

## 3 次元視研究の動向—1994—

### The Trends on the Research of 3-Dimensional Perception in 1994

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

1. はじめに
2. 運動要因による 3 次元視
  - 2.1. 運動視差とステレオキネティック効果との関係
  - 2.2. 3 次元表示へのステレオキネティック効果の応用
  - 2.3. トランスレーションとローテーションからの 3 次元形状の復元
  - 2.4. 運動視差と立体面の出現方向 (depth order)
  - 2.5. 運動性奥行効果と剛体性拘束条件
  - 2.6. 運動性奥行効果と光学的不変項
  - 2.7. 運動視における窓問題
  - 2.8. オプティカル・フローと自己移動錯覚
  - 2.9. オプティカル・フローと 3 次元視
3. 両眼立体視
  - 3.1. 網膜視差と肌理要因の相互作用
  - 3.2. 色情報のみによる R D S 立体視は可能か
  - 3.3. 色彩立体視 (chromostereopsis)
  - 3.4. ステレオスコピックな傾斜面の角度を規定する要因
  - 3.5. 垂直視差と絶対的奥行距離
  - 3.6. 網膜視差を用いての立体視再現の正確度
4. 視空間構造
  - 4.1. 絶対的奥行距離と視かけの運動方向との関係
  - 4.2. 観察者と対象が奥行方向に動く事態での対象の奥行距離知覚
  - 4.3. 大きさの恒常性
  - 4.4. 視空間の構造と視覚に指示された行動との関係
  - 4.5. 観察者の移動による絶対的奥行距離の変化と運動対象の速度変化
5. 絵画的要因による立体視
  - 5.1. 陰影要因による立体視
  - 5.2. 主観的輪郭図形
  - 5.3. 写真の撮影位置の推定
  - 5.4. オクルージョン (蔽—被蔽要因) にもとづく対象の復元
6. 眼筋的要因

- 6.1. 眼球調節と両眼輻輳のメカニズムについてのモデル
- 7. 動物を対象とした3次元視の研究
  - 7.1. 視覚領破壊と視覚的断崖回避、方向定位、眼球振盪
  - 7.2. プタオザルと絵画的要因
- 8. その他の3次元視研究
  - 8.1. 運動視、方向視、3次元視の情報処理過程における論理的類似性
  - 8.2. モアレパターンにおける運動視と3次元視
  - 8.3. 奥行対比効果に関わる時間的要因
  - 8.4. 単眼視と両眼視条件でものをつかむ動作の運動学的分析
  - 8.5. 触手感覚による距離知覚
- 9. おわりに

## 1. はじめに

本報告には、3次元視知覚に関連した論文を、Psychological Abstract 誌の1993年版から抽出し、3次元視知覚研究のいくつかの領域に分類して紹介する。文献抽出は、DIALOG の文献抽出システムを利用し、検索語は Distance perception, Depth perception, Stereoscopic vision とした。

## 2. 運動要因による3次元視

### 2.1. 運動視差とステレオキネティック効果 (stereokinetic effect, SKE) との関係

いま、円錐の頂点が観察者の手前に視線軸 ( $z$  軸) と一致するように置かれ、同時に  $y$  軸 (垂直軸) を中心として回転するものとする。このときの回転にともなう運動要素を分解すると (Proffitt et al. 1992)、ひとつは、円錐の頂点が投影面で対象の回転にともなうどの程度の距離を動いたかについての運動要素 (第1運動要素、図1-a、ここでは円錐の断面が示され、 $z$  軸が視線軸に一致する) である。他は、視かけの回転角度に関わる運動要素 (第2運動要素、図1-b) で、これは対象基底面の長さが回転にともなうどの程度縮小されるかで示される。図1-a より、円錐頂点が  $\theta$  度回転したとき、その回転分に伴って生じる投影面上 ( $P$ ) での変位距離 ( $e$ ) は、 $e = d \sin(\theta)$  で表される。したがって、対象の相対的奥行 ( $d$ ) は、 $d = e / \sin(\theta)$  となるが、これだけでは視かけの回転角度がわからないので、この式からだけでは対象の相対的奥行 (頂点から底面までの距離) を知ることはできない。対象の視かけの回転角度は、円錐底面の長さ ( $r$ ) の回転に伴う長さ変化から知ることができる。回転にともなう底面の長さ変化 ( $f$ ) は、 $f = r \cos(\theta)$  となる。幾何学上では、対象の奥行は対象の基底面の回転にともなう長さ変化 (回転に伴う基底面の長さの縮小程度) から導かれる。運動視差事態では、第1運動要素と第2運動要素が存在するが、SKE 事態では、第2運動要素は存在しない。

さらに、別の角度から運動視差と SKE とを比較すると、運動視差は観察者の運動によって誘導される奥行位置の異なる対象の角速度と観察者の運動速度とが網膜上で合成されたものと理解できる (図2)。すなわち、運動視差は、対象-中心の速度変化と観察者-中心の速度変化の合成である。一方、SKE では、観察者-中心の速度変化は存在しないので、対象-中心の速度変化のみで示される。対象-中心の速度変化は、先の第1運動要素に該当する。また、運動視差事態では、対象が観察者の運動に伴って左右方向にシフトするので、観察者と対象とのなす角度を直接知ることができるので、対象が  $z$  軸を中心として回転する事態において必要とされた第2運動要素に該当するのは、対象の相対的奥行を知る上で必要とされない。

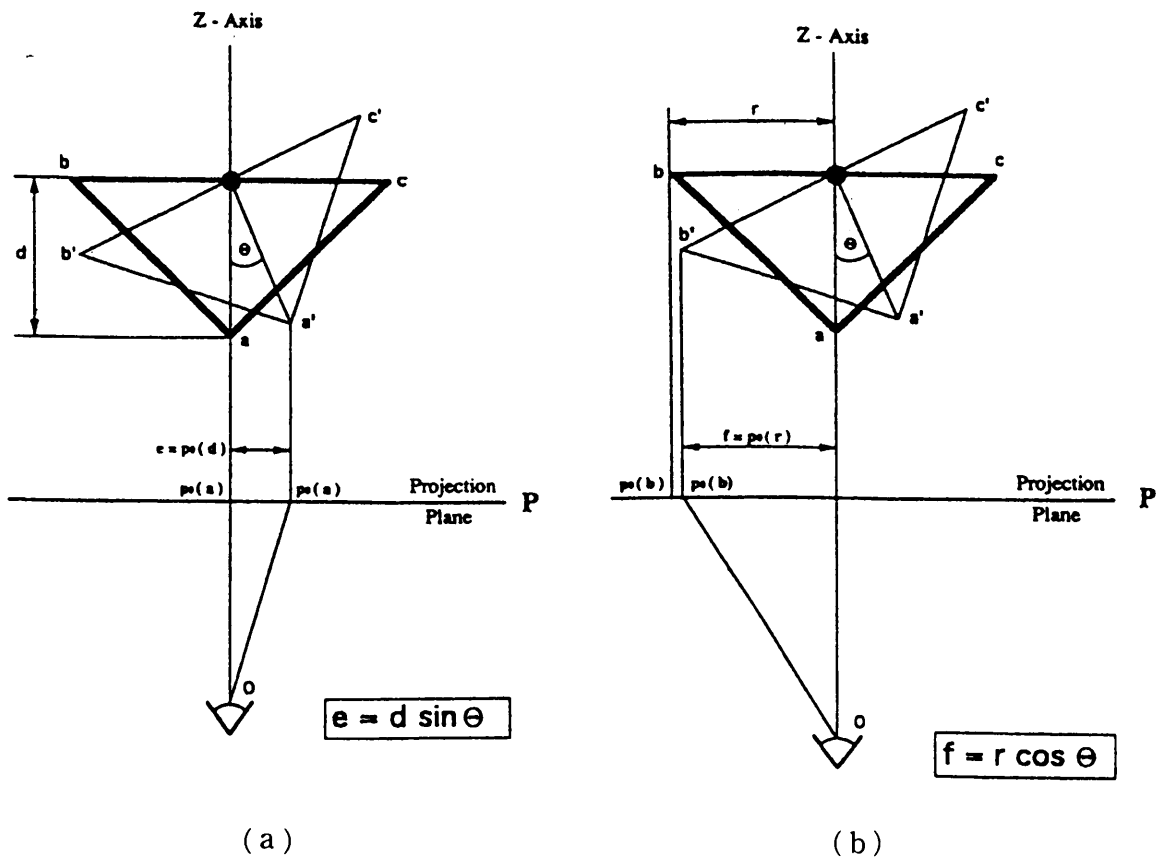


図1 (a)円錐体がY軸を中心として反時計回りに回転( $\theta$ )するとき、円錐体の頂点が投影面(P)でどのようにシフトするかを図解したもの。Z-Axisは視線軸を、 $abc$ と $a'b'c'$ は円錐体の断面を指し、しかも $abc$ は回転の前を、 $a'b'c'$ は回転の後を、 $d$ は円錐体の高さ(奥行)を各々示す。  
(b)円錐体がY軸を中心として反時計回りに回転したときの円錐体の底面の投影面上における長さ変化を図解したもの。(Caudek & Profitt 1993)。

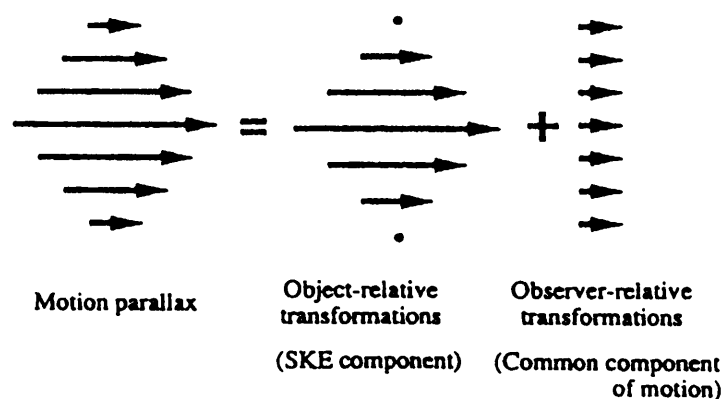


図2 運動視差の運動要因の図解。運動視差は対象—中心的運動要素と観察者—中心的運動要素の合成から成立する (Caudek & Profitt 1993)。

運動視差とSKE事態では、実際には、対象の相対的奥行はどのように知覚されているかが、Caudek & Profitt(6)によって、運動視差事態とSKE事態とを同一のパターンでシミュレートすることを通して実験的に吟味された。パターンは、水平におかれたくさび型で、対象—中心の速度変化と観察者—中心の速度変化が加えられた。観察者—中心の速度変化を起こすには、観察者を運動させる場合とディスプレイを観察者が移動するように動かし、同時にディスプレイ内のドットも

それに随伴して変化させる場合の2通りがある。また、観察者も静止して観察する場合と運動して観察する場合の2通りがある。ディスプレイ要因が2通り、観察者要因が2通りあるので、総計4種類の刺激条件で運動視差とSKEが設定されることになる(図3)。視かけの相対的奥行が、この4種類のシミュレーション条件下で、くさび型の奥行を変化させて(これは、くさび型の横幅に対する奥行の比率を操作することで変えられた)測定された。その結果、「奥行/横幅」比の増大にともなって視かけの奥行も直線的に増大したが、この関係には運動視差とSKE間で差がなく、直線の勾配は同一であった。このことは、視かけの奥行が対象—中心の速度変化のみで規定されていることを示す。対象—中心の速度変化のみでは、その絶対量は理論的には確定できないので、視覚システムはある特有の推定(perceptual heuristic)を行うと考えられる。それには対象の投影されたときの大きさ要因が関係し、事実、対象の大きさを拡大すると、それに比例して視かけの奥行も増大した。視覚システムは、対象の横幅が大きいと対象の相対的奥行も深いとする知覚的仮説を立て、対象—中心の速度変化と合わせて、対象の視かけの相対的奥行を算定すると、Caudekらは考えている。


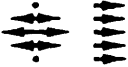

			DISPLAY	
			Object-relative	Object-relative + Common Component
				
OBSERVER	STATIONARY	.	SKE	MOTION PARALLAX
	MOVING		MOTION PARALLAX	SKE

図3 運動視差条件とSKE条件とが観察者と対象の静止と運動によってどのように規定されるかを図解したもの(Caudek & proffitt 1993)。

### 2.2.3 次元表示へのステレオキネティック効果の応用

コンピュータ・グラフィックス(CG)技術は、CRT上に対象の形状、その形状の変化、対象の運動などを表示可能にし、さらには、対象の3次元形状をも表示可能とするまでに発展しつつある。3次元形状を表示するためには、何らかの方法で、各眼に網膜視差をもつ刺激を別々に入力してやらねばならない。しかし、これには比較的大がかりな装置とコストが、とくに対象が運動する条件では、必要となる。もし、ステレオキネティック効果(SKE)を利用することができれば、3次元形状を比較的簡単なソフトプログラムで再現できる。

Kaiser(14)は、前述したCaudek & Proffitt(6)にもとづいて、SKE要因のみで、すなわち対象—中心の速度変化である第1運動要素のみでの3次元形状の表示を試みた。3次元表示が可能になると便利なものに、等高線地図がある。これは、航空機の操縦に際しても、地形から飛行経路確認のために利用されている。等高線地図は、輪郭線の勾配を変えることによって地形の高度を表示するが、高速で飛行する機上から、この地図と眼下の地形を照合するのには、相当の習熟を必要とする。しかしもし、地形の高度を3次元表示できれば、この種の照合は容易となる。そこで、図4に示さ

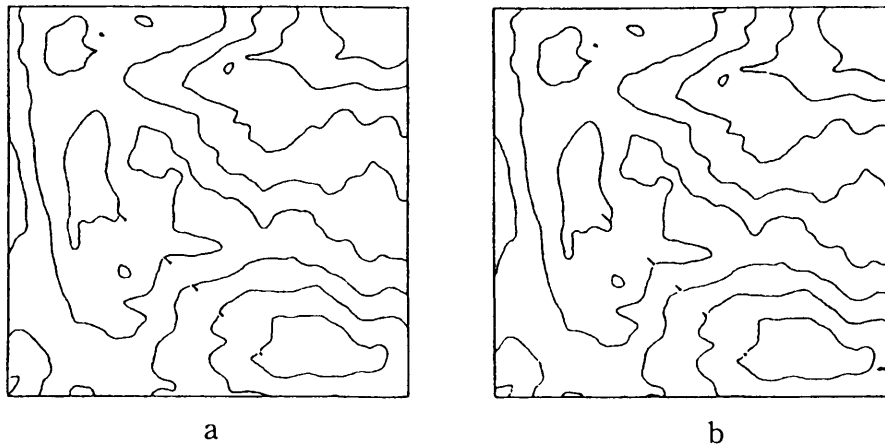


図4 SKEを利用した等高線地図(2フレーム分)。図中の矢印はSKE運動中の輪郭線の運動の大きさを示す (Kaiser & Proffitt 1992)。

れたように、地形の示す輪郭は変えないまま、地形の高度に対応して輪郭線をx軸とy軸方向に周期的に振動させるプログラムが開発された(表1)。ただ、運動残像がおきるので、振動時間と休止とを適当に組み合わせる必要がある。さらに、航空管制での航空機の飛行高度の変化の表示への応用も試みられた。航空管制で必要なことは、飛来する複数の航空機に飛行高度の指示を与え、その結果、航空機が高度を変えたとき、変える以前の飛行高度と変化後の飛行高度の両方を飛行方向とともに表示されることが望ましい。これまでは、飛行方向の表示のみで飛行高度は表示されていない。そこで、図5に示されたように、はしご(梯子)形状のアイコンを考案し、はしごの両サイド

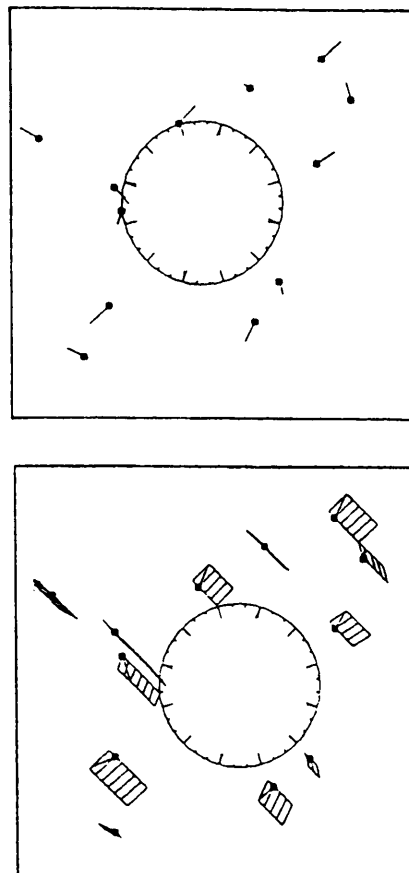


図5 航空管制のためのディスプレイ。(a)従来の航空機の進路方向のみが2次元で表現されている。(b)航空機の航空高度の変化が、SKEを利用し、「はしご」アイコンで3次元表示されている (Kaiser & Proffitt 1992)。

表 1 ステレオキネティック効果を利用した 3 次元表示のプログラム

```

/* demo version of ske-topographical map display */
#include <stdio.h>
#include <pixrect/pixrect_hs.h>
#define NULLPR (struct pixrect *) NULL
#define MAXLEV 32 /* number of contour surfaces (parallel planes) */
struct pixrect *PR, *B, *OVR[MAXLEV];
main ()
{
    int i;
    int ske, obs;
    int xobs, yobs;
    int xske, yske;
    int x0, y0, x1, y1, elev;
    PR=pr_open ("/dev/fb");
    cmap ();
    for (i=0; i<MAXLEV; i++)
        OVR[i]=mem_create (512, 512, 1); /* create 512×512 overlays, 1 bit deep */
    B=mem_create (256, 256, 1); /* display buffer is 256×256 */
    /* read map elevation data from stdin */
    while (5==scanf ("%d %d %d %d %d", &x0, &y0, &x1, &y1, &elev))
        if ((elev<MAXLEV) && (elev>=0))
            pr_vector (OVR[elev], x0, y0, x1, y1, PIX_SET, 0);
    /* draw each vector in the overlay appropriate to its elevation */
    /* clear graphics buffer */
    pr_rop (PR, 0, 0, 1152, 900, PIX_CLR, NULLPR, 0, 0);
    /* draw 512×512 reference map (below main display) */
    for (elev=0; elev<MAXLEV; elev++)
        pr_rop (PR, 0, 256, 512, 512, PIX_SRC | PIX_DST, OVR[elev], 0, 0);
    ske=0; /* index ske phase */
    obs=0; /* index position of observer */
    while (1)
    {
        xske=yske=ske<2? ske-1:3-ske; /* diagonal oscillation ske (arbitrary) */
        xobs=obs<256? obs:512-obs;
        yobs=128; /* horizontal translation of viewer (arbitrary) */
        /* clear buffer */
        pr_rop (B, 0, 0, 256, 256, PIX_CLR, NULLPR, 0, 0);
        /* construct the display (this is the important part)
        for each elevation (elev), superimpose the part of the appropriate overlay (OVR[elev])
        indexed by the observer's position (xobs, yobs) to the temporary buffer (B), offset one
        increment (xske, yske) for each level of elevation */
        for (elev=0; elev<MAXLEV; elev++)
            pr_rop (B, 0, 0, 256, 256, PIX_SRC | PIX_DST, OVR[elev], xobs-xske*elev, yobs-yske*elev);
        /* copy buffer to screen */
        pr_rop (PR, 0, 0, 256, 256, PIX_SRC, B, 0, 0);
        obs= (obs+4) %512;
        ske= (ske+1) %4;
    }
}
cmap ()
{
    unsigned char red[2], grn[2], blu[2];
    red[0]=grn[0]=blu[0]=0;
    red[1]=grn[1]=blu[1]=255;
    pr_putcolormap (PR, 0, 2, red, grn, blu);
}

```

で現在の飛行位置と次の飛行位置を、はしごの横木で飛行高度を表示した。そして、飛行高度の3次元表示は、はしごの横木を、最下段を除き、高度に対応して振動させる方法で行われた。

SKEを利用した3次元CGは、プログラムが簡単で、しかも他の方法と同程度の3次元表示が可能である点で優れている。

### 2.3. トランスレイションとローテーションからの3次元形状の復元

観察者が動いたりあるいは対象が移動すると、網膜上に投影された対象の運動速度勾配ができる。観察者が対象を頭部を左右に振りながら観察するとき、観察者と3次元対象のある部位までの距離に対応して網膜角速度が変わる。観察者と対象のある部位まで距離が大きいと網膜角速度は遅くなり、逆に距離が小さいとそれは速くなる。これは極投影下でのトランスレイション (translation) と呼ばれ、観察者中心座標での3次元情報となる。一方、対象を頭部をシフトさせながら観察するとき、対象のY軸に関して速度勾配ができる。対象のある部位がY軸より近い場合には、網膜角速度が速くなり、逆にY軸に遠い場合には、遅い角速度となる。これは平行投影下でのローテーション (rotation) と呼ばれ、対象中心座標での3次元情報となる。

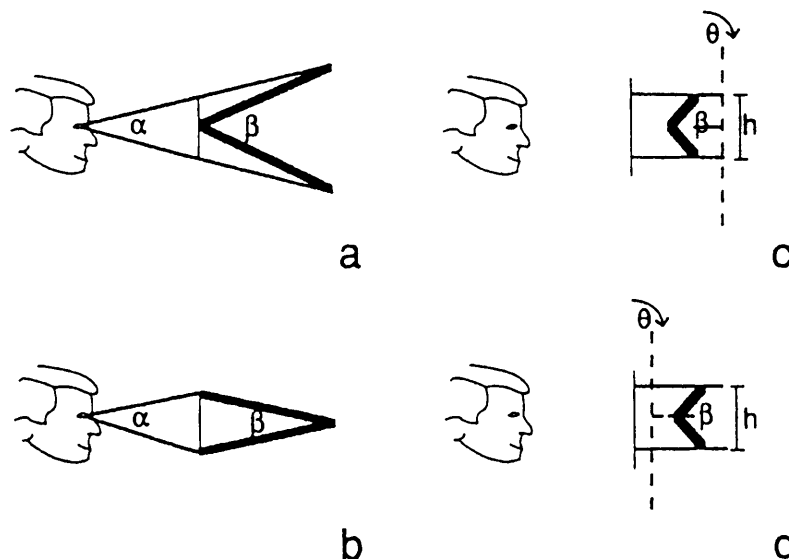


図6 極投影条件 (a,b) と平行投影条件 (c,d) (Braunstein, Liter & Tittle 1993)。

Braunstein, Liter & Tittle(2)は、図6のようなパターンをCRT上にシミュレートし、極投影下でのトランスレイションからの3次元形状の復元と平行投影下でのローテーションからのそれとがどのように異なるかをしらべた。その結果、(1)平行投影下でのローテーション事態でも、極投影下でのトランスレイション事態と同様に、網膜角速度が速い部分は観察者の手前に定位されて見えること、(2)網膜角速度が速い方が手前に定位される関係は、両投影条件とも、速度勾配が小さい方が顕著であること、(3)シミュレートされたくさび型の角度を測定すると、平行投影条件では過小視が、極投影条件では過大視が起きることなどが示された。網膜上での速度勾配は、知覚的には、極投影下でのトランスレイションおよび平行投影下でのローテーションの両方の視点、すなわち、観察者中心座標と対象中心座標の両方から得られた情報として処理されている。

### 2.4. 運動視差と立体面の出現方向 (depth order)

運動視差による立体出現は、観察者が運動しながら静止した対象を観察する条件、あるいは観察

者が静止したままC D Tに提示された運動する対象を観察する条件の両方で可能である。しかし、観察者が静止した条件では、立体面の奥行出現方向が安定せず、奥行の反転が起こる。これは観察者が静止しているのに、その前庭感覚あるいは自己受容感覚が働かないためか、あるいは遠近性、肌理勾配などの付加的なオブティカル・フローが存在しないためである。Rogers & Rogers(25)は、図7に示された観察条件で奥行反転を抑制する要因をしらべた。図中、(a)では、観察者、観察者とC R Tを結ぶ空間(還元トンネルで、トンネル状に上下左右が囲まれている)、およびC R Tを静止した条件で、C R Tに提示されたランダム・ドットがサイン波状に左右に自動的にシフトする。(b)観察者が頭部をシフトさせると、それに連動してパースペクティブ要因が出現しないように還元トンネルとC R Tが動く。C R T上のランダム・ドットは観察者の運動に連動しシフトする。ここでは観察者の前庭、自己受容感覚のみが分離されている。(c) C R Tのみをシフトさせ、その動きに連動してパターンのパースペクティブを変形させ、これが手がかりとなるように操作する。還元トンネルと観察者は動かさない。(d) C R T、還元トンネル、観察者は静止させたまま、パターンの上下を拡大／縮小して垂直方向のパースペクティブを与える。(e)は(d)と同様に、垂直方向のパースペクティブと連動して水平方向の線分の太さを変えることによってパースペクティブを与える。(f)還元トンネル内の壁に不規則な白と黒の模様を描き、これを左右にシフトする。C R Tと観察者は静止したままである。ここでは、観察者からC R Tまでの空間のオブティカル・フローが手がかりを与える。観察の結果、観察者の前庭・自己受容的要因、パースペクティブ要因とも奥行反転を減らし、奥行出現方向に安定をもたらすことが示された。

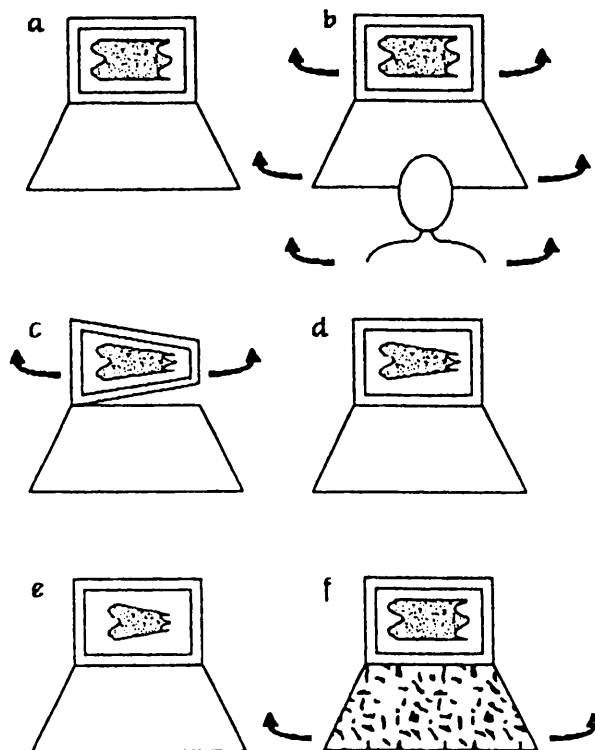


図7 運動視差事態での視覚的情報と非視覚的情報の働きをしらべるための実験装置と条件。(a)統制条件、(b)観察者の運動に伴い非視覚的情報が働く条件、(c)CRTの移動に伴い画面のパターンにパースペクティブをつけた条件、(d)画面のパターンに垂直方向のパースペクティブをシミュレーションした条件、(e)垂直方向とともに水平方向のパースペクティブを水平線分の太さをシミュレートすることによって変化させた条件、(f)観察者とCRTまでの間の空間を左右にシフトさせた条件 (Rogers & Rogers 1992)。



## 2.5.運動性奥行効果 (KDE) と剛体性拘束条件

計算機科学の視点から運動性奥行効果を考えるとき、対象の2次元上での運動からは無数の3次元対象が復元可能である。これを解決するには、知覚された対象は剛体性をもつという拘束条件を仮定する必要がある。しかし、2次元面の運動が、視かけ上、伸びたり、曲がったりしながら運動する生物のように知覚される例が挙げられ (Johansson 1975, Todd 1982 1984)、この拘束条件が人間の知覚過程には必ずしも妥当しないとも指摘される。Ganis, Casco & Roncato (9) は、2次元面の運動から非剛体的な3次元対象が知覚される可能性について、図8のような8個のドットを垂直軸を中心に回転して見えるように提示し、このとき、8個のドットの長さが、視かけ上、回転中に伸びるように操作して非剛体性を導入した。観察の結果、非剛体的知覚は、対象に導入した非剛体性によるのではなく、フェーズ (ドットが1フレーム分シフトしたときの回転角度) に依存して変わる (半径が小さいと非剛体的に視える) が示された。これは、フェーズが小さいと2つのドット間に強い知覚的結合ができてしまい、これが剛体性をもつ対象の出現を妨げるためと考えられる。2次元面で運動する対象の長さや運動方向が変化しないときには、KDEは生じにくい。ノイズを背景として予め決められた2個のドット (回転するように2次元面で運動する) の検出率をしらべてみると、フェーズが小さいときに検出率が高いことが示された。これらのことから、KDEでは、複数のドット間に仮想的なまとまりができてしまうと、剛体的な3次元対象の出現が妨げられると思われる。

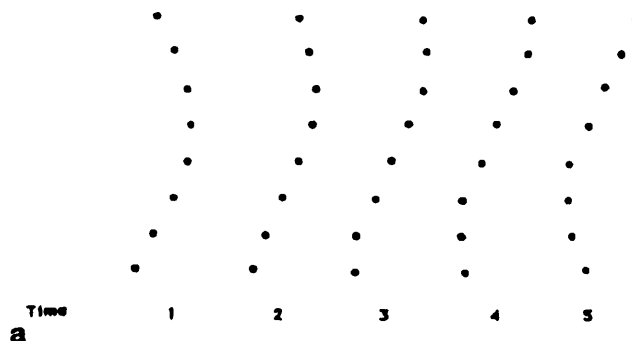


図8 KDEでの剛体性拘束条件をしらべるための刺激パターン。1フレーム当たり、ドットは30度回転し、30度位相する (Ganis, Casco & Roncato 1993)。

## 2.6.運動性奥行効果 (KDE) と光学的不変項

KDEは光学的に変形するものの中から不変項を視覚システムが抽出した結果として生じるもので、これは運動対象での形の恒常性であると、Gibson, J. (1979) は考えた。光学的不変項とは、例えば、あるスライドを斜めに投影してもまっすぐな壁に投影したものと同一の内容が保存されるが、このような投影に際し、その角度、大きさ、あるいは回転などによっても光学的に変わらない特徴をいう。このような不変項は、光学では、クロス比 (cross ratio) で表すことができる。クロス比の計算は、図9に示されている。図中、A、B、C、Dは4辺形の頂点を $\phi$ は座標軸の原点 (0,0) を示す。クロス比は、この4辺形の場合、3角形AD $\phi$ の面積と3角形BC $\phi$ の面積の積を3角形AB $\phi$ の面積と3角形CD $\phi$ の面積の積で除して得られる。

KDEでの形の知覚が、はたして、光学的不変項にもとづいているか否かについて、このクロス比との関連で検討された。もし、視覚システムが不変項を抽出していれば、KDE条件で提示された図形のクロス比と、それと知覚的に等価とされた図形のそれとは一致すると考えられる。Niall (20) は、図10に示されたように、4辺形を奥行方向に回転してKDEをつくり、そこに出現した形

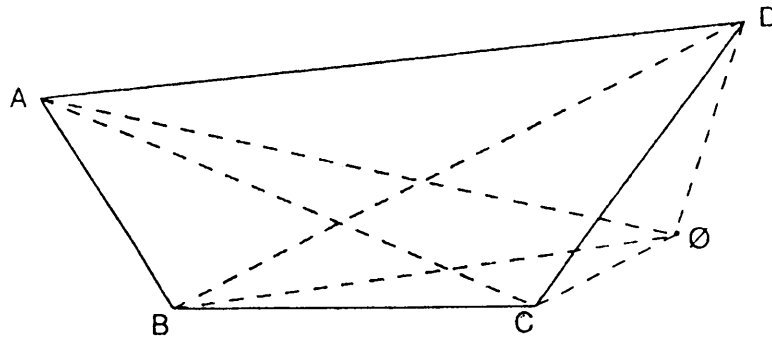


図9 クロス比は、この4変形の場合、 $(\triangle AD\phi\triangle BD\phi)/(\triangle AB\phi\triangle CD\phi)$  で計算できる (Niall 1992)。

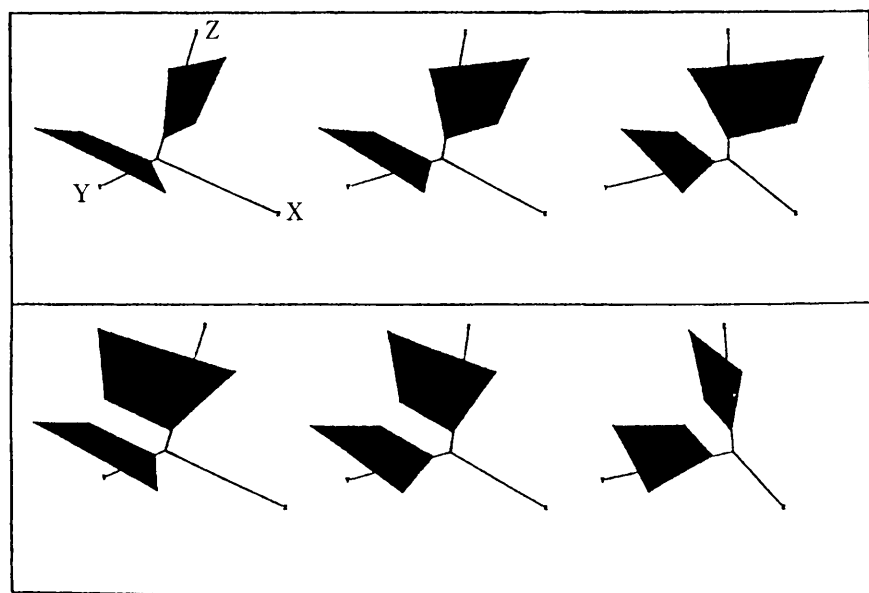


図10 KDEにおける剛体性拘束条件をしらべるための刺激パターン。奥行方向に回転して提示した標準刺激 (XY座標面) を比較刺激の1頂点を変化させて形態についてのマッチングをさせる。比較刺激はYZ座標面 (上段) あるいはXZ座標面 (下段) に提示される (Niall 1992)。

を、比較刺激として提示した4辺形の1頂点を操作させて再現させた。比較刺激は静止条件と回転条件の2通りで提示される。再現された形のクロス比を計算し、これをKDE条件で使した4辺形のそれと比較したところ、一致しないことが明らかにされた。面図形の他に立体図形(3角錐体)でも同様な結果であった。これらの結果は、視覚システムは、KDEにおいて、形についての不変項を直接的には検出していないことを示唆する。

## 2.7. オプティカル・フローと自己移動錯覚

視野が視線に平行あるいは直角に移動するとき、観察者は自分が反対方向に動くような錯覚をもつ。これは自己移動錯覚と呼ばれる。これまでの研究によれば、視野の周辺領域の運動刺激は自己移動錯覚を起こし、視野の中心領域の運動刺激は対象の運動として知覚されるという (Brandt et al. 1973, Johansson 1977)。これに対して、視野の中心領域での運動刺激でも、それが奥行的により遠い面上を運動するのであれば、自己移動錯覚を起こすことができる (Andersen & Braunstein 1985, Ohmi & Howard 1988)。

視野の中心領域での運動刺激が自己移動錯覚を起こすか否かについて、とくに、運動視差と運動性オクルージョン要因によって視野に奥行印象を誘導したときの自己移動錯覚が Telford, Sparatley & Frost (26) によって検討された。その結果、(1)中心領域が後面にあるように知覚された場合には、それが前面に視える場合に較べてより強い自己移動錯覚が生起する、(2)中心領域がより周辺視野に移すと、自己移動錯覚は減少する、(3)中心領域と周辺領域の運動刺激の方向をそれぞれ反対方向にとっても自己移動錯覚は無影響で、その時の自己移動錯覚は中心領域が後面に視えたときに生起しやすい、などが明らかにされている。

## 2.8. 運動視における窓問題

図11-a に示したように、縞あるいは格子パターンを小さな窓を通して左から右に水平に運動させると、斜め縞パターンでは斜め下方向への運動が、斜め格子パターンでは右水平方向への運動が知覚される。この現象を説明するために、Adelson & Movshon (1982) は、まず、方向をもつ刺激線分間の速度が見積られ、次いで、2次元のパターンが全体としてどの方向に運動するかをそれらの

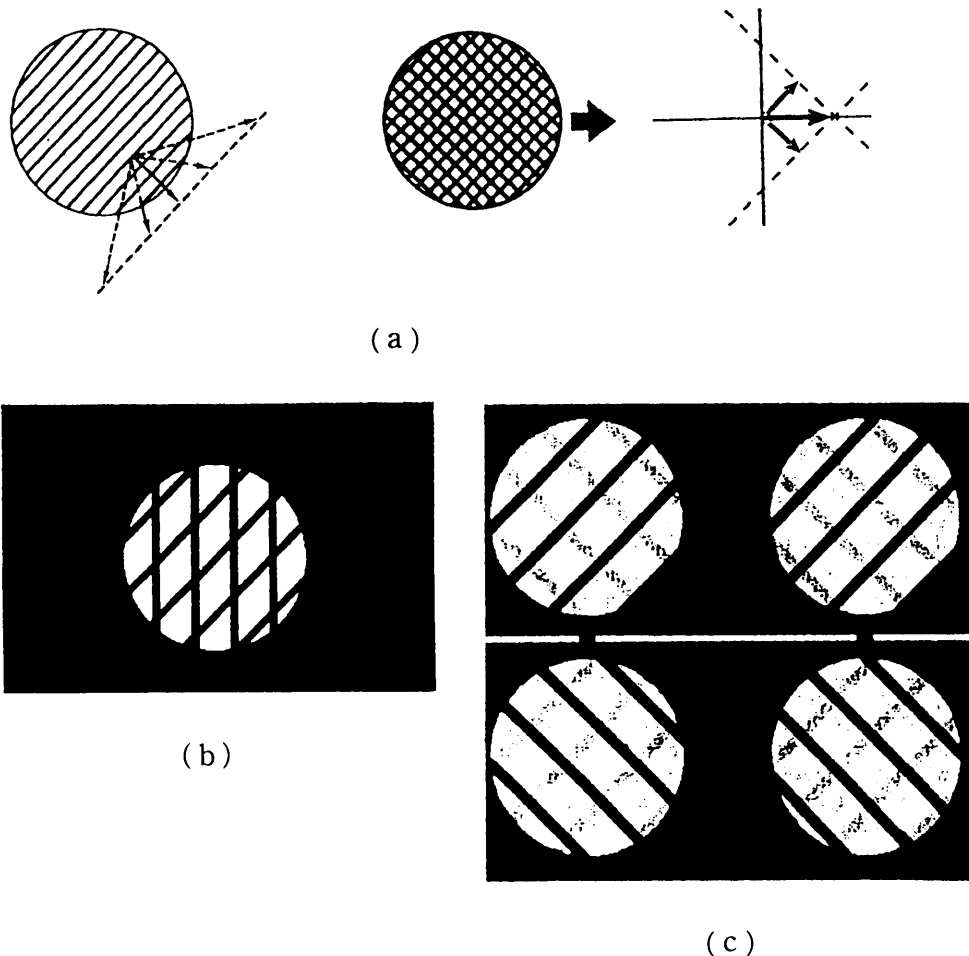


図11 運動視における窓問題。(a)斜縞あるいは格子縞パターンは左から右へと水平に運動する。点線の矢印は物理的に妥当な運動方向を示し、実線の矢印は知覚される運動方向を示す。(b)格子縞パターンの中、垂直線分を静止させたまま、斜め線分を右水平方向に運動させる。パターンは、全体として垂直下方向に動いて視えるが、垂直線分を斜め線分より細くすると、斜め線分のみが斜め下方向に動いて視えるように変わる (Bressan, Ganis & Vallortigara 1993)。(c)運動視における窓問題と3次元視との関係をしらべるためのステレオグラム。格子縞パターンを構成する右下がりあるいは左下がり斜め縞は同一の奥行面に存在しないように両眼視差を利用して操作される (Trueswell & Hayhoe 1993)。

運動要素から計算すると考えた。斜め縞パターンの場合、視かけの運動方向は、物理的に妥当な2つの運動方向のベクトル合成で規定され、斜め格子パターンの場合にも、同様に、方向が各々反対である2つの線分から生じる運動ベクトルの合成ベクトルで決まる。これに対して、図11-bのパターンにみられるように、斜め縞線分のみを水平方向に運動（垂直線分は静止）させると、パターンは、全体として視かけ上、垂直下方向に動く。このとき、垂直線分を斜め縞線分より細くすると、斜め縞線分のみが斜め下方向へに動くように見え、逆にそれを斜め縞線分より太くすると、パターン全体が垂直方向に運動して見える。垂直線分と斜め縞線分の輝度比をかえても同様なことが起こる。パターン全体として垂直方向への動きが出現するのは、垂直線分が明るく同時に斜め縞線分の上にあるように表示された条件である。これらのことから、垂直線分と斜め縞線分の交点では、どちらが奥行的に上側（近方）にあるかの情報を伝えているが、垂直線分が奥行的に分離し下側（遠方）に見えるときには知覚的に存在せず、したがって、視かけの運動は斜め縞線分の運動方向のみで規定されてしまうためにこの種の現象が起こると説明されている（Bressan, Ganis & Vallortigara(4)）。

同様に、運動視における窓問題は、運動視メカニズムの回路系では解決できない。窓問題の刺激条件をみると、運動する斜め縞は窓際で2通りの消え方をするように知覚できる（Shimojo, et al. 1989）。一つは、斜め縞が窓際で断ち切られるとする見方であり、他は、斜め縞が別の面のなかに隠れていくとする3次元的な見方である。事実、窓問題での運動錯視が生じるのは最初の見方しかできないような刺激条件であり、第2の見方、すなわち奥行手がかかり（網膜視差）を利用して運動する縞パターンが窓とは同一の奥行面に存在しないように奥行手がかかり（網膜視差）をつけると、運動錯視は生じなかった。この結果は、図11-cに示されたように、縞の方向が互いに反対方向をとる斜め縞を重ね合わせ、同時にそれらのパターンが同一の奥行面に存在しないように透明要因と網膜視差を利用して奥行手がかかりをつけると、パターン全体としての垂直下方向への運動は出現せず、パターンを構成する斜め縞パターンに固有な方向への、斜め右あるいは斜め左への運動が出現するようになった（Trueswell & Hayhoe(35)）。

運動視における窓問題での視かけの運動方向は、これらの結果にも示されたように、運動視の処理回路のみでは決められず、運動視の処理回路とは無関係の回路である図一地分擬あるいは3次元視の回路の関与をまっしてはじめて確定される。

## 2.9. オプティカル・フローと3次元視

オプティカル・フローからの3次元構造の復元問題は、心理学と計算機科学の両方から研究が進められている。計算機科学では、オプティカル・フローから3次元構造を復元するための最適なアルゴリズムを開発するために、オプティカル・フローに内在する奥行情報について理論的に分析する。心理学は、人間の視覚システムが計算機科学で仮定された奥行情報処理過程のアルゴリズムに基づいて3次元構造を知覚しているかについて検証する。Simpson(30)は、両領域で行われたこれまでの研究を概観し、以下の諸点を指摘した。(1)オプティカル・フローのなかには、並進的成分(translation、観察者が奥行の異なる複数のものをx軸、y軸、z軸にそって動かしたときに網膜面に生じるフロー)と回転的成分素(rotation、対象をx軸、y軸、z軸を中心として回転させたときに生じるフロー)とがある。いま、奥行の異なる2つの平面があるとき、それを並進的、回転的に動かしたと仮定して、そのときの並進的成分と回転的成分を示すと、図12ようになる。図からも明らかのように、眼球を中心として回転させた場合には、すべての投影点はその奥行位置と無関係に同一の角速度で動くので、この中には奥行情報は存在しない。したがって、人間の視覚システムは回転成分を捨象し、並進的成分を残すことによって奥行を知ると予測される。しかし、精神物理学的にし

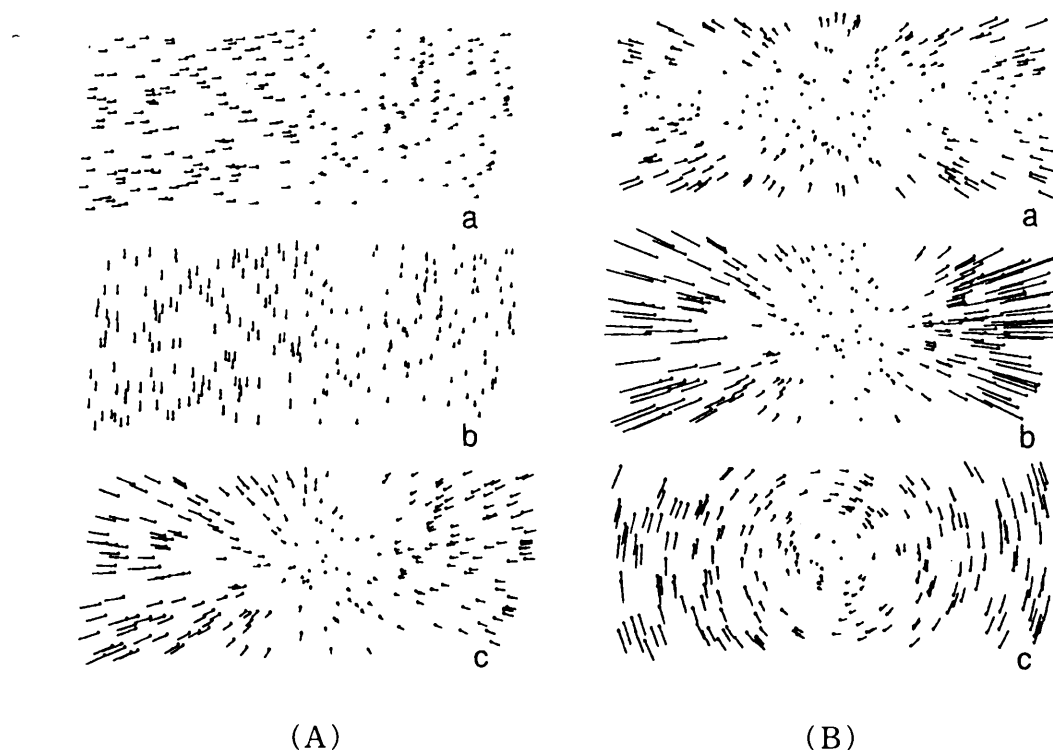


図12 オプティカル・フロー。(A)並進運動のオプティカル・フローを示し、(a)はx軸方向、(b)はy軸方向、(c)はz軸方向への運動を表す。(B)回転運動のオプティカル・フローで、(a)はx軸中心に、(b)はy軸中心に、(c)はz軸中心に回転している (Simpson 1993)。

らべてみると、視覚システムは、回転成分を捨象する能力は小さい。(2)x軸とy軸についての面の傾きあるいは面の凹凸は、理論的には網膜角速度の空間についての1次あるいは2次微分から復元できるが、視覚システムがこのような計算をしているとは考えられない。(3)オプティカル・フローのなかの速度成分が3次元を復元する主要素であるが、速度成分以外の成分、たとえば、肌理密度、線分の長さ、面積などの成分変化も一定程度の奥行情報を担う。(4)KDEとSKEは、並進的成分をもつために3次元的に知覚される。(5)オプティカル・フローから3次元構造を復元する研究領域には、奥行方向の多義性問題、非剛体性のオプティカル・フローにもとづく3次元構造の復元問題、独立に運動する物体からのオプティカル・フローから各々の物体を分離する問題などが残っている。

オプティカル・フローからの3次元構造復元をコンピュータに行わせるにしろ、あるいは視覚システムが行うにせよ、上述の問題を解決する必要がある。

### 3. 両眼立体視

#### 3.1. 網膜視差と肌理要因の相互作用

計算機科学と精神物理学の領域では、網膜視差、肌理あるいはパースペクティブ、運動要因、陰影要因からどのようにして立体が知覚あるいは復元されるかについて研究が行われてきたが、その前提には、これらの要因はいずれもひとつのモジュラー内で単独に処理されると仮定されていた。しかし、それぞれの要因からの形状復元を考えると、複数のモジュラー間の相互作用と統合過程が重要であることが指摘されている。Buckley & Frisby(5)は、網膜視差と肌理要因が軽度知覚闘争的にある事態を設定し、それが視かけの奥行出現に与える影響を通して、両要因の相互作用と統合過程の分析を試みた。図13(a)(b)(c)のステレオグラムでは、y軸に平行な円柱状凸面が、(d)(e)(f)では、x軸に平行な同形凸面が出現する。そして、(a)(d)では網膜視差の示す奥行深度が大

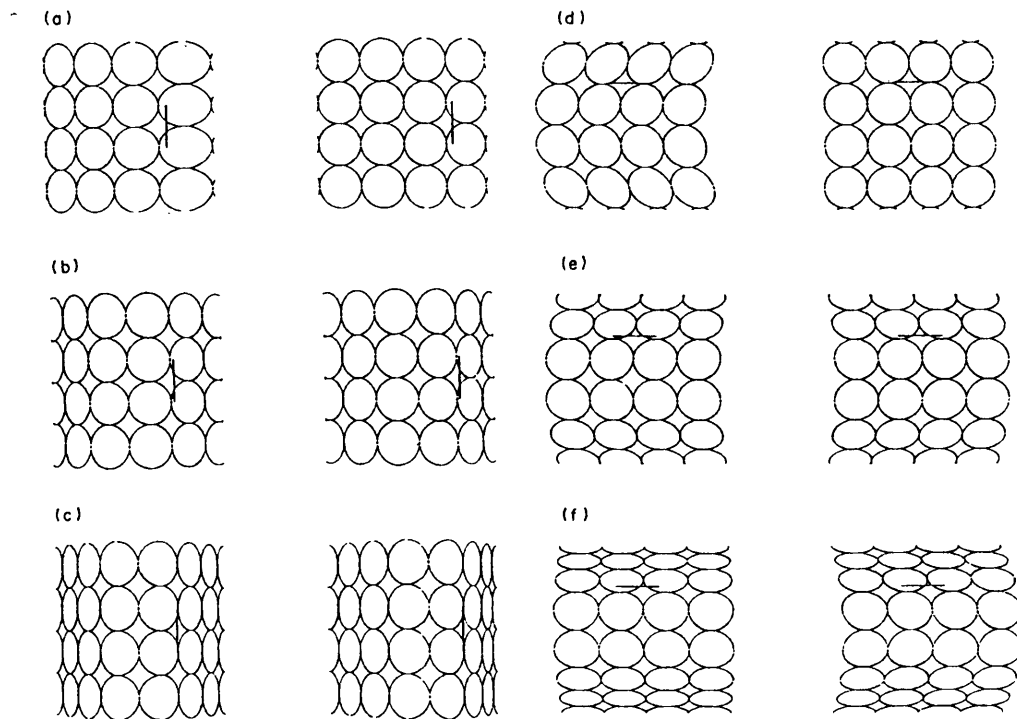


図13 網膜視差と肌理要因の相互作用と統合過程をしらべるためのステレオグラム。(a)(b)(c)ではY軸に平行な円柱状凸面が、(d)(e)(f)ではX軸に平行な円柱状凸面が出現する。ただし(a)(d)では網膜視差が深い奥行を示すのに肌理要因は浅い奥行を表すように操作され、(c)(f)ではそれらの関係が逆になるように操作されている (Buckley & Frisby 1993)。

きいのに肌理要因の示すそれは浅くなるように、また、(c)(f)ではそれらの関係が逆転するように、(b)(e)では両要因の示す奥行深度は一致するように、各々操作してある。各ステレオグラムの視かけの奥行深度を測定したところ、(1)X軸方向に凸面が出現する場合には、網膜視差が優勢となる、(2)Y軸方向に凸面が出現する場合には、肌理要因は奥行深度の浅い条件(3-6 cm)で優勢となるが、深い条件(9 cm)では優勢とはならない、(3)実物モデルを使用した場合(円柱形の表面に肌理要因を表示したもの)には、網膜視差が優勢となるなどの結果が得られた。複数の奥行手がかりから形状を復元する統合過程で、空間異方性が存在すること、また実物モデルとステレオグラム条件とで網膜視差と肌理要因の働きが異なるのは、眼球調節要因が関与していることなどがこれらの結果から示唆される。

### 3.2. 色情報のみによるRDS立体視は可能か

両眼立体視には、3種類の視覚情報処理経路(大細胞チャンネル、小細胞チャンネル、プロップチャンネル)のうち、大細胞チャンネルのみが関与している(Livingstone & Hubel 1987, 1990)。事実、カラーコントラスト要因(color contrast)のみで作成されたRDSでは両眼立体視が成立しないことは、大細胞層には色対立型の受容野が存在しないことと一致する。これに対して、ステレオグラムの対応領域の輝度を反転させ、このとき併せて対応領域にカラーコントラスト要因を追加すると、両眼立体視成立までの時間が長くなるものの成立する(Julesz 1971)。等輝度でもフィギュラル・ステレオグラムでは両眼立体視が成立することは確からしい(Comerford 1974, Gregory 1979, de Weert 1979, de Weert & Sadza 1983)。しかし、等輝度RDSの場合には、両眼立体視が成立しない結果が得られたもの(Lu & Fender 1972, Gregory 1979, de Weert 1979)と成立する結

果が得られたもの (de Weert & Sadza 1983, Grinberg & Williams 1985) とが報告されていて、不明である。そこで、カラーコントラスト要因で構成された RDS 両眼立体視の可能性が、Julesz タイプの輝度反転 RDS を修正したステレオグラムで検討された (Stuart, Edwards & Cook (33))。ここでは、Julesz のようにステレオグラムの対応領域すべてのドットの輝度を反転させるのではなく、その1部の領域内のドットの輝度もしくは色要素、あるいはその両方をノイズレベルを操作して反転させた (ノイズレベルは反転させるドット数で操作され、ノイズレベル50%は対応の存在しないステレオグラムを、ノイズレベル100%はコントラスト反転ステレオグラムを指す)。もし、両眼立体視で色要素が手がかりとして利用されていなければ、両眼立体視が成立するまでに要する時間は、色要素の反転の如何あるいは程度に関係なく、輝度要因のノイズレベルで規定されると予想される。実験の結果、6人の被験者のうち、3人は色要素が対応し輝度要素が対応しないときのみ、3分以内に両眼立体視が成立、残りの3人は輝度要因が完全に反転した条件で両眼立体視が成立した。輝度要素と色要素のコントラストが信号対ノイズ比を変えることによってモザイク状に散在する条件では、色要素は輝度要素と同等の役割を RDS 両眼立体視で果たしている。

### 3.3. 色彩立体視 (chromostereopsis)

色彩立体視とは、等観察距離にある色の異なる対象が奥行的に相違して視えることをいう。たとえば、黒い背景のもとにある赤い対象は、青い対象よりも、それらが等観察距離におかれているにも関わらず、観察者に対して手前に見え、また白い背景下にそれらをおくと見えの奥行関係が逆転する。色彩両眼立体視は、両眼間に生じるレンズによる色収差で説明される。すなわち、色の異なるものを注視すると、レンズの色収差によって各網膜像に2重像視が生じ、この左右眼での2重像の何らかの差が網膜視差となり、立体視が出現するというわけである。この色収差説は瞳孔の大きさが小さいときには妥当するが、対象の明るさを暗くしたり人工瞳孔を使うなりして瞳孔の大きさを大きくするときには、色立体視の出現程度が減少し、うまくあてはまらない。これを説明するための修正仮説が3種類提起された。その1は、瞳孔の大きさが変わることによって2つの対象からの各々の入射角が変わるためとするもの、その2は、瞳孔が大きいと、色収差が大きくなり、結果として2重像が広がり、色立体視が損なわれるとするもの、その3は、色収差による2重像が Stiles-Crawford 効果によって修正されるためとするものである。Stiles-Crawford 効果とは、瞳孔の周辺から入射する光は、その中心から入射する光に較べて色がずれて視える現象をいう。瞳孔と色収差との関係は図14に示されている。Ye et al. (36) は、これらの仮説のいずれが正しいかを検証するために、色収差による2重像が瞳孔の大きさ変化に伴って変わるか、あるいは大小の人工瞳孔を正確に同一位置に設定し、色収差を完全に統制した状態で色立体視はどのようになるか、さらには暗所視と明所視条件を設定し、Stiles-Crawford 効果の有る条件と無い条件で色立体視の出現は変わるか否かについて各々しらべた。実験の結果、瞳孔の大きさが変わると、色収差が減少し、その結果として色立体視が減少すること、また入射角をこめかみまたは鼻側にずらした条件で明所視から暗所視に移行させると、色立体視の程度は瞳孔が小さいときには変化しないが、瞳孔が大きいたときには減少することが示された。結局、色立体視は、各眼の色収差の生起の程度で規定され、色収差は瞳孔の大きさ、対象の入射角、および対象の明るさで変化する。

色立体視は、背景の輝度が変わると色対象の奥行の出現順序が逆転する。例えば、黒い背景下では比較的色彩波長の長いもの (赤、黄色など) が観察者からみて手前に、色彩波長の短いもの (青、紫) は遠くにそれぞれ出現するが、白い背景下に変えると、この奥行出現順序が反対となる。Dengler & Nitschke (7) は、この奥行順序反転現象を説明するために、背景と対象との間の縁 (border) に着目し、白色光が色対象との境目で光学的に2種類の効果を出現させるためと考えた。その2種類の効

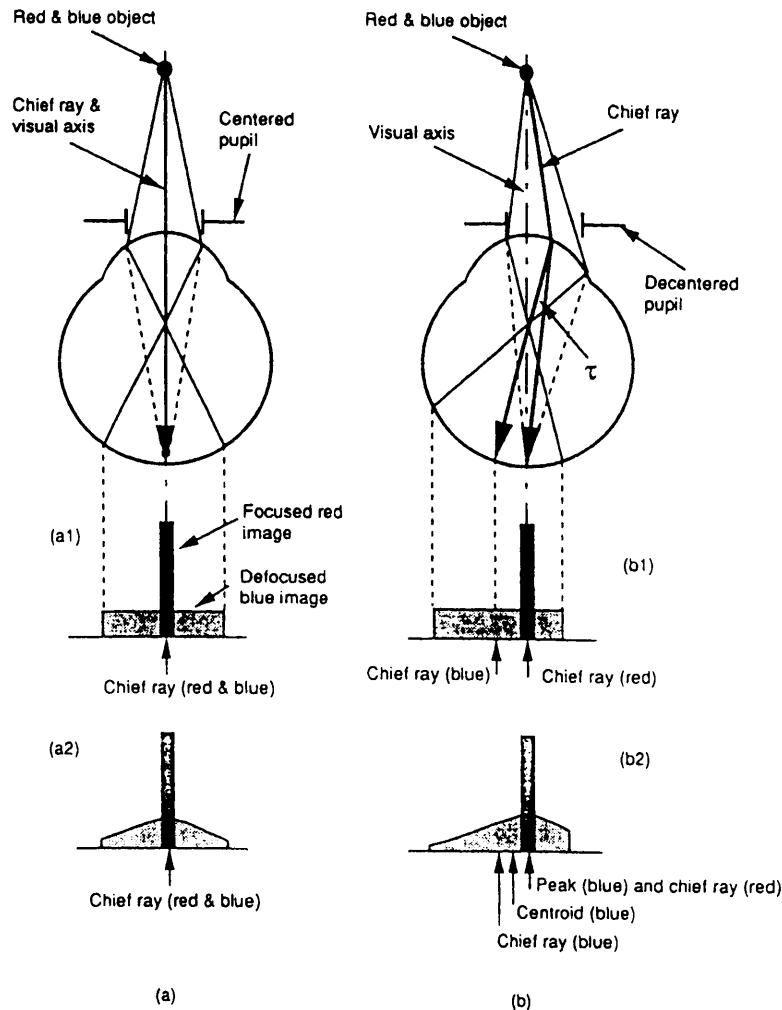


図14 瞳孔と色収差との関係。ここでは、赤色光は網膜に焦点されるが、青色光は網膜の手前に焦点されると仮定されている。(a)視軸と対象からの光線とが一致した条件を示し、(a1)はStiles-Crawford効果が無い場合を、(a2)はその効果がある場合を示す。(b)は視軸と対象からの光線とが不一致の場合を示し、(b1)はStiles-Crawford効果が無い場合を(b2)それがある場合を指す (Ye, Brad-lay, Thibos & Zhang 1992)。

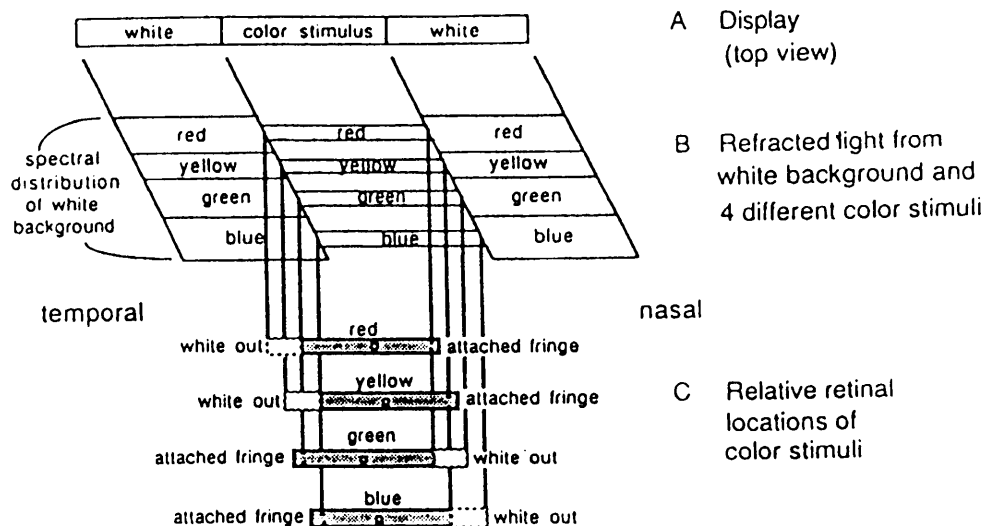


図15 色立体視での色対象の奥行の背景輝度による逆転を説明するためのモデル。光の回析とホワイティングアウトによって網膜視差が変化することが仮定されている。(A) 刺激布置条件、(B)白色光と4種類の色光との間の回析、(C)光回析とホワイティングアウトによる網膜上での投影位置、を各々示す (Dengler & Nitschke 1993)。



果とは、光の回折によって出現する縞とホワイトニングアウト（白色光が他の単色波長と混じるとき、白色になるまで彩度が減少すること）で、これらによって水平視差が変わる（図15）。

Ye et al.の研究と併せ考えると、色立体視の奥行順序を規定する要因は、瞳孔の大きさ、対象の入射角、対象と背景の明るさ関係で規定されている。

### 3.4. ステレオスコピクな傾斜面の角度を規定する要因

平面が水平軸あるいは垂直軸を中心として傾いているときの両眼視差（方向視差 orientation disparity）は、傾斜軸（水平／垂直）、平面にある輪郭線の方角角、平面の傾斜角度で、理論的には規定される。平面傾斜角30度のときの方向視差と表面輪郭線の方角角の関係は、図16で示される。図より、表面輪郭線の方角角が水平（図では90度の時）の時には、水平、垂直いずれの軸を中心として傾いても方向視差は零であるが、表面輪郭線の方角角が垂直の時には垂直軸を中心とした傾むきでは方向視差は零となり、また水平軸中心に傾いたときにはそれは最大となることがわかる。また、方向視差が最大となるのは、表面輪郭線が垂直で同時に水平軸中心に傾いているときで、これは表面輪郭線の方角角が45あるいは135度で垂直軸中心に傾いているときの2倍となる。

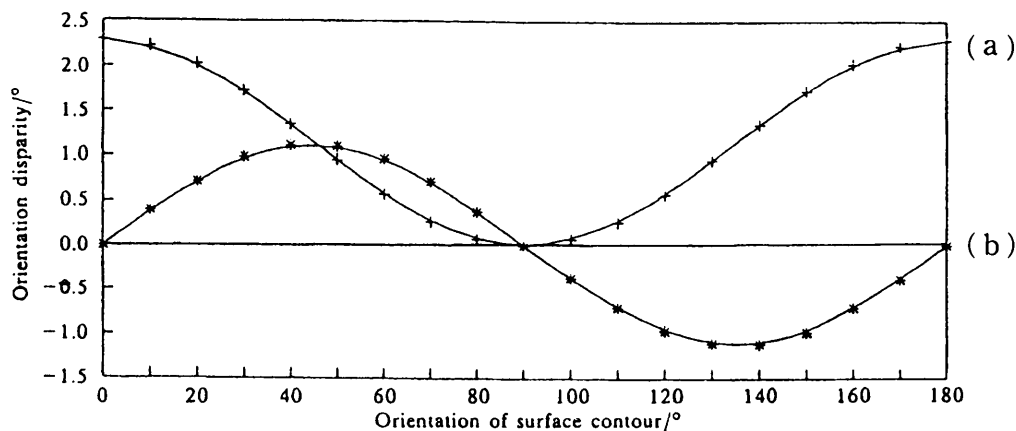


図16 平面傾斜が30度のときの方向視差と表面輪郭線角度との関係。a 曲線はx について傾斜している場合、b 曲線はy 軸について傾斜している場合を示す (Gillam & Ryan 1992)。

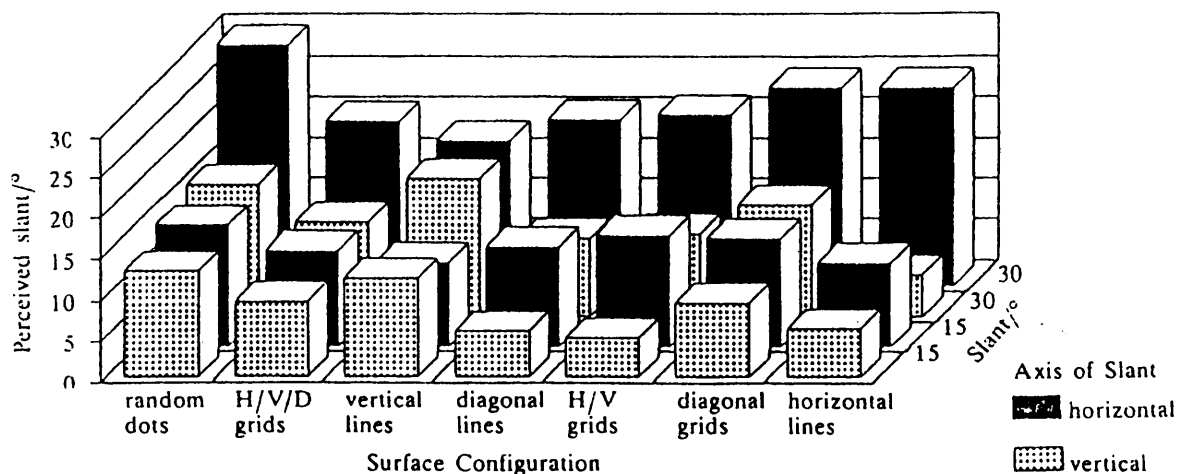


図17 表面輪郭のパターンを様々に変えたときの視かけの傾き。パターンは、垂直線、斜線、正方形格子、斜め格子、方形と斜め格子の合成、ランダム・ドットの6種類である。平面の傾斜角度はx 軸、y 軸とも15度と30度である (Gillam & Ryan 1992)。

奥行方向での傾斜角は、このように、幾何学的には方向視差で規定されるが、視かけの奥行を測定してみると、パースペクティブ要因や空間異方性が影響して方向視差だけでは規定できない。Gil-lam & Ryan(11)は、表面輪郭を水平線(Horizontal line)、垂直線(Vertical line)、斜線(Diagonal line)、正方形格子(H/V grid)、斜め格子(Diagonal grid)、方形と斜め格子の合成(H/V/D grid)、ランダム・ドット(random dot)で構成し、平面の傾斜角を15度と30度にとったとき(幾何学的に計算された傾斜角)の視かけの傾斜角を測定した。図17に示されたように、視かけの傾斜角は方向視差では規定できなく、表面輪郭の形態的要因が重要な働きをしている。

### 3.5. 垂直視差におけるパースペクティブ成分の左右差

対象を両眼で注視するとき、左右網膜上には水平視差と垂直視差が生じる。垂直視差では、図18- a

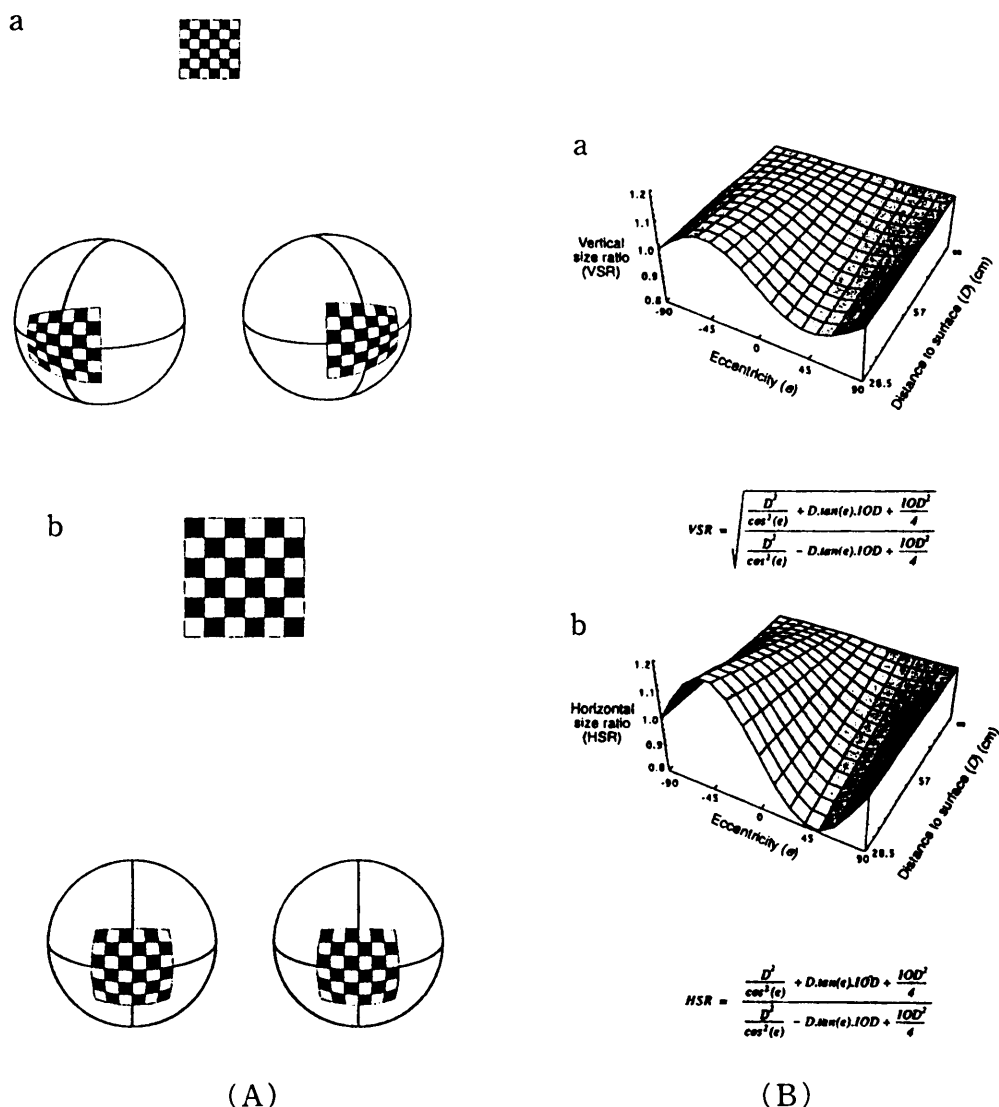


図18-A 市松パターンを注視した時の垂直視差でのパースペクティブ成分の左右眼差。  
(a)ターゲット刺激が近距離にあるときのパースペクティブ成分の左右眼差、(b)  
ターゲット刺激を遠距離(無限大)においたときのもので、パースペクティブ  
成分の左右眼差は消失する。

18-B パースペクティブ成分の左右眼差が網膜上の位置でどのように変化するかを  
ターゲット刺激までの観察距離との関係で表示したもの。(a)パースペクティブ  
成分の垂直方向次元の左右眼差、(b)同様な成分の水平方向次元の左右眼差。い  
ずれも、網膜の中心窩から45度のところで、パースペクティブ成分の左右眼差は  
最大となる。各々の欄の計算式で計算された(Rogers & Bradshaw 1993)。

に示されたように、左右の網膜像間にパースペクティブの左右差が生じる。いま、比較的近い観察距離にある市松パターン対象を注視すると、左網膜像の左側縦線分と右網膜像の右側縦線分間には大きさの違いが生じ（垂直方向の大きさ比、vertical size ratio VSR）、それらは各々右側に移るにしたがって、大きさ変化に勾配ができる。これは、パースペクティブ成分の左右差を示し、とくに縦方向について生じているので、パースペクティブ成分の垂直方向の左右差（differential vertical perspective, DVP）と呼ばれる。同様なパースペクティブ成分の変化は水平方向についても生起するので、これはパースペクティブ成分の水平方向の左右差（differential horizontal perspective, DHP）と呼ばれる。これらの左右差は、しかしながら、観察距離が遠方になると（理論的には無限大）、近似してきて、実質的には意味を失う。図18のcとdには、このパースペクティブ成分の左右差の勾配変化が、網膜の中心からの距離に応じてどのように変化するかを示されている。cはパースペクティブ成分の垂直方向の左右差を、dには水平方向の左右差を、それぞれ示す。IODは眼球間距離で6.5cmに設定された。Rogers & Bradshaw(24)は、パースペクティブ成分の左右差が相対的奥行距離の知覚に何らかの役割を果たしているかについて、DVPとDHPを単独に提示した条件、それらを組み合わせた条件、さらには観察距離を近距離(28cm)にとった場合と無限大にとった場合とを設定して、各々の条件下での相対的奥行距離の測定を試みた。その結果、DVPは両眼立体視の相対的距離の知覚に影響を与えること、DHPも、同様に若干の影響を与えることが示された。垂直視差におけるパースペクティブ成分の左右差は、網膜の中心からの距離と絶対的奥行距離に対応して変化するので、視覚システムは、観察距離が比較的近い場合には、この左右差を水平視差の見積りに利用している。

### 3.6. 網膜視差を用いての立体視再現の正確度

両眼立体視のしくみを用いて3次元表示する場合、どの程度正確に立体量が再現できるのかは、それを医療、工業、産業、運輸などに利用しようとするとき、錯覚や誤判断による事故をさけるために、確認されていなければならない。両眼視差による立体量（2つの対象間の奥行あるいは凝視点と対象間の奥行：相対的奥行距離  $d$ ）は、次の式で規定できる。

交差視差の場合、 $d = S \times D / (I + S)$

非交差視差の場合、 $d = S \times D / (I - S)$

ここで、 $S$ は網膜視差（ステレオグラムの対となる対象間距離）、 $D$ は観察距離（観察者から凝視点までの距離：絶対的奥行距離）、 $I$ は眼球間距離を各々示す。

Patterson, Moe & Hewitt(22)は、ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラムを用いて、矩形を提示し、凝視点と矩形間の奥行を言語報告とプローブをもちいてのマッチングとによって測定した。その結果、 $D$ を75cmと150cm、 $S$ を0.3, 0.7deg、 $I$ を6cmとした交差、非交差視差条件では、公式での予測値と言語報告および測定値はともによく一致したが、 $D$ (150cm)と $S$ (0.7deg)を大きく、同時に刺激サイズを小さく(1.0deg)した場合の非交差視差条件では、実験値は予測値を下回ることが示された。しかし、刺激サイズを大きくとり(5.5deg)、同時に刺激提示時間を長くすると、非交差視差条件でも実験値と予測値は一致を示した。このことから、両眼立体視による立体表示では、刺激サイズをある程度大きくとらないと(5.5deg)、立体量は正確には再現されない。

コンピュータ・グラフィックスでの3次元表示に、両眼立体視のしくみが利用されるにともない、それについての正確な知識が求められている。人間の両眼立体視について、これまで明らかにされた知見が、Patterson & Martin(21)によって、(1)両眼立体視の幾何学、(2)視覚的持続(visual persist-

ence)、(3)立体視提示された刺激間の時間的、空間的な知覚相互作用、(4)立体視の神経生理学、(5)立体視の理論に絞ってまとめられている。

#### 4. 視空間構造

##### 4.1 絶対的奥行距離と視かけの運動方向との関係

運動方向が異なる対象の一方を眼球あるいは頭部を移動させながら追従させて観察すると、追従していない対象の運動方向が実際の方向から逸脱して見える (Swanston & Wade 1988)。一方、対象までの絶対的奥行距離は、運動対象の視かけの方向を変える。例えば、観察者が頭部を左右に運動させながら対象を注視するとき、対象までの絶対的奥行距離を過大視すると対象の視かけの運動方向は頭部運動方向とは反対方向に、それを過小視すると対象は頭部運動と同方向に動いて見える (Gogel 1990)。頭部あるいは眼球を運動させながら対象を注視するとき、対象の運動方向とその対象までの絶対的奥行距離とは相互に影響を与える。この関係は、Swanston et al. (34) らによって、図19に表されている。運動する対象を両眼で頭部をシフトさせながら観察するとき、対象の運動軌跡は、まず単眼網膜中心座標でとらえられ、次いでキクロピアン網膜中心座標でとらえられる。こ

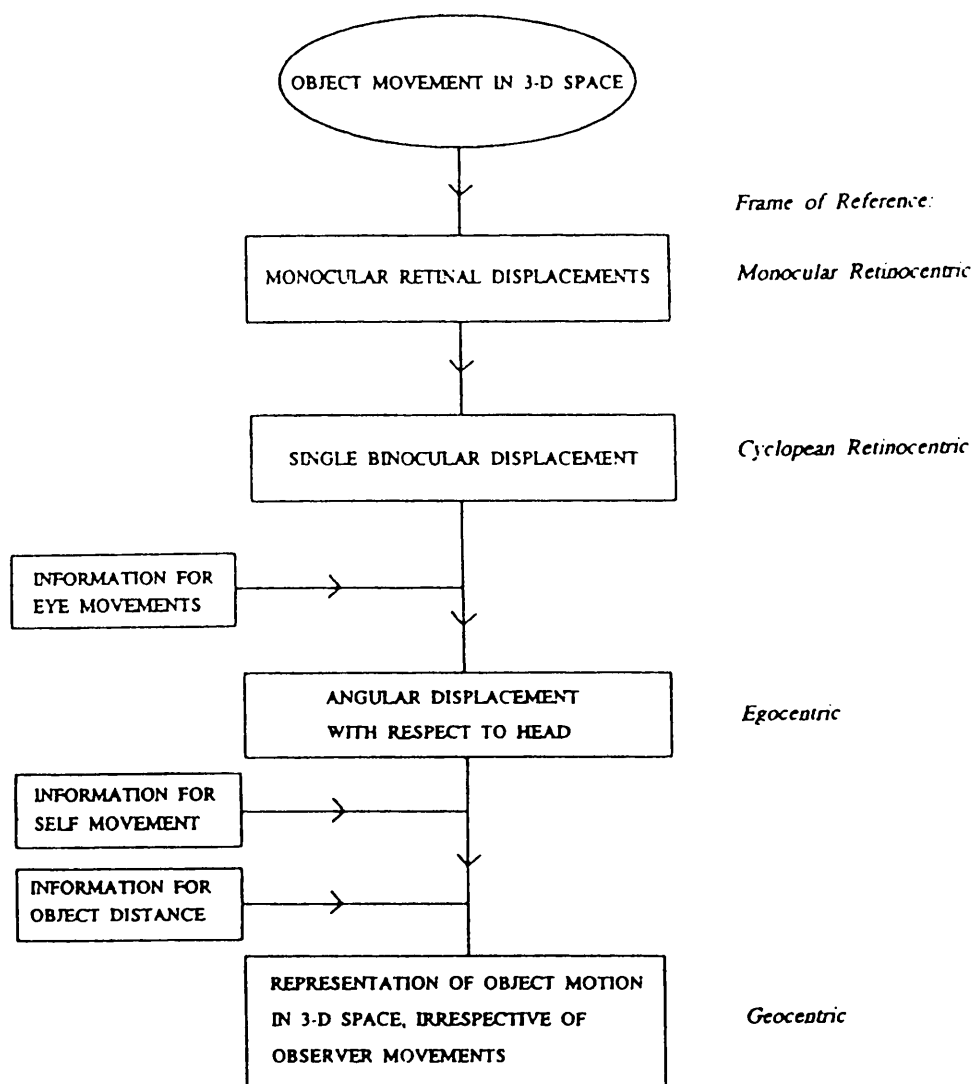


図19 観察者の運動方向、対象の運動方向、絶対的奥行距離との関係を図示したもの。観察者が頭部をシフトさせながら両眼で運動する対象を観察したときの情報処理過程を示す (Swanston et al. 1992)。

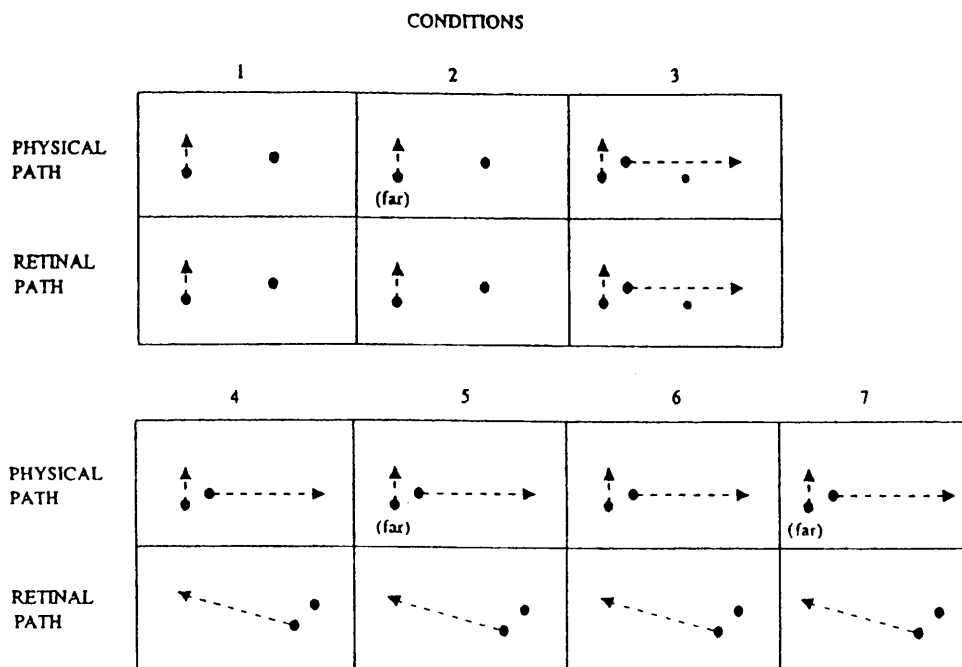


図20 観察者の運動方向、対象の運動方向、絶対的奥行距離との関係をしらべるための実験条件。静止あるいは水平方向に運動するドット（右側）を観察者に頭部を運動あるいは静止して観察させ、常に垂直に運動する左側のドット運動軌跡を報告させる（Swanston et al. 1992）。

れに眼球運動の情報が加えられ、観察者の頭部運動との関連で、対象の運動軌跡はとらえられる（自己中心的座標、egocentric）。さらに、観察者自体の動きについての情報と対象までの絶対的奥行距離情報が加えられて、観察者の運動からは独立した状態での対象の運動軌跡が確定される（地球中心座標、geocentric）。このモデルが、図20に示された実験条件を設定して検証された。条件1では、左端のドットは常に垂直方向に運動するが中央のドットは静止している。これは統制条件にあたる。条件2では、左端のドットはCRT面より遠方に定位される（2つのドットを網膜視差をつけて提示し、左右眼前でのポラロイドフィルターを通して融合させる）。中央のドットは静止したままである。条件3では、中央やや下に提示されたドットを頭部を静止したまま注視する。条件4と5では、頭部を静止したままで、水平方向に運動する対象を眼球で追従する。条件6と7では、同様に水平方向に運動する対象を頭部をシフトさせることで追従する。これらの実験条件下で、垂直運動するドットの視かけの運動軌跡が測定された。その結果、対象までの絶対的距離と頭部運動が共に関与した条件で、視かけの運動軌跡は反時計方向に傾斜することが示され、モデルが実証されている。

#### 4.2 観察者と対象が奥行方向に動く事態での対象の奥行距離知覚

観察者が奥行方向に移動すると、視かけ上は、対象が近づく。観察者が静止し、対象が近づいても同様な知覚が生じる（図21）。観察者が動くときには、運動感覚と自己受容感覚が、対象の動き、観察者の動き、その両方による動きを識別するために働く。Gogel & Tiez (10) は、対象が奥行方向に運動する事態を静止した観察者が知覚する事態と、対象が静止したままで観察者が運動する事態の両方で対象の視かけの運動量の測定を試みた。もし、観察者の自己受容感覚が働けば、両事態での視かけの運動量が異なると予想される。対象の視かけの運動量は奥行方向に提示された2本の棒を調整させる方法で測定され、また対象の絶対的奥行距離も同時に求められた。対象は光点で提示され、また観察は両眼視で行われた。その結果、対象の視かけの運動量は、両事態で差がないこと、

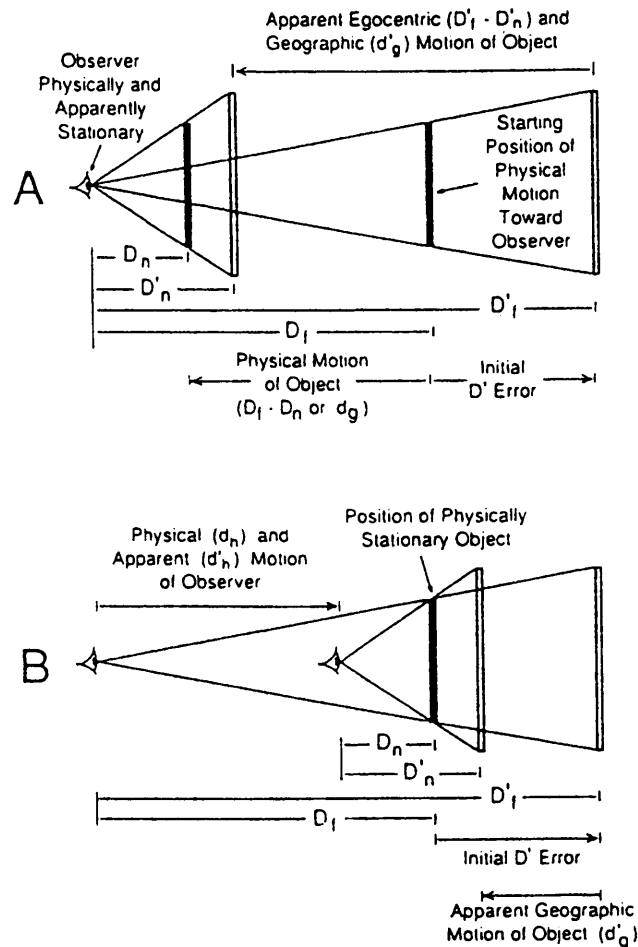


図21 観察者が運動する条件と対象が移動する条件での絶対的奥行距離の知覚。(A)対象が観察者の方へ移動する事態、(B)観察者が対象の方へ運動する事態 (Gogel & Tiez 1992)。

また対象までの絶対的奥行距離も対象を特定の奥行距離に定位させる傾向 (specific distance tendency) の影響を受けて歪められることが示された。静止対象を観察者が動きながら観察するとき、観察者の自己受容感覚はほとんど働いていない。

#### 4.3. 大きさの恒常性

対象の視かけの大きさではなく、それが網膜に投影されたままの大きさ (視角的大きさ) を測定しても、そこには誤差あるいはばらつきが生じる。これがどうして生じるかについて、2通りの仮説がある (図22)。一つは、視角的大きさ情報は単独に処理されるので、誤差はその系統内のノイズによると考えるものである (図-A)、他は、視角的大きさは、対象の視角情報に対象までの奥行距離情報とが一緒にされて視かけの大きさが算定された後で、視角的大きさが知覚されると考えるもので、誤差は視角情報処理系と奥行距離情報処理系の両方のノイズの影響を受けると考えるものである。

McKee & Welch (19) は、これらの仮説のいずれが正しいかを検証するために、種々な奥行距離にあるときの対象の視かけの大きさの測定 (視かけの大きさ判断)、視角が常に一定となる条件で奥行距離を変えたときの対象の視かけの大きさの測定 (視角的大きさ判断)、奥行距離が一定で対象の視角を種々変えたときの対象の視かけの大きさの測定をそれぞれ試みた。奥行距離は網膜視差を変えることを通して操作し、また視かけの大きさ測定は、大きさ尺度を別に提示して対象の大きさにマッチングさせるのではなく、標準刺激に対していくつかの変化刺激を用意し、その大きさについて

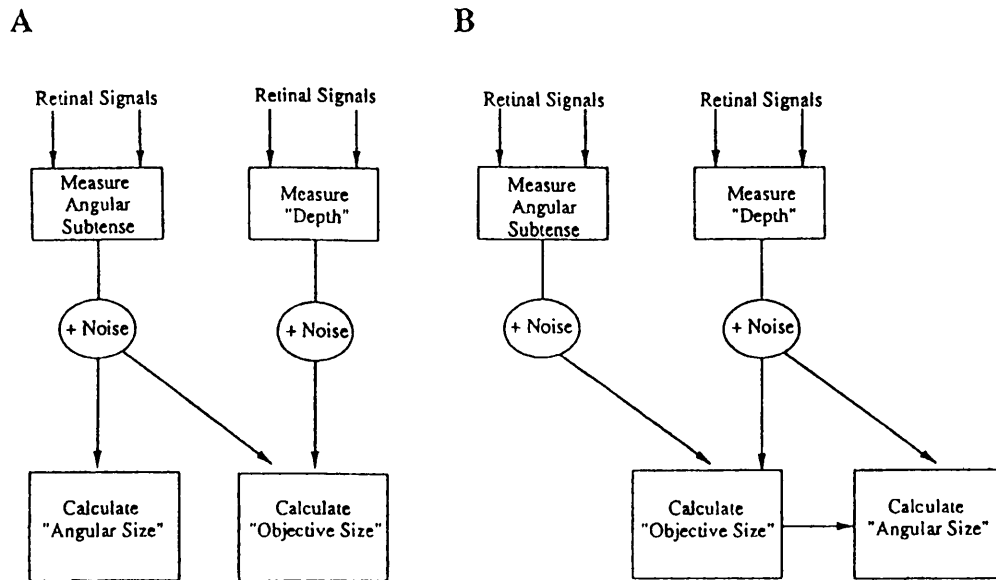


図22 視角の大きさの対象の大きさ（大きさ恒常性）の知覚処理過程。(A)視角の大きさを処理するための単独の回路を仮定、(B)視角の大きさは視角情報と絶対的奥行距離情報とから対象の大きさが算定された後で知覚されると仮定される (McKee & Welch 1992)。

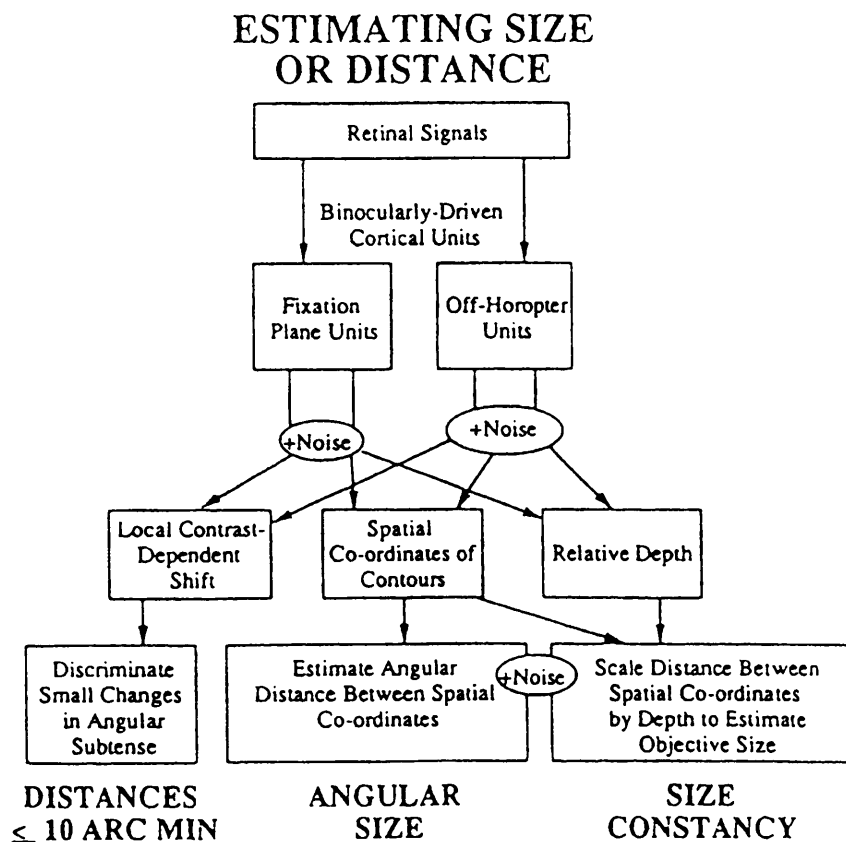


図23 視角の大きさの対象の大きさの知覚のための情報処理過程。網膜で入力された大きさ信号は、両眼視ユニットを経由した後、比較的小さい視角の大きさ回路、視角の大きさ回路、対象の大きさ回路の3系統で平行処理される (McKee & Welch 1992)。

ての変化点(閾値)を求める方法によった。その結果、(1)対象として提示した視角の大きさが 10 arc min. 以下の条件では、視かけの大きさ判断で求められた閾値は視角的大きさ判断でのそれより相当に大きく、この大きさ条件内では大きさの恒常性が十分に機能していないこと、(2)対象の視角が 20 arc min.以上の時には、視かけの大きさ条件と視角的大きさ条件でのウェーバー比は等価となること、(3)奥行距離を増大させたときに対象の大きさもそれにあわせて増大させる過恒常条件では、恒常条件に比較して視かけの大きさ判断の閾値は大きい、しかしこの事態での試行を被験者の判断にもとづいて正誤のフィードバックを流して反復練習を課すと、わずかな練習でこの課題を達成できることから、恒常性は学習されるものであること、(5)奥行距離一定条件で視角を変化させたときの閾値は、奥行距離を種々変えた条件でのそれに比較して小さく、したがって両眼立体視は網膜上に投影される大きさを、直接には情報処理していないこと、などが明らかにされた。これらの結果から、先に示された回路が修正され、図23に示されたような大きさ判断についての新たな情報処理回路が提示された。それによると、網膜で入力された大きさ信号は、はじめ、中枢での両眼視ユニットでのノイズに影響されるのをはじめとして、段階的に処理されていくが、最終的には、3系統の回路で平行処理される。修正された部分は、対象の大きさが小さい条件での回路が追加された点で、ここでは大きさや奥行距離変化は明るさコントラスト変化で処理される。視角的大きさ情報は単独回路で処理されるのが特徴である。

#### 4.4. 視空間の構造と視覚に指示された行動との関係

Loomis et al. (18) は、精神物理学的測定法で測定された視空間と視覚に指示された行動を指標として表示した視空間とを比較した。視空間の精神物理学的測定は、水平方向 (x 軸) にとられた 2 点間の距離と等しくなるように奥行方向 (z 軸) に設定された 2 本のロッドの調整によった。このとき、水平方向距離を示す 2 本ロッドの提示距離 (観察距離) は 4m から 12m の範囲で変えられた。また、視覚に指示された行動による測定は、ある奥行距離にあるターゲットあるいは水平方向にある距離をおいて置かれた 2 本のロッドを両眼で観察させ、その後、閉眼させ、観察した奥行距離を実際に歩いて再現、あるいは 2 本のロッド間の距離を歩いて再現させる方法によった。その結果、精神物理学的測定では、奥行方向距離は水平方向距離より過大視され、しかもこの傾向はターゲットとなるロッドの提示距離が長くなると増大する傾向があった。これに対して、実際に被験者に移動させる方法によると、奥行距離の再現は極めて正確に再現されたが、水平距離は過大視された。これらの結果から、視覚システムには、対象までの絶対的奥行距離を正確に知覚できるしくみがあること、絶対的奥行距離を観察者の歩測運動で再現させる場合には、絶対的奥行距離の見積を修正するしくみがあること、そして運動を伴わない視覚システムと視覚をとまなう運動システムは、相互に独立したシステムと考えられることなどが示唆される。

#### 4.5. 観察者の移動による絶対的奥行距離の変化と運動対象の速度変化

視線と直交するように移動する対象を観察者がその絶対的奥行距離を変えながら観察するとき、観察者は何を手がかりとして対象の運動変化を知るのだろうか。図24に示されたような刺激条件を設定すると、対象までの絶対的奥行距離が変わると必然的に運動対象の速度も変化する。観察者の自己運動知覚に関わる要因の抽出が、対象の視かけの速度変化に影響する要因を探ることを通して試みられた (Brenner (3))。その結果、対象の視かけの速度は、対象の大きさ、周囲の肌理パターンの光学的流動 (拡大と縮小)、対象の運動によって生じる左右網膜上での対象の投影位置の違い (これは輻輳運動を生じさせる) によって影響されることが示された。



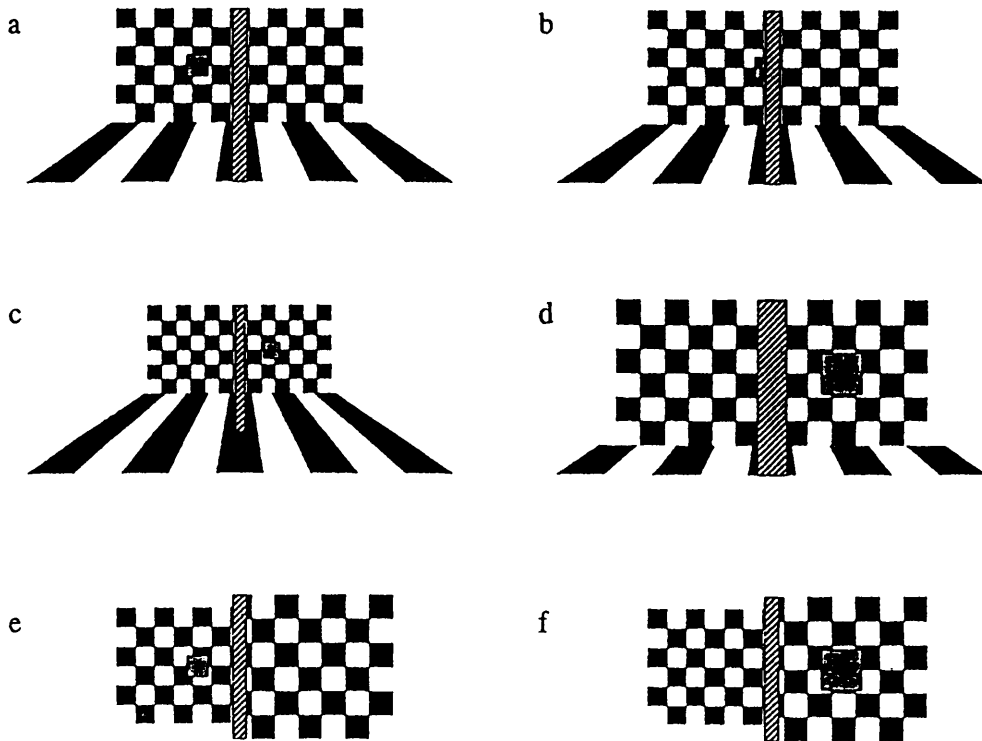


図24 観察者の運動と対象の速度変化をしらべる実験。ターゲットは左から右へと移動し(a,b)、中央の柱に隠れる。このとき、背景面は観察者が前後に移動したかのように後方(c)あるいは前方(d)に移動する。背景面が移動するとオブティカル・フローが生じるが、これを統制するためにあらかじめ背景面を左右に奥行差を設け固定したものが(e)、(f)である (Brenner 1993)。

## 5. 絵画的要因による立体視

### 5.1. 陰影要因による立体視

陰影要因は強力な立体効果をもつが、そのメカニズムは未だ不明である。Kleffner & Ramachandran(16)は、図25のような陰影パターンをCRTに提示し、その凹凸を判断させる方法で、陰影立体効果を可能にさせる条件分析を行った。その結果、(1)陰影立体効果には、照明方向の要因が重要であり、しかもそれは唯一の方向、すなわち上方向が常に仮定される。これはある方向からの陰影パターンとこれとは反対方向の陰影パターンとを同時に提示すると、どちらかの内一方が凹に他方が凸に知覚され、凹凸の知覚と陰影方向とが必ず対応することから実証された。(2)照明方向での上方向は、重力中心で規定されるのではなく、網膜中心で規定されている。これは、上方向からの陰影と横方向からの陰影とを垂直に座して観察する場合と横に伏して観察する場合とで比較され、上方向からの陰影の場合には垂直に座して観察した条件で、横方向からの陰影では伏して観察した条件で立体効果が高いことから結論された。(3)陰影トークンのみで、図—地分離、あるいは知覚的体制化が可能となる。(4)陰影トークンのみで(位置に関係なく)、仮現運動が可能となる。(5)ある方向からの陰影パターンを一つだけ、複数の他の陰影方向パターン(ノイズ項目)の中に提示し、その検索反応時間をしらべると、凹陰影パターンは、凸陰影、左右方向からの陰影、段階的な陰影パターンに較べて、ノイズ項目を増やしても反応時間が大きくなり、ポップアウト効果をもつ。(6)しかし、陰影知覚に経験が多くなると、凹陰影パターンのポップアウト効果は解消する。これらのことから、陰影による立体視は、図—地分離、図—地体制化、運動視よりも早い段階で情報処理される初期知覚過程と考えられる。

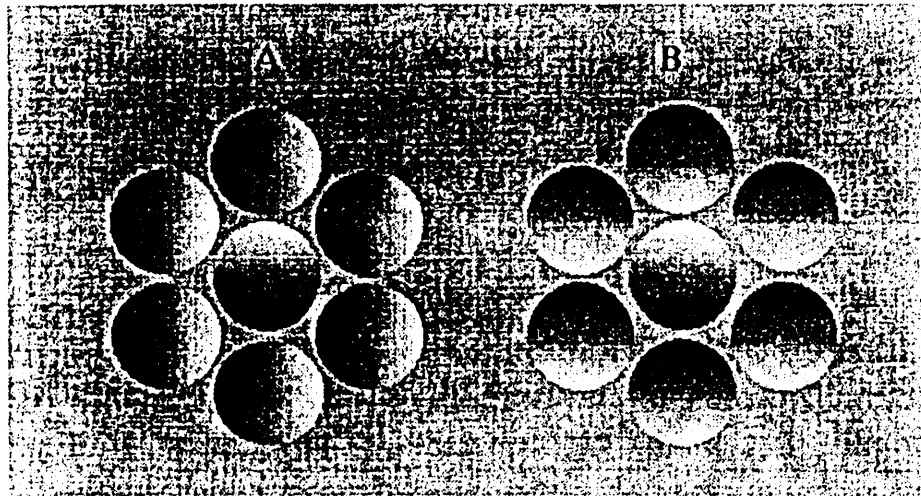


図25 陰影要因の立体効果をしらべるためのパターン。中心にある円形と周辺にある円形群の照明方向を一致させる(A)と、一致しない条件(B)よりも中心にある円形の陰影効果による立体効果は大きくなる (Kleffner & Ramachandran 1992)。

## 5.2.主観的輪郭図形

主観的輪郭は、Kanizsa(1955)によれば、不完全図形が形態的に完結しようとする力の働きによって生じるという。図形の不完全性は不完全図形間に主観的図形を解発し、その結果、もとの図形を心理的に覆い、主観的輪郭図形が前面に浮きでて見える。この説明仮説によれば、主観的輪郭面は、常に、奥行的に一番前に出現することになる。これに対して、図26の中で、周辺領域、主観的矩形領域、中心の矩形領域間の奥行的関係を測ってみると (Purghe & Coren(23))、a 図形では、観察者からみて主観的輪郭、中心の矩形領域、周辺領域の順で奥行的に遠くに定位されて見えるが、b 図形では、中心の矩形領域がもっとも手前に定位されて視えてしまうという。b 図形で中心の矩形が最前面に出現して見えることは、各領域に配したドットの視えの大きさあるいは中心の矩形領域の視えの大きさなどの測定でも間接的ながら支持された。これらの結果は、Kanizsa 説を否定する。

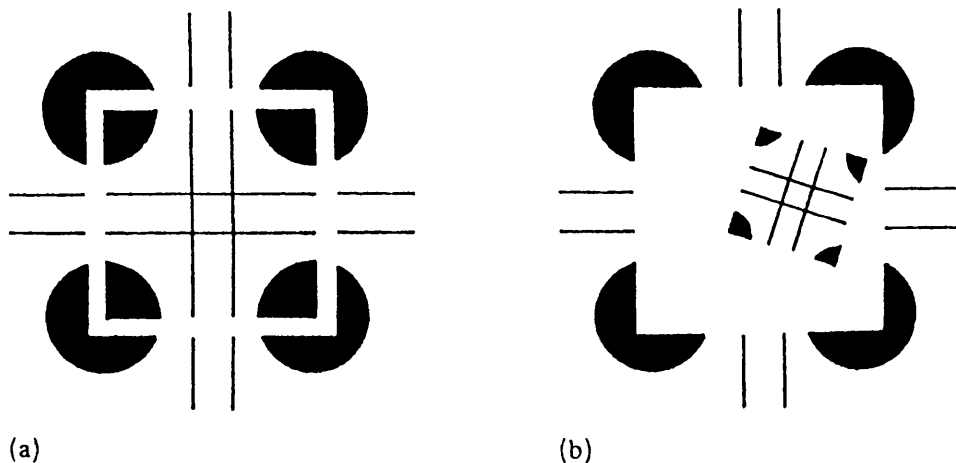


図26 変形ボツィ (Bozzi) 図形。(a)主観的輪郭、中央の矩形面、周辺図形の奥行順序で観察者の前から後ろに定位される、(b)中央の矩形図形がもっとも前方に定位されて見える (Purghe & Coren 1992)。

### 5.3. 写真の撮影位置の推定

写真をみたとき、それがどの位置から撮影されたものかを推定し、それにもとづいて写真に写された内容が修正したりして知覚される。写真からその撮影位置をどのくらい正確に推定できるかがしらべられた (Hagen & Giorgi(13))。それによると、撮影角度は $20^{\circ}$ 以下の誤差で推定され、距離は約半分程度に過小視される。また、地上からのカメラの高さも過小視されるが5ft位のところに集約される傾向があるという。

### 5.4. オクルージョン（蔽—被蔽要因）にもとづく対象の復元

オクルージョンから奥行を復元し、それにもとづいて対象の形状の復元を試みるアルゴリズムが、Finkel & Sajda(8)によって提唱された。それは、次のような順序をたどって処理されていく。

- (1) エッジを検出する
- (2) 断片輪郭を結合する
- (3) 輪郭と面とを結合し、対象の原型を識別する
- (4) オクルージョンの境界部位を検出する
- (5) 遮蔽対象を奥行に関して配置する
- (6) 対象の原型から対象を形成する
- (7) 後期過程の結果を初期過程に反映させる

図27-(a)はこれらの処理段階のフローチャートである。このアルゴリズムの特徴は、断片輪郭を結合して対象の輪郭を得る部分である。その基本となる手続は、輪郭の内と外とを識別することである(b)。輪郭の内側がわかれば、輪郭で閉じられた面が識別できる。輪郭の部位ごとに、内と外とを決めるために、輪郭線を挟んで互いに方向が反対で同時に輪郭線に対して垂直な方向を検出する。次いでその残された2つの方向のうち、今度は入力より強いほうを残す。この輪郭の内と外とを検出するユニットは、ちょうど神経細胞の樹状突起のように、その周囲から入力を受ける構造をもつ。輪郭線の内側からの入力は外側からの入力に較べて強くなる。最終的には、残された2つの方向のうち、輪郭線の内側の方向が常に残される。オクルージョンから奥行を復元するには、輪郭部位で“T”を構成するところを検出する(c)。“T”部位は輪郭線の不連続の部分を示している。すべての対象は、トポグラフィックマップに定位される。このマップでは、対象は前面と後面のどこかに、すなわち、もっとも近いものは前面に、遠いものは後面に、そしてその他のものはその中間に位置づけられる。輪郭部位“T”が検出されると、輪郭が断線していない部位が上側（前面）に定位される。こうして、すべての輪郭面がトポグラフィックマップに定位される。図28は、このアルゴリズムを実際に試し、どのように処理されてゆくかを例示したものである。図中Aでは、輪郭検出過程の分布（左側）とそれを5回反復した後の最終的分布を示す。Bでは、輪郭の内側を示す方向ユニットの分布を示す(ウマの鼻とフェンスの部分)。Cでは、トポグラフィカルマップが示され、フェンス、ウマ、の順番で定位され、またイエと太陽は同じところに定位されている。このアルゴリズムを用いると、主観的輪郭も識別できる。その過程は図29に示されている。図中、Bでは、はじめパックマン形のL部分はパックマンに属するものとして識別されるが、3回反復させた後では主観的輪郭の一部をなすものとして再識別される。この変化を起こすものはオクルージョンで、L部分がオクルージョンの縁として識別されるからである。このモデルは、複数の蔽—被蔽関係にある対象を識別し奥行的に定位できる上に、主観的輪郭をも検出できる点で優れている。また、このモデルは人間の主観的輪郭の知覚過程のシミュレーションとみなすこともできよう。

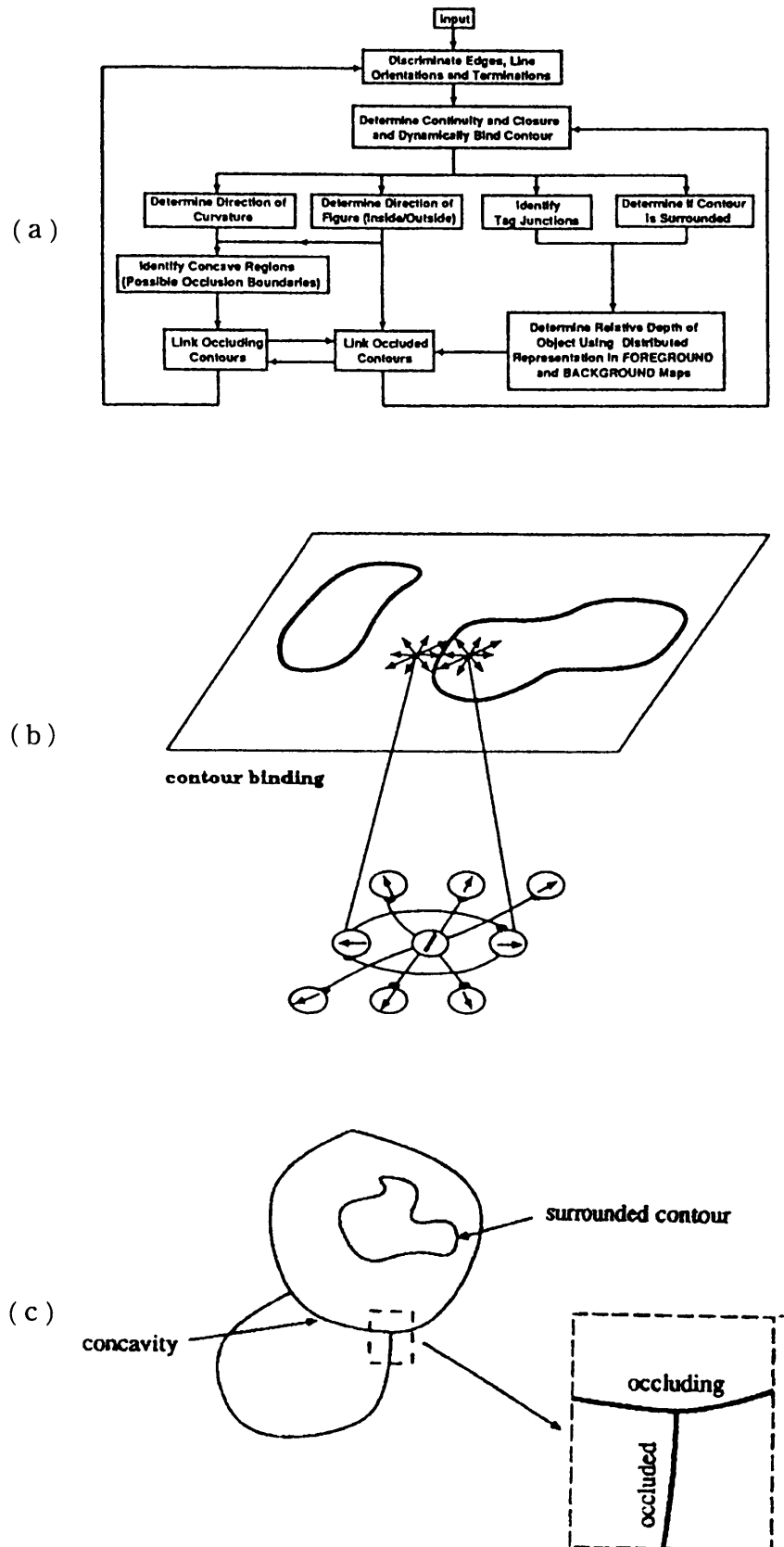


図27 (a)オクルージョンからの形状復元のための手続。ここでは、オクルージョンの検出（フローチャートの左側）と奥行関係の復元（右側）とが段階的に処理される。  
 (b)輪郭の内と外を識別する手続。輪郭線を挟んで互いに方向が反対で同時に輪郭線に対して直角な方向を検出し、さらに、その残された2つの方向の中で入力の高い方を残す。  
 (c)オクルージョン関係を検出する手続。蔽—被蔽を表示する輪郭部位“T”が検出される（Finkel & Sajda 1992）。

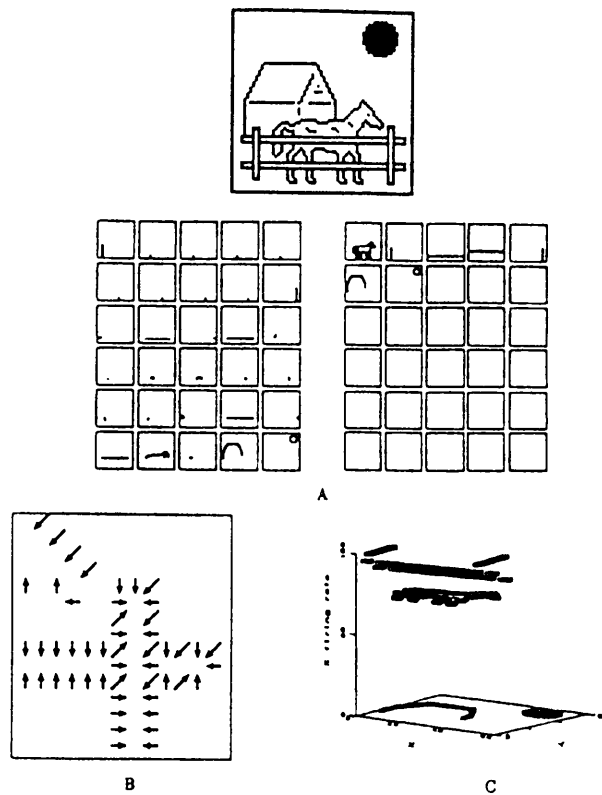


図28 オクルージョンからの形状復元の実際。(A)輪郭検出過程の流れとその最終的結果、(B)輪郭の内側を示す方向ユニットの分布(ウマの鼻とフェンスの部分)、(C)奥行関係を表示するトポグラフィカルマップ (Finkel & Sajda 1992)。

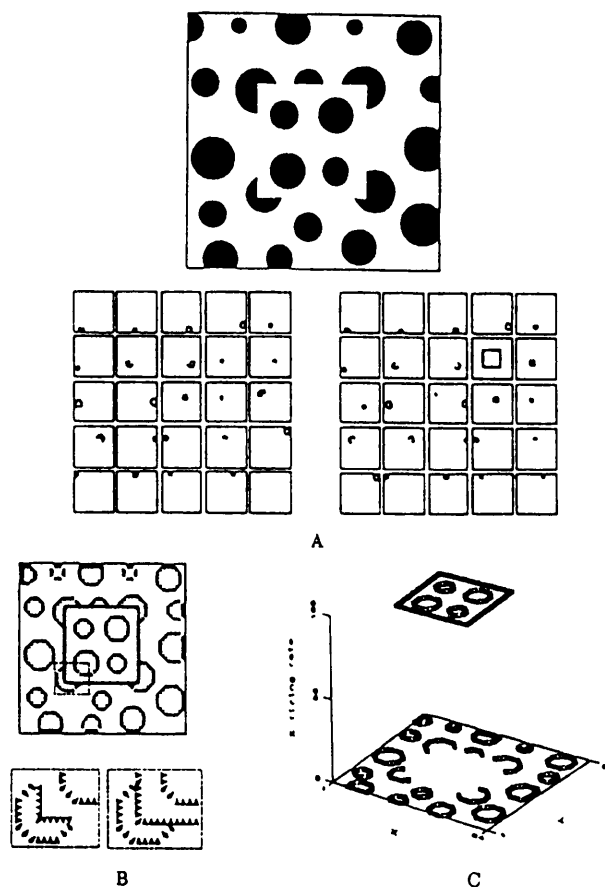


図29 主観的輪郭図形の形状復元。(A)輪郭検出過程、(B)輪郭の内側を示す方向ユニットの分布、(C)トポグラフィカルマップ (Finkel & Sajda 1992)。

## 6. 眼筋的要因

### 6.1 眼球調節と両眼輻輳のメカニズムについてのモデル

観察者は、3次元空間内で眼筋をコントロールすることを通してものを見るが、ものを注視するときの眼筋の働きについてのモデルが、Schor et al. (27) によって提唱された。眼球調節と両眼輻輳は、基本的には2系統の情報処理回路でコントロールされる(図30)。ひとつの系統は、大きさ要因、陰影、肌理勾配、オクルージョン、パースペクティブ、運動視差などの奥行き手がかりから奥行き距離を知覚することで始動されるもの(奥行き距離系統回路、spatiotopic)、もうひとつの系統は、網膜でのボケと網膜視差で始動されるもの(網膜系統回路、retinotopic)である。眼球調節は、奥行き系統回路と網膜系統回路のボケ始動回路で、両眼輻輳は奥行き系統回路と網膜系統回路のうち網膜視差始動回路で、各々コントロールされる。奥行き系統回路と網膜系統回路にはフィードバック回路があり、各々の回路内で修正を受けて再出力される。奥行き系統と網膜系統は、フィードフォワード回路内で結合され、眼球調節と両眼輻輳を共通に駆動する回路に出力される。ものを注視する際に大きなエラーが生じたときには奥行き系統回路で修正され、小さなエラーは網膜系統回路で処理される。奥行き系統回路は粗-密戦略とトップダウン方式で注視反応を始動し、網膜系統回路はボトムアップ方式で注視をより正確なものに変えていく。このモデルでは、ボケあるいは網膜視差という物理的レベルのみで始動する網膜系統回路と知覚レベルで駆動する奥行き系統回路とが組み合わされている点に特徴があろう。

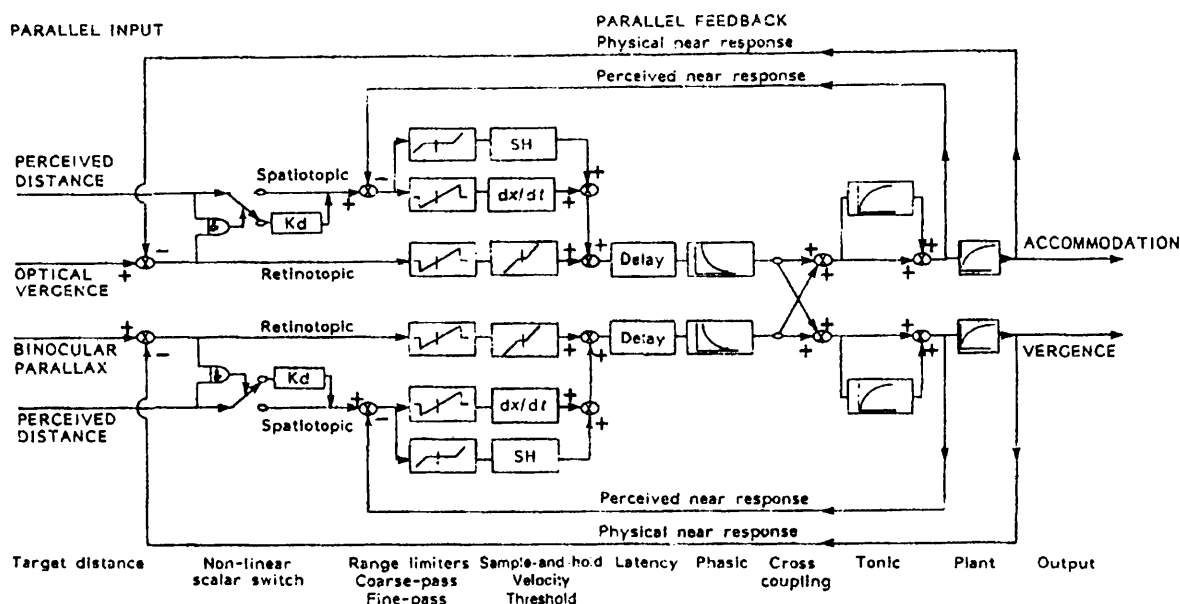


図30 眼球調節と両眼輻輳のメカニズム。眼球調節と両眼輻輳は、奥行き距離系統回路と網膜系統回路の2系統で平行処理される (Schor et al 1992)。

## 7. 動物を対象とした3次元視の研究

### 7.1 視覚領破壊と視覚的断崖回避、方向定位、眼球振盪

脳の同一部位を破壊しても、破壊時期(幼体期/成体期)によって失われる能力の程度が異なり、幼児期に受けた破壊に基づく能力は補償されることが多い。

Shupert, C., Cornwell, P. & Payne, B. (29) は、視覚領の破壊時期の違いが、視覚的断崖回避反応、方向定位反応、および眼球振盪の諸反応に与える影響をネコを対象としてしらべた。脳損傷は、17、18、19野の視覚領の小破壊にとどめるものと、17、18、19野に加えてこれに接触する suprasylvian の中央と後部を大きく破壊するものとの2条件とし、また破壊時期は出生後3-4日、6-8日、

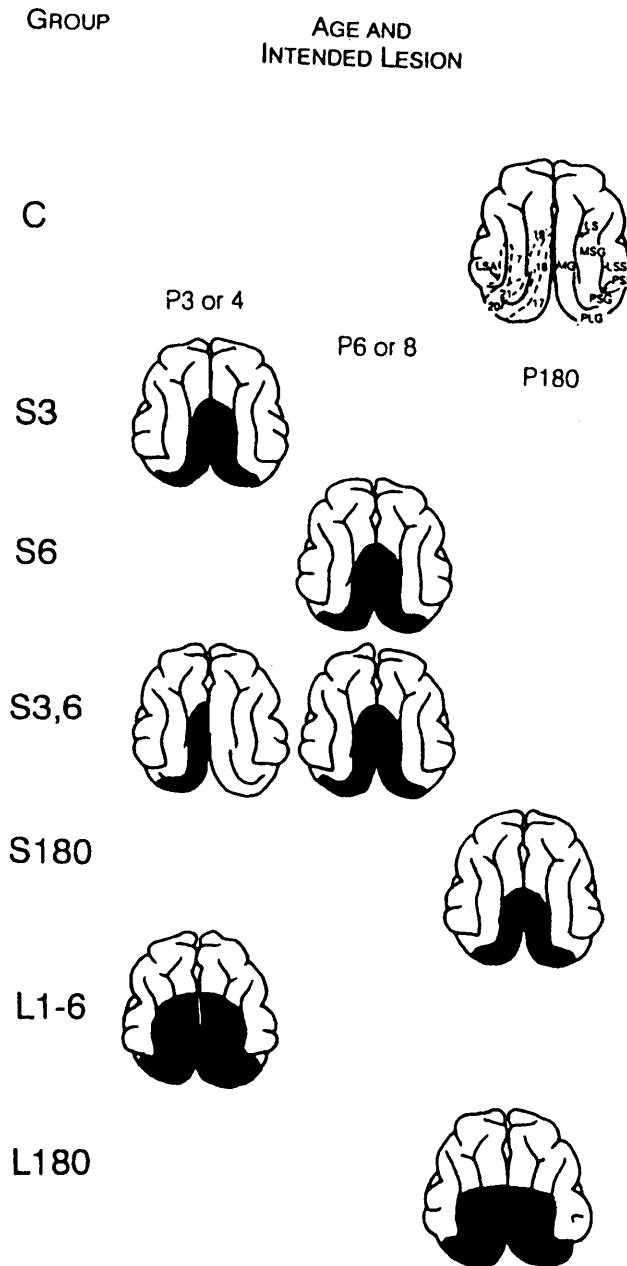


図31 視覚領の破壊程度と視覚的断崖回避反応。図中、Cは統制群、Sは小規模破壊群、Lは大規模破壊群、pのあとの数値は破壊時期を出生日数で示す (Shupert, Cornwell & Payne 1993)。

180日の3条件とした(図31)。視覚的断崖反応は、深側あるいは浅側の選択を、方向定位反応は、移動する標的に対する眼球の追従および様々な方向に提示された誘引物に向けての接近反応を、そして眼球振盪は、回転する白黒縦縞のドラム内に被験体をおき、そのときに生じる眼球振盪を各々しらべた。実験の結果、以下のことが示された。(1)視覚的断崖反応は、小規模幼体期破壊群では、浅側が選択され、非破壊群とほとんど差がなく、また小規模成体期破壊群でも浅側選択率は低いもののチャンスレベル以上を示すが、しかし破壊程度が大規模になると、破壊時期に関わらず、浅側回避は生じない。(2)方向定位反応については、対象の眼球追従、対象接近とも、小規模幼体期破壊群では若干の能力欠損が示されたが、小規模でも成体期破壊群、および破壊時期に関わらず大規模破壊群では、大きな能力欠損が示された。(3)眼球振盪についてみると、小規模成体期破壊群に較べて小規模幼体期破壊群では、その影響の程度は小さいが、大規模破壊群では、破壊時期にかかわらず、

すべて大きな影響を受ける。これらの結果から、幼体期の脳破壊には、その能力欠損を補償するしくみが働く。

## 7.2. 両眼輻輳を歪めて育てたネコの両眼視

ネコにゴーグルを装着させることによって両眼輻輳を歪めて飼育した場合、両眼視にどのような影響があらわれるかが、Shinkman et al. (31)によってしらべられた。ゴーグルは各眼を反対方向にシフト（16度と32度）させるレンズがはめ込まれたもので、4週齢の仔ネコに1日2－4時間、8週間の間、装着された。その後で、視力、および片眼奥行視力、両眼奥行視力がテストされた。その結果、16度変位のゴーグル装着の被験体は、統制条件と同等の両眼視能力を示したが、32度変位条件の被験体は、両眼立体視を可能にさせる両眼視機能を何ら示さなかった。しかし、成体になってからのこの種の操作は、両眼視能力に影響を与えないことも確認されている。

## 7.3. ブタオザルと絵画的要因

人間の乳児は、5.5－7カ月齢になると、相対的大きさ、肌理勾配、熟知的大きさなどの絵画的要因にもとづいて、近／遠対象の識別を行い、自分により近い対象に対して手伸ばし反応をする（Yonas, Pettersen & Granrud 1982, Yonas, Granrud & Pettersen 1985, Yonas, et al. 1986）。人間に近縁な霊長類についても、同様な能力の発達を見ることができるのであろうか。7週齢のブタオザル（*Macaca nemestrina*）を対象として、このことがGunderson et al. (12)によってしらべられた。刺激条件は、肌理勾配をもつ床面に同形、同大の物体（おもちゃ）が、奥行配置を違えて置くか、あるいは大きさ要因のみが異なる対象が、他には手がかりとなるものが何もない暗黒室内に置くかした。また指標反応には手伸ばしを選ばれた。ブタオザルは、手前に置かれた物あるいは等しい奥行距離にあっても大きさの大きいものに、とくに単眼視条件で手伸ばし反応が多く出現した。このことから、下等霊長類は、絵画的要因から奥行を知る能力を生得的にもつのではないかと考えられる。

## 8. その他の3次元視研究

### 8.1. 運動視、方向視、3次元視の情報処理過程における論理的類似性

運動視、方向視、3次元視の情報処理過程間には論理的類似性が存在する。たとえば、不規則に散在するドットをある方向に規則的にシフトし、このシフトしたパターンと元のパターンとを重ねあわせると（Glassパターン）、そこにはある方向性をもつフローパターンが出現するし、また、同一パターンを位置をかえて継時的に提示すれば、運動が出現する（仮現運動）。さらに同一パターンの水平位置をシフトし、これらを両眼視すれば、立体が視える。Allik (1)は、このように、位置関係をかえるという同一の刺激操作を通して、運動視、方向視、3次元視の情報処理過程を比較したところ、3種類の過程とも、不規則に散在するドット刺激をまとめあげ、そこから知覚体制化を得るために、一種のクロス相関に類似したしくみを働かせることを示した。これは、散在する刺激要素の属性（方向、大きさ、明るさ、位置など）の中から、位置の情報（場所トークン）のみを最初に検出し、こうすることによって、刺激抽出過程での単純化を果たしている。位置の情報は、刺激要素間の距離と明るさ強度で規定される。運動、方向、3次元情報の検出過程には、このような類似性があるが、異質な過程も存在する。とくに2種類以上の刺激属性が操作されたパターン間では、情報検出の相違が明らかとなる。たとえば、図32はダブルネイル錯視に類似させて作成したRDSであるが、ここでは、不規則に散在させた点と白丸画素をペアとし、しかも左右のステレオフレーム間で、ペアとなる画素の水平位置を一様にシフトし、同時に左右のステレオペア間で点と白丸を



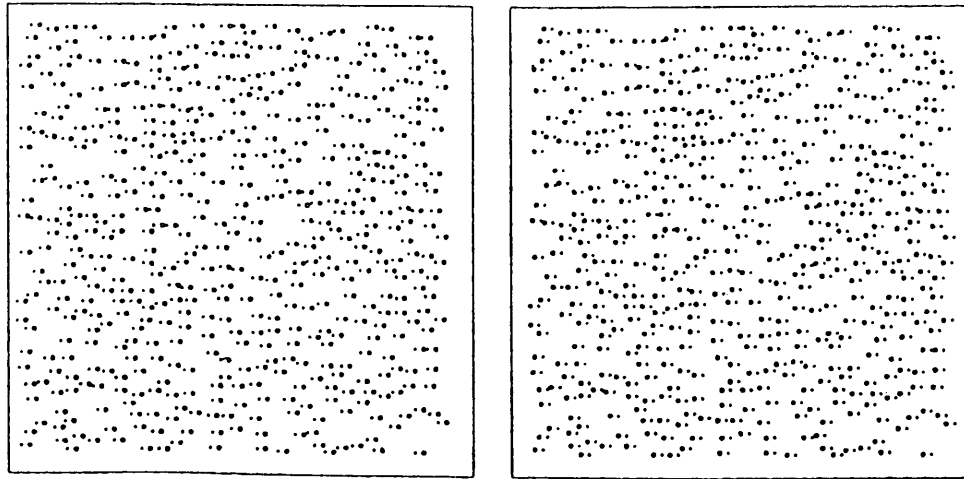


図32 ダブルネイル錯視に類似させて作成したRDS。ここでは、不規則に散在する点と白丸がペアをなし、左右のステレオフレーム間で対応するペアの位置を水平方向にシフトし、同時にペアとなる点と白丸の位置を入れ換えてある (Allik 1992)。

入れ換えてある(明度条件を逆転)。このパターンを左右フレーム間で継時的に提示すると、明度条件差を大きくするにつれて運動視はできなくなるが、しかし両眼立体視は可能で透明な2面が出現する。複数の知覚体制化が可能な場合、運動視過程は、競合する知覚の一方を強く抑制する傾向があるのに対して、3次元視過程は複数の対応を許容し、複数の3次元面を出現させる。結局、運動視、方向視、3次元視の情報処理過程は、類似したしくみがあるものの、多義的な刺激パターンの解決では基本的に異なる方略を選択していると考えられる。

## 8.2. モアレパターンにおける運動視と3次元視

空間周波数のような周期的なパターンを少しの距離をはさんで重ねると、光学的干渉作用を起こすが、これがモアレパターンである。この光学的干渉作用の結果として、大きさ、運動、回転、奥行の促進効果が視覚的に生じる。これは、音楽の領域で、2つの類似した周波数の音から、別種の拍子音が生まれることに類似する。2つの空間周波数パターンが重ねて提示されたとき、前面と後面からの両刺激の合作として、それらは網膜に投影される。もし、ある位置で前面に黒いストライプ、後面に白いストライプがあれば、黒いストライプが白いそれをオクルードするために、黒いストライプだけが視える。前面の黒のストライプと後面のそれとが重なれば、広いストライプとして視える。結局、黒いストライプが幅広くなるので、モアレパターンの空間周波数は、前面と後面の空間周波数より低くなる。同様な光学的干渉作用は、視かけのシフト方向を異ならせる。重ね合わせた2つの空間周波数パターンの一方をシフトさせると、モアレパターンもシフトするが、それは、図33に示されたように、前面と後面の黒のストライプの重なりが、どちらか一方のシフトによってどの方向にシフトするかで決まる。後面を固定し、前面をシフトさせるとき、前面の空間周波数が後面のそれより高いときには、モアレパターンのシフト方向は、前面のシフト方向と同一となり、前面の空間周波数が後面のそれより低いときには、モアレパターンの方向は前面のシフト方向と反対となる。回転させた場合のモアレパターンの回転方向とモアレパターンを構成する空間周波数パターンとの関係は、シフトさせた場合と全く同一である。モアレパターンでは、運動も拡大して出現する、一方のパターンを運動させると、モアレパターンの運動速度と運動範囲が、それを構成するパターンよりも大きくなる。とくに、2つのパターンの空間周波数が高く、しかもそれらの空間周波数間の差が小さいときに、効果が大きい。また、モアレパターンでは、両眼立体視も可能とな

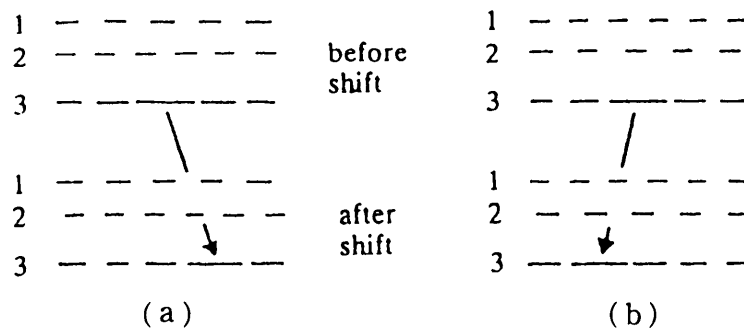


図33 モアレパターンの視かけの運動方向の図解。(a)前面 (line 2) の空間周波数が後面 (line 1) のそれより高い場合に、前面を右方向にシフトされると、モアレパターン (line 3) の視かけの運動方向は前面と同一方向となる、(b)前面の空間周波数が後面より低い場合で、モアレパターンの視かけの運動方向は前面とは反対方向となる (Spillmann 32)。

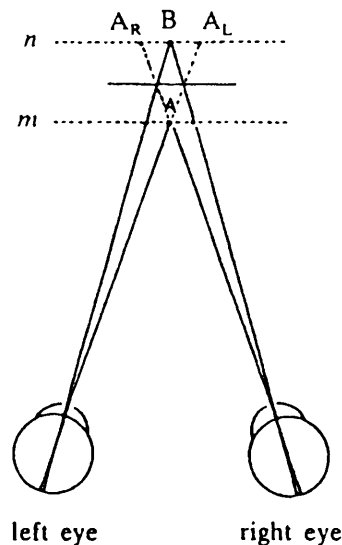


図34 モアレパターンを用いた両眼立体視。後面(n)の1点(B)を注視すると、前面の点(A)は注視点の近傍に投影される。前面の周波数が後面のそれより高いときには、前面の点は注視点から離れて投影されるので交差視差を、前面の空間周波数が低いときには、それが近くに投影されるので非交差視差をつくる (Spillmann 32)。

る。そのしくみは、図34に示されている。後面の1点を注視するとき、前面の点(A)は左右網膜の注視点の近傍に投影される。このとき、前面の空間周波数が高いと、A点の投影点は注視点の投影点から離れて投影され、これが交叉視差となる。前面の空間周波数が低いときには、A点の投影点は注視点の近くに投影されるので非交叉視差となる。モアレパターンでは、運動視差の効果も、強力に出現する。後面のパターンを立体的に折曲げ、それを別のフラットな空間周波数パターンを通し、観察者が頭部を動かしながら観察すれば、そこに運動視差が出現する。このように、モアレパターンは、イリュージョンではなく、光学的干渉の結果として、大きさ、運動、方向、3次元を可変させる刺激ツールとなる。実際、ものを拡大する道具として光学の領域で、あるいは網膜組織の変性をしらべる道具として眼科学の領域（網膜のリセプターをひとつの空間周波数パターンとみなし、50-60cpd以上の高空間周波数パターンを網膜に投影すると、特有なモアレパターンが表れるが、このモアレパターンの特性から診断する）で使われている。この光学的干渉作用は、知覚的效果を簡便に増強できるので、知覚実験にも適している (Spillmann(32))。

### 8.3. 奥行対比効果に関わる時間的要因

奥行対比効果とは、Y軸に関して傾いた枠組みの中におかれたテスト対象が、奥行に関して等距離に定位されているにもかかわらず、異なる奥行距離に定位されて見える。この奥行対比効果には、時間的要因が重要で、刺激提示当初に効果が大きく、観察時間が長くなると減少する。そこで、Kumar & Glaser (17) は、図35に示されたような刺激条件で奥行対比における時間的要因をしらべた。Y軸に関しての奥行傾斜面は、Ogleの大きさ誘導効果(幾何学的効果)を利用して作成された。図中、点線あるいは白丸で描かれたものは左眼に、実線あるいは黒丸のものは右眼に、そして、実線で描かれていてしかもペアの相手となる点線で描かれたパターンが存在しないものは、左右眼に同一パターンが提示されたことを示す。実線と点線で描かれ、左右に別々に提示されるパターンは、同形ではあるが、その横幅の大きさは左右で拡大もしくは縮小されている(図中、左コラムでは左眼に提示するものが拡大を、右コラムでは縮小を各々示す)。観察の結果、(1)奥行対比効果は、観察持続時間の経過とともに減少し、もし奥行誘導図形(台形)の網膜視差がオシレイトしなければ(左右眼への誘導図形を左右に各々同方向にシフトする)、数分以内に消失する。(2)奥行対比効果の消失は、たとえ誘導図形がオシレイトされても、それによって網膜視差が変わらないときには生起する。(3)奥行対比効果は、誘導図形がテスト刺激提示の前と後で0.5sec以内に提示されれば生起する。(4)テスト刺激を矩形で囲むと、矩形の外側に誘導図形を提示しても奥行対比効果は生起しない。(5)テスト刺激を囲む矩形に大きさ誘導効果を通して傾きをつけると、その傾きの方向が誘導図形と同方向の場合には、奥行対比効果は生起しない。しかし、両図形の傾きの方向が反対の時には、観察持続時間の経過とともに奥行対比効果は復活する。これらの結果から、人間の3次元視システムでは、

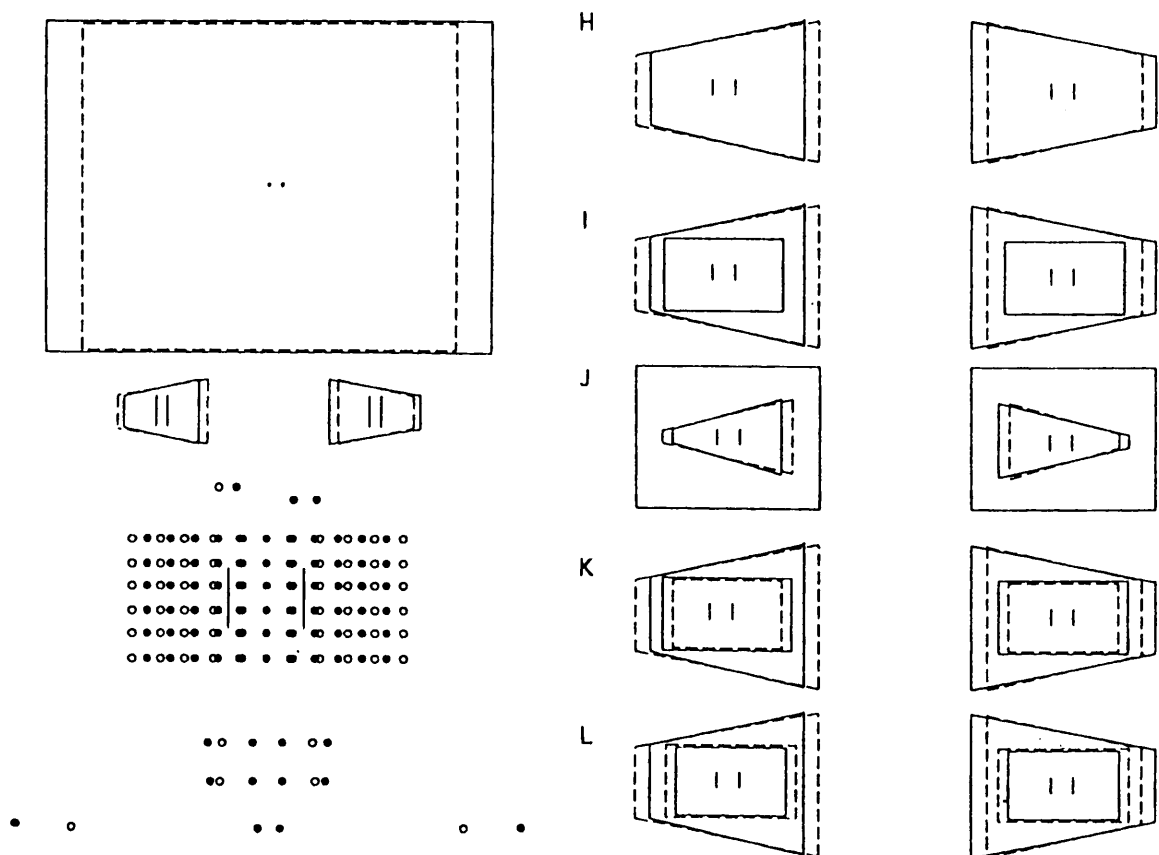


図35 奥行対比効果の時間的減衰をしらべるためのパターン。図中、点線あるいは白丸で描かれたものは左眼に、実線あるいは黒丸で描かれたものは右眼に提示される。実線によるものと点線によるものはペアを構成するが、左右眼とも実線で表されたものは左右眼に同一のパターンが提示されたことを示す (Kumar & Glaser 1993)。

奥行関係を表示する局所的な関係系が視覚情報処理の初期に形成され、この関係系のなかで、奥行対比をはじめ種々な現象が生起すると考えられるが、詳細な理論はいまだ提示されていない。

#### 8.4. 単眼視と両眼視条件でのものをつかむ動作の運動学的分析

ものをつかむ動作を単眼視と両眼視で行わせたときの運動学的分析によれば、単眼視条件では両眼視条件に比較して、(1)ものをつかむまでの時間が長い、(2)ものをつかみにいく最大速度が低い、(3)ものをつかむ直前の減速時間が長い、(4)ものをつかむための親指と人差指間の間隔が小さい、という。Servos, Goodale & Jakobson(28)によれば、これは動作以前での対象の知覚に際して、単眼視条件では対象の大きさと距離を過小視するためと論じている。

#### 8.5. 触手感覚による距離知覚

昆虫類、例えば、サソリやクモは獲物の発する振動から獲物までの距離を感覚し、それをとらえることができる。人間にも、同様な感覚が備わるかについて、図36のような装置でしらべられた(Kinsella-shaw & Turvey(15))。2本の支柱の間(264.5cm)にロープが張られ、そのロープに対象(14.6kg)がくくられている。被験者は、ロープを親指と人差指でつまみ、適当にゆすりながら、触手感覚のみにもとづいて、指で摘んだ位置から対象までの距離を、被験者の傍らに設定された別のロープをたぐり、それにくくられた指標でマッチングする。その結果、(1)物理的距離変化(20cm-160cm)にともなう触手知覚距離はリニアーに変化することから、触手への振動にもとづく距離知覚は正確なこと、(2)この能力は経験の有無とは無関係であること、(3)ロープの張力を強めると、距離は過小に知覚されること、(4)ロープを水平に張る条件と垂直に張る条件とでは、距離知覚に相違があること、(5)振動は、被験者自身によらなくてもかまわない、などが示されている。

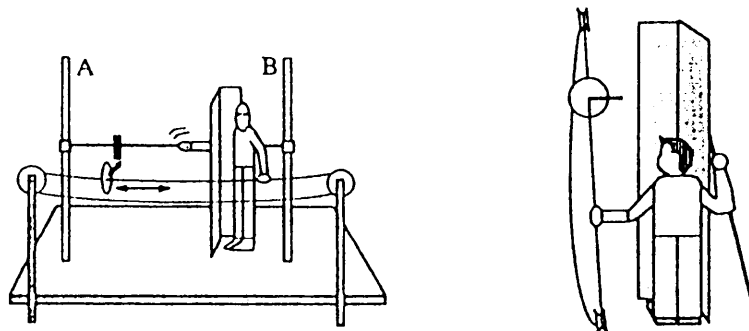


図36 触手感覚による距離知覚をしらべるための実験装置。ロープを握り、ロープの中間にある対象までの距離を被験者報告する (Kinsella-shaw & Turvey 1992)。

#### 9. おわりに

心理学の領域における3次元視研究の本年度の特徴は、両眼立体視関連の研究数が大幅に減少したことである。本報告でとりあげた研究も、ここ10年間は、年平均12から15件程度、報告されてきた。前年度から研究報告数が減少する傾向を示していたが、それが今年度は顕緒になったといえよう。RDS技法の開発以来、30年以上経過し、両眼立体視研究は、当面考えられる問題が尽きたものであろう。確かに、この領域では多くの知見が蓄積されたが、しかし研究の進展につれて問題も深まっている。対応問題にしても、どこに問題があるかは計算機科学の立場からの理論的指摘によって明瞭にされたが、解決してはいない。心理学、神経生理学、計算機科学からの共同研究が必要となろう。

両眼立体視研究の領域での研究数が減少した代わりに、運動要因による立体視研究が増加してきた。本報告でも5-6編の研究が紹介されるのが通例であったが、今年度は9編を紹介した。とくに、運動視差、ステレオキネティック効果 (SKE)、運動性奥行効果 (SKD)、オプティカル・フローなど、運動要因による立体視に関連する問題が広くとりあげられている。とくに、SKEを3次元表示に応用しようとした研究が報告されていることである。運動要因による立体視は、単眼で機能するしくみなので、その効果が特定されれば、ハードウェアとソフトウェアの両面において比較的容易にしかも簡便に応用できると思われる。

同様に、絵画的要因による立体視も、立体の復元という観点から研究がみなおされている。人間の視覚システムは、平面画像のなかに表現された陰影、大きさ、肌理勾配、オクルージョンなどから立体を視ることができる。これまでの研究では、それらの効果の測定が十分に正確に行われてきたとは言えない。もし、これらの手がかり要因を産業などの現場で実際に応用することになれば、3次元表示の曖昧さによる錯誤は人災を招いてしまう。どのように表示すれば、どの程度の奥行がどちらの方向に出現するかを明確に特定すること必要となる。

心理学における3次元視研究は、3次元視の成立過程の探求のみにとどまらず、応用面での精巧な研究も、これからはますます求められよう。

## 文 献

- (1) Allik, J. 1992 Resolving ambiguities in orientation, motion, and depth domains. *Perception*, 21, 731-746.
- (2) Braunstein, M.L., Liter, J.C. & Tittle, J.S. 1993 Recovering three-dimensional shape from perspective translations and orthographic rotations. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19 (3), 598-614.
- (3) Brenner, E. 1993 Judging an object's velocity when its distance changes due to ego-motion. *Vision Research*, 33 (4), 487-504.
- (4) Bressan, P., Ganis, G. & Vallortigara, G. 1993 The role of depth stratification in the solution of the aperture problem. *Perception*, 22, 215-218.
- (5) Buckley, D. & Frisby, J.P. 1993 Interaction of stereo, texture and outline cues in the shape perception of three-dimensional ridges. *Vision Research*, 33 (7), 919-933.
- (6) Caudek, C. & Proffitt, D.R. 1993 Depth perception in motion parallax and stereokinesis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 19 (1), 32-47.
- (7) Dengler, M. & Nitschke, W. 1993 Color stereopsis: A model for depth reversals based on border contrast. *Perception & Psychophysics*, 53 (2), 150-156.
- (8) Finkel, L.H. & Sajda, P. 1992 Object discrimination based on depth-from-occlusion. *Neural Computation*, 4, 901-921.
- (9) Ganis, G., Casco, C. & Roncato S. 1993 Rigid and non-rigid kinetic depth effect with rotating discrete helices. *Psychological Research*, 55, 1-9.
- (10) Gogel, W.C. & Tietz, J.D. 1992 Determinants of the perception of sagittal motion. *Perception & Psychophysics*, 52 (1), 75-96.
- (11) Gillam, B. & Ryan, C. 1992 Perspective, orientation disparity, and anisotropy in stereoscopic slant perception. *Perception*, 21, 427-439.
- (12) Gunderson, V.M., Yonas, A., Sargebt, P.L. & Grant-Webster, K.S. 1993 Infant macaque monkeys respond to pictorial depth. *Psychological Science*, 4 (2), 93-98.

- (13) Hagen, M.A. & Giogi, R. 1993 Where is the camera? *Ecological Psychology*, 5 (1), 65-84.
- (14) Kaiser, M.K. 1992 Using the stereokinetic effect to convey depth: Computationally efficient depth-from-motion displays. *Human Factors*, 34 (5), 571-581.
- (15) Kinsella-shaw, J.M. & Turvey, M.T. 1992 Haptic perception of object distance in a single-strand vibratory web. *Perception & Psychophysics*, 52 (6), 625-638.
- (16) Kleffner, D.A. & Ramachandran, V.S. 1992 On the perception of shape from shading. *Perception & Psychophysics*, 52 (1), 18-36.
- (17) Kumar, T. & Glaser, D.A. 1993 Temporal aspects of depth contrast. *Vision Research*, 33 (7), 947-957.
- (18) Loomis, J.M., DaSilva, J.A., Fujita, N. & Fukushima, S.S. 1992 Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 18 (4), 906-921.
- (19) McKee, S.P. & Welch, L. 1992 The perception of size constancy. *Vision Research*, 32 (8), 1447-1460.
- (20) Niall, K.K. 1992 Projective invariance and the kinetic depth effect. *Acta Psychologica*, 81, 127-168.
- (21) Patterson, R. & Martin, W.L. 1992 Human stereopsis. *Human Factors*, 34 (6), 669-692.
- (22) Patterson, R., Moe, L. & Hewitt, T. 1992 Factors that affect depth perception in stereoscopic displays. *Human Factors*, 34 (6), 655-667.
- (23) Purghe, F. & Coren, S. 1992 Amodal completion, depth stratification, and illusory figures: a test of Kanizsa's explanation. *Perception*, 21, 325-335.
- (24) Rogers, B.J. & Bradshaw, M.F. 1993 Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 361 (6409), 253-255.
- (25) Rogers, S. & Rogers, B.J. 1992 Visual and novisual information disambiguate surfaces specified by motion parallax. *Perception & Psychophysics*, 52 (4), 446-452.
- (26) Telford, L., Spratley, J. & Frost, B.J. 1992 Linearvection in the central visual field facilitated by kinetic depth cues. *Perception*, 21, 337-349.
- (27) Schor, C.M., Alexander, J., Cormack, L. & Stevenson, S. 1992 Negative feedback control model of proximal convergence and accommodation. *Ophthalmic & Physiological Optics*, 12, 307-318.
- (28) Servos, P., Goodale, M.A. & Jakobson, L.S. 1992 The role of binocular vision in prehension: a kinematic analysis. *Vision Research*, 32, 1513-1521.
- (29) Shupert, C., Cornwell, P. & Payne, B. 1993 Differential sparing of depth perception, orienting, and optokinetic nystagmus after neonatal versus adult lesion of cortical areas 17, 18, and 19 in the cat. *Behavioral Neuroscience*, 107, (4), 633-650.
- (30) Simpson, W.A. 1993 Optic flow and depth perception. *Spatial Vision*, 7 (1), 35-75.
- (31) Shinkman, P.G., Timney, B. & Isley, M.R. 1992 Binocular depth perception following early experience with interocular torsional disparity. *Visual Neuroscience*, 9 (3-4), 303-312.
- (32) Spillmann, L. 1993 The perception of movement and depth in moire patterns. *Perception*, 22, 287-308.
- (33) Stuart, G.W., Edwards, M. & Cook, M.L. 1992 Color inputs to random-dot stereopsis. *Perception*, 21, 717-729.

- (34) Swanston, M.T., Wade, N.J., Ono, H. & Shibuta, K. 1992 The interaction of perceived distance with the perceived direction of visual motion during movements of the eyes and the head. *Perception & Psychophysics*, 52 (6), 705-713.
- (35) Trueswell, J.C. & Hayhoe, M.M. 1993 Surface segmentation mechanism and motion perception. *Vision Research*, 33 (3), 313-328.
- (36) Ye, M., Bradley, A., Thibos, L.N. & Zhang, X. 1992 The effect of pupil size on chromostereopsis and chromatic diplopia : Interaction between the Stiles-Crawford effect and chromatic aberrations. *Vision Research*, 32, 2121-2128.

## 参考文献

- Adelson, E.H. & Movshon, J.A. 1982 Phenomenal coherence of moving visual patterns. *Nature* (London), 300, 523-525.
- Andersen, G.J. & Braunstein, M.L. 1985 Induced self-motion in central vision. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 11, 122-132.
- Brandt, T., Dichgans, J. & Koenig, E. 1973 Differential effects of central versus peripheral vision on egocentric and exocentric motion perception. *Experimental Brain Research*, 16, 476-491.
- Comerford, J.P. 1974 Stereopsis with chromatic contours. *Vision Research*, 14, 975-982.
- Gregory, R.L. 1979 Stereovision and isoluminance. *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, 204, 467-476.
- Grinberg, R.L. & Williams, D.R. 1985 Stereopsis with signals from the bluesensitive mechanism. *Vision Research*, 25 531-537.
- Johansson, G. 1975 Visual motion perception. *Scientific American*, 232, 76-88.
- Julesz, B. 1971 Foundations of Cyclopean Perception. Chicago University of Chicago Press.
- Johansson, G. 1977 Studies on visual perception of locomotion. *Perception*, 6, 365-376.
- Kanizsa, G. 1955 *Quasi-perceptual margins in homogeneously stimulated fields*. In *The Perception of Illusory Contours*, Eds S. Petry & G.E. Meyer. New York, Springer, 1987, 40-49.
- Lu, C. & Fender, D.H. 1972 The interaction of color and luminance in stereoscopic vision. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 11, 482-490.
- Ohmi, M. & Howard, I.P. 1988 Effects of stationary objects on illusory forward self-motion induced by a looming display. *Perception*, 17, 5-12.
- Proffitt, D.R., Rock, I., Hecht, H. & Schubert, J. 1992 The stereokinetic effect and its relations to the kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 3-21.
- Shimojo, S., Silverman, G.H. & Nakayama, K. 1989 Occlusion and the solution to the aperture problem for motion. *Vision Research*, 29, 616-626.
- Todd, J.T. 1982 Visual information about rigid and nonrigid motion : A geometric analysis. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception & Performance*, 8, 238-252.
- Todd, J.T. 1984 The perception of three-dimensional structure from rigid and nonrigid motion. *Perception & Psychophysics*, 36, 97-103.
- Weert, C.M.M. de 1979 Color contours and stereopsis. *Vision Research*, 19, 555-564.
- Weert, C.M.M. de & Sadza, K.J. 1983 New data concerning the contribution of color differences to stereopsis in *Color Vision : Physiology and Psychophysics*, Eds J.D. Mollon & L.T. Shape.

London, Academic Press, 553-562

Yonas, A., Granrud, C., Arterberry, M. & Hanson, B. 1986 Infants' distance perception from linear perspective and texture gradients. *Infant Behavior and Development*, 9, 247-256.

Yonas, A., Granrud, C. & Pettersen, L. 1985 Infants' sensitivity to relative size information for distance. *Developmental Psychology*, 21, 161-167.

Yonas, A., Pettersen, L. & Grandrud, C. 1982 Infants' sensitivity to familiar size as information for distance. *Child Development*, 53, 1285-1290.