いていると考えられる。とくに、テクスチャの密度を高めると、網膜像視差単独条件およびトランスレーション条件では、立体感が減少するのに対してローテーション条件では安定した立体視が得られた。これらの結果から、SFM 情報は両眼立体視の対応を容易にするような作用をもち、両要因は協調的關係にあると結論される。

また、網膜像視差と運動視差との関係も、両要因が抗争的条件において検討された (Uomori & Nishida (32))。両要因の抗争は、水平軸中心に回転して見えるランダム・ドットの円筒を網膜像視差で、垂直軸中心回転は運動視差で作成 (KDE) することによって設定した。観察者は両要因で作成された円筒を見て、円筒の中心はどの軸かが求められた。その結果、観察当初には運動視差で作成された円筒が、その後は網膜像視差で作成された円筒が優位に視えた。網膜像視差で作成された形状は、本来、運動視差のそれよりも優位であるが、しかし両眼対応を行うまでに時間がかかるので、はじめに運動視差で作成された形状が視えたのか、あるいは運動要因についての順応が網膜像視差のそれよりも早くまた強力なために、しだいに運動視差による立体効果が減衰し、この結果となったのであろうか。運動刺激に順応させた場合と網膜像視差に順応させた場合で、順応後に両要因で作成した検査刺激を提示し、どの中心軸の円筒が視えるかをしらべたところ、運動刺激に順応させた条件でのみ運動視差に対する強い抑制効果が出現した。さらに、様々な運動刺激 (速度差のある運動条件、一様な速度で運動する条件、不規則な速度で運動する条件、運動方向が交替する条件、運動位置が交替する条件など) に事前に順応させ、その後に同様な検査刺激を提示したところ、速度差のある運動条件の運動視差に対する抑制効果が大きいことが示された。これらのことから、運動視差は、はじめに相対的な速度差の検出から処理過程がスタートすると考えられる。

3. 3. 両眼立体視過程と運動要因による立体視過程は同一のメカニズムによるか

網膜像視差にもとづく奥行 (depth from disparity, DS) と運動要因にもとづく奥行 (Kinetic depth, KD) とが、神経生理学的に同一のユニットで担われている可能性を示すいくつかの証拠が報告されている。たとえば、ダイナミックな両眼立体視に順応させ、その後で運動要因にもとづく奥行を曖昧な事態 (奥行に関して一義的に決められない条件) をテスト刺激として提示すると、その奥行判断は先行刺激に影響を受ける (Smith 1976, Rogers & Graham 1984, Nawrot & Blake 1989, 1993)。Nawrot & Blake (1991) によれば、DS と KD を担う神経ユニットは方向と網膜像視

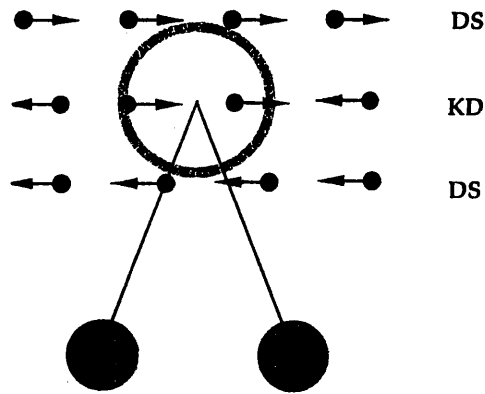


図24 両眼立体視過程と運動要因による3次元視過程が同一の神経ユニットで担われていることを検討するためのプライミング・パラダイム。はじめに、相互に反対方向に運動するドットに交差と非交差視差をつけて1秒間提示する（このようにするとドットは時計あるいは反時計廻りに奥行回転して見える）。その後、相互に反対方向に等しい速度で運動するドットをゼロ視差面に提示する。（Nawrot M. & Blake, R. 1993）

差に選択的に反応する。換言すれば、この神経ユニットは網膜像視差あるいは運動視差のいずれでも活性化される可能性をもつ。Nawrot & Blake (23) は、DSをあらかじめ提示し、次にあいまいなKDを提示したときにKDの奥行関係の知覚がDSに規定されるか否か、あるいはKDをあらかじめ提示し、あいまいなDSを提示したときの奥行関係がどのようになるかをしらべるプライミング・パラダイムを通して、この仮説の検証を試みた。前者については、図24に示すように、あらかじめDS(交差と非交差の視差をもつドットの帯が相互に反対方向に運動するので、全体的には時計廻りあるいは反時計廻りしているように見える)を提示し、次いで曖昧なKD(ゼロ視差に提示され、あたかも中心軸を中心として回転する球のように見えるが、運動方向は互いに反対方向のものを混在させてあるので、回転方向は曖昧となっている)をテスト刺激として提示し、その奥行関係の知覚(ここでは、球が時計廻りあるいは反時計廻りかの判断)をしらべる。後者については、あらかじめKD(運動視差をもちいて時計廻りあるいは反時計廻りする球)を提示し、次いでDS(運動するドットを交差あるいは非交差で提示するが、ドットの多くはゼロ視差でしかも運動方向は相互に反対)を提示し、その奥行関係についてしらべる。その結果、DSはKDに対してプライミング効果をもつこと、あるいはその逆にKDはDSに対して同様な効果を与えることが示された。両眼立体視過程と運動要因による3次元視過程とは共通の神経ユニットで担われていると考えられる。

4. 絵画的要因による3次元視

4. 1. テクスチャからの形状の知覚

テクスチャは3つの要因から成立している。テクスチャを構成する刺激要素の面積勾配、要素の密度変化および要素の形態圧縮率(形態の縦/横の比率)である。これらの3要因を独立に変化させ、どの要因がテクスチャから形状を知覚する場合にもっとも効果的かがしらべられた(Cumming, Johnston & Parker (8))。図25に示されたように、(1)密度要因(Density)、(2)面積勾配(area)、(3)形態圧縮率(compression)、(4)密度と形態圧縮率、(5)面積勾配と形態圧縮率などの組合せ条件が設定され、これを水平におかれた円筒の表面とみなして、その丸みの程度(半

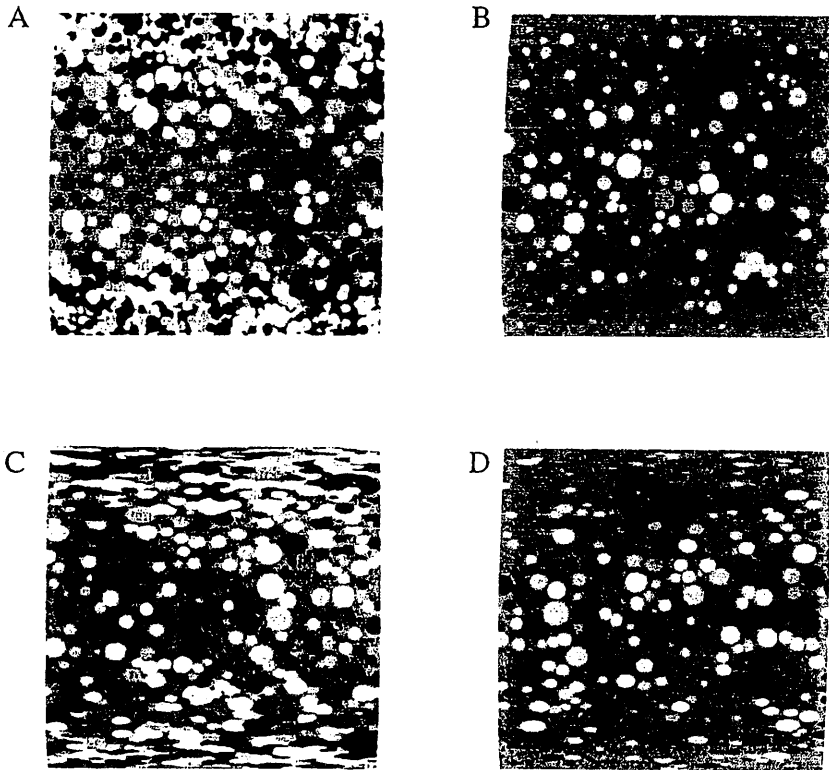


図25 テクスチャからの形状知覚。(A) 密度要因のみで表現、(B) 面積勾配 (area) のみで表現、(C) 密度と形態圧縮率 (テクスチャ要素の縦／横比率) で表現、面積勾配は除外、(D) 面積勾配と形態圧縮率で表現、密度は除外。(Cumming, B. G., Johnston, E. B. & Parker, A. J. 1993)

径に対する奥行の程度) が測定された (観察はステレオグラムを用いて両眼立体視条件で試行)。その結果、形態圧縮率が単独で存在する条件、あるいは他の要因に形態圧縮率が絡む条件で、テクスチャからの形状知覚が効果的であることが明らかにされた。

さて、表面に散在するテクスチャから面の形状 (この場合には円筒形の丸み) が知覚可能なのは、3次元形状をもつ対象の表面上のテクスチャが2次元面に投影されていると仮定しているからで、もし対象の面上の要素自体が変形しているならば、誤った知覚をしてしまう。テクスチャからの形状の復元には、対象表面がどのような特性をもつかについての仮定が必要となる。この仮説には2通り考えられる。ひとつは、Gibson が指摘したように、対象表面は、あたかもタイルを敷き詰めたように、同形、同大の刺激で満たされているので、その幾何学的特性は一樣 (homogeneous) であり、したがって対象表面のテクスチャ要素の密度は一定と仮定するものである。もうひとつは、対象表面自体には対象の奥行特性を表示する要素は何もなく等方的 (isotropic) と仮定するものである。いま、対象表面が円形の小石を敷き詰めたような外観をもつとしよう。観察者がこの対象表面を一樣であると仮定すれば、観察者は一部の円形がどのように変形しているか、すなわち円の縦／横比率の変化 (楕円の程度) から、表面の形状を判断することが可能となる。しかし、観察者が対象表面には奥行特性を表示するものは存在せず等方的である仮定すれば、対象表面には円形の小石の他に楕円の小石も存在することになり、全体の形態圧縮率を視ることでは表面形状は

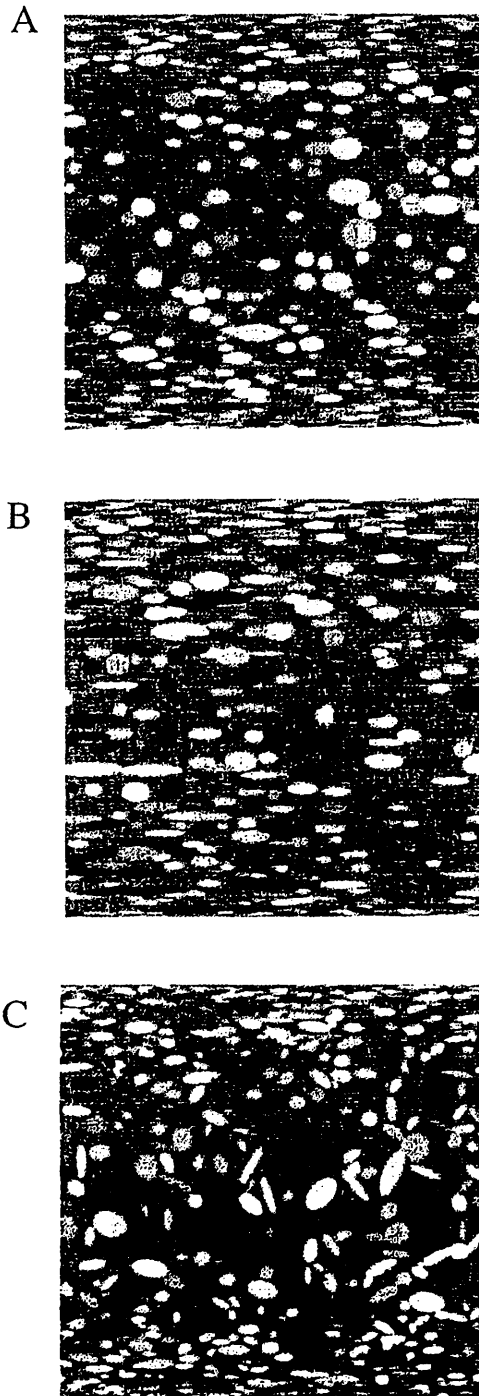


図26 テクスチャの形態圧縮率を変化させた条件での形状表現。(A) テクスチャ要素が一定方向で圧縮率1.5、(B) テクスチャ要素が一定方向で圧縮率3.0、(C) テクスチャ要素がランダムな方向で圧縮率3.0。(Cumming, B. G., Johnston, E. B. & Parker, A. J. 1993)

知覚できない。Cumming, Johnston & Parker (8)は、図26に示されたように、形態圧縮の勾配は一定としたまま、個々の要素の最大圧縮率を変え、また圧縮の方向も、水平方向(図a、b)のみとランダム方向(c)とを設定して、その表面の形状判断(水平におかれた円筒の半径に対する奥行の程度)を求めた。その結果、最大圧縮率が増大すると表面の形状判断は悪くなること、しかし圧縮の方向をランダムにしても形状判断は悪くならないことが示された。このことから、人間の視覚システムは対象表面のテクスチャが一様ではなく等方的であると仮定して、テクスチャから表面の形状を知覚していることを示唆する。

4. 2. Hollow Face の錯覚

Hollow Face の錯覚とは、人間の顔のマスクのような凸状の対象をその背後から照明し、そして1mないし1.5m程度の観察距離から視ると、奥行の反転が生じてマスクが窪んで見える現象をいう。陰影の手がかりは、それ自体、曖昧な特性をもち、一義的には奥行方向を支持しない。凹面でもある照明方向から照射されると凸面に見えるし、逆に凹面が実際とは反対方向から照明されているように見えることもある。陰影要因のこのような曖昧な特性が、Hollow Face の錯覚を導く。この錯覚を起こす要因のうち、照明方向と対象の提示方向について吟味された(Hill & Bruce (15))。正立方向にマスクが提示され、照明が上方向の時に、明瞭な錯覚が生じること、しかし、マスクを倒立提示しても、ある程度の錯覚が生じることが示された。この錯覚では、人間の顔という情報が凹あるいは凸として知覚の成立に影響している。

5. その他の3次元視研究

5. 1. 螺旋運動残効

回転する螺旋形状パターンの運動残効は、回転方向とは反対の運動印象が生じるが、このとき、2次元での拡大(縮小)と3次元での進出(後退)とが知覚される。円の中心点で45度で交差する8本の点線パターンを回転させて運動を作ると、両眼視条件では主として2次元での運動残効が、単眼視条件では3次元での運動残効が多く観察されるという(Wright & Day(35))。3次元視情報の程度が運動残効の出現の在り方に影響している。

5. 2. 手動水平位置固持操作と誘導運動

CRT上に水平に提示された線分を、その周囲を囲むドットが回転した状態で水平に保つことは難しく、ターゲット線分を回転方向へと傾斜させるある種のバイアスが生じる。これはターゲット刺激の周囲の回転による局所的な知覚的誘導運動にもとづくのか、あるいは、それが観察者自身の姿勢の傾斜を誘導し、その結果としてこの種のバイアスが起きるのかが、Prebic & Donnelly(27)によって検討された。ターゲット刺激の周囲に回転するドットを提示するが、この時、ターゲット刺激と周囲との間に奥行を設けた。その奥行はターゲット刺激の前、後、および同一面に両眼立体視で提示された。観察者には、回転する周囲の中に提示されたターゲット線分を水平に固持するように求めるとともに、誘導運動と観察者自身の傾きを報告させた。その結果、手動で水平位置を固持する操作へのバイアスと誘導運動とは密接に関連し、どちらもターゲット刺激と同一あるいはその背後の周囲に提示された回転運動に強く影響されることが示された。

6. おわりに

立体や奥行を知るための手がかり(cue)は、観察者側と刺激側の両方で複数個存在し、視覚システムはそれらを統合して視覚世界を認識している。しかし、視覚心理実験では、条件を統制する必

要から、それらの手がかりを可能な限り制限し、単独での立体効果を分析するのを常道とする。ここに、複数の手がかりが存在する事態での手がかり統合過程の問題が生じる。この問題は、視覚システムを解明する上にも、またこれら奥行手がかりを VR(virtual reality)や CAD(computer-aided design)に応用し、リアリティの高い3次元空間を表現するためにも必要となる。

奥行手がかり統合モデルには、弱い統合モデルと強い統合モデルとが提唱されている。弱い統合モデルでは、それぞれの手がかりはそれぞれ固有のモジュールで別々に処理された後に結合法則にもとづいて統合される。結合法則は、単純加算あるいは重みづけ加算とし、手がかり間の相互作用は想定しない。一方、強い統合モデルでは、それぞれの手がかりが協調的に処理されてひとつの奥行を算定する。ここでは、手がかりは非線形の相互作用をしていると仮定される。Young, Landy & Maloney(36)の運動要因と肌理要因とを操作した研究は、視かけの奥行が2つの手がかりの重みづけ加算の総和と一致したことから弱い統合モデルを支持する。

これに対して、Tittle & Braunstein(31)の研究によれば、それぞれの手がかりには守備範囲のようなものがあり、単独では立体や奥行を表現できず曖昧な部分が残る。たとえば、網膜像視差は奥行位置関係は正確に支持するが、立体形状は曖昧な部分が残る。一方、運動視差は形状は正確に表現されるが、奥行位置関係は曖昧となる。視覚システムはこれらの手がかりを相互に補完しあうことによって3次元を再現する。網膜像視差とKD(kinetic depth)を組み合わせると、それぞれが単独で提示されたときよりは正確に立体形状と奥行が知覚されることから、奥行手がかりは協調的關係にあり、ここでは強い統合モデルが支持される。奥行手がかりについての2つのモデルの検証はこれからの課題であろう。

近年、両眼立体視(網膜像視差)と単眼運動立体視(運動視差)とは、同一の神経生理過程で処理されていることを示す精神物理学のそして神経生理学的データが多くなってきている。プライミング・パラダイムを用いての Nawrot & Blake(23)の研究によれば、網膜像視差にもとづく先行刺激は運動視差にもとづくテスト刺激の視えにプライミング効果をもち、またその逆も成立することが示され、これら2つの立体視過程が同一の神経ユニットで処理されている可能性が示唆された。網膜像視差と運動視差とは、3次元立体や空間を再現する2つの主要な要因であり、もしこれらが同一の神経生理過程で処理されているのであれば、立体や奥行視の起源は運動視差にあるとも考えられるので興味深い。

絵画的要因の立体効果については、あいかわらず、研究が少ないが、陰影、テクスチャ、パースペクティブなどの要因は、VRやCADでの3次元表現に必要なものであり、その奥行手がかり効果を定量的に確定するとともに、これらの手がかりが3次元の再現に効果を持つことは確認されているので他の手がかりと組み合わせられた事態でどのように作用するかがこれからの検討課題となる。これに関しては、Cumming, Johnston & Parker(8)が、テクスチャについて詳細な分析を試み、テクスチャから立体形状を知覚するのに主要な要素が形態圧縮率(テクスチャを構成する要素パターンの縦/横比率)であることを指摘したが、これは3次元表現を考える上で重要であろう。

心理学における3次元視研究の領域では、これからVR技術が導入されるので、視覚過程の研究とともに、VR技術への応用的側面の研究も進展すると期待される。

文 献

1. Adelson, S. J., Allen, J., Badre, A.N., Hodges, L. F. & Lawrence, A. 1993 Performance comparison of multiple image depth and shape cues. *International Journal of Human-Computer Interaction* 5, 347-360.

- 2 . Bingham, G. P. 1993 Optical flow from eye movement with head immobilized: Ocular occlusion beyond the nose. *Vision Research*, 33, 777-789.
- 3 . Cagnello, R. & Rogers, B. J. 1993 Anisotropies in the perception of stereoscopic surfaces: the role of orientation disparity. *Vision Research*, 33, 2189-2202.
- 4 . Cogan, A. I., Lomakin, A. J. & Rossi, A. F. 1993 Depth in anticorrelated stereograms: Effects of spatial density and interocular delay. *Vision Research*, 33, 1959-1975.
- 5 . Cormack, L. E., Stevenson, S. B. & Schor, C. M. 1993 Disparity-tuned channels of the human visual system. *Visual Neuroscience*, 10, 585-596.
- 6 . Cornilleau-Peres, V. & Droulez, J. 1993 Stereo-motion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure. *Perception & Psychophysics*, 54, 223-239.
- 7 . Coutant, B. E. & Westheimer, G. 1993 Population distribution of stereoscopic ability. *Ophthalmol. Physiol. Opt* 13, 3-7.
- 8 . Cumming, B. G., Johnston, E. B. & Parker, A. J. 1993 Effects of different texture cues on curved surfaces viewed stereoscopically. *Vision Research*, 33, 827-838.
- 9 . Cumming, B. G. & Parker, A. J. 1994 Binocular mechanisms for detecting motion-in-depth. *Vision Research*, 34, 483-495.
- 10 . Fahle, M. & De Luca, E. 1994 Spatio-temporal interpolation in depth. *Vision Research*, 34, 343-348.
- 11 . Ganis, G., Casco, C. & Roncato, S. 1993 Perceived rigidity and nonrigidity in the kinetic depth effect. *Perception*, 22, 23-34.
- 12 . Glennerster, A. & Rogers, B. J. 1993 New depth to the Müller-Lyer illusion. *Perception*, 22, 691-704.
- 13 . Harrad, R. A., McKee, S. P., Blake, R. & Yang, Y. 1994 Binocular rivalry disrupts stereopsis. *Perception*, 23, 15-28.
- 14 . Herbolme, P. & Ninio, J. 1993 Processing of linear elements in stereopsis: Effects of positional and orientational distinctiveness. *Vision Research*, 33, 1813-1825.
- 15 . Hill, H. & Bruce, V. 1993 Independent effects of lighting, orientation, and stereopsis on the hollow-face illusion. *Perception*, 22, 887-897.
- 16 . Ichikawa, M. & Egusa, H. 1993 How is depth perception affected by longterm wearing of left-right reversing spectacles. *Perception*, 22, 971-984.
- 17 . Ishigushi, A. & Wolfe, J. M. 1993 Asymmetrical effect of crossed and uncrossed disparity on stereoscopic capture. *Perception*, 22, 1403-1413.
- 18 . Johnston, E. B., Cumming, B. G. & Parker, A. J. 1993 Integration of depth modules: Stereopsis and texture. *Vision Research*, 33, 813-826.
- 19 . Kruger, K., Kiefer, W. & Groh, A. 1993 Lesion of the suprasylvian cortex impairs depth perception of cats. *NeuroReport* 4, 883-886.
- 20 . Mansfield, J. S. & Parker, A. J. 1993 An orientation-tuned component in the contrast masking of stereopsis. *Vision Research*, 33, 1535-1544.
- 21 . McKee, S. P., Bravo, M. J., Taylor, D. G. & Legge, G. E. 1994 Stereo matching precedes dichoptic masking. *Vision Research*, 34, 1047-1060.
- 22 . McKee, S. P. & Harrad, R. A. 1993 Fusional suppression in normal and stereoanomalous observers. *Vision Research*, 33, 1645-1658.

23. Nawrot M. & Blake, R. 1993 On the perceptual identity of dynamic stereopsis and kinetic depth. *Vision Research*, 33, 1561-1571.
24. Nawrot, M. & Blake, R. 1993 Visual alchemy : stereopsis adaptation produces kinetic depth from random noise. *Perception*, 22, 635-642.
25. Patterson, R., Bowd. C., Phinney, R., Pohndorf. R., Barton-Howard. w. J. & Angilletta, M. 1994 Properties of the stereoscopic (Cyclopean) motion aftereffects. *Vision Research*, 34, 1139-1147.
26. Pito, A., Zatorre, R. J., Petrides, M., Frey, S., Alivisatos, B. & Evans, A. C. 1993 Localization and lateralization of stereoscopic processing in the human. *NeuroReport* 4, 1155-1158.
27. Prebic, F. H. & Donnelly, M. 1993 The effects of visual depth and eccentricity on manual bias, induced motion, and vection. *Perception*, 22, 929-945.
28. Ryan, C. & Gillam, B. 1993 A proximity-contingent stereoscopic depth aftereffect : evidence for adaptation to disparity gradients. *Perception*, 22, 403-418.
29. Siderov, J. & Harwerth, R. S. 1993 Precision of stereoscopic depth perception from double images. *Vision Research*, 33, 1553-1560.
30. Thompson, P. & Wood, V. 1993 The Pulfrich pendulum phenomenon in stereoblind subjects. *Perception*, 22, 7-14.
31. Tittle, J. S. & Braunstein, M. L. 1993 Recovery of 3-D shape from binocular disparity and structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 54, 157-169.
32. Uomori, K. & Nishida, S. 1994 The dynamics of the visual system in combining conflicting KDE and binocular stereopsis cues. *Perception & Psychophysics*, 55, 526-536.
33. Van Damme, W. J. M. & Van De Grind, W. A. 1993 Active vision and the identification of three-dimensional shape. *Vision Research*, 33, 1581-1587.
34. Van Den Berg, A. V. & Brenner, E. 1994 Human combine the optic flow with static depth cues for robust perception of heading. *Vision Research*, 34, 2153-2167.
35. Wright, R. D. & Day, R. W. 1993 Effect of depth information on a bistable spiral -motion aftereffect. *Perception*, 22, 767-769.
36. Young, M. J., Landy, M. S. & Maloney, L. T. 1993 A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues. *Vision Research* 33, 2685-2696.

参考文献

- Andersen, G. L. & Braunstein, M. L. 1983 Dynamic occlusion in the perceptio of rotation in depth. *Perception & Psychophysics*, 34, 356-362.
- Badcock, D. R. & Schor, C. M. 1985 Depth-increment detection functins for individual spatial channels. *Journal of the Optical Society of America, A*, 2, 1211-1215.
- Blakemore, C. 1970 The range and scope of binocular depth discrimination in man. *Journal of Physiology, London*, 211, 599-622.
- Clark, J. J. & Yuille, A. L. 1990 *Data fusion for sensory information processing systems*. Boston, Mass., Kluwer.
- Frisby, J. P. & Julesz, B. 1975 Depth reduction effects in random-line stereograms. *Perception*, 4, 151-158.
- Frisby, J. P. & Roth, B. R. 1971 orientation of stimuli and binocular coding. *Quarterly*

- Journal of Experimental Psychology*, 23, 367-372.
- Julesz, B. 1971 *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- Krekling, S. 1974 Stereoscopic threshold within the stereoscopic range in central vision. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 51, 626-634.
- Legge, G. E. 1984a Binocular contrast summation-I. Detection and discrimination. *Vision Research*, 24, 373-383.
- Legge, G. E. 1984b Binocular contrast summation-II. Quadratic summation. *Vision Research*, 24, 385-394.
- LeVay, S. & Voight, T. 1989 Ocular dominance and disparity coding in cat visual cortex. *Visual Neuroscience*, 1, 395-414.
- Maloney, L. T. & Landy, M. S. 1989 A statistical framework for robust fusion of depth information. *Visual Communications and Image Processing IV. Proceedings of the SPIE*, 1199, 1154-1163.
- Mapp, A. P. & Ono, H. 1986 The rhino-optical phenomenon: Ocular parallax and the visible field beyond the noise. *Vision Research*, 26, 1163-1165.
- Mather, G. 1989 The role of subjective contours in capture of stereopsis. *Vision Research*, 29, 143-146.
- Mayhew, J. E. & Frisby, J. P. 1978 Stereopsis masking in humans is not orientationally tune. *Perception*, 7, 431-436.
- McKee, S. P. & Harrad, R. A. 1993 Fusional suppression in normal and stereoanomalous observers. *Vision Research*, 33, 1645-1658.
- McKee, S. P., Levi, D. M. & Bowne, S. F. 1990 The impression of stereopsis. *Vision Research*, 30, 1763-1769.
- Mitchell, D. E. & O'Hagen, S. 1972 Accuracy of stereoscopic localization of small line segments that differ in size or orientation for the two eyes. *Vision Research*, 12, 437-454.
- Nawrot, M. & Blake, R. 1989 Neural integration of information specifying structure from stereopsis and motion. *Science*, 244, 716-718.
- Nawrot, M. & Blake, R. 1991 A neural network model of kinetic depth. *Visual Neuroscience*, 6, 219-227.
- Nawrot, M. & Blake, R. 1993 On the perceptual identity of dynamic stereopsis and kinetic depth. *Vision Research*, 33, 1561-1571.
- Ogle, K. N. 1953 Precision and validity of stereoscopic depth perception from double images. *Journal of the Optical Society of America*, 43, 906-913.
- Papert, S. 1961 Centrally produced geometrical illusions. *Nature*, 191, 733.
- 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.
- Ramachandran, V. S. 1986 Capture of stereopsis and apparent motion by illusory contours. *Perception & Psychophysics*, 39, 361-373.
- Ramachandran, V. S. & Cavanagh, P. 1985 Subjective contours capture stereopsis. *Nature (London)*, 317, 527-530.
- Richards, W. 1970 Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10, 380-388.

- Richards, W. 1971 Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61,410-414.
- Richards, W. 1985 Structure from stereo and motion. *Journal of the Optical Society of America A*, 2,343-349.
- Smith, R. A.Jr. 1976 The motion disparity aftereffect: a preliminary study. *Vision Research*, 16,1507-1509.
- Shimojo, S. & Nakajima, Y. 1981 Adaptation to the reversal of binocular depth cues: effects of wearing left-right reversing spectacles on stereoscopic depth perception. *Perception*, 10,391-402.
- Tittle, J. S. & Braunstein, M. L. 1990 Shape perception from binocular disparity and structure from motion. *SPIE*, 1383, 225-234.