

3次元視研究の動向—1991—

The Trends in the Research of 3-Dimensional Perception in 1991

林部敬吉

Keikichi HAYASHIBE

目 次

1. 運動要因による3次元視
 - 1.1. 単眼運動立体視（運動視差）
 - 1.1.1. 観察者の頭部運動の方向
 - 1.1.2. 速度差からの奥行出現の問題
 - 1.2. 運動による3次元形態効果（KDE、Kinetic Depth Effect）
 - 1.2.1. 第1次運動検出器と第2次運動検出器
 - 1.2.2. KDEと両眼立体視との関係
 - 1.3. ハトの tectofugal と accessory optic pathway での運動対象と自己運動
2. 両眼立体視（実体鏡視）
 - 2.1. 対応問題での色相要因
 - 2.2. 両眼立体視と空間周波数
 - 2.3. 前注意過程における網膜視差と運動情報の処理
 - 2.4. ダ・ヴィンチ ステレオプシス
 - 2.5. ダブル・ネイル錯視
 - 2.6. 両眼立体視での相対的奥行距離と絶対的奥行距離との関係
 - 2.7. 両眼立体視条件下での視対象の奥行次元での知覚的牽引と反発
 - 2.8. 両眼立体視における異方性
 - 2.9. 輝度変化によるステレオグラフ
 - 2.10. 両眼立体視と視覚領での受容野
 - 2.11. 色相収差による網膜視差（chromostereopsis）
3. 眼筋的要因による3次元視
 - 3.1. 暗視輻輳（dark convergence）の測定
 - 3.2. 輻輳要因の順応的再修整
 - 3.3. 壁紙効果（wall paper effect）
4. 大きさ—距離関係
 - 4.1. 月の錯視

5. 3次元視の絵画的要因

- 5.1. 乳児の絵画的要因に対する反応
- 5.2. 交差文化的研究

6. 動物を対象とした3次元知覚研究

- 6.1. 眼筋の自己受容的感覚情報が3次元視の発達に及ぼす影響
- 6.2. ラットの奥行距離知覚の手がかり
- 6.3. モルモットにおける網膜像の大きさの手がかり
- 6.4. ジャービル (Gerbil) とスパイニーマウス (Spiny mouse) の奥行と落差の知覚
- 6.5. ハトの3次元視のための視覚システム

7. その他の3次元知覚研究

- 7.1. 高齢での白内障手術と3次元視

8. おわりに

序. はじめに

本報告には、3次元知覚に関連した論文を、Psychological Abstract 誌の1991年版から抽出し、3次元視研究の各領域に分類して紹介する。文献抽出は、DIALOG の文献検索システムを利用し、検索語は Distance perception、Depth perception、Stereoscopic vision とした。

1. 運動要因による3次元視

1.1. 単眼運動立体視 (運動視差)

1.1.1. 観察者の頭部運動の方向

運動視差は、他のすべての奥行手がかりが除かれても相対的奥行距離を明示する強力な要因である。とくに、何らかの理由で単眼でしか見ることができなくなった者にとって、このような奥行手がかりで奥行や立体が識別できることは福音である。Gonzalez, et al. (1989) は、乳児期に片眼を摘出した児童が、奥行や立体弁別時に運動視差をどの程度効果的に用いているかをしらべた時、児童の頭部運動の用い方に違いがあることに気がついた。あるものは頭部を左右に振り、また別の者は頭部を並進するように左右に動かした。今回、Steinbach, Ono & Wolf (26) は、健常眼の成人に頭部を回転するように運動させる条件と頭部を左右に並進させるように運動させる条件とで、運動視差の効果が生じるか否かについて実験した。刺激は運動視差シミュレーション技法によって、サイン波パターンの立体が頭部運動に随伴して提示された。その結果、頭部回転と並進条件とも、その運動方向が上下あるいは左右のいずれにあっても、基本的には同等の運動視差効果をもたらすことが確認されている。

1.1.2. 速度差からの奥行出現の問題

視野中の対象の速度変化は、それだけでは奥行印象を生じさせないと、Ullmann (1979) は考え、それを「コンベアベルトの実験」で示した。「コンベアベルトの実験」とは、画面を縦方向に3分割し、まん中の領域のドットを他の2領域とは違えたものである。これを観察すると、速度の

異なる領域が奥行の異なる面として視えることはなく、すべての点が同一の前額平行面上にあるように見え、まん中の領域を通過するときには速度が変わるように見えるだけである。これに対して、Ito & Matsunaga (11) は、この「コンベアベルトの実験」を再検証した。速度変化は、2段階の矩形的条件とサイン波条件である。観察の結果、矩形的速度変化条件では、速度の遅い面が観察者からみて手前に、サイン波的速度変化条件では速い面が手前に知覚された。速度と奥行出現の方向は一定しないが、しかし速度差が視かけの奥行を生じさせている。また前額平行移動する平面上に垂直軸を中心として回転する円筒面を重ね合わせたものをスクリーンに投影した事態をシミュレートして観察させた場合にも、円筒と平面のドットが各々独立した運動をしているにも関わらず、両形態を識別でき、しかも平面上のドット速度と円筒面上のドット速度（円筒の場合、観察者と円筒面までの距離によって速度が異なるため、その最高速度を基準とする）の比を変えることによって、両形態の視かけの奥行関係が相違して視えた。この結果は、Ullmann の結論とは異なり、速度変化が奥行印象を誘導している。

1.2. 運動による3次元形態効果 (KDE、Kinetic Depth Effect)

1.2.1. 第1次運動検出器と第2次運動検出器

運動方向の検出器としては、2つの受容器(R1、R2)が1つのAND-NOTゲートを介して、一方(R1)は直接に、他方(R2)はある遅延を伴って連結されているモデルが Reichardt (1957) によって提唱されている。このモデルでは、受容器R1で最初に、続いてR2で明るさが検出された場合には、ゲートは出力されるが、逆にR2で最初に、次いでR1で検出された場合には、2つの受容器からの信号はほとんど同時にゲートに到達するので出力しない。これは、刺激が不感方向に非常に遅い速度で動くとか、2つの受容器間で停止し再度動くとかのことがない限り、もっとも基本的な運動検出器として作用すると考えられる。しかしながら、このモデルでは、受容器は明るさ強度検出器であるので、明るさコントラストが反転した場合に、運動検出器としては作動しない。Doshier et al. (1989) は、運動するドットパターンを提示する際、はじめに灰色背景で白色ドットを次に灰色背景で黒色ドットを提示し、またはじめの提示に戻る方法で次々とコントラストを反転

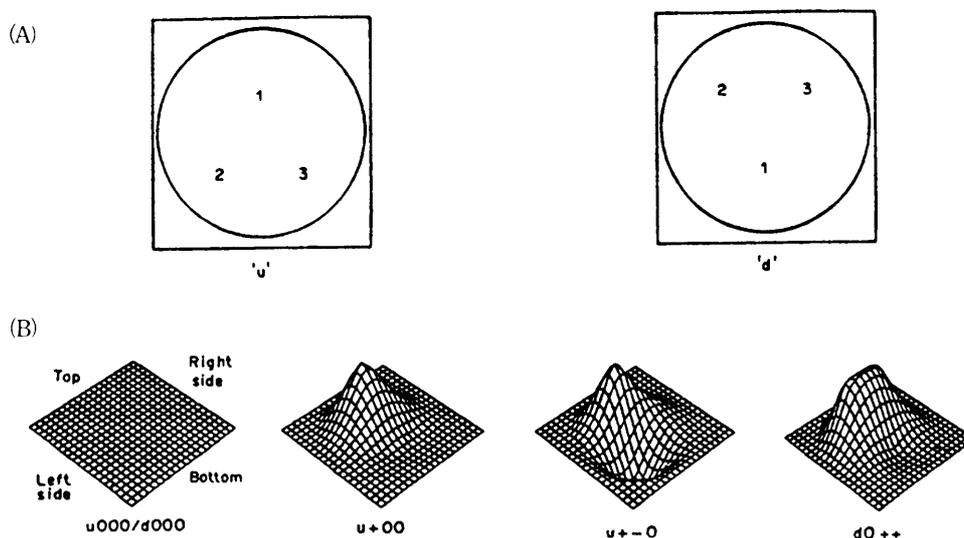


図1 1次運動検出器、2次運動検出器とKDEとの関係をしらべるための刺激配置。(A)は、凸または凹部分の2通りの配置を示す。(B)はCRT上に表現された幾つかの刺激パターン例で、(+)は凸、(-)は凹、0は凹凸が零をUは凹凸部分の△配置を、dは▽配置を各々示す。

(Landy, M.S., Doshier, B.A., Sperling, G. & Perkins, M.E. 1991)

させながらドットを提示したところ、KDE 効果は消失したが、運動は感ぜられることを報告した。これは、前述した1次運動検出器に続いて、コントラストに対して非線形な特性をもつ2次の運動検出器の存在を示唆する。Landy, et al. (15) は、マイクロバランス刺激技法を用い、1次検出器の出力が完全に零となる事態で、運動と KDE 効果がどのように検出されるかを検討した。マイクロバランス刺激技法では、各ドットは、フレームが変わるたびに、そのコントラストの極性がランダムにかつ独立して変えられて提示されるもので、この技法によれば、1次の運動検出器の出力を完全に統制することができる。刺激パターンは、図1に示されている。被験者には、パターンの位置、凹凸の判断が求められる。実験の結果、マイクロバランス技法で提示された刺激からは KDE 効果は出現しなかった。これは、KDE 効果が1次の運動検出器に担われていることを示す。さらに、運動を誘導する最小のフレーム数は2フレームであるが、それでも KDE 効果が出現することも確認された。これは、KDE 効果には運動速度の加速要因は無関係であることを示している。

1.2.2. KDE と両眼立体視との関係

両眼立体視は左右網膜像の空間的ズレにもとづき、また、単眼運動立体視（運動視差）は時間的なズレを利用しているために、両システムの類似性が指摘されている。事実、両眼立体視に欠陥をもつものは、KDE も成立しにくいこと (Richards & Leiberman, 1985)、Pulfrich 効果を利用して回転する対象を観察順応した後に ND フィルターをはずして観察すると、対象の回転方向が順応条件時と反対になること (Smith, 1976)、さらに波形パターンを両眼立体視条件もしくは運動視差シミュレーション条件のいずれかで観察順応した後、波形の凹凸があいまいなテストパターンを、両眼立体視順応条件のものには運動視差シミュレーション条件で、運動視差シミュレーション順応条件のものには両眼立体視条件でテストしたところ、それぞれの条件で波形の凹凸の出現方向が反対になること (Rogers & Graham, 1984)、などがこれまでに明らかにされている。Nawrot & Blake (22) も、両眼立体視と KDE との関係についての実験を順応技法をもちいて行い報告した。それによれば、(1)順応時に両眼立体視条件で回転する対象を観察させた後に、KDE 条件でテストすると対象の回転方向が順応時と反対になること(ただし、統制条件として順応を行わず KDE 条件でのみ観察させると、対象は反転して見え多義的となる)、(2)順応からの回復時間は、90秒間順応条件でおおよそ45秒であること、(3)順応効果は、順応時とテスト時の網膜上での刺激位置が同一の場合にしか生起しないこと、(4)順応効果は、対象の回転軸が順応時とテスト時で同一でないと生起しないこと、(5)前面と後面上のドットの運動方向がそれぞれ反対方向となっている対象を両眼立体視させた後に、KDE 条件でテストすると順応条件時とは反対方向に回転する対象が観察されること(順応時に前面が左方向、後面が右方向に運動する場合には、テスト時には反時計方向への回転が視える)、(6)両眼立体視条件で順応後、対象を KDE 条件、単眼視でテストしても順応効果が生起すること、(7)回転する対象を両眼立体視条件で順応後、静止対象を両眼立体視条件でテストした場合には、順応効果は成立しないこと、(8)順応時とテスト時の回転対象の形を変えても、順応効果は影響を受けないこと、(9)パースペクティブ要因や大きさ要因を付加することによって回転方向の多義性をなくした対象を KDE 条件で提示(両眼立体視条件を用いていない)して順応後、KDE 条件でテストしても順応効果はあらわれないこと、などが明らかにされた。これらの結果は、すべて両眼立体視と KDE の両視覚システムは相互に強く関連していることを示している。

1.3. ハトの tectofugal と accessory optic pathway での運動対象と自己運動

Frost, Wylie & Wang (8) は、tectofugal と accessory optic pathway で運動対象や観察被験体の自己運動が生理学的にはどのように処理されているか、これまでのハトについての研究をレ

ヴィーした。それによれば、tectal 細胞は、運動する視対象、あるいは視対象と背景が反対方向に運動する場合には反応するが、視対象と背景が同方向に運動する場合には反応しないこと、また視対象が奥行的に定位されている場合には、視対象のみの運動、あるいは視対象と背景が反対方向に運動する条件で反応するが、視対象が凹条件では視対象のみあるいは背景のみが運動する場合は反応を生じさせないこと、さらに、視対象の運動にともなって生起する蔽—被蔽については、覆っていく条件では反応するが、覆われていく条件では反応しないこと、またエッジの運動にはそれぞれ先導あるいは牽引の場合でも同様な反応が生じるという。tectal 細胞は、視対象運動に反応するばかりでなく、それに図—地分離や奥行・立体条件が絡んでいる。一方、accessory optic pathway では、とくにハトの basal optic root の神経細胞は、方向特異性をもち、上方、下方あるいは後方の運動のいずれかに反応すると共に、いくつかの細胞は、両眼からの運動刺激入力、それが同一あるいは反対方向でも、反応が出現した。これらの細胞は、横断あるいは回転運動の検出を担うに最適と考えられ、また同時に観察主体の姿勢や運動制御に関わっていると思われる。

2. 両眼立体視 (実体鏡視)

2.1. 対応問題での色相要因

色相手がかりのみによる等輝度ランダム・ドット・ステレオグラムでは、左右の対応点の検出ができず、両眼立体視が成立しない (Lu & Fender 1972, Gregory 1977, De Weert 1979)、一方、図形で構成されたステレオグラムでは、等輝度で色相のみが手がかりであっても、両眼立体視は成立する (Ramachandran, et al. 1973, Gregory 1977, De Weert 1979,)。これらの結果は、色相情報が両眼立体視過程で必須の要因でないことを示すが、しかし、輝度情報と連携して働く効果まで否定しているわけではない。Jordan III, Geisler & Bovik (14) は、輝度を変化させ、同時に色相要因をも付加した条件下で両眼立体視が、輝度変化のみの条件下でのそれと相違するか否かを比較することを通して、両眼立体視過程での色相要因の役割について吟味した。実験は、図 2 に示されたようなステレオグラム (wall paper stereogram) を用いて行われた。等間隔小矩形で構成されたこのステレオグラムを両眼立体視すると、近接した小矩形が対応して立体が生じるが、等価な対応点が 2カ所存在するので、立体出現は多義的となる。このステレオグラムの隣接した小矩形間で色相を一定にし、輝度を 2段階に設定した条件と輝度と色相 (赤と緑) の両方を 2段階で変化させた条件で、立体出現の多義性は、色相一定・輝度変化条件に比較して色相・輝度変化条件の方が少なくなることが示された。色相要因は輝度要因と連動して提示されたときには、ステレオグラムの左右の対応点の検出要素として効果的となる。このことから、これまで輝度・運動・立体は大細胞系 (Y 細胞、magnocellular) で、色と形は小細胞系 (X 細胞、parvocellular) でそれぞれ別々に処理され

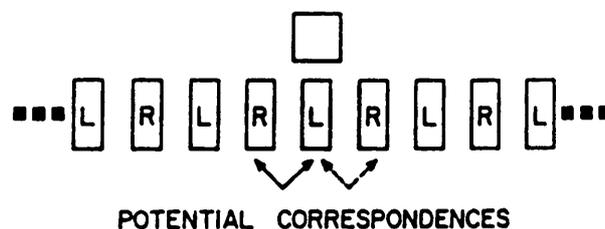


図 2 多義的な対応をもつウォールペーパーステレオグラム。小矩形が等間隔に並んだこの種のパターンを左右眼に提示すると、潜在的対応点が 2通り存在する。

(Jordan III, J.R., Geisler, W.S. & Bovik, A.C. 1990)

ると考えられてきた (Livingstone & Hubel 1988) が、この結果はこれに対して問題を提起するものとなっている。

2.2. 両眼立体視と空間周波数

Julesz & Miller (1975) は、両眼立体視のステレオグラムで2オクターブ離れた場合には、それらが重ね合わされても立体視が生じることを明らかにしているが、Yang & Blake (31) は、この点について、シグナル刺激にノイズとして加味する空間周波数およびそのノイズ強度 (シグナル刺激強度/ノイズ刺激強度、S/N比) を種々変えて吟味した。実験は、0.4オクターブで帯域炉波したランダム・ドット・ステレオグラム (上方あるいは下方に小矩形が浮かび出る) の片側にある空間周波数のノイズ刺激を加え、そのノイズ強度を変えながら、どの時点で両眼立体視が成立しなくなるかを測定した。結果は、図3に典型的に示されている。すなわち、図3—(a)のステレオグラムは、8.5 c/degの空間周波数から作成されていて両眼立体視すると上方に小矩形が浮かぶ。図3—(b)では、ステレオグラムの左側に8.5 c/degでS/N比が10dBのノイズがかけられているが、立体視が成立する。図3—(c)では、ステレオグラムの左側に同様なノイズがかけられているが、そのS/N比は12dB以上に強められているため立体視は不成立となる。図3—(d)では、S/N比は図3—(c)と等価であるが、しかし2.4オクターブ離れた1.7 c/degのノイズが用いられているため、立体視は成立する。図3—(e)では、図3—(d)と同等な空間周波数がノイズとして用いられているが、S/N比が強められているため (-6dB)、立体視は不成立である。このように、ステレオグラムの片方にノイズをかけることによって、両眼立体視をマスキングするのに必要な空間周波数をノイズ強度を変えながらしらべた。例えば、空間周波数3.7 c/degと1.7 c/degのシグナル刺激のステレオグラムがマスクされる最適な空間周波数とそのためのノイズ強度を比較すると、3.7 c/deg条件の方がマスクを起こす空間周波数の全範囲でより強いノイズ強度を必要とするので、両眼立体視過程では、3.7 c/degの方が1.7 c/degの空間周波数より強い感度をもつといえる。その結果、3 c/degと5 c/degをそれぞれピークとする2つのチャンネル群が検出された。これら2組のチャンネル群は、小さい視差から大きい視差にわたって、また交叉、非交叉視差の両方で有効であった。この結果は、粗い空間周波数は比較的大きい視差を検出し、細かい空間周波数は比較的小さい視差を処理すると考えるMarr & Poggio (1979) の説に一致しないものとなっている。

両眼立体視過程では2オクターブ以上離れた2つの空間周波数帯から構成されたステレオグラムは、別々の独立したチャンネルで処理されているとする説に対して、Wilson, Blake & Halpern (30) は、粗い空間周波数チャンネルと細かい空間周波数チャンネル間の相互作用が可能であることを実証した。実験は、図4に示されたように、1.0の空間周波数帯幅をもつテストステレオグラム (図4—A) とこれにマスク刺激としての余弦波空間周波数を重ねたステレオグラム (図4—B、C) とを作成し、テストステレオグラムの両眼融合閾がどの程度妨害されるか、がしらべられた。図4—Bにみられるように、マスク刺激の余弦波空間周波数がテスト刺激より2オクターブ低い場合には、両眼融合閾は著しく小さくなるが、しかし、図4—Cのように、それが4オクターブ低い場合には、両眼融合閾は影響されず、テスト刺激とマスク刺激とが別々の奥行位置に定位されて視えることが示された。この種の効果は刺激方向に特異的で、テストとマスク刺激の方向を違えると(45度)、両眼融合閾は減少しないこと、また、マスク刺激をテスト刺激より2オクターブ高めた場合にも、この効果は生起しないこと、さらに、テストとマスク刺激が前額に平行に提示せず、垂直軸に関して奥行方向に傾けた条件でも同様な効果が示された。これらの結果は、いずれも、2オクターブ以上離れた空間周波数チャンネル間には、各々が完全に独立しているのではなく相互作用があることを示唆する。

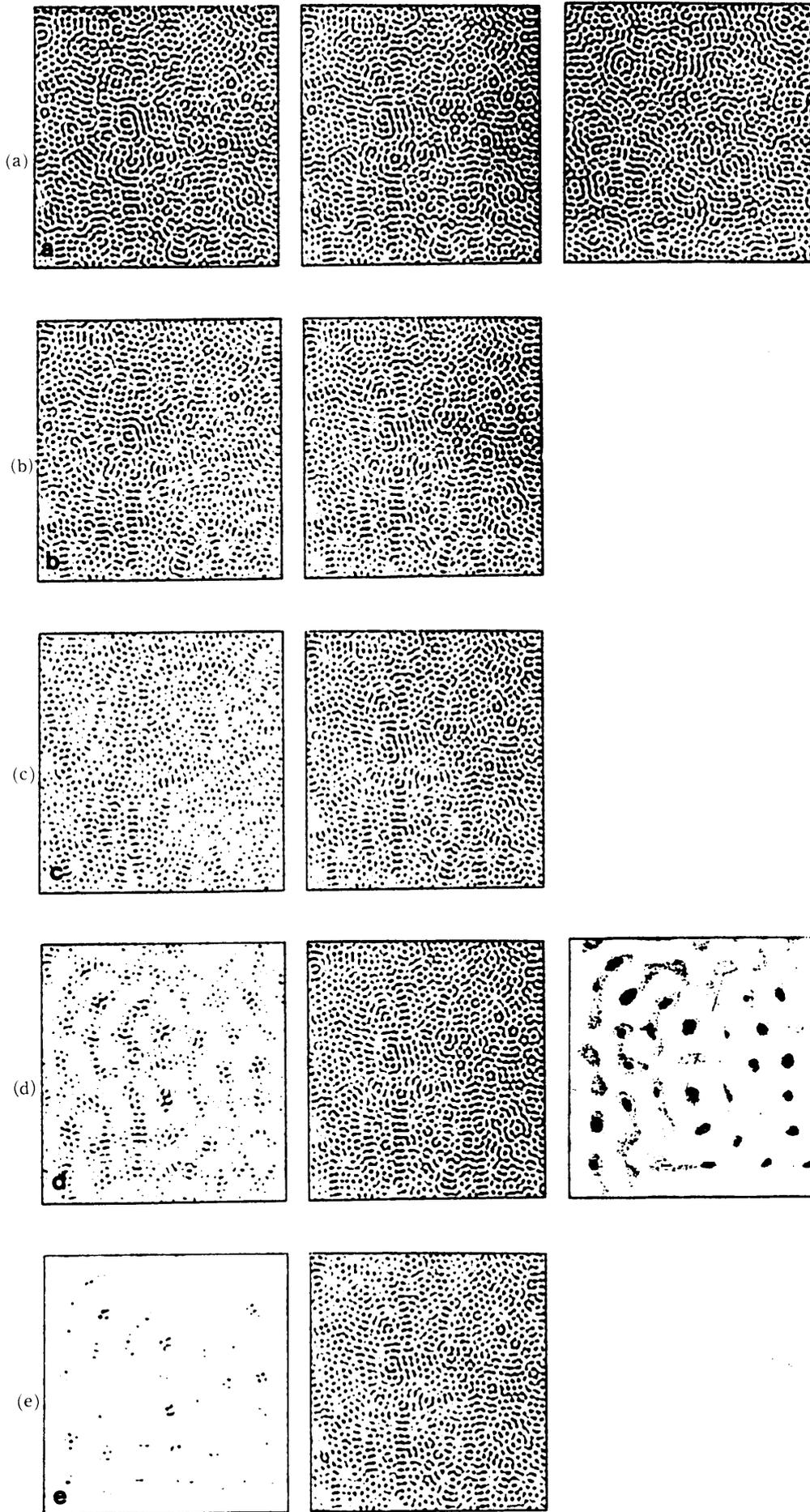


図3 ステレオグラムの片方にノイズ刺激を加えてある帯域炉波したランダム・ドット・ステレオグラム (Yang, Y. & Blake R. 1991)

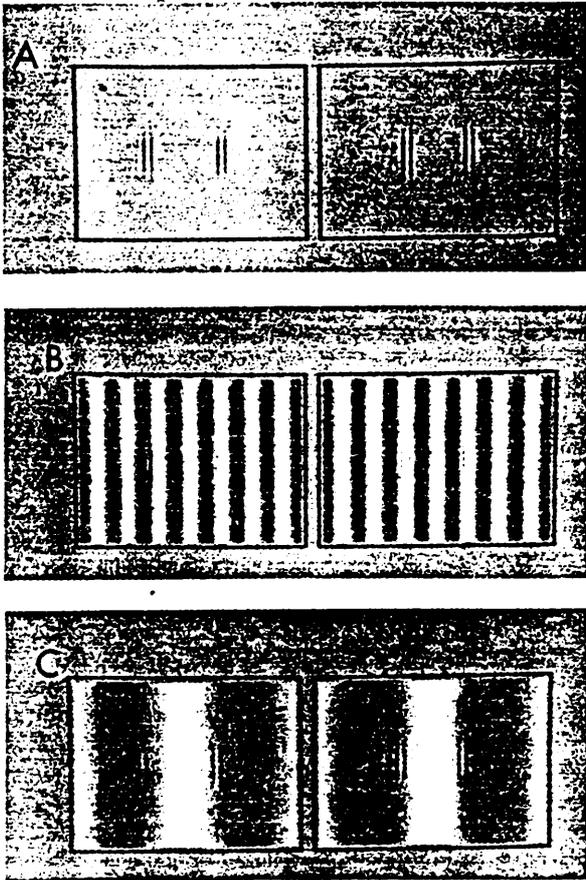
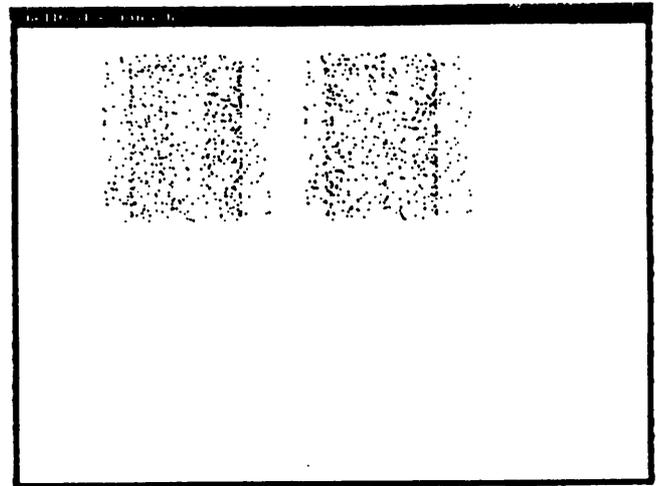
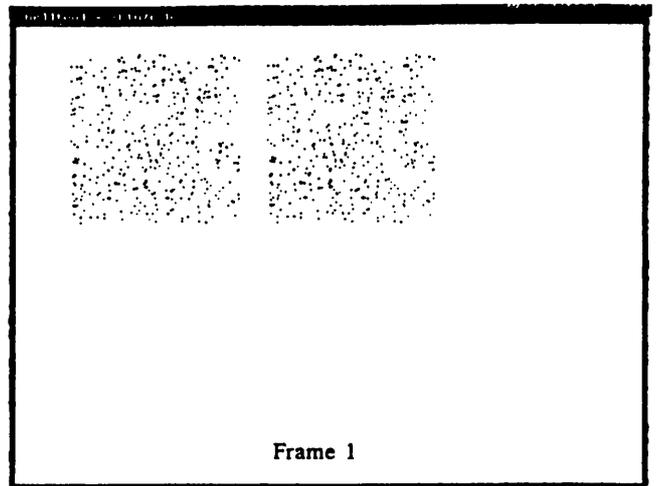


図4 細かい空間周波数チャンネルと粗い空間周波数チャンネル間の相互作用をしらべるためのステレオグラム。(A)テストステレオグラム。(B)テストステレオグラムに2オクターブ低い余弦波空間周波数パターンを重ねたステレオグラム。(C)同様に、4オクターブ低い余弦波空間周波数パターンを重ねたステレオグラム。

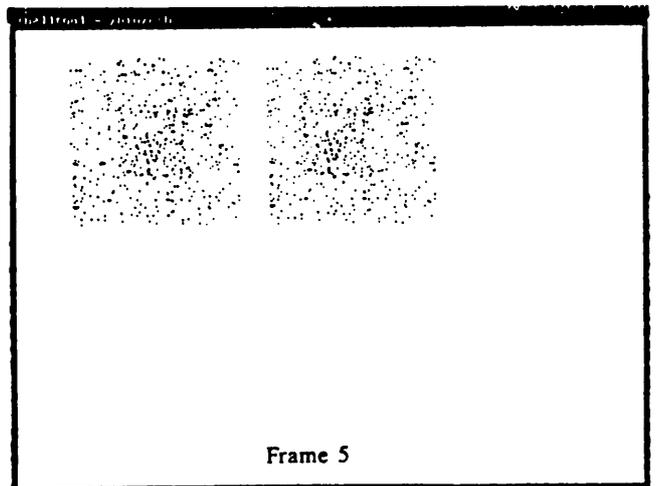
(Wilson, H.R., Blake, R. & Halpern, D.L. 1991)



(a)



Frame 1



Frame 5

(b)

図5 (a)両眼視差と運動要因とが競合するステレオグラム。

(b)両眼視差と大きさ要因とが競合するステレオグラム。

(Pong, T., Kenner, M.A. & Otis, J. 1990)

Julesz & Miller(1975)は、低空間周波数から作成したステレオグラムの片方だけに、2オクターブ以上のマスク刺激を重ねて提示すると、立体視と視野闘争が交互に出現し、共存することはない、と報告した。これに対して、Blake, Yang & Wilson (3)は、空間周波数のフィルターをかけたランダム・ドットから作成されたステレオグラム(シグナル刺激)の片側だけにマスク刺激を重ねて提示し観察したところ、マスク刺激の強度(シグナル/ノイズ比、S/N比)が小さいときには、ノイズ刺激を重ねられた安定した立体視が揺らぐことなく知覚されること、しかし、S/N比を中程度に高めると、立体視と視野闘争が交互に生じるが、この場合にも立体視がある部分に生じると視野闘争はその隣接部分で生じるというように、同一の刺激部分で立体視と視野闘争が生じるということは観察されないこと、さらにS/N比を強めると、マスク刺激が優位となり、立体視は生じなくなることを見出した。これらの観察結果は、両眼立体視において立体視と視野闘争が処理する空間周波数チャンネルが独立にかつ平行であるために、同一の刺激部分で生起することができるとする説に相対立するものとなっている。

2.3. 前注意過程における網膜視差と運動情報の処理

視覚情報は低次と高次の2過程を経て処理されると考えられている。低次過程は、形が即座に(200 msec以内)識別可能な段階で、情報が並列的に処理され、前注意過程と呼ばれる。高次過程は時間をかけての精査が必要で情報が直列的に処理され、集中的注意過程と呼ばれる。Pong, Kenner & Otis(24)は、これまでの前注意過程での研究を整理し、(1)複数の手がかりが抗争的にあるとき、どのような視覚情報処理がなされるか、(2)特定の手がかりが示す情報が不完全であるとき、この不十分な情報の知覚的解決に他の手がかりを用いることができるか、(3)複数の手がかりは、はたして並列的に処理されているのか、あるいは決められた処理順序があるのか、などの問題点を挙げ、これらについて網膜視差手がかりと運動要因とが競合的あるいは抗争的な事態を設定して、実験的検証を試みた。前注意過程をしらべるために、刺激は時間・空間次元で局所的に提示して行われた(ストロボ提示)。まず、図5—(a)に示されたように、透視できる回転円筒形をステレオグラムで提示した事態(このとき、円筒形の前表面と後表面上のドットの光学的流動方向は左右で反対方向となる)を設定し、左右の網膜視差に運動要因を競合させると、運動要因が絡まない静止した条件では、立体視が生じないのに、運動要因が付加されると回転する円筒形が出現して視えた。また、図5—(b)に示されたように、矩形をステレオグラムで提示し、網膜視差を増大し、同時に矩形の大きさを小さくさせて視差と大きさ変化要因とを抗争的にさせた事態では、矩形が小さくなりながら観察者に接近するように見え、また、網膜視差を増減するが矩形の大きさは変わらない事態では、視かけ上、矩形は大きさが変わりながら接近あるいは後退して見えること、さらに、矩形を構成しているドットの配列がフレーム間で対応しない条件で、矩形の大きさを一定にしたままで視差を変化させた事態でも、視かけ上、矩形は大きさを変えながら運動して見えることが確かめられた。これらの観察事実から、(1)視差情報は光学的運動情報が付加されることによって明瞭となること、(2)運動情報は視差情報より前に処理されていること、(3)視差情報と大きさ変化要因とが抗争的な事態では、視差情報が優先されること、(4)視差情報が不完全な場合には、運動情報を補完し、全体として意味のあるものにまとめる働きがあること、(5)前注意過程では、網膜視差処理系・光学的運動情報系・大きさ変化情報処理系が協調的に作動している、などが明らかにされている。

2.4. ダ・ヴィンチ ステレオプシス

ひとつの対象を両眼視すると、網膜上には、左右で対応しない領域ができる。両眼の間にある対象を観察する場合には、対応しない領域は各眼の網膜投影領域のこめかみ側に、視野の両側に遮蔽

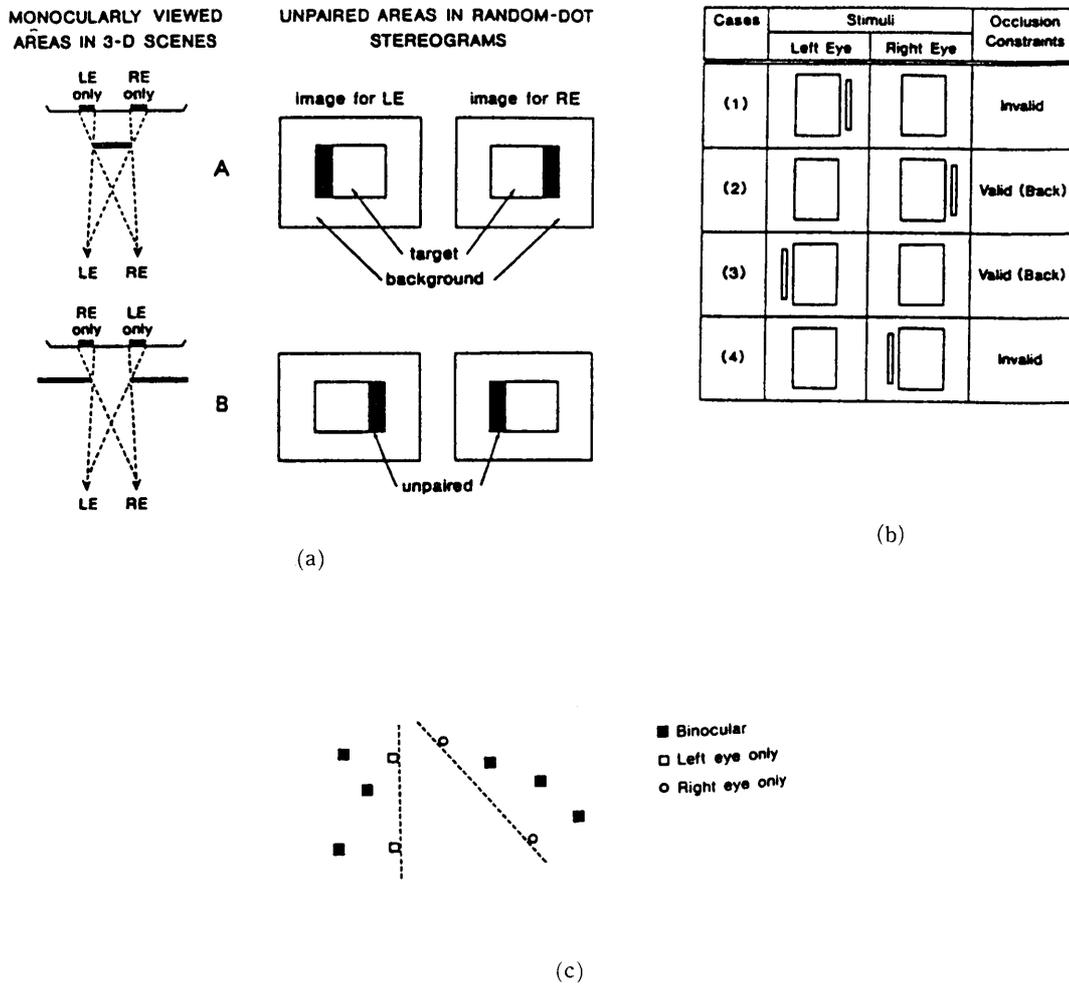


図6 (a)ダ・ヴィンチ ステレオプシスの原理
 (b)ダ・ヴィンチ ステレオプシスを検証するための刺激条件
 (c)左右の刺激間で対応しない部分をもつステレオグラムの原理
 (Nakayama, K. & Shimojo, S. 1990)

物があり、その間を通して背景を観察する場合には、対応しない領域は網膜投影領域の鼻側に、それぞれ出現する (図6—(a))。両眼の間に遮蔽対象がある場合と視野の両側に遮蔽物がある場合の、左右で対応しない領域の正しい出現のしかたは、図6—(a)のステレオグラムに表されている。Nakayama & Shimojo (21) は、人間の両眼立体視システムがこの種の左右で対応しない情報を立体視再現過程で利用しているか否かについて、図6—(b)のようなステレオグラムで検証した。左右で対応しない領域をもつこのステレオグラムを実体鏡視すると、その対応しない領域が正しく設定されている場合には、対応しない領域が融合矩形領域の背後に位置して見えること、その奥行量は対応しない領域と矩形の左あるいは右端との間隔距離に直線的に比例すること (間隔距離が25—45min arcの範囲内) が報告された。そこで、図6—(c)に示されるように、左右で対応しない領域を人工的に設定したステレオグラムを実体鏡視したところ、対応しない領域が背景面に沈み込むように出現することが観察された。このように、垂直方向に存在する遮蔽対象によって背景の一部が遮蔽され、その結果として両眼間で生じた対応しない部分による立体視は、他と区別してダ・ヴィンチ ステレオプシスと名づけられているが、これまでのところ、遮蔽両眼立体視システムは、この種の左右で対応しない領域からの情報を立体・輪郭・表面の再現に利用していること、また、対応しない領域は遮蔽対象と眼球との位置関係で規定されるという特性をもつので、視覚情報処理過程の初期に処理されている可能性が高いこと、さらに対応しない領域を立体再現に利用するこの

種の過程は、対応しない領域と遮蔽対象輪郭との連合にもとづく視覚経験によって形成されること、などが明らかに考察されている。

2.5. ダブル・ネイル錯視

ダブル・ネイル錯視とは、読書距離のところに垂直に細長い釘のようなものを互いに奥行方向に数センチメートル離して提示し両眼観察すると、視かけ上、それが前額に平行に定位されて見える現象をいう。Krol & de Grind (1980) は、この事態では、対象は両眼融合領域で2つの顕在的対応点と2つの潜在的対応点をもつので、錯視はこの2つの潜在的対応点に基づいて生じると考えた。今回、Mallot & Bideau (17) は、ステレオグラムでダブル・ネイル錯視を生じさせ、図7-(a)に示したように、その注視点を4つの出現可能位置のいずれかに置くように教示してみたところ、注視点の位置と対象の視かけの定位位置とは密接な関係にあることを突き止めた。この結果は、図7-(b)のような左右の注視点とそれに対応した視覚融合領域との図式にもとづいて考察されている。

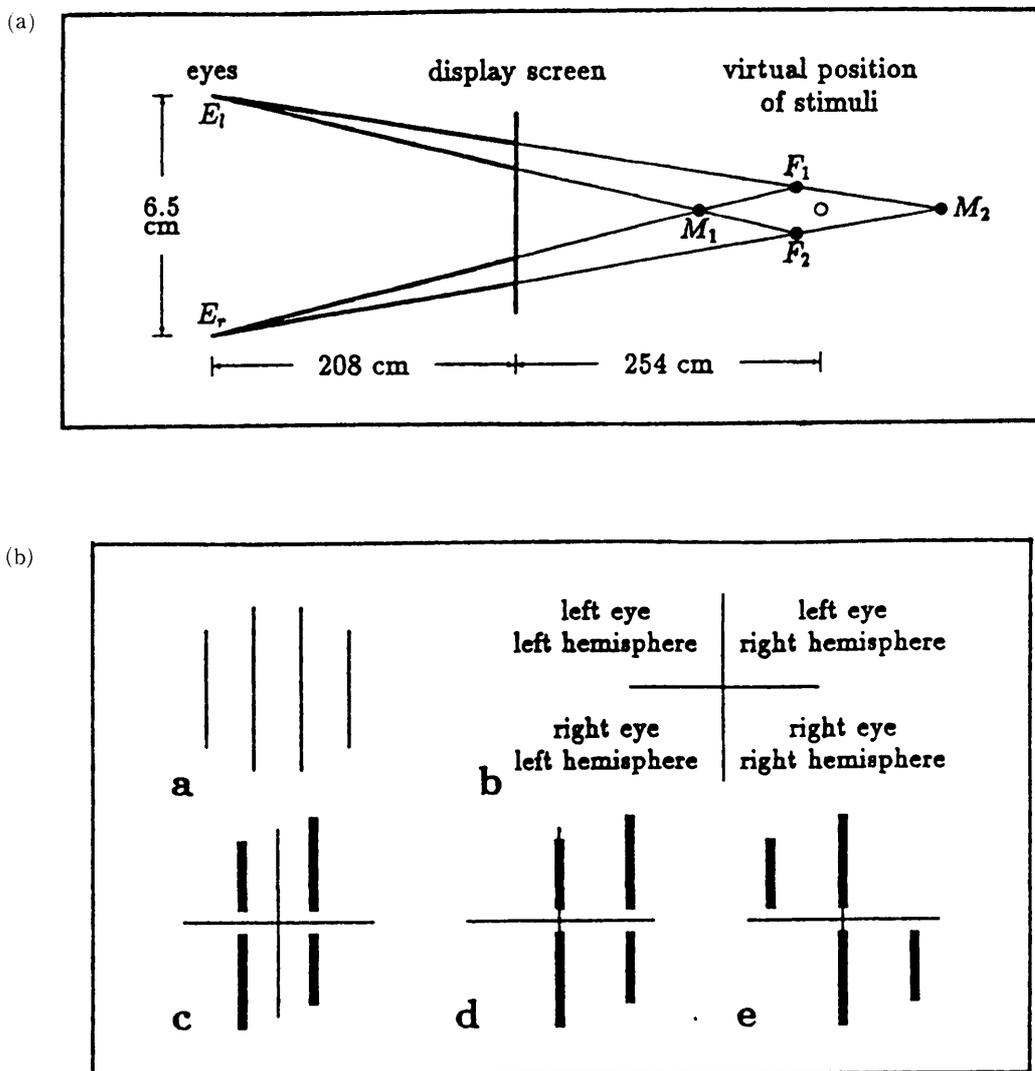


図7 (a)ダブル・ネイル錯視、 M_1 、 M_2 の視対象が F_1 、 F_2 に定位して見える。 M_1 、 F_1 、○印は注視点を示す。
(b)図中、aはステレオグラムを、bは左右眼の中枢での投影領域を示す。注視点を○印においた時にはcに示されたような刺激の中枢での投影が生じ2刺激は前額平行に、 F_1 を注視するとdのような中枢での投影が生じ、同様に前額平行に、 M_1 を注視すると、線分刺激の長い方は融合するが、短い方は融合されないで、各々知覚されると予想される。

(Mallot, H.A. & Bideau, H. 1990)

2. 両眼立体視での相対的奥行距離との関係

両眼立体視での相対的距離量は、絶対的奥行距離を変えることによってその視差量が等しくても、異なることが奥行の恒常性として知られている。これは、網膜視差量が絶対的奥行距離にもとづいて査定されるからなのか、それとも、対象の何らかの形態特性が両眼網膜像の相違から抽出されるからなのか。Johnston (13) は、凝視図形を53.5、107、214cmの距離に提示し、これとランダム・ドット・ステレオグラムで提示した融合図形の距離とを一致させる方法によって、両眼立体視での絶対的奥行距離を操作し、相対的奥行距離に与える影響をしらべた。両眼立体視図形は円筒形とし、その直径を種々変えながら3段階に設定された絶対的奥行距離での円筒形の視かけの膨らみの程度を測定した。その結果、円筒形は絶対的奥行距離が53.5cm条件では膨らみすぎ、214cm条件では平べったくなり、結局、107cm条件の時にもっとも最適な円筒形に視えることが示された。このことから、網膜視差からの相対的奥行量は絶対的奥行距離の査定を通して再現されることが強く示唆されている。

2.6. 両眼立体視条件下での視対象の奥行次元での知覚的牽引と反発

一般に、2つの視対象は奥行次元であれ前額方向次元であれ、接近して提示されると、それらの対象の位置が牽引あるいは反発したようにシフトされて知覚される (Ganz 1964, Westheimer & Levi 1987)。Stevenson, Cormack & Schor (27) は、両眼立体視条件下の奥行次元でのこの種の知覚的牽引と反発が両眼融合される以前の単眼過程で対象の方向がシフトし、結果として網膜視差に変化が生じるのか否かについて実験的検討を試みた。実験は、図8のように、誘導面とテスト面とをランダム・ドット・ステレオグラムで重なるように接近して提示し、テスト面の視かけの位置がどのようにシフトされるかを測定した。その結果、誘導面とテスト面とが奥行次元で近接している場合 (3~4 min arc) には知覚的牽引が、それ以上離れると反発が生起することが確認された。これは、この種の知覚的牽引と反発が単眼視過程ではなく両眼視過程で起きていることを示している。

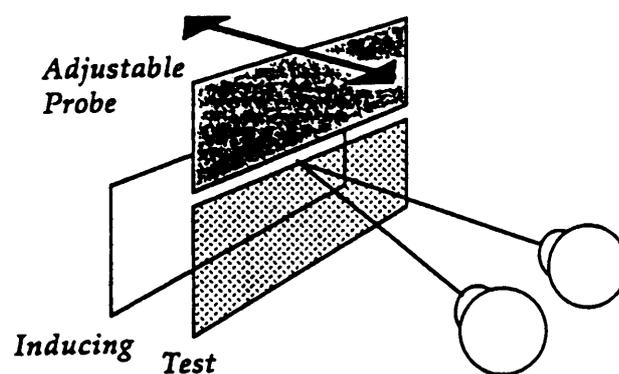


図8 両眼立体視条件下での奥行次元での知覚的牽引と反発をしらべるための刺激事態。ランダム・ドットで提示されたテスト面と誘導面間の奥行距離をプローブを調整させることによって測定する。

(Stevenson, S. B., Cormack, L.K. & Schor, C.M. 1991)

2.7. 両眼立体視における異方性

水平視差の垂直方向での勾配 (これは、両眼立体視した事態では、水平方向を軸として奥行方向に傾いて見えさせる) は、水平方向の勾配 (これは、垂直方向を軸として奥行方向に傾いて見えさせる) より強力に知覚されることが知られている。Cagenello & Rogers (1988) は、この種の異方

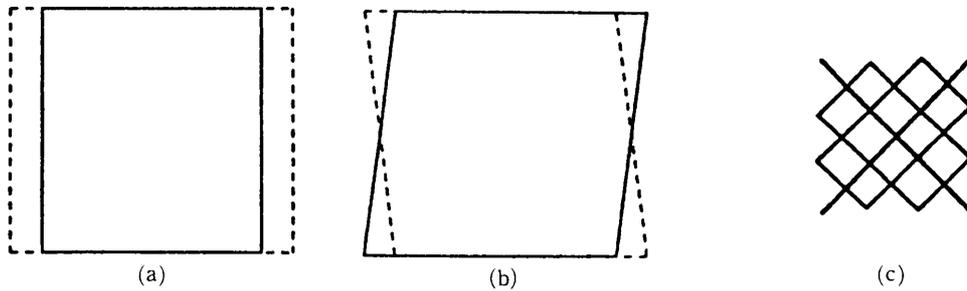


図9 (a)勾配は水平方向にあるので、方向視差は生起しない。
 (b)勾配が垂直方向にあるので、垂直線分間で方向視差が生じている。
 (c)水平、垂直方向の勾配が等しいパターン。
 (Mitchison, G.J. & McKee, S.P. 1990)

性を方向視差で説明しようと試みた。方向視差は水平方向の視差勾配で作られるものよりは垂直方向の視差勾配で作られるものの方が大きいからである。図9に示されたように、(a)では方向視差がつかれないが、(b)では方向視差がつかれている。Mitchison & McKee (20) は、図9—(c)に示されたように、垂直方向の視差勾配で作られた方向視差と水平方向の視差勾配で作られた方向視差とが等しいステレオグラムでも、水平方向を軸として奥行方向に傾いて見える傾向が強いことを示し、方向視差では説明できない異方性が存在することを明らかにしている。

2.8. 輝度変化によるステレオグラム

Kaufman, Bacon & Barroso (1973) は、網膜視差のないステレオグラムで左右の対象間に輝度差を設けると両眼立体視が可能であることを報告した。このステレオグラムの左右ペアの各々は、2つの図形が重ねられていて、左右ペア間には網膜視差はないが、左右のステレオグラム内の一方の図形のみ輝度差が設けられている。これを実体鏡視すると輝度差を設定した図形間で視かけの奥行が生じたという。下野と大野 (35) は、ランダム・ドットあるいは線図形で同様なステレオグラムを作成し、輝度差と奥行出現との関係を再吟味した。その結果、輝度差によって視かけの奥行が出現したが、輝度差に伴う視えの奥行量の関係あるいは輝度差と視えの奥行出現の方向との関係は、被験者間で一定しないことが示された。このような反応の多義性は、両眼立体視のしくみを考えるとき説明困難な現象であるので、網膜視差と同様な意味で輝度差が立体視をもたらしたとは考えにくい。

網膜視差をもつが、しかし左右のペアのコントラストが逆転しているステレオグラムでも、両眼立体視は成立することが知られている。滋野井 (34) は、各ペアが垂直2線分からなるこの種の逆転コントラストステレオグラムを短時間提示し、その立体視成立までの過程をノーマルなコントラストをもつステレオグラムと比較した。それによれば、ノーマルなコントラスト条件では100msec提示で立体視がほぼ成立するのに対して、逆転コントラストステレオグラム条件では立体視は不成立であった。逆転コントラストステレオグラムの場合には、立体視成立に輻輳がより強く関係していると思われる。

2.9. 両眼立体視と視覚領での受容野

両眼立体視を担う神経生理学的しくみを明らかにするためには、まず、両眼からの刺激がニューロンでどのように処理されるかを知らねばならない。Freeman & Ohzawa (8) は、両眼に刺激入力したときの視覚領の単純細胞と複雑細胞の電氣的活動をネコを対象にして測定した。刺激は、サ

イン波形格子パターンとした。また、網膜視差は、片眼のフェーズを固定し他眼のフェーズを0から360度まで45度間隔で変えることによって導入した。測定の結果は、大部分の単純細胞(測定した77個中73個)の活動電位は、左右眼の相対的フェーズが0と360度の時に最大となり180度で最低の活動を示したのに対し、複雑細胞は、測定した98個の細胞中37個は、単純細胞のように相対的フェーズに特異的な反応を示さなかったが、しかし残りの細胞は相対的フェーズが180度で最大となるような山型の曲線で表される活動を示した。この種の複雑細胞には、単純細胞の受容野特性をもつサブユニットがあることが示唆される。いずれにしても、これら単純・複雑細胞は、両眼視過程においては、各眼からの刺激を等価に処理するという意味で線形な特性を示すが、しかし、単眼優位性が強いけれども、両眼から刺激入力された場合にも、単眼視条件と同様な反応をする細胞の存在も考えられる。両眼間の刺激強度(コントラスト比)を大きく違えた条件(5%または6.3%対50%のコントラスト比)で単純細胞の活動電位を測定したところ、両眼に等価な刺激入力を行った条件と同様にフェーズに特異性をもつ反応特性が示された。これは、両眼間の刺激強度が大きく相違しても、両眼間の相互作用を維持する非線形のしくみがあることを示している。

左右眼からの情報を受ける視覚領の受容野は、これまで、その形が左右で同一であり、しかも同一の型(プロフィール)の明るさ応答曲線(luminance sensitivity profile)をもち、したがって、水平視差は、網膜非対応に対応した左右受容野の応答曲線の位相で表現される、と考えられてきた。図10-(a)は、この関係を示しているが、グラフのX軸は網膜の位置をY軸は感度を、そして実線は視覚領の単純細胞の受容野曲線であるガボール関数を表す。ここでは、水平視差はガウスエンヴェロープ(図中、破線で示されている)の中心軸の左右でのズレで示される。一方、左右受容野の感度曲線のプロフィールが同一であるとする上記の仮説に対して、左右受容野の感度曲線の型は、フェーズが相違しているとも考えることも可能である。この場合、図10-(b)に示されたように、水平視差は中心軸の左右のズレではなく、左右の感度曲線のフェーズの相違で示される。

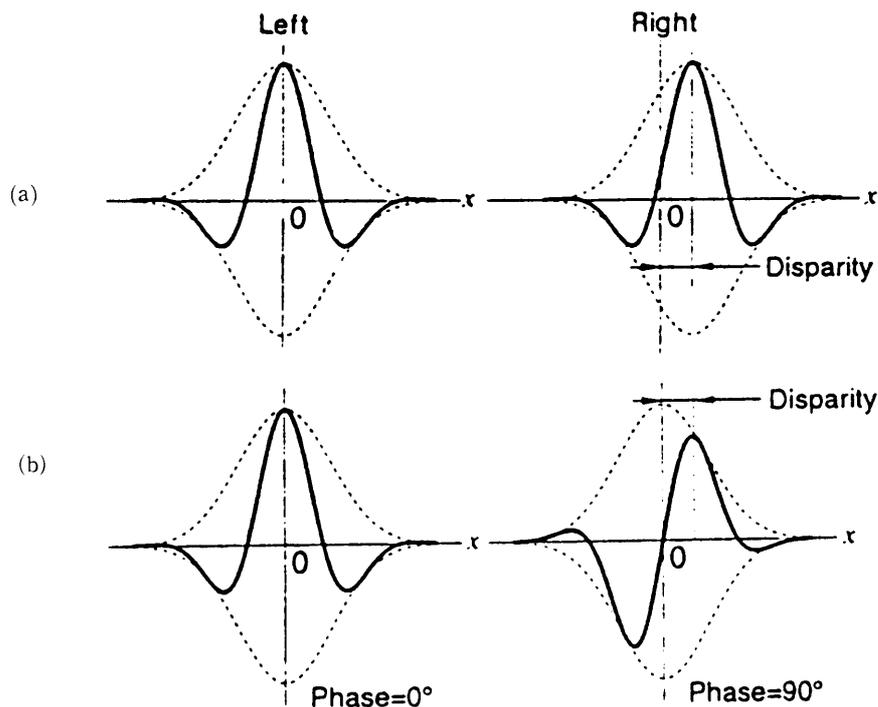


図10 両眼立体視に応答する単純細胞の網膜視差検出のための2種類の方法。図中、X軸は網膜位置を、Y軸は感度を示す。(a)では、水平網膜視差が左右受容野の中心軸のズレで表現されているが、(b)では左右の感度曲線のフェーズのズレで表現されている。

(DeAngelis, G.C., Ohzawa, I. & Freeman, R.D. 1991)

Freeman & Ohzawa (7) は、ネコの視覚領の単純細胞の受容野を逆相関技法でしらべた。逆相関技法とは、図11に示されたように、活動電位が生じたら、それがどの刺激に触発されて生じたのかを時間を遡って対応させる方法である。一般的に、刺激が与えられてから活動電位が生じるまでに平均50msecの遅延がある。このとき、刺激は、ある範囲内の位置にランダムに on (bright) または off (dark) で次々と提示され、その刺激位置・属性と活動電位の有無が対応づけられる。このようにして得られた左眼と右眼からの反応から、左右の受容野マップが作られる。逆相関技法を用いたのは、従来の方法が小矩形刺激を移動させて受容野をきめていたが、この方法では、隣接した領域を連続して刺激するので受容野マップが不正確になるのを避けられない。測定の結果、左眼と右眼からの刺激入力に対応する受容野マップを作成してみると、それらが左右で一致しているものと、相違しているもののが存在することが見いだされた。左右で相違する受容野マップが存在するということは、フェーズの相違を検出するしくみがあることを示唆する。

同様に、Gregory, et al. (10) も、ネコ (17個体) の有線皮質 (striate cortex) にある単純細胞をしらべることによって上記の2つの仮説のいずれが妥当であるか検討した。単純細胞のそれぞれの最適方向角度と最適空間周波数がしらべられた上で、空間周波数パターンのフェーズを左右眼で変えたときの左右の受容野の応答プロフィールがしらべられた。その結果、水平方向近辺に応答特性がある単純細胞では、応答フェーズはほぼ0度を示し、左右受容野の応答プロフィールが等しいことを示したが、垂直方向に応答特性のある単純細胞では、応答フェーズは0から180度までの間に分散していることを示し、したがって左右受容野の応答プロフィールは多様であることが示された。網膜視差の視覚生理学的処理は、左右受容野の応答プロフィールのフェーズのズレで行われていると考えられる。

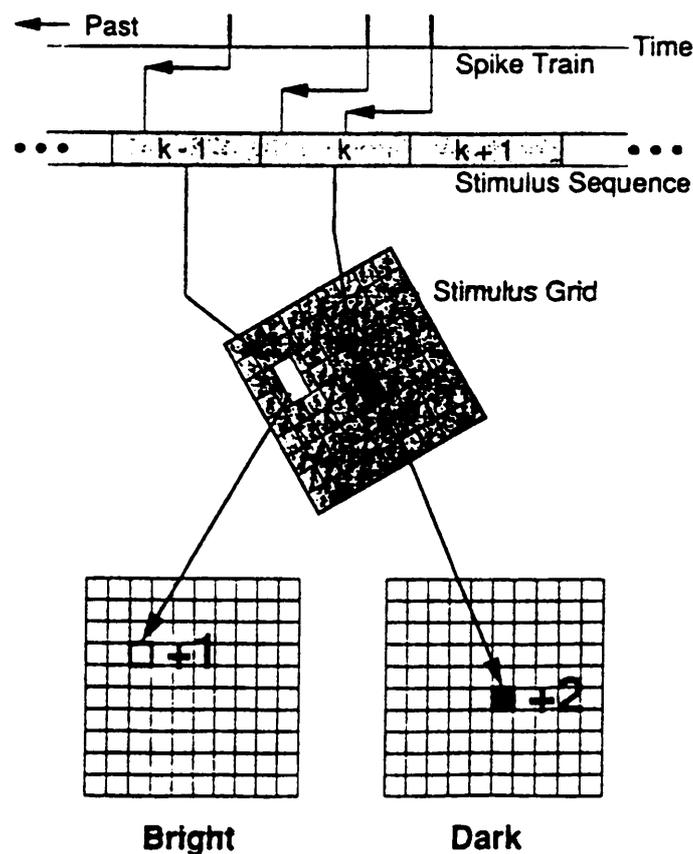


図11 逆相関技法 (reverse correlation technique)。活動電位が生じたら、それがどの刺激に触発されて生じたのかを時間を遡って対応させる。

(Freeman, R.D. & Ohzawa. I. 1990)

視覚領の複雑細胞は刺激の on、off に関わりなく、その位置に応答する単眼受容野をもつことが知られているが、網膜視差を検出するには、この単眼受容野特性だけでは不十分である。網膜視差を検出するための複雑細胞に必要な要件は、(1)網膜視差の検出度は複雑細胞の受容野の大きさから予測されるものより精度が高くなければならない、(2)選択特性をもつ網膜視差は刺激位置に関わりなく検出されねばならない、(3)網膜視差が適正に検出されても、明るさコントラストが左右で相違する場合には、視差検出を無効にしなければならない、の3条件である。Ohzawa, DeAngelis & Freeman (23) は、この3要件を満たす網膜視差検出器の特性を図12—(a)のように表した。図中、x軸とy軸は、各々、左と右の受容野の位置を示す。そして、ネコの視覚領の単純細胞と複雑細胞を対象として、それらの細胞がこの要件を備えているか否かについて左右眼に別々に刺激を提示して検証実験を行った。1個の単純細胞、2個の複雑細胞から得られた活動電位の結果が、図12—(a)に示されている。図中、小矩形点の濃度が濃いほど活動電位の発射頻度が多いことを示す。単純細胞と複雑細胞についてのこれらの結果は、さきに予測した3つの要件をこれらの細胞が備えていることを示し、ある組合せの複雑細胞が網膜視差検出に特に適していることを示す。さらに、この複雑細胞は、図12—(b)に示されたように、4種類の単純細胞からの入力を受けて作動するとのモデルが提示されている。

Tyler (29) は視覚についての最近の生理学的・解剖学的研究をまとめ、外側膝状体から視覚領にいたる視覚経路には、parvo>blob 経路、parvo>interblob 経路、magno>interblob 経路が存在するとしている。parvo>blob 経路では、主に色と低空間周波数情報が、parvo>interblob 経路では、高空間周波数と静止情報が、magno>interblob では、運動情報と一過性の輝度情報が、それぞれ処理されている。両眼立体視過程も、この3種類の視覚情報処理経路と対応していて、粗い両眼立体視過程 (coarse stereopsis) は、magno>interblob 過程で、密な両眼立体視過程 (fine stereopsis) は parvo>interblob 過程で、原型的両眼立体視 (protostereopsis) 過程は parvo>blob 過程で処理されていると考えられる。密な両眼立体視とは、網膜視差が20分以内でのみ成立する立体視で、全体的立体視過程 (global stereopsis) をいう。粗い両眼立体視は、網膜視差が20分を越えても立体が成立するもので、局所的立体視 (local stereopsis) をさす。原型的両眼立体視とは、網膜視差の代わりに、空間周波数差を左右に導入したもので (difference + frequency で diffrequency と呼ばれる)、奥行方向への傾きが知覚される。これら3種類の両眼立体視過程は、各々が独立したチャンネルで処理されていることがこれまでの精神物理学的研究と神経生理学的研究で裏づけられつつある。

2.10. 色相収差による網膜視差

色相収差による網膜視差とは、赤と青の光線が眼球に入力される時生起する収差にもとづく視差をいう。図13—(Aのa) に示されたように、人工瞳孔を通して同位置にある赤色 (486nm) と青色 (656nm) の対象を観察するとき、人工瞳孔が対象と中心窩の延長線上にあるときには色相収差は生じないが (Aのb)、それがこめかみ側あるいは鼻側にズレて配置されたときには色相収差が生じる (Aのa、Aのc)。図13—Bに示されたように、一对の人工瞳孔を装置した同位置にある赤色と青色の対象を観察すると、色相による網膜視差が生じ、人工瞳孔がこめかみ側に配置された条件では赤色対象が青色対象より手前に、人工瞳孔が鼻側に配置された条件では、視かけの位置が逆転して見える。人工瞳孔を用いなくても、同様なくみで色相による網膜視差が起きると推定される (図13—(C))。肉眼観察条件でのこれまでの研究によると、色相収差による網膜視差にもとづく立体の出現方向 (赤色対象が手前に位置して見えるかあるいは青色対象が手前に位置してみえるか) は、照明レベルを一定にした場合には被験者間で、照明レベルを変えた場合には個人内で変動することが明らかにされていた。Simonet & Campbell (25) は、今回、単眼での色相収差の見え方と立体

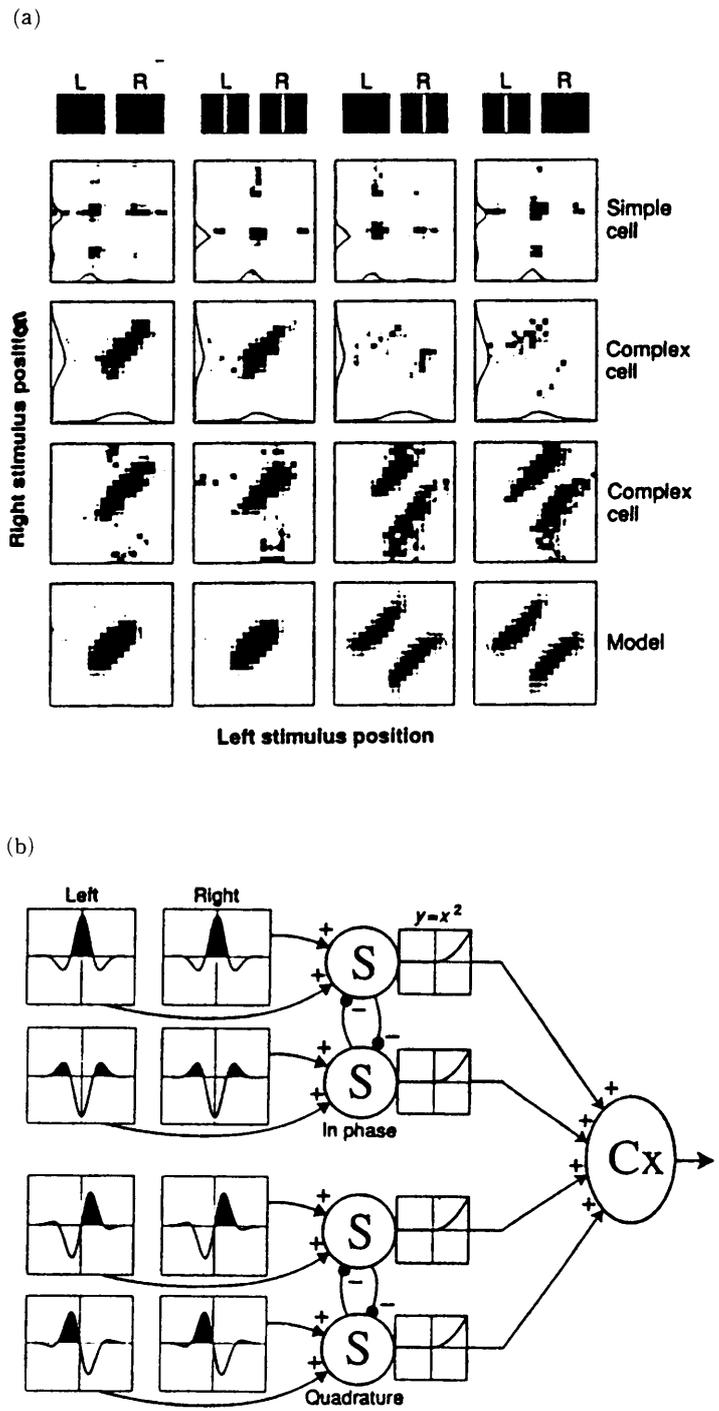


図12 (a) 1つの単純細胞と2つの複雑細胞の応答分布および
 (b)のような複雑細胞モデルを想定した時の応答範囲。
 各コラム上には、使用された刺激パターンが示されて
 いる。
 (b) 4種の単純細胞からの入力を受ける複雑細胞モデ
 ル。
 (Ohzawa, I., De Angelis, G.C. & Freeman, R.D. 1990)

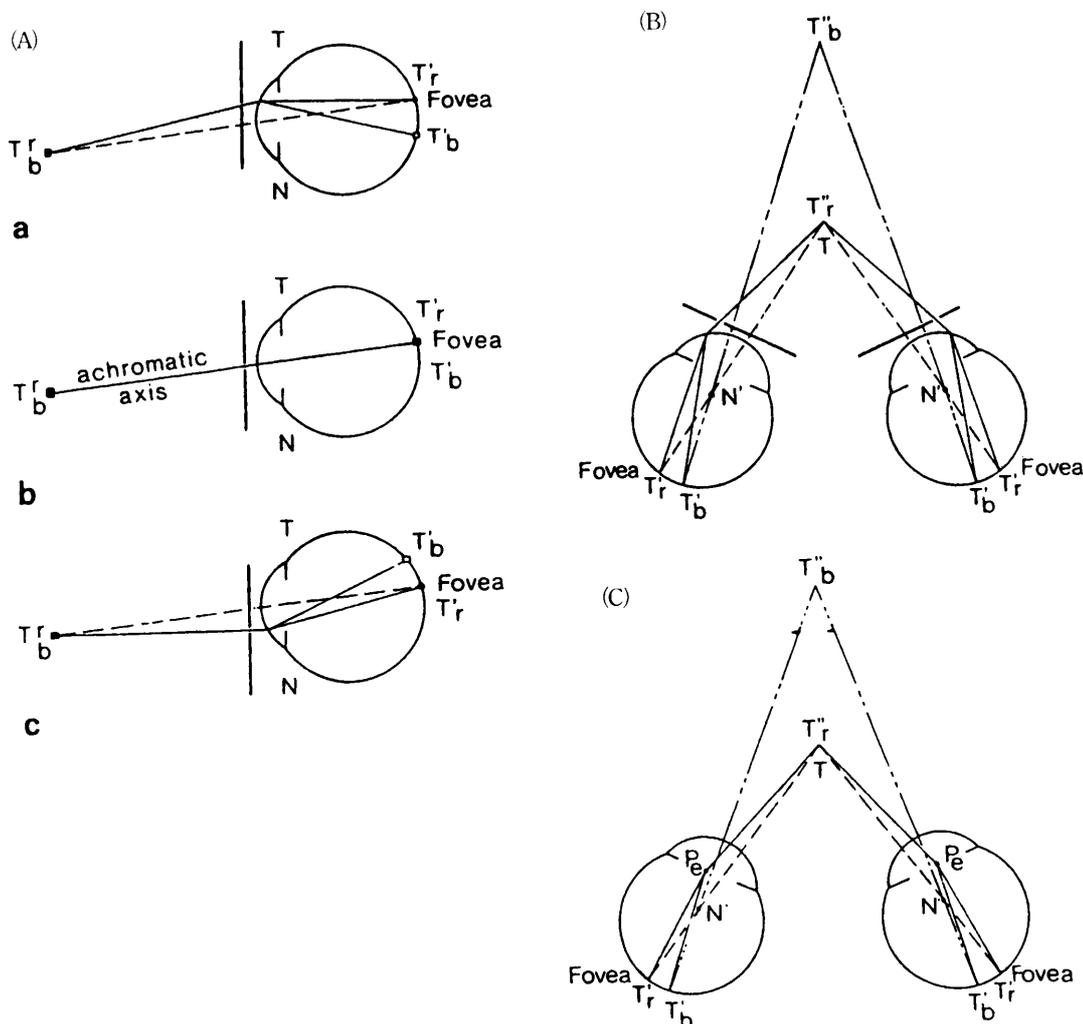


図13 (A)人工瞳孔を用いた条件での色相視差の原理、(B)人工瞳孔を用いた条件での色相視差による両眼立体視
(C)人工瞳孔を用いない条件での色相視差による両眼立体視
(Simonet, P. & Campbell, M.C.W. 1990)

出現の方向との関係を、照明レベルを2段階(10, 1000 lx)に変えて検討した。色相収差が網膜上にあるような変位を生じているかは、単眼条件で対象のみかけの出現位置を報告させることによって、また色相収差による網膜視差にもとづく立体出現方向は、対象の視かけの奥行的位置を報告させることによって、それぞれ独立にしらべられた。その結果、色相収差の網膜視差にもとづく立体出現方向は、照明レベルのいかに関わらず、被験者の半数は赤色対象が手前に見え、半数は後方に見えると報告した。照明を増大させた場合、約半数の被験者は視かけの奥行位置が逆転した。また、単眼での色相収差が生起していないのに色相収差の網膜視差にもとづく両眼立体視が出現するケースも報告され、単眼での閾下の視差検出による両眼立体視の可能性も示唆されている。

3. 眼筋的要因による3次元視

3.1. 暗視輻輳 (dark convergence) の測定

注視対象となるものを欠いた等質視野では、両眼はある奥行距離に輻輳されていることが知られていて、これは暗視輻輳と呼ばれる。これまでの研究によれば、暗視輻輳距離は個人内では安定しているが、個人間では30cmから無限大まで変動し、一定した値が得られていない。Jaschinski-Kruza (12)は、暗視輻輳に影響する要因についてしらべた。測定は、ノニウス視標を用いる技法および片眼に回転プリズムを装着し、プリズムを通した視標を肉眼のそれと一致させる技法の2通り

でなされた。その結果、観察距離 (50、100、500cm) および観察距離を知っていることの要因は、測定バイアスとなること、測定技法としてはプリズム技法が優れていること、また、人工瞳孔を使うと観察距離要因の影響を減らすことが可能なことなどが明らかにされた。

3.2. 輻輳要因の順応的再修整

眼球間距離を2倍にするミラー・デバイス (図14) を装着すると、網膜視差もそれに伴って増大する。このとき、網膜視差と眼筋的要因 (調節と輻輳作用) とは、抗争的な奥行手がかかり関係となる。Wallach et al. (1963) は、この事態で順応が進むと、相対的奥行距離が減少するように修正されることを示し、これを網膜視差要因が運動視差あるいは遠近的要因などの他の奥行手がかかりによって再修整されるため、と考えた。これに対して、近年、単眼によるあるいは人工瞳孔を通しての両眼によるミラー・デバイスを用いての順応では、視かけの奥行の修正が起きないこと (Fisher & Ebenholtz 1986, Ebenholtz & Fisher 1982) が示され、網膜視差の再調整の存在に疑問が出されている。Fisher & Ciuffreda (6) は、ミラー・デバイスを装着させ、自然環境に順応した前と後の視かけの絶対的奥行距離と相対的奥行距離、調節 (ディオプタ) と輻輳 (メートル角)、さらに調節—輻輳比 (調節・輻輳/調節、メートル角/ディオプタ) を各々測定した。その結果、視かけの奥行の順応に伴って有意に変化した眼筋的要因は、輻輳要因のみであった。2倍の眼球間距離に順応した後で生起する視かけの奥行の修正は、輻輳要因の再修整によることが示唆されている。

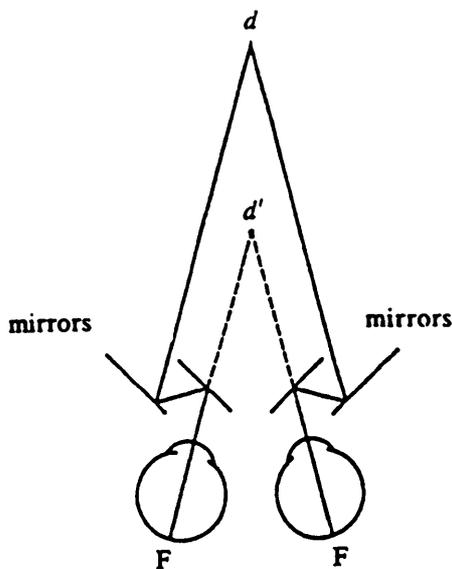


図14 眼球間距離を増大させることによって網膜視差を増大させるミラー装置 (Fisher, S.K. & Ciuffreda, K. 1990)

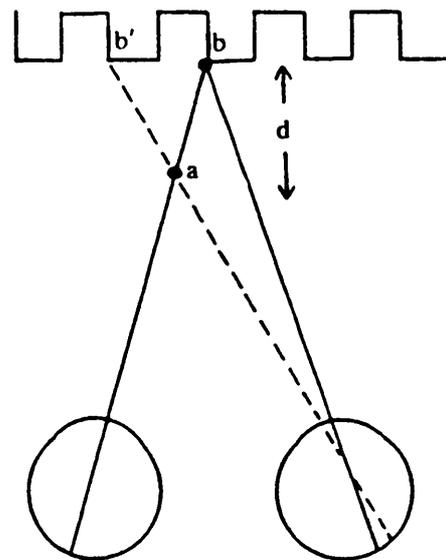


図15 壁紙効果を説明するもので、片眼が位置(b)を注視している時に他眼がその近傍(b')を注視してしまい、結果として輻輳角が変化することから生じている。 (Cohn, T.E. & Lasley, D.J. 1990)

3.3. 壁紙効果 (wall paper effect)

壁紙効果あるいは壁紙錯視とは、水平方向に周期的変化をする刺激パターンを両眼で凝視したときに、刺激面までの奥行距離が過小視される現象で、図15に示されたように、片眼がある位置(b)を注視しているときに他眼がその近傍の位置(b')を注視してしまい、結果として輻輳角が変化することから生じる。Cohn & Lasley (4) は、下りエスカレータに乗るとき、しばしば奥行距離を間違え、踏み誤る事故が起きるのは、エスカレータの踏み板面上の刺激パターンが、その構造上、水平

方向に周期的に変化するように作られているために壁紙錯視が生じ、結果として踏み誤ると考えた。そこで、エスカレータを前にして、単眼視、壁紙錯視が起きないように頭部を横方向に傾けた両眼視、両眼視の3観察条件で試したところ、両眼視条件で有意にエスカレータの踏み板面までの奥行距離の過小視が生起した。事実、エスカレータの踏み板面に非周期的パターンを描いたところ、この種の過小視は生起しないことが示されている。

4. 大きさ—距離関係

4.1. 月の錯視

月の錯視については、これまで次のことが明らかにされてきた。(1)月の視かけの大きさは地平から天空に昇るにつれて減少する。(2)月の視かけの大きさとその視かけの距離とは反比例する。(3)還元視した事態(筒を通して観察する)では、月の錯視は消失する。(4)視かけの距離が大きいほど、月の視かけの大きさも大きくなる。(5)地平にある月がビルディングなどの建物や雲などによって囲まれた事態では、月の錯視は促進される。(6)逆転視事態では、月の錯視は減じる。Baird, Wagner & Fuld (2)は、これらの事実にもとづいて、月の錯視を数式化するための3つの原理をたてた。(1)対象の視かけの大きさは、それらの視かけの視角で表される。(2)月の視かけの大きさは、空や地上にある対象物の視角に対する月の視角の比で規定される。(3)ある一定の大きさをもつ対象の視角は対象までの距離に反比例する。これらの原理にもとづいて、月の視かけの大きさ(θ')は、月の錯視を起こしている環境内に存在する多くの視対象の加重平均された視角(ξ_i)に対する月の視角(θ)のベキ関数で表される。

$$\theta' = k (\theta / \xi_i)^n$$

ここで、 $n = 1$ と仮定され、 K は定数をしめす。

5. 3次元視の絵画的要因

5.1. 乳児の絵画的要因に対する反応

先に、7月齢乳児は熟知的大きさ、相対的大きさ、陰影、蔽—被蔽、線遠近法、肌理勾配などの奥行手がかり要因に対して反応できることが、対象までの手伸ばし技法で確認されている(Yonas, Arterberry & Granrud, 1987)。今回、Arterberry, Bensen & Yonas (1)は、同様な問題を、視覚順応からの回復をみる技法でしらべた。順応刺激として台形の窓(Amesの窓)が2次元画像で提示され、また、テスト刺激としては、それに実物(3次元物体)が加えられた。対象乳児(5月齢と7月齢)は、順応刺激を単眼視あるいは両眼視のいずれかで観察し、テストではすべて両眼視で観察した。その結果、7月齢乳児は、単眼視順応から両眼視テストに移行した場合には2次元画像で提示されたものを、順応とテストがともに両眼視であった場合には、実物で提示されたものを、各々新奇なものとして見ていることが示されたが、一方5月齢乳児にはこのような傾向は現れなかった。このことから、7月齢乳児は絵画的要因を奥行の手がかりとして利用できる能力をもつ、と考えられる。

5.2. 交差文化的研究

非ヨーロッパ文化圏とくにアフリカ文化圏に属する児童は平面画像の奥行視に困難があるとの報告が多いが、これは認知スタイルに起因するのではないかと考えられる。そこで、Mshelia & Lapidus (20)は、ナイジェリアの児童(小学4年生、年齢は10—20歳)を対象として認知スタイルと平面画像の奥行視能力との関係を吟味した。認知スタイルは、埋め込み図形テスト(集団用)で場—依存性、場—独立性をみることによって、また平面画像の奥行視能力はハドソンテストを改作

したものによって各々しらべられた。場一独立性得点の高い児童は、ハドソンテストでも高得点を出し、また平面画像の奥行視能力を高める訓練でも良い学習成績を修めた。平面画像の奥行視を交差文化的視点からみる研究では、文化の相違が奥行視能力の発達に及ぼす要因ばかりでなく、認知スタイルの要因をも考慮する必要がある。

6. 動物を対象とした奥行知覚研究

6.1. 眼筋の自己受容感覚情報が3次元視の発達に及ぼす影響

眼筋の自己受容感覚情報は視覚領17野の発達に重要な役割を担っていることがネコを対象とした実験で明らかにされている。もし片眼からの眼筋自己受容感覚が残されていなければ、視覚運動行動は正常に発達しない。眼筋自己受容感覚情報は、出生後の3次元視の発達にも大きな役割を担っていて、6—8週齢のネコの眼筋自己受容感覚情報が伝達されないように両眼からの神経を切断した場合には、両眼による奥行視力は単眼によるそれと同程度にとどまるが、成体まで成長してからの神経切断は視覚的欠陥をもたらさない (Hein & Daimond 1983, Graves, Trotter & Fregnac 1987)。Trotter et al. (28) は、この種の神経切断が両眼による3次元視能力の欠陥をもたらすための発達の臨界期を探った。実験は、ネコの単側あるいは両側の三叉神経を3週齢、9.5—13週齢、14週齢期に切断し、その両眼奥行視力にあたる影響を、180—220日齢になるまで、跳躍技法でしらべた。その結果、単側神経切断が13週齢までに、また両側神経切断が10週齢までに成されると、両眼奥行視力に生涯を通じた欠陥が生じることが明らかにされている。

6.2. ラットの奥行距離知覚の手がかり

Leggs & Lambert (16) は、跳躍技法でラット (hooded rat) の奥行距離知覚の手がかり要因を分析したところ、ラットは跳躍に先だつて盛んに頭部を上下させることを観察した。この種の頭部運動が運動視差を誘導しているかについて、着地台の先端部分しか視えないようにして運動視差要因を無効にして確かめたところ、この条件でも正確な奥行距離—跳躍関係が示された。ラットの奥行方向への跳躍には、視覚情報と、頭部運動からもたらされる自己受容感覚情報との統合が関わっているものと考えられる。

6.3. モルモットにおける網膜像の大きさの手がかり

網膜像の大きさ要因が奥行手がかりとしてどの程度機能しているかが、モルモットを対象にして、Ellard, Chapman, & Cameron (5) によって検討された。実験技法には跳躍法が用いられ、跳躍台と大、小2種類の着地台間の跳躍が訓練された。テスト試行は、訓練試行中に、訓練試行で使用されたものとは大きさ(幅)の異なる着地台への跳躍を挿入する方法によって行われ、着地台への跳躍の正確度が訓練条件でのそれと比較された。その結果、跳躍台の大きさが訓練条件のそれよりも大きい場合には跳躍距離の過小視が、跳躍台の大きさが小さい場合には跳躍距離の過大視が生じた。また、着地台の大きさと跳躍距離は、先行試行のフィードバック情報を受けて変化することも示された。これらの結果から、網膜像の大きさ要因をもとにした絶対的奥行距離の算定が試行毎に行われている、と考えられる。

6.4. ジャービル (Gerbil) とスパイニーマウス (Spiny mouse) の奥行と落差の知覚

モンゴルジャービル (*Meriones unguiculatus*) の視覚的断崖での落差弁別は、スパイニーマウス (*Acomys cahirinus*) に比べて劣っていることが示されている (Greenberg, 1986) が、今回、水平方向での奥行弁別能力をY型迷路の選択肢に長短をつけ迷路学習を行ったところ、ジャービルの

方が奥行弁別学習では優れていることが示された。これは、ジャービルが穴を掘って生活する習性をもつものに対して、スパイニーマウスは地表で生活するという生態的な相違にもとづくと、Grennberg, McCarthy & Bergamo (9) は考えている。

6.5. ハトの奥行視のための視覚システム

動物を対象とした最近の両眼立体視の研究によれば、両眼立体視のしくみを備えているのは霊長類や哺乳類もしくは捕食性の動物種に限定されないことを明らかにしている。McFadden (18) は、ハトの奥行視を担う視覚システムについてのこれまでの研究を詳細にまとめた。それによれば、絶対的奥行と相対的奥行を最適に知るためのしくみがハトの眼球と網膜構造の制約のもとで備わっていて、とくに穀物をペックするときのように絶対的奥行距離を検出し対象に接近する場合には、頭部のサッカディクな動きと両眼輻輳運動が安定した網膜像を維持するのに役だっていること、また輻輳運動だけでは奥行を正確に検出するのに不十分で、両眼立体視のしくみが関与していること、しかし両眼立体視は絶対的奥行を知るためにあるというよりはパターン検出をより効果的にするために備わっていると考えられることなどがまとめられている。

7. その他の奥行知覚研究

7.1. 高齢での白内障手術と奥行視

高齢で白内障手術を受けた後の奥行知覚について、本人自身の観察報告がある。小笠原(32)、(33)によれば、手術直後は人工レンズのためすべてのものが大きく、近くにそして奥行が浅く見える。さらに、同一の大きさの皿を奥行を違えて提示すると、遠いものの方が大きく見え、過剰恒常性が生じている。しかし、手術後7カ月を経過すると過剰恒常性が減じてはきたが、しかし遠くに定位されたものが小さく、あるいは手前にあるものと等しく見えるようにはならないとのことである。

8. おわりに

知覚心理学における奥行視研究は、現在、心理学・生理学・工学・眼科学・計算機科学などの領域から探求されている。そのため従来使用されていた学術用語も研究の進展にともないさまざまに言い換えられてきている。例えば、従来使われていた実体鏡視という用語は、両眼立体視と表現されることが多いし、両眼視差は網膜視差に、奥行視は3次元視にというようである。これは、他領域からの研究成果を取入れ、また術語の曖昧な部分を整理したためであろう。とくに、計算機理論にもとづく視覚研究が進展するに伴い、同一視覚現象を各々の領域で別々に表現されることが多くなっている。対象をスクリーンの背後で運動あるいは回転させ、そのシルエットを観察すると、明瞭な立体が視えるが、知覚心理学の領域では、それを運動の奥行視と呼び、また計算機科学の視覚理論領域では、運動からの形状復元という。心理学での視覚理論では、視覚現象を研究対象とし、計算機科学での視覚理論では、刺激から形状や立体、運動を復元することを研究目的としているので、同一現象についての術語の用法に相違が生じているためである。視覚理論を踏まえての用語の統一と正確な概念規定が求められている。

3次元視研究は、両眼立体視問題と単眼立体視問題に集約される。単眼立体視問題には、運動要因に基づく立体視と陰影・肌理勾配・遠近法的要因などに基づく絵画的立体視に分けられる。

両眼立体視過程は、これまでの精神物理学的・神経生理学的・計算機科学的研究から、Tyler (29) によってまとめられたように、3つの異なった過程から成立していると考えて良いようである。それらは、局所的 (local) ・粗い網膜視差 (coarse stereopsis) ・非キクロピアン (cyclopean) 特性をもつ過程、全体的 (global) ・細かい網膜視差 (fine stereopsis) ・キクロピアン特性をもつ過程、お

よび両眼間の空間周波数差 (diffrequency) にもとづく過程である。そして、これらの過程は、運動情報や一過性の輝度情報を処理する過程、高空間周波数で静止情報を処理する過程、色相や低空間周波数情報を処理する過程と対応している。Julesz のランダム・ドット・ステレオグラムの考案以来、多くの研究が積み重ねられてきたが、両眼立体視のしくみを解きあかすための構図が浮かび上がってきたようである。

単眼立体視研究の領域、とくに運動要因にもとづく立体視研究は、運動視差・KDE・ステレオキネティック効果の問題を通して検討されている。これらの現象は、対象の運動速度差が3次元効果をもたらすということで共通している。しかし、形と大きさの同一な2つの独立した対象を速度を違えて提示しても、それらは同一奥行面上を速度の異なる物体が移動しているとしか見えない。Ullmann のコンペアベルト実験も、同様なことを検証している。これに対して Ito & Matunaga (11) の実験では、速度差が視かけの奥行を生じさせるという。筆者の研究でも、速度差をもつ刺激が背景から独立した単体の場合には、刺激速度差は速さが異なると知覚され、速度差が背景そのものに生じている場合には、すなわち速度差が面 (surface) に生じている刺激事態では、速度差の異なる面は、速さが異なると知覚されるよりは、奥行が異なると知覚される方がはるかに強く生じる。とくに、速度差が2段階では奥行印象は薄い、速度差に勾配がつけられていると奥行印象は明瞭となる。サイン波形速度勾配は、もっとも効果的に波状の奥行を生む。KDE あるいはステレオキネティック効果も、対象の運動によって複雑な運動速度勾配が形成され、その結果として奥行、立体など3次元効果が生じると考えられる。

絵画的要因にもとづく立体視研究は、最近、進展がみられない。陰影・テクスチャ・線遠近法要因などの条件分析的研究は、ほぼやり尽くされたと思われる。これからは、このような要因にもとづいて、3次元形態がどのように復元されるかという視点からの研究も求められよう。

文献 (1991年)

- (1) Arterberry M.E., Bensen, A.N. & Yonas, A. Infants' responsiveness to static-monocular depth information: A recovery from habituation approach. *Infant Behavior and Development* 1991, 14, 241-251.
- (2) Baird, J.C., Wagner, M. & Fuld, K. A simple but powerful theory of the moon illusion. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 1990, 16, 675-677.
- (3) Blake, R., Yang, Y. & Wilson, H.R. On the coexistence of stereopsis and binocular rivalry. *Vision Research*. 1991, 31, 1191-1203.
- (4) Cohn, T.E. & Lasley, D.J. Wallpaper illusion: cause of disorientation and falls on escalators. *Perception*, 1990, 19, 573-580.
- (5) Ellard, C.G., Chapman, D.G. & Cameron, K.A. Calibration of retinal image size with distance in the Mongolian gerbil: Rapid adjustment of calibration in different contexts. *Perception & Psychophysics*, 1991, 49, 38-42.
- (6) Fisher, S.K. & Ciuffreda, K.J. Adaptation to optically-increased interocular separation under naturalistic viewing condition. *Perception*, 1990, 19, 171-180.
- (7) Freeman, R.D. & Ohzawa, I. On the neurophysical organization of binocular vision. *Vision Research*, 1990, 30, 1661-1676.
- (8) Frost, B.J., Wylie, D.R. & Wang, Y.C. The processing of object and selfmotion in the tectofugal and accessory optic pathways of birds. *Vision Research*, 1990, 31, 1677-1688.
- (9) Greenberg, G., McCarthy, T. & Bergamo, P. Depth/distance perception in gerbils and spiny

- mice : ecological considerations. *The International Journal of Comparative Psychology*, 1989, 3, 131-136.
- (10) Gregory, C., DeAngelis, G.C., Ohzawa, I. & Freeman, R.D. Depth is encoded in the visual cortex by a specialized receptive field structure. *Nature*, 1991, 352, 156-159.
 - (11) Ito, H. & Matsunaga, K. The correlation between velocity and perceived depth in motion. *Japanese Psychological Research*, 1990, 32, 107-116.
 - (12) Jaschinski-Kruza, W. Effects of stimulus distance on measurements of dark convergence. *Ophthalmic Physiological Optics*. 1990, 10, 243-2512.
 - (13) Johnston, E.B. Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, 1991, 31, 1351-1360.
 - (14) Jordan III, J.R., Geisler, W.S. & Bovik, A.C. Color as a source of information in the stereo correspondence process. *Vision Research*, 1990, 30, 1955-1970.
 - (15) Landy, M.S., Doshier, B.A., Sperling, G. & Perkins, M.E. The kinetic depth effect and optic flow-II. First-and second-order motion. *Vision Research*, 1991, 31, 859-876.
 - (16) Leggs, C.R. & Lambert, S. Distance estimation in the hooded rat : experimental evidence for the role of motion cues. *Behavioral Brain Research*, 1990, 41, 11-20.
 - (17) Mallot, H.A. & Bideau, H. Binocular vergence influences the assignment of stereo correspondences. *Vision Research*, 1990, 30, 1521-1523.
 - (18) McFadden, S.A. Eye design for depth and distance perception in the pigeon : An observer oriented perspective. *The International Journal of Comparative Psychology*, 1989, 3, 101-129.
 - (19) Mitchison, G.J. & McKee, S.P. Mechanism underlying the anisotropy of stereoscopic tilt perception. *Vision Research*, 1990, 30, 1781-1791.
 - (20) Mshelia, A.Y. & Lapidus, L.B. Depth perception in relation to cognitive style and training in non-Western children. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 1990, 21, 414-433.
 - (21) Nakayama, K. & Shimojo, S. Da Vinci stereopsis : Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, 1990, 30, 1811-1825.
 - (22) Nawrot, M. & Blake, R. The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 1991, 49, 230-244.
 - (23) Ohzawa, I., DeAngelis, G.C., Gregory, C. & Freeman, R. Stereoscopic depth discrimination in the visual cortex : Neurons ideally suited as disparity detectors. *Science*, 1990, 249, 1037-1041.
 - (24) Pong, T., Kenner, M. A. & Otis, J. Stereo and motion cues in preattentive vision processing-some experiments with random-dot stereographic image sequences. *Perception*, 1990, 19, 161-170.
 - (25) Simonet, P. & Campbell, M.C. Effect of illuminance on the directions of chromostereopsis and transverse chromatic aberration observed with natural pupils. *Ophthalmic Physiological Optics*. 1990, 10, 271-279.
 - (26) Steinbach, M.J., Ono, H. & Wolf, M.E. Motion parallax judgements of depth as a function of the direction and type of head movement. *Canadian Journal of Psychology*, 1991, 45, 92-98.
 - (27) Stevenson, S.B., Cormack, L.K. & Schor, C.M. Depth attraction and repulsion in random dot stereograms. *Vision Research*, 1991, 31, 805-813.
 - (28) Trotter, Y., Beaux, J.C., Pouget, A. & Imbert, M. Temporal limit of the susceptibility of

- depth perception to proprioceptive deafferentations of extraocular muscles. *Developmental Brain Research*, 1991, 59, 23-29.
- (29) Tyler, C. W. A stereoscopic view of visual processing streams. Special issue: Optics, physiology and vision. *Vision Research*, 1990, 30, 1877-1895.
- (30) Wilson, H.R., Blake, R. & Halpern, D.L. Coarse spatial scales constrain the range of binocular fusion on fine scales. *Journal of the Optical Society of America A*, 1991, 8, 229-236.
- (31) Yang, Y. & Blake, R. Spatial frequency tuning of human stereopsis. *Vision Research*, 1991, 31, 1177-1189.
- (32) 小笠原滋英 高齢での白内障手術後の空間知覚の障害 I、*基礎心理学研究*、1989、8、9-16。
- (33) 小笠原滋英 高齢での白内障手術後の空間知覚の障害 II、*基礎心理学研究*、1990、9、19-25。
- (34) 滋野井 光、コントラスト逆転ステレオグラムにおける奥行弁別、*基礎心理学研究*、1990、9、11-18。
- (35) 下野孝一、大野ひろし 両眼網膜視差をもたないステレオグラムの輝度変化に対する奥行反応。*心理学研究*、1990、61、263-267。

参考文献

- Cagenello, R. & Rogers, B.J. Local orientation differences affect the perceived slant of stereoscopic surfaces. *Investigative Ophthalmology and Visual Sciences (Supplement)*, 1988, 29, 399.
- De Weert, C.M. Color contours and stereopsis. *Vision Research*, 1979, 19, 555-564.
- Dosher, B.A., Landy, M.S. & Sperling, G. 1989 Ratings of kinetic depth effect in multi-dot displays. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 15, 816-825
- Ebenholtz, S.M. & Fisher, S.K. Distance adaptation depends on plasticity in the oculomotor control system. *Perception & Psychophysics*, 1982, 31, 551-560.
- Fisher, S.K. & Ebenholtz, S.M. Does perceptual adaptation to telestereoscopically enhanced depth on the recalibration of binocular disparity? *Perception & Psychophysics*, 40, 1986, 101-109.
- Ganz, L. Lateral inhibition and the location of visual contours: An analysis of figural after-effects. *Vision Research*, 1964, 4, 465-481.
- Gonzalez, E.G., Steinbach, M.J., Ono, H. & Wolf, M.E. Depth perception in children enucleated at an early age. *Clinical Vision Sciences*, 1989, 4, 173-177.
- Graves, A.L., Trotter, Y. & Fregnac, Y. Role of extraocular muscle proprioception in the development of depth perception in cats. *Journal of Neurophysiology*, 1987, 58, 816-831.
- Greenberg, G. Depth perception in Mongolian gerbils (*Meriones unguiculatus*) and spiny mice (*Acomys rusatus* and *A. cahirinus*). *Journal of Comparative Psychology*, 1986, 100, 81-84.
- Gregory, R.L. Vision with isoluminant color contrast: A projection technique and observations. *Perception*, 6, 113-119.
- Hein, A. & Daimond, R. Contribution of eye movement to the representation of space. In M. Jeannerod (Ed.), *Spatially Oriented Behavior*, Springer, Berlin, 1983, 119-133.
- Julesz, B. & Miller, J.E. Independent spatial-frequency-tuned channels in binocular fusion and rivalry. *Perception*, 1975, 4, 125-143.

- Kaufman, L., Bacon, J. & Barroso, F. Stereopsis without image segregation. *Vision Research*, 1973, 13, 147-147.
- Krol, J.D. & van de Grind, W.A. The double nail illusion : Experiments on binocular vision with nails, needle and pins. *Perception*, 1980, 9, 651-669.
- Livingstone, M.S. & Hubel, D.H. Segregation of form, color, movement, and depth : Anatomy, physiology, and perception. *Science*, 1988, 240, 740-749.
- Lu, C. & Fender, D.H. The interaction of color and luminance in stereoscopic vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 1972, 11, 482-490.
- Marr, D. & Poggio, T. A computational theory of human stereovision. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 1979, 204, 301-328.
- Ramachandran, V.S., Rao, V.M. & Vidyasayar, T.R. The role of contours in stereopsis. *Nature, London*, 1973, 242, 412-414.
- Reichardt, W. Autokorrelationsauswertung als Funktionsprinzip des Zentral nervensystems. *Zeitschrift Naturforschung B*, 1957, 12, 447-457.
- Richards, W. & Leiberman, H.R. Correlation between stereo ability and the recovery of structure from motion. *American Journal of Optometry & Physiological Optics*, 1985, 62, 111-118.
- Rogers, B.J. & Graham, M.E. Aftereffects from motion parallax and stereoscopic depth : similarities and interactions. In L. Spillman & B.R. Wooten (Eds.) *Sensory experience, adaption, and perception* : Festschrift for Ivo Kohler (pp. 603-619). Hillsdale, NJ : Erlbaum.
- Smith, R.A. Jr. The motion/disparity aftereffect : A preliminary study. *Vision Research*, 1976, 16, 1507-1509.
- Ullman, S. *The interpretation of visual motion*. 1979, Cambridge, MA, M.I.T. Press.
- Wallach, H., Moore, M. & Davidson, L. Modification of stereoscopic depth perception. *American Journal of Psychology*, 1963, 76, 191-204.
- Westheimer, G. & Levi, D.M. Depth attraction and repulsion of disparate foveal stimuli. *Vision Research*, 1987, 27, 1361-1368.
- Yonas, A., Arterberry, M. & Granrud, C. 1987 Space perception in infancy, In R. Vasta (Ed.) *Annals of child development*, Greenwich, CT : JAI Press.