

3次元視研究の動向—1997-1998年

3-Dimensional Perception:1997-1998 Research Trends

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

抄録：視覚心理学における3次元視研究の動向を運動要因による3次元視、両眼立体視、人工現実空間における3次元視、絵画的要因による3次元視などに分類して報告した。人間の3次元視覚システムを応用した人工現実感（バーチャル・リアリティ）の研究とその技術が広まりをみせ、またこれを核として研究が新たな展開を示している。

Abstract: The papers of 3-dimensional visual perception in 1997 and 1998 were reviewed in the fields of depth from motion cue, stereoscopic vision, pictorial cues and virtual reality. The virtual reality technique applying human visual system is broadly utilized in various fields such as industry, education, medical care, welfare and entertainment. Also it stimulates the new development of the studies of visual depth perception.

1. はじめに

本報告には、心理学における3次元視知覚の研究論文を、Psychological Abstract誌の1997年と1998年版から抽出し、目次に示した各領域に分類して紹介した。文献抽出は、DIALOGの文献抽出システムを利用し、検索語は、Distance Perception, Depth Perception, Stereoscopic visionである。

2. 運動による3次元視

■2.1. 運動視差と両眼視差の統合

運動視差と両眼視差は共通のメカニズムをもつ可能性がいくつか指摘されている。たとえば、(1) 両眼視差への順応は運動による奥行視(kinetic depth perception)に影響すること(Nawrot & Blake, 1991), (2) 運動視差にもとづいて奥行を出現させ、そのときの閾値を測定すると、両眼視差が同時に存在する条件では、閾値の低下がみられること(Cornilleau-Peres & Droulez, 1993), (3) 運動要因による奥行手がか

りが存在すると、テクスチャ要因が両眼視差を妨害しても、立体視が安定すること(Tittle & Braunstein, 1993)などが報告されている。これらは、運動視差と両眼視差とが共通に処理され統合されていることを示す。運動視差と両眼視差を、奥行出現の方向(凹あるいは凸)について知覚的に抗争させた場合には、両眼視差が奥行出現方向を優位に決定する(Rogers & Collett, 1989)が、しかしオクルージョンと抗争させると必ずしも優位ではない(Braunstein et al. 1986)。一方、運動視差は、オクルージョンと抗争する条件では優位に奥行出現方向を決定する(Ono et al. 1988)。

運動視差と両眼視差の統合について、両要因を知覚的に抗争する条件で再度検討が試みられた(Ichikawa & Saida (17))。刺激は垂直方向に正弦波上に凹凸が出現するパターンとし、両眼視差と運動視差要因で奥行が誘導される。観察者には、奥行出現の方向の報告と奥行量の調整が求められた。その結果、(1) 奥行出現方向は、排他的に両眼視差あるいは運動視差のいずれかによって決められる。多くの場合、それは両眼視差のみによって決められるが、しかし両

眼視差が小さい条件 ($0.5'$) では、運動視差が決定要因となることが増大する。(2) 奥行量は奥行出現方向を決めている手がかり要因によって変化し、もし視覚システムが両眼視差を選択していれば、両眼視差と運動視差の重み付けをもつ加算で決められ、両眼視差が規定する奥行量の方が運動視差のそれより大きくなる。また、もし視覚システムが運動視差を奥行出現の手がかりとして選択していれば、奥行量は運動視差によってのみ一義的に規定される。これらの結果は、両眼視差と運動視差の2要因が働く事態では、どちらかひとつの奥行手がかりが優位な手がかりとして選択されること、さらに運動視差は両眼視差に対して排他的であることを示し興味深い。

■2.2. 運動視差からの形状復元、ステレオキネシスによる形状復元と両眼視差からの形状復元との比較

運動視差からの形状復元、ステレオキネシス (y 軸を中心としての対象の回転) による形状復元と両眼視差からの形状復元は、幾何学的に分析すると類似しているという (Durgin et al.

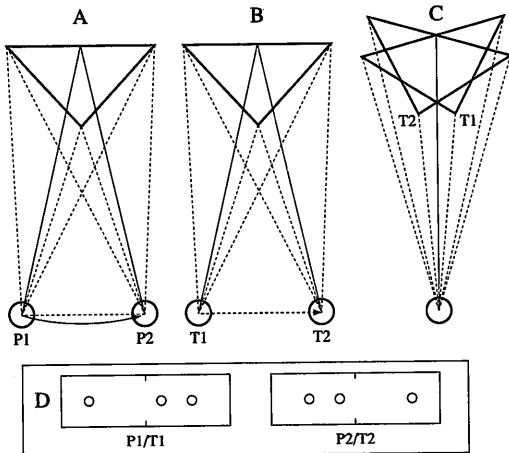


図1. (A)両眼視差からの形状復元、(B)運動視差からの形状復元、(C)ステレオキネシスによる形状復元 (Durgin, F.H., Proffitt, D.R., Reinke, K.S. & Olson, T.J. 1995).

(9)). いま、観察者が、図1に示されたように、円錐の一点を注視するとき、左右眼P1とP2から生じる両眼視差(A)を、その円錐の3

頂点で表示すると(D)のようになる。運動視差(B)は、いずれかの一方の眼が頭部運動によってT1からT2まで移動したと考えればよいので、同様にその3頂点は(D)のようになる。ステレオキネシス(C)は、 y 軸を中心としての回転で与えられるので、もし、回転角度を両眼視差と運動視差に合わせれば、T1時点とT2時点の3頂点は、(D)のようになる。幾何学的に分析すると、運動視差からの形状復元、ステレオキネシスによる形状復元と両眼視差からの形状復元は、同一の情報を観察者に提供する。検証実験では、5本の円環から構成された円錐を、両眼視差、運動視差、ステレオキネシス条件(回転による輪郭の遠近的縮小は操作されない)で提示し、両眼視差量、運動視差および回転角度をそれぞれ操作して形状知覚の正確度(ここでは円錐の頂点から底面までの奥行)を求めた。その結果、運動視差とステレオキネシス条件に比較して、両眼視差条件は形状知覚がより正確であることが示された。これは先の幾何学的な解析結果とは一致しない。その理由として、両眼視差を利用する両眼立体視には、ヒューリスティックな処理過程が関係し、ステレオスコピックな奥行恒常性にみられるように、形状の奥行の正確性を保証するしくみがあるためと考えられる。

■2.3. 運動視差からの傾斜角度の復元

Meese, Harris & Freeman (26) の研究によれば、 x 軸を中心として90度傾いた面があり、観察者が横方向にのみ移動すれば(図2-(A)), 面状の各点は(B)の左欄のような1次元の運動(水平・シア)となる。 y 軸を中心として傾いた面(x 軸は0度)でもそれは擬視面から左右への運動(水平・コンプレッション)となる((B)の右欄)。もし、観察者が横方向に移動したときの同様な傾斜面を2次的に解析すれば、面の形状の歪み(デフォーメーション)と面の回転(カール)の加算的变化(Cの左欄)あるいは面の形状の歪みと面の

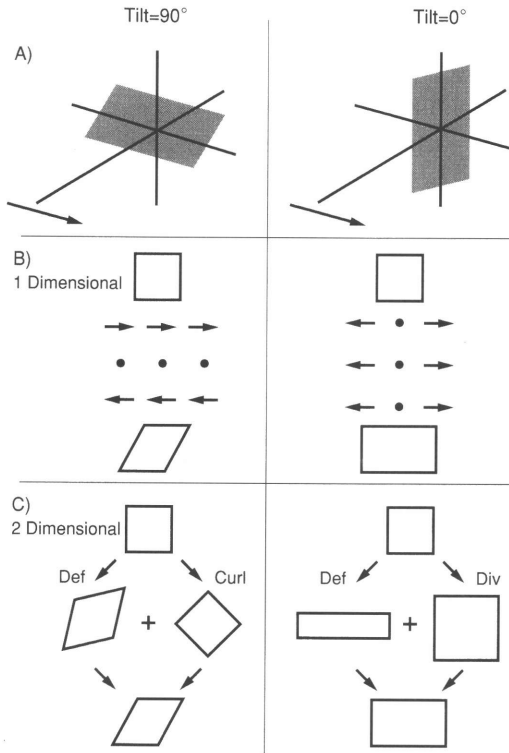


図2. 傾斜面に対して観察者が横方向に移動したときの1次元と2次元の流動パターン (Meese, Harris & Freeman 1995).

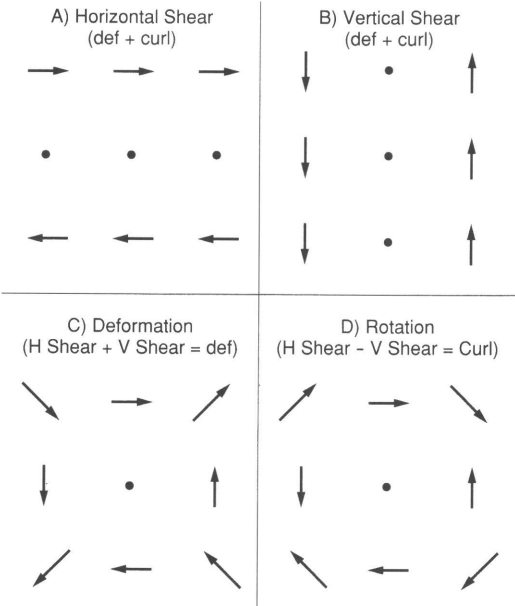


図3. 1次元の流動パターンの2次元的要因による合成と2次元の流動パターンの1次元的要因による合成 (Meese, Harris & Freeman 1995).

拡大(エクспанション)の加算的变化(Cの右欄)が起きることになる。水平シアーは、デフォーメーション+カールで合成(図3-

(A) できるし、同様にバーティカル・シアーはデフォーメーション - カールで合成(B)できる。デフォーメーションは、水平シアー+バーティカル・シアーで合成(C)できることになるし、ローテーションは水平シアー - バーティカル・シアー(D)で合成できる。もし、1次元の流動パターンが面の傾斜を決定しているのであれば、水平シアー、バーティカル・シアー、デフォーメーションおよびローテーションに共通な要因は水平シアーかバーティカル・シアーである。水平シアー要因は水平シアー、デフォーメーションおよびローテーションに存在し、バーティカル・シアー要因はバーティカル・シアー、デフォーメーションおよびローテーションに存在する。2次元の流動パターンが決定要因であると考え、デフォーメーション要因は水平シアー、バーティカル・シアーおよびデフォーメーションに、カール要因は水平シアー、バーティカル・シアーおよびローテーションに存在する。これらの4種類の流動パターンを作成し、観察させたところ、バーティカル・シアー条件でのみ面の傾斜知覚が不能であった。このことから、2次元の流動要因であるデフォーメーションが、面の傾斜知覚の決定要因であると考えられる。

2.4. ステレオキネティック効果

ステレオキネティック効果とは、前額に平行に回転する2次元パターンから生起する3次元印象を指す。これらの効果の成立には、(1) どのような3次元形状が成立するか、(2) 成立した3次元形状の奥行出現の方向の安定性(奥行反転の有無)、(3) 形状の剛体性問題(rigidity problem)の3種類の問題が関与する。剛体性問題については、ステレオキネティック効果で出現する3次元形状には、その形状を変形する楕円や線分が観察することから、ここでは剛体性の要請は成立していないことが指摘されている(Zanforlin & Vallortigara 1988, Beghi, et al., 1991)。

ステレオキネティック効果の仮説としては、近年、以下のようなものが提出されている。(1) 前額平行に横切るパターンでも3次元形状が成立するので、ステレオキネティック効果はキネティック・デプス効果のひとつの構成成分である (Proffitt, et al. 1992)。(2) ステレオキネティック効果は、キネティック・デプス効果にひとつの形状を保持しようとする知覚特性 (identity imposition) が作用して成立する (Wallach & Centrella 1990)。(3) ステレオキネティック効果は、前額平行面を運動するパターンの構成要素の速度間の差を最小にしようとして、その速度差を奥行方向の速度差に変換する知覚特性が作用し、結果として視えの奥行を出現させる (Beghi, et al 1991)。これらの仮説はいずれも、いまのところ十分な説明力をもたない。

Masini et al. (25) は、速度差最小仮説を否定するとともに、新たにベクトルモデルを提唱した。使用したステレオキネティック効果のためのパターンは、2つの面状の円が瓢箪あるいは8

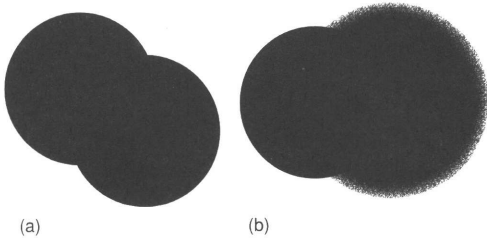


図4. ステレオキネティック効果のためのパターン
(a) 2つの面状の円が瓢箪あるいは8の字状に描かれたもの、(b) 2つの円盤の一方にファジーな輪郭をもつパターンで、このファジーな輪郭がステレオキネティック効果を促進 (Masini, et al. 1994)。

の字状に描かれたものである (図4)。これを前額に平行に、パターンの引力の平衡点をその中心とし回転させて観察すると、頭を切った円錐が斜めに傾いている3次元形状が出現し、パターン (a) ではその底面と頭部面とが奥行反転すして見えるという。これに対して、ファジーな輪郭をもつパターン (b) は、このファジーな輪郭がステレオキネティック効果を促進し、ファジー輪郭をもつ円盤が常に底面となつて、3次元形状を安定させ、さらに深い奥行を

出現させる。速度差最小仮説によれば、出現した立体形状の底面と上面の奥行の深さは、2つの円盤の直径、パターンの回転の中心となる平衡点および2つの円盤の中心との間の距離によって規定されると予想される。しかしながら、観察された立体形状の深さは、ファジー輪郭をもつ条件で、より大きいこと、また立体が観察者に対して垂直方向に提示されている方が水平方向より大きいことなどから、速度差最小仮説は支持されなかった。ここで観察された現象を説明するためのベクトルモデルによれば、出現する輪郭に強く関与する運動点PとP'の運動

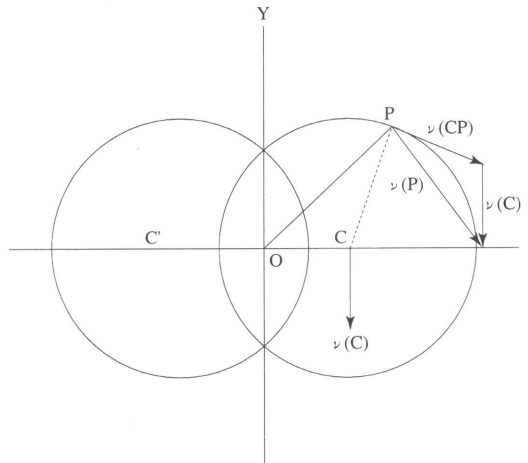


図5. ステレオキネティック効果の図解。
O: 回転の中心、CとC': 円盤の中心
(Masini, R, Ferraro, M. & Costa, T. 1994)。

速度は、

$$v(P) = v(C) + v(CP) \quad v(P') = -\{v(C) + v(CP)\}$$

でそれぞれ表される (図5、ここでOはパターンの回転の中心でXY座標軸の原点、CとC'は円盤の中心をそれぞれ示す)。このモデルでは、2つの円盤上の点はそれぞれ反対方向に運動することを予測し、2つの円盤に分離して知覚されることを示すが、ステレオキネティック・パターンがもつ良い連続性や閉合の要因の知覚作用によってひとつの3次元形状を出現させると仮定する。

■2.5. 大脳半球切除による機能障害をもつ者の運動による奥行視

大脳半球切除による機能障害をもつ患者を対象にして、運動による奥行視が可能か否かが試された (King, et al. (20)). 4人の患者は、出生後あるいは10歳までに脳炎、あるいは嚢腫を発病し、13歳から25歳までの間に外科的切除手術を受けている。運動による奥行視を生じさせる刺激パターンは、観察者に近づいたり、あるいは遠去かのように見えるパターンで、パターンの構成要素であるドットあるいは同心円を輻輳あるいは開散するように回転させて奥行印象を生起させる。被験者にはパターンの見え方を言語報告させるとともに、GSR反応を測定した。GSR反応の測定では、刺激パターンの回転を反転させることで対象の運動方向を変えても、変化は生じなかった。また、半盲領域に刺激を提示したときには、刺激の運動方向を正しく答えられなかった。これらのことから、皮質下の視覚処理過程は、運動による奥行視情報を処理できないと考えられる。

■2.6. 運動からの形状復元における異性体構造

異性体 (metamerism) とは、分子式が同じで構造が異なるものをいい、物理的あるいは化学的性質の異なる存在をさす。van Veen & Werkhoven (41) は、運動からの形状復元においても、この種の異性体的な性質を示す現象が対象の回転角度と対象の傾斜角度で存在することを示した。刺激パターンはドットで構成された1枚の矩形形の平らな面で、垂直軸に回転するとともに、垂直面に対して傾斜角をもつ。観察者には別に提示された同一の刺激パターンの回転角度 (28-98deg) と傾斜角度 (15-60deg) とが同一になるように、検査刺激のそれらを調整させる。その結果、傾斜角度が大きく回転角度が小さい場合には、調整された傾斜角度と回転角度は正しいが、しかし傾斜角度が小さく回転角度が大きい場合には、これらの調整値はバラツキが大きくなることが示された。このことから、傾斜角度が大きく回転角度が小さい場合には、

対象の回転と傾斜との間には異性体的性質があるが、傾斜角度が小さく回転角度が大きい場合、両要因は独立に処理されていると考えられる。

3. 両眼立体視研究

■3.1. 両眼視差および運動からの形状復元における体系的歪み

両眼視差 (水平視差) は、対象間の相対的奥行を規定するが、しかしこの奥行は絶対的距離で変化するので、その奥行量は決定されない。これを補償する手がかりとして、絶対的奥行距離要因や垂直視差があげられたが、視覚システムはこれらの要因を用いてはいないことが示されている (Johnston 1991, Rogers & Bradshaw 1992)。そこで、他の要因、とくに運動要因が両眼立体視における奥行量を規定していると考えられた。しかし、多くの実験的結果はこの説を否定した (Liter et al. 1993, Norman & Todd 1993, Todd & Bressan 1990)。さらに、両眼視差

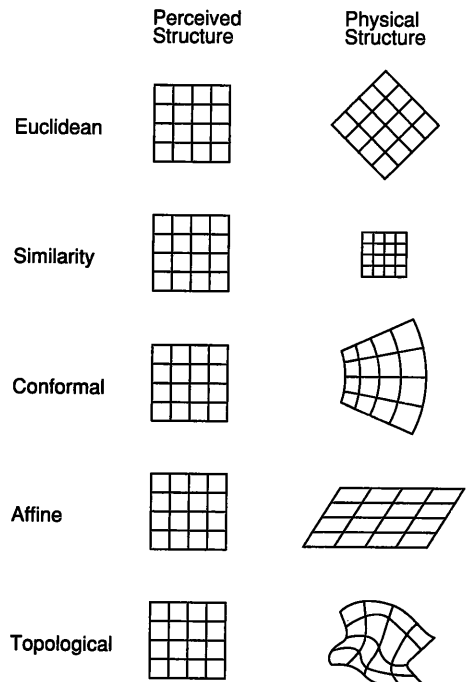


図6. 物理的空間から知覚的空間への変換系
A: 相似性、B: 調和性、C: アフィン性、D: トポロジー性
(Tittle, J.S., Todd, J.T., Perotti, V.J. & Norman, J.F. 1995)

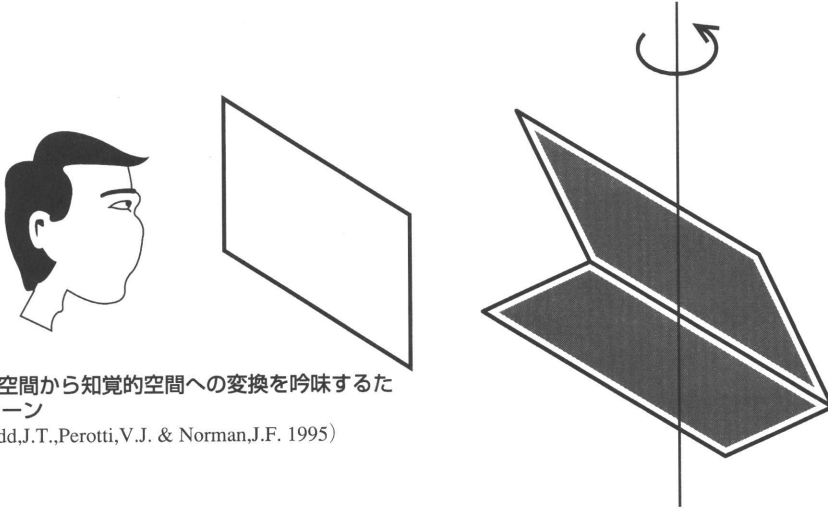


図7. 物理的空間から知覚的空間への変換を吟味するための刺激パターン

(Tittle, J.S., Todd, J.T., Perotti, V.J. & Norman, J.F. 1995)

や運動要因からの形状復元実験で、視覚システムは形状の奥行を正確に知覚できるとする結果 (Norman & Lappin 1992) から、逆に複数の手がかりから形状復元を求めても、不正確にしか知覚できない (Baird & Biersdorf 1967, Wagner 1985, Loomis, et al. 1992) とするものまで一定しない。そこで、知覚的空間 (Ψ) と物理的空間 (Φ) とは、 $\Psi = \Phi$ の関係にあるのではなく、 $\Psi = f(\Phi)$ の関係にあるのではないかと考えられた (Tittle, et al. 1995 (38))。すなわち、知覚的空間は、体系的に、ある幾何学的特性が歪められた形で存在する。その歪み (図6) は、(1) 相似性：絶対的大きさを除いてすべての幾何学的特性は保存される、(2) コンフォーマル性 (conformal)：局所的角度が保存される、(3) アフィン性：水平と垂直方向の距離が伸張される、(4) トポロジー性：パターンの局所的な隣接と連結が保存される、の4通り考えられている。視覚システムがこのような体系的な歪みをもって、物理的空間を変換しているか否かが実験的に検討された。相似性、コンフォーマル性、アフィン性、トポロジー性の検討のために、シリンダー、くさび型面図形 (図7)、2つの相互に離れた面図形、および2つの相互に接している面図形が、両眼視差、運動視差およびこの両要因の組み合わせでそれぞれ作成された。そして、観察者には、対象までの奥行距

離および面の角度を変えながら、相似性検討条件ではシリンダーの切断面が真円になるように、コンフォーマル性条件ではくさびの角度を直角になるように、アフィン性条件では、2つの面が平行になるように、そしてトポロジー性条件では2つの面間に不連続がないように、それぞれ調整させた。対象までの奥行距離および面の角度を変えた場合、その形状がどのように変換されるかあるいは保存されるかをみたところ、運動視差による形状復元事態では、方向が変化すると形状は不変を保存できないことが、また両眼視差による形状復元事態と両眼視差と運動視差の複合による形状復元事態では、対象までの奥行距離が変化すると形状は不変を保存できないことが示された。このことから、運動視差による形状復元での物理的空間から知覚的空間への変換と両眼視差にもとづくそれとは、変換系が異なること、さらに両眼視差による形状復元での変換は、従来指摘されているようなアフィン性変換では説明できない点が存在することなどが示唆されている。

■3.2. 両眼立体視からの形状復元と運動からの形状の復元の統合過程

これまで、両眼視差、運動視差、運動、陰影、テクスチャなどからの形状復元についてしらべられてきた。ここでは、このような形状復元

が2つの要因からの統合として行われる場合、たとえば両眼視差とテクスチャ (Buckley & Frisby 1993, Johnston, et al. 1993), 両眼視差と陰影 (Bulthoff & Mallot 1988), 両眼視差と運動 (Braunstein, et al 1986, Doshier, et al. 1986, Johnston, et al 1994, Nawrot & Blake 1993, Rogers & Collett 1989, Tittle & Braunstein 1993) などからの形状復元を考えてみる。理論的には、それぞれの要因からの形状復元は、それぞれの要因を処理するプロセスで独立して処理され、その結果の組み合わせで最終的な形状復元が決定される。実験結果もこのモジュラー理論を支持する (Bruno & Cutting 1988, Doshier et al. 1986)。これに対して、両眼視差と運動要因の組み合わせによる形状復元では、モジュラー理論が当てはまらない結果が出ている (Bradshaw & Rogers 1993, Johnston et al. 1994, Nawrot & Blake 1993, Tittle & Braunstein 1993)。もし、2つの要因からの形状復元が、それぞれ単独での形状復元より正確に行われ、両要因の処理過程で何らかの相互作用があるとすれば、それはひとつの要因での形状復元が他の要因からの形状復元を促進するように働くと考えられる。Tittle, Perotti & Norman (39) は、このことを検証するために、両眼視差からの形状復元と運動からの形状復元を単独あるいは組み合わせて提示し、復元された形状の弁別閾を求めた。刺激パターンはCRT上に提示されたドットパターンで、復元された形状が観察者からみて三角波形状に凹凸、あるいはサイン波形状に凹凸して見えるかのいずれかであった。観察者には、この2種類の凹凸波形の弁別が求められた。その結果、両眼視差単独による形状復元条件、運動要因単独による形状復元条件、そしてこれら2要因の組み合わせによる形状復元条件のいずれにおいても、形状弁別に差は生じなかった。このように差が生じなかったのは、この種の弁別課題が三角波形状とサイン波形の弁別という精度の高い奥行尺度を必要とするものだったために、単独要因による形状復元と2要因の組み合わせによる

形状復元の間、結果的に差が生じていないことが考えられた。そこで、精度の粗い奥行尺度でも弁別が可能な空間周波数弁別課題に変更して試みたところ、単独要因による形状復元よりは、2要因の組み合わせによる形状復元条件の方が形状知覚が正確であることが示された。このことから、3次元視処理過程は、多次元的処理過程から成立して、たとえば、両眼視差処理過程、運動要因からの形状復元過程そして「両眼視差-運動」からの形状復元過程から成立しているとも考えられる。

一方、両眼視差による形状知覚と運動視差による形状知覚とが抗争的事態にある場合、どちらか一方の手がかりが優位となり、3次元の形状(凹凸、奥行方向など)が決定されるのか、あるいは両要因の平均化など何らかの組み合わせが起きるのかについても検討された (Norman & Todd (30))。抗争的奥行手がかり事態は、両眼視差が水平の凹凸サイン波形を、運動視差が垂直の凹凸サイン波形を指示することによって導入した。観察者には、一方の要因から構成されたランダム・パターンを標準刺激として提示し、他方の要因から構成された波形の増幅度を、視えの奥行が両要因間で同等になるように調整させた。その結果、運動視差が水平方向の凹凸波形を示すときには、運動視差が両眼視差を抑制し、逆に両眼視差が垂直方向の凹凸波形を示すときには、運動視差を抑制することが示された。ただ、運動視差の両眼視差に対する抑制の方が強いことも示された。このことから、それぞれの奥行手がかりが示す奥行方向には異方性があり、両眼視差は垂直方向で、運動視差は水平方向で効果的に奥行を示すと考えられる。また、これらの結果は、複数の奥行手がかりからの3次元形状知覚の統合がリニアに加算されるのではなく、複数の奥行手がかりがそれぞれ重み付けを受けて統合されるとする理論 (weak fusion model, Landy, et al. 1995) を支持する。

■3.3. ステレオマッチングにおける空間周波数チャンネルの選択特性

ステレオマッチングにおいて、空間周波数チャンネルの選択特性が一定の役割を果たしている。たとえば、ランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) が重複する空間周波数で構成されていても、立体視が出現するし (Julesz 1971, Mayhew & Frisby 1976), 2オクターブ以上離れた空間周波数のノイズをRDSに混入しても立体視は妨害されない (Julesz & Miller 1975, Yang & Blake 1991)。また、高空間周波数から構成されたステレオグラムに対する単一像融合が可能な視差範囲は、2オクターブ以下の低空間周波数で構成されたステレオグラムを提示すると縮小される (Wilson et al.1991, Rohaly & Wilson 1993)。さらに、立体視が出現する視差範囲は低空間周波数では相当広いけれども、空間周波数を高めていくとそれは減少する。これらのことから、両眼立体視の処理過程には2種類の空間周波数チャンネルが関係していて、低空間周波数チャンネルは大きい視差を、高空間周波数チャンネルは小さい視差を検出すると考えられている (size disparity correlation, Shor & Wood 1983)。Smallmann (37) は、ステレオマッチングにおける低空間周波数チャンネルと高空間周波数チャンネルの相互作用について検討した。ステレオグラムはサイン輝度波形で構成したものとランダム・ドットで構成したものとを、重複して作成してある。サイン輝度波形で構成した部分は、左眼と右眼のステレオグラムで波形の位相を逆転させてあるので、交差と非交差視差の対応が両方とも可能で (図8)、したがって多義的となる。一方、ランダム・ドット (フィルター処理をしてある) で構成された部分のステレオマッチングは一意的な対応をとるように設定した。このように、ステレオグラムはサイン輝度波形とフィルター処理したランダム・ドットの2種類の刺激が重複されているが、さらにサイン輝度波形で構成したもの、およびランダム・ドットで構成したものとも、低

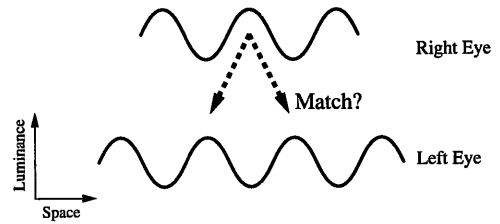


図8. サイン輝度波形を用いたステレオグラム。

左眼像と右眼像とで波形の位相を逆転させ、対応の多義性を誘導 (Smallmann, H.S.1995)。

空間周波数 (2 c/deg) から成るものと高空間周波数 (8 c/deg) から作成したものを作成した。さらにサイン輝度波形で作成した部分の視差は、低空間周波数条件では視差を15分に、高空間周波数条件では3.75分に固定された。ランダム・ドットで構成したものの視差は、0, 4, 8, 12, 16分に変化させた。この2種類の刺激を組み合わせたステレオグラム、すなわち「サイン輝度波形-ランダム・ドット」の組み合わせは、低-低、低-高、高-高、高-低の4種類となる。このようなステレオグラムを両眼立体視したとき、もし、高空間周波数チャンネルと低空間周波数チャンネル間で相互に影響があるとすれば、サイン輝度波形で構成されたステレオグラムの対応の多義性に対応の一意的なランダム・ドットのステレオグラムで打ち消されて、サイン輝度波形のステレオグラムで出現する奥行方向が一意的に定まると予測される。観察の結果、「サイン輝度波形-ランダム・ドット」の組み合わせで一意的な奥行出現比率が高いのは、相互の視差が一致した場合 (低-低条件と高-高条件) であるが、一方、低-高条件と高-低条件ではすべての視差範囲で一意的な奥行方向の出現が高いこと、とくに低-高条件でそれが顕著なことが示された。これらのことから、高空間周波数チャンネルと低空間周波数チャンネル間に相互作用があり、とくに高空間周波数チャンネルが低空間周波数チャンネルに影響する力がより強いと考えられる。

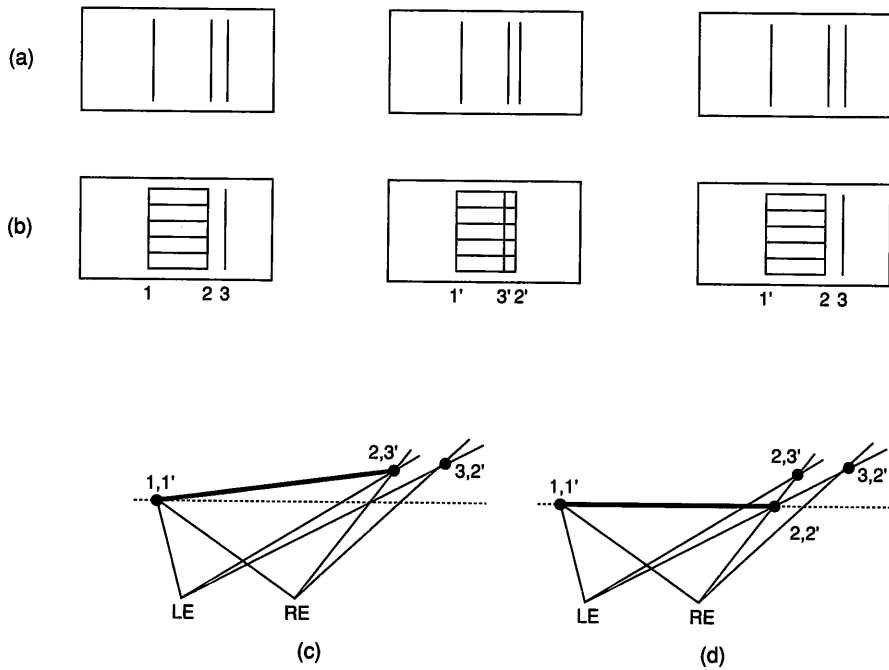


図9. パナムのリミッティング事態をモデルにした両眼視のマルチプルな対応。
 (a)と(b)はステレオグラムで左パターンと中央パターン、右パターンと中央パターンで融合させる。(c)は(a)のマルチプルな対応を、(d)は(b)のマルチプルな対応を図解したもの(Kumar,T. 1996)。

■3.4. 対応問題

両眼立体視における対応問題での計算論的な多義性を解決するために、3つの拘束条件が前提とされる。そのひとつはユニークネス条件で、左画像のひとつの要素は右画像の他の要素とのみ対応し、同時に別の要素とは対応をもたないというものである。二つめは順序条件で、いま左画像に2本の垂直線分a,bがあり、右画像にも2本の垂直線分c,dがあれば、対応の組み合わせは4組あるが、しかし対象は一般には不透明であることから、2組が除去でき、最終的にはaとc、bとdの対応が残るというものである。三つめは、連続性の条件で、一般に面が連続的であるので、視差も連続性が保存されるというものである。これらの拘束条件は、すべて、面の連続性と対象の非透過性を大前提としているので、この大前提が成立しないところでは、これらの拘束条件も成立しない。その実験的事例として、1眼に1本の垂直線を他眼に2本の垂直線を提示するパナムのリミッティング事態

(Panum's limiting case)があり、ここでは1本の垂直線が2本の垂直線と同時に対応をもつので、ユニークネス条件が成立しない。Kumar (22)は、このようなマルチプルな対応について、図9のようなパナムのリミッティング事態をモデルに、その変形を作成し検討した。図(a)の場合にはパナムと同様な対応(図(c))が出現するが、図(b)では、図(d)のように、図(a)のパターンでは出現しない対応が成立する。このように、両眼視における対応は、対応可能な要素を取り巻く刺激布置条件(パターン、明るさ、密度)によってダイナミックに変化することが示された。このことから、ユニークネス、順序、連続性の3つの拘束条件は、限定された大前提のもとでのみ成立するのではないかと考えられる。

また、ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム(DRDS)を用いて、両眼立体視における対応問題も検討された(Lankheet & Lennie (24))。DRDSを用いると、空間周波数、

時間周波数および両眼視差量を独立に操作でき、また左右像の対応の程度をノイズを加減することによって操作して視差検出感度を測定することができる。実験では、水平方向にサイン波形状に凹凸変化するパターンがドットで作成され、空間周波数 (0.45-6 c/deg)、時間周波数 (0.1-8 c/sec) と視差量がそれぞれ独立に操作され、被験者には凹凸の波形が知覚できたら (対応検出閾) 応答するように教示された。その結果、(1) 空間周波数の変化に伴う対応検出感度は、1.5-2 c/deg近辺が最大となるband-pass型の特性を示すこと、(2) 時間周波数の変化に伴う対応検出感度は、静止条件 (0 c/sec) および比較的速度の遅い 1 c/sec近辺が高く、以降は直線的に低減し、4-8 c/secで限界に到達するlow-

pass型の特性を示すこと、(3) 空間周波数は、視差量 (disparity modulation amplitude) と強く関係し、4-6 c/deg近辺で最大の検出感度を示し、以後は急激に下降し、したがって視差が小さいところ (low amplitude) ではband-pass型の特性を、視差が大きいのところ (high amplitude) ではlow-pass型の特性を示すこと、などが明らかにされている。

一方、対応問題から離れて、このパナムのリミテイング事態 (図10- (a)) を説明する仮説として、これまで、2重融合説 (double fusion) が有力であったが、これに対して、輻輳誤謬説 (convergence error)、ダヴィンチステレオ説 (da Vinci stereopsis) が提唱されている。2重融合説は1本の線分が他の2本線分のそれぞれと対応すると考えるが、輻輳誤謬説では、片眼の1本の線分は他眼の1本の線分のみと対応し、このとき過剰輻輳あるいは過小輻輳が生じ、対応しない線分との間に奥行が生じると仮定する (Kaufman 1976, Howard & Ohmi 1992, Howard & Rogers 1995)。ダヴィンチステレオ説では、片眼の1本の線分が他眼の2本の線分のそれぞれと対応を持つことができるが、パナム効果が出現するのは観察者が1本の線分と2本線分のこめかみ側を注視 (輻輳) したときで、このときには鼻側と対応した対象は、近方に定位される注視対象より遠方に定位されるので隠されてしまい (図 (b))、また、1本の線分が2本の線分の中の鼻側と対応をもつように観察者が注視 (輻輳) すれば、こめかみ側の線分は対応線分がなくなり、その奥行定位は曖昧となる (図 (c)) と説明する (Ono, et al 1992)。Gillam, Blackburn & Cook (12) は、これらの仮説の真偽を検証するために、片眼の2本線分的一方のみを常に他眼の1本線分と対応するようにノニウスラインを付けて指定し (観察者は常にこの対応する線分を注視するように求められる)、2本線分のうち対応をもたない線分と1本線分との間の両眼視差を変えて、その視かけの奥行距離を測定した。その結果、視かけの奥行距離は、両眼視差

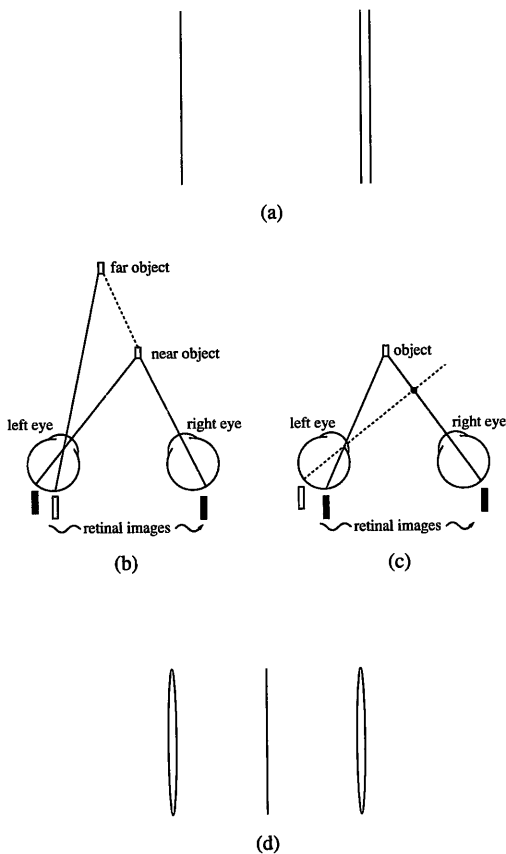


図10. Panum's limiting case . (a) Panum's limiting caseのステレオグラム、(b) と (c) ダヴィンチステレオ仮説、(d) Panum's limiting caseの変形ステレオグラムで両眼立体視すると奥行方向に傾斜した円形が出現する (Gillam, Blackburn & Cook, 1995). チプルな対応を図解したものの (Kumar, T. 1996) .

と比例して変化することが示された。また、パナムのリミテイング事態を図 (d) のように変形し、その効果をしらべたところ、奥行方向に傾斜した円形が出現し、その円形の深さは、垂直線分と2本線分の上下の交点の間に形成される視差に規定されることが示された。これらの結果は、いずれも片眼の1本線分が他眼の2本線分のいずれとも対応していることをあらわすことから、2重融合仮説を支持する。

■3.5. 交差視差処理過程と非交差視差処理過程

ステレオ盲の研究によれば (Richards 1970, 1971), 交差視差のみステレオ盲あるいは、その逆のケースもみられる。これは、交差視差処理と非交差視差処理とが別々の過程で処理されることを示唆する。このことをさらに検証するために、交差視差処理過程と非交差視差処理過程に要する時間が測定された。ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラムを提示し、立体視が成立するまでの時間が、交差視差と非交差視差それぞれにおいて測定された (Patterson & Day (34))。その結果、交差視差が検出され立体視が出現するまでの時間は100msec以下に対して非交差視差のそれはより長いことが示された。交差視差処理と非交差視差処理は、それぞれ独立した処理過程と考えられる。

同様な結果は、フィギュラル・ステレオグラムを用い交差視差と非交差視差の反応時間と奥行方向についての知覚の正確性をしらべたLanders & Cornack (23) の研究からも確認された。それによれば、交差視差の方が反応時間は短く、

また奥行方向の知覚の正確度も高いことが示された。さらに、ここでは視差が指示する奥行方向とは反対方向の奥行出現もしばしば観察された。これらのことから、交差視差と非交差視差が単独で独立して処理されるのではなく、まず奥行量が処理され、次いで交差と非交差視差にもとづき奥行方向が処理される一連の連続した処理過程の存在が示唆される。

■3.6. 両眼視差と相対的奥行距離の問題

両眼視差は相対的奥行距離量を規定するが、しかしそれは観察距離の二乗に反比例して変化するので、対象までの奥行絶対距離の手がかりが付加されないと一意的には決定されない。この問題で用いられる絶対的奥行距離の手がかりとしては、両眼輻輳や眼球調節などの眼筋的要因、垂直視差、熟知の大きさなどの認知的要因が挙げられてきた。Bradshaw, Glennerster & Rogers (3) は、垂直視差と輻輳要因を別々に操作し、両眼立体視における相対的距離を一意的にこれらの要因が単独で規定するかをしらべた。垂直視差と輻輳 (0,97.5,195,390,585,780 min arc) は、図11に示すような考え方に従って導入された。垂直視差は、観察距離が短くなると左右眼の前額に平行な面の傾斜角度が大きくなるし、逆に観察距離が無限大になるとそれは平行になる。そこで、実験ではステレオグラムで提示される対象の左眼像と右眼像を視線に対して、それぞれが逆の傾斜角をもつように操作して垂直視差が導入された (観察距離57cmで±3.25 degの傾斜角をとる)。また、垂直視差は視野角とも大きく関係し、視野角が小さいと

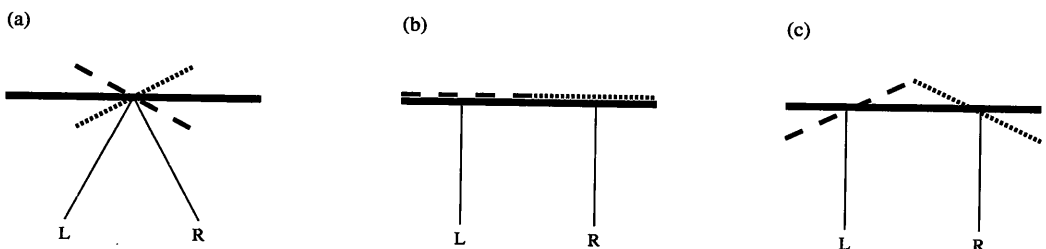


図11. 両眼立体視における垂直視差と輻輳の関係

(Bradshaw, M.F., Glennerster, A. & Rogers, B.J. 1996).

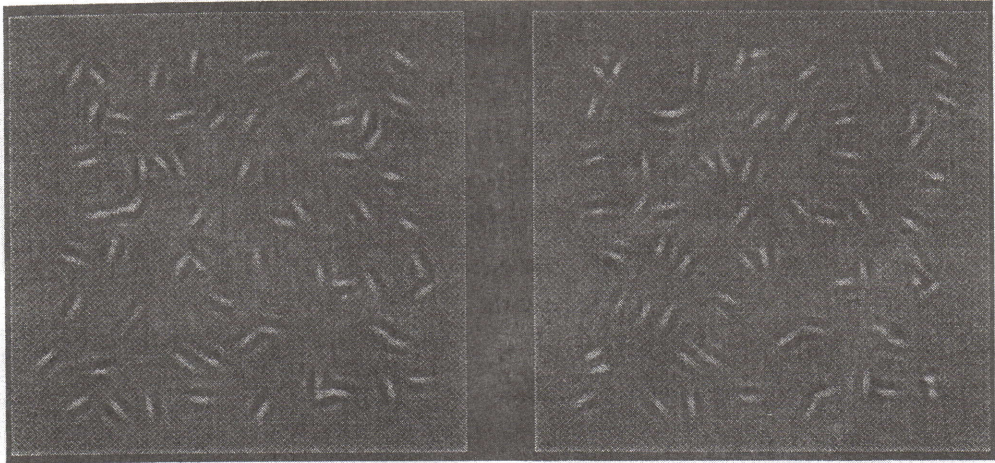


図12. 異なる奥行面にある刺激要素からの輪郭の生成のためのステレオグラム
(Hess,R.F. & Field,D.J. 1995)

垂直視差の効果は減少するので、ディスプレイの大きさを変えることによって視野角(10,20,39,70 deg)をも操作した。その結果、垂直視差が、相対的奥行距離を規定するのに効果をもつのは、視野角の大きさが20deg以上の条件の場合であり、一方、輻輳はこれと反対に20deg以下の場合であることが示された。これらの結果から、両眼立体視において垂直視差と輻輳はそれぞれ単独で相対的奥行距離を規定するのに必要な絶対的奥行距離の手がかりになるとともに、垂直視差と輻輳を組み合わせた場合には、その効果は垂直視差と輻輳を別々に操作した条件での効果の加算的総和となることも示されている。

■3.7. 2つの奥行面にまたがる輪郭の統合過程

複数の刺激要素は、ゲシタルトのグループ化原理によって統合され、輪郭が生成される。最近の研究によれば、刺激要素を結合すると、ある滑らかな曲線的な輪郭(path)を知覚できる一群の刺激が、方向を異にする一群の刺激要素の中に埋め込まれ、しかも、曲線を構成する刺激要素間の線分角度が60 deg相違していても、その輪郭を検出できるという(Field, et al. 1993)。このように、視覚システムは一群の刺激要素が距離、シンメトリー、フェーズ、方向

そして色で相違しても、それをのりこえて輪郭として結合する力をもつと考えられている。Hess & Field (15)は、輪郭を構成する刺激要素が奥行の異なる面上にあっても、それをのりこえて輪郭が生成できることを実験的に示した。刺激パターンはガボール関数で構成された短線分で、その相互の隣接線分の角度を ± 10 deg以内にとどめてあるので、連続した1本の輪郭線が知覚できる。この輪郭線は6本の短線分で構成されるが、1本おきにその半数はある奥行面に、他は別の奥行面に両眼視差で操作され提示される。輪郭を構成する短線分は、その方向角がランダムに変化する同種の刺激要素群の中に埋め込まれる(図12)。観察の結果、輪郭を構成する刺激要素が異なる奥行面に散在しているにもかかわらず、輪郭が知覚できることが示された。

■3.8. 両眼立体視における錯視的輪郭(illusory contour)の生成

互いに重なる部分をもつ2つの対象が網膜に投影されると、覆う部分と覆われる部分の接合部は、輪郭上でT字型となり、対象のコーナー部分はL字型となる(図13, Guzman 1969)。Anderson & Julesz (1)は、これを踏まえて、輪郭上でT字型とL字型を含むステレオグラム

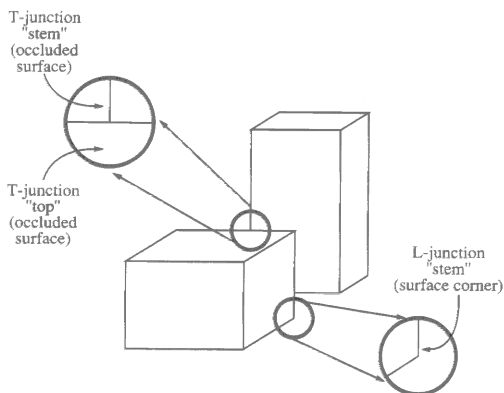


図13. 重なりがある対象の交差領域でのL字型とT字型の接合
(Anderson, B.L. & Julesz, B. 1995)

(図14)を作成し、両眼立体視すると、L字型の輪郭構造をもつステレオグラムでは錯視的輪郭は生じないが、T字型の輪郭構造をもつステレオグラムでは、T字の接合部で錯視的輪郭が生じることを見いだした。すなわち、中央のコラムと右側のコラムでの両眼立体視では、黒色と灰色との接合部分では黒色の矩形は灰色の矩形を覆い、一方左側のコラムとの両眼立体視ではその接合部分で黒色のの矩形を横切るように灰色の錯視的輪郭は生じる。また、垂直線分のエッジに非対応の部分を設定しても錯視的輪郭が生じる。図15のように、垂直線のエッジの左右で対応する部分に非対応な明るさの差を導入し、両眼立体視（左と中央のコラムのステレオグラム）すると、そのエッジを囲むような錯視的円輪郭が線分の手前に浮き出る。このような錯視的輪郭を生じさせるパターンの詳細な分析から、ステレオグラムにおいては、両眼で対応する部分は相対的奥行を規定する視差を指示し、一方、L字、T字やI字接合部にみられるように、パターンの特徴的な輪郭領域は対象の幣一被弊部分に関わる輪郭を規定すると考えられている。

■3.9. ランダム・ドット・ステレオグラム

(RDS) における学習効果



図14. L字型接合部分で錯視的輪郭が生じるステレオグラムパターン
(Anderson, B.L. & Julesz, B. 1995)

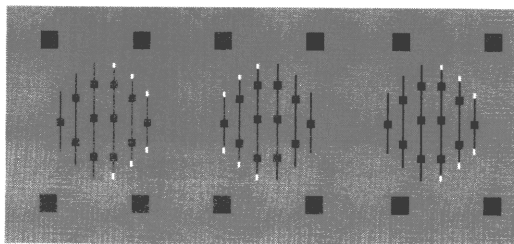


図15. I字型接合部分で錯視的円形の輪郭が浮き出るステレオグラムパターン
(Anderson, B.L. & Julesz, B. 1995)

ランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) を初めて両眼立体視すると、しばしば、立体が出現するまでに十数秒の時間がかかるが、反復試行すると、それが顕著に減少する。これは、観察者がRDSを反復して観察する過程で、左右の視野の異なる部分を融合領域に有効にコンバージョンすることを学習するためと説明されてきた (Frisby & Clatworthy 1975, Ramachandran 1976,). Bradshaw, Rogers & Bruyn (4) は、この輻輳運動仮説の再検討を試みた。実験は、RDSを初めて観察するものを被験者として、螺旋図形が出現するRDSを反復提示し、刺激提示から螺旋が知覚されてその向き（左巻あるいは右巻）を報告するまでの反応時間が測定された。その結果、最初の6試行と最後の6試行（19試行目から24試行目）の反応時間を比較しても、両試行群間には有意差がないことが示された。さらに、両眼視差が変えられた条件（20,40,60,80 min arc）で、RDSの提示から立体出現までの最小時間を指標として輻輳運動の影響がしらべられ、両眼視差と立体出現までの潜時が比例しないことも示された。これらの結果から、少なくとも、RDSで立体出現までの潜時

が長くなるのは、両眼融合に必要な輻輳運動とは関係していないことが明らかにされている。

■3.10. 第1次視覚野 (V1) 領域での両眼視差と輻輳の相互作用

両眼視差は、相対的奥行距離のための手がかりなので、絶対的奥行距離の手がかりと協調しなければ、対象までの距離を特定できない(ただし、垂直視差には絶対的奥行距離情報が内包されているが、視覚心理学的に十分には立証されていない)。このとき、絶対的奥行距離要因となるのは輻輳である。Trotter (40) は、相対的奥行距離要因と絶対的奥行距離要因とが神経生理的に相互作用する仕方には、(1) 両眼視差ニューロンは、絶対的奥行き距離とは無関係に反応する、(2) 両眼視差ニューロンは、絶対的奥行距離に対応して反応量を変える、(3) 両眼視差ニューロンは、絶対的奥行距離に選択的に反応し、いわばモジュレートされている、の3通りが想定できると考えた。そして、サルに固視訓練を施した上で、3種類(20, 40, 80cm)の観察距離にRDS(ドットの視角および両眼視差量はそれぞれの観察距離で等価に設定)を提示し、V1領域での単一ニューロンのスパイク反応を測定した。その結果、ある型のニューロンは観察距離20cmの場合にのみ強く反応し、その他の距離では反応しないことがわかった。実際、80%以上のニューロンが観察距離に対してモジュレートされていることが確認された。さらに、絶対的奥行距離の手がかりは何かを確かめるために、プリズムで輻輳要因を変えて測定したところ、輻輳が指示する絶対的奥行距離に対応して、単一ニューロンの反応が変化した。両眼視差ニューロンと連動し絶対的奥行距離の情報をもたらしている主たる手がかり要因は、輻輳であることが示唆されている。

■3.11. 両眼視融合限界と視野角

両眼視融合限界を確定することは、ステレオ視で対象を奥行に関してどこまで定位できるか

と関連して重要である。Nagata (29) は、視野角と両眼視融合限界との関係を実験的に検討した。視野角は、2層の偏光シートをもつOHPを利用して、ステレオグラムを任意に拡大/縮小(視野角は、 6.3° , 22° , 38° に変化)する事によって視野角を変化させた(観察距離は一定)。その結果、交差視差では、10minの割合で、また、非交差視差では5minの割合で、視野角の拡大に伴い両眼視融合限界も拡大することが明らかにされた。

また、両眼融合限界には、ステレオグラムのターゲットの大きさおよびその背景となる周囲のパターン条件(背景パターンが一樣に照らされている条件、一樣に暗い条件、背景パターンがシャープな条件、ボケた条件)が関係していることも明らかにされた。それによれば両眼視融合限界は、ターゲットが大きいほど、また背景パターンがボケた条件で拡大するという。この結果から、バーチャルリアリティの技法を用いて人工現実空間を提示するときには、視野角を可能な限り広げ、同時に立体提示させる物体を大きくとり、両眼視融合を起こしやすくすることが重要である。

■3.12. 両眼視差の検出と前注意過程

両眼視差の検出は、前注意過程でなされるか、あるいは注意過程でなされるかが、視覚探索課題で検討された(O'Toole & Walker (32))。前注意過程では、刺激個数を増大しても視覚探索時間は一定であることが知られている。そこで、ターゲットとデストラクター(妨害刺激)をRDSで提示し、デストラクターの個数を変化させたときの視覚探索のための反応時間を測定した。その結果、(1) ターゲットとデストラクターがともに交差視差をとる場合には、デストラクター数の増大に伴う視覚探索時間はゆるやかなスロープをもって増大すること、(2) ターゲットとデストラクターがともに非交差をとる場合でターゲットがデストラクターより手前にある条件では(1)と同一な傾向を、ターゲット

がデストラクターより後ろに提示された条件ではデストラクター数の増大しても視覚探索時間は長くならないこと、(3) ターゲットとデストラクターが凝視面をはさんで提示された場合でターゲットがデストラクターの手前にある条件ではデストラクター数が増大しても視覚探索時間は長くならないことが、ターゲットがデストラクターより後ろに提示された条件ではデストラクター数の増大に伴う視覚探索時間は大きなスロープをもって増大すること、などが示された。これらの結果は、視差検出が前注意過程で処理されている可能性を支持するが、それは部分的にとどまることを示唆する。

■3.13. ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム (DRDS) によるマカクの両眼立体視

2個体の若いマカク (*M.mulatta*) の両眼立体視能力がDRDSで検討された (Crawford et al. (6)). 実験は、はじめに簡単な幾何学的固形図形、例えば四角形と十字形、プラス図形とマイナス図形、長方形と三角形を提示し、その弁別を先行訓練として試行し、次いで、DRDSを用いて固形図形の代わりに遠い面と近い面を提示し、その奥行面の弁別テストに移行して行われた。その結果、弁別成績は両眼視差が小さくなると、それに比例して低下することが示され、マカクはDRDSによる両眼立体視能力をもつことが明らかにされている。

■3.14. 乳児の両眼視融合、両眼立体視と両眼視力の測定

2-8月齢の乳児を対象として両眼視融合、両眼立体視と両眼視力が、視線の偏好反応と視覚誘発反応の両方でしらべられた (Birch & Petrig (2)). 測定は、DRDSを使用し、また統制刺激には、両眼視差が付加されないが、左右眼で対応のあるドット、あるいは左右眼で対応のないドットから作成されたものなどを用いた。その結果、両眼視融合と両眼立体視は、2-3月齢の

乳児ではそれらのいずれも示されないが、5月齢を過ぎると大部分の乳児はそれらの能力を獲得していることが、両方の測度で示された。また、両眼立体視力は、6-7月齢になると成人の立体視力 (60 sec) に近似してくる。さらに、両眼視差の増大に伴う視覚誘発反応の大きさは、非単調的变化を示し、視差10minを境にして不連続となる。これは、粗い視差と密な視差を処理する2過程の存在を示唆する。

■3.15. 両眼視ニューロンの損傷

霊長類の新生児は、視覚経験を経る前に健全な両眼視ニューロンをもって生まれてくる。そして、出生後1週齢から1月齢にかけての正常な両眼視刺激を受けることによってはじめて、これらの両眼視ニューロンは機能するようになる。もし、この時期に両眼視経験が阻害されると、視覚領の両眼視ニューロンは、深刻なダメージを受ける (Crawford, et al. 1984, 1991)。Crawford, et al. (7) の研究によれば、両眼にプリズムを装着させ、一方の眼のプリズムを15-20度回転させることによって両眼視融合を妨害すると、成長後も永久に両眼立体視が阻害される。マカク類の幼体を対象にして、そのようなプリズムを7日間、15日間、あるいは30日間装着し、1年から3年後に、DRDSでテストすると、出生直後に15日間あるいは32日間のプリズム装着を受けた被験体はすべて両眼立体視能力を永久に阻害されていることが明らかにされた。また、30日齢から装着をはじめた被験体の半数も同様であった。さらにそのような両眼融合の妨害で、両眼立体視能力が阻害されたアカゲザルの乳児の視覚領の両眼視ニューロンの神経生理学的な反応も測定された (Crawford, Pesch & Noorden (8)). ニューロンの微小電極法による測定は1歳から5歳の間に行われたが、単眼刺激に対しては、視覚領 (V1) のニューロンは正常に反応したが、DRDSを提示しての刺激に対しては、反応する両眼視ニューロンは劇的に減少した。このことから、出生直後の両眼視融合の妨

害はステレオブラインドを永久にもたらすと考
えられる。

■3.16. サル (rhesus monkey) の両眼立 体視下での両眼輻輳

サルと人間の両眼立体視下での両眼輻輳が測
定された (Harwerth, Smith III & Siderov (13)).
測定は、局所的立体視条件の下、輻輳はプリズ
ムを装着することによって変化させた。その結
果、サルと人間の両眼視融合は、同一の輻輳範
囲内でなされていること、また同時に測定した
両眼立体視力もサルと人間の間で同一であるこ
とが確認された。

4. 3次元視における絵画的要因

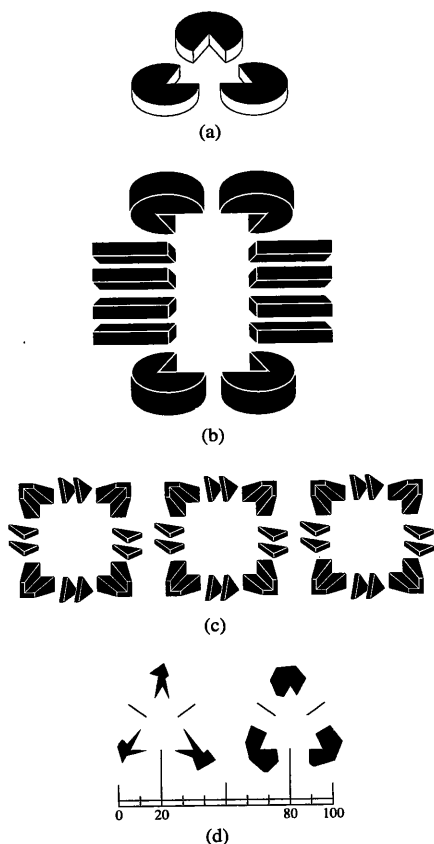


図16. 主観的輪郭図形とオクルージョン。
(a) に対して (b) の誘導図形のそれぞれは3次元的に
描画され、この場合には主観的輪郭効果は生じない。
(c) は誘導図形要素が両眼立体視表示された条件、(d)
は誘導図形が主観的輪郭図形よりも前方に立体視され
る条件 (Purghé,1995)。

■4.1. 主観的輪郭図形とオクルージョン

主観的輪郭についてのオクルージョン仮説に
よれば、主観的輪郭が出現するのは、それを誘
導する図形要素がひとつの対象に対して蔽一被
蔽関係をもつように配置されるために、これが
潜在する輪郭を生みだすと説明される (Rock
& Anson 1979)。これは、図16- (b) で例証さ
れる。図 (b) に対して図 (a) の誘導図形の
それぞれは3次元的に描画され、この場合には
主観的輪郭効果は生じない。一方、図 (c) に
示すように、誘導図形の各々が3次元的に描画
されていても、主観的輪郭が出現する (Purghé
1993)。そこで、主観的輪郭効果には、オクル
ージョンが必須の要件であるか否かについて
Purghé (36) によって検証された。実験は、主
観的輪郭図形に網膜像視差を導入し、誘導図形
の各々を3次元表示、あるいは誘導図形の各々
の方が主観的輪郭図形より前方に出現するよ
うに両眼視差を付して、オクルージョン要因を完
全に排した条件で行われた。図 (c) は誘導図
形要素が両眼立体視表示された条件 (左図と中
央図あるいは右図と中央図でステレオグラムを
構成) で、図 (d) は誘導図形が主観的輪郭図

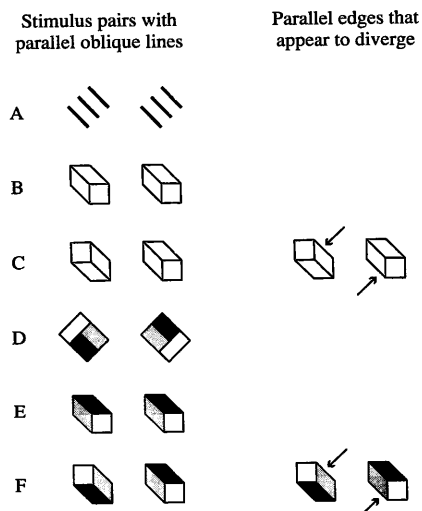


図17. 方向錯視図形。
图中、CとFの矢印で示した線分は、実際は平行線分
であるにもかかわらず、互いに開散/輻輳するよ
うに見える。立体的に描かれた2つの箱の視かけの配置関係
からこれは生起する (Enn & Coren,1995)。

形よりも前方に立体視される条件で、もっとも主観的輪郭効果が出現したパターンである。この結果は、主観的輪郭の出現には、オクルージョン要因は必須要件ではないことを明瞭に示す。

■4.2. 絵画的奥行要因による方向錯視

図17中、CとFの矢印で示した線分は、実際は平行線分であるにもかかわらず、互いに開散/輻輳するように見える。この方向錯視は、Enn & Coren (10) によって考案されたもので、立体的に描かれた2つの箱の視かけの配置関係から生起する。錯視条件を探ってみると、(1) 線分で描かれた図形(C)では、図形間の配置関係が互いに同一の方向を向いていても方向錯視が生起するのに対して、陰影をもつ図形(F)では、方向が互いに異なる方を向いていないと錯視は生起しない、(2) 統制条件ではペアとなる図形間の距離が増大すると、ターゲットとなる平行線分間の方向の逸脱は大きくなるのに対して、この種の方向錯視図形では、逆に図形間の距離が増大すると錯視量は減少する、(3) この種の錯視図形をパースペクティブ要因で作成された3次元図形の中に埋め込むと方向錯視が強調され、とくに、1個の消失点より2個の消失点をもつ3次元図形を背景にしたときの方がより強い錯視効果が生起する、(4) 平行線分のみを3次元図形の背景の下に埋め込むと、箱状図形の構成線分である平行線分よりも強い方向錯視が生じる、ことなどが見つけられた。この種の方向錯視は、絵画的要因で表現されたパターンから3次元性がどのように知覚されるかを探るための有効なテストパターンとなるかもしれない。

5. 人工現実空間

(バーチャル・リアリティ)

■5.1. 人工現実空間での眼球調節作用

人工現実空間は、両眼視差を利用してCRTデ

ィスプレイあるいはヘッド・マウント・ディスプレイ(HMD)などの2次元画像提示装置に人工的に3次元空間を提示するために、人間の視覚機能とくに眼球調節機能に多くの負荷をかける。crtに提示した視対象を両眼視差を変えることによってその奥行位置を変化させ、それを液晶シャッター式ステレオスコープを通して観察、このときの眼球調節作用の変化をオプトメータで測定した研究(Miyao, et al. (28))によれば、(1) 人工現実空間での眼球調節作用には個人差があり、ある者は自然空間で示されるより人工現実空間の方が、より大きな眼球調節の変化を示す、(2) バーチャルに提示された視対象に対する眼球調節は、常に、実際よりも観察者に近い位置に調節される傾向をもつ、(3) 奥行方向に移動するバーチャルな視対象の遠近判断課題を持続的に与えると(30分間)、眼精疲労が増大し、その結果、眼球調節が適切に働かなくなる、ことなどが示されている。

ステレオグラム立体視での両眼輻輳と眼球調節の不一致問題については、ステレオグラム面を一定時間注視(10分間)する課題の前後で、眼球調節の収縮あるいは拡大までの反応時間をみることによっても検討された(Cho, A. et al. (5))。それによれば、ステレオグラム面までの観察距離が短いときには(40cm)には、遠方に焦点調節するまでの反応時間がステレオグラム立体視後では多くなり、逆に観察距離が長いとき(300cm)には近方に焦点調節するまでの反応時間が有意に長くなり、この中間の観察距離(100cm)では、ステレオグラム立体視の前と後では反応時間に差が示されないことが示された。このことから、ステレオグラム立体視では、眼球調節は暗視条件におかれたときにとられる状態(dark focus)にセットされていると推定されている。

両眼視差を用いてバーチャルな3次元対象を提示するとき、交差視差で提示すると視対象はディスプレイの手前(フォワードイメージ)に、非交差視差で提示するとその後方(バックワ

ードイメージ)に提示される。このとき、交差視差、非交差視差とも、輻輳角は融合された視対象に位置されるが、それでは、眼球調節は融合された視対象に合わせられるのか、それともディスプレイ上になるのであろうか。この問題は、フォワードイメージ条件とバックワードイメージ条件での視えの大きさを求めることによる解決が試みられた (Iwasaki, et al. (19)). それによれば、フォワードイメージ条件でバーチャルな視対象の視えの大きさを測定すると過小視が、逆にバックワードイメージ条件では過大視が生じていた。このような結果から、輻輳は眼球調節とは不一致であると考えられる。輻輳は視対象の位置に常にあるので、眼球調節はステレオグラム上にあると推測される。もし、そうであるとすれば、フォワードイメージ条件では、眼球調節による奥行きがかりは輻輳要因による手がかりよりも視対象が遠くにあること指示し、バックワードイメージ条件では、それらの関係は逆を指示するので、結果として過小視と過大視がそれぞれ生起すると予測される。

■5.2. ヘッド・マウント・ディスプレイ (HMD) 使用前後の眼筋機能の比較

HMDをディスプレイとして使用すると、観察者の眼筋機能への負荷が高いと思われる。そこで、HMDの使用前後の眼筋機能が測定された (Hasebe, et al. (14)). 観察者には、HMDに提示されたバーチャルな細長いバーが奥行き方向に移動するのを追従させる課題 (25分間) を課して、眼筋機能への負荷を与える。この課題の前後に、眼筋機能の測定を行った。その結果、(1) AC/A比 (Accommodative convergence/Accommodation) と立体視力 (Titmus検査とTNO検査で測定) については、HMD使用前後で差はない、(2) 屈折についてはHMD使用前後で若干の差が生じる、(3) 輻輳運動については (magnetic searchcoil methodで測定)、HMD使用前後で異常がみられるが、それは病理的範囲に入るほどのものではない、ことなどが明らかにされてい

る。

同様にステレオスコピックな映像 (ドラマ) をハイビジョン・ディスプレイに提示し、液晶シャッター式ステレオスコープで視聴させた前後の眼筋機能が測定され、比較された (Oohira & Ochiai (31)). 視聴時間は24分間、また眼筋機能については、視力、屈折、輻輳運動、融合振幅、AC/C比、立体視力、眼球調節、瞳孔反応が測定された。その結果、ステレオスコピックな映像の視聴の前と後では眼筋機能に有意な差は示されなかったが、ただ、高齢 (63歳と69歳) な視聴者では輻輳振幅、AC/C比、立体視力で変化が生じた。これらの結果は、ステレオスコピックな映像の視聴をする際には、高齢者にとっては注意が必要なことを示す。

■5.3. パーチャルな視対象への手指によるポインティング

観察者がバーチャルに提示された対象を手指でどの程度正確につかまえることができるかについてしらべられた (Inoue, et al. (18)). 骨格立方体をバーチャルな対象として提示し、観察者には2本の指で立方体の2つの頂点をポインティング (このようにすると、立方体の各辺の視えの大きさも求められる) することを求めた。観察者からバーチャルな視対象までの距離 (Sd) は次式で求めた。

$$Sd = 1 / [1 + (\text{Interocular distance}) / (\text{Distance between images})] \times (\text{viewing distance})$$

観察者に液晶シャッター式ステレオスコープを通して観察させ、ポインティングさせた結果、(1) バーチャルな視対象は、奥行きについて過小視されること、(2) バーチャルな視対象の形状も歪んで知覚されていること、(3) ポインティングと形状の知覚の両方で学習効果があり、それらの正確度が増大すること、などが示された。これらのことから、バーチャルな視対象の形状を正確に知覚し、またその奥行き位置を誤りなくポインティングするには、相当の訓練が必要である。

■5.4. 健常眼者と斜視者のHMDディスプレイでのステレオ視

健常眼者と斜視者のステレオ視が、HMD型ディスプレイで比較、検討された (Komachi et al. (21)). 提示された立体刺激は、熟知された対象 (人間の顔)、非熟知の対象 (絡まったロープ) で、正常な両眼視差条件、それとは逆の両眼視差条件 (凹凸が反対) および単眼視条件の下で試された。また、このほかに両眼視条件下で輪通しテストも試行された。その結果、健常者にあつては、逆視差条件でも熟知された対象は、凹凸が反対に、たとえば、顔の中の鼻が凹に知覚されることはないこと、一方非熟知対象については、逆視差条件では凹凸の混乱が生じること、さらに逆視差条件での輪通しも困難なことが示された。これに対して斜視者では、逆視差条件でも知覚に変化がなく、したがって両眼立体視機能が抑制され、基本的には単眼視機能しか働かず、健常者よりも陰影、大きさ、テクスチャなどの手がかりで立体視を補完していることが示された。

■5.5. 流動する両眼視差パターン、および拡張と伸縮のパターン条件下での自己運動 (vection) の知覚

流動する刺激パターン事態では、自己の身体

があたかも前後あるいは左右に移動あるいは運動するような錯覚が生じる。光学的な流動パターン、とくにモーション・パースペクティブや刺激の大きさの拡張と伸縮は、強くこのような自己運動を誘導する。Palmisano (33) は、ステレオ・モーション (両眼立体視させた事態で、奥行方向に刺激パターンを流動させる) がどの程度に自己運動を誘導するかをしらべた。刺激は、図18に示されたパターンで、パターン全体が視差を変化させることによって奥行方向に運動し、観察者は前あるいは後方への自己運動が知覚されたら報告する。それによると、統制条件である単眼視による流動パターン条件、あるいは両眼視でも視差の付加されない流動条件に比較して、ステレオ・モーション条件は自己運動をより強く誘導することが示された。

6. その他の3次元視研究

■6.1 水平距離と垂直距離の知覚

前額平行におかれた水平線分と垂直線分を観察するとき、網膜の垂直方向と水平方向の長さが等しければ、垂直方向の方が水平方向より長く見える。これは、水平-垂直錯視として知られている。Higashiyama (16) は、この錯視と網膜像との関係を観察者の体位を変えて操作し検討を試みた。観察者の体位と視野については、

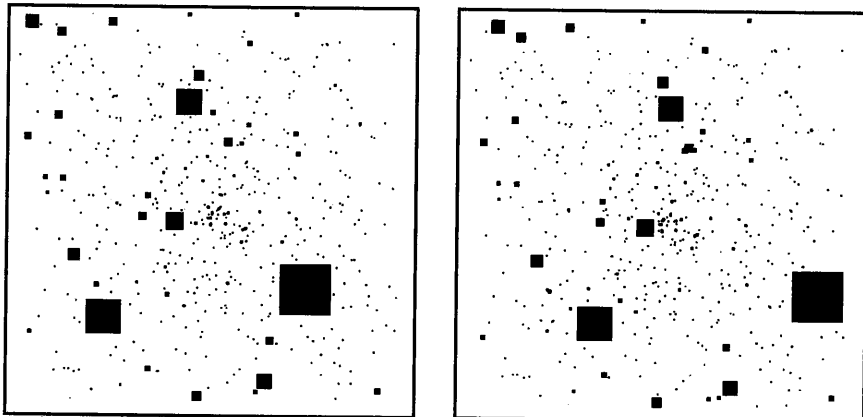


図18. 自己運動を誘導するステレオグラム (Palmisano, S. 1996)

(1) 身体直立, 視野正立, (2) 身体横臥, 視野正立, (3) 身体正立, 視野横転, (4) 身体横臥, 視野横転, (5) 身体正立, 視野逆転の5条件とし, また水平距離と垂直距離は, 3階建てのビルの壁面を利用して5,10,15mの3段階に設定した。水平と垂直それぞれの視えの距離は, 観察者とビルの壁面までの距離がそれらと等距離となるように調整させる方法で求められた。その結果, 水平距離より垂直距離が視かけの上で長く見えたのは, 条件(1)のみであった。このことから, 水平-垂直錯視は, 身体要因, 視野の枠組み要因, 重力要因と連関して生起し, これら3要素が一致した条件で最大の効果が生じ, 逆にこれらの要因のうち, 2要因が不一致条件では錯視効果は減じ, さらに3要因が不一致条件では錯視は生起しないと考えられる。

■6.2. 世界が3次元であることを, ある日, 突然, 認識した者についてのケーススタディ

Mikulas (27)によれば, Bobは45歳になったとき, 突然, 世界が3次元であることに気がついたと言う。彼は, それまで, どのようにしても, ものの奥行や立体を知覚できなかった。そのため, キャッチボールはできないし, また, 段差を知覚し飛び下りることもできなかった。ところが, ある日, ノースカロリナの山々を, マリファナを吸いながら, ぼんやりみていたら, 大小の山々が連なる広大な景観を突然知覚したと言う。このあと, 3次元知覚は生起したりしなかったりしたが, 1年後には3次元知覚は常態となったという。5年後, RDSを試したところ, はじめは立体視ができなかったが, これもある日, 突然, 見えるようになったという。このケースでは, 両眼視差をはじめ, 運動視差, 両眼輻湊, 眼球調節などの奥行手がかりは機能できる状態にあったが, それが知覚の統合過程で利用されていなかったものといえよう。稀なケースであるだけに, 詳細な研究が望まれる。

■6.3. 十分な奥行手がかり条件と縮減手がかり

り条件での奥行絶対距離知覚

十分な奥行手がかり条件と縮減手がかり条件での奥行絶対距離知覚が, Philbeck & Loomis (35)によって実験的に検討された。十分な奥行手がかり条件としては, 眼球調節, 両眼輻湊, 両眼視差, 運動視差, パースペクティブ, 陰影, テクスチャ勾配および俯角要因が与えられ, 縮減手がかり条件では, 眼球調節, 両眼輻湊に限定された。奥行絶対距離知覚の指標としては, 言語による報告と歩行距離測度 (locomotor pointing) が選ばれた。歩行距離測度では, ある距離におかれた対象を注視した後, 閉眼して対象まで歩行することによって絶対距離を求められる。廊下空間で奥行絶対距離を79-500cmの間で変化して実験した結果, 手がかり縮減条件下では近距離を過大視, 遠距離を過小視すること, 奥行絶対距離の手がかりとしては両眼視差, 運動視差と俯角要因が効果をもつこと, さらに言語報告指標と歩行距離指標とは高い相関を示すことなどが明らかにされた。

■6.4. 視覚と触覚による大きさ知覚

視覚と触覚 (haptic) による大きさ知覚の相違が分析された (Garrett, et al. (11)). 刺激は, 様々な奥行位置 (8-27m) に提示された間隙 (2つの短い柱で構成し, 3種類の大きさを設定) で, 観察者はそれを視覚と触覚 (眼では見えないようにしてステッキ状のプロープで探らせる) で知覚し, その大きさを2つの直角柱の間隙を調整して再生する。その結果, 物理的大きさ変化に対する知覚された大きさ関係は, 視覚と触覚でともに同一の変化を示すことが明らかにされた。

7. おわりに

バーチャル・リアリティは, 人間の3次元視のしくみを利用した技術で, 産業, 教育, 医療, 福祉, 娯楽分野で普及しようとしている。視覚心理学的にこの技術を考察すると, (1) バーチ

ャル・リアリティ技術で再現された人工現実空間の視覚特性と自然空間のそれとの間の類似度が明確ではないこと、(2) 2次元画像から3次元世界を構築するので、輻輳作用と眼球調節作用との間に不一致が生じること、(3) 長時間にわたって持続観察したときの眼精疲労などの程度が不確定なこと、(4) 現実と人工現実との混同からくる心理発達上の問題が不明であることなどの問題が解決されていない。人工現実空間での眼球調節と輻輳作用の不一致を検討した研究 (Miyao, et al. (7)), HMDを使用したときの眼筋機能を分析した研究 (Hasebe, et al (14)), あるいは人工現実空間で生起すると考えられる観察者の自己運動をしらべた研究 (Palmisano (33)) などは、バーチャル・リアリティで構築された人工現実空間での視覚心理学的問題を扱ったもので注目される。

心理学における3次元視研究の関心は、RDSにおける両眼視差検出の対応問題から、奥行手がかりを用いての形状復元の問題、および奥行手がかりの統合問題に移っている。奥行手がかりは、基本的には、対象の3次元形状を知覚させるために働くが、視覚システムは複数の奥行手がかりを統合して処理し、ひとつの矛盾しない対象を再現する。対象の形状の再現には、対象の形状、大きさ、奥行などが正確に復元されて知覚されねばならない。これまで、形状復元については、3種類の主要な奥行手がかりが取り上げられ、両眼視差からの形状復元、運動視差からの形状復元、そしてステレオキネティックからの形状復元というテーマのもとで検討されてきた。今回、報告したように、この3種類の形状復元を、限定した条件ではあるが、比較した研究 (Durgin, et al. (9)) は、3次元視の処理過程を統合的に考察する上で示唆的である。

この問題は、結局は、複数の奥行手がかりが、どのように関連し、統合されるかの問題でもある。これについてはモジュラー理論が有力であり、両眼視差、運動視差、運動、陰影、テクス

チュアなどからの形状復元についてこれまで知られてきた。この理論では、形状復元が2つの要因からの統合として行われる場合、たとえば両眼視差とテクスチュア、両眼視差と陰影、両眼視差と運動からの形状復元の場合、理論的には、それぞれの要因からの形状復元は、それぞれの要因を処理するプロセスで独立して処理され、その結果の加算的総和で最終的な形状復元が決定される。これに対して、もし、2つの要因からの形状復元が、それぞれ単独での形状復元より正確に行われ、両要因の処理過程で何らかの相互作用があるとすれば、それはひとつの要因での形状復元が他の要因からの形状復元を促進する。奥行手がかりの統合問題には、このように、手がかりがそれぞれモジュラー処理されているのか、それらのモジュール間での相互作用はあるのか、さらに統合は加算的総和、重み付け総和、あるいはそのほかの形式の統合が行われているのかなどの問題を内包する。

今回、特筆される報告 (Mikuras (27)) は、中年 (45歳) になるまで奥行や立体感を欠く2次元知覚能力しかもてなかった中年の男性が、ある日、突然、ほんやりと遠くの山々を眺めていたときに3次元視能力を回復したとの事例である。2次元的にしか世界を知覚できないという状態を想像しにくい、さらに3次元知覚が、突然、生じたのも理解がしにくい。多分、変化が生じたのは、視知覚の処理過程ではなく、認知の過程と推定されるが、それにしても不思議な事例といえよう。

心理学における3次元視研究は、バーチャル・リアリティ関連の研究と奥行手がかりの統合の問題を中心にこれから展開されると考えられる。

文献

- (1) Anderson, B.L. & Julesz, B. 1995 A theoretical analysis of illusory contour formation in stereopsis. *Psychological Review*, 102, 705-

- 743.
- (2) Birch, E. & Petrig, B. 1996 FPL and VEP measures of fusion, stereopsis and stereoacuity in normal infants. *Vision Research*, 36, 1321-1327.
 - (3) Bradshaw, M.F., Glennerster, A. & Rogers, B.J. 1996 The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues. *Vision Research*, 36, 1255-1264.
 - (4) Bradshaw, M.F., Rogers, B.J. & Bruyn, B.D. 1995 Perceptual latency and complex random-dot stereogram. *Perception*, 24, 749-759.
 - (5) Cho, A., Iwasaki, T. & Noro, K. 1996 A study on characteristics of binocular 3-D images. *Ergonomics*, 39, 1285-1293.
 - (6) Crawford, M.L.J., Harweth, R.S. & Smith, E.L. & von Noorden, G.K. 1996 Loss of stereopsis in monkeys following prismatic binocular dissociation during infancy. *Behavioural Brain Research*, 79, 207-218.
 - (7) Crawford, M.L.J., Noorden, G.K. von, Harweth, R.S. & Smith III, E.L. 1996 Judgments by monkeys of apparent depth in dynamic random-dot stereograms. *Behavioural Brain Research*, 79, 219-225.
 - (8) Crawford, M.L.J., Pesch, T.W. & Noorden, G.K. von 1996 Excitatory binocular neurons are lost following prismatic binocular dissociation in infant monkeys. *Behavioural Brain Research*, 79, 227-232.
 - (9) Durgin, F.H., Proffitt, D.R., Reinke, K.S. & Olson, T.J. 1995 Comparing depth from motion with depth from binocular disparity. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, 21, 679-699.
 - (10) Enns, J. & Coren, S. 1995 The box alignment illusion: An orientation illusion induced by pictorial depth. *Perception & Psychophysics*, 57, 1163-1174.
 - (11) Garrett, S., Barac-Cikoja, D., Carello, C. & Turvey, M.T. 1996 A parallel between visual and haptic perception of size at a distance. *Ecological Psychology*, 8, 25-42.
 - (12) Gillam, B., Blackburn, S. & Cook, M. 1995 Panum's limiting case: double fusion, convergence error, or "da Vinci stereopsis". *Perception*, 24, 333-346.
 - (13) Harweth, R.S., Smith III, E.L. & Siderov, J. 1995 Behavioural studies of local stereopsis and disparity vergence in monkeys. *Vision Research*, 35, 1755-1770.
 - (14) Hasebe, H., Oyamada, H., Ukai, K. & Toda, H. 1996 Changes in oculomotor functions before and after loading of a 3-D Visually-guided task by using a head-mounted display. *Ergonomics*, 39, 1330-1343.
 - (15) Hess, R.F. & Field, D.J. 1995 Contour integration across depth. *Vision Research*, 35, 1699-1711.
 - (16) Higashiyama, A. 1996 Horizontal and vertical distance perception. *Perception & Psychophysics*, 58, 259-270.
 - (17) Ichikawa, M. & Saida, S. 1996 How is motion disparity integrated with binocular disparity in depth perception. *Perception & Psychophysics*, 58, 271-282.
 - (18) Inoue, K., Kawai, T. & Noro, K. 1996 Performance of 3-D digitizing in stereoscopic images. *Ergonomics*, 39, 1357-1363.
 - (19) Iwasaki, T., Akiya, S., Inoue, T. & Noro, K. 1996 Surmised state of accommodation to stereoscopic three-dimensional images with binocular disparity. *Ergonomics*, 39, 1268-1272.
 - (20) King, S.M., Frey, S., Villemure, J., Ptito, A. & Azzopardi, P. 1996 Perception of motion-in-depth in patients with partial or complete cerebral hemispherectomy. *Behavioural Brain Research*, 79, 169-180.
 - (21) Komachi, Y., Miyazaki, K., Murata, T., Nagata, S. & Kani, K. 1996 Stereopsis with normal and reversed binocular parallax using a head mounted display in normal and strabismic subject. *Ergonomics*, 39, 1321-1329.
 - (22) Kumar, T. 1996 Multiple matching of features in simple stereograms. *Vision Research*, 36, 675-698.
 - (23) Landers, D.D., Cormack, L.K. 1997 Asymmetries and errors in perception of depth from disparity suggest a multicomponent model of disparity processing. *Perception & Psychophysics*, 59, 219-231.
 - (24) Lankheet, M.J.M. & Lennie, P. 1996 Spatio-temporal requirements for binocular correlation in stereopsis. *Vision Research*, 36, 527-538.
 - (25) Masini, R., Ferraro, M. & Costa, T. 1994 Stereokinetic effects with sharp and fuzzy

- illusory contours. *Perception*,23,1437-1445.
- (26) Meese,T.S.,Harris,M.G. & Freeman,T.C.A. 1995 Speed gradients and the perception of surface slant:analysis is two-dimensional not one-dimensional. *Vision Research*,35,2879-2888.
- (27) Mikulas,W.L. 1996 Sudden onset of subjective dimensionality:A case study. *Perceptual & Motor Skills*,82,852-854.
- (28) Miyao,M.,Ishihara,S.,Saito,S. & Kondo,T. 1996 Visual accommodation and subject performance during a stereographic object task using liquid crystal shutters. *Ergonomics*, 39,1294-1309.
- (29) Nagata,S.1966 The binocular fusion of human stereoscopic displays-fields of view and environment effects. *Ergonomics*,39,1273-1284.
- (30) Norman,J.F. & Todd,J.T. 1995 The perception of 3-D structure from contradictory optical patterns. *Perception & Psychophysics*, 57,826-834.
- (31) Oohira,A. & Ochiai,M. 1996 Influence on visual function by a TV programme with binocular liquid crystal shutter and Hi-Vision display. *Ergonomics*,39,1310-1314.
- (32) O'Toole,A.J. & Walker,C. 1997 On the preattentive accessibility of stereoscopic disparity: Evidence from visual search. *Perception & Psychophysics*,59,202-218.
- (33) Palmisano,S. 1996 Perceiving self-motion in depth: The role of stereoscopic motion and changing-size cues. *Perception & Psychophysics*, 58,1168-1176.
- (34) Patterson,R. & Day,P. 1995 Temporal integration differences between crossed and uncrossed stereoscopic mechanisms. *Perception & Psychophysics*,57,891-897.
- (35) Philbeck,J.W. & Loomis,J.M. 1997 Comparison of two indicators of perceived egocentric distance under full-cue and reduced-cue conditions. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, 23,72-85.
- (36) Purghe,F.1995 Illusory figures from stereoscopically three-dimensional inducers depicting no occlusion event. *Perception*,24,905-918.
- (37) Smallmann,H.S.1995 Fine-to-coarse scalar disambiguation in stereopsis. *Vision Research*, 35,1047-1060.
- (38) Tittle,J.S.,Todd,J.T.,Perotti,V.J. & Norman,J.F. 1995 Systematic distortion of perceived three-dimensional structure from motion and binocular stereopsis. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*,21,663-678.
- (39) Tittle,J.S.,Perotti,V.J. & Norman,J.F. 1997 Integration of binocular stereopsis and structure from motion in the discrimination of noisy surfaces. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, 23,1035-1049.
- (40) Trotter,Y.1995 Cortical representation of visual three-dimensional space. *Perception*,24,287-298.
- (41) van Veen,H.A.H.C. & Werkhoven,P. 1996 Metamerisms in structure-from-motion perception. *Vision Research*,36,2197-2210.

参考文献

- Baird,J.C. & Biersdorf,W.R. 1967 Quantitative functions for size and distance judgments. *Perception & Psychophysics*,2,161-166.
- Beghi,L.,Xausa,E. & Zanforlin,M. 1991 Analytic determination of the depth effects in stereokinetic phenomena without a rigidity assumption.. *Biological Cybernetics*,65,425-432.
- Bradshaw,M. & Rogers,B.J. 1993 Subthreshold interactions between binocular disparity and motion parallax. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*,33,1332.
- Braunstein,M.L.,Andersen,G.J.,Rouse,M.W. & Tittle,J.S. 1986 Recovering viewer-centered depth from disparity,occlusion, and velocity gradients. *Perception & Psychophysics*, 40,216-224.
- Bruno,N. & Cutting,J.E. 1988 Minimodularity and the perception of layout. *Journal of Experimental Psychology, General*,117,161-170.
- Buckley,D. & Frisby,J.P. 1993 The integration of stereo texture and outline cues in the shape of three dimensional ridges. *Vision Research*, 7,919-933.
- Bulthoff,H.H. & Mallot,H. 1988 Integration of

- depth modules: Stereo and shading. *Journal of the Optical Society of America A*, 5, 1749-1758.
- Cornilleau-Peres, V. & Droulez, J. 1993 Stereo-motion cooperation and the use of motion disparity in the visual perception of 3-D structure. *Perception & Psychophysics*, 54, 223-239.
- Crawford, M.L.J., Smith, E.L., Harweth, R.S. & von Noorden, G.K. 1984 Stereoblind monkeys have few binocular cortical neurons. *Investigative Ophthalmology of Vision Science*, 25, 779-781.
- Crawford, M.L.J., Pesch, T.W., von Noorden, G.K., Harweth, R.S. & Smith, E.L. 1991 Bilateral form deprivation in monkeys: Electrophysiologic and anatomic consequences. *Investigative Ophthalmology of Vision Science*, 32, 2328-2336.
- Doshier, B., Sperling, G. & Wurst, S. 1986 Trade-offs between stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure. *Vision Research*, 26, 973-990.
- Field, D., Hayes, A. & Hess, R.F. 1993 Contour integration by the human visual system; evidence for a local "association field". *Vision Research*, 33, 173-193.
- Frisby, J.P. & Clatworthy, J.L. 1975 Learning to see complex random-dot stereograms. *Perception* 4, 173-178.
- Guzman, A. 1969 Decomposition of a visual scene into three-dimensional bodies. In A. Grasselli (Ed.) *Automatic Interpretation and Classification of Images*, New York, Academic Press.
- Howard, I.P. & Ohmi, M. 1992 A new interpretation of the role of dichoptic occlusion in stereopsis. *Investigative Ophthalmology and Visual Science, Supplement*, 33, 1370.
- Howard, I.P. & Rogers, B. 1995 *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford University Press.
- Johnston, E.B. 1991 Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, 31, 1351-1360.
- Johnston, E.B., Cumming, B.G. & Parker, A.J. 1993 Integration of depth modules: Stereopsis and texture. *Vision Research*, 33, 813-826.
- Johnston, E.B., Cumming, B.G. & Landy, M.S. 1994 Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, 34, 2259-2275.
- Julesz, B. 1971 *Foundations of Cyclopean Perception*. Chicago, University of Chicago Press.
- Julesz, B. & Miller, J.E. 1975 Independent spatial-frequency-tuned channels in binocular fusion and rivalry. *Perception*, 4, 125-143.
- Kaufman, L. 1976 On stereopsis with double image. *Psychologia*, 19, 224-233.
- Lamdy, M.S., Maloney, L.T., Johnstone, E.B. & Young, M. 1995 Measurement and modeling of depth cue combination: In defense weak fusion. *Vision Research*, 35, 389-412.
- Liter, J.C., Braunstein, M.L. & Hoffman, D.D. 1993 Inferring structure from motion in two-view and multi-view displays. *Perception*, 22, 1441-1465.
- Loomis, J.M., Da Silva, J.A., Fujita, N. & Fukusima, S.S. 1992 Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, 18, 906-921.
- Mayhew, J.E. & Frisby, J.P. 1976 Rivalrous texture stereogram. *Nature*, 264, 53-56.
- Nawrot, M. & Blake, R. 1991 The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 49, 230-244.
- Nawrot, M. & Blake, R. 1993 On the perceptual identity of dynamic stereopsis and kinetic depth. *Vision Research*, 33, 1561-1571.
- Norman, J.F. & Lappin, J.S. 1992 The detection of surfaces defined by optical motion. *Perception & Psychophysics*, 51, 386-396.
- Norman, J.F. & Todd, J.T. 1993 The perceptual analysis of structure from motion for rotating objects undergoing affine stretching transformation. *Perception & Psychophysics*, 3, 279-291.
- Ono, H., Rogers, B.J., Ohmi, M. & Ono, M.E. 1988 Dynamic occlusion and motion parallax in depth perception. *Perception*, 17, 255-266.
- Ono, H., Shimono, K. & Shibuta, K. 1992 Occlusion as a depth cue in the Wheatstone-Panum limiting case. *Perception & Psychophysics*, 51, 3-13.
- Proffitt, D., Hecht, H. & Shubert, J. 1992 Stereokinetic effects and its relation to the kinetic depth effect. *Journal of Experimental Psy-*

- chology: Human Perception and Performance* 18,3-21.
- Purghe, F. 1993 Illusory contour from pictorially three-dimensional inducing elements; counter-evidence for Parks and Rock's example. *Perception*, 22, 809-818.
- Ramachandran, V.S. 1976 Learning-like phenomena in stereopsis. *Nature* (London), 262, 382-383.
- Richards, W. 1970 Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10, 380.
- Richards, W. 1971 Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 410-414.
- Rock, I. & Anson, R. 1979 Illusory contour as the solution to a problem. *Perception*, 8, 665-681.
- Rogers, B.J. & Bradshaw, M.F. 1992 Differential perspective effects in binocular stereopsis and motion parallax. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 34, 1333.
- Rogers, B.J. & Collett, T.S. 1989 The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41A, 697-717.
- Rohaly, A.M. & Wilson, H.R. 1993 The nature of coarse-fine constraints on binocular fusion. *Journal of the Optical Society of America*, A, 10, 2433-2441.
- Schor, C.M. & Wood, L. 1983 Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency. *Vision Research*, 23, 1649-1654.
- Tittle, J.S. & Braunstein, M.L. 1993 Recovery of 3-D shape from binocular disparity and structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 54, 157-169.
- Tittle, J.S., Perotti, V.J. & Norman, J.F. 1997 Integration of binocular stereopsis and structure from motion in the discrimination of noisy surfaces. *Journal of Experimental Psychology, Human Perception & Performance*, 23, 1035-1049.
- Todd, J.T. & Bressan, P. 1990 The perception of 3-dimensional affine structure from minimal apparent motion sequences. *Perception & Psychophysics*, 48, 419-430.
- Wilson, H.R., Blake, R. & Halpern, D.L. 1991 Coarse spatial scales constrain the range of binocular fusion on fine scales. *Journal of the Optical Society of America*, A, 8, 229-236.
- Yang, Y. & Blake, R. 1991 A spatial frequency tuning of human stereopsis. *Vision Research*, 31, 1177-1189.
- Wagner, M. 1985 The metric of visual space. *Perception & Psychophysics*, 38, 483-495.
- Wallach, H. & Centrella, N. 1990 Identity imposition and its role in a stereokinetic effect. *Perception & Psychophysics*, 48, 535-542.
- Zanforlin, M. & Vallortigara, G. 1988 Depth effects from a rotating line of constant length. *Perception*, 17, 493-499.
- Zanforlin, M. & Vallortigara, G. 1988 Depth effect from a rotating line of constant length. *Perception & Psychophysics*, 44, 493-499.