

# 心理学における 3次元視研究 2

## —運動要因による 3次元視—

### 3-Dimensional Visual Perception in Psychology 2

#### —Analysis by Motion cue—

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

## 1. 運動視差

### 1.1. 観察者の運動と奥行手がかり

観察者が静止した状態から運動した状態へと変わると、網膜の光学的配列にダイナミックな変化が生まれる。観察者の運動は、頭部が動く場合、四肢が動く場合、身体が移動する場合の3通りに分類され、それぞれ、固有の光学的情報を担う (Gibson, J. 1979)。頭部が動く場合には、注視点を中心として網膜の光学的配列の1部に速度的変化が生起する。四肢、とくに手を動かした場合には、観察者は手を注視することになるので、手に持った対象が手の動きにつれて光学的拡大や縮小あるいはその傾きによって変形を来す。身体が移動した場合には、光学的配列は内側から外側に向かって徐々に大きくなるような流動パターンを形成する。

観察者の運動の中、頭部の運動や移動は、頭部自体が自己定位の絶対的基準となっているため、光学的流動の基本となる。観察者が積極的に頭部や身体を動かすことによって作り出す奥行手がかりは、運動視差と呼ばれる。これは、観察者の運動によって生起する網膜での対象の角速度差で、観察者の自己生産的運動のフィードバックに基づいて作り出される奥行手がかりとなる。

### 1.2. 運動視差の公式

運動視差 (P) は、2つの対象間の奥行距離 (d)、観察者の頭部運動の速度 (V) と対象までの絶対的奥行距離 (D) の3要素から、次のように規定される。

$$P = dV / D^2$$

運動視差量は、 $d$ と $V$ に比例し、 $D$ の2乗に反比例する。

運動視差のしくみを考えるとき重要なもう一つの要因は、網膜上での刺激の運動方向である。観察者の凝視点の位置によって5つの事態（図1）が区別される。

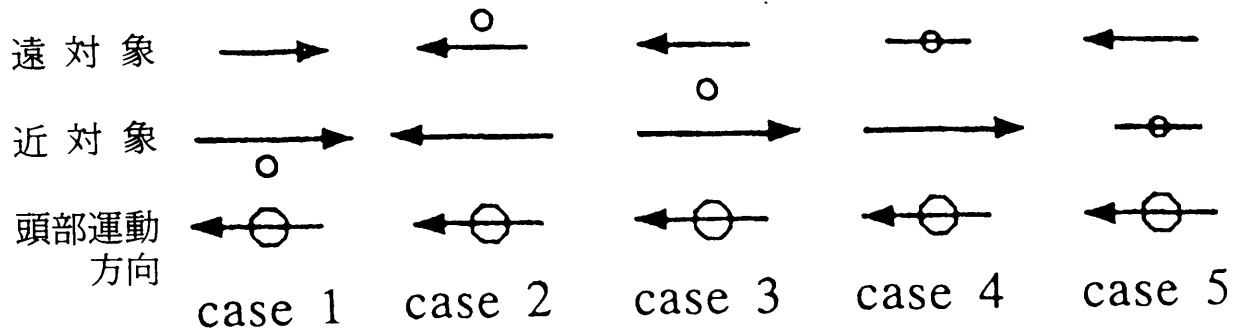


図1 運動視差における頭部運動方向と注視点との関係。

←印は対象の網膜上での運動の方向と速度を示す。

(1) 凝視点を2つの奥行を異にする対象（近対象と遠対象）の手前に置いた場合。2つの対象の網膜像の運動方向は観察者の頭部運動方向と同一となる。近対象の網膜像速度は遠対象のそれよりも大きい。

(2) 凝視点を2つの対象の向こう側に置いた場合。2つの対象の網膜像の運動方向は観察者の頭部運動と反対となる。近対象の網膜像速度は遠対象のそれよりも大きい。

(3) 凝視点を2つの対象の間に置いた場合。近対象の網膜像の運動方向は観察者の頭部運動と反対方向に、遠対象のそれは同一方向となる。近対象の網膜像速度は遠対象のそれよりも大きい。

(4) 凝視点を遠対象の上に置いた場合。近対象の網膜像の運動方向は頭部運動のそれと反対方向となるが、遠対象は網膜の中心に常に投影されるので頭部運動にともなっては運動しない。近対象の網膜像速度は遠対象より大きい。

(5) 凝視点を近対象の上に置いた場合。遠対象の網膜像の運動方向は頭部運動のそれと同一方向となり、またその網膜像速度は近対象より大きい。

運動視差の成立要因は、このように、対象の網膜像の速度と方向である。網膜像の運動速度は相対的奥行量を規定し、運動方向は対象と凝視点との奥

行関係を規定する。

### 1.3.運動視差シミュレーション技法

これまで、運動視差についてはいくつかの研究がなされてきたが、その研究の大半は、運動視差と運動視差によって誘導された視かけの奥行との関係を直接に操作することが困難であったため、奥行や落差のある対象を運動視差が単独の手がかりとなるように絞りこんだ条件で観察させ、奥行弁別の可否をしらべることによって運動視差検出の有無を試してきた。この方法では、運動視差の生得性、反応特性や弁別精度は明らかにすることはできるが、しかし、運動にもとづく網膜上の相対的速度差が奥行や立体に変換されるしくみについての分析を進めることは難しい。過去にも、相対的角速度差と奥行弁別との関係についてさまざまな試みがなされてきた。例えば、観察者の頭部を移動させるかわりに、刺激対象全体をある速度で運動させる方法 (Graham, et al. 1948) である。ここでは、遠近を異にする2本のロッドがフレームに据え付けられ、フレーム全体を左右に運動させ、その際のロッドの奥行判断が求められた。運動視差は、対象間の奥行距離 ( $dD$ ) と頭部運動の速度 ( $V$ )、対象までの奥行距離 ( $D$ ) の3要因から成り立つ。運動視差に関与するこれらの要因の中で、 $V$  を観察者と対象の相対運動速度を示すものと解し、とくに頭部運動の速度が奥行弁別閾をどのように変化させるかがしらべられた。それによると、フレームの運動速度が増大すると奥行弁別は悪くなるが、しかし、フレームの運動距離を長くすると弁別力は高まることが示された。先に示した運動視差公式によれば、観察距離や対象間奥行距離が一定の時、運動視差量は速度 ( $V$ ) に比例する。一般に、運動視差量が多ければ奥行弁別判断は容易になるはずであるが、この結果は予測に反したものとなった。これは、十分な観察距離がなくて運動視差が大きい場合には、網膜上での対象移動が速く、そのため、観察者は対象を凝視し、把捉することが困難になるためである。運動視差による奥行弁別は、速度 ( $V$ ) が観察距離との関係のなかで最適値をとる時、最良になる。速度 ( $V$ ) が観察者の頭部運動によって誘導されたものであれば、観察距離の如何に関わらず、頭部運動速度には自ら限界が生じよう。

速度 ( $V$ ) を観察者と対象間の相対的なものと解し、対象自体の運動を操作することによって運動視差が誘導されてきたが、運動視差が3次元の世界

を出現させる否かを明らかにするためには、頭部運動に連動した運動視差を2次元面上に再現する方が望ましい。これまでは、対象の運動を頭部の動きに連動させることが技術的に困難だったために、半透明スクリーンの背後で対象を運動させ、その投映像がもたらす運動速度差から運動視差を誘導する方法がとられてきた (Gibson, J. & Carel 1952, Gibson, E. et al 1959)。しかしながら、この方法によるシミュレーション事態では、奥行差や奥行傾斜面が2次元面上に明確には出現しないこと、また、例え、視えの奥行が出現しても投影像そのものが陰影、大きさ、肌理などの経験的要因を含み、視かけの奥行が運動視差にのみよるか否かが断定できない、などの点に問題が残った。

これらは、パーソナル・コンピュータを用いオシロスコープ上に打ち出したランダム・ドット・パターンを観察者の頭部運動と連動させる技法 (運動視差シミュレーション技法) を開発することによって、解決された (Rogers & Graham 1979, 1982)。この技法では、凹凸のある3次元面を観察した時の網膜流動パターンを2次元面上に完全にシミュレートすることができる。単眼視観察の結果、観察者がその頭部を静止した状態では、オシロスコープ上のパターンは、不規則な点からなる平面にしか視えないのに、観察者が頭部を動かすと、そこに3次元的な波形パターンが出現する。

運動視差が観察者の運動によって誘導されるのではなく、外的な運動による場合にも3次元面が出現するか否かについて、同様に Rogers らによって検討された。ここでは、ランダム・ドット・パターンの運動は、観察者の頭部運動の代わりに、観察者の視線を横切るように左右に移動するオシロスコープの動きと連動させられた。単眼視観察の結果、頭部運動連動時と同様、明瞭な3次元印象が2次元画面上に生起した。

周知のように、Julesz (1960) は、ランダム・ドット・ステレオグラムを用いることによって、経験的要因を一切除去し、網膜視差立体視研究を大いに進展させたが、これと同様に、Rogers らの研究も運動視差を経験的要因から完全に分離することに成功し、運動視差を単独で独立に操作しうる道を開いた点で画期的といえよう。

#### 1.4. 網膜像の運動速度と奥行出現方向

運動視差では、奥行出現の方向は、1.1 で明らかにしたように、凝視点が近

対象にある場合を除いて、すべて網膜像の運動速度の大きいものの方が観察者に近く出現して見える。この場合、網膜像の運動速度は、刺激のもつ物理的速度と観察者の頭部運動速度の合成で規定される。刺激の運動方向と観察者の運動方向が反対の場合には、刺激のもつ物理的速度の大きい方が前方に出現して見えるが、刺激と頭部運動方向が同方向の場合には、両速度が相殺される結果、物理的速度が速い方が網膜上では遅くなり、視かけ上、後方に出現すると予測される。

奥行出現の方向が刺激速度と頭部運動速度の合成で規定されていることは、運動視差シミュレーション技法を用いて確かめられた (Hayashibe, 1992)。ランダム・ドット・パターンから構成され、5つに等分に分割された水平な帯のうち(図2)、上、下、中央の帯とそれ以外の帯の速度と方向は独立に動く。運動している対象を、観察者が頭部を左右に振って観察、あるいは頭部を左右に傾けて観察、または頭部を前後に傾けて観察、さらに眼球を左右に動かして観察させると、基準ときめた刺激帯の奥行出現の方向が、頭部運動に伴って、とくに左右に頭部を傾けたり、振ったりしたときに顕著に反転することが示された。左右に頭部を傾ける条件では、観察者が振子のように首を左または右に傾けるたびに標準刺激帯の奥行は反転して視えた。

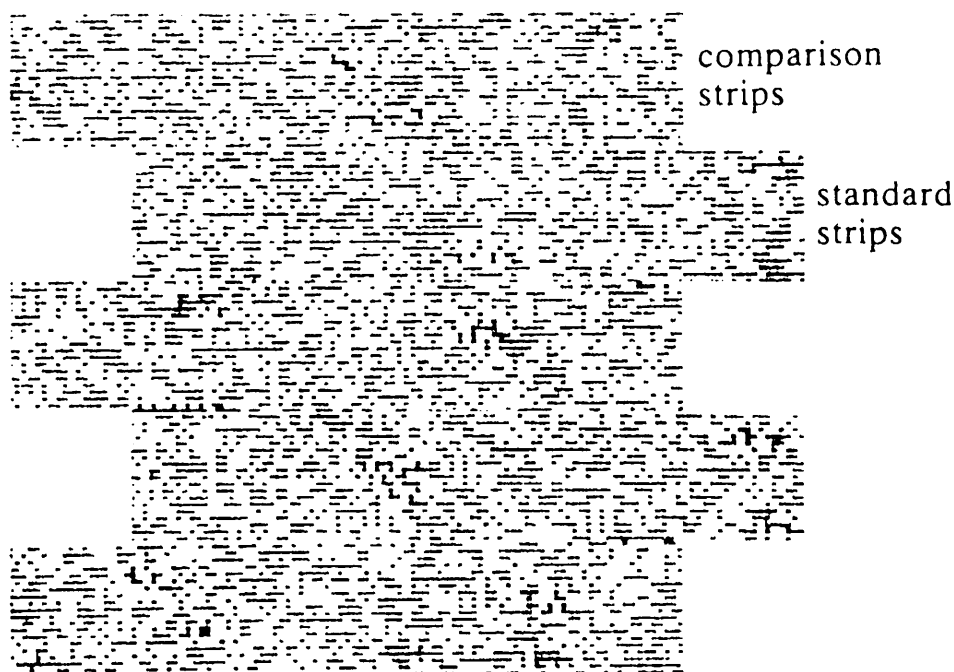


図2 運動視差シミュレーションでの刺激パターン

表1 刺激と東部運動の角速度と奥行出現方向

刺激の運動方向		同一方向	反対方向	反対方向	同一方向	反対方向
標準刺激 (deg/S)		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
比較刺激 (deg/s)		0.05	0.05	0.10	0.20	0.20
合成角速度						
頭部運動 右方向	標準刺激	57.40	57.40	57.40	57.40	57.40
	比較刺激	57.35	57.25	57.20	57.50	57.10
頭部運動 左方向	標準刺激	57.20	57.20	57.20	57.20	57.20
	比較刺激	57.25	57.35	57.40	57.10	57.50
奥行出現方向						
頭部運動 右方向	標準刺激	凸方向	凸方向	凸方向	凹方向	凸方向
	比較刺激	凹方向	凹方向	凹方向	凸方向	凹方向
頭部運動 左方向	標準刺激	凹方向	凹方向	凹方向	凸方向	凹方向
	比較刺激	凸方向	凸方向	凸方向	凹方向	凸方向

\* 頭部運動速度：57.30(deg/s)

なぜこの種の奥行反転が生じるのであろうか。運動視差のしくみでは、前述したように、網膜上での速度が奥行出現の方向を規定すると考えられる。CRT 上のパターンと観察者の頭部運動方向が同方向な場合には、網膜上での対象の速度は互いに相殺される。一方、パターンと頭部運動が反対方向の場合には、網膜速度は加速される。実験では、基準となる刺激帯とそれ以外の刺激帯は常に決められた方向に運動しているので、観察者が左または右に頭部を傾ける毎に網膜速度が相殺あるいは加速される。網膜速度が対象の運動速度と頭部運動速度 (57.3 deg/s に仮定して計算した) の各々の運動方向によってどのように合成されるかは、表 1 の中段に示されている。これによれば、頭部の傾けによる奥行出現の方向は、頭部と対象の運動方向にもとづいて合成された網膜速度によって規定されることがわかる。

この結果は、CRT 上でのパターン方向を変えた場合にも確認された。これまでは、基準となる刺激帯の運動方向は、観察者に対して常に左方向であったが、これを右方向に変えた場合にも、視かけの奥行出現方向は合成網膜速度によって規定されていた。

では、CRT 上のパターンを観察者の頭部運動と連動させた場合にも、視かけの奥行出現方向は網膜上での合成角速度で規定されるのであろうか。観察は、観察者のあごをチンレストに載せ、それを左右に一定の速度で振りながら行われる。刺激パターンは、チンレストに連動して動く。5つの帯に分割されたパターンの中、基準となる刺激帯は、チンレストが右に動けば右に、左に反転すれば左に動く。基準となる刺激帯とそれ以外の刺激帯との間の運動速度比や運動方向は変えられている。このような条件では、1条件(速度比2.0で標準刺激帯と比較刺激帯の運動方向が反対条件の場合)を除いて、標準刺激帯と比較刺激帯の物理的速度比と網膜上での合成速度比は逆転を示し、物理的に速い帯の方が網膜上では遅くなると予測される(表2)。観察の結果、予測通り、1条件を除いて他のすべての条件で、物理的に速い帯の方が奥行的に後退して見えることが示された。

運動視差にもとづく奥行の出現方向は、観察者と対象の運動速度と方向によって合成された網膜速度によって規定される。

表 2 刺激の角速度と奥行出現方向

刺激の運動方向		同一方向	反対方向	反対方向	同一方向	反対方向
標準刺激 (deg/S)		0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
比較刺激 (deg/s)		0.05	0.05	0.10	0.20	0.20

頭部運動との合成角速度						
	標準刺激	57.20	57.20	57.20	57.20	57.20
	比較刺激	57.25	57.35	57.40	57.10	57.50

奥行出現方向						
頭部運動	標準刺激	凹方向	凹方向	凹方向	凸方向	凹方向
左方向	比較刺激	凸方向	凸方向	凸方向	凹方向	凸方向

\* 頭部と刺激の運動方向は常に反対方向、頭部運動速度は57.30 (deg/s)と仮定

### 1.5. 観察者の運動要因の効果

網膜上に速度差を生じさせるには、対象と観察者との間に相対的な運動関係があればよい。この種の相対的運動関係は、(1)静止した対象を観察者が運動しながら観察する、(2)静止した観察者が速度の異なる運動対象を観察する。(3)対象を提示している CRT が、あたかも観察者が運動しながら観察したときに観察者と対象との間に生起する相対的運動事態と同じように、移動し、同時に CRT 内の対象が CRT の動きと連動して運動するのを、静止した観察者が観察する。

運動視差が効果的に奥行情報を担うのは、観察者の運動または少なくとも観察者が運動したのと同じように対象を提示している CRT とその内部にある対象が運動する必要がある (Rogers & Graham 1979)。これを受けて、運動視差が観察者の運動と連動している必要があるか否か、言い換えれば、



観察者の非視覚的手がかりが何らかの効果をもつかについて検討された (Braunstein & Tittle 1988)。運動視差は、あるウィンドー内にドットを提示し、ウィンドーとドットを各々独立に運動させ、観察者は静止したまま、それを観察する方法で誘導された。ドットの速度は、ウィンドーの上端もしくは下端から中央に向かって徐々に増大あるいは減少させる。これを観察すると、奥行方向に突出あるいは窪んだくさび形が視える。ドットとウィンドーの速度は各々独立に変化させるが、この時、対応的、多義的、抗争的の3条件を設ける。対応的条件ではウィンドーの運動方向はドットの運動方向と反対となるように、多義的条件では最低と最高速度が等しくかつ運動方向が逆になるように、抗争的条件ではウィンドーの運動方向とドットの運動方向とが同方向になるように、各々独立に操作された。また、観察者から見たときのドットの速度の最小と最大比は、常に1:1.12あるいは1:3.0となるように操作する。この他に、対照条件として、ウィンドーを静止させたまま、ドットを運動させ、静止した観察者が観察する条件も加える。実験の結果、視かけの奥行の方向は観察者から見たときの速度比によって規定されること、また、この速度差がウィンドーの運動と関連して生み出されていてもいなくても、奥行出現について同一の効果をもつこと、しかし、速度比が大きくなると視かけの奥行出現の程度は大きくなるのに対して、奥行方向の判断の正確さは減少すること、などが明らかにされた。

運動視差は観察者と対象との間に連関した運動がなくても十分効果的であるとの結果に対して、この種の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、矩形波にみられるように段階的に変化する運動速度差条件で、対象の運動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ことも指摘されている (Brooks et al. 1988)。矩形波パターンを用いた Hayashibe (1991) によれば、対象の運動が観察者の頭部運動と連動して変化する条件 (観察者運動条件) は、対象が速度差をもって自動的に運動する条件 (観察者静止条件) より、奥行出現の安定度が高い。矩形波パターンは、水平に等分に分割された5つの帯でつくられ、標準刺激帯と比較刺激帯との間には速度差が設けられ、また両刺激間の運動方向も「同一」と「反対」条件が設けられている。観察者の頭部運動と標準刺激帯とは、常に反対方向に運動する。観察では、奥行出現方向の交替 (奥行反転) 現象が起きるか否かがしらべられた。その結果、奥行反転

現象は、観察者静止条件と運動条件の両方で生起するが、観察者静止条件の方が有意に多いことが示された。

では、観察者運動条件ではどうして奥行反転現象が少ないのであろうか。観察者運動条件と静止条件との相違は、静止条件の網膜角速度が対象速度で規定されるが、運動条件でのそれは頭部運動と対象との合成速度となることである。この相違は、しかしながら、網膜速度の不安定をもたらす原因とはならない。両条件とも一義的に網膜速度は規定されているはずである。観察中、注目されたことは、奥行反転と凝視点の移動とが関係することである。観察者には、凝視した刺激帯は、心理的に遅くなるように感じられる。事実、運動するランダム・ドット・パターンを凝視すると、その途端に、いままで流れていて不明瞭にしか知覚できなかったドットが知覚できるようになる。もし、注視によって速度が心理的に遅くされるならば、奥行出現方向の逆転が生起すると考えられる。観察中に意図的に凝視点を変えると、奥行反転現象は観察者静止条件では、ほぼ完全に、運動条件でも大幅に増大することが確認された。

運動視差のしくみでは、観察者の頭部運動要因は特別の役割を担っていることはなく、観察者の運動による誘導の如何に関わらず網膜角速度で奥行出現の方向は規定されている。

#### 1.6. 「コンベアベルトの実験」

一方、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、Ullman (1979 a, b) 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の速度を他の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。この「コンベアベルトの実験」は、再検証された (Ito & Matsunaga 1990)。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。同様に、垂直軸を中心として回転する円筒面上と前額平行

移動する平面上に存在するドットがスクリーンにともに投影された事態をシミュレートしたものを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。これらは、いずれも、Ullmannの結論とは異なり、速度変化要因のみで奥行印象が誘導されている。

### 1.7. 眼球運動に起因する運動視差

奥行距離の異なる2つの対象に対して顔面を静止させ眼球のみ運動させて観察した場合、対象の網膜角速度に若干の差が生じ、これが運動視差として働くと考えられる。眼球運動に起因する運動視差を作り出すために、眼球運動に連動してCRT上のパターンを運動させることを林部（1990）は考えた。眼球運動は、ポリグラフでその水平成分のみを検出し、A-Dコンバータを使用して、デジタル値に変換し、パーソナルコンピュータに入力する。眼球運動に連動してシフトする領域と眼球運動の方向はそれぞれ反対とし、眼球運動の方向が反転した場合にはそれと同期して刺激帯も反転する。観察の結果、奥行出現の程度は小さくなるものの、奥行は明瞭に知覚されることが示された。

眼球運動に起因する運動視差は小さいが、しかし、奥行は明瞭に生起することが確認されている。

### 1.8. 運動視差による奥行検出感度と空間周波数

運動視差に誘導された奥行事態での感度特性が、凹凸の反復頻度（空間周波数）との関連で測定されている（Rogers & Graham 1982）。CRT上に提示されたランダム・ドット・パターンは、チン・レストに設けられたポテンショ・メータによって検出される頭部運動に連動し、シフトされる。頭部が左から右にシフトする時には、凹凸面の凸領域ドットは頭部と同方向に、凹領域のそれは逆方向にシフトされる。運動視差に誘導された奥行の検出感度（閾値）が種々な空間周波数条件で求められた結果、それは空間周波数0.2-0.5 c/degで最大となった。これは、種々な空間周波数条件で網膜視差を変化することによって求められた奥行検出感度と、最大値の得られる空間周

波数帯域の点で完全に一致している。運動視差と網膜視差のしくみは極めて類似したシステムであると考えられている。

### 1.9. 運動視差に誘導された奥行残効と奥行対比効果

運動視差に誘導された3次元図形にも奥行残効 (depth after effect) が生起するか、その可否がしらべられている。奥行残効は、Köhler & Emery (1947) によって初めて報告されたもので、奥行方向に傾いた図形を凝視後、前額平行面を観察すると、凝視図形のそれとは反対方向に傾いて知覚される現象をいう。Graham & Rogers (1982) は、図3に示されたようなランダム・ドット・パターンを観察者が実際の表面を頭部を左右に移動させてみた時に生起する網膜上の変化と等しくなるように正確にシミュレートさせて提示した。CRT上に提示されたパターンを、左右に移動する凝視点に誘導されながら、頭部を運動させて観察すると、奥行方向に波打つパターン(図3 a)が観察される。凝視図形の観察時間は8秒、次いで、検査図形であるフラットなランダム・ドット・パターンが提示された(図3 b)。残効量は、順応によって凹凸に知覚されている検査図形を、主観的にフラットになるように波形を物理的に調整させて求められ(図3 c)、その結果、順応効果による検査図形の波形の凹凸は、凝視図形とは逆方向に出現することが確認された。

また、運動視差にもとづく奥行対比効果についてもしらべられている (Graham & Rogers 1982)。奥行対比効果とは、Anstis (1975) によって初めて報告されたもので、等距離にある矩形面の一方は凹面で、他方を凸面で囲むと前者の矩形面が前面により出現してみえる現象をいう。Grahamらは、

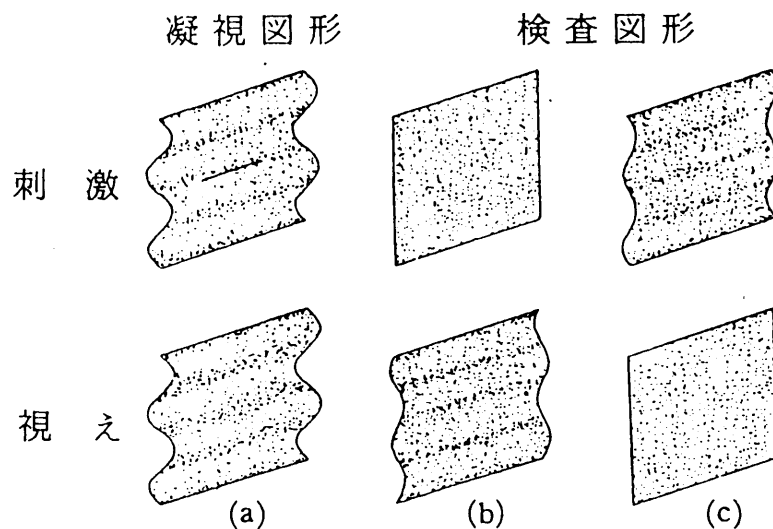


図3 運動視差にもとづく奥行残効 (Graham & Rogers 1982)

運動視差に誘導されて出現している奥行傾斜面に上下をはさまれた帯面は、それが前額平行面であるにもかかわらず奥行傾斜面とは逆方向に傾いて見えるという。

奥行残効や奥行対比効果は、網膜視差によって誘導された3次元パターンでも、運動視差の場合と同様に観察される。運動視差と網膜視差についての継時的、同時的対比効果の存在が確認されたことから、運動視差と網膜視差とは類似したメカニズムに支配されている可能性が高い。

### 1.10. 運動視差に誘導された Craik-O'Brien Cornsweet 錯視

図4 a に示したような Craik-O'Brien Cornsweet 状の凹凸パターンを、その中央の凹部分を垂直になるように提示して観察すると、凹部分を挟む両側の領域は物理的に等高であるにもかかわらず、右領域の方が高く見える (図4 c、Anstis, Howard & Rogers 1978)。

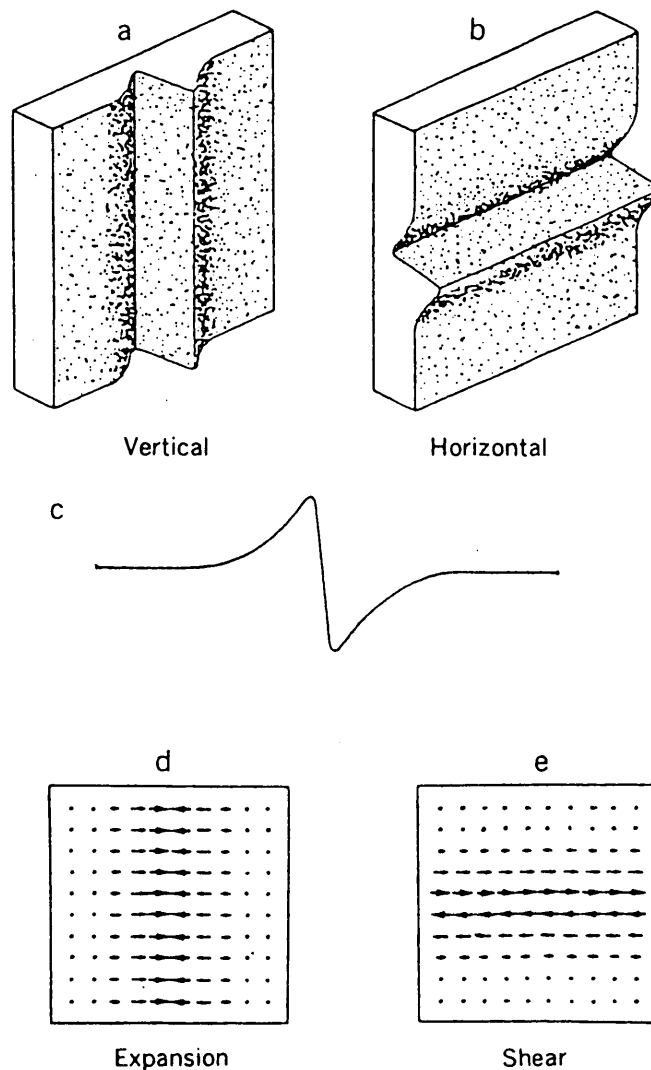


図4 Craik-O'Brien Cornsweet 状の凹凸パターン (Rogers & Graham 1983)

Rogers & Graham (1983) は、 Craik-O'Brien Cornsweet 状の凹凸パターンを運動視差要因のみで作成して提示し、この種の奥行的錯覚に異方性があることを明らかにした。運動視差は、観察者の頭部運動と連動して誘導され、また、この時の頭部運動の方向には水平と垂直の2方向を設けた。奥行錯覚量は、刺激パターンの中央領域の凹部分が垂直に提示される場合と水平の場合とで比較された。実験の結果、水平頭部運動条件では中央凹領域が垂直の場合に、垂直頭部運動条件では中央凹領域が水平の場合に、それぞれ錯覚が生起し、異方性効果が存在することが示された。同様なパターンを網膜視差のみで作成し、奥行錯覚量を測定すると、中央凹領域が垂直条件のときのみ、錯覚が生起することがわかった。これは、水平頭部運動による運動視差条件や網膜視差条件では、中央凹領域が垂直の場合に運動視差や網膜視差の効果が現れる (図 4 d, Expansion 条件) のに対し、中央凹領域が水平の場合にはその効果が相殺されてしまう (図 4 e, Shear 条件) ためと、Rogersらは考えている。

### 1.11. 運動視差と絶対的奥行距離情報

奥行距離は、対象までの絶対的奥行距離と対象間の相対的奥行距離に分けられる。これまで、運動視差は主に相対的奥行距離を知覚させる要因であると考えられてきた。しかし、物理的には、相対的奥行距離は絶対的奥行距離に比例して変化する。運動視差が奥行知覚を可能にする単独で独立した要因であるなら、絶対的奥行距離情報が加わってはじめて相対的奥行距離を算定できる。

運動視差によって相対的奥行距離を表す場合、絶対的奥行距離が変わると運動視差量がその2乗に比例して減少するが、視かけ上は、相対的奥行距離が維持される奥行恒常性が存在することから、絶対的奥行距離情報を検出し、それを運動視差による相対的奥行距離の算定に利用するしくみがあると考えられる。運動視差が絶対的奥行距離の変化に対応して相対的奥行距離を算定することができるか否かについては、Ono, Rivest & Ono (1986) によってしらべられた。運動視差は、観察者の頭部運動をフィードバックさせ、CRT上のパターンと連動させて誘導、提示した。CRT上に提示されたパターンは波形で、その頂は頭部運動と連動して同方向に、その谷は逆方向にシフトする。絶対的奥行距離はCRTまでの観察距離を変化(80 cmと40 cm)すること

によって、また、網膜上での運動視差量は観察距離が変わっても、常に一定に保たれた(網膜視差換算  $0.47^\circ$  一定、網膜視差に換算する場合、頭部水平運動距離 6 cmを眼球間距離とみなして算定する)。運動視差によって生起した視かけの奥行は、ポインターを調整させることによって測定されている。運動視差が一定に保たれた事態では、視かけの奥行距離 (d) は、対象までの観察距離 (D) の 2 乗に比例して増大すると予測され、次式が成り立つ ( $\delta$  は運動視差量)。

$$d = (D + d) \delta / 6 = \delta D^2 / 6 - \delta D$$

実験の結果、運動視差量を一定に保った場合、視かけの相対的奥行距離は、観察距離とともに増大したが、しかし、その増加の勾配は、上式から予測される距離の 2 乗に比例するものとはならないことが示された。絶対的奥行距離情報として利用されるものには、輻輳要因がある。Rivest, Ono & Saida (1989) は、輻輳角を人工的に操作することによって視かけの絶対的奥行距離 (distance) を変え、それが運動視差によって作り出された相対的奥行き量 (depth) にどのように影響するかをしらべたところ、輻輳要因は視かけの奥行に影響を与えないことが確認した。そこで、視かけの絶対的奥行距離を熟知的手がかり(ここでは、1ドル紙幣が使用された)を用いて変化させたところ、視かけの絶対的奥行距離の変化に伴って、運動視差によって作られた視えの相対的奥行が変化した。これは、還元スクリーンを用いて対象までの視かけの絶対的奥行距離を操作した事態でも確認された。視覚系は視かけの絶対的奥行距離情報を運動視差が作り出す相対的奥行距離の算定に利用しているが、その算定は輻輳要因など眼筋的手がかりに基づいてはいない。

#### 1.12. 運動視差によって透明な複数の奥行を異にする面が生じるか？

運動視差シミュレーション技法による研究では、そこに出現する面を常に不透明なものとして想定している。そこで、1つの画面上に複数の速度差をもつドットを重ね合わせて提示することが試みられた (Andersen 1989)。ドットは水平または斜め方向に運動させ、水平方向運動条件では等速度で、斜め方向運動条件では加速をつける。これを静止した観察者が観察すると、水平方向運動条件の場合には奥行を異にする複数の面が、斜め方向運動条件では後退あるいは接近する複数の面が視える、と予想される。このような方

法で透明な面を1面から5面まで提示した結果、水平方向と斜め方向の両運動条件で、3面までは奥行を異にする透明な面が出現して見えること、また重ね合わせた2群のドットの速度比を3倍まで変えて提示したところ、速度比が大きくなるにつれ透明な2面間の視えの奥行距離は増大すること、さらに出現した透明な2面の観察者に対する近/遠判断を求めたところ、そこに安定した奥行関係が出現していることが明らかにされた。速度差をもつ複数のドット群が重ね合わされていても、そこに奥行を異にする透明な面が出現することから、運動視差による奥行視では、拘束条件としてそこに出現する面を不透明なものに限定する必要がないと考えられる。

### 1.13. 運動視差とダイナミック・オクルージョンの競合

運動視差とダイナミック・オクルージョン（運動する蔽—被蔽事態）とが競合した場合、いずれの要因が優位であろうか。Ono, et al. (1988)は、CRT画面を、5区画に縦割にし、隣接した区画間で運動視差を設定し、2ないし3区画領域がひとまとまりとして、視かけ上、奥行的に定位されるように提示し、同時に、隣接した区画領域の辺縁でドットが出現あるいは消失を繰り返してダイナミック・オクルージョンを作り出した（図5）。この時、運動視差の示す奥行方向とダイナミック・オクルージョンの示すそれとの間で、そ

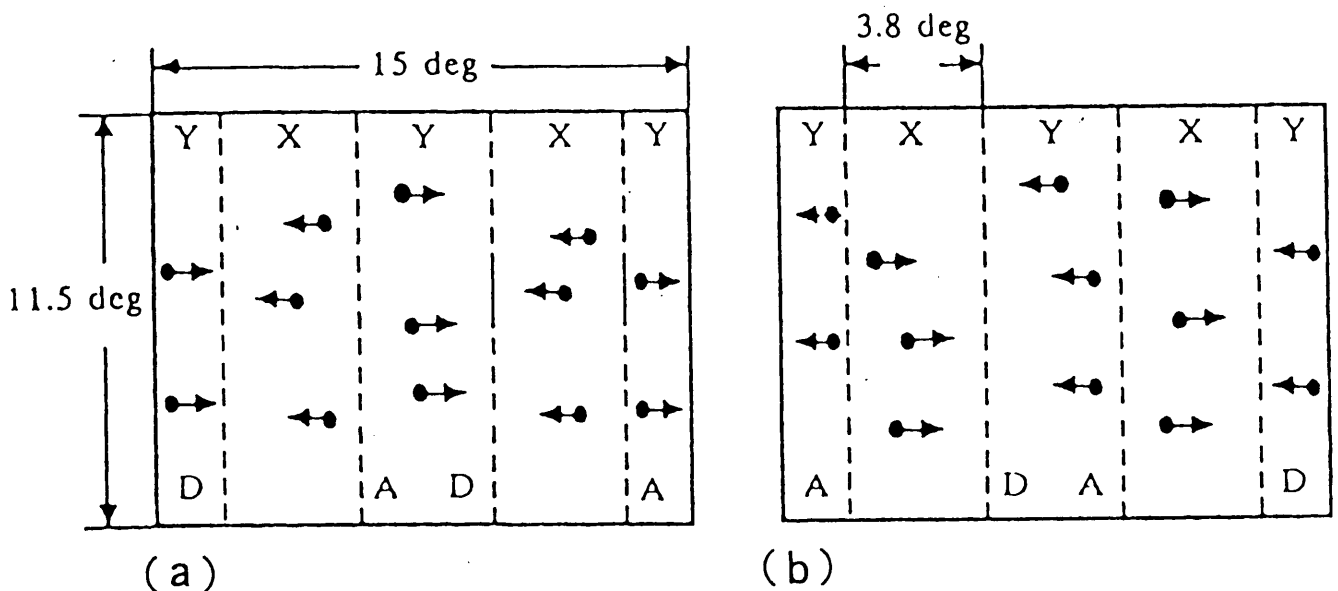


図5 運動視差とダイナミック・オクルージョンの奥行効果を調べるための刺激パターン。(a)では、観察者の頭部運動方向が右の条件、(b)では、それが左の条件を示す。図中、Dはドットの速度が遅く、Aではそれが速い。XとYの領域のドット方向は互いに反対である。(Ono, Rogers, Ohmi & Ono. 1988)



これらの要因が奥行方向に関してともに(1)一致する条件、(2)矛盾する条件を設定した。運動視差は、観察者の頭部運動と連動した条件と、観察者の頭部運動を記録し、この記録した頭部運動によって作成された運動視差を静止した観察者が観察する条件とで提示した。その結果、運動視差が示す奥行距離が小さいときには、運動視差が視かけの奥行方向を主に規定するが、運動視差が示す奥行が大きいときには、ダイナミック・オクルージョンが優位になること、また観察者静止条件では、運動視差が示す奥行方向が一義的でないので、視かけの奥行はダイナミック・オクルージョンによって規定されることなどが示された。

また、Royden, Baker & Allman (1988) は、CRT 上にランダム・ドットを提示し、その中心領域に、縦横比の大きい矩形領域を縦長線分が垂直あるいは水平方向になるように設け、この矩形領域内のドットを左から右に運動させたところ、矩形の縦長が垂直に配置されている場合（ドットの運動方向と縦長線分が直角をなす場合）には、矩形領域は周囲の背後に奥行的に定位され、矩形の縦長線分が水平に配置されている場合（ドットの運動方向は、縦長線分と平行になる場合）には、矩形領域は周囲より手前になるように定位されて見えることを見いだした。この種の視かけの奥行定位は、矩形領域の縦横比に規定されていて、ドットの運動方向が縦長線分と直交する場合には、縦横比が大きいほど、その矩形領域は周囲より背後に、逆に、ドットの運動方向が縦長線分と平行な場合には、縦横比が大きいほどその領域は手前に見えた。ドットの運動方向が縦長線分と直交する場合に働く奥行手がかりはダイナミック・オクルージョンである。この手がかりは、投影面の高さ要因あるいは網膜視差要因をも抑制するほどに強力であることが、各々の要因を抗争的条件においた事態で実験的に確認されている。

#### 1.14. 運動視差のまとめ

運動視差は、基本的には、観察者の運動によって誘導される網膜での対象の速度差をいう。運動視差についてのこれまでの知見をまとめると次のようである。

(1) 運動視差は、対象間の相対的奥行距離と観察者の頭部運動速度に比例し、対象までの絶対的奥行距離の 2 乗に反比例する。

(2) 網膜上に速度差を生じさせるには、速度の異なる運動対象を静止した

観察者が観察する場合と奥行位置の異なる静止した対象を運動する観察者が観察する場合の2通りがある。どちらの場合にも、奥行出現の方向や程度、あるいは安定度に相違はあるものの、視かけの奥行は出現する。運動視差が奥行手がかりとして有効となるために網膜上での対象の速度差が観察者の運動によって誘導されることは、必須の要件ではない。

(3) 運動視差による3次元視印象を誘導する主要な要素は、パターンが速度勾配をもつか否かである。サイン波形パターンや段階的に変化する勾配をもつ矩形パターンなどのように、網膜上での速度差に勾配が付いているモーション・パースペクティブの事態では、奥行印象は鮮明となる。これに対して、網膜上で複数の速度の異なる視対象が動いている事態では、それらは同一奥行面上を異なる速度で移動する物体として知覚される方が優位となる。

(4) 運動視差のしくみでは、網膜上での速度の速い方が、観察者からみて、前方に、遅い方が後方に定位される。網膜速度は、対象速度と観察者速度の合成で規定される。視かけの相対的奥行距離量は、運動視差量で規定され、また運動視差量を規定する際には視かけの絶対的奥行距離量が反映する。

(5) 運動視差立体視と網膜視差立体視は、空間周波数奥行感度、奥行残効、奥行対比効果について共通する特性をもつことから、それらは類似したしくみであることが示唆される。

## 2. 運動の3次元視効果 (kinetic depth effect, KDE)

### 2.1. 運動の3次元視効果

3次元形状をした針金細工をスクリーンに投影し、その陰影を観察すると、針金細工が静止した事態ではその形態を知覚できないが、それを回転させ、その運動する陰影を観察すると、すぐに針金の3次元形態が知覚できることを Wallach & O'Connell (1953) は見いだした。これは、運動にともなって生起する奥行効果であるので、運動の3次元視(奥行)効果(kinetic depth effect, KDE)と呼ばれる。

この運動の3次元視効果は、針金細工の代わりに滑らかな面からなる固体を用いると生起せず、運動する陰影は視えても、形は知覚できない。針金細工では、その陰影のある点と針金細工のある点とは、回転にともなってその位置を変えても1対1の固定した対応をもつが、滑らかな面からなる固体の場合には、陰影のある点は固体の表面の任意の点と関係づけられてしまい、

固体が回転する度に全く別の点に対応づけられ、1対1の対応を保つことができない。針金細工の陰影は、その物理的実体と対応関係を維持できるが、滑らかな固体の陰影は、対応関係を保てないために3次元形態が知覚できない。

運動の3次元視効果と運動視差の相違は、前者が正射影を用いているのに対し、後者は極射影を用いている点にある。したがって、運動視差では、原則的に平らな表面をあつかうことが可能であるが、運動の3次元視効果では平らな表面から3次元構造を知ることはできない。

Ullman (1978 a, b) は、運動の3次元視効果を計算機科学の視点から解くためには、次の2つの課題を解決しなければならないとした。その1は、時点  $t_1$  におけるある点が別の時点  $t_2$  ではどの点と対応しているかという問題（対応問題）、その2は、第1の課題で得られた情報から3次元構造を復元する課題（運動からの3次元構造復元問題）である。

## 2.2. 対応問題

Ullman は、対応問題はすべて2次元の範囲内に含まれる情報によって解決されると考えた。そして刺激が2次元的に連続して変化する時、そのコマ変化の中では、距離と形状要素が最小になるものが対応する可能性が高いと仮定する。連続したコマ変化の中で、より近く、またより似ているものが対応づけられることになる。対応の決定にあたっては、確率的な過程が導入される。すなわち、連続して変化するコマの間で、可能性のある複数の対応の中、各々の対応についての類似度が求められ、そのなかで類似度が最大になるような解が選択される。

対応を見つける場合、全体の形態とは別に比較的小さな部分間で対応がとられ、その後全体が成立するのか、あるいは形態全体が知覚され、その後部分間で対応がとられるのであろうか。図6は、比較的小さな部分間で対応がとられていることを例証している (Ullman, 1979 a, b)。図中、コマ1は実線で、コマ2は破線で示されている。もし、全体の形態がはじめに知覚され、その後で部分間で対応がなされるとすれば、車輪全体が回転しているように知覚される。またもし、はじめに部分間で対応がなされるならば、車輪の中心と外側領域はその左側に近い線分があるので半時計まわりに、その中間領域は右側に近い線分があるので時計まわりに回転して見えるはず

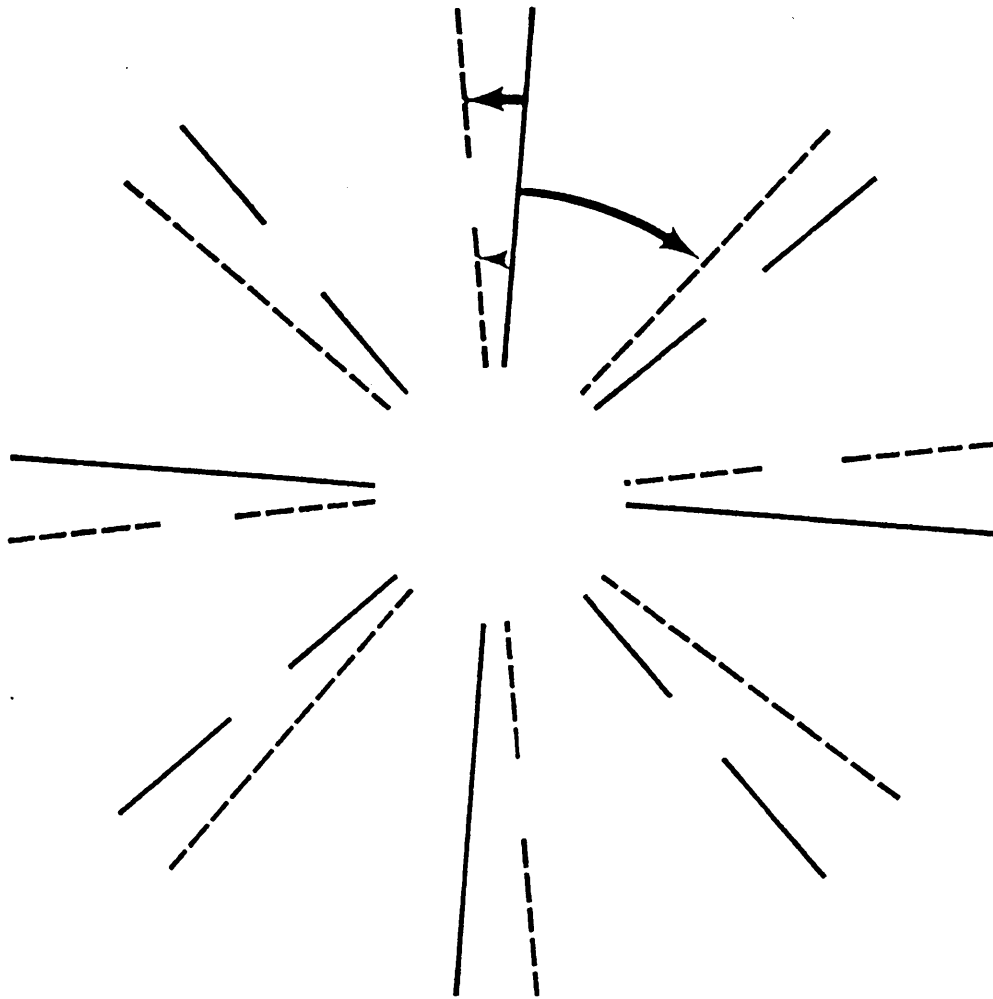


図6 仮現運動での対応問題。車輪の中心と外側の回転方向とその中間領域の回転方向とは異なって観察されることから、比較的小さい部分間で対応がとられている (Ullman, 1979)

である。観察すると、後者のように各々反対方向に回転して知覚される。

全体のなかの部分間の対応の強さ（対応強度）は、部分間の類似度とその部分間に作用する局所的な相互作用で決定される。類似度は、形、距離、明るさ、方向など人間の視覚システムの特徴性にもとづいた類似性についての一覧表によって決められる。局所的な相互作用によって知覚的分裂や融合が起こりうる場合には、これは対応関係を弱めるので考慮される。対応強度についての Ullman のアプローチは、図7に示されている。

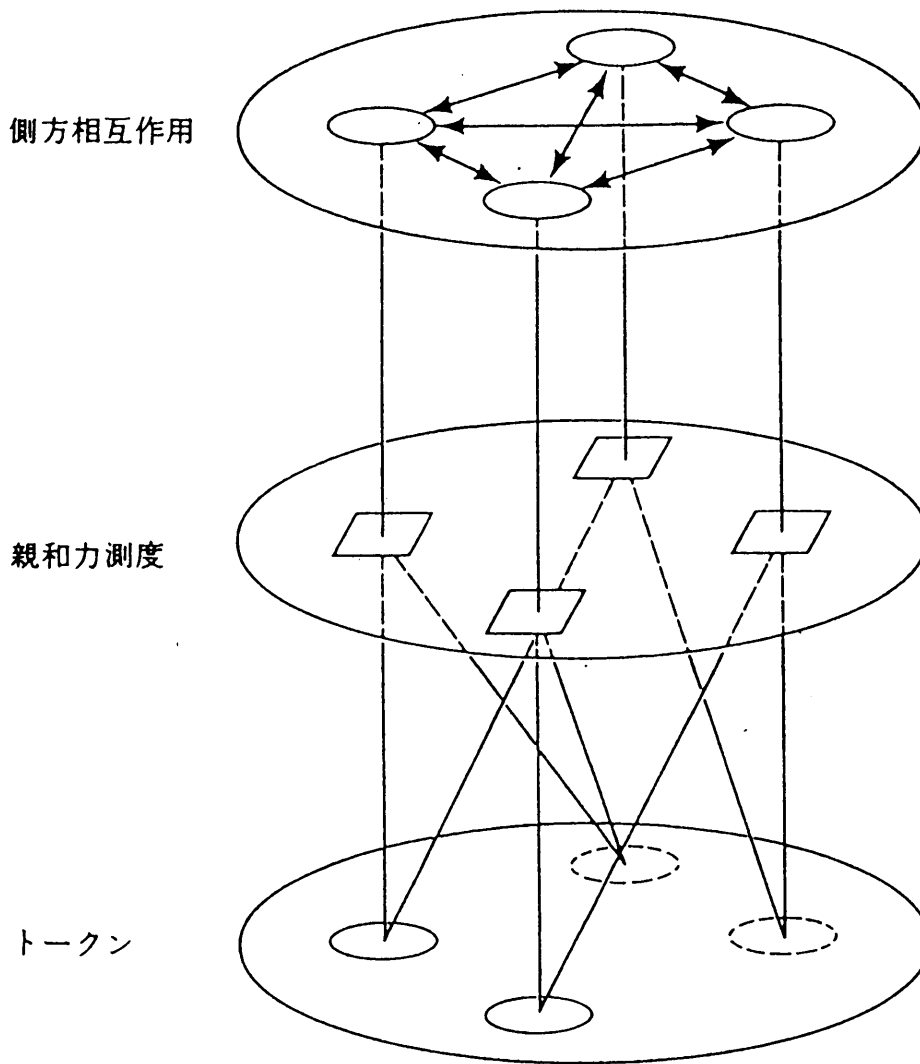


図7 対応強度を決定するための Ullman のアプローチ、全体のなかの部分間の強さ(対応強度)は、部分間の類似度とその部分間に作用する局所的な相互作用で決定される (Ullman, 1979)

### 2.3.3 次元構造の復元問題

連続的に提示された刺激間で、前述した方法で対応がとられている場合、そのデータの集合から3次元形態を復元するには、無数にある解から合理的な解を得るために制約条件を設定する必要がある。Ullmann (1979 a) は、ものの表面にある力を加えられてもその内部の各点の相互位置は変化しないという剛体性を仮定することによって、運動からの構造復元問題が解決できることを数学的に証明した。それによれば、剛体性をもつ立体物の同一平面にない4点の異なる3つの正射影的観察が与えられれば、ただひとつの三次元構造が決定できる。対応問題が解決されていれば、同一平面上にない4点を

3回観察するだけで3次元構造が求められる。まず、4点(O、A、B、C)のうち、点Oは常に座標軸(x, y, z)の原点にあるものとする。各観察から得られる情報量は、A、B、C各点の2次元座標であるから、6個の関係が得られる。3回の観察では18個の関係(関数)が得られることになる。A、B、CとOとの相対的な位置は、この3点各々についてのx, y, zの3座標軸の関係、すなわち9個の関数で決められる。回転を特定するには、回転軸と回転量を決める必要があり、これは観察1から観察2と観察3への変化で特定される。回転軸を特定するには2個の関数、回転量には1個の関数が必要で、結局、3次元回転を特定するためには6個の関数が必要となる。3次元構造を復元するためには15個の関数があればよいので、4点3回観察の方法で必要な情報量を満たす。

運動からの3次元構造復元を実行するためのコンピュータモデルは次のようなものである(Ullman 1984)。モデル作成のために以下の前提が置かれた。(1)観察された対象の3次元構造の判断を決められた時間毎に行う。その時々で構成された対象についての心的モデルは、観察当初、粗く不正確なものであるが、判断が進むにつれて改良されるものとする。(2)このスキーマでは、形が剛体特性をできうる限り選択するように判断される。(3)このスキーマでは、非剛体性に対してできうる限り抵抗する。(4)観察時間が拡張されても、情報の統合を行うことができる。(5)最終的には、正確な3次元構造を持つ形、あるいはそれに近似したものを再生する。これらの前提に基づいて作成されたモデルによると、いま、観察された対象の心的モデルをM(t)とするとき、M(t)は(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>)の3次元から構成される。ここで、(X<sub>i</sub>, Z<sub>i</sub>)はi番目の点の心的座標であり、Y<sub>i</sub>はこのモデルによって推定される奥行距離を示す。観察当初は、観察した対象の3次元性についての情報が欠けているので、最初のモデル(M(t), t=0)は2次元であり、したがってY<sub>i</sub>=0である。次に、対象が運動すると(t'), M(t)は、可能な限り構造をかえないようにしながらM(t')へと変わる。このとき、M(t')は(X<sub>i</sub>, Y<sub>i</sub>)座標で示されるが、いまだY<sub>i</sub>は未定である。Y<sub>i</sub>は次のようにして算出される。t時のiとj点の距離をL<sub>ij</sub>とすると、

$$L_{ij}^2 = (X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2$$

また、t'時のi点とj点の距離をl<sub>ij</sub>とすると、

$$l_{ij}^2 = (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2$$

スキーマは形の構造を可能な限り変えないように推定するという前提を取る  
ので、 $L_{ij}$  と  $l_{ij}$  はできうる限り近似値をとるように  $Y_i$  の値を選択せねばな  
らない。そこで、 $L_{ij}$  と  $l_{ij}$  の間の差の測度を  $D(L_{ij}, l_{ij})$  とすると、 $Y_i$  の  
値を決定するには、

$$\sum_{ij} D(L_{ij}, l_{ij})$$

を最小になるように演算すればよい。このようにして、 $Y_i$  の値が決定されれ  
ば、 $(x_i, y_i, z_i)$  が新しいモデル  $M(t')$  となり、レジスターされる。こ  
うして以上の手順が反復される。

Ullman は、この 4 点 3 回観察のコンピュータモデルが、人間の運動による  
3 次元構造復元過程と質的に類似すると主張する。しかし、これはコンピュ  
タ・ビジョンを想定したときのアルゴリズムのひとつで、人間の視覚シス  
テムの処理過程とは異なるものであろう。

## 2.4. KDE の成立に関わる諸変数

### 2.4.1. 運動成分

KDE を成立させる要因については、次のような仮説が Braunstein & An-  
dersen (1984) によって提唱された。(1) ドットが水平方向に運動する場合、  
水平方向の速度成分がサイン波をもって運動するときには、それらは一定の  
速度で奥行方向に回転するものとして知覚される。(2) ドットが水平方向に運  
動する場合、垂直方向の速度成分に勾配があるときには、それらは凸または  
凹状の 3 次元的な波形をもつものとして知覚される。(3) 同一領域内で反対方  
向に運動するドットがある場合には、それらは前面と後面の両面をもつもの  
として知覚される。実験では、上記の 3 要素が独立に操作され、図 8 のよう  
に、CRT 上に提示された。実験の結果、水平次元 (X 次元) 上でのサイン波  
的速度成分が、奥行的 (立体的) 形状の知覚の可否に最も大きい効果をもち、  
また、垂直次元 (Y 次元) 上での速度成分は視えの奥行量を規定した。

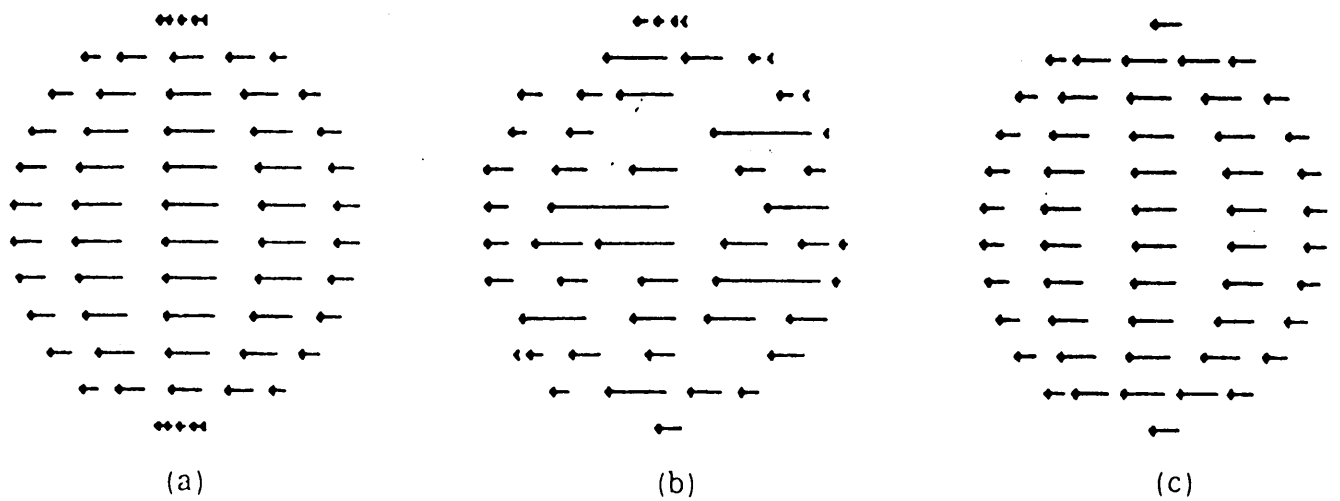


図8 運動の奥行効果を生じさせる速度勾配成分の分析。図中、(a)は速度勾配成分中、垂直方向に一定比率の速度勾配をもつ。(b)同様に、垂直方向にランダムな速度勾配をもつ。(c)垂直方向には、速度勾配はもたない。(Braunstein & Andersen, 1984)

#### 2.4.2.KDEにおける剛体性、凝集性

運動による奥行効果 (KDE) によって生み出された対象は、3次元の対象ならば具備している3つの属性を有しているのであろうか。3つの属性とは、凝集性 (coherence、ディスプレイ上のドットが、すべて一つの対象を生み出しているように見えるか否か)、奥行程度 (出現した奥行 (立体) の程度)、剛体性である。Doshier, Landy & Sperling (1989) による実験では、形態 (球形と円筒形)、ドットの分布 (ドットの分布が面で一様あるいは容積で一様)、ドット数、および遠近性要因 (点投影あるいは平行投影) の4要素が操作され、先の3属性についての評定が5段階尺度で求められた。その結果、形態要素は、剛体性に影響するが奥行の程度には無関係であること、点投影条件 (遠近性要素) は、平行投影条件と比較すると、剛体性を幾分低めるが奥行程度は高めることが明らかにされた。

これまで KDE 効果として見いだされた結果は、これら3つの属性のどれについて求められたものかを明らかにする必要があるし、また人間の知覚ではこれら3つの属性が関連していることを考慮すると、剛体性を唯一の拘束条件とする KDE についての計算機理論は、人間には直接当てはまらないことが示唆される。

#### 2.4.3.KDEに有効なパターンのドット数

KDE とパターンを構成するドット数との関係について、ランダム・ドット



で構成されたパターンをY軸を中心として回転提示してKDEを作り出し(図9)、そこに出現する立体の正確さを測度として、KDEの効果の程度がしらべられた。それによれば、パターンを構成するドット数が少ないとKDEは有効ではないこと、またドットの肌理密度要因はKDEに無関係であることが示された(Sperling, et al. 1989)。KDEでは運動要素のみが主要因である。この場合、KDEに有効と考えられる運動要素は、光学的流動(同時的速度ベクトル)と特定のドット間の距離変化の2種類が想定されるが、どれが主たる手がかりになっているかについては、いまのところ不明である。

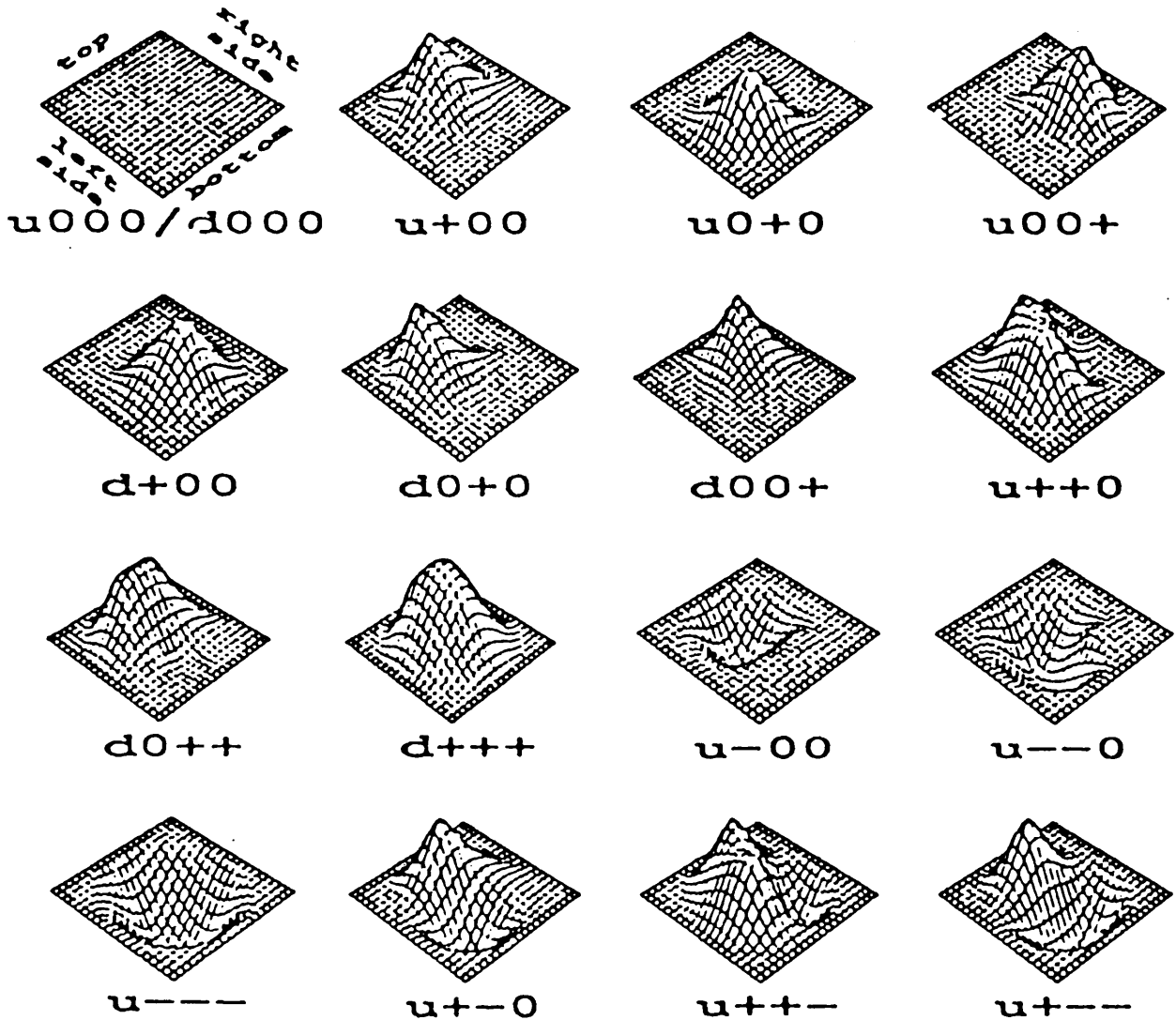


図9 運動の奥行効果を分析するための刺激条件とパターン。パターンはランダム・ドットで構成され、視かけ上、三角形の山(+)あるいは谷(-)に見える。図中、uは三角形の頂点が観察者からみて凸ように、dは凹ように配置されていることを示す(Sperling, et al, 1989)。

#### 2.4.4. フレーム数、回転角度、SOA、ISI

運動の3次元視効果とは、2次元の対象が奥行方向に回転運動した時に知覚される立体効果をいうので、そこに関係する要因は、何回フェーズが変化したかその回数(フレーム数)、1回当りの回転角度(垂直軸を中心とした角度)、SOA、ISI、および対象の形態である。これらの要因を組み合わせた刺激をCRTに提示し、観察者には対象の3次元としての剛体性(rigidity)を10ポイントスケールで評定させた実験(Todd, et al. 1988)によると、次のようである。(1)もっとも高い3次元剛体性が得られるのは、1回の変化角度を小さく、かつSOAを短くした事態で変化フレーム数を多くした条件である。この時、形態要素としては、図10に示されたように、対象がドットよりは線で構成されていた方がよい。しかし、ドットや線の数量は無関係である。(2)比較的高い剛体性が得られるのは、対象が不透明な面をもっている場合で、この時には1回当りの回転を小さく、かつISIを短くとした条件が最適である。(3)剛体性が比較的に乏しいのは、SOAを長く、1回当りの回転角度を小さく、かつISIを小さくとした条件である。この条件の時は、変化フレーム数は剛体性の知覚に無関係である。(4)剛体性の知覚がもっとも得にくいには、SOAを長く、1回当りの回転角度を大きく、かつ対象が複雑な形態をもつ条件である。

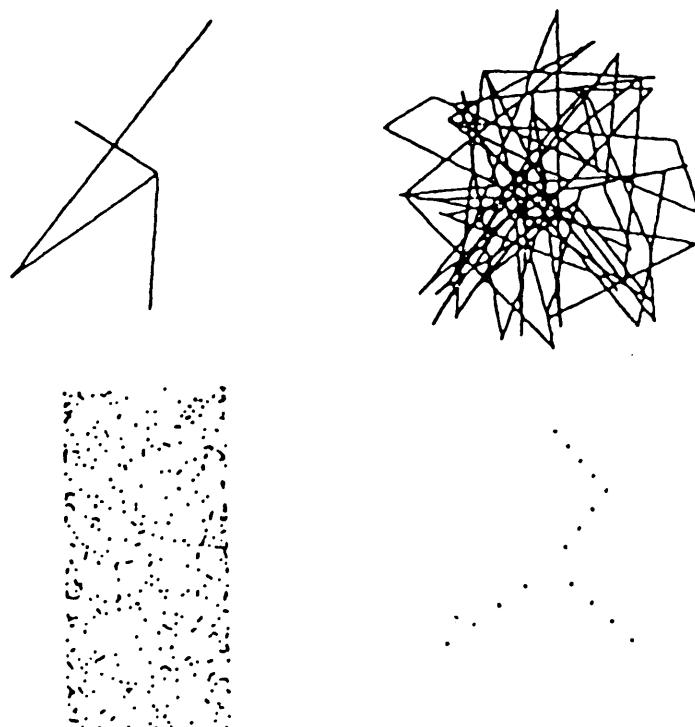


図10 運動の奥行効果に効果的な形態要素を調べるためのパターン (Todd, et al, 1988)

#### 2.4.5. 遠近法的、非遠近法的、肌理密度の要因

運動対象が担う奥行情報は、平行投影事態 (parallel projection) で生じる非遠近法的変化、点投影事態 (polar projection) で生じる遠近法的変化、そして蔽一被蔽関係の連続する変化に大別できる (Braunstein 1976)。針金でつくられた3次元物体を回転させたとき得られるスクリーン投影像をCRT上にシミュレートして提示して、平行投影条件と点投影条件における立体効果を比較した実験 (Shoji, Sumi & Fujita 1980) によれば、3次元的な見えは、点投影条件で多く出現し、運動対象の視かけの反転は平行投影でより多く生起する。これは遠近法的要因が運動の立体効果に重要であることを示す。

輪郭をもたないパターンでの蔽一被蔽要因については、Andersen & Braunstein (1983) によって吟味された。輪郭をもつパターンの場合 (図 11)、静止条件でも一方の5角形が移動して他方の5角形の背後に動いたことがわかるが、輪郭を持たない場合には、蔽一被蔽関係は全く知覚できない。しかし、5角形のドットを一団にしてシフトさせると輪郭を欠いていてもそこに蔽一被蔽関係が浮かび上がる。この効果 (kinetic occlusion) は、ドットの密度や重なるドットの数によるよりは、ドットを構成する形の大きさや重なる領域の大きさによって強く影響される。これは、奥行の順序を知るには有効であるが、相対的奥行距離や立体性の手がかりとしては効力が小さい。

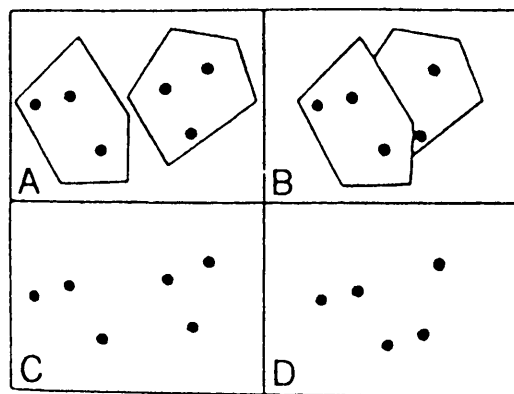


図 11 ダイナミックな重なり (dynamic occlusion) をしらべるための刺激例。(Andersen & Braunstein 1983)

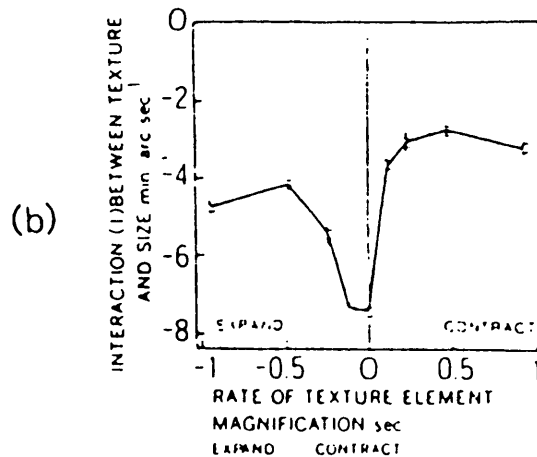
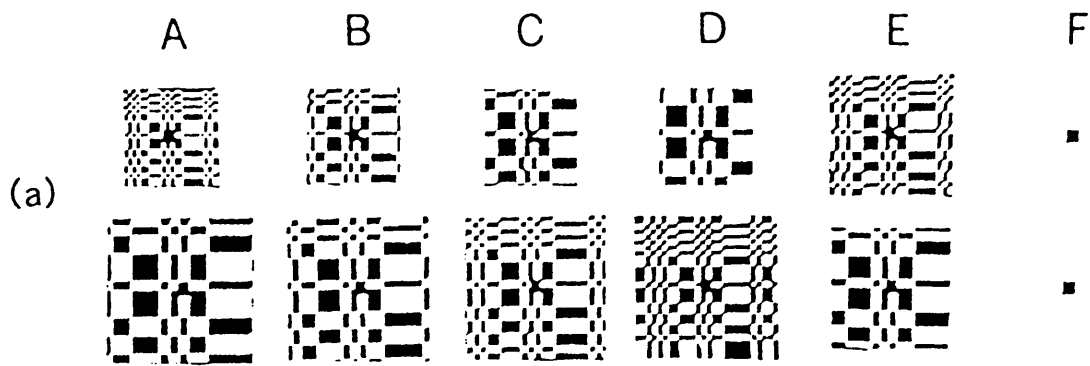


図 12 (a)肌理要因と矩形の大きさ要因の変化パターン例。  
 (b)肌理要因と大きさ要因の相互作用効果。(Beverley & Regan 1983)

KDE と同様に、大きさや肌理要因の連続的変化は、対象を奥行方向に運動するように見えさせる。図 12 a に示されたように、肌理をもつ矩形を CRT 上に提示し、矩形の大きさと肌理要因とを各々がともに縮小・拡大、あるいは各々が相反する方向に変化させ、大きさあるいは肌理要因の連続的変化への順応によって生じる奥行運動残効量を測定した実験 (Beverley & Regan 1983) によれば、大きさ要因は、単独でも強く奥行方向への運動効果を生起させるが、大きさ要因の変化に同方向の肌理要因の変化が加えられても奥行方向への運動効果は大きくなり、逆にその効果は減弱された。この種の運動効果は大きさ要因と肌理要因の単純な加算的総和としては表されないことを示す。これらの関係を表すと次のようになる。

$$A(S+T) = AS + AT + I$$

ここで、 $A(S+T)$  : 大きさと肌理の両要因が変化したときの奥行運動残効量  
 $AS$  : 大きさ要因が単独で変化したときの残効量

- A T : 肌理要因が単独で変化したときの残効量  
 I : 両要因の相互作用

この式から、

$$I = A S + T - A S - A T$$

となり、これにもとづいて、(I)をデータから計算し図示すると図 12 b が得られる。この図からも明らかのように、(I)が最大になるのは肌理要因がゼロの時であることがわかる。

#### 2.4.6. 形態的要因

一般に、球や楕円体のように滑らかな輪郭線を持つ物体は、運動の 3 次元視効果を生じさせにくい (Wallach & O'Connell 1953)。しかし、図 13 に示されたような 2 個の楕円体を用い、その回転位置の組合せを変えて提示すると、2 個の対象が相互に交差 (intersection) し、かつ、互いに他を一時的にも遮蔽するパターン (図 13 b) で強い奥行効果が生じる (Todd 1985)。さらに、物体の表面の明るさと肌理分布の要因についてみると、回転する物体表面の明るさあるいは肌理に非均質性がある場合には、均質条件に比較して非均質条件の方が強い奥行効果があらわれる。

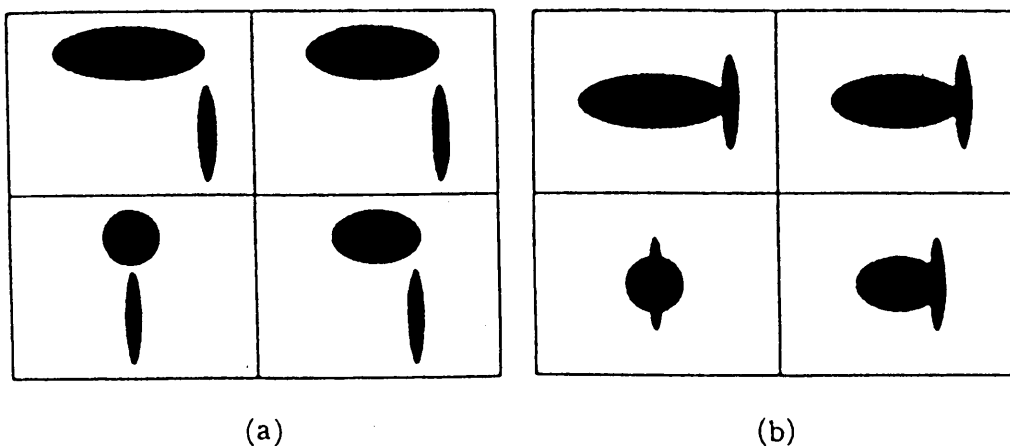


図 13 運動の奥行効果を見るための 2 種類の刺激布置 (Todd 1985)。

#### 2.4.7. 認知的要因

KDE は推理あるいは問題解決のプロセスに基づくのではないかと考えることができる。これによると、まず、回転する刺激は知覚システムにどんな事象が生起しているかについて問いを投げかける。次に、その事象に適合する仮説が提示される。この場合、前額に平行に、長さや方向が共に変化する

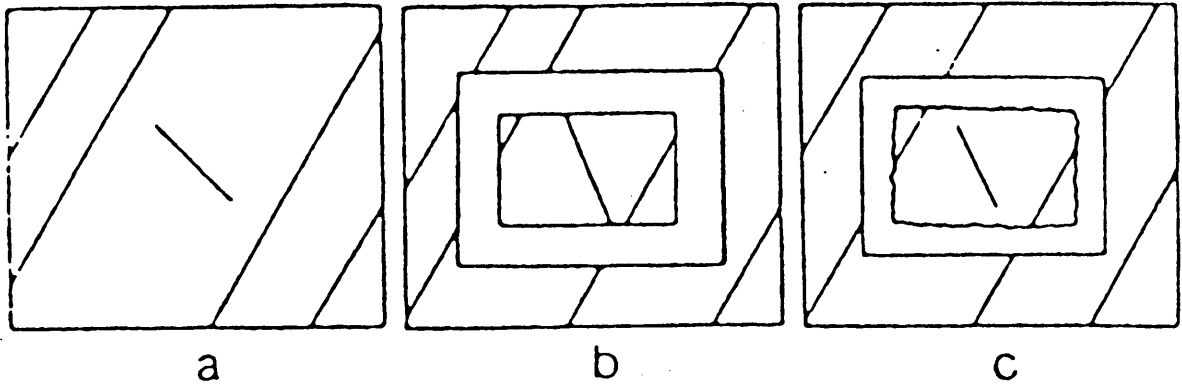


図 14 運動の奥行効果 (Rock & Smith 1981)

る刺激が存在するという仮説と奥行方向に回転する一定の長さの物体があるという仮説が成り立つ。どの仮説が採択されるかは、その仮説の適合度によるが、刺激事態が多義的な場合には、仮説の選択は好みに委ねられる。Rock & Smith (1981) による実験は、図 14 のような矩形枠の中心で斜線が方向と長さを変えて反復運動するようにして設定された。観察では、条件 a、c は斜線が奥行方向に運動するように知覚されるのに対し、条件 b では、斜線は矩形面上に留まり、しかも前額平行面上で回転するようにはしか見えなかったという。

KDE にとって運動対象がひとつの「まとまり」として知覚されることが重要であることは、対象が運動するとき、全体を構成する各部分がどのようにまとまろうとするかをしらべた実験 (Gillam & Grant 1984) でも明らかにされる。CRT 上に図 15 のようなパターンを Y 軸を中心として回転して提示し、2 線分が同方向に運動するかあるいは相互に反対方向に運動して見える

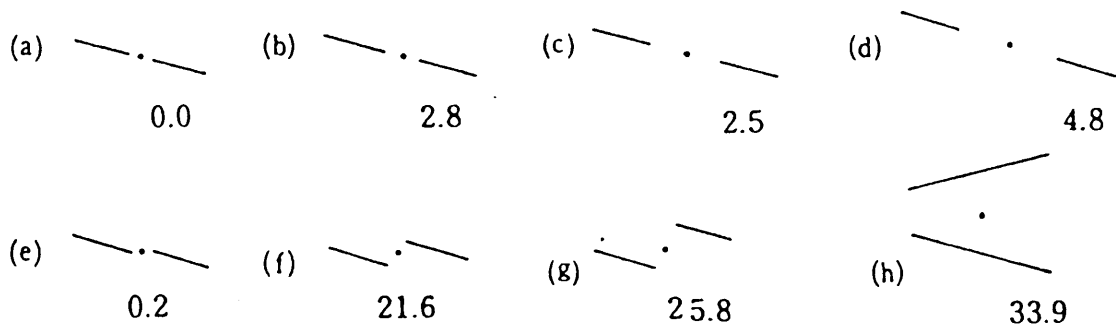


図 15 運動による「まとまり効果」をみるための刺激条件、数値 (秒) は両線分が非一体的運動をするように視えた時間 (Gillam & Grant 1984)

かを求めたところ、線分間の間隔距離が短いほど「まとまり」効果が高く、また、2線分が直線上にあるか否かに関わらず、相互の近縁性のみがこの効果を規定していた。

### 3. ステレオキネティック効果 (stereokinetic effect)

同心的布置をもつパターンをゆっくり回転させると、そこに円錐あるいは紡錘形状や凹形の立体が知覚され、ステレオキネティック効果と呼ばれる。Wilson, Robinson & Piggins (1983) によれば、これはパターンの回転に眼がその輪郭を追従できず、そのため回転についての手がかりが縮減され、代わりに、パターンの回転が運動視差を生み出し、その結果、視覚システムが3次元形を作り出すと説明される。

#### 3.1. ステレオキネティック効果を規定する要因

遠近法的要素、同心パターンでの離心率、同心パターンと非同心的パターン

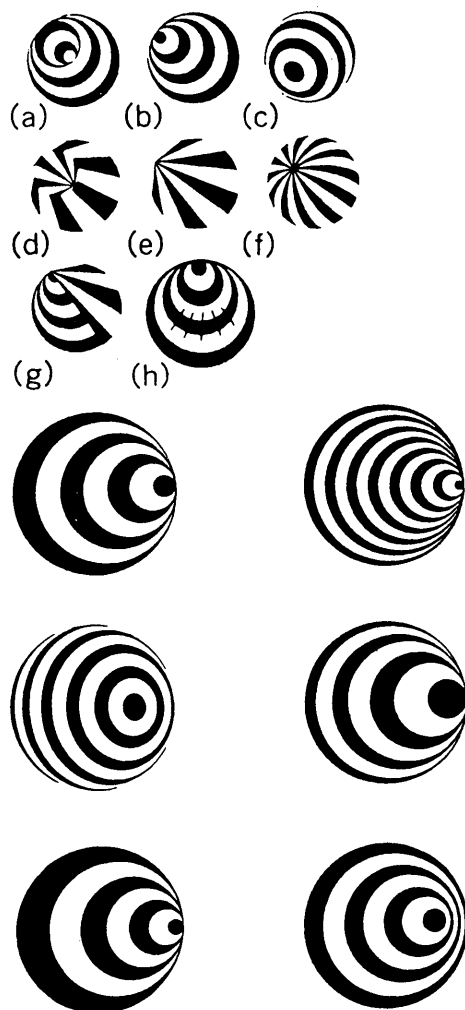


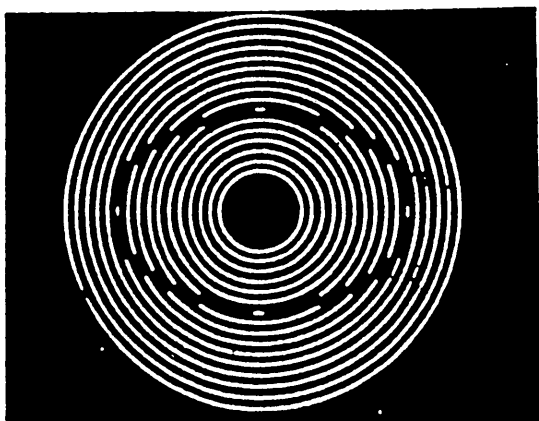
図 16 ステレオキネティック効果 (Stereokinetic effect) を示す刺激パターン例。  
(Wilson, Robinson & Piggins 1983, 1986)

(ストライプパターン)を含む種々のパターン(図16)についての立体出現の程度を観察した研究(Wilson, Robinson & Piggins 1983, 1986)によれば、立体出現を規定する主たる要素は、同心的布置でありしかも離心率が大きいほど、立体効果が強く、また平面画像の奥行視では常に重要な手がかりである遠近法的要素は、ここではそれほどの影響力をもっていない。

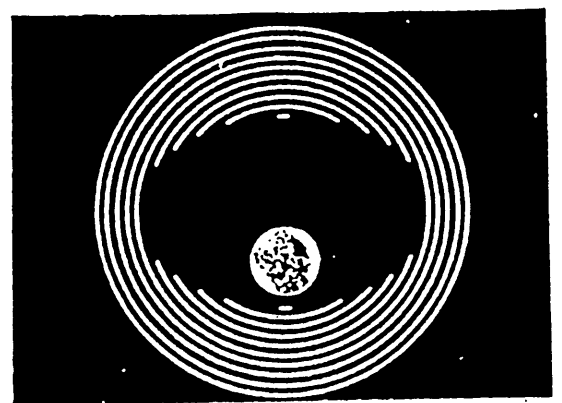
一般に同心的に配され多重円を前額に平行に回転させると、同心の中心と周辺では運動速度の差が生じ、しかもその離心率を高めると、それにともなって運動速度差も複雑に変化する。これが、運動視差として働き、ステレオキネティック効果を生じさせると考えられる。

### 3.2. 主観的輪郭をもつパターンによるステレオキネティック効果

主観的輪郭がステレオキネティック効果を生み出すことができるかについては、図17のようなパターンで検討された(Bressan & Vallortigara 1986)。それによればパターンが回転すると、図17 aでは楕円形が、bでは傾いた円錐形が出現することが観察された。主観的輪郭でステレオキネティック効果が生起することは、この種の効果が一種の運動視差によるとの説明に疑問を投じるものとなる。



(a)



(b)

図17 主観的輪郭によるステレオキネティック効果。回転させて観察すると、(a)では、奥行方向への傾きをもつ楕円が、(b)では灰色の頂点をもつ傾いた円錐が、各々知覚される(Bressan, Vallortigara, 1986)



### 3.3. ゲシタルトの原理との関連

楕円図形を前額に平行に回転させながら観察すると、はじめは3次元的に傾いた円盤が視えるが、そのまま観察を続けると、飛行船のような円錐立体が視えてくるのが、Bressan & Vallortigara (1987 a) によって報告された。同一のパターンがステレオキネティック効果によって2種類の3次元的形を生じさせるのである。順応あるいは一種の疲労のような相互に交替する神経生理学的過程が、この種の多義的な知覚を説明するものとして想定されている。

また、図 18 a に示されたようなパターンをゆっくりと回転させると(6回転/分)、bのように、土星が回転しているように視えるという(Bressan & Vallortigara 1987 b)。同様に、cでは卵に2つのリング(輪)が傾いてかかっている、スムーズなリングは傾いているのみであるが、ギザギザのあるリングは回転しているように見え、dでは、王冠が出現し、その王冠の縁飾りの手前の部分は知覚的に補完されて視える。ステレオキネティック効果には、ゲシタルトの簡潔性の原理が働いている。

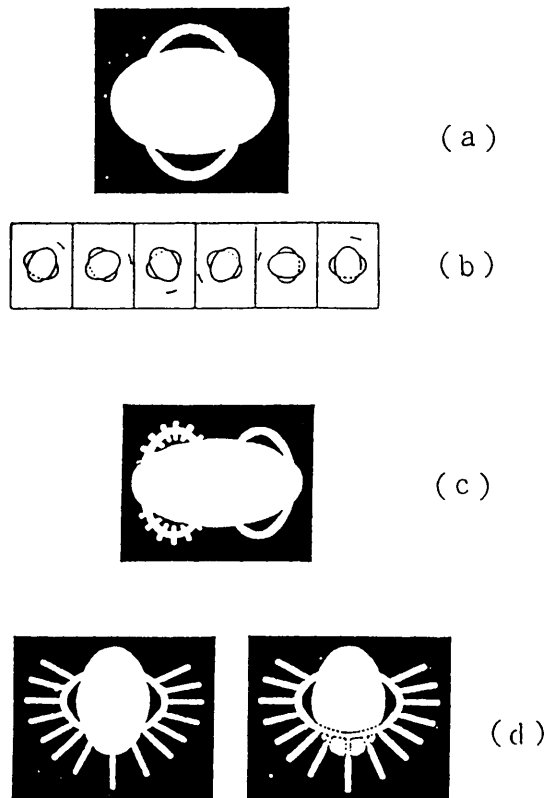


図 18 ステレオキネティック効果を生じさせるパターン(a)回転させて観察すると、(b)に示したようにリングをもった土星が回転して視える、(c)卵に2つのリングがかかり、スムーズなそれは静止、ギザギザのものは、回転して視える、(d)王冠が出現し、その縁飾りは、補完されて視える (Bressan & Vallortigara, 1987)

### 3.4. ステレオキネティック効果における剛体性の拘束

一般的に、3次元の空間内で運動する2次元の形は、理論的には、無数の変形を生じるので、知覚される形は、一義的には決まらない。この多義性を解決する方略として、観察された対象は剛体であるということを仮定しなければならない (Ullman 1984)。しかし、これに対して、2次元形を前額に平行に回転させたとき、そこに出現する3次元形が剛体にならず、歪んだり、あるいは多義的に見えたりする事実から、この種の多義性が生起するのは、はじめに、大きさ変化に反応するフィルターが刺激され、次いで、これにもとづいて運動による奥行出現の段階が作動するためとも考えられる (Braunstein & Andersen 1984)。これによれば、ステレオキネティックにおいて、複数の3次元の形が出現し、それが反転して見える時には、何らかの2次元形が先導的に出現することが予測される。

白い楕円形を回転させたときに出現する様々な見えの形の観察報告 (Valloirtigara, Bressan & Bertamini 1988) によれば、2種類の3次元形 (奥行方向への傾きをもつ円盤形と奥行方向へ傾いた卵形) の交替の合間に、平板な楕円形と平たいアメーバ様な形が出現するという。とくに円盤には、アメーバ様な形が、卵形には楕円形が先導的に出現し、また、円盤から卵形へと直接変換する現象もしばしば観察された。3次元形の出現に先立って2次元形が出現する事実は、大きさ変化に反応するフィルターの関与を支持する。しかし、直接に3次元形間での交替もみられることから、ステレオキネティック現象には、他の重要な要因の関与も否定されていない。

### 3.5. ゲシュタルト簡潔性原理との関連

ステレオキネティック効果は、楕円形に典型的に示されているように、輪郭に滑らかな曲線要素をもつ場合に生起する。視覚システムは、この種のパターンが前額に平行に回転して提示されると、運動が観察者からみて輪郭に直交するときには刺激の運動方向と長さを検出できるが、しかし輪郭に平行に運動しているときには、輪郭の滑らかな拡張/収縮が検出できない。したがって、前額に平行に回転する2次元パターンは、網膜面では方向と長さが連続的に変化するものとしてとらえられ、運動の3次元視効果と同様な事態が生じる。ステレオキネティック効果は、このように運動の3次元視効果と関連させて理解されている (Ullman 1984, Wilson, Robinson & Piggins 1983)。

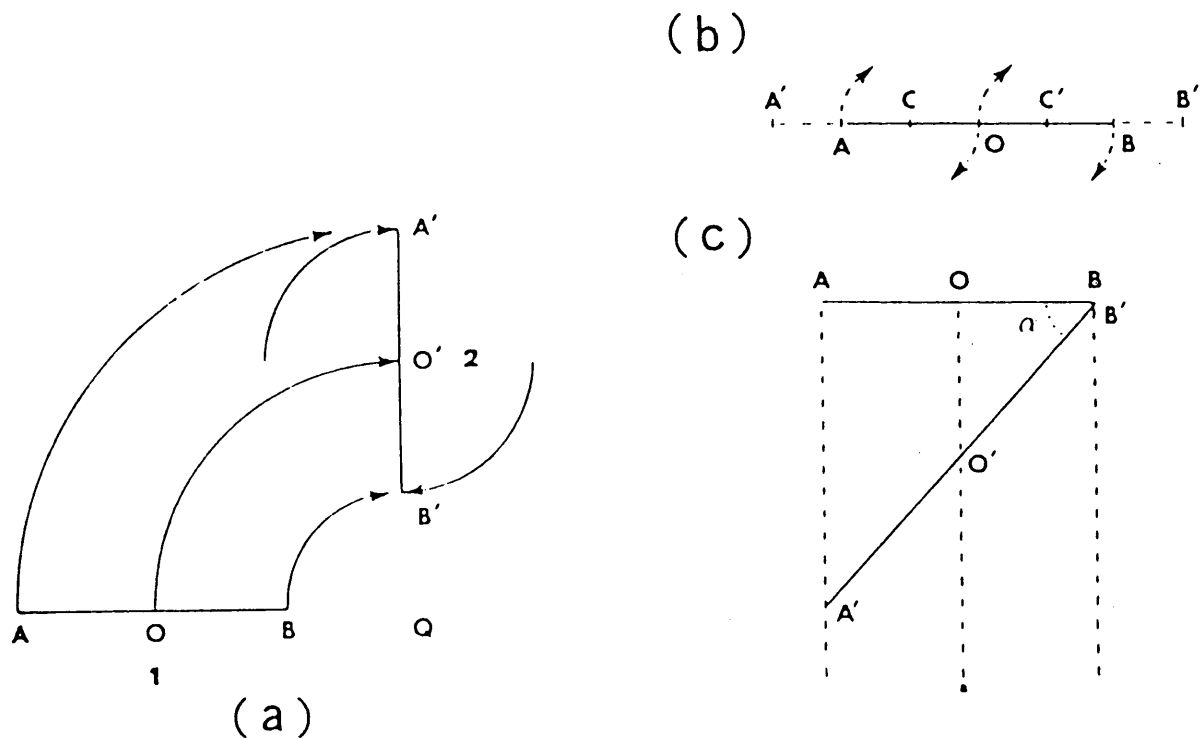


図 19 ステレオキネティックの効果を説明するための概念図。(Zanforlin & Vallortigara, 1988)

一方、輪郭に曲線要素が存在しない直線でも、ステレオキネティック効果が出現する (Vallortigara, Bressan & Zanforlin 1986, Bressan & Vallortigara 1986)。そこで、図 19 a に示されたように、直線の延長が前額に平行に回転する円盤の回転の中心上を通るように直線を配置し、円盤をゆっくりと回転させてみると (Zanforlin & Vallortigara 1988)、はじめは、直線が円盤の中心にそって回転しているように見えるが、そのうちに円盤が静止し、直線が円盤から浮き上がるように見える。この後、直線がその中点を中心として回転しながら、同時に円盤の中心にそって移動しこの時、直線は奥行方向に傾き、その長さも拡大したように感じられる。また、奥行方向の傾きは、円盤の周辺に近い直線の先端が観察者に対して手前になるように出現する。この現象のメカニズムは、次のように分析される (図 19 a)。Q を中心として直線 AB が回転したとき、A と B の角速度は等しいが、1 次速度は異なる。AB の中点 O は運動する A と B の 1 次速度の平均となるので、O を中心としたときの A の速度は B のそれと等しくなる。ここで、A と B の間の 1 次速度差を最小にする力 (簡潔性原理) が働き、直線は O を中心として回転しながら Q の廻りを移動するように見える。直線が O を中心として回転して見えるようになると、O と A あるいは O と B の間の平均的 1 次速度は OA の中点 C

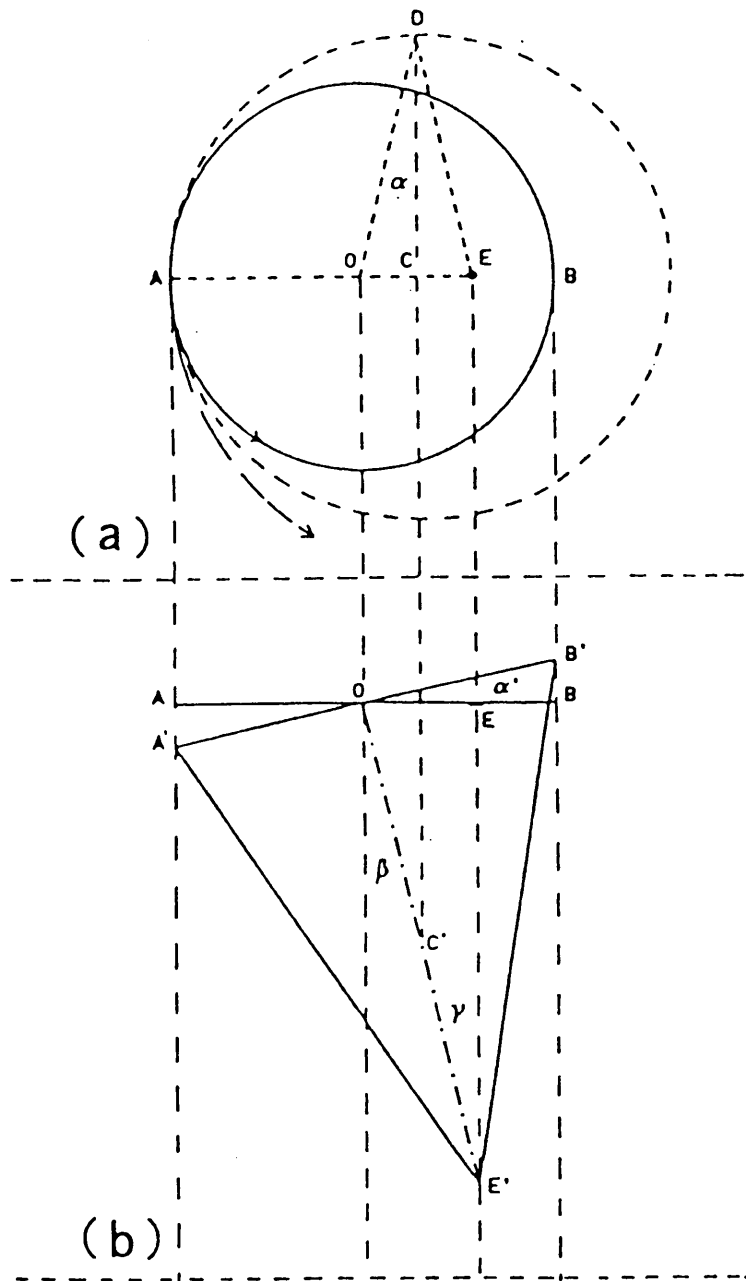


図 20 (a)中心よりはずれた位置にあるドットをもつ円のステレオキネティック効果。実際の回転の中心(O)と視かけの回転の中心(E)をもつので、OとEを中心とした楕円(点線で表示)が生じる。(b)視かけの楕円の直径(A'B')は実際の円の直径(AB)より長くなるので、見かけ上、傾く。(Zanforin 1988)

あるいはOBの midpoint  $C'$ との距離ACあるいは $BC'$ で与えられる。物理的な角速度はすべての点で等しいので、1次速度は回転の中心からの相対的距離で規定される。したがって、Aでの視かけの1次速度は距離 $AC+AO$ 、すなわち $A'O$ となる。Bでの視かけの1次速度も同様である(図19b)。Cを中心とした回転は、Cでは2つの等しい1次速度が互いに反対方向に働いているので、生起しない。視かけの距離 $A'B'$ は、理論的には、ABの50%増となる。

物理的距離と視かけの距離とが一致しない場合には（図 19 c）、奥行方向に  $\alpha$  度傾斜させることによって知覚的解決を計らなければならない。この仮説を実験的に検証するため、線分の視かけの長さの測定、あるいは線分を回転の中心から逸脱するように配置（非放射条件）し、ステレオキネティック効果の出現の程度がしらべられた。線分の視かけの長さは、ほぼ理論値と一致すること、非放射条件ではステレオキネティック効果が生起しにくいことが確認され、仮説を支持する結果が得られている。

さらに、中心よりはずれた位置にドットをもつ楕円あるいは円を回転させたときに生起するステレオキネティック効果についてもしらべられた (Zanforlin 1988)。それによれば、中心よりはずれた点を内部にもつ円盤がゆっくりと回転すると（図 20）、O を中心とした実際の回転と、E を中心とした視かけの回転が生起し、これを知覚的に解決するために、簡潔性の原理によって視かけの楕円回転が生じる。この時、実際の円の直径と視かけの楕円の長軸の長さが異なるので、楕円は奥行方向に傾くことによって知覚的解決を計る。この仮説によれば、偏心度あるいは円盤の直径から浮きでる立体の高さを予測することができるが、実験結果は仮説をよく支持する。

### 3.6. 運動に伴うマイクロなレベルとマクロなレベルの変化

ステレオキネティック効果を生じさせる基本的要因は、その種の効果を生じさせる刺激のマイクロな変化によるのか、あるいはマクロな変化に依存するのだろうか。マイクロな変化とは、刺激を構成する要素の運動に伴う明るさ変化であり、マクロな変化とは刺激の形態要素そのものが運動にともなって変形することを言う。マイクロな変化要因を完全に除去した場合にもステレオキネティック効果が出現するか否かについては、図 21 に示されたようなパターンをドットで構成し、あたかも図形が回転するようにドットをシフトさせることによって検討され (Prazdny 1986)、その結果、ステレオキネティック効果が生起することが確認された。また、ランダム・ドット・ステレオグラムに描かれた図形が回転するように連続的に提示した場合にも、同様に、ステレオキネティック効果が生じた。これらの結果から、この現象は、マクロなレベルでの形の変化が基本的要因であることが明らかされている。

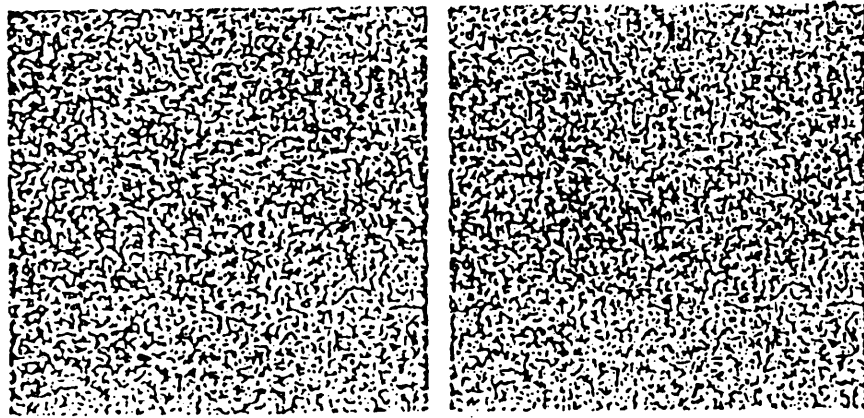


図 21 ステレオキネティック効果を生じさせるステレオ・シネマトグラム。ここでは、対象は2次元面に存在するのに、3次元の針金物体が回転して見える。(Prazdny, 1986)

#### 4. フリッカーの奥行効果 (Flicker Induced Depth)

ドットをフリッカーさせると、フリッカー領域は非フリッカー領域に較べて奥行的に後退して見える (Wong & Weinstein 1985)。これはフリッカーによる奥行効果と呼ばれる。

##### 4.1. フリッカーの奥行効果を規定する要因

この現象を規定している要因を分析した研究 (Wong & Weinstein 1985) によると、フリッカー領域が比較的広く (視角 1.35 または 0.68 deg)、フリッカー頻度が比較的高い条件 (6.3 または 7.1 Hz) では、奥行分離がもっとも

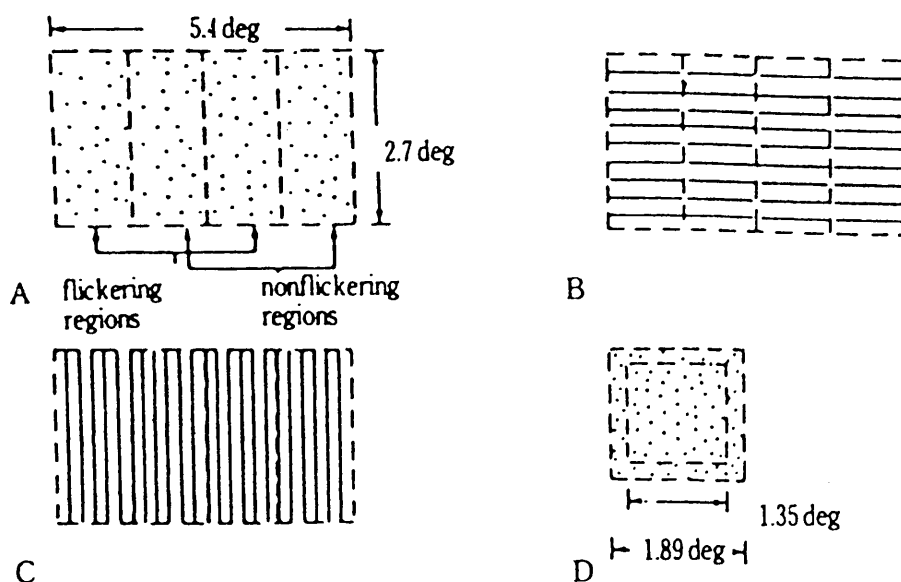


図 22 フリッカー運動による奥行効果 (Wong & Weinstein 1985)

大きく、フリッカー領域の輝度が非フリッカー領域の輝度の2倍にしてもフリッカー領域は奥行的に後方に見え、さらに temporal modulation (25-100% の間で変化) が減少すると奥行的分離は小さくなる。また、交互にフリッカーと非フリッカー領域 (図 22) を設け、フリッカー頻度を 3.6-12.5 Hz の範囲内で操作し、奥行分離の最大になるところを求めると、最適値は 6 Hz 前後となる (Wong & Weistein 1985)。

#### 4.2. 図-地分擬との関連

視野を構成する最も基本的要素である図と地の分擬を生じさせる要因には、大きさ、明るさ、色、シンメトリ性などが有り、さらに運動要因や網膜視差要因もあげられる。とくに、2つの領域に存在する刺激要素 (ドットなど) の運動方向や速度の相違は、図-地分擬を生じさせる (Frost & Nakayama 1983, Julesz 1971)。図 23 のように、Rubin の反転図形の各領域内のドットをフリッカーさせると、フリッカーさせた領域は「地」となり、し

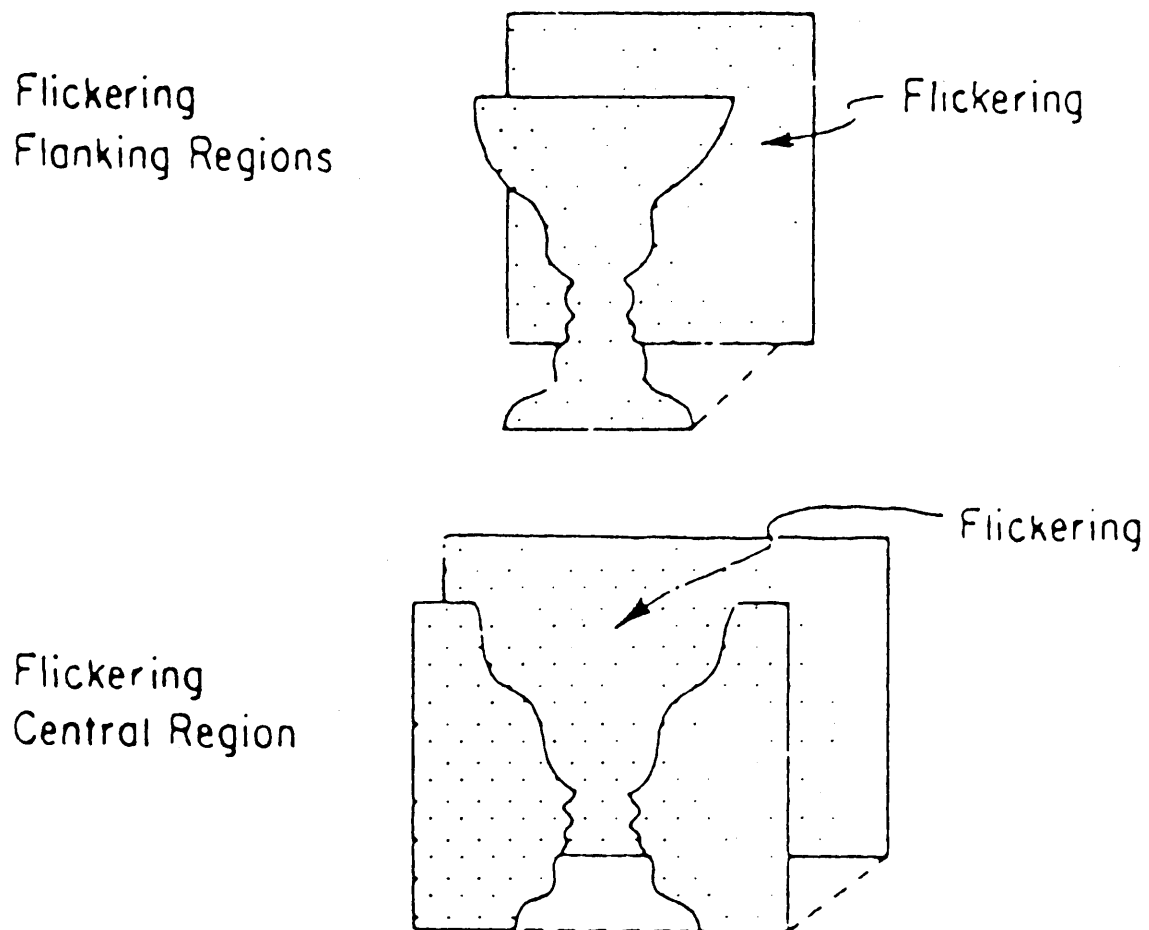


図 23 フリッカーによる図-地分擬 (Wong & Weistein 1987)

かも背後に後退して見える (Wong & Weisstein 1987)。「地」と見えるための最適なフリッカーの点滅頻度は、6.3ないしは8.3 Hzであった。一般に、図形間に相対的な速度差がある場合、そこに奥行の差が出現する。フリッカーと図-地分擬現象は、この種の領域内の要素の相対的運動速度による奥行出現と関係がありそうであるが、今後の検討が期待される。

## 5. 光学的拡大・縮小による奥行効果

スクリーンの背後で刺激を拡大あるいは縮小させると、刺激の大きさが変化したとは知覚されず、対象が奥行方向に運動して見える。これを光学的拡大・縮小による奥行効果と呼ぶ。

### 5.1. 「大きさ変化」特徴検出器 (changing-size channel)

対象が奥行方向へ運動しているか否かを知るための視覚システムとして、大きさ変化に対してのみ感受性をもつ「大きさ変化」特徴検出器 (changing-size channel) と前額平行面上の運動に対してのみ感受性をもつ「前額平行方向運動」特徴検出器 (Sideway-motion channel) の存在が、Regan, Bever-

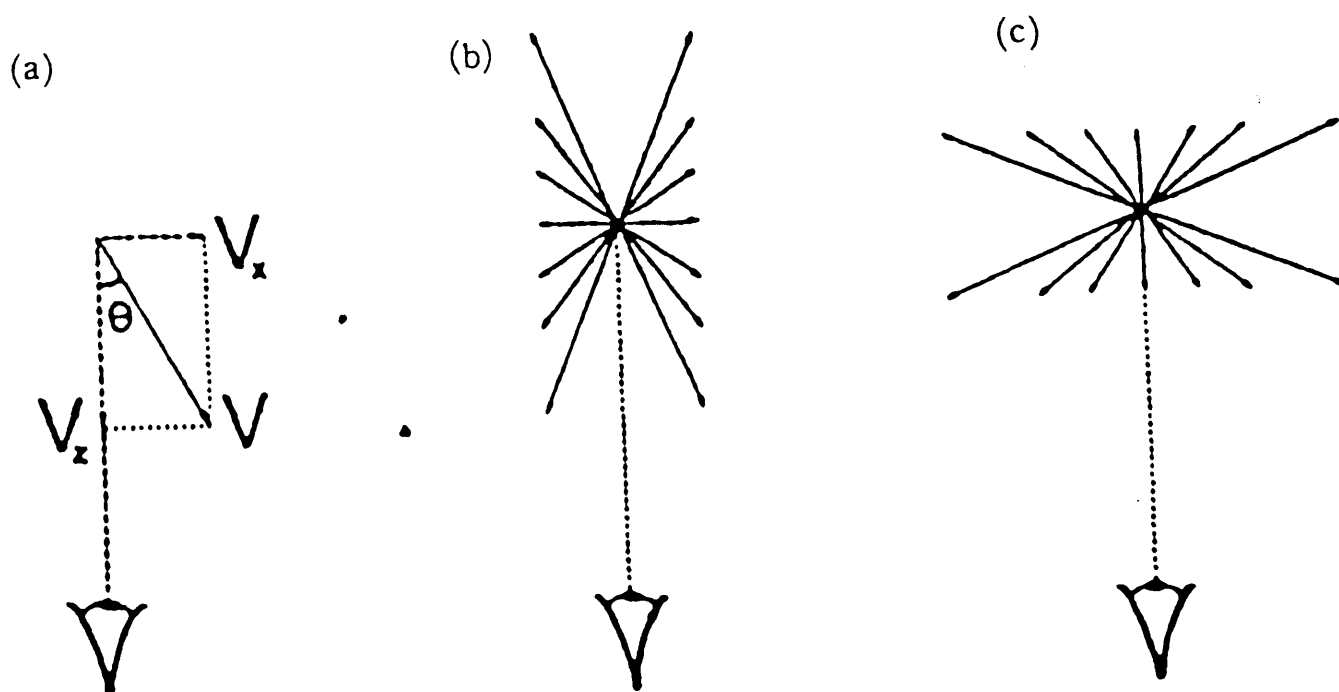


図 24 運動対象のベクトル分析。(a)対象が奥行方向 ( $\theta$ ) に動いた場合、 $x$  軸要素 ( $V_x$ ) と  $Z$  軸要素 ( $V_z$ ) に分解できる。(b)  $V_x$  要素を等価にし、 $V_z$  要素を変化させた場合の運動軌道、(c)  $V_z$  要素を等価にし、 $V_x$  要素を変化させた場合の運動軌道。(Regan & Beverley, 1980)



ley & Cynader (1979)、Regan & Beverley (1980) によって仮定された。図 24 に示されたように、対象は、任意の V 方向に移動するが、これを  $V_x$  要素と  $V_z$  要素に分解し、これにもとづいて(1)「大きさ変化」特徴検出器は 2 次元面での運動とは独立に大きさの変化に対してのみ反応、一方、(2)「前額平行方向運動」特徴検出器は大きさの変化とは独立に 2 次元面上の運動に対してのみ感受性をもつと仮定された。これらの仮説を検証するために、CRT 上に  $V_z$  要素を固定し  $V_x$  要素のみを変化させた矩形をオシレートさせて提示し、あるいは、 $V_x$  要素を固定し  $V_z$  要素を変化させて提示し、順応後、各々の条件での閾値の上昇の可否をみたところ、 $V_z$  方向の変化( $V_x$  方向は固定)をもつ刺激条件でのみ閾値の上昇がみられた。この結果から、対象の大きさ変化の差をその対象の運動軌跡から独立に計算する「大きさ変化」特徴検出器の存在が示唆される。

## 5.2. 回転要素と大きさ変化要素に特異的に反応する特徴検出器

拡大あるいは縮小する刺激、2 次元上での 1 次元的大小さが変化する刺激、そして回転する刺激の各々に特異的に反応する検出器が存在すれば、これら 3 種類の刺激特性が複合した刺激に順応させ、それぞれの特徴検出器に対応したテスト刺激を提示すれば、それに特異的な知覚的残効が出現すると考えられる。回転する螺旋刺激 (図 25) を用い、その螺旋の長さを変える刺激事態でこのことが検証された (Hershenson 1987)。回転する螺旋刺激は、回転運動ベクトルと放射運動ベクトル要素に分解することができるが、螺旋の長さによって回転要素を強めたり、あるいは逆に放射運動要素を強めたりすることができる。90 度螺旋刺激は、強い回転ベクトルと、回転の中心近辺と遠縁で弱くその中間で強い放射ベクトルを、270 度螺旋刺激は、強い放射ベクトル

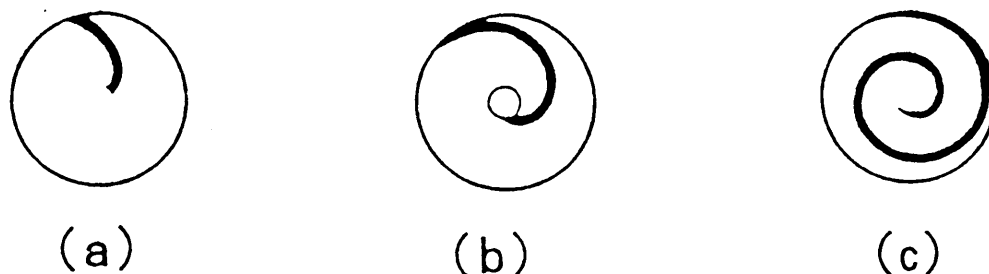


図 25 回転要素と大きさ変化要素に特異的な特徴検出器をしらべるためのラセン刺激パターン。(a)は 90 度ラセン図形、(b)は 270 度、(c)は 720 度 (Hershenson, 1987)

ルと弱く不連続な回転ベクトルを、720度螺旋刺激は、強い放射ベクトルと弱い回転ベクトルを、それぞれ持つ。テスト刺激は、順応刺激の運動方向とは直交する輪郭をもつ放射刺激と5本の帯からなる同心円刺激及び観察者の前方の空間内に浮かんで見える黒色の円盤刺激である。順応時間は、30秒と3分間で、直ちに運動残効テスト試行へと移行した。その結果、90度螺旋図形では放射刺激に対して順応時とは反対方向への強い回転運動残効が、270度と720度の螺旋図形では同心円図形に対して縮小運動残効が、黒色円盤刺激に対して奥行方向への後退移動残効が、各々報告された。また、270度螺旋図形での運動残効時間を計ると、回転運動残効持続時間は、縮小運動残効より有意に短いことが示された。これらの結果から、螺旋回転運動残効は回転要素と放射要素に分解でき、これらの要素は、さらに、回転運動特徴検出器と大きさ変化特徴検出器で検出されると考えられる。

### 5.3. 大きさと輻輳要因の共変化

刺激の大きさと網膜視差を同時に連続的に変化させると奥行的運動が知覚され、両要因がともに同方向の奥行変化をするときには加算的效果が、逆方向の変化をするときには減殺的效果が生起する (Regan & Beverley 1979)。刺激の大きさと輻輳要因を共変化させた場合にも、同様な効果が生起するのであろうか。これは各眼に個別に提示した輪郭円の間隔距離を操作することによって輻輳を、刺激の直径を変えることによって大きさを、各々操作することによって検討された (Heuer 1987)。変化の方向は、輻輳と大きさが共に刺激が観察者に接近あるいは後退するように変化される場合、輻輳と大きさが相互に反対方向の奥行変化を指示する場合の2通りが設定された。その結果、両要因が共に同方向の奥行変化を指示するように連続的に操作された場合には、対象の視かけの奥行運動は、両要因の加算的效果によって規定されたが、両要因が反対方向の奥行変化を指示した場合には、対象の視かけの奥行運動は、減殺的にならず、両要因の中のどちらかの要因が優先的に視かけの奥行運動を支配することが明らかにされた。これに基づいて、図26に示されたように、輻輳と大きさとが共変化したときの奥行運動を規定するモデルが提唱された。このモデルでは、両要因が同一方向の奥行変化を指示する場合には、対象の奥行運動はその加算的效果によって決められるが、両要因が反対方向の奥行変化を指示する場合には、一方の要因の他方に対する抑制効

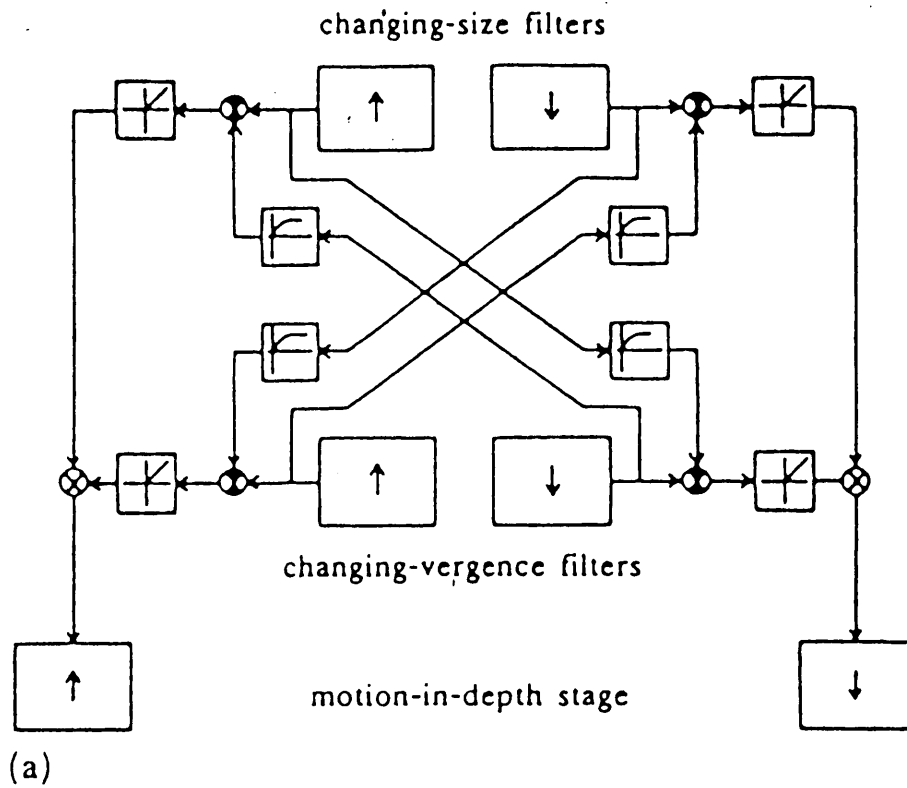


図 26 大きさ要因と輻輳要因を変化させた時に生起する奥行運動を説明するための修正加重モデル (Heuer, 1987)

果に限界が設定され、それを越える条件では抑制効果が零となり、一方の要因の変化によってのみ奥行運動は規定される。

#### 5.4. 奥行方向の運動検出フィルターと前額平行運動検出フィルター

刺激が前額平行面で拡大あるいは縮小運動するとき、それは対象の大きさ変化としては知覚されず、対象の接近、後退運動として視える。流動パターンからこのような奥行情報を抽出するためには、奥行方向の運動要素と前額平行方向でのそれとを分離しなければならない。Koenderink (1985) は、奥行と前額平行の両方向の運動要素をもつ複合流動パターンから前額に平行な方向の運動要素を除去するフィルターを仮定し、奥行方向の運動要素のみが純粹に別のフィルターで検出されると考えた。一方、Simpson (1988) は、はじめに、あらゆる方向の運動要素が複合した事態を受容し、後に、前額平行な方向の運動要素のみを差し引くフィルターを考えた。この両仮説を検討するために、次のような実験事態が設定された。CRT 上に 2 つの対象を提示し、接近あるいは後退して視えるように拡大あるいは縮小させるが、この時、両対象間に接近／後退の速度差を設ける。観察者には、速度差のある 2 つの対

象が接近もしくは後退して見えるとき、どちらの対象が観察者の正面に、より速く衝突もしくは最後に／離脱するかが求められる。衝突あるいは離脱を知覚することのできる速度差が閾値として測定される。もし、Simpson 仮説が正しいければ、前額平行な方向の運動要素が付加されると、閾値は上昇し、また、あらかじめ前額に平行な方向の運動に順応させておけば、前額平行な方向での運動が追加されても閾値の上昇は抑えられると予測される。実験の結果は、Simpson 仮説が正しいことを支持している。

### 5.5. 光学的拡大・縮小と大きさ－距離不変仮説

光学的拡大・縮小による奥行効果を担う手がかりが何んであるかについて、大きさ－距離不変仮説を援用した分析が試みられている (Swanston & Gogel 1986)。もし、この現象下でも大きさ－距離不変仮説が成立しているならば、図 27 に示された知覚可能性のいずれかが、この種の事態で生じると予測される。いま、観察者から一定の距離のところ対象がその大きさを  $S_f$  から  $S_n$  へと拡大させると考えるとき (physical)、第 1 の知覚可能性として (Perception A)、対象  $S_f$  の大きさと奥行距離が物理的なそれらに一致するように正しく知覚され、その結果、対象の視角が  $\theta_f$  から  $\theta_n$  に変化しても、視かけの大きさは変化せず ( $S'_f = S'_n$ )、代わりに、対象が奥行方向に視かけ上の距離  $d'$  だけ接近する。この場合には、光学的拡大要因が主要な手がかり

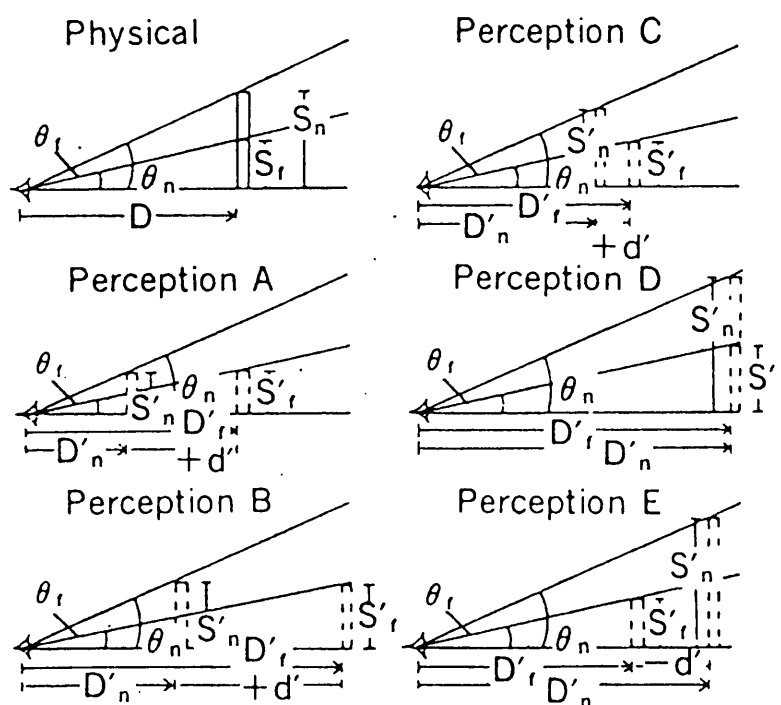


図 27 光学的拡大による奥行運動視と大きさ－距離不変仮説 (Swanston & Gogel 1986)

として作用する。第2の知覚可能性として(Perception B)、最初に提示された対象  $S_f$  の知覚された大きさと奥行距離が物理的なそれより過大視された場合で、この時には、第1の知覚可能性と同様に、対象の視かけの大きさは固定されたままで ( $S' = S$ )、奥行方向に視かけの距離 ( $d'$ ) だけ運動して見える。この場合の運動距離は、第1の知覚可能性より大きい。第3の知覚可能性として(Perception C)、光学的な刺激拡大にともなってその大きさもいくらか拡大して知覚される場合である ( $S'_n = S'_f$ )。この時には、対象の大きさ変化が知覚される程度に応じて、対象の視かけの奥行運動距離は小さくなる。第4の知覚可能性として(Perception D)、光学的拡大は奥行手がかりとしての機能をまったく持たず、したがって、対象は物理的位置(視かけの奥行距離は、この場合、近、遠両位置で等しい ( $D'_n = D'_f$ )) で拡大するように見える。第5の知覚的可能性として(Perception E)、光学的に拡大したときの視かけの大きさが、過大視される場合である ( $S'_n / S'_f > S'_n / S'_f$ )。この場合には、大きさ-距離不変仮説によれば、対象は光学的拡大にともなって視かけ上遠ざかるように知覚されるはずである。光学的拡大に伴う視かけの奥行距離と近、遠位置での大きさを、指標とのマッチングで求めたところ、遠位置に対する近位置での視かけの大きさ比は、それぞれの視角比より若干大きいか、あるいはほぼ同等となる ( $S'_n / S'_f \geq S'_n / S'_f$ ) にもかかわらず、実際は、対象は、光学的拡大に伴って接近するように知覚されることが見いだされた。これは、実測された対象の奥行運動距離が、対象の大きさについての実測値をもとにした大きさ-距離不変仮説によって予測したところの奥行運動距離の理論値と一致しないことになる。Gogel (1971, 1974, 1976, 1981) の研究によれば、「大きさ-奥行距離」知覚には、2つの知覚過程が関係しているという。1つは、直接的な感覚情報にもとづく大きさ-距離不変仮説の成立している過程であり、他は、奥行距離に関しての大きさが、過去の知覚にもとづく記憶された大きさ要因 (familiar size) によって規定されている過程である。そこで、Gogel の開発した adjustable pivot (head motion) 法を用いて視かけの奥行運動距離を推定したところ、記憶された大きさが視かけの奥行運動距離を規定していることがわかった。このことから、光学的拡大による視かけの奥行運動には、認知的な過程が関係している。

## 6. 運動による奥行多義性現象 (depth-ambiguous apparent motion, DAAM)

多義的奥行運動現象とは、刺激図形を継時的に種々な方向に提示したとき、刺激図形が奥行に関し多義的に見えることを言う。現象には、前額平行面上で2次元的に移動して見える場合と奥行方向に移動して見える場合の2種類がある。前者の場合にはその形が捻れたり歪んだりするが、後者の場合には図形が回転して知覚される。刺激間の間隔時間 (ISI) が 50 msec 前後の時には、2次元面上の移動と形の歪みが、また、260 msec の時には、図形の奥行回転が観察される (Koles & Pomerantz 1971)。これは、刺激が2次元面上を移動する場合よりも3次元面上を移動するように知覚される場合の方が、刺激が視かけ上移動する距離が長く、そのためには十分な ISI を必要とするからと解釈された。この仮説の検証は、先行、後続刺激間の形要因の類似性が視かけの多義性にどのように影響するかを、図 28 に示したパターンを用い、ISI と提示方向とを変えることによって試みられた (White, Wenderoth & Curthoys 1979)。その結果、視かけの変化 (2次元のあるいは3次元) は、隣接した線分が平行な場合には3次元的变化が、そうでない場合には2次元的变化が知覚されることから、ISI によっては規定されず、したがって先行と後続刺激間の形態に依存することが明らかにされた。DAAM 現象は、提示された図形が同一の「もの」であることを保存しようとし、そのた

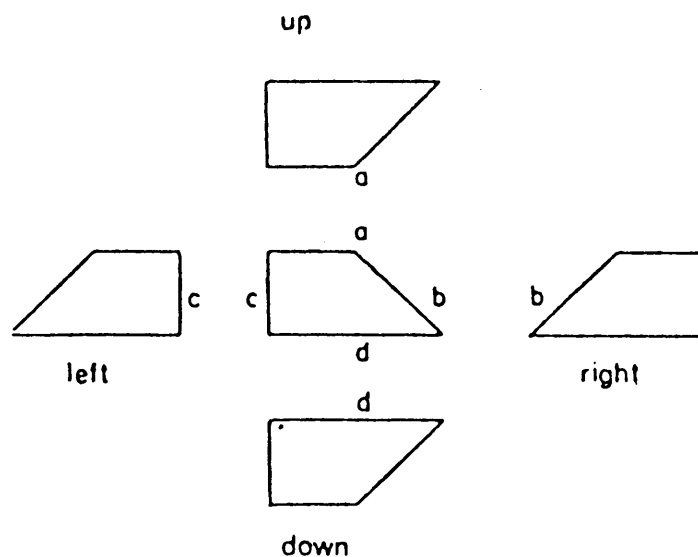


図 28 奥行多義性現象 (Depth-Ambiguous Apparent Motion) のための刺激布置。中央図形が常に先行提示される。(White, Wenderoth, & Curthoys 1979)

めに図形が奥行的に回転させられていると解釈する高次な認知過程の下で生起すると考えられる。

同様に、ランダム・ドットの集合でできた球を回転させながら投影したときにできる2次元パターンをCRTに再現し、その時の3次元性の知覚を規定する要因もしらべられた(Doner, Lappin & Perfetto 1984)。2次元パターンの持続時間、回転角度、継時的に変化するパターン間の一致度などの変数が操作されたが、3次元性の知覚は、基本的には、パターンの運動が連続して変化すると感知されているか否かに関わっていた。

## 7. 乳児における運動の3次元視効果 (KDE)

自立移動や確実な手の操作反応が出現する以前の乳児にも、大きさや形の恒常性が存在すること (Bower 1966) が示されて以来、乳児には3次元の視覚世界を知るための能力が広範囲にわたって存在することが明らかにされつつある (Bower 1972, Bruner & Koslowski 1972, Yonas et al. 1977, Cook et al. 1978, Caron et al. 1979, Hofsten & Lindhagen 1979)。これらの研究を踏まえ、3 - 4月齢 (平均 117日齢) の乳児にも運動の3次元視効果が存在するか否かがしらべられた (Ow-sley 1983)。先行刺激として、予めあるパターンに視覚的に馴化させ、その後、新奇な形を含むいくつかのテストパターンを提示し、それに対する注視反応の程度から被験児の知覚過程を探る視覚的馴化法 (visual habituation procedure) が用いられた。先行馴化刺激は、くさび形の立体物である。成人の観察者の結果によれば、この刺激は立方体として知覚される。乳児は、静止対象に馴化する条件、運動対象に馴化する条件の2群に分けられた。運動対象は、左右45度の範囲内で連続して反転する。テスト刺激には、先行刺激と同一のくさび形立体、新奇なくさび形立体、そして立方体である。もし、運動の3次元視効果にもとづいてくさび形を知覚し、それに視覚的に馴化されていれば、運動対象群の乳児は、テストでは、立方体により多く注視反応を示すはずであり、逆に静止対象群は、どの刺激も先行刺激と同形の立体と知覚すると予想された。実験結果は、この予測を支持し、3 - 4月齢の乳児は、運動の3次元視効果に基づいて形の立体性を知覚する能力が備わることを示した。

同様な観点から、4月齢 (平均 119日齢) の乳児の運動の3次元視効果に

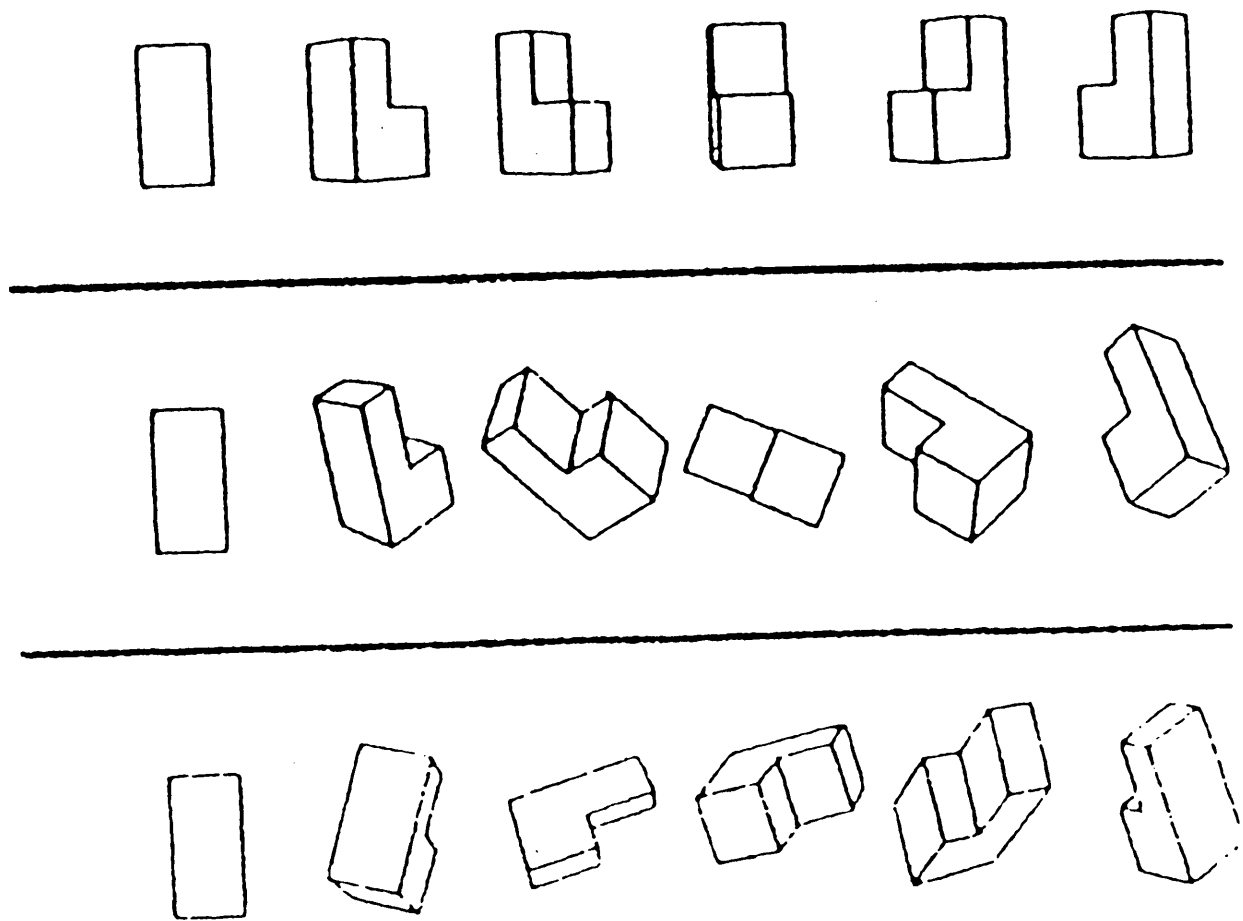


図 29 乳児の運動の奥行効果を吟味するための刺激。上段は垂直軸を中心とする回転を、中段は 45°前額斜方向の回転を、下段は奥行方向に 45°斜方向の回転を各々示す。(Kellman, 1984)

についても検討された (Kellman 1984)。先行刺激には、図 29 のような立体物が用いられ、運動対象提示群には、垂直軸、前額平行上に 45 度傾けた軸、及び背後方向に 45 度傾けた軸を中心回転させたものの中から、2 種類を選択して提示、また静止対象群には、これらの回転位置の中から、15 度、あるいは 60 度毎に抽出した対象を継時的に連続提示した。刺激はすべて、ビデオ装置によって CRT 上に提示された。テスト刺激には、先行馴化刺激に使用した立体と新奇な立体とを用意し、運動対象群には先行刺激では用いなかった回転角度で回転して提示、また、静止対象群には、それらを回転位置 15 度または 60 度毎に抽出したものを提示した。新奇な立体に顕著な注視反応を示すものは、運動対象群のみであった。4 月齢乳児は、静止パターン、あるいは継時的にその形を変化させるパターンからは立体を知覚し得ないのに対し、連続して回転するパターンからは立体を知覚できる。



3 - 6 週齢乳児が、スクリーンの背後で対象を奥行方向に運動させることによってスクリーン上に刺激の拡大あるいは縮小を起こした時、どのような反応をするかについても、Nanez (1988) によってしらべられた。乳児は刺激の縮小よりはるその拡大に対して、瞬目と頭部を後ろに反らせるなどの防御反応を有意に生起させるが、しかし刺激を同様に拡大させても、背景を暗くして拡大する対象を明るくするとこの種の防御反応は著しく減少した。この週齢の乳児は刺激の拡大を刺激の接近として知覚している。

## 8. 奥行方向に運動する対象を検出するニューロン

### 8.1. 運動視事態での視覚中枢の受容野

神経生理学は、視覚を担う中枢のしくみを電気生理学的手法で明らかにし、とくに、受容野の概念は視覚中枢機構の基本単位を構成することを示した。しかしながら、受容野の構造を明らかにするために神経生理学者達によって使用された刺激パターンは、光点や光線分など「点」に当たるもののみを操作したものであり、視覚心理学が重要と考える「地」が無視されている点が指摘できる。

背景となる「地」のテクスチャの方向や速度を操作した場合、受容野はどのような構造をもつか、フクロウザル (owlmonkey, *Aotus lemurinus griseimembra*) の middle temporal visual area (MT) の単一ニューロンの反応を測定することによって試みられた (Allman, Miezin, & McGuinness 1985)。刺激パターンは、図 30 に示されたような 3 種のペアである。実

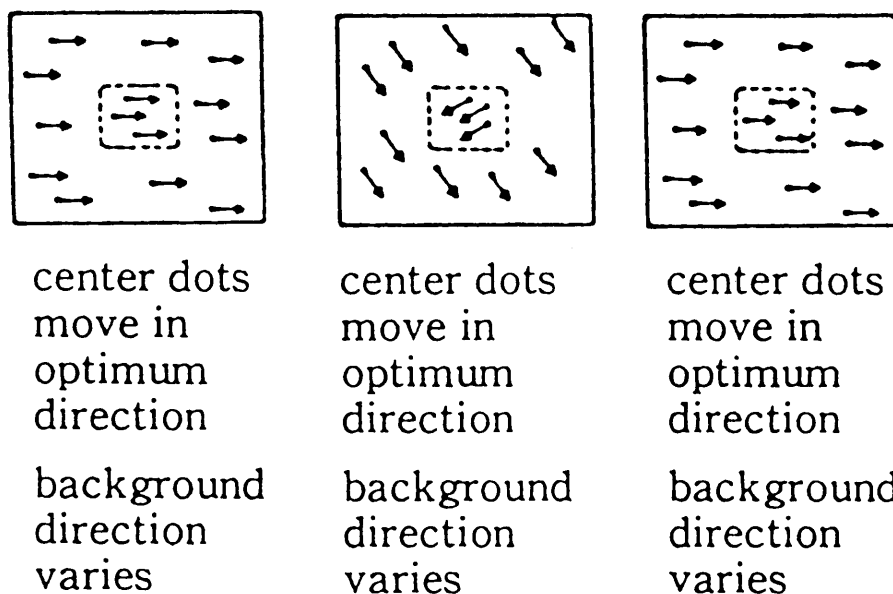


図 30 運動視事態での視覚中枢受容野をしらべるための刺激条件 (Allman, et al 1985)。

表3 背景を運動させた事態での受容野

(Allman et al 1985)

タイプ	特 性
タイプ 1	周囲の運動方向に選択的に反応し、抑制をかけるもの
タイプ 2	classicalな受容野に対して、90度方向の周囲の運動刺激に選択的興奮反応を起こす
タイプ 3	周囲のすべての方向の運動刺激に抑制反応を起こす
タイプ 4	周囲の運動刺激に反応をしめさないもの

験の結果、表3に示されたような、4種類のニューロンが発見された。この種の反応を起こす受容野の大きさは、WieselとHubelの受容野(classical receptive field)の50-100倍の広さをもつと推定されている。ここで明らかにされたMT野の受容野は、図-地分離、前注意的知覚、運動的奥行手がかりにもとづく奥行視に関係する。

### 8.2. 奥行運動検出ニューロン

一般に、奥行運動は左右網膜像の運動速度と方向を種々変化させることによってさまざまな奥行方向への視えの運動を得ることができる(図31)。左右網膜像が同一方向に等しい速度で運動する場合には、網膜像の運動とは反対方向への前額平行な視えの運動が、左右網膜像が反対方向に等しい速度で運動する場合には、奥行方向への視かけの運動が、各々生じる。

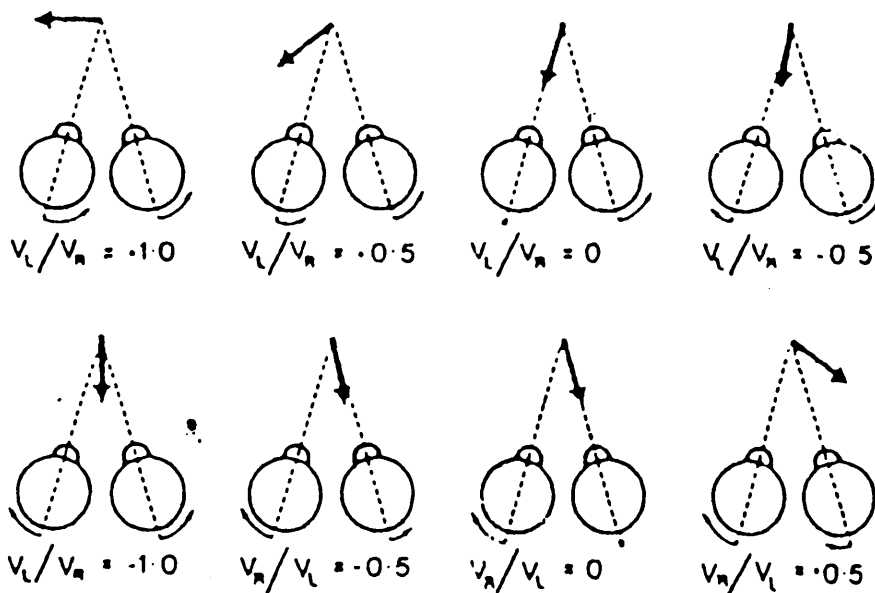


図31 網膜像の運動方向・速度と運動の奥行視の関係 (Cynader & Regan 1982)

Cynader & Regan (1982) は、ネコの左右眼に方向と速度を異にする刺激を与え、視覚領の単一ニューロンの反応の測定を試みた。刺激提示に当たっては、刺激の奥行距離を7段階に変え、網膜視差をも操作した。測定した17野と18野のニューロ約1/4が奥行方向への視かけの運動に感応した。視かけの奥行方向に反応したニューロンのうち、網膜視差の変化に反応したものは1部であり、その他のニューロンは感応しなかった。しかし、感応した場合にはかなり広い範囲の網膜視差(12 deg)に反応した。奥行方向への運動に同調するニューロンには、網膜視差に選択性をもつものと奥行方向の運動に特異的に反応するものとの2種類が存在する。

### 8.3. Clare-Bishop (CB) 領域

Clare-Bishop (CB) 領域 (medial bank of lateral suprasylvian cortex) のニューロンは、スリットやエッジの代わりに、円や矩形のスポット光に対して反応するほか、静止刺激より運動刺激、なかでも奥行的に運動する際の大きさ変化に対して鋭敏である。ネコのCBニューロンのユニット電位が、網膜視差条件および大きさを変化させながら奥行方向に運動する条件のそれぞれで測定された (Toyama & Kozasa 1982)。その結果、測定したニューロンの約半数 (28/54) は、網膜視差と大きさが共に変化したときに、残りの半分は、網膜視差のみを変化させたときに、活動電位を発することが示された。CBニューロンは、網膜視差と奥行方向への運動による大きさ変化の両方を検出している。

## 9. 運動要因による3次元視効果のまとめ

運動要因による3次元視効果には、KDE、ステレオキネティック効果、フリッカーの3次元効果、光学的拡大と縮小による3次元効果などがある。これらについての研究成果次のようである。

(1) KDEに関与する要因は、運動成分、遠近法的要因、大きさ(長さ)の変化要因、形態的要因、認知的要因である。とくに、運動成分は重要で、前額平行面に平行で水平なサイン波動的な運動成分はY軸を中心として奥行方向に回転するように、前額に平行で水平に運動する刺激群の垂直方向の速度勾配成分は凹あるいは凸に、そして反対方向の運動成分がある場合には、前面

と後面に分離するように、3次元知覚を各々出現させる。

(2) KDEにおける計算機科学からのアプローチは、コンピュータ・ビジョンを想定したものであるが、対応問題とその結果としてのデータ集合からの3次元の復元についてのモデルは、例え、それが人間の視覚システム処理過程とは異なるものでも、心理学的に3次元問題を分析するのに有益であろう。

(3) ステレオキネティック効果は、基本的には、KDEと同一のしくみで生起している。すなわち、偏心のある同心円や楕円に典型的にみられるように、それら滑らかな曲線をもつものが前額に平行にZ軸を中心として回転して提示されると、輪郭線上の各点の運動速度は、回転の中心からの距離に比例して増大し、各点間に速度差が生じる。この速度差が3次元視をもたらす基本的要因となる。ステレオキネティック効果による3次元視が運動視差と同等な働きで生じるのか、あるいはその種の速度差を簡潔性原理にもとづき知覚的に解決しているのかについては明かではない。

(4) 光学的拡大と縮小も、対象の奥行方向への運動という強い3次元効果を生じさせる。これは、対象の前額平行に水平方向の運動の検出とは独立に対象の大きさ変化に特異的に反応するチャンネルによって検出されている。

(5) 運動要因にもとづく3次元視では、網膜上での刺激の運動的变化が奥行や立体を生じさせる手がかりとなる。

## 文 献

- Allman, J., Miezian, F. & McGuinness, E. 1985 Direction- and velocity-specific responses from beyond the classical receptive field in the middle temporal visual area (MT). Special Issue: Human motion perception. *Perception*, 14, 105-126.
- Andersen, G. J. & Dyre, B. P. 1989 Spatial orientation from optic flow in the central visual field. *Perception & Psychophysics*, 45, 453-458.
- Andersen, G. L. & Braunstein, M. L. 1983 Dynamic occlusion in the perception of rotation in depth. *Perception & Psychophysics*, 34, 356-362.
- Anstis, S. M. 1975 What does visual perception tell us about visual coding? In *Handbook of Psychobiology* (Blakemore, C. & Gazzaniga, M. S.), Academic Press, New York.
- Anstis, S. M., Howard, I. P. & Rogers, B. 1978 A Craik-O'Brien-Cornsweet illusion for visual depth. *Vision Research*, 18 213-217.

- Beverley, K. I. & Regan, D. 1983 Texture changes versus size changes as stimuli for motion in depth. *Vision research*, 23, 1387-1400.
- Bower, T. G. R. 1966 Slant perception and shape constancy in infants. *Science*, 151, 832-834.
- Braunstein, M. L. & Andersen, G. J. 1984 Shape and depth perception from parallel projections of three-dimensional motion. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 10, 749-760.
- Braunstein, M. & Tittle, J. S. 1988 The observer-relative velocity field as the basis for effective motion parallax. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 14, 582-590.
- Bressan, P. & Vallortigara, G. 1986 Multiple 3-D interpretations in a classic stereokinetic effect. *Perception*, 15, 405-408.
- Bressan, P. & Vallortigara, G. 1987 a Stereokinesis with moving visual phantoms. *Perception*, 16, 73-78.
- Bressan, P. & Vallortigara, G. 1987 b Learning to see stereokinetic effects . *Perception*, 16, 187-192.
- Brooks, T.C., Ono, H. & Steinbach, M. J. 1988 Exafference and reafference as different cues to relative depth. *Investigative Ophthalmology and visual science*, 29, 447.
- Brunner, J. S. & Koslowski, B. 1972 Visually preadapted constituents of manipulatory action. *Perception*, 1, 3-14.
- Carron, A.J., Carron, R.F. & Carlson, V. R. 1979 Infant perception of the invariant shape of objects varying in slant. *Child Development*, 50, 716-721.
- Cook, M., Field, J. & Griffiths, K. 1978 The perception of solid form in early infancy. *Child Development*, 49, 866-869.
- Cynader, M.S. & Regan, D. 1982 Neurons in cat visual cortex tuned to the direction of motion in depth : Effect of positional disparity. *Vision Research*, 22, 967-982.
- Doner, J., Lappin, J.S. & Perfetto, G. 1984 Detection of three-dimensional structure in moving optical patterns. *Journal Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 10, 1-11.
- Dosher, B.A., Landy, M.S. & Sperling, G. 1989 Ratings of kinetic depth in multidot displays. *Journal Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 15, 816-825.
- Frost, B. J. & Nakayama, K. 1983 Single neurons code opposing motion independent of direction. *Science*, 220, 744-745.
- Gibson, E., Gibson, J., Smith, O.W. & Flock, A. 1959 Motion parallax as a determinant of perceived depth. *Journal of Experimental Psychology* 54, 40-51.

- Gibson, J. & Carel, W. 1952 Does motion perspective independently produce the impression of a recording surface? *Journal of Experimental Psychology*, 44, 16-18.
- Gillam, G. & Grant, T. 1984 Aggregation and unit formation in the perception of moving collinear lines. *Perception*, 13, 659-664.
- Gogel, W. C. 1971 The validity of the size-distance invariance hypothesis with cue reduction. *Perception & Psychophysics*, 9, 92-94.
- Gogel, W. C. 1974 Cognitive factors in spatial response. *Psychologia*, 17, 213-225.
- Gogel, W. C. 1976 An indirect method of measuring perceived distance from familiar size. *Perception & Psychophysics*, 20, 419-429.
- Gogel, W. C. 1981 The role of suggested size in distance response. *Perception & Psychophysics*, 30, 149-155.
- Graham, C.H., Baker, K.F., Hecht, M. & Lloyd, V. U. 1948 Factors influencing thresholds for monocular movement parallax. *Journal of Experimental Psychology*, 38, 205-223.
- Graham, M. & Rogers, B. 1982 Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information. *Perception*, 11, 247-262.
- Hayashibe, K. 1991 Reversals of visual depth caused by motion parallax. *Perception*, 20, 17-28.
- Hayashibe, K. 1992 Head motion induced apparent order of depth in motion parallax display. *Perception*, 22, 643-652
- Hershberger, W. 1970 Attached-shadow orientation perceived as depth by chickens reared in an environment illuminated from below. *Journal of Comparative and Physiological Psychology*, 73, 407-411.
- Heuer, H. 1987 Apparent motion in depth resulting from changing size and changing vergence. *Perception*, 16, 337-350
- Hofsten, C. von. & Lindhagen, K. 1979 Observations on the development of reaching for moving objects. *Journal of Experimental Child Psychology*, 28, 158-173.
- Ito, H. & Matsunaga, K. 1990 The correlation between velocity and perceived depth in motion. *Japanese Psychological Research*, 32, 107-116.
- Julesz, B. 1960 Binocular depth perception of computer generated patterns. *Bell System Technology Journal*, 39, 1126-1162.
- Kellman, P. J. 1984 Perception of three-dimensional form by human infants. *Perception & Psychophysics*, 36, 353-358.
- Koenderink, J. J. 1986 Optic flow. *Vision Research*, 26, 161-179.
- Köhler, W. & Emery, A. 1947 Figural aftereffects in the third dimension of visual space. *American Journal of Psychology*, 60, 159-201.

- Kolers, P. A. & Pomeranz, J. R. 1971 Figural change in apparent motion. *Journal of Experimental Psychology*, 87, 99-108.
- Nanez, J. E. 1988 Perception of impending collision in 3-to 6-week-old human infants. *Infant Behaviour and Development*, 11, 447-463.
- Ono, M.E., Rivest, J. & Ono, H. 1986 Depth perception as a function of motion parallax and absolute-distance information. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 12, 331-337.
- Ono, H., Rogers, B., Ohmi, M. & Ono, M. E. 1988 Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, 17, 255-266.
- Owsley, C. 1983 The role of motion in infants' perception of solid shape. *Perception*, 12, 707-717.
- Prazdny, K. 1986, Three-dimensional structure from long-range apparent motion. *Perception*, 15, 619-625.
- Regan, D. & Beverley, K.I. 1979 Binocular and monocular stimuli for motion in depth : changing-disparity and changing-size feed the motion-in-depth stage. *Vision Research*, 19, 1331-1342.
- Regan, D. & Beverley, K.I. 1980 Visual response to changing size and sideways motion for different directions of motion in depth : Linearization of visual responses. *Journal of the Optic Society of America*, 70, 1289-1296.
- Regan, D. & Beverley, K.I. & Cynader, M. 1979 The visual perception of motion in depth. *Scientific American*, 240, 122-133.
- Rivest, J., Ono, H. & Saida, S. 1989 The role of convergence and apparent distance in depth constancy with motion parallax. *Perception & Psychophysics*, 46, 401-408.
- Rock, I. & Smith, D. 1981 Alternative solutions to kinetic stimulus transformations. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 7, 19-29.
- Rogers, B. & Graham, M. 1979 Motion parallax as an independent cue for depth perception. *Perception*, 8, 125-134.
- Rogers, B. & Graham, M. 1982 Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270.
- Rogers, B. & Graham, M. 1983 Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces. *Science*, 221, 1409-1411
- Royden, C. S., Baker, J. F. & Allman, J. 1988 Perception of depth elicited by occluded and shearing motions of random dots. *Perception*, 17, 289-296.
- Shoji, K., Sumi, S. & Fujita, H. 1980 Depth perception in moving line patterns. *Perceptual & Motor Skills*, 51, 683-687.
- Simpson, W. A. 1988 Depth discrimination from optic flow. *Perception*, 17, 497-512.

- Sperling, G., Landy, M.S., Doshier, B.A. & Perkins, M. E. 1989 Kinetic depth effect and identification of shape. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 15, 826-840.
- Swanston, M. T. & Gogel, W. C. 1986 Perceived size and motion in depth from optical expansion. *Perception & Psychophysics*, 39, 309-326.
- Todd, J. T. 1985 Perception of structure from motion : Is projective correspondence of moving elements a necessary condition? *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 11, 689-710.
- Toyama, K. & Kozasa, T. 1982 Responses of Clare-Bishop neurones to three-dimensional movement of a light stimulus. *Vision Research*, 22, 571-574.
- Ullman, S. 1979 a The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society of London*, 203 B, 405-426.
- Ullman, S. 1979 b *The Interpretation of Visual Motion*. Cambridge, Mass. : MIT Press.
- Ullman, S. 1984 a Rigidity and misperception. *Perception*, 13, 219-220
- Ullman, S. 1984 b Maximizing rigidity : The incremental recovery of 3-D structure from rigid and nonrigid motion. *Perception*, 13, 255-274.
- Vallortigara, G., Bressan, P. & Bertamini, M. 1988 Perceptual alternations in stereokinesis. *Perception*, 17, 31-34.
- Vallortigara, G., Bressan, P. & Zanforlin, M. 1986 The saturn illusion : A new stereokinetic effect. *Vision Research*, 26, 811-813.
- Wallach, H. & O'Connell, D. N. 1953 The kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology*, 45, 205-217.
- White, D.G., Wenderoth, P. & Curthoys, I.S. 1979 The importance of pattern information for the resolution of depth-ambiguous apparent motion. *Perception & Psychophysics*, 26, 355-362.
- Wilde, K. 1950 Der Punktreiheneffekt und die Rolle de binocularen Querdisparation beim Tiefensehen. *Psychologische Forschung*, 23, 223 -262.
- Wilson J.A., Robinson, J.O. & Piggins, D.J. 1983 Wobble cones and wobble holes : the stereokinetic effect revised. *Perception*, 12, 187-193.
- Wilson, J.A., Robinson, J.O. & Piggins, D.J. 1986 Apparent height of a stereokinetic cone is decreased by departure from circularity. *Perception*, 15, 399-403.
- Wong, E. & Weisstein, N. 1985 a A new visual illusion : Flickering fields are localized in a depth plane behind nonflickering fields. *Perception*, 14, 13-17.
- Wong, E. & Weisstein, N. 1987 The effect of flicker on the perception of figure and ground. *Perception & Psychophysics*, 41, 440-448.
- Zanforlin, M. 1988 Stereokinetic phenomena as good gestalts : The minimum princi-



ple applied to circles and ellipses in rotation. *Gestalt Theory*, 10, 187-214.

Zanforlin, M. & Vallortigara, G. 1988 Depth effect from a rotating line of constant length. *Perception & Psychophysics*, 44, 493-499.

林部敬吉 1990 運動視差の発現機構の解明(4) 日本心理学会第54回大会 発表論文集.