

3次元視知覚研究の動向—1992—

The Trends of The Research of 3-Dimensional Visual Perception in 1992

林部敬吉

Keikichi HAYASHIBE

目 次

- 1.はじめに
- 2.運動要因に誘導された3次元視
 - 2.1.運動の3次元視 (kinetic depth effect, KDE)
 - 2.1.1.運動の3次元視に影響する要因 (運動速度、運動範囲)
 - 2.1.2.KDEの神経細胞ネットワークモデル
 - 2.2.運動視差での奥行反転と観察者の頭部運動
 - 2.3.奥行視における自己受容的運動感覚情報の役割
 - 2.4.スリットを通しての運動対象の観察
 - 2.5.ステレオキネティック効果
 - 2.6.ステレオモーション
 - 2.7.絵画的奥行情報と運動的奥行情報の相互作用
 - 2.8.運動残効と注視作用
- 3.両眼立体視
 - 3.1.網膜視差勾配と立体視量
 - 3.2.対応問題での拘束条件
 - 3.3.等輝度条件での両眼立体視
 - 3.4.RDSの両眼立体視における有効性 (理想的観察者と人間観察者との比較)
 - 3.5.両眼立体視における左右視野の対応の程度と輝度コントラストの相関
 - 3.6.両眼立体視下での奥行恒常性
 - 3.7.両眼立体視における奥行手がかりとしての蔽—被蔽要因
 - 3.8.運動によって出現させた輪郭にもとづくステレオグラムの両眼立体視
 - 3.9.奥行対比効果 (depth contrast)
 - 3.10.両眼立体視で出現する形態輪郭の補完
 - 3.11.両眼立体視閾の測定での刺激の同時提示、刺激の空間的近接要因と眼球運動
 - 3.12.プルフリッチの振子現象
 - 3.13.両眼立体視条件での Ternus 仮現運動
 - 3.14.対象の回転運動情報からその3次元世界の計量的構造を構成することが可能か?
 - 3.15.継時的両眼立体視 (sequential stereopsis)
 - 3.16.Cannabis 薬服用時の両眼立体視の凹凸反転
 - 3.17.両眼立体視下でのアンマスキング

- 3.18.サル¹の両眼立体視閾と脳梁 (corpus callosum)、外側視覚有線野 (extra striate visual area)
- 3.19.ネコの RDS の両眼立体視と視覚中枢
- 3.20.サルにおける color opponent チャンネルと broad-band チャンネル
- 4.単眼的奥行手がかり
 - 4.1.単眼的奥行手がかりとしての色相対比要因 (無輝度対比条件での色相対比)
- 5.大きさ-距離関係
 - 5.1.熟知的大きさ要因 (familiar size)
 - 5.2.月の錯視
 - 5.3.3次元視における発達的研究
 - 5.4.3次元配置対象の描画表現の発達
 - 5.5.踏台あるいは障害物のアフォーダンスについての発達的研究
- 6.動物を対象とした3次元視研究
 - 6.1.ネコの単眼視覚経験剝奪と両眼奥行視
 - 6.2.生得的微細斜視をもつネコの両眼奥行視
- 7.おわりに

1.はじめに

本報には、心理学における3次元視知覚の研究論文を、Psychological Abstract 誌の1992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 の文献検索システムを利用した。検索語は、Distance Perception, Depth Perception, Stereoscopic Vision である。

2.運動要因に誘導された3次元視

2.1.運動の3次元視 (kinetic depth effect, KDE)

2.1.1.運動の3次元視に影響する要因 (運動速度、運動範囲)

対象の2次元投影像でもそれが回転していると容易に3次元形状を知覚可能であることが、運動要因からの3次元視 (KDE) として知られている。KDE には、主要な3要因、すなわち、対象の回転範囲 (持続時間)、対象の奥行程度、対象の2次元投影像のなかのノイズの程度が関与している (Hildreth et al. 1990)。ここでは、奥行の異なる3点が、ちょうど太陽を中心として回転する地球のように、ディスプレイの中心を回転して提示され、KDE の正確度の指標として3点のうち奥行的に真中にくる点がどれかが求められた。その結果、回転角度が増大するにつれてその正確度は増すが回転角度30-40度で定常状態になること、3点間の奥行程度が大きいとある範囲まではその正確度も増大すること、さらにノイズが多いとその正確度は減少するが、それが定常状態に到達する回転角度は、ノイズが無い場合と同等であること、などが示された。今回、Eby (8)は、図1のような円錐体をドットで構成して、太陽をまわる地球のように、円錐の底面を前額に平行になるようにして回転提示し、種々な時間的、空間的条件下で KDE 要因を分析した。円錐体の視かけの深差の推定判断 (メートル法での推定) を KDE の指標として用いた結果、KDE は(1)対象の運動速度と範囲の両要因に依存して変化すること、(2)対象の奥行が大きいほど速い運動速度が必要なこと、(3)対象を構成する要素数は無関係なこと、(4)対象が透明あるいは不透明であるか (あるいは重なりをもつか、もたないか) の要因も無関係であること、(5)対象が自転運動する場合には、公転運動する場合よりも、速い運動速度が必要となること、などが明らかにされている。

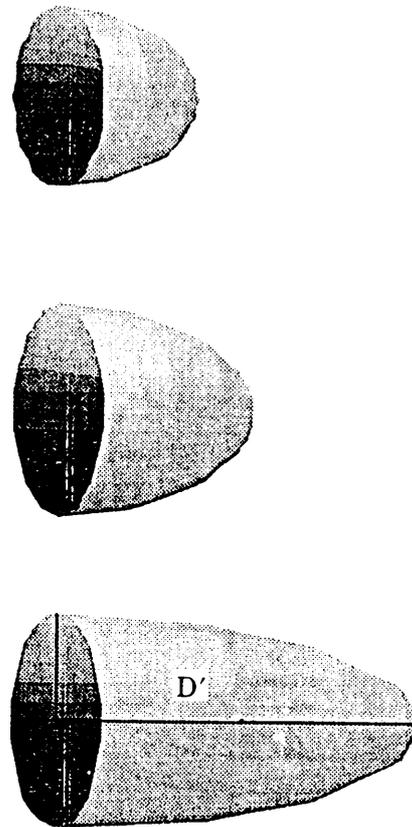


図1 円錐形を半切にしたもの、D'を判断させる (Eby 1992)

2.1.2.KDEの神経細胞ネットワークモデル

Nawrot & Blake(25)は、運動要因による奥行についての神経細胞ネットワークモデルを提唱した。このモデルは単眼ユニットと両眼ユニットから構成される。単眼ユニットは、単眼での受容野における対象の運動方向を検出する(但し、速度要因はKDEでは一定の役割をもつがここでは考慮されない)。両眼ユニットは、左右眼からなる一对の単眼ユニットで構成され、両眼視差と運動方向を検出する(図2)。これら一对のユニット間では、検出された運動方向と両眼視差は同一となる。また、これらユニット間では興奮あるいは抑制ネットが形成されている(図3)。これらのネット間では、同方向の運動を検出するユニットで奥行的に隣接するユニット間では興奮と抑制連結が、異方向の運動を検出するユニットで奥行の離れたユニット間では抑制連結が形成されている。

いま、前額平行な凝視面(両眼視差は零)で互いに反対方向に対象が運動したとすると(視かけ上、それらの対象は奥行を異にして見える)、両眼視差零レベルの両眼ユニットが活性化され、その興奮を他の両眼視差レベルの両眼ユニットに伝播する。そして、興奮と抑制のネットワークを通して、最終的に両眼視差のレベルが異なりしかもその運動方向が互いに反対方向のユニットが最大に活性化され、視かけ上の奥行が生じる。この刺激事態で順応させると、奥行反転が生じるが、これは最大に活性化された神経細胞の疲労の結果、両眼ユニットのペアを構成するもう一方の神経細胞に活性化が移ることで説明される(図4)。奥行の異なる対象が互いに反対方向に運動する場合は(両眼視差をもつケース)、その視差に対応したレベルの両眼ユニットで運動方向に同期する神経細胞が活性化される。

このモデルは、新たな刺激事態を設定すると、どのような知覚現象が生じるかを次のように予測する。いま、ある奥行面で不規則な方向に運動するランダム・ドットに別の奥行面のある方向にのみ運動するドットを重ねあわせて提示する。

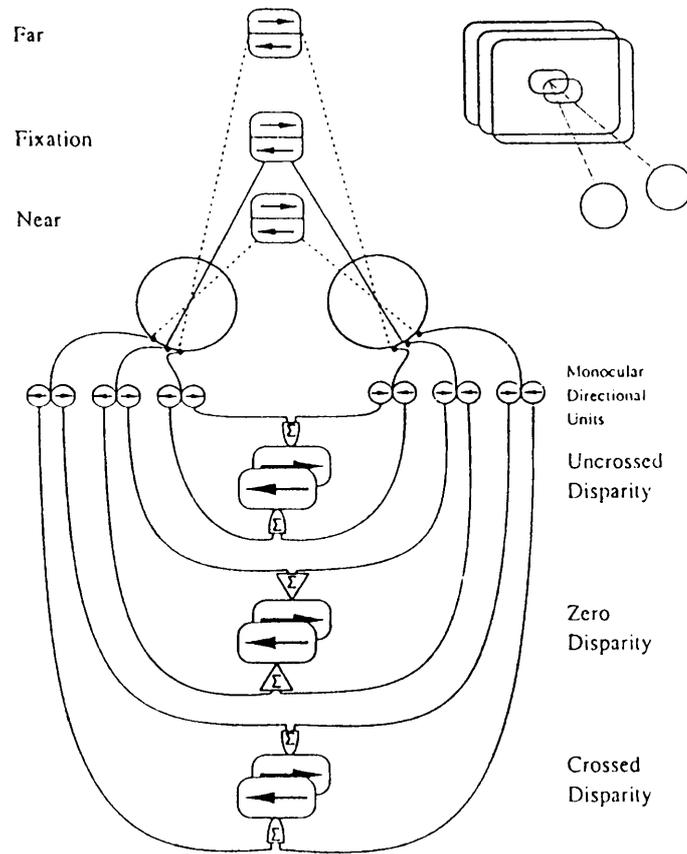


図2 KDの神経細胞ネットワークモデル。両眼ユニットは左右眼からの一対の単眼ユニットで構成され、両眼視差と運動方向を検出する。これら一対のユニット間では、検出された運動方向と両眼視差は同一となる。(Nawrot & Blake 1991)

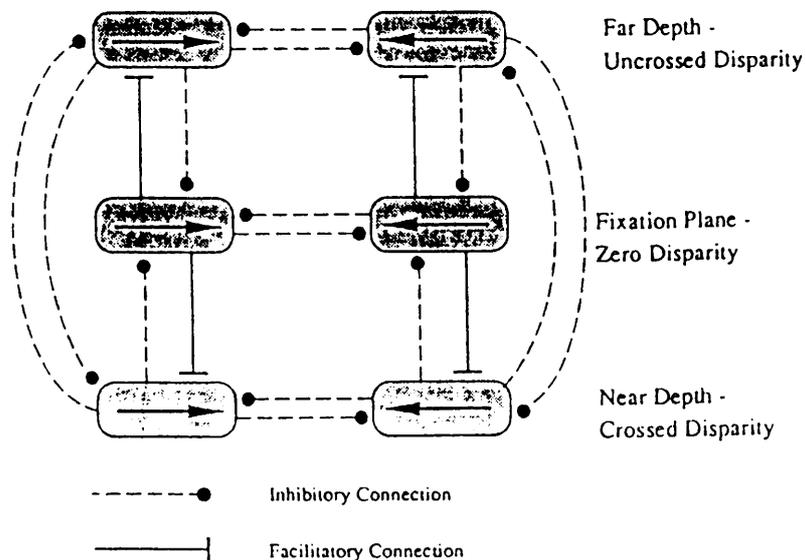


図3 両眼ユニット間での興奮あるいは抑制ネット。同方向の運動を検出するユニットで奥行的に隣接するユニット間では興奮と抑制連結が、異方向の運動を検出するユニットで奥行の離れたユニット間では抑制連結が形成されている。(Nawrot & Blake 1991)

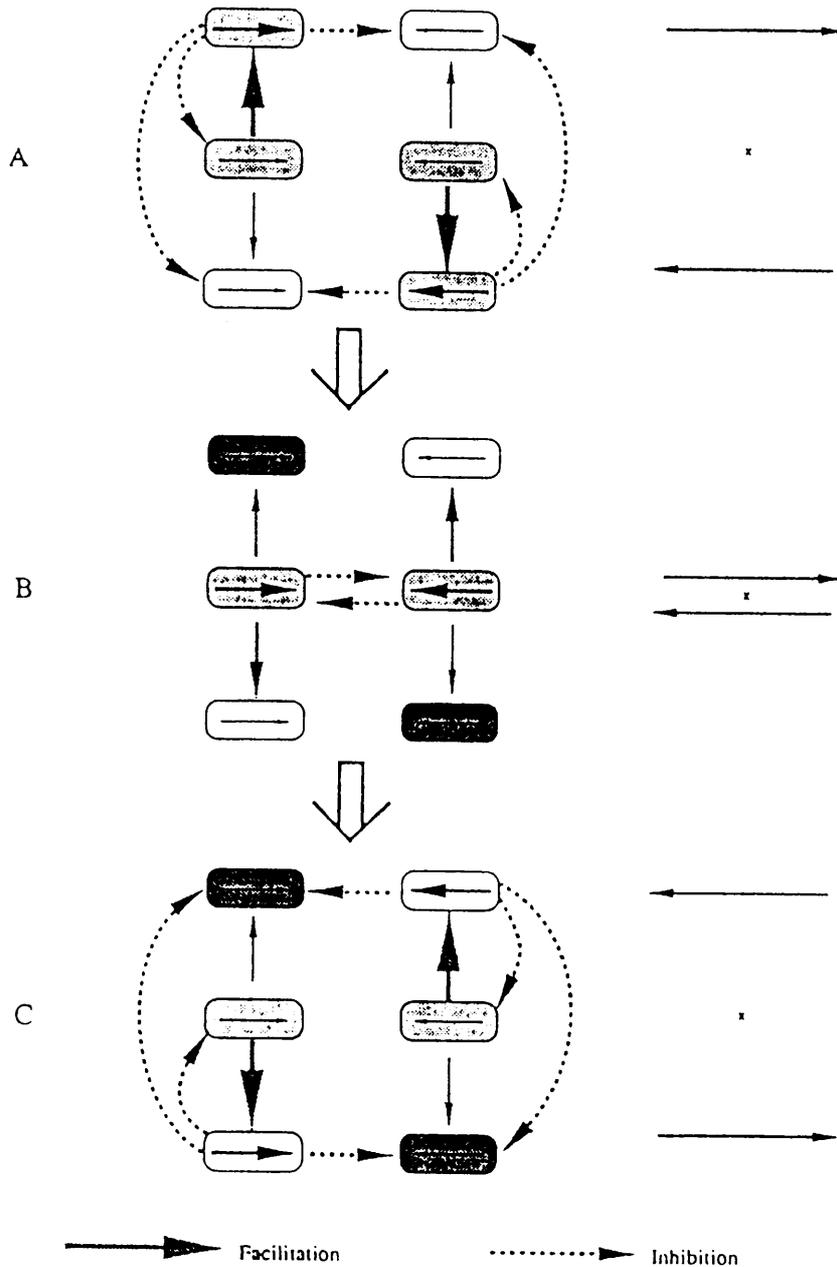


図4 神経細胞ネットワークモデルをもちいてのKDでの奥行反転現象の説明。

いま、前額平行な凝視面（両眼視差は零）で互いに反対方向に対象が運動したとすると（視かけ上、それらの対象は奥行を異にして見える）、両眼視差零レベルの両眼ユニットが活性化され、その興奮を他の両眼視差レベルの両眼ユニットに伝播する。そして、興奮と抑制のネットワークを通して、最終的に両眼視差のレベルが異なりしかもその運動方向が互いに反対方向のユニットが最大に活性化され、視かけ上の奥行が生じる（A）。この刺激事態で順応させると、奥行反転が生じるが、これは最大に活性化された神経細胞の疲労の結果（B）、両眼ユニットのペアを構成するもう一方の神経細胞に活性化が移ることで説明される（C）。図中、実線と点線矢印は興奮と抑制を各々示し、その太さはそれらの活性化程度を表す。またユニットに付した陰影濃度は、それが濃いほど神経的疲労を示す。（Nawrot & Blake 1991）

このモデルによれば、この両方のドットが置かれた奥行面間の距離が小さいとき（両眼視差が小さいか零）には、不規則方向に運動するドットは規則的方向に運動するドットと同方向に運動するように見え、一方、この両方の奥行面間の距離が大きいとき（両眼視差が大きい）には、不規則方向に運動するドットは規則方向に運動するドットと反対方向に運動して見えることが予測される。なぜならば、奥行面間の距離が小さいときには、隣接するユニット間の連結では興奮的過程（促進的過程）の方が抑制的過程より強いためであり、また、奥行面間の距離が大きいときには、抑制過程の方が奥行を異にするユニット間で強くなるためである。実験の結果は、この予測を支持した。

2.2. 運動視差での奥行反転と観察者の頭部運動

運動視差は観察者と連動していなくても、十分効果的に奥行を生じるという結果に対して、この種の奥行効果が得られるのは、サイン波パターンのように運動速度が連続的に変化する条件のみで、運動速度変化が矩形波的、段階的に変化する条件で運動視差が観察者の頭部運動と連動しない場合には安定した奥行が得られない (Brooks et al. 1988)。運動視差が観察者の運動と連動して変化する条件と観察者の運動と連動しない条件を設け、運動速度を矩形波的に変化させた研究 (Hayashibe (17)) によると、奥行反転は観察者静止と運動の両条件で生起するが、観察者静止条件の方が有意に多いことが示された。そして、この奥行反転には観察中の凝視点の移動が関係していた。凝視は、運動する対象を注視しようとするので、そのときの眼球運動は対象の運動を追従することになり、対象の網膜運動速度を減速する。その結果、対象間の網膜速度に逆転が生じ、奥行反転が生じる。奥行反転が観察者静止条件で多いのは、凝視点が移動しやすいからである。これは、観察者静止条件で意図的に凝視点を別の運動対象に変えると、奥行反転は、ほぼ完全に生起することからも確認されている。

2.3. 奥行視における自己受容的運動感覚情報の役割

静止対象を観察者が動いたり、頭を動かしたりして視るとき、その網膜投影像は観察者の運動に対応して動くが、視かけ上、対象は静止したものとして知覚される。これは、観察者の自己受容的、求心的、運動感覚情報が網膜像の変化を相殺あるいは補償し、結果として、網膜像の変化は観察者の運動に帰属させられ、静止した対象の知覚が成立すると説明される（補償説あるいは運動感覚情報考慮説 Epstein 1973 1977, Wallach 1985 1987）。これに対して、観察者が動いても対象が奥行的に位置を変えたりあるいは傾いたりして見えないことは、観察者の自己受容的運動感覚情報を考慮しなくても、観察者がどのくらい移動したかの知覚、観察者の運動に対応して動いて見える対象の運動方向、および対象までの知覚された絶対的奥行距離の3要因から説明できると、Gogel & Tiez (14) は考えた。これを実証するために、観察者が頭部を横方向に移動させながら対象を観察する条件と観察者は静止したままで対象が頭部運動のときと同様な距離だけ移動する条件とが設定された。観察者に、このような条件のもとで、奥行の異なる2つの対象が観察者からどの方向に見えるか（2つの対象を結ぶ線分のY軸を中心とした時の角度方向 (tilt)）、あるいは2つの対象が奥行方向にどの程度傾いて見えるか（2つの対象を結ぶ線分のX軸を中心としたときの角度 (slant)）の判断が求められた。その結果、対象の方向と傾き知覚について観察者頭部運動条件と観察者頭部静止条件間に差は生じなかった。このことから、この種の知覚過程に観察者の自己受容的、求心的運動感覚情報の関与を想定する必要がないと結論されている。

2.4. スリットを通しての運動対象の観察

1本の狭いスリットを通して、前額平行に横方向にシフトする対象を観察すると、対象の1部分

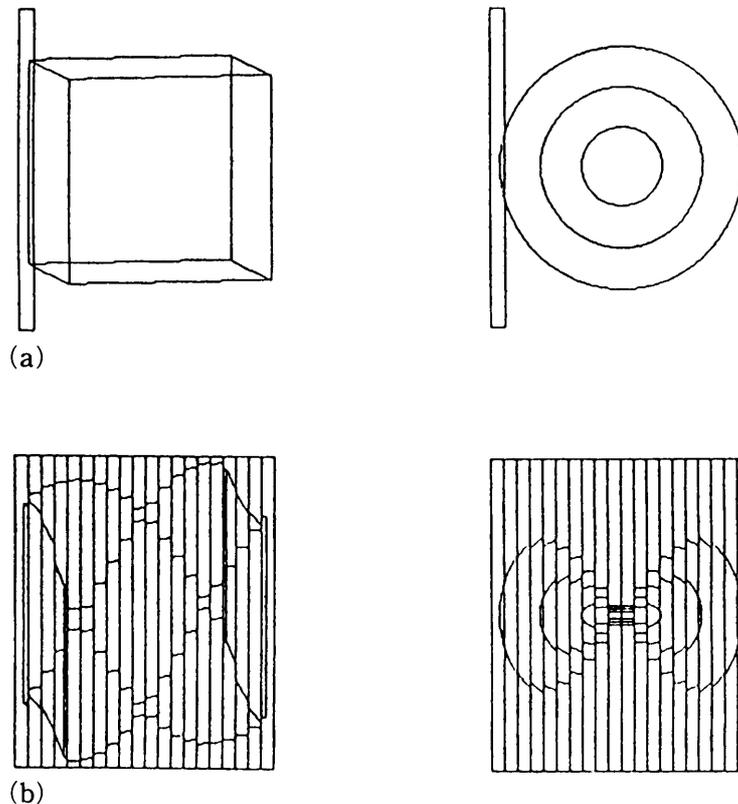


図5 (a) スリット視で使用された回転する立方体と同心円パターン。(b) 回転する立方体あるいは同心円をスリット視したとき、そのスリットを通してみられる部分を網膜上に時系列にそって敷き詰めたパターン。(Fujita 1990)

ずつしか視えていないのに、全体の形態を知覚することができる。これは、anorthoscopic perception と呼ばれる。この現象は、2次元対象ばかりでなく、Y軸を中心として奥行方向に回転する3次元運動対象でも生起する(Day, 1989)。Fujita(13)は、図5-aに示されたような立方体あるいは同心円をY軸を中心として半回転あるいは回転させ、スリット視させたところ、立方体についてはそれが前額平行に移動して、また同心円については回転するように見えることを報告した。また、この際、2次元対象のスリット視と異なり、対象の形が伸びたり縮んだりして見えるような歪みは、ほとんど報告されなかった。この現象については、これまで、スリットを通して得られた部分が、順次、網膜上でモザイクのように敷き詰められていき、全体の形態が再現される(網膜ペインティング仮説)と説明されてきた。この仮説に基づき、奥行回転する立方体や同心円が1本のスリットを通して観察されたときの部分パターンがどのように敷き詰められるかをみると、図5-bのようになる。これは、明らかに、観察された知覚内容と異なり、網膜ペインティング仮説を支持しない。この種のペインティングが網膜上ではなくイメージレベルで行われたとしても、同様と考えられる。いずれにしても、運動からの3次元形態の復元を考えると、対象の全体が見えなくても形態が復元できることを念頭において置く必要がある。

2.5. ステレオキネティック効果

同心円上にその半径となるような線分を主観的輪郭で描き(図6-a)、それをステレオキネティックで観察すると、主観的輪郭線分が同心円の前(主観的透明、transparency)で中心から周辺にかけて観察者の手前になるように奥行方向に斜めに浮きでて見える。一方、図6-bに示されたように、同心円上の半径線分を多くの赤色短線で構成し(ネオン展延、neon spreading)、同様に、

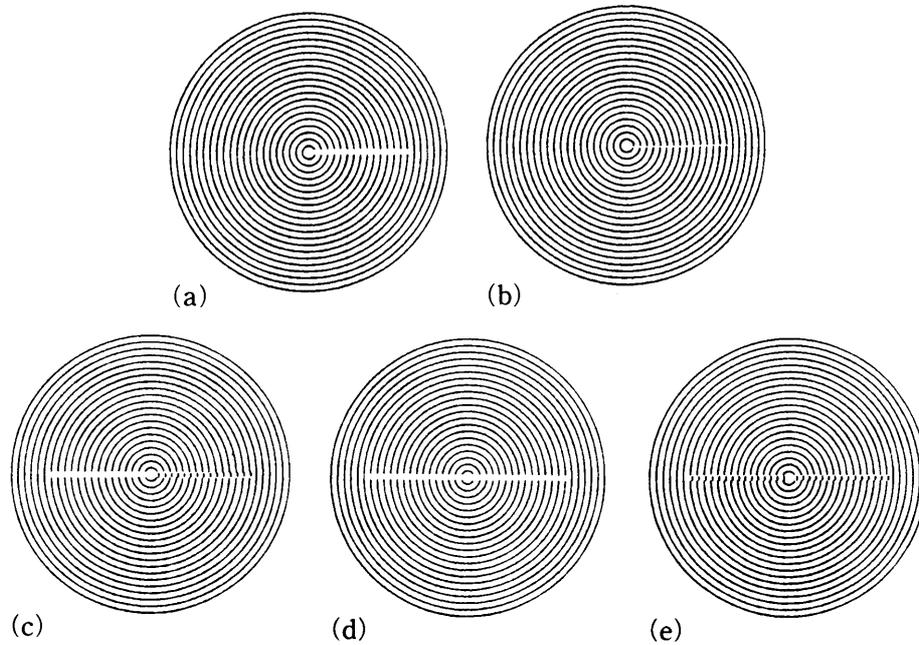


図6 主観的輪郭を回転提示したときに生起する視かけの奥行的傾き。(a)では、回転させると静止した同心円の上に奥行的に傾いた横線分が出現、(b)では、同心円の背後に奥行的に傾いたネオンのように赤い線分が出現、(c)では、中心点を境にして主観的輪郭線分は同心円の上に、ネオンのような線分はその背後に、奥行的に傾きしかも1本の一様な線分として出現、(d)では、同心円のうゑに前額平行に出現、(e)では、同心円の背後に前額に平行に出現する。(Bressan & Vallortigara 1991)

それをステレオキネティック視すると、同心円の背後で、中心から周辺部にかけて観察者から遠ざかるように奥行方向に斜めに傾いて見える。さらに、図6-cに示されたように、主観的輪郭線分と赤色短線分で構成された輪郭線分とを中心点で接続した条件では、これらの線分は、回転して観察すると、単一の線分として知覚され、しかも主観的輪郭線分は同心円の前方に、赤色短線分の輪郭線はその背後に奥行的に斜めになって見える。しかし、図6-d、eのように、主観的輪郭線分や赤色単線構成線分が同心円の中点を挟んで両方にまたがる場合には、これらの線分は同心円の前方あるいは背後にあるように見えても前額に平行で奥行的斜めに見えることはない。また、主観的輪郭線分あるいは赤色短線分による輪郭線を、回転(rotary)させるのではなく、前額に平行にシフトさせた場合(translatory)には、それらの線分は同心円の前方あるいは背後に存在するように見えたが、しかし斜め奥行方向には出現しなかった。赤色短線分による輪郭線が背景となる図形の前方あるいは背後のいずれに出現するかは、輪郭線を構成する部分と背景部分との明るさ対比に依存し、明るさ対比が高い場合には背景パターンより前方に、低い場合には逆転した。しかし、主観的輪郭線の場合には、明るさ対比のいかんに関わらず前方に出現して見えた。これらの結果から、Bressan & Vallortigara (1)は、主観的輪郭、ネオン展延、主観的透明、奥行効果などの諸現象が、大脳生理学が示唆するような extrastriate 皮質領域での別個の現象ではなく、相互に関連したものであることを明らかにしている。

2.6. ステレオモーション

対象が観察者に向かってまっすぐに動いてくるとき、網膜上では対象の大きさが変化すると共に対象の運動方向が互いに反対になるようにシフトする。この種の大きさ変化と網膜視差変化とは、独立したチャンネルで担われている(Beverley & Regan 1979)。また、この種のステレオモーションは、静止網膜視差とは無関係であることが、精神物理学的(静止網膜視差では正常の能力をもつ

ものがステレオモーションには反応しない (Regan et al. 1985)、あるいは、速度の異なる運動対象を左右眼に別々に順応させておくと運動する対象の感受性が奥行方向で異なる (Regan et al. 1979)、あるいは電気生理学的研究(静止網膜視差とステレオモーションに反応するニューロンが別である (Regan et al. 1979)) などで明らかにされている。ステレオモーションの問題は、どのようにして左右眼から検出された運動情報が統合されて3次元運動として知覚されるのかにある(節穴問題 aperture problem)。この節穴問題において、視かけの運動方向がどのように規定されるかについて、Adelson & Movshon (1982) は次のような理論を提示した。いま、図7-aに示したような斜め縦縞パターンがいろいろな方向に運動するとき、視覚システムは、座標軸のベクトルで示したように、運動方向をエッジと直角の向きであると見なす。このようなパターンを、その方向が互いに直角になるように合成し等速度で運動させて提示すると(図7-b)、節穴を通して観察した視かけの運動方向と速度は、各々のベクトルに直角な線分(破線で示され、これはパターンの縞と平行になる)の交点と座標の原点を結んで得られるベクトルで規定される。縞パターンの方向と速度を図7-cに示したように操作し合成して提示すると、同様に各々のベクトルに直角な線分の交点

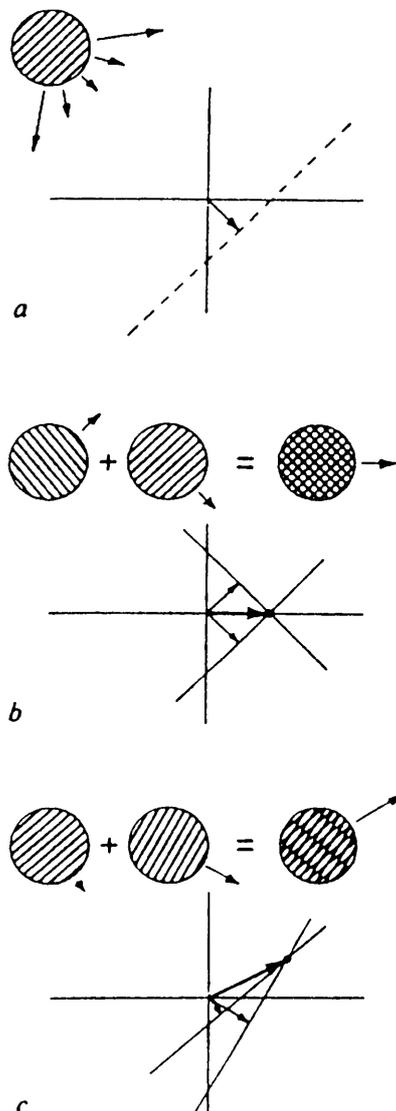


図7 運動する縞パターンを節穴から観察したときの視かけの運動方向を規定するしくみ。aでは、1個の縞パターンが運動する条件を示し、運動方向はベクトルで表示。bでは、2個の縞パターンが互いに直角方向に等速度で運動する条件、cでは2個の縞パターンが互いにわずかに相違する方向に異なる速度で運動する条件を、各々示す (Adelson & Movshon 1982)。

と原点とを結んで得られるベクトルで視かけの方向と速度が規定される。

この種の縞パターンを各眼に提示し、その運動方向が互いに反対方向になるように運動させて両眼立体視したときの、視かけの運動方向と速度も同様に規定できる(図8、Wright & Gurney(41))。ここでは、視かけの運動方向と速度は、各眼に提示された刺激のベクトルに直角な面の交点と凝視点とを結んで得られるベクトルで規定される。この理論では、縦縞の角度が垂直方向から隔たるにつれて視かけの速度は減少することを予測するが、実験ではこれが確認されている。

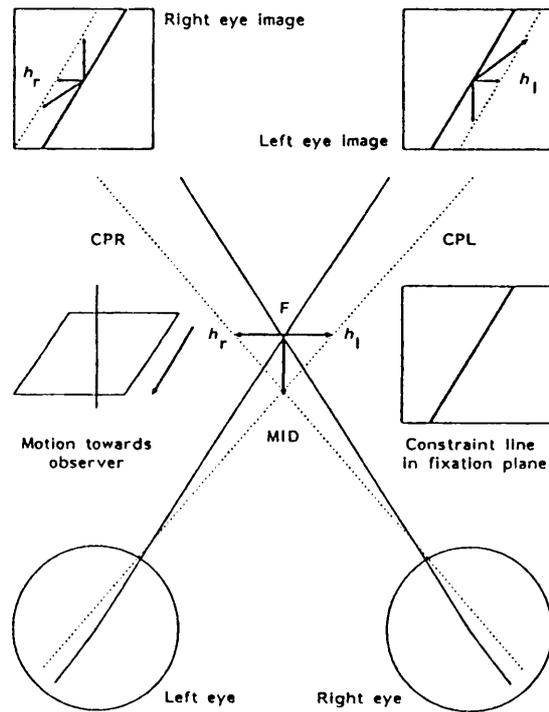


図8 両眼立体視で提示した運動する斜線分の節穴問題 (aperture problem) の解法 (Wright & Gurney 1991)。

2.7. 絵画的奥行情報と運動的奥行情報の相互作用

絵画的奥行情報とは相対的大きさ、遠近的要因、肌理勾配などをいい、また運動的奥行情報とはモーション・パースペクティブや対象到着時間差要因 (ある地点までの到着時間の差が奥行手がかりとなる) をいう。この絵画的奥行情報と運動的奥行情報との相互作用について、DeLucia (6) によって吟味された。絵画的奥行情報としては相対的大きさ要因が、運動的奥行情報としては対象到着時間差要因がとりあげられ、対象到着時間差と相対的大きさ要因が知覚的抗争を生じる条件で、両要因間の関係が2個の大きさの相違する対象のうちどちらが早く凝視点に到達して見えるかを奥行手がかり効果の指標としてしらべられた(図9)。対象到着時間は相対的大きさが小さい対象が早くなるように設定されたにもかかわらず、視かけ上では、大きい対象の方が早く到達して視えた。このとき、運動視差要因を付加したり (図9-c)、あるいはテスト対象の真下で「地 (ground)」上を対象と同速度で移動する対象 (十字形、ロッド、三角形) を追加 (図9-d、e、f、) すると、相対的大きさ要因の効果は顕著に低下した。これは、「地」面と接しかつ移動する対象からの手がかりが奥行を強く指示するからである。

Gibson, J. (1979) によれば、絵画的奥行要因は、運動的奥行要因の静止した相 (フェーズ) であり、同種の手がかりと考えられていたが、この結果はそれらが互いに異種の独立した奥行手がかりであることを示している。

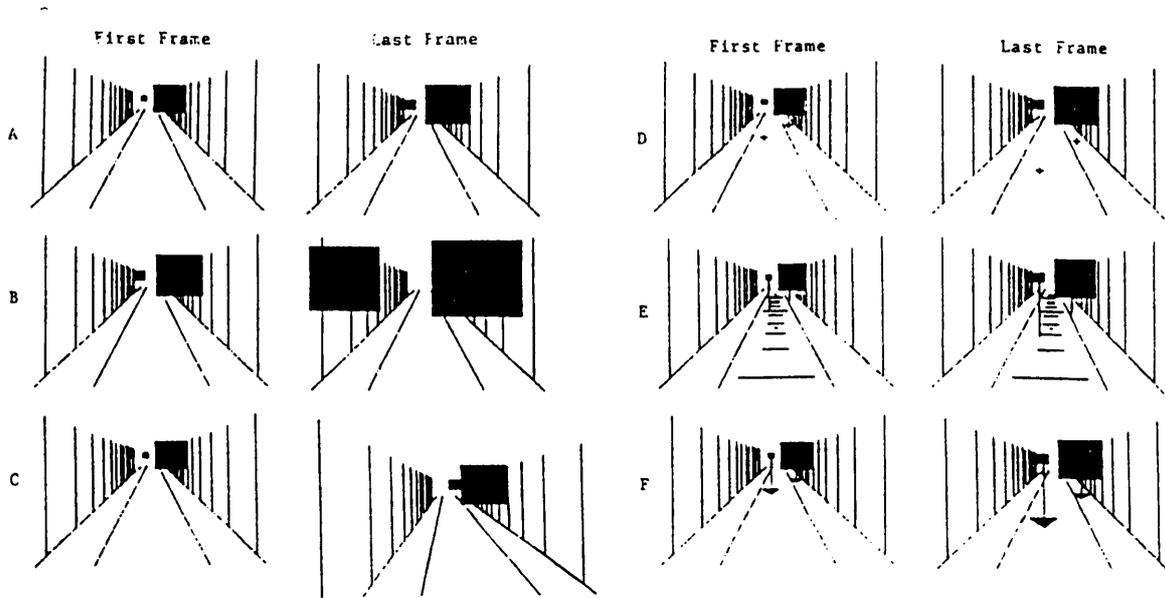


図9 奥行手かかりの中、運動的要因と絵画的要因の相互作用をしらべるための実験条件。A：拡大速度が遅い場合、B：拡大速度が速い場合、C：モーション・パースペクティブ条件、D：十字形を付加した条件、E：ロッドを付加した条件、F：ロッドと三角形を付加した条件。各条件では、左から右の順序で時間的に提示される (DeLucia 1991)。

2.8. 運動残効と注視作用

3次元回転する物体を持続観察した後で、3次元回転方向があいまいな検査対象を提示すると、順応刺激とは反対方向に回転して見える運動残効が生じる (Petersk, Shepard & Malsch 1984)。Shulman(37)は、順応刺激として、各々が反対方向に3次元回転する2個の対象を提示し、そのどちらかを選択的に注視させてみた。そしてそのときの運動残効時の回転方向をしらべてみると、それは注視対象の回転方向に規定されていることを見いだした。3次元方向の回転の知覚過程には、注視作用が関与すると考えられる。

一方、2次元螺旋図形を誘導刺激とした場合にも運動残効が生起する (Reinhardt-Rutland(33))。検査刺激は螺旋図形の中心に提示されるリング形の静止刺激である。運動残効は誘導刺激とは反対方向に生起し、しかも3次元的であった。また、これには大きさの変化も随伴して生じた。

3. 両眼立体視

3.1. 網膜視差勾配と立体視量

網膜視差勾配 (disparity gradient) とは、キクロピアン距離 (S_{bin}) に対する2組の視差量の差 ($dR - dL$) の比をいい、次の式で表される。

$$G = (dR - dL) / S_{bin}$$

網膜視差勾配が0となれば、2個の対象は、融合されたとき、同一奥行面に位置して見えることを意味し、また、パナムの融合限界は網膜視差勾配では2.0となる。視野闘争が生起しないで両眼視融合が可能なのは、網膜視差勾配が1までである (Burt & Julesz 1980)。視差を構成する対象を互いに水平直線上に配置し、2組の視差量の差を一定としたとき、網膜視差勾配がキクロピアン距離との関係でどのように変わるのかが、図10に示されている。

立体視量が網膜視差勾配によってどのように変化するか、Bülhoff, Fahle & Wegmann(2)に

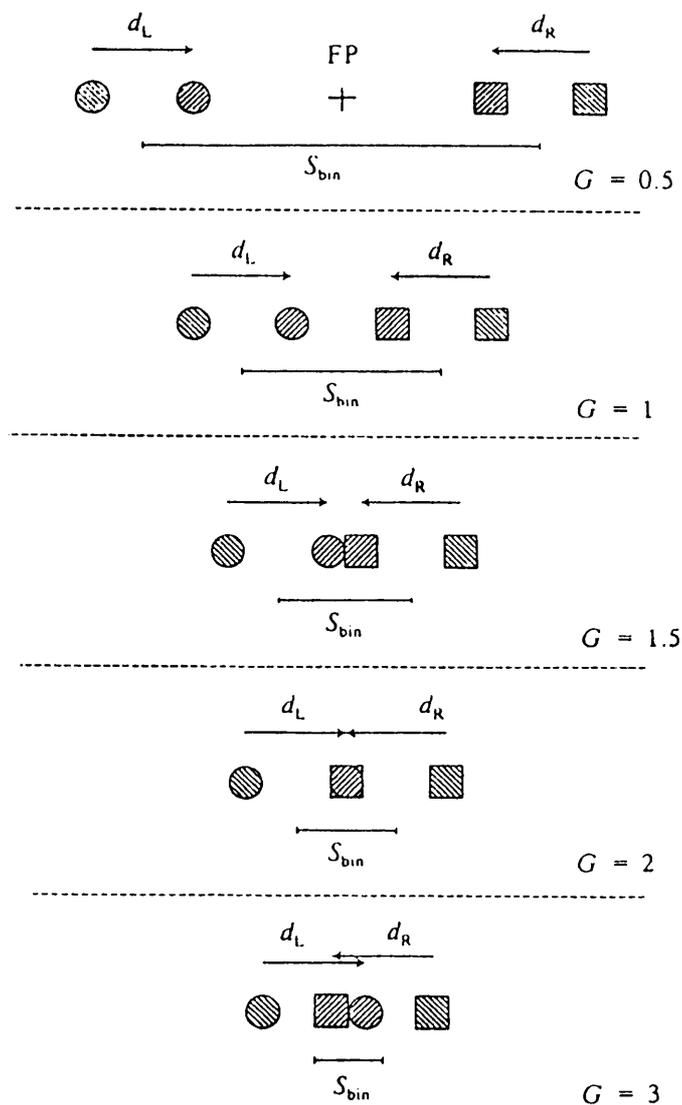


図10 網膜視差勾配と両眼立体視量をしらべるための刺激条件 (d_L は左眼に提示された刺激間の距離を、 d_R は右眼に提示された刺激間の距離を、 S_{bin} は各眼の刺激の中点を結ぶ距離を、そして G は網膜視差勾配をそれぞれ示す)。ここで G が2の値をとると、それはパナムの臨界条件にあたる (Bülhoff, Fahle & Wegmann 1991)。

よって吟味された。刺激は、点、線、あるいはその他のシンボルが用いられた。視差は0 min から27min の範囲で変えられ、また、2組の刺激対のうち一方は交叉視差で他方は非交叉視差で提示されたので、その間に成立する視差の差量は0min から54min であった。網膜視差勾配は、0.3から1.9の範囲で操作されている。立体視量（立体的に定位された2個の刺激の奥行位置間の差量）は、刺激と同時に提示されるレファレンスラインにマッチングさせることで求められた。このレファレンスラインは、ステレオグラムで提示され、凝視面の前後に5 min から25min の範囲で5 min 間隔で奥行的に提示された。測定の結果、(1)立体視量は、網膜視差量が増大すると、例え視差量が一定でも、減少する。(2)2組の対象間に生じる視差の差量と立体視量の比は一定とならず、視差の差量が大きくなるにつれて、小さくなった。(3)網膜視差勾配の増大にともなう立体視量の減少は、線分刺激よりは点あるいはシンボル刺激で少なく、また、刺激が識別しやすい位に大きいと少ない。(4)網膜視差勾配の増大にともなう立体視量の減少は、2個の刺激対が水平方向に配置された条件より45度斜めあるいは垂直に配置された条件で小さい。これらの結果は、いずれも立体視量を減少させる条件を示しているため、結局は、視差検出に際しての対応が困難な条件を示している。

3.2. 対応問題での拘束条件

RDSの両眼立体視での対応問題を考えるとき、無数の組合せの中から正しい対応を選択するためには、2つの拘束条件、ユニークネスとスムーズネス条件を、とくにコンピュータ・ビジョンでは、仮定する必要がある(Marr & Poggio 1976)。ユニークネス条件とはステレオグラムの片方の対象は他方のひとつの対象とのみ対応するというものであり、スムーズネス条件(奥行についての最小変化条件)とはステレオグラムの片方の対象の近傍にある対象は他方のそれと対応する対象の近傍の対象とのみ対応するというものである。これは、人間の両眼立体視にもあてはまるとされるが、これに対して、ダブルネイル錯視はこれらの拘束が人間の両眼立体視でも仮定できることを実証した(Krol & van de Grind 1980)。ダブルネイル錯視とは、奥行を異にする2個の釘(対象)を両眼視すると、それらが前額に平行にあるように見えるという現象である。これは、4つの対応点が考えられる中でこの拘束条件にあったものが、実際の対象配置とは異なっても選択されていることを示す(図11-a)。しかし、片眼には2個の対象が投影されるのに対して他眼には1個の対象しか投影されないケース(パナムの限界ケース、Panum's limiting case、図11-b)では、片眼での1個の対象が他眼の2個の対象と対応して奥行の異なる2個の対象が出現してしまうので、ここではユニークネス条件は成立しない。パナムの限界ケースをRDSで作成し(図12)、ユニークネス条件が人間の両眼立体視でも成立するか否かが、Weinshall(40)によって検討された。図12のRDSでは、ステレオグラムの左右ペアの中央領域がある間隔において重複されている。この重複のための間隔が網膜視差を形成し、しかもここでは左右でその視差の大きさが違えてある。このステレオグラムで左右の対応の程度をみると、図12-cに示されたように、各々の視差(-2、0、2、6)でのドットの対応は等しい(各々の視差でドットが完全に左右で対応すれば、値は1となる)。重複のための間隔を左右で種々違えることによって視差での対応度を変えたステレオグラムが作成され(図13)、その見え方が観察された。その結果、人間の両眼立体視における視覚システムは、ある時にはユニークネス条件のもとで、別の時にはそれに拘束されないように働いていることが示された。すなわち、4種類の対応がある場合には、奥行の異なる複数の透明な面が出現、あるいは4種類の対応があっても1個の不透明な面が出現した。これらの結果にもとづいて、これまでに提案された両眼立体視における対応問題解決のための様々なアルゴリズム(Marr & Poggio 1979, Pollard, Mayhew & Frisby 1985, Prazdny 1985)が検討されている。

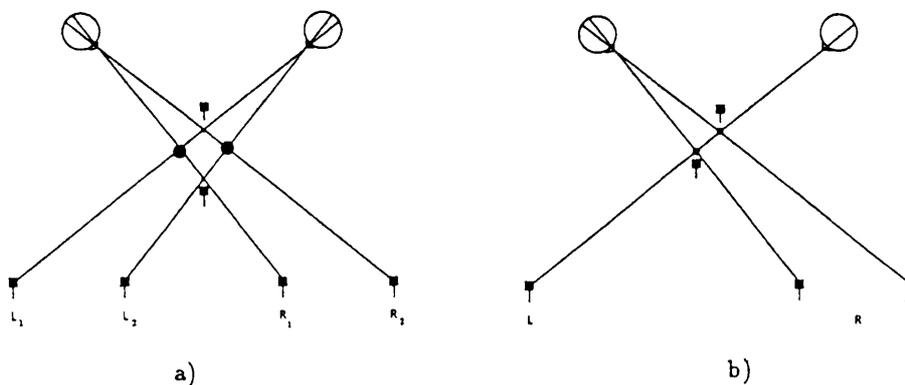


図11 (a) ダブル・ネイル錯視 (double nail illusion)。正しい対応はL1R2、L2R1なのにL1R1、L2R2が対応してしまう。(b) パナムの限界条件 (Panum's limiting case)。Lは対応をもたないが、しかし2つのRと対応し、奥行が生じる (Weinshall 1991)。

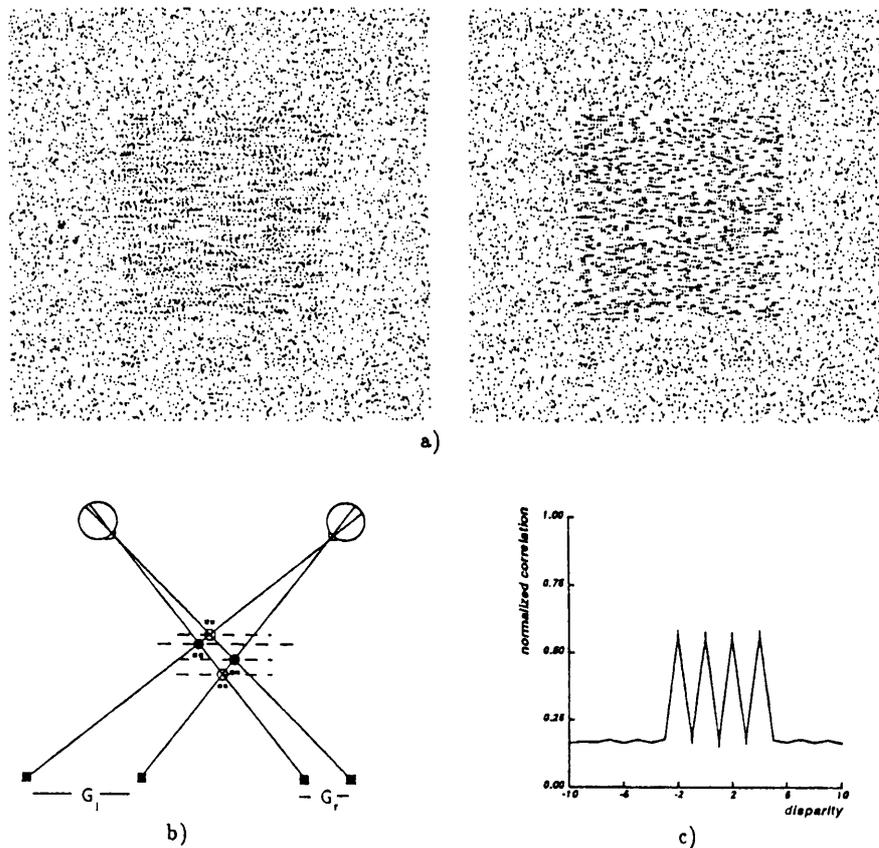


図12 曖昧な対応点をもつステレオグラム (a)。ここでは、左ペアの対象間距離 (G_L) は右ペアの対象間距離 (G_R) の2倍である (b)。(c) は視差と対応の程度との関係を示す。ある視差をとるとき左右ペア内のドットが完全に対応すれば1、半分のドットが対応すれば0.5となる (Weinshall 1991)。

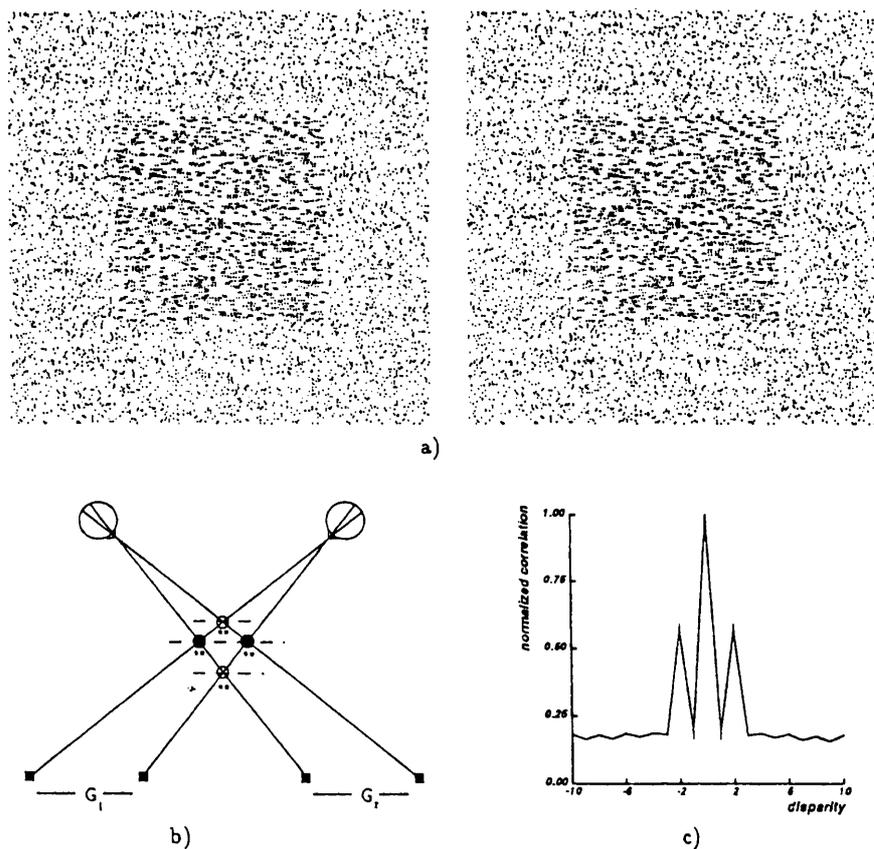


図13 曖昧な対応点をもつステレオグラム (a)。ここでは、左ペアの対象間距離 (G_L) と右ペアの対象間距離 (G_R) は等しい (b)。(c) は視差と対応の程度との関係を示す (Weinshall 1991)。

3.3. 等輝度条件での両眼立体視

等輝度で色要因のみから成立したステレオグラムの両眼立体視は不能であるか否かはいまだ未決着な問題である。これまで、等輝度条件での RDS では両眼立体視は不能であるとする結果が多く (Lu & Fender 1972, Gregory 1977, De Weert 1979)、一方、等輝度条件でも輪郭ステレオグラムでは両眼立体視が成立するとの結果が多い (Comerford 1974, Gregory 1977, De Weert 1979)。等輝度条件での RDS でも両眼立体視が成立したとの報告もある (Osuobeni & O'Leary 1986)。このように結果が一致しないのは、色収差から生じる輝度誤差を十分に統制していないためとも考えられる。色収差からの輝度誤差はとくに波長間の境目に生じやすく、またその成分は高空間周波数からなりたつ。そこで、低帯域通過フィルターを通して高空間周波数成分をカットすることで色収差の輝度誤差を除去し、等輝度 RDS の両眼立体視が成立するか否かが試みられた (Scharff & Geisler (34))。両眼立体視は等輝度 RDS においても、個人差が大きいものの、成立することが示されている。

これに対して、等輝度で色要因 (赤と緑あるいは青と黄色の組合せで作成) のみで作成された縦縞パターンのステレオグラム (ペアを構成する各パターンは赤と緑あるいは青と黄色のストライプで輪郭はぼかしてある) では、両眼立体視が成立しないことが報告されている (Kulikowski(20))。とくに、飽和度が低い条件では、たとえば赤と緑が混じり合って等質な黄色が視野を占めて見える。飽和度が高い条件では、視野闘争が出現したり、あるいはパターンを構成する2色が闘争して見えたりする。いずれにしても、ここでは等輝度色条件での両眼立体視は否定されている。

3.4. RDS の両眼立体視における有効性 (理想的観察者と人間観察者との比較)

理想的観察者とは、Harris & Parker(16)によれば、仮説的検出器をいう。ここでは、ある特定の課題を解決するために必要なすべての情報が最適に利用できる。いま、図14に示されたような RDS でどちらの領域が観察者の手前にあるかを弁別する課題を与え、同時にノイズ刺激をドットで添加する。この条件での理想的観察者の弁別性能 (d_i) は「ノイズ」対「信号」比、すなわち、

$$D_i = \Delta / \sigma$$

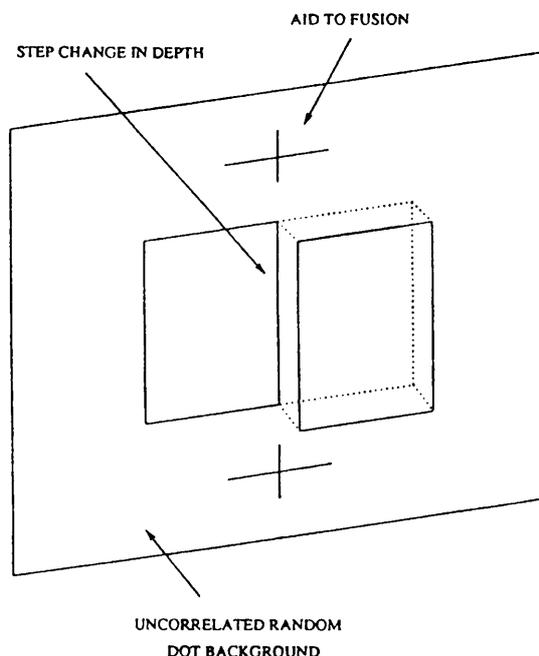


図14 理想的観察者と人間観察者の比較実験で使用されたRDS (Harris & Parker 1992)。

で表される (σ はノイズの標準偏差値、 Δ は2つの領域間の網膜視差の差分の平均の集合)。また、人間観察者の弁別性能 (D_e) は、2者択一反応での正当率とその標準偏差値にもとづき次の式で、

$$D_e = \sqrt{2} P^{-1}(x)$$

計算された (ここで、 $P^{-1}(x)$ は inverse cumulative normal equation)。人間観察者と理想観察者の弁別性能比 (F) が次の式で

$$F = (D_e / D_i)^2$$

求められた。その結果、刺激の大きさが視覚1.3度で一定のとき、ドット数が30個以下のときには、 F 値は20%程度を示したが、ドット数が80個になると2%に落ちた。この関係は、刺激の大きさやドット密度を変えても同様であった。RDSの両眼立体視が比較的容易に成立するのに、理想的観察者との比較で得られた人間観察者の弁別性能の非能率は不思議である。この非能率は、視差検出の段階で生じるのか、あるいは正しく検出された視差を結合する段階で生じるかについてみると、ドット数が増大すると非能率は急激に落ちることから、人間観察者は有効にドットを利用していないことがわかる。この結果は、視差検出での対応問題を解くための理論のひとつである協調的アルゴリズムに一致する。

3.5. 両眼立体視における左右視野の対応の程度と輝度コントラストの相関

左右視野の対応度とは、左右網膜像がどの程度対応しているかを示す測度を言う。ランダム・ドットで構成された左右視野の対応度が100%のときは(この場合、網膜視差は0に設定されている、以下同様)、左右視野像が完全に両眼融合し、平面が視える。左右対応度が50%のときは、ひとつの平面が生じるが、それは不安定で凝視面の前面あるいは後面にドットが出現する。左右視野対応度が0%のときは、安定した平面は出現しない。左右網膜像のマッチングは、このように、左右視野対

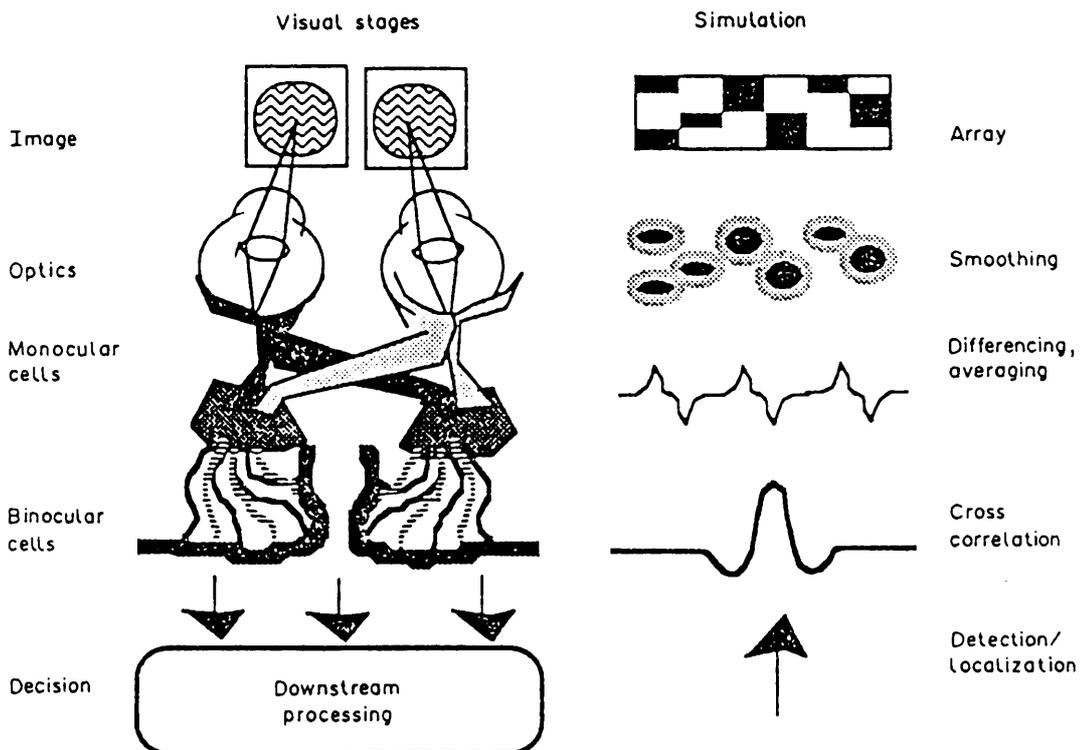


図15 両眼立体視での対応問題についてのクロス相関法によるモデル。クロス相関法では、2種類の入力信号(左右視野の対応の程度と明るさコントラスト)から2種類の入力信号の対応の程度を示すクロス相関係数が算出され、これに基づいて、エッジ情報が検出される (Cormack, Stevenson & Schor 1991)。

応度と関係するが、一方、左右視野像のコントラストとも関係していることが知られている (Halpern & Blake 1988, Legge & Gu 1989, Heckman & Schor 1989)。そこで、左右視野のコントラスト変化にともなって左右視野のマッチングの検出がどのように変わるかが左右視野の対応度を測度 (左右視野の対応検出閾値) として測定された (Cormack, Stevenson & Schor (4))。刺激は、ダイナミック・ランダム・エレメント・ステレオグラムで提示された。コントラストが高いときには、左右視野の対応検出閾値はコントラストとは無関係に変化するが、コントラストが低いときには、コントラストの2乗に反比例して変化した。両眼間の対応問題についてのこの種の結果を踏まえて、エッジ情報はクロス相関法で検出される、と考えられた。クロス相関法では、2種類の入力信号からクロス相関関数が算出され、その算出値は2種類の入力信号の対応の程度を示す。これに基づいて、両眼立体視過程のモデルが提案されている (図15)。

3.6. 両眼立体視下での奥行恒常性

知覚恒常性とは、網膜上の手がかりが指示するようには対象の諸属性が知覚されずに、対象の真の属性が知覚される心理的性質をいう。これまでの研究によれば、知覚的恒常性には、眼筋的要因が強く関係しているが、しかしこれだけでは説明がつかず、それを補完する他の要因の存在が指摘されている。両眼立体視下での大きさとお奥行恒常性を成立させる要因についての分析が、Collett, Schwarz & Sobel (3)によって試みられた。刺激は、不規則な大きさの水玉パターンで覆われた矩形面でCRTに提示され、両眼立体視すると、矩形面の上面と下面間に奥行差が出現する。CRTは還元トンネルを通して提示されるので、眼筋の手がかり以外は除去されている。このような観察条件下で、観察距離を変えて(45-130cm)矩形面までの視えの奥行距離、矩形面の大きさ、矩形面の上面と下面に出現した奥行差が、マッチング法で測定された。その結果、矩形面の視角一定条件では、面間の奥行差は観察距離の増大に伴い減少すること、しかし矩形面の大きさが固定されている条件では、面間の奥行差は観察距離ではほとんど変わらないこと、観察距離があるところに固定されているときには、矩形面の視角が小さくなると、奥行差は大きくなること、そして、奥行差に与える視角の影響は観察距離が増大すると大きくなること、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼立体視下での奥行恒常性に関係するものとして2種類の要因が抽出された。一つは観察距離に関係し、視角とは無関係な要因であり、他は視角に関係し、観察距離が増すと、その役割が大きくなる要因である。そして、観察距離のための主要な手がかりは眼筋的要因であり、観察距離が増大するとしだいに、他の手がかりがそれにとってかわると考えられる。

3.7. 両眼立体視における奥行手がかりとしての蔽—被蔽要因

片眼に2刺激を他方に1刺激を提示するとき、両眼立体視が成立することがある。これはWheatstoneとPanumによって示されたのでWheatstone-Panum limiting caseとよばれる。ここでは、片眼に与えられた1刺激と他眼に与えられた2刺激のうちこめかみ側の刺激とが融合し観察者により近いところに定位されると、片眼の鼻側の刺激はより遠いところに定位されて見える(図16-A)。なぜこのように定位されて見えるかについては、未だに明快な説明がなされていない。そこで、ひとつの仮説、すなわち、視覚システムは、融合された2つの対象が片眼の視線上に定位される際には、遠方に定位された対象が近方に定位された対象によって覆われていると解釈するために一義的な奥行関係が成立するとの仮説が、Ono, Shimono & Shibuta (26)によって提示された。そして、片眼の2刺激のうちこめかみ側の刺激と他眼の1刺激が融合され、その結果、融合刺激ともうひとつの非融合刺激とが片眼の同一の視線上に定位され、奥行関係が一義的に決まる刺激条件と、他方、片眼の2刺激のうち、鼻側の刺激と他眼の1刺激とが融合し、その結果、非融合刺激が同一視線上

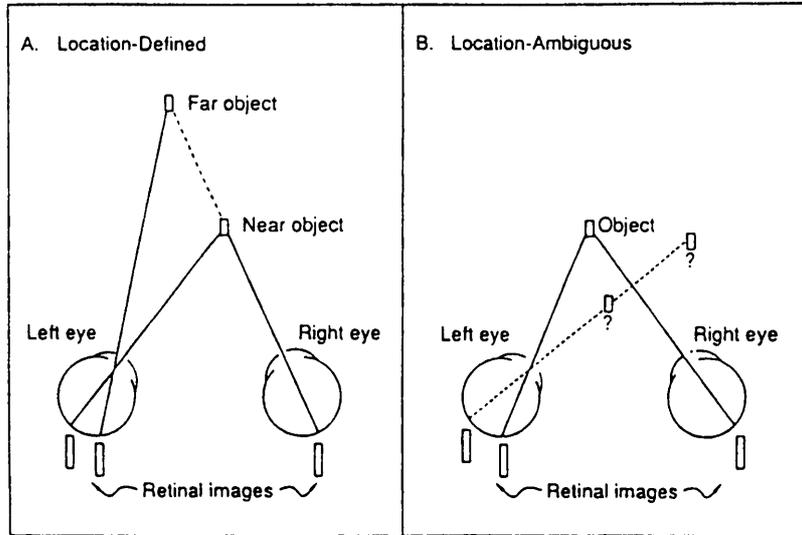


図16 パナムの限界ケースではたらく蔽-被蔽要因をしらべるための実験条件。(A) 融合刺激ともうひとつの非融合刺激とが片眼の同一の視線上に定位され、奥行関係が一義的に決まる刺激条件、(B) 片眼の2刺激のうち、鼻側の刺激と他眼の1刺激とが融合し、その結果、非融合刺激が同一視線上に定位できず、蔽-被蔽要因が働かないために奥行関係が曖昧となる刺激条件 (Ono, Shimono & Shibuta 1992)。

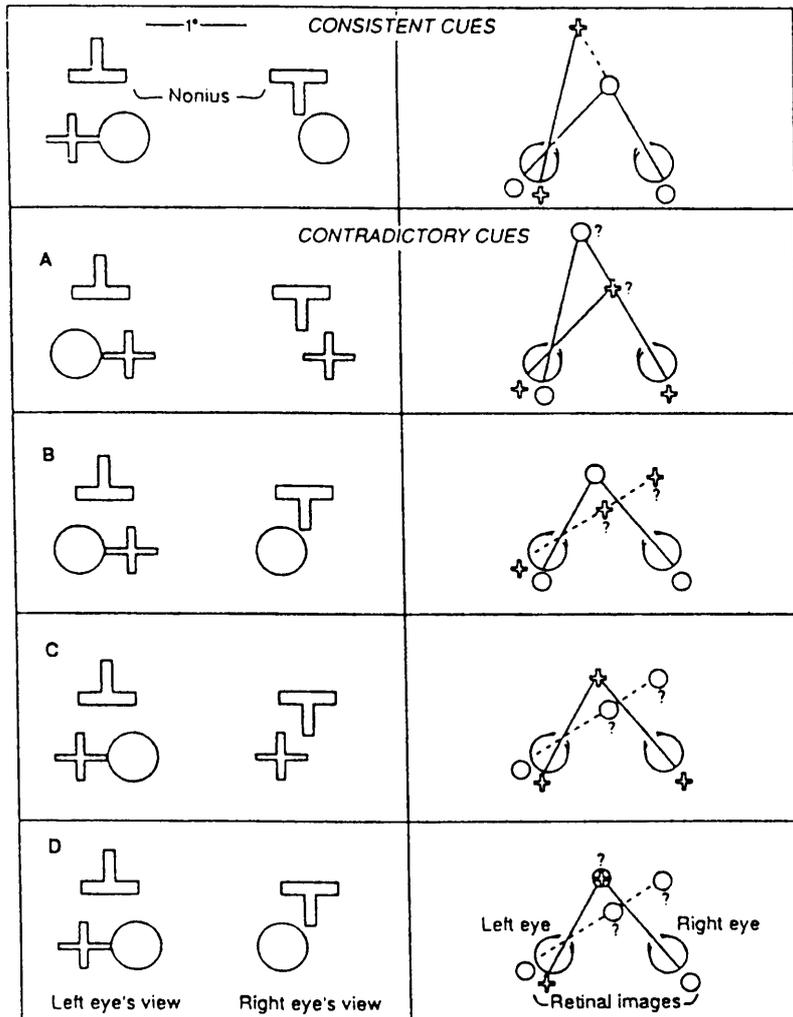


図17 パナムの限界ケースで片眼に提示する2刺激のうち、一方の刺激の形態を変えた条件 (Ono, Shimono & Shibuta 1992)。

に定位できず、蔽—被蔽要因が働かないために奥行関係が曖昧となる刺激条件（図16—B）とを設定し観察させたところ、奥行関係が一義的に決まる条件で安定した立体視が生じた。この結果は、片眼に提示する2刺激のうち、一方の刺激の形態を変えた条件（図17）あるいは、片眼に提示する刺激を2刺激から3刺激に増やした条件（図18）でも同様であった。このことから、両眼立体視においても、視覚システムは奥行関係を規定するのに蔽—被蔽要因を利用していると考えられる。

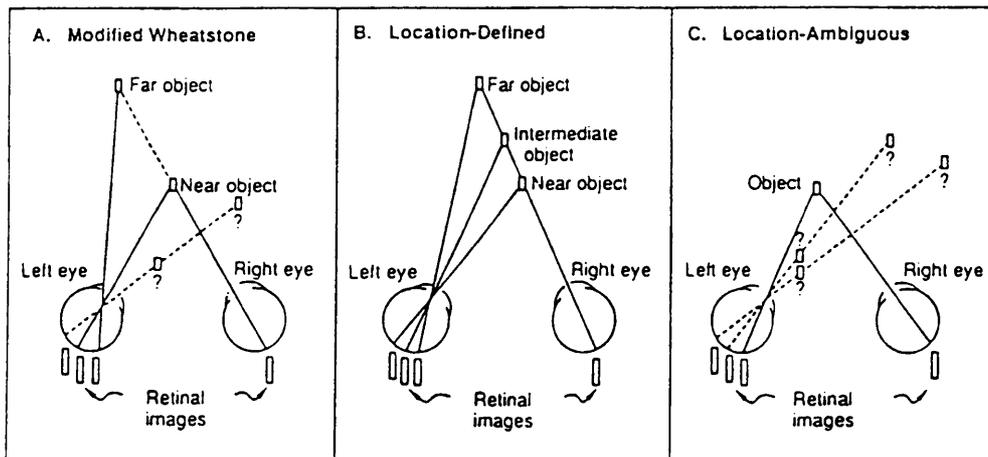


図18 パナムの限界ケースで片眼に提示する刺激を3刺激に増やした条件（Ono, Shimono & Shibuta 1992）。

3.8. 運動によって出現させた輪郭にもとづくステレオグラムの両眼立体視

静止状態では輪郭が視えないRDSでも、ある一群のドットを運動させるとその輪郭を浮かび上がらせることができる。もし、片眼の各々に左右反復運動で同一の輪郭をドットで出現させ、両眼間の輪郭間には視差はあるがしかしそれらドット間には点对点对応が存在しない条件でも、これを両眼立体視したとき、そこに立体が出現するか否かが、Halpern(15)によって試みられた。観察の結果、立体視は出現したが、その奥行程度は両眼視差に対応せず、小さいことが示された。また、非交叉視差での奥行出現程度が著しく小さかったが、これは両眼間に点对点对応が存在しないからではなく、背景となるドットと輪郭図形との間の蔽—被蔽要因と抗争的となるからである（輪郭図形は背景パターンを覆うように運動し、また非交叉視差では輪郭図形は背景パターンの背後に出現するので、輪郭図形と背景とは奥行出現に際し抗争的となる）。ただし、両眼間に点对点对応が無い場合には、蔽—被蔽要因が両眼立体視に影響するが、点对点对応が存在する場合には全く影響をもたない。

3.9. 奥行対比効果（depth contrast）

奥行対比効果とは、ある対象の奥行に関する属性が他の対象の奥行特性から影響を受けて変容することを言う。たとえば、ある2個の対象間の奥行弁別が、それを囲む対象の奥行特性、仮にそれが奥行方向に傾いていることによって影響されるなどである。奥行対比効果がどの範囲まで及んでいるかを決定することは、3次元視過程を理解するために必要である。マスキング技法を用いた研究によれば、網膜視差で16度離れた対象間でマスキング効果が及んでいる（Richards 1971）。Kumar & Glaser(21)は、奥行対比効果がどの範囲まで及んでいるかを決定するために、幾何学的効果あるいは誘導効果（Ogle 1950）を利用して測定した。幾何学的効果とは片眼に水平方向のみを拡大するレンズを装着して観察するとき前額平行面のレンズ装着側の片側が垂直軸を中心として奥行方向

に傾いて見える現象をいい、また誘導効果とは垂直方向のみを拡大するレンズを片眼に装着したときに前額平行面が水平軸を中心として奥行方向に傾いて見える現象を言う。この種の効果が奥行対比をみる実験に利用された。ここでは、周辺刺激（影響刺激）として矩形を左右眼に別々に提示するが、その際、左右の矩形の横幅に差を設けた。こうすることによって幾何学的効果と同様な奥行の傾きが矩形面に生じる。周辺刺激である矩形から影響をうける検査刺激には、視野の中央部で左右に2個のドット刺激が提示された。周辺刺激からの影響の程度は、2個のドットの一方の視差を変化して奥行に関し両点が等距離になるところを求めることによって得られた。刺激は、眼球運動の影響を避けるために短時間提示(100msec)された。その結果、(1)奥行対比効果は、影響刺激の大きさ（矩形の横幅）が視角51度まで、また影響刺激と検査刺激との相対的奥行距離が網膜視差換算で20度離れていても存在すること、(2)奥行対比効果は、影響刺激と検査刺激との奥行間隔分離に反比例して変化し、視差換算で2度を越えると平準化すること、(3)奥行対比効果は、垂直視差を操作しても生起すること、(4)奥行対比効果には個人差があり、影響刺激の形や布置をかえるとさらに個人差は拡大すること、したがって、奥行対比効果は影響刺激の刺激特性のみでは説明ができず、認知的要因が関与していること、などが明らかにされた。

奥行対比効果については、さらに周辺刺激の形態的要因や遠近法的奥行要因が変えられ、同様に、Kumar & Glaser(22)によって検討された。ここでは、周辺刺激として台形が用いられ、その平行2線分の長さの差を操作することによって遠近法的要因が変えられた(図19)。台形は網膜視差をつけて提示され、視かけ上、台形ではなく矩形が垂直軸に関して奥行方向に傾斜しているように見えるが、このとき、台形の遠近法的要因と網膜視差が示す奥行方向が一致している条件と不一致の条件とが設けられた。検査刺激は中心窩に提示された垂直2線分で、両線分が奥行的等距離に見える網膜視差値が測定された。奥行対比効果は、周辺刺激の網膜視差が一定であるにも関わらず、台形の平行2線分の長さの差が大きくなると、網膜視差と遠近法的要因の一致あるいは不一致に関係なく増大することが示されている。奥行対比効果では、その奥行方向は網膜視差に規定され、またその程度は遠近法的要因に規定される。

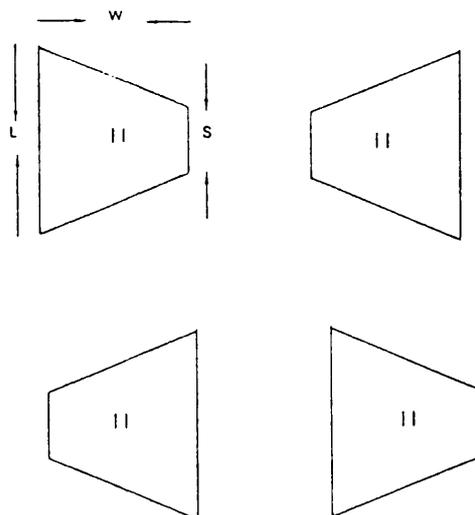


図19 形態的特性の奥行対比効果をしらべるためのステレオグラム。形態的特性として台形が用いられ、その平行2線分の長さの差を操作することによって遠近法的要因が変えられた。台形は網膜視差をつけて提示され、視かけ上、台形ではなく矩形が垂直軸に関して奥行方向に傾斜して見えるように設定、また、台形の遠近法的要因と網膜視差が示す奥行方向が一致している条件と不一致の条件とが設けられた (Kumar & Glaser 1991)。

3.10. 両眼立体視で出現する形態輪郭の補完

ステレオグラムでの対象輪郭に空白部分が存在しても、両眼立体視するとそこに輪郭が補完されて見える。図20-aのステレオグラムの矩形は、小さな要素の集合であるが、両眼立体視すると輪郭をもつ矩形面が見える。図20-b、cは、主観的輪郭による矩形で、cでは輪郭が湾曲させてあるが、これを両眼立体視すると中央空白部分にまっすぐなあるいは湾曲した奥行きが生じて見える。図20-dは、不等像視パターンで、両眼立体視すると垂直軸に関して奥行的に傾斜した面が生じる。図20-eは、サイン波形的RDSパターンで、両眼立体視すると水平軸に関して奥行的に傾斜した面が生じる。図20-fは、図cの輪郭をぼかしたもので、低空間周波数パターンとなっている。Shipley & Shore(36)は、これらのステレオグラムを両眼立体視させ、十分に融合して立体視が生じた後で、このステレオグラムの左右ペアを水平あるいは垂直方向に引き離し、その両眼立体視で出現した形態輪郭の補完が消失する位置を求めたところ(図dとeでは垂直方向への分離のみ操作)、図aから

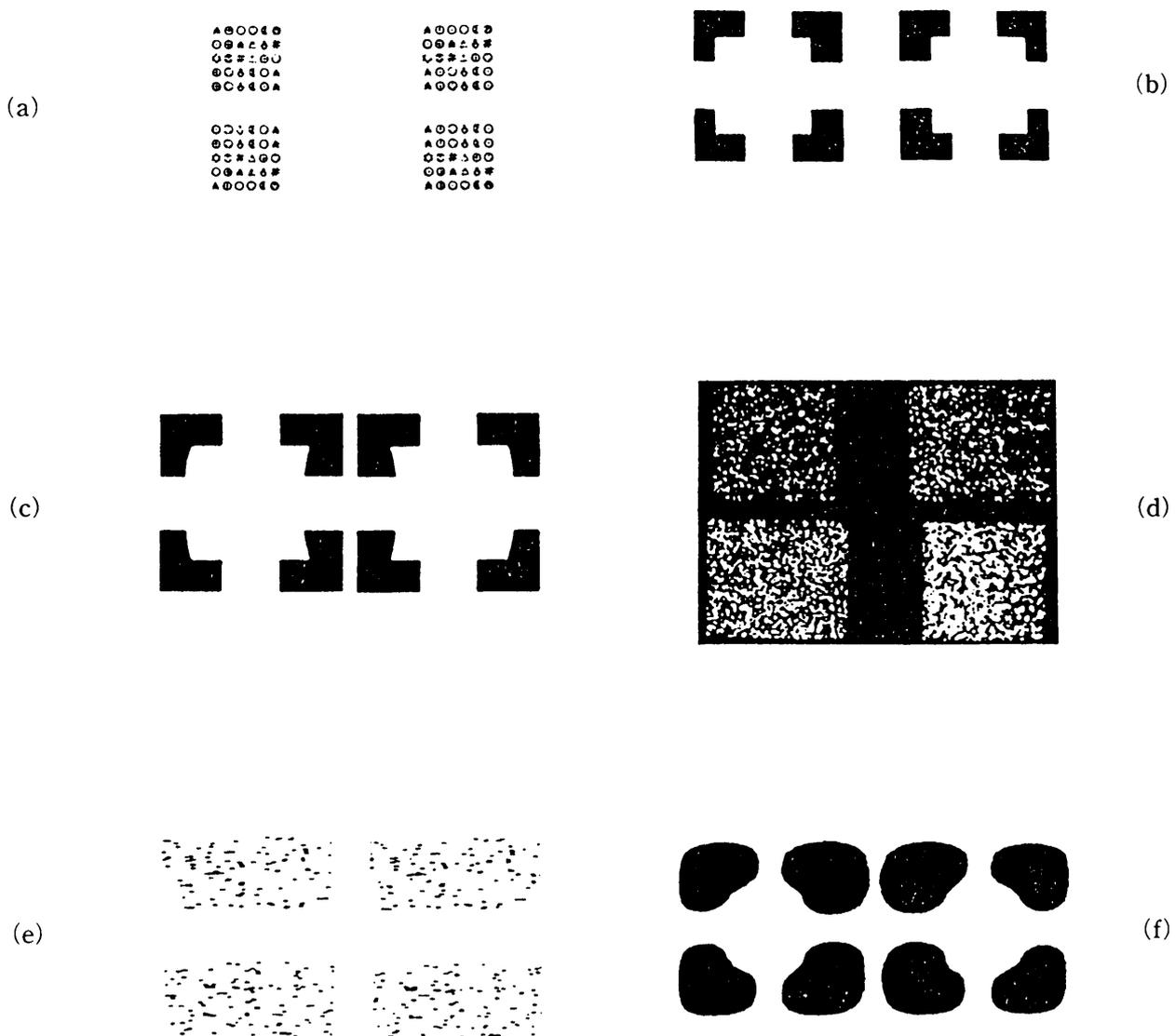


図20 両眼立体視で出現する形態輪郭の補完。(a) ステレオグラムの矩形は、小さな要素の集合であるが、両眼立体視すると輪郭をもつ矩形面が見える。(b)、(c)主観的輪郭による矩形で、cでは輪郭が湾曲させてあるが、これを両眼立体視すると中央空白部分にまっすぐなあるいは湾曲した奥行きが生じて見える。(d)、不等像視パターンで、両眼立体視すると垂直軸に関して奥行的に傾斜した面が生じる。(e) サイン波形的RDSパターンで、両眼立体視すると水平軸に関して奥行的に傾斜した面が生じる。(f)図cの輪郭をぼかしたもので、低空間周波数パターンとなっている (Shipley & Shore 1990)。

eではおおよそ水平垂直方向とも視角5度離れたところで両眼立体視的輪郭補完は消失すること、図fのそれは他の高空間周波数をもつその6分の1位であること、また、交叉と非交叉視差間で差があり、両眼立体視的輪郭補完範囲は交叉視差の方が広く、さらに、対象を小さく(視角0.97度)したり、中心窩をはずして(中心窩の左あるいは右0.5度)に提示すると、同様に、両眼立体視的輪郭補完範囲は小さくなることを明らかにした。両眼立体視的輪郭補完はランダム・エレメント・ステレオグラムと同様不等像視ステレオグラムでも生起すること、高空間周波数パターンで大きいこと、中心窩を外すと小さくなることなどから、この現象は認知的要因よりは神経生理的レベルで起きていると考えられる。

3.11. 両眼立体視閾の測定における刺激の同時提示、刺激の空間的近接要因と眼球運動

両眼立体視閾は、2個の対象が同時に提示されている条件、すなわち時間的重なりが長いほど良くなるが(3-10 sec arc, Westheimer 1979)、時間的重なりが皆無となると急激に悪くなる。また、2個の対象の時間的重なりが無くしかも両対象の提示時間間隔が離れるほど、両眼立体視閾は少しづつ悪くなるが、しかし両対象が提示される間隙時間に他の刺激を挿入しても、それは無視して差し支えないほどの影響しか与えない(Foley 1976)。これまでの両眼立体視閾の研究では、刺激対象は中心窩に収まる範囲内で空間的には離して提示されていた。これは、対象が中心窩内にある方が両眼立体視は良いからである。しかし、対象のいずれかが中心窩の外にあっても、両眼立体視はかなり良好を保つ(Ogle 1950)。これは、観察者が奥行的に配置された対象を交互に注視することによって中心窩に対象を投影し継時的比較をするためと考えられる。そこで、このことを確認するために、2個の対象が中心窩に同時に投影されないように空間的に離して(視角10度離して提示)同時あるいは継時的提示(この場合、対象は時間的重なりをもつ)し、その両眼立体視閾の測定が試みられた(Enright(12))。対象を大きく相互に離れた条件では、対象が中心窩に同時に投影される条件で示されたような、時間的重なりが零になったときの急激な閾値の上昇は示されなかった。この時の輻輳運動を測定すると、対象が離されて提示された条件に較べて対象を近接して提示した条件で不随的な細かい反復する輻輳運動がより多く生起していた。これは、近接した対象を長く注視しているためである。

3.12. プルフリッチの振子現象

時計の振子のように、前額に平行に反復運動する対象を片眼にデンスティ・フィルタを装着して観察すると、奥行方向に楕円を描いて運動するように見える。これは、デンスティ・フィルタによる入力遅延が両眼視差を生じさせるからと説明されてきた。これまでの観察記録によれば(Harker 1967, Harker & O'Neal 1967)このような事態で対象は楕円軌道を描くように運動して見えるが、その楕円は振子運動軌道を長軸とした左右対称の楕円ではなく、長軸が奥行方向に傾いた楕円を描くことが確認されている(図21-a)。Emerson & Pesta(9)は、楕円軌道のこの種の歪みを次のように考えた。いま、対象が軌道上を v の速度で運動するとき、 t 時間後の位置は vt で表され、またデンスティ・フィルタによる視覚的潜時を p とすると、知覚された対象の位置は $vt - vp$ で示される。さらに、運動検出器による知覚された運動速度を考慮し、これを v' とすると、知覚された対象の位置は $vt - vp + v'p$ となる。このとき、 $v'p$ は、実際には vp より小さい値をとるので、 $v'p = wvp$ と表すことができ、 w は0から1の間の値をとる。 w が1の時には $vp = v'p$ となるので、知覚的遅延は生起しない。 w が0の値をとるときには、プルフリッチの楕円軌道の長軸は振子軌道と一致する。 w が0より大きい値をとるときには、楕円軌道の短軸の大きさは w が0のときより小さくなる。この仮説によると、観察者が振子運動の中心に位置していれば、視かけの楕円の長軸は奥行方向に傾

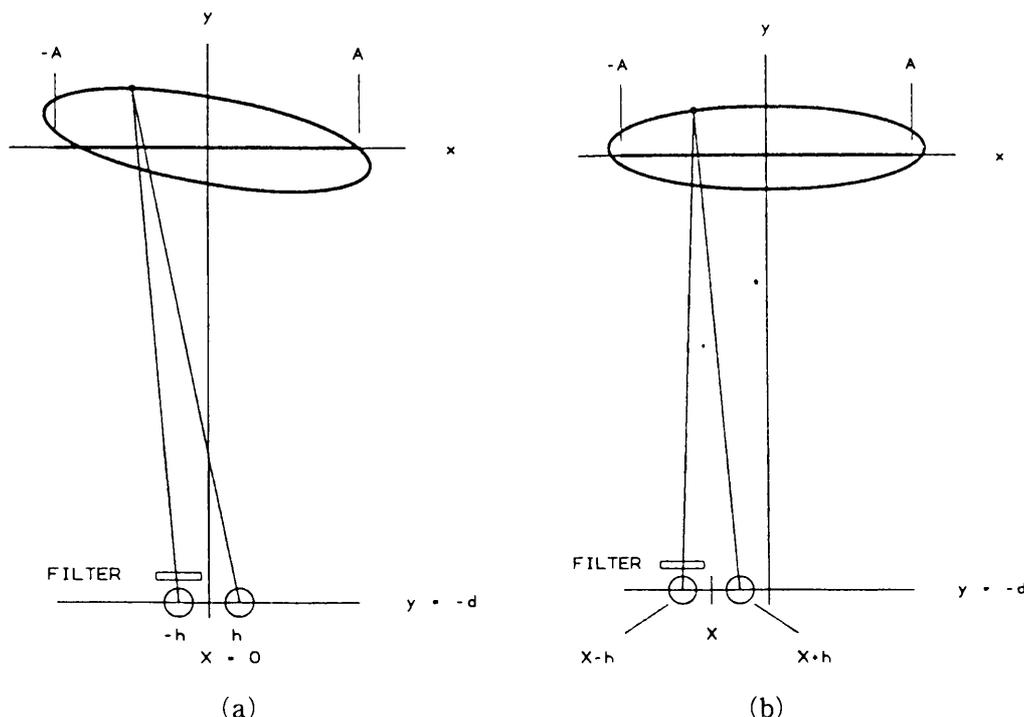


図21 プルフリッチの振子における一般化された刺激遅延仮説。(a) 観察者が振子運動の中心に位置した場合の視かけの楕円軌道。(b) 観察者の位置をフィルタ装着側へとシフトすると楕円軌道が観察者からみて左右対称に見える (Emerson & Pesta 1992)。

くことが数学的に予測され、したがって、視かけの楕円の長軸が振子軌道と一致して見える観察者の位置 (図21-b) を求めることができる。実験の結果、視かけの楕円の長軸が振子軌道と一致して見えるのは、デンスティ・フィルタ装着側によった位置であること、これはデンスティ・フィルタ濃度が高いほど大きいこと、また、視かけの楕円の短軸も、フィルタ濃度が高いほど大きいこと、さらに、視かけの楕円の短軸と長軸の交点は、フィルタ濃度が高くなると奥行方向にシフトすること、などが明らかにされた。これらの結果は、一般化された視覚的遅延仮説を支持する。

3.13. 両眼立体視条件での Ternus 仮現運動

Ternus 仮現運動とは、水平に等間隔で配置された3光点を1フレームとして継時的に提示し、その際、2フレーム目には3光点の位置を横水平方向に1区画距離シフトさせるもので(図22)、フレーム間の間隔時間 (ISI) が短時間 (10msec) の時には中央の光点は静止し、両側の光点は端から端に動いて見え、また ISI が長いときには (90msec)、3光点は一つのまとまりを保持して水平に運動して見える。ISI の差にもとづいて2通りの仮現運動がこのような生じるのは、運動視知覚過程が2通り存在することのひとつの証拠であると考えられた。そこでは、短期過程 (short-range) と長期過程 (long-range) が区別される (Braddick 1974 1980, Nakayama 1985)。短期過程では輝度差による時空的变化を検出し、両眼立体視は関わらない。長期過程では、比較的大きい空間的变化(数度)と長い時間間隔(数百 msec)を検出し、短期過程で検出されるものより大きい範囲の時空的变化をもつ輝度輪郭と肌理、網膜視差やコントラスト差で規定された輪郭に反応し、あわせて、両眼立体視過程と認知過程をもつ。Ternus 仮現運動での2通りの視えは、運動視における短期過程と長期過程にそれぞれ対応する (Pantle & Picciano 1976, Braddick 1980, Petersik 1989)。そこで、この仮説をさらに検証するために、Ternus 仮現運動をダイナミック・ランダム・エレメント・ステレオグラムで提示し、このキクロピアン条件と輝度輪郭条件との比較が試みられた (Patterson, Hart &

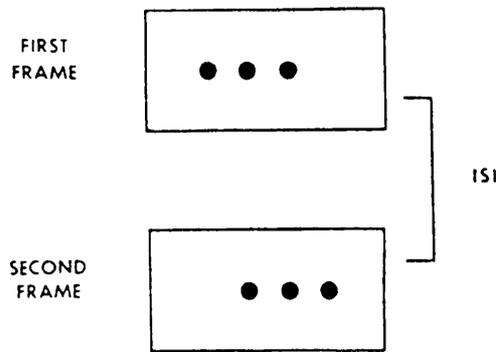


図22 Ternus仮現運動条件。ISIが短いときには(10msec)、中央ドットは静止し、左右端のドットが端から端に動くように見え、ISIが長いときには(90msec)、3点がひとまとまりとなって動くように見える(Patterson, Hart & Nowak 1991)。

Nowak(27))。実験の結果、ISIの変化にともなう仮現運動現象は、キクロピアン条件と輝度輪郭条件ともよく類似していた。Ternus 仮現運動は、ISIの長短に関わらず両眼立体視と関連しているので、運動視の2過程仮説では説明できない。

3.14. 対象の回転運動情報からその3次元世界の計量的構造を構成することが可能か？

両眼立体視における立体視量は、観察距離の約2乗に比例する。これは両眼立体視における形態知覚にも影響し、例えば球体は観察者から対象までの絶対的奥行距離が正しく知覚されたときにのみ球体として知覚でき、もし絶対的距離を過大評価すると、対象は伸張して知覚される。このように、両眼立体視において対象を正しく知覚するためには、対象を含む3次元世界の構造を知らなければならない。両眼間の距離を拡大することによって両眼視差を増幅する実体視鏡を通して、針金立体を提示し、それを回転させて観察させたところ、回転にともなって針金立体の形は歪んで見える。これは両眼視差を拡大することによって絶対的奥行距離が過大視されたためである。しかし、この後で回転する対象を10分持続観察させたところ、今度は対象までの絶対的奥行距離は縮小して視えた。

Wallach & Karsh (1963 a, b) は、回転運動する対象を視ることによって両眼立体視構造に再調整が生じたためとこれを考えたが、後に Fisher & Ebenholtz (1986) は、この実験事態が対象についての運動要因が存在しない両眼視差要因のみの条件、あるいは両眼視差要因が存在しない運動要因のみの条件のいずれかで試みられていることを指摘し、運動する対象を視ることによって両眼立体視下での3次元構造が再調整されたのではないと考えた。そこで、Lappin & Love(23)は、両眼立体視下で類似した対象を提示し、それを回転提示した条件と静止提示条件のどちらで形の判定の正確度が高いかを比較した。対象はドットで構成された長軸と短軸の比が3種類の楕円形で水平軸を中心として奥行方向に3段階(40、50、60度)に傾斜させて提示された(図23)。対象の回転は、対象の垂直軸を中心として90度の範囲で反復された。実験条件としては、両眼視差をもつ条件ともたない条件、観察距離と両眼視差とが適合している条件と観察距離に較べて両眼視差を過大にし、あたかも観察距離を縮小したような条件、および対象を回転させた条件と静止条件である。楕円形の形態を選択肢を設定して判断させたところ、どの実験条件でも、対象回転観察条件のほうが対象の形態を正しく知覚できることが示された。この種の効果は、対象の回転角度を縮小したり、あるいは対象と回転軸との角度を90度から逸脱させるにつれて減少することも確認された。これらの結果から、回転する対象から得られる情報は、対象の置かれた知覚世界の3次元構造を正しく成立させるのに役だっている。

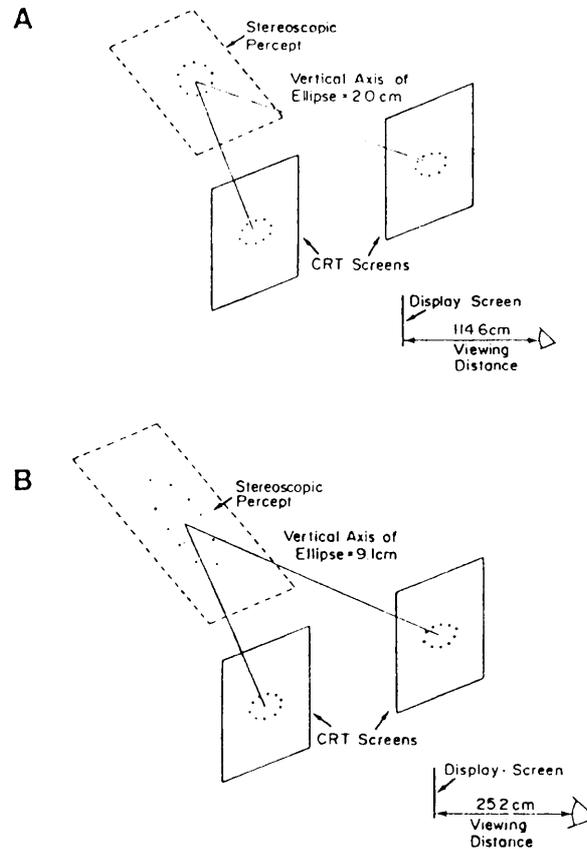


図23 対象の回転運動情報からその3次元構造を知ることが可能かをしらべるための実験事態。(a) 融合像が40度の奥行的傾きをもつ円に視えるステレオグラムが観察距離114.6cmのところ提示される。(b) 観察距離25.2cmのところ、観察距離114.6cmから視たような40度の奥行的傾きをもつ円形となるように適当な視差をつけたステレオグラムが提示される (Lappin & Love 1992)。

3.15. 継時的両眼立体視 (sequential stereopsis)

日常、ものの遠近を弁別するとき、交互にものを凝視すると、その判断が容易になることが知られている。これを実験的に確認するためには、通常両眼視差が働かないように工夫して対象を提示する必要がある。そのために、奥行距離を異にする2個の対象のうち一方を凝視したとき、他の対象は片眼にのみ投影されていなければならない。このため、網膜にある盲点が利用された。すなわち、一方の対象を凝視したとき、他の対象の片眼への投影は盲点に投影されるように配置する。このようにすると、2個の対象の奥行弁別において両眼視差は働かないことになる。Enright (11) は、この種の実験事態を設定し2個の対象間の奥行弁別閾を求めたところ、両眼立体視閾と変わらない閾値を得た。この種の奥行弁別閾は、2個の対象を交互に継時提示しても、あるいは2個の対象を輻輳運動が生起しない程度に短時間同時提示しても同様であった。通常両眼視差が存在しない事態でのこの種の奥行弁別がどうして生起するかについては、継時的両眼立体視仮説 (sequential stereopsis) が立てられた。それは、複数の対象が交互に継時的に水平方向のサッケード眼球運動によって凝視され、交互に中心窩に投影されたとき、その前後の視差が記憶されていて比較照合され、その結果、立体や奥行が出現するというものである。この仮説による継時的両眼立体視が可能になるためには、水平方向のサッケード眼球運動中は、輻輳運動が生起しないように厳密に統制されていなければならない。この種の奥行弁別事態での眼球運動がモニターされ分析された結果、水平方向のサッケード眼球運動中は輻輳は安定していることが確かめられ、この種の継時的両眼立体視の存在が示唆されている。

3.16. Cannabis 薬服用時の両眼立体視の凹凸反転

網膜視差は凹面を指示するのに視かけ上では凸面が知覚されることがある。とくに、人間の顔レリーフなど日常慣れ親しんだものを対象としたときにこの現象は良く生起する。これは、入力された感覚データがこれまで貯蔵された記憶データと照合され、検閲を受けた結果、不合理な視えが抑圧されるからと考えられる。そこでサイケデリック状態を誘発する Cannabis 薬剤を服用させ、両眼立体視の凹凸反転がどのように変わるかをしらべた (Emrich, et al. (10))。両眼立体視の凹凸の反転は、薬剤服用時には強く抑制され、網膜視差が示す奥行方向が知覚されていることが示された。とくに、人間の顔のなかの鼻、目など意味の強い部分の凹凸反転が抑制された。これは、サイケデリックな状態では中枢部が不合理な知覚を修正できないでいることを示している。

3.17. 両眼立体視下でのアンマスキング

ノイズ音刺激とともに提示されたシグナル音刺激は、片耳より両耳条件の方が検出しやすいアンマスキング現象がある。視覚過程にも同様なアンマスキングがある。例えば、背景にノイズ刺激を伴うシグナル刺激を両眼に別々に提示し融合させる。このとき、シグナル刺激としてサイン波刺激を用い、フェーズの等しい刺激を両眼に提示する条件とフェーズが180度変位した刺激を左右眼に別々に提示する条件で比較すると、シグナルが低空間周波数の場合には、後者の条件の方がシグナル刺激の検出は容易であった (Henning & Hertz 1973)。アンマスキングは両眼立体視条件下でも検討されている。2次元の広帯域のガウス関数刺激をノイズとして、その上にガボール関数刺激をシグナルとして両眼に提示し、このときノイズ刺激に水平視差を設けるが、シグナル刺激には両眼間で対応をもつ条件ともたない条件とを設ける。両眼間で対応をもつ条件でアンマスキングが生じた (Schneider, Moraglia & Jepsen 1989)。同様な効果は、ノイズ刺激に垂直視差を設けた条件でも確認されている (Moraglia & Schneider (24))。この種のアンマスキングは、各眼への入力の加算で説明が可能である。ノイズ刺激に帯域を限定したガウス関数(0-8.7 cycles/deg)刺激を用い、

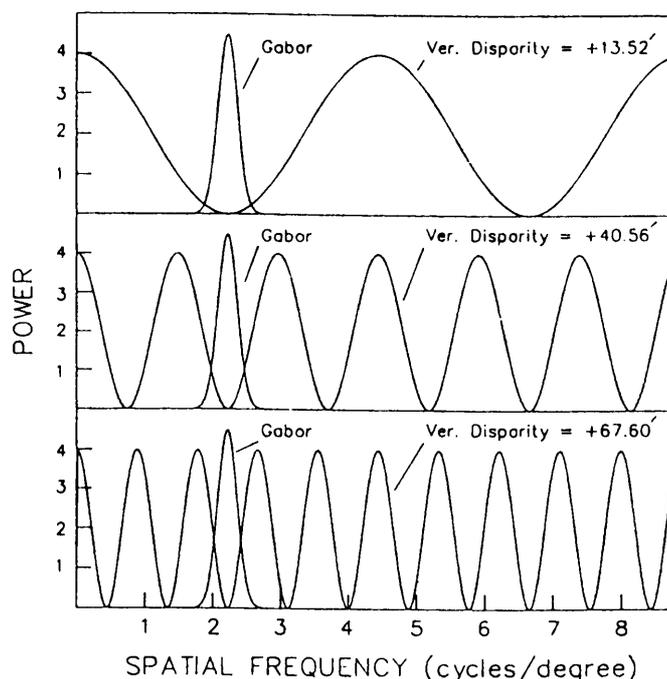


図24 左右眼へのガウス関数ノイズ刺激を加算し、それを空間周波数の関数で表示したもの。上段は垂直視差が13.52'-中段は40.56'-下段は67.60'-の各条件を示す (Moraglia & Schneider 1991)。

それに垂直視差を付加して各眼に入力すると、各眼からの入力合計は空間周波数の周期的関数を描いて変化し、しかも垂直視差をパラメータとすると、その空間周波数が異なることが分かる。図24から明らかなように、垂直視差13.52min条件より67.60min条件の方がシグナル刺激はノイズ刺激の中に埋没しているため、シグナル刺激の検出は困難となることが予想される。実験の結果はこれを裏づけている。

3.18. サルの両眼立体視閾と脳梁 (corpus callosum)、外側視覚有線野 (extra striate visual area)

人間の両眼立体視閾は視角約2秒程度で、これは中心窩における細胞間距離よりも小さく、超精度 (hyperacuity) を示すもののひとつである。これまで、マカック類での両眼立体視閾の測定は1例あり (Sarmiento 1975)、それによれば人間のそれとほぼ同等である。Cowey & Wilkinson (5)は、マカック類、とくにアカゲザル (rhesus monkey) の両眼立体視閾を測定し、あわせて両眼立体視過程を担う中枢過程との関連も吟味した。刺激は上下垂直に配された細い線で、両眼立体視閾は上線あるいは下線のいずれかを動かし奥行に関してマッチングさせる方法で求められた。6頭のアカゲザルの両眼立体視閾は視角13-23秒で、同時に試行された人間と大差はなかった。脳梁の膨大 (splenium) の切断は、それが視覚領V2の除去前と除去後のいずれで行われても、両眼立体視閾に影響を与えなかった。この領域は、従来指摘されたのとは異なり、視軸の内側の細かい網膜視差の検出にはそれほど関係していない。視覚領V2の中心窩に対応する部分の除去は、両眼立体視閾値を顕著に上昇させた。これは有線皮質 (striate cortex) の網膜の中心5度範囲に対応する部分を除去しても同様であった。また、下部側頭回皮質 (infero-temporal) の後部領域の切除は、両眼立体視を若干悪くさせるが、それに続いて、とくに吻側上丘 (rostral superior colliculi) を破壊すると、両眼輻輳作用を不調にし両眼立体視閾を損なう。

3.19. ネコの RDS の両眼立体視と視覚中枢

ネコが両眼立体視できるかについては、Fox & Blake (1971) によって3本ロッドを各眼に別々に入力させる方法で両眼視差を導入し、3本が奥行に関して等距離に視えないときにはリッキングの条件性抑制が生じるように訓練してしらせ、両眼立体視能力をもつと結論されている。しかし、単眼の手がかりを完全に除去した条件での実験はいまだ試みられていない。そこでネコのRDS両眼立体視能力が、赤緑RDSを赤・緑コンタクトレンズを通して提示する方法をもちいて、Ptito, Lepore & Guillemot (29) によって検討された。訓練は、白-黒弁別、縦矩形-横矩形弁別、ランダム・ドットによる縦-横矩形弁別そしてRDSでの縦-横矩形弁別という順序で行われた。20個体の被験体はすべて両眼立体視能力を示した。そこで、両眼立体視能力が視覚中枢のどこで主に担われているかを破壊実験を通して探られた。はじめに、視交叉を切断したところ、両眼立体視能力は著しく損なわれた。次に、他の被験体の脳梁を切断し、RDS刺激の弁別再訓練を行うと、これは再学習が可能であったが、しかし、脳梁と視交叉の両方を切断すると、再学習は不成立となった。両半球の17と18視覚野を破壊すると、両眼立体視も不能となった。さらに、17、18、19視覚野の単一ニューロンの電気応答が測定され、その結果、17、18視覚野は網膜視差に応答するニューロンを多くもつこと、19野にも分布密度は小さいが17、18野のそれよりも広範囲な視差に応答するニューロンが存在すること、視交叉を切断すると17、18野の視差応答ニューロンは有意に減少し、また19野のそれは完全に消失することが示された。ネコの両眼立体視は、視交叉、外側膝状体を経る神経回路と視覚野が統合的に働くことによって可能となっている。

3.20.サルにおける color opponent チャンネルと broad-band チャンネル

視覚情報は2種類の独立したチャンネル、color opponent と broad-band チャンネルで伝達される。網膜の ganglion cell のレベルでは、color opponent チャンネルは小さい受容野をもち、その中心と周辺は異なるタイプの錐体細胞からの入力を受けるのに対して、broad-band チャンネルは広い受容野をもち、時間的变化する刺激を検出する。これらのチャンネルは外側膝状体の別々の細胞層に投影され（color opponent チャンネルは小細胞層（parvocellular cell）に、broad-band チャンネルは大細胞層（magnocellular cell）に投影）、そのあと、一部は独立回路網を維持したまま視覚中枢に伝達される。外側膝状体では、broad-band チャンネルは、輝度変化する刺激のみに反応し、等輝度で色相差のみの刺激には応答しないが、color opponent チャンネルは等輝度刺激にも反応できると考えられている。等輝度色相差刺激を用いて、各々のチャンネルが検出できる視覚情報がしらべられた結果、color opponent チャンネルは、色、肌理勾配、パターン、網膜視差情報を、broad-band チャンネルは、運動やフリッカー情報を検出していることがこれまでに明らかにされている（Livingstone 1988, Livingstone & Hubel 1987, 1988）。

Schiller, Logothetis & Charles (35) は、サルを対象とし、小細胞あるいは大細胞を破壊することによって、どのような視覚情報が影響を受けるかを精神物理学あるいは電気生理学的に検討した。小細胞と大細胞の破壊は薬物の注入によった。操作された視覚情報は色（等輝度）、肌理勾配、パターン（市松格子）、網膜視差、明るさ、運動、フリッカーである。これらの刺激属性が正しく弁別されているか否かは、複数の刺激の中からあらかじめ正刺激として強化訓練された対象への眼球運動を測定することで判定された。その結果、小細胞の破壊では色、パターン、および高空間周波数の肌理勾配と網膜視差情報が、大細胞の破壊では高頻度、低コントラストの運動、フリッカー情報がそれぞれ損なわれた。しかし、大細胞を破壊しても等輝度刺激での網膜視差と肌理勾配情報、および小細胞破壊での運動情報は、それぞれ正常に検出されること、また大細胞ニューロンの電気生理学的測定でも、等輝度刺激は反応が減少するが消失しないこと、小細胞ニューロンでも等輝度刺激は反応を減弱させることなどが示された。broad-band チャンネルは等輝度刺激に反応しないとするこれまでの結果は、ここでは否定され、等輝度条件では、color opponent, broad-band の両チャンネルとも影響を受け、視覚情報の検出が妨げられると考えられる。

4. 単眼的奥行手がかり

4.1. 単眼的奥行手がかりとしての色相対比要因（無輝度対比条件での色相対比）

視覚系は遠近法的要因、肌理勾配、蔽一被蔽要因などから奥行を知覚できるが、それらの要因から奥行が識別できるのは、輝度差がある場合に限られ、等輝度条件（輝度対比をもたない色相対比条件）ではそれらの奥行手がかりは作用しないと言われる（Livingstone & Hubel 1987）。これに対して、等輝度条件でも蔽一被蔽、あるいは遠近法的要因は奥行手がかりとして有効とする結果（Cavanagh 1987）もあれば、輝度条件下での不規則な肌理勾配は無効とする結果（Zimmerman & Cavanagh 1990）も出されている。視覚系が輝度対比の無い色相対比条件下でも単眼的奥行要因を検出できるかが、Troscianko et al. (39) によって検討された。観察者には、輝度対比の無い色相対比要因（赤色）でのみ構成された肌理勾配パターンを辺縁枠組を取り除き純粹に表面のみが見えるようにして提示し、その視えの奥行傾斜程度を単眼で測定させた。輝度対比が無い色相対比条件下での視えの奥行傾斜量は、輝度対比をもつそれと同等であることが示された。また、肌理勾配のほかに彩度勾配（赤一灰色）、色相勾配（赤一緑）、輝度勾配（赤一黒）を追加した条件下で、同様に視えの奥行傾斜程度を測定したところ、彩度勾配は視えの奥行傾斜を高めるのに効果があるが、色相勾配は無効であった。考えてみれば、風景の中では、遠くのものは大気によって妨げられ、強い

彩度勾配ができる。視覚系は、このような中でも、色情報のみから奥行を検出できる能力をもっている不思議ではない。

5. 大きさ—距離関係

5.1. 熟知的大きさ要因 (familiar size)

熟知的大きさ要因が奥行距離知覚に及ぼす影響のこれまでの研究によれば、熟知対象は、幾何学的対象よりは遠くに定位されて見える (Carlson & Tassone 1971, Predebon 1990)。これは、肌理勾配や遠近法的要因などで成立している奥行距離スケールが、熟知対象が視野内に存在することによって変わるためと説明されていた。この種の現象が絶対的奥行距離ばかりでなく相対的奥行距離でも生じるか否かが、Predebon(28)によって検討された。熟知対象には人間を、幾何学的対象には矩形が選ばれ、2人間あるいは2対象間の相対的奥行距離が、自然な観察条件のもと種々の観察距離からマッチング法あるいは簡便な一対比較法で求められた。その結果、熟知対象と幾何学的対照条件間には、相対的奥行距離の知覚において有意な相違は見いだされなかった。この結果は、熟知的大きさ要因が奥行手がかりとなるのは熟知対象が奥行距離スケールを変えるからとする仮説を支持していない。

一方、女性を熟知的対象として戸外にたたせ、熟知的大きさ要因のその視かけの大きさと距離に与える影響が非熟知的対象と比較された (Higasiyama & Kitano(18))。それによれば、実物女性の大きさ判断には知覚恒常性が示されたが、非熟知的対象の大きさ判断では、距離の増大と共に視かけの大きさも増大し、過恒常が示された。絶対的奥行距離判断を熟知的対象と非熟知的対象で比較すると、熟知的対象では、実物と等大、あるいは過小な大きさは、その視かけの奥行距離が非熟知的対象のそれより遠くに定位されるのに対して、大きさが実物より大きい場合には、熟知的対象と非熟知的対象とは等距離に定位された。

5.2. 月の錯視

月の錯視は、地面上の様々な対象物が月までの視かけの距離の見積りに影響を与えるか、あるいはそれらが調節や輻輳など眼筋システムを変調させる結果として生起すると説明される。事実、天空にある月では、これら地勢的要因が存在しないために、この種の知覚システムの変調は起きず、したがって錯視も生じない。このような説明に対して、月の錯視が生じるのは、月という固有な対象存在の故であるとする考えが提示されている。月の錯視が十分に生起する条件下で月以外の天体を対象として錯視量を測定すると (Reed & Krupinski(32))、例えば、オリオン座の2つの星では、2つの星間の視かけの距離、星までの視かけの絶対的距離、星の視かけの大きさは、地平線にあるときも天空にあるときも変わらなかったし、3つの星間のそれらも月のようには錯視が生じなかった。

5.3. 3次元視における発達的研究

5月齢と3½月齢児が陰影要因から立体視を可能にさせるかについて馴化法をもちいてしらべられた (Putansuu & Hofsten(31))。馴化刺激としては、低空間周波数で輝度が垂直方向のサイン波変化をするパターンをカラー平面上に投影したものをを用いた。これは成人が観察すると縦割した円筒立体に見える。検査刺激には、縦割円筒立体の実物と馴化刺激と同一の空間周波数で矩形波的輝度変化をするパターン (成人には平面的にしか視えない) を提示した。5月齢児は、どちらの検査刺激も目新しいものとして扱い、3½月齢児は実物円筒立体は熟知したものとして扱った。陰影要因がどの発達段階から3次元視の手がかりとなるかについては、7月齢児からとのデータ (Granrud

et al. 1985) があるものの、いまだ不定である。

5.4.3 3次元配置対象の描画表現の発達

3次元的に配置された対象の描画表現がどのように発達するかについて、5-11歳児を対象としてしらべられた (Klaue(19))。対象は奥行位置の異なる2個のボールで机の上に置かれた。描画は紙面を水平におく条件と垂直に立てて描かせる条件とで試行した。3次元配置された対象の正しい描画は、7歳児では半数以下、しかし9歳児では60%を超えるようになる。また、この種の描画は紙面の方向と関係し、紙面が水平におかれると対象の3次元配置が良く再現されるが、垂直に立てられると網膜に投影された位置関係で再現される傾向が高い。

5.5 踏台あるいは障害物のアフォーダンスについての発達の研究

人間や動物は、移動するとき、そこにある障害をのり越えることができるか、あるいはその断差なら飛び越えられるかを判断しながら行動している。Gibson, J.(1979)によれば、人間や動物にとって対象はすべて生態的意味あるいは利用価値 (アフォーダンス) をもち、その観点から知覚されているという。障害物があれば、それは乗り越えられる大きさのものか、あるいは階段や断差があれば昇降できる程度の高さか否かが見積られている。6、8、10歳児がどの程度、この種のアフォーダンスをもつか、踏台の昇降可能な高さや障害物の乗り越え可能な高さの上限をどの程度正確に知覚できるかを測定することによってしらべられた (Pufall & Dunbar(30))。昇降可能限界は被験児の足の長さの0.88、乗り越え可能限界は0.50となることが示された。これは、児童の年齢と無関係に成立し、しかも成人で得られた値 (Warren 1984) と等価であった。アフォーダンスは、発達のみにてかなり早期に獲得されていて、しかも対象の知覚に影響する。知覚と行動を結ぶ概念としてのアフォーダンスの重要性が指摘される。

6. 動物を対象とした3次元視研究

6.1. ネコの単眼視覚経験剝奪と両眼奥行視

両眼奥行視の発達の臨界期が、ネコの片眼の視覚経験を剝奪する方法でしらべられた (Timny (38))。視覚剝奪は眼瞼の縫合で、また両眼奥行視能力は跳躍法で測定された。その結果、(1)単眼視覚経験剝奪が出生直後から30日までの間に限定されると、両眼奥行視への影響は無い、(2)視覚剝奪が90日齢以降からはじまる場合にも両眼奥行視への影響は無い、(3)視覚剝奪が出生後から90日までの期間に行われると、両眼奥行視は影響を受け、その程度は剝奪開始時期と剝奪継続期間によって変わる、(4)両眼奥行視の発達にとって最も重要な時期は、35日齢から45日齢の間である、(5)この期間内では5日程度の視覚剝奪でも、両眼奥行視能力を半永久的に損なわせる、などが明らかにされている。

6.2. 生得的微細斜視をもつネコの両眼奥行視

両眼の輻輳を外科的あるいは光学的に歪めると、両眼間の受容野の対応が少なくなり、その結果両眼から中枢への輻輳的入力が増加する (Hubel & Wiesel 1965, Bisiti & Maffei 1979, Cynader et al. 1984, Kalil et al. 1984)。生得的に微細斜視をもつ被験体は、人為的につくられた斜視と同様にこの問題を探るための格好な対象となる。生得的斜視が出現しやすい家系のネコを対象として、その両眼奥行視能力が行動的にそして電気生理学的にしらべられた (Distler & Hoffmann(7))。奥行視能力の行動的検査は、一種の跳躍法を用いて行われた。そこでは遠近の2選択肢 (着地台上に前額に平行に提示された面が奥行的に異なる) が提示され、どちらかを常に正刺激として条件づけら

れた。微細斜視をもつネコの両眼奥行視能力は、正常な被験体の単眼奥行視能力と同等程度を示し、両眼奥行視能力の欠陥を示した。微細斜視をもつネコの視覚17、18野からの単一ニューロンからの電気生理学的検査では、(1)いずれかの眼からの入力で応答するニューロンは、正常被験体(74.8%)に比較して斜視被験体(49.7%)では大幅に少ない、(2)両眼からの同時入力に応答するニューロンは、正常被験体(10.4%)より斜視被験体(1.6%)では有意に少ない、(3)刺激の方向角度範囲(どの角度範囲まで応答するか)をみると、正常被験体と斜視被験体との間には差がないが、しかし角度に対する感受性は斜視被験体の方が劣る、(4)水平あるいは垂直刺激より斜め方向の刺激を偏向する兆候は、両被験体ともみられない、(5)両眼同時刺激を長時間にわたって行うとき、どちらかの眼を交互に優先させることがあるが、斜視被験体でこれが有意に出現するということはない、などが明らかにされた。これらの結果は、種々の視覚障害をもつ被験体あるいは眼筋を切断し人為的に斜視を導入した被験体を用いた研究結果と同じである。

7. おわりに

本報告を終わるにあたり、今年度の研究を概観すると、まず、運動要因に誘導されて出現する3次元視研究が盛んになってきたことであろう。この領域は、これまで kinetic depth effect として知られ、多くの研究の蓄積があるが、ここ近年では、計算機科学からの影響を受け structure from motion として問題設定がなされている。今年度の研究も、運動要因からどのように3次元形態が復元されるかについての研究が多い。この領域での研究は、大別すると、運動視差に関わるものとステレオキネティック現象など KDE に関わるものに分けられる。運動視差に関わる研究では、運動視差の成立に関わる要因分析、運動視差の3次元成立の効果の程度、その神経生理学構造などについて分析がされている。KDE に関わる研究は、運動要因から3次元形態がどのようにして復元されるかを主要課題とし、主として対応問題について分析されている。スリット視問題あるいは節穴問題も、そのような課題に関わる研究のひとつで、対象の全体が同時に見えなくても、運動から3次元形態が復元できることを示している。本報告にもあるように、これについては、網膜ペインティング仮説をめぐる、論争されている。

次に、両眼立体視の研究領域でも、計算機科学からの影響は大きく、網膜視差からの3次元形態の復元の計算機科学的理論を中心として研究が進められているが、しかし、全般的に、RDS 条件での研究はやり尽くされた感があり、大きな進展は今回みられない。

それでは、人間の両眼立体視メカニズムが解明されたのかといえば、それは否であり、今後も、計算機科学理論を1種のナビゲータとしてこの領域での研究が、たとえば拘束条件(ユニークネス条件とスムーズネス条件)が人間の視覚システムにも妥当するか否かをめぐる研究にみられるように、取り組まれて行くものと思われる。

運動要因からの3次元視や両眼立体視は、いずれも、2つ以上の画像から、同時にあるいは継時的に情報を検出することによって3次元視を成立させる。一方、人間の視覚システムは単一の画像からも3次元形態を容易に知ることができる。絵画的要因にもとづく3次元視は、心理学における奥行視研究のそのような領域での研究であったが、最近は、発達の視点からの分析を除き、極めて少ない。陰影、肌理勾配、線遠近的要因など、3次元形態の復元という新たな視点からの分析があっても良い。

文献 (1992)

- (1) Bressan, P. & Vallortigara, G. 1991 Illusory depth from moving subjective figures and neon color spreading. *Perception*, 20, 637-644.

- (2) Bülthof, H., Fahle, M. & Wegmann, M. 1991 Perceived depth scales with disparity gradient. *Perception*, 20, 145-153.
- (3) Collet, T.S., Schwarz, U. & Sobel, E.C. 1991 The interaction of oculomotor cues and stimulus size in stereoscopic depth constancy. *Perception*, 20, 733-754.
- (4) Cormack, L.K., Stevenson, S.B. & Schor, C.M. 1991 Interocular correlation, luminance contrast and cyclopean processing. *Vision Research*, 31, 2195-2207.
- (5) Cowey, A. & Wilkinson, F. 1991 The role of the corpus callosum and extra striate visual area in stereoacuity in macaque monkeys. *Neuropsychologia*, 29, 465-479.
- (6) DeLucia, P.R. 1991 Pictorial and motion-based information for depth perception. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 17, 738-748.
- (7) Distler, C. & Hoffmann, K. P. 1991 Depth perception and cortical physiology in normal and innate microstrabismic cats. *Visual Neuroscience*, 6, 25-41.
- (8) Eby, D.W. 1992 The spatial and temporal characteristics of perceiving 3-D structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 51, 163-178.
- (9) Emerson, P.L. & Pesta, B.J. 1991 A generalized visual latency explanation of the Pulfrich phenomenon. *Perception & Psychophysics*, 51, 319-327.
- (10) Emrich, H.M., Weber, M.M., Wendl, A., Zihl, J., Meyer, V. & Hanisch, W. 1991 Reduced binocular depth inversion as an indicator of cannabis-induced censorship impairment. *Pharmacology Biochemistry & Behavior*, 40, 689-690.
- (11) Enright, J.T. 1991 Exploring the third dimension with eye movements : better than stereopsis. *Vision Research*, 31, 1549-1562.
- (12) Enright, J.T. 1991 Stereo-threshold : simultaneity, target proximity and eye movements. *Vision Research*, 31, 2093-2100.
- (13) Fujita, N. 1990 Three-dimensional anorthoscopic perception. *Perception*, 19, 767-771.
- (14) Gogel, W.C. & Tiez, J.D. 1992 Absence of compensation and reasoning-like processes in the perception of orientation in depth. *Perception & Psychophysics*, 51, 309-318.
- (15) Halpern, D.L. 1991 Stereopsis from motion-defined contours. *Vision Research*, 31, 1611-1617.
- (16) Harris, J.M. & Parker, A.J. 1992 Efficiency of stereopsis in random-dot stereogram. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 14-24.
- (17) Hayashibe, K. 1991 Reversals of visual depth caused by motion parallax. *Perception*, 20, 17-28.
- (18) Higashiyama, A. & Kitano, S. 1991 Perceived size and distance of persons in natural outdoor settings : The effects of familiar size. *Psychologia*, 34, 188-199.
- (19) Klaue, K. 1992 The development of depth representation in children's drawings : Effects of graphic surface and visibility of the model. *British Journal of Developmental Psychology*, 10, 71-83.
- (20) Kulikowski, J.J. 1992 Binocular chromatic rivalry and single vision. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 12, 168-170.
- (21) Kumar, T. & Glaser, D.A. 1991 Influence of remote objects on local depth perception. *Vision Research*, 31, 1687-1699.
- (22) Kumar, T. & Glaser, D.A. 1992 Shape analysis and stereopsis for human depth perception.

Vision Research, 32, 499-512.

- (23) Lappin, J.S. & Love, S.R. 1992 Planar motion permits perception of metric structure in stereopsis. *Perception & Psychophysics*, 51, 86-102.
- (24) Moraglia, G. & Schneider B. 1991 Binocular unmasking with vertical disparity. *Canadian Journal of Psychology*. 45, 353-366.
- (25) Nawrot, M. & Blake, R. 1991 A neural network model of kinetic depth. *Visual Neuroscience*, 6, 219-227.
- (26) Ono, H., Shimono, K. & Shibuya, K. 1992 Occlusion as a depth cue in the Wheatstone-Panum limiting case. *Perception & Psychophysics*, 51, 3-13.
- (27) Patterson, R., Hart, P. & Nowak, D. 1991 Cyclopean Ternus display and the perception of element versus group movement. *Vision Research*, 31, 2085-2092.
- (28) Predebon, J. 1991 Spatial judgment of exocentric extents in an open-field situation: Familiar versus unfamiliar size. *Perception & Psychophysics*, 50, 361-366.
- (29) Ptito, M., Lepore, F. & Guillemot, J.P. 1991 Stereopsis in the cat: behavioral demonstration and underlying mechanisms. *Neuropsychologia*, 29, 443-464.
- (30) Pufall, P.B. & Dunbar, C. 1992 Perceiving whether or not the world affords stepping onto and over: A developmental study. *Ecological Psychology*, 4, 17-38.
- (31) Putaansuu, J. & Hofsten, C. V. 1991 Infants' sensitivity to differential luminance as information about depth. *Scandinavian Journal of Psychology*, 32, 144-153.
- (32) Reed, C.F. & Krupinski, E.A. The target in the Celestial (Moon) illusion. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception and Performance*. 1992, 18, 247-256.
- (33) Reinhardt-Rutland, A.H. 1991 Induced movement in depth and induced changing-size elicited by a luminous rotating spiral. *Perceptual and Motor Skills*, 73, 79-82.
- (34) Scharff, L.V. & Geisler, W.S. 1992 Stereopsis at isoluminance in the absence of chromatic aberrations. *Journal of the Optical Society of America A*, 9, 868-876.
- (35) Schiller, P.H., Logothetis, N.K. & Charles, E.R. 1991 Parallel pathways in the visual system: their role in perception as isoluminance. *Neuropsychologia*, 29, 433-441.
- (36) Shipley, T. & Shore, H. 1990 Neurological implications of aniseikonic tilts and stereoscopic completions through homogeneous visual space. *International Journal of Neuroscience*, 54, 209-220.
- (37) Schulman, G.L. 1991 Attentional modulation of mechanisms that analyze rotation in depth. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 17, 726-737.
- (38) Timny, B. 1990 Effects of brief monocular deprivation on binocular depth perception in the cat: a sensitive period for the loss of stereopsis. *Visual Neuroscience*, 5, 273-280.
- (39) Troscianko, T., Montagnon, R., Clerc, J.L., Malbert, E. & Chateau, P.L. 1991 The role of color as a monocular depth cue. *Vision Research*, 31, 1923-1930.
- (40) Weinshall, D. 1991 Seeing "ghost" planes in stereo vision. *Vision Research*, 31, 1731-1784.
- (41) Wright, M.J. & Gurney, K.N. 1992 Dependence of stereomotion on the orientation of spatial-frequency components. *Ophthalmic and Physiological Optics*, 12, 264-268.

参考文献

Adelson, E.H. & Movshon, J.A. 1982 Phenomenal coherence of moving visual patterns. *Nature*,

- 300, 523-525.
- Beverley, K.I. & Regan, D. 1979 Separable aftereffects of changing-size and motion-in-depth: different neural mechanisms. *Vision Research*, 19, 727-732.
- Bisti, S. & Maffel, L. 1979 Binocular interaction in bilateral strabismic kittens. *Brain Research*, 170, 359-361.
- Braddick, O.J. 1974 A short-range process in apparent motion. *Vision Research*, 14, 519-527.
- Braddick, O.J. 1980 Low-level and high-level processes in apparent motion. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, B*, 290, 137-151.
- Burt, P. & Julesz, B.A. 1980 A disparity gradient limit for binocular fusion. *Science*, 208, 615-617.
- Carlson, V.R. & Tassone, E.P. 1971 Familiar versus unfamiliar size: A theoretical deprivation and test. *Journal of Experimental Psychology*, 87, 190-115.
- Cavanagh, P. 1987 Reconstructing the third dimension: Interactions between color, texture, motion, binocular disparity, and shape. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 37, 171-195.
- Comerford, J.P. 1974 Stereopsis with chromatic contours. *Vision Research*, 14, 975-982.
- Cynader, M., Gardner, J.C. & Mustari, M. 1984 Effects of neonatally induced strabismus on binocular responses in cat area 18. *Experimental Brain Research*, 53, 384-399.
- Day, R.H. 1989 Apparent depth from progressive exposure of moving shadows: The kinetic depth effect in a narrow aperture. *Bulletin of the Psychonomic Society*, 27, 320-322.
- Epstein, W. 1973 The process of 'taking-into-account' in visual perception. *Perception*, 2, 267-285.
- Epstein, W. 1977 What are the prospects for a higher-order stimulus theory of perception. *Scandinavian Journal of Psychology*, 18, 164-171.
- Fisher, S.K. & Ebenholtz, S.M. 1986 Does perceptual adaptation to telestereoscopically enhanced depth depend on the recalibration of binocular disparity? *Perception & Psychophysics*, 40, 101-109.
- Foley, J.M. 1976 Successive stereo and vernier position discrimination as a function of dark interval duration. *Vision Research*, 16, 1269-1273.
- Fox, R. & Blake, R.R. 1971 Stereoscopic vision in the cat. *Nature*, 233, 55-56.
- Gibson, J.J. 1979 *The Ecological Approach to Visual Perception*, Boston: Houghton Mifflin.
- Granrud, C.E., Yonas, A. & Opland, E.A. 1985 Infants sensitivity to the depth due shading. *Perception & Psychophysics*, 37, 415-419.
- Gregory, R.L. 1977 Vision with isoluminant color contrast: 1. A projection technique and observations. *Perception*, 6, 113-119.
- Harker, G.S. 1967 A saccadic suppression explanation of the Pulfrich phenomenon. *Perception & Psychophysics*, 2, 423-426.
- Harker, G.S. & O'Neal, O.L.Jr. 1967 Some observations and measurements of the Pulfrich phenomenon. *Perception & Psychophysics*, 2, 438-440.
- Henning, G.B. & Hertz, G.B. 1973 Binocular masking level differences in sinusoidal grating detection. *Vision Research*, 13, 2455-2463.
- Hildreth, E.C., Grzywacz, N.M., Adelson, E.H. & Inada, V.K. 1990 The perceptual buildup of

- three-dimensional structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 48, 19-36.
- Hubel, D.H. & Wiesel, T.N. 1965 Binocular interaction in striate cortex of kittens reared with artificial squint. *Journal of Neurophysiology*, 28, 1041-1059.
- Kalil, R.E., Spear, P.D. & Langstemo, A. 1984 Response properties of striate cortex neurons in cats raised with divergent or convergent strabismus. *Journal of Neurophysiology*, 52, 514-537.
- Krol, J.D. & van de Grind 1980 The double nail illusion : Experiments on binocular vision with nails, needles, and pins. *Perception*, 9, 651-669.
- Livingstone, M.S. 1988 Art, illusion and the visual system. *Scientific American*, 258, 78-55.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. 1987 Psychophysical evidence for separate channels for the perception of form, color, movement, and depth. *Journal of Neuroscience*, 73416-3468.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. 1988 Segregation of form, color, movement and depth : anatomy, physiology, and perception. *Science*, 240, 740-749.
- Lu, C. & Fender, D.H. 1972 The interaction of color and luminance in stereoscopic vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 11, 482-490.
- Marr, D. & Poggio, T. 1976 Cooperative computation of stereo disparity. *Science*, 194, 283-287.
- Marr, D. & Poggio, T. 1979 A computational theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society, London B*, 204, 301-328.
- Nakayama, K. 1985 Biological image motion processing : A review. *Vision Research*, 25, 625-660.
- Ogle, K.N. 1950 *Researches in binocular vision*. Philadelphia, Saunders.
- Osuobeni, P.E. & O'Leary, D.J. 1986 Chromatic and luminance difference contribution to stereopsis. *American Journal of Optometry and Physiological Optics*, 63, 970-977.
- Pantle, A.J. & Picciano, L. 1976 A multistable movement display : Evidence for two separate motion systems in human vision. *Science*, 193, 500-502.
- Petersik, J.T. 1989 The two-process distinction in apparent motion. *Psychological Bulletin*, 106, 107-127.
- Petersik, A., Shepard, A. & Malsch, R. 1984 A three-dimensional motion aftereffect produced by prolonged adaptation to a rotation simulation. *Perception*, 13, 488-497.
- Pollard, S.B., Mayhew, J.E. & Frisby, J.P. 1985 A stereo correspondence algorithm using a disparity gradient limit. *Perception*, 14, 449-470.
- Prazdny, K. 1985 Detection of binocular disparities. *Biological Cybernetics*, 52, 93-99.
- Predebon, J. 1990 Relative distance judgments of familiar and unfamiliar objects viewed under representatively natural conditions. *Perception & Psychophysics*, 47, 342-348.
- Regan, D., Erkelens, C. & Collewijn, H. 1985 Visual field defects for vergence eye movements and stereoscopic motion perception. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 27, 806-819.
- Regan, D., Beverley, K.I. & Cynader, M. 1979 Stereoscopic subsystem for position in depth and for motion in depth. *Proceedings of the Royal Society London B*, 204, 485-501.
- Richards, W. 1971 Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 410-414.
- Sarmiento, R.F. 1975 The stereoacuity of the macaque monkey. *Vision Research*, 15, 493-498.

- Schneider, B., Moraglia, G. & Jepson, A. 1989 Binocular unmasking: An analog to binaural unmasking? *Science*, 243, 1479-1481.
- Wallach, H. 1985 Perceiving a stable environment. *Scientific American* (May), 118-124.
- Wallach, H. 1987 Perceiving a stable environment when one moves. *Annual Review of Psychology*, 38, 1-27.
- Wallach, H. & Karsh, E. 1963a The modification of stereoscopic depth perception and the kinetic depth-effect. *American Journal of Psychology*, 76, 429-435.
- Wallach, H. & Karsh, E. 1963b Why the modification of stereoscopic depth perception is so rapid. *American Journal of Psychology*, 76, 413-420.
- Warren, W.H. 1984 Perceiving affordances: Visual guidance of stair climbing. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 10, 683-703.
- Weert, C.M.M. de 1979 Color contours and stereopsis. *Vision Research*, 19, 555-564.
- Weert, C.M.M. de & Sadza, K.J. 1983 New data concerning the contribution of color differenced to stereopsis. *Color Vision*, J.D.Mollon and L.T. Sharpe. eds. Academic, New York, 553-562.
- Westheimer, G. 1979 Cooperative neural processes involved in stereoscopic acuity. *Experimental Brain Research*, 36, 585-597.
- Zimmerman, G.L. & Cavanagh, P. 1990 Slant perception at equiluminance. *Investigative Ophthalmology and Visual Science Supplement*, 31, 411.