

心理学における 3 次元視研究の動向 —2003—

3-Dimensional Perception: 2003 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 2003 年の動向を、両眼立体視、運動要因による 3 次元視、絵画的要因による 3 次元視、奥行距離知覚に分類して報告した。

Abstract: The papers of 3-dimensional visual perception in 2003 were reviewed in the fields of stereoscopic vision, depth from motion cue, pictorial cues and virtual reality.

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 2002 年版から抽出し、両眼立体視、運動要因による 3 次元視、絵画的要因による 3 次元視、奥行距離の知覚に分類して紹介した。

2. 両眼立体視

2.1. 両眼立体視閾と空間周波数帯域

初期の視覚処理過程は空間周波数特性をもつニューロンから構成、両眼立体視処理過程にも存在する。しかし、両眼立体視処理過程での空間周波数チャンネルの役割については、いくつかの問題がある。位置視差を検出する受容野について初期に提案されたモデルでは、受容野の大きさは特別な役割を与えられていないが、視差が位置視差ではなくフェーズ視差によってコード化されるとするモデルでは、個々のニューロンの空間的特性が固有の役割を持ち、高空間周波数に選択的なニューロンは高密な視差に対応し、低空間周波数に選択的なそれは粗い視差に対応する (size-disparity correlation 仮説) とされる。この仮説を実証するために、空間周

波数を変化させ、それぞれの周波数での両眼立体視の下限閾 (D_{\min}) と上限閾 (D_{\max}) とが測定され、その結果、空間周波数が 2.4 c/deg 以下の場合には、 D_{\min} は空間周波数に依存して変化するのに対して、 D_{\max} は空間周波数が変化しても一定となることを見いだされた (Schor & Wood 1983)。この結果は、空間周波数チャンネルが空間周波数 2.4 c/deg 以下の場合に両眼立体視の処理過程と関係を持つことを意味する。そこで、Hess et al. (15) は、図 1 に示されたようなステレオグラムを作成し、 D_{\min} と D_{\max} を測定した。ステレオグラムは、フィルターをかけないもの、低域濾過したもの、高域濾過したもの、帯域濾過したものの 4 種類が作成され、これらを両眼立体視すると中央付近に円盤が浮きでて見える。 D_{\min} と D_{\max} は、円盤が手前にあるか、後方にあるかを判断させて測定された。

その結果、低域濾過条件の場合の D_{\min} は、濾過後にそのステレオグラムに含まれる最大の高空間周波数に依存して小さくなるが、高域濾過条件のそれは、低域空間周波数に依存しては変化しないことが示された。一方、 D_{\max} は低域濾過条件では変化しないが、高域濾過条件では空間周波数に依存して小さくなること、さらに D_{\max} は出現させるイメージの大きさに依存して変化した。これらの結果から、 D_{\min} と D_{\max} はそ

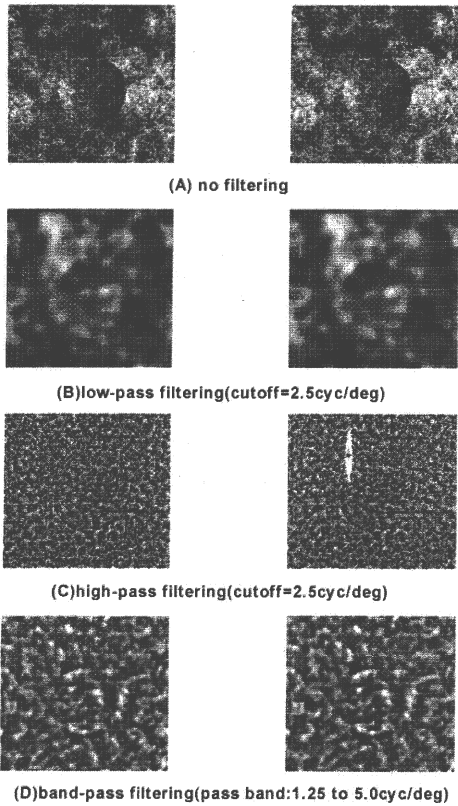


図 1

フィルター濾過しないステレオグラム (A), 低域濾過したステレオグラム (B), 高域濾過したステレオグラム (C), 帯域濾過したステレオグラム (D) の4種類のステレオグラムで、これらを両眼立体視すると中央付近に円盤が浮きでて見える (Hess, et al., 2002).

それぞれ異なった処理過程に担われていると考えられる。

2.2. 対応問題

Petrov⁽²³⁾ は、図2に示されたような対応問題を実験的に検討した。曖昧な対応をもつ1対の刺激がステレオグラムの中央に横並びで提示され、それを上下に挟むように刺激対が同一の奥行距離に提示される。このようなステレオグラムを両眼立体視すると、中央の点が上下の2つの点と垂直方向に同一の奥行距離をとって並んで見えるか、あるいは中央の点が奥行位置をはずれて見えるかする。すなわち、左右網膜像の2

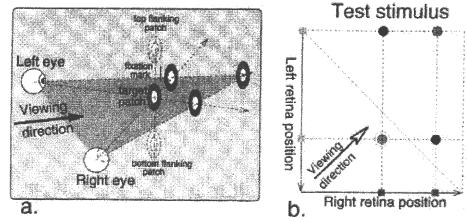


図 2

曖昧な対応をもつ1対の刺激がステレオグラムの中央に横並びで提示され、それを上下に挟むように刺激対が同一の奥行距離に提示される (a). 左右網膜像の2点の対応を考えると、左網膜像の右位置にある点と右網膜像の右位置にある点、左網膜像の左位置にある点と右網膜像の左位置にある点とがそれぞれ対応する場合 (Long Disparity Match, LMG, 灰色丸で表示) と、左網膜像の右位置にある点と右網膜像の左位置にある点、左網膜像の左位置にある点と右網膜像の右位置にある点とがそれぞれ対応する場合 (Short Disparity Match, SMG, 黒丸で表示) とがある (b) (Petrov, 2002).

点の対応を考えると、左網膜像の右位置にある点と右網膜像の右位置にある点、左網膜像の左位置にある点と右網膜像の左位置にある点とがそれぞれ対応する場合 (Long Disparity Match, LMG) と、左網膜像の右位置にある点と右網膜像の左位置にある点、左網膜像の左位置にある点と右網膜像の右位置にある点とがそれぞれ対応する場合 (Short Disparity Match, SMG) とがあり、前者の対応を持つ場合に上下に3点が同一奥行距離に定位して見える。実験は、上下の点と中央のターゲット間の距離およびターゲットの大きさを変え、どのような対応が得られるかについて検討された。

その結果、上下の点と中央のターゲットとの間の距離が小さいときにはLDG対応が生じ、その間の距離が拡大するにつれてSDGに移行した。これらの結果は、あいまいな視差対応点がある場合の視差対応は、視差を構成する刺激要素の形状性 (形状の文脈効果) によって対応点が捕捉 (Capture) され決定される場合があることを示唆する。

2.3. 両眼立体視におけるトランジェントとサステインド型

両眼立体視にはトランジェント型とサステインド型とがある。サステインド型のステレオグラムは、通常の立体視でパヌムの融合範囲内で立体視が可能であり、また左右の網膜像の方向、空間周波数、明るさコントラストが等しくなければ立体視は生じない。一方トランジェント型の立体視では、2重像となるステレオグラムでも、短時間提示すると、一時的に立体視が可能であり、左右の網膜像の方向、空間周波数、明るさコントラストが異なっても融合でき、立体視が生じる (Schor, et al. 1884, Schor & Heckman 1989, Schor et al. 1998, Edwards, et al. 1999, Pope et al. 1999)。そこで、Schor, et al. (28) は、左右ステレオグラムペアの刺激全体の大きさが著しく異なる場合にトランジェント型立体視が成立するかを検討した。ステレオグラムは、図3に示されたように、ガボール関数で記述された小片 (ガボール・パッチ, Gabor patch) で、ガボール関数のエンベロープの大きさ (σ) が3オクターブの範囲内で変えられる ($0.2^\circ, 0.25^\circ, 0.37^\circ, 0.6^\circ, 0.75^\circ, 1.25^\circ, 2^\circ, 2.5^\circ$) とともに、左右ステレオペアの一方のエンベロープの大きさが4種類の大きさのどれかに固定され、他のそれは4段階に変化させられた。左右ステレオペアの刺激は同方向条件、互いに直交方向の2条件、そして

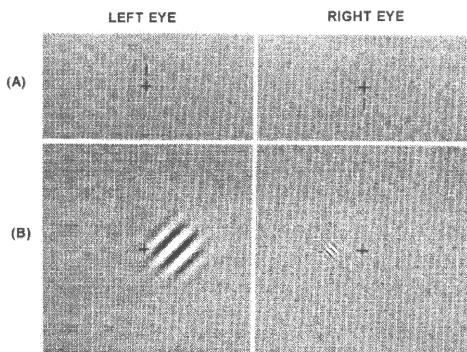


図3

ガボール関数で表示された小片 (ガボール・パッチ, Gabor patch) から構成されたステレオグラム (Schor, et al., 2001)。

視差は小さな視差と大きな視差条件 ($0.5^\circ, 5^\circ$), さらに左右ステレオペア間のコントラスト比を操作した条件とが設定された。左右ステレオペア間のコントラスト比は、片方のコントラスト (パターンは $\sigma=0.25^\circ$ のガボールで表示) を100%に固定し、他方 (パターンは $\sigma=1.5^\circ, 2.0^\circ$ あるいは 2.5° で表示) のそれは20%から100%まで5段階に変化させられた。トランジェント型立体視では、刺激提示時間は140 msで、サステインド型立体視でのそれは7sである。実験では、観察者はステレオグラムを両眼立体視し、交差あるいは非交差で提示された刺激パターンが手前に見えるか、あるいは後方に見えるかの判断が求められた。

実験の結果、(1) 小さな視差条件の場合には、トランジェント型とサステインド型立体視とも、左右ステレオペアの刺激のエンベロープの大きさの差が2オクターブの範囲内ならば立体視が成立すること、(2) 左右ステレオペアの刺激の方向が互いに直交する場合、サステインド型立体視では刺激のエンベロープが大きくなるに伴い、立体視の成立は減じること、(3) 大きな視差の視差条件の場合、トランジェント型立体視では、左右ステレオペアの刺激のエンベロープの大きさの差が3オクターブになっても立体視が成立すること、(4) 左右ステレオペア間のコントラスト比を変えた場合、トランジェント型立体視では、パターンのガボール帯幅 (σ) が大きくなるほどコントラストの差が5%から10%まで小さくしたときに立体視の成立が顕著に高まること、などが明らかにされた。これらの結果から、ガボールパターンにおけるエンベロープに対しての視覚システムの同調は、それ自体は広範囲な帯幅に同調するものの、ステレオペア間の空間周波数の違い、パターンの方向の違い、コントラストの違いほどは立体視成立のためには大きくはないこと、したがって、トランジェント型立体視ではガボールパターンのエンベロープの大きさが、ステレオペアの対応問題解決の初期過程では重要な役割を果たしている

ことが示唆される。ステレオグラムのガボールパターンのエンベロープの大きさとそのガボールパターンを構成する波形に関する情報は、粗い視差から細かな視差を検出する一連の過程で、ステレオペア間の対応を解決するために共に利用され、またエンベロープの大きさから抽出された2次の情報は、細かな視差対応を見つけ出すのに有効に働いていると考えられる。

2.4. 両眼視差と視差輻輳融合との関係

両眼視差と視差輻輳融合とは、同一の神経過程で処理されるのか、あるいはそれら2つの入力情報は、視差情報として最初は第1視覚野(V1)で検出され、次いで別々に処理されるのか、さらにはそれら2つの処理過程は単独で独立しているのか、などについては十分に解明されていない。もし両眼視差と視差輻輳融合とが同一の神経過程で処理されているならば、両眼視差に対する奥行弁別能力が良いものは、その視差輻輳融合能力も高く、逆に、両眼視差弁別能力が劣るものは、その視差輻輳融合能力も劣るといえる。事実、粗い視差(30分以上)に対してステレオアノマリ(両眼立体視異常)を示すもので、交差視差に対する能力を欠くものは、交差視差に対する輻輳融合も欠いていること、しかし非交差視差に対する開散融合能力は保持していることが見いだされている(Richards 1971, Johns 1977)。ステレオアノマリを示すものすべてが輻輳融合異常(バージェンスアノマリ)を示さないが、しかし輻輳融合異常を示すものはステレオアノマリを示している。各眼での網膜像が融合できない二重像の場合の輻輳融合と、両眼融合できる網膜像の場合の輻輳融合とは、基本的に、その神経処理過程が異なる。視差が小さく両眼融合が十分に可能な場合(30分以内)、輻輳融合に異常を示すものが視差にもとづく立体視が不能か否かは、いまだ不明である。そこで、Fredenburg & Harwerth⁽¹⁴⁾は、ステレオアノマリであると診断された者を被験者として、両眼視差立体視能力と視差輻輳融合能力をしら

べた。視差輻輳融合能力の測定は、両眼立体視中のステレオグラムにノニウス線を上下に提示し、上線は基準線とし、下線を右あるいは左の位置(-20, -10, 0, +10, +20)に提示し、その位置を報告させる方法(恒常法)で測定し、そのPSEが交差視差と非交差視差別に求められた。また、ステレオグラムにはガボールパッチで構成されたパターンが用いられた。

実験の結果、(1)視差が小さい場合にも、ステレオアノマリとバージェンスアノマリが存在すること、(2)ステレオアノマリ(交差視差不能あるいは非交差視差不能型)とバージェンスアノマリ(交差視差輻輳融合不能と非交差視差輻輳融合不能)との間には関連が無く、交差視差不能が交差視差輻輳融合不能とはならないこと、(3)両眼立体視が正常な者にもバージェンスアノマリが存在すること、などが見いだされた。とくに、両眼立体視が正常な者にもバージェンスアノマリが存在することは、両眼視差過程と視差輻輳融合過程とは、第1視覚野で視差に選択的なニューロンによって視差が検出された後では、それぞれ別個に独立して処理されることを示唆する。

2.5. 両眼立体視における色相対比感受メカニズムと輝度対比感受メカニズムの相互作用

輝度が等しく色相のみが異なるステレオグラムの立体視(色相立体視 chromatic stereopsis)の可否については多くの研究がなされ、その結果、色相立体視は可能であるが、立体視可能な視差は限定され、立体視力も悪く、さらに輝度対比による立体視に比較して、ランダム・ドット・ステレオグラムのように立体視が出現して初めて形状が知覚できる条件での立体視能力が劣っていることなどが、これまでの研究で明らかにされている(Kingdom & Simmons 2000)。これらの結果から、色相立体視の対応問題の解決には、まず、ステレオグラムの色相のひとつひとつにラベル付けがなされ、次いで、そのラベルが同一

のもの同士の間で対応づけがなされると考えられた。

一方、色相対比にもとづく立体視過程と輝度対比にもとづく過程とはそれぞれ独立していて、それらの過程で個々別々に検出された立体情報が、これ以降の過程で統合されて、ひとつの立体視が出現するという考え方も提起されている (Simmons & Kingdom 1997)。

そこで、これら2通りの仮説のいずれが妥当かを検証する試みが、Simmons & Kingdom⁽²⁹⁾によってなされた。ステレオグラムは0.5cpdの垂直方向の空間周波数からなるガボールパッチで、そのエンベロープの標準偏差は1°である。等輝度条件のステレオグラムでは、輝度を等しくし、色相対比は赤—緑で表示し、また等色相条件のステレオグラムでは、色相を等しくするために一色(黄色)で、輝度対比は黒で表示された。さらに、色相と輝度の複合ステレオグラムが作成され、ここでは色相対比と輝度対比が導入された。各ステレオグラムでは、左右ステレオペアの刺激属性(色相と輝度)が対応をもつもの(correlation)と、その対応が反対を示すもの(anti-correlation)とが作成された。実験では、各条件のステレオグラムが提示され、その立体視閾値が求められた。

その結果、(1) 立体視閾は色相対比あるいは輝度対比が増大するに伴って、向上すること、(2) しかし、輝度対比条件でのステレオグラムに、反対極性をもつ色相対比を加えると、立体視は妨害されること、(3) 同様に、色相対比をもつステレオグラムに反対極性を持つ輝度対比を加えると、立体視は妨害されることが見いだされた。これらの結果は、両眼視差が検出され、そして立体視が成立する前の段階で働く色相対比感受メカニズムと輝度対比感受メカニズム間に、立体視成立にとってポジティブなそしてネガティブな相互作用が存在することを支持する。

2.6. 両眼視差と運動視差の手がかりの統合

両眼視差と運動視差が共にある空間周波数をもつサイン波状の凹凸パターンを表示するとき、両眼視差が表示する周波数と運動視差が表示する周波数とが異なる場合には、それらの異なる波形の合成された凹凸パターンが知覚される (Rogers & Collett 1989, Uomori & Nishida 1994)。出現する形状は、両要因の合成で決まるが、その奥行きも加算的な合成で決まるかはいまだ不明である。そこで、サイン波状パターンの空間周波数を0.125, 0.25, 0.5, 1.0 cpdの5段階に設定し、これにもとづいて両眼視差と運動視差で提示する空間周波数パターンは、これら5種類の空間周波数をすべて組み合わせて(25通り)提示し、その際に観察される凹凸パターンと奥行きが知らべられた (Ichikawa & Saida⁽¹⁶⁾)。凹凸パターンは描画させる方法で、奥行きは別に提示した直線の長さを調整させる方法で求められた。その結果、視えの形状は、両眼視差と運動視差が提供する形状の合成となるか、あるいは運動視差要因のみで決められた。また、視えの奥行きも、両要因が提供する奥行きが増大すると、それにもなって大きくなった。これらの結果は、両眼視差と運動視差が提供する形状と奥行きは、それら両要因の加算的総和で規定されることを支持する。

2.7. 運動するドットで生起させたエッジ(kinetic edge)間の両眼視差にもとづく立体視

両眼視差にもとづく立体視は、輪郭線で構成された対象の間に水平方向の位置による視差をつけることによって生み出されるのが通常であるが、運動要因によって導入したエッジによる位置視差によっても可能になる。例えば、運動要因によって出現させた対象間に視差があれば、対象を構成するテクスチャのドットが左右のステレオペアで非対応でも立体視が出現するし (Lee 1970, Halpern 1991)、またテクスチャを構

成するドットを左右ステレオペア間で対応をとってフリッカーさせることによって視かけの図形を誘導し、その誘導した図形間に視差があれば、テクスチャ間に左右で対応が無くても立体視は出現する (Prazdny 1984) ことが明らかにされている。

Poom⁽²⁴⁾ は、新たに、対象の面のテクスチャを構成するドットの相対的運動で作り出された視かけのエッジ (kinetic edge) 間に位置視差を導入し、両眼立体視が可能になることを次のような刺激条件で示した。図4にあるように、左右のステレオ画像はドットで構成され、両眼立体視するとダイヤモンド形が中央に浮かび上がる (図4 (a))。これらの各ステレオペアの運動するドットは、ペア間で常に非対応であるが、それらのドットが一体となって回転運動する時、ドットが浮かび出るダイヤモンド形のエッジを通過する際に出現と消失を繰り返すように操作する (図4 (b))。このように運動要因で出現させる各ステレオペアでは、浮き出させるダイヤモンド形のキネティック・エッジ間の両眼視差は水平方向へのシフトを導入することによってもたすが、その内部で回転運動するドットの中心は左右同一とし、視差はゼロとする。またダイヤモンド形の内部と外部では、回転する運動方向は互いに逆方向とする (キネティック・エッジ視差, 図4 (c))。方向視差 (direction disparity) は、ダイヤモンド形の内部で回転するドットの中心を水平方向に左右でシフトすることによってもたす。この際、キネティック・エッジと外部で回転するドットの回転軸とは左右ペアで同一とし、したがって視差はゼロとする (方向視差, 図4 (d))。さらに、対応のあるフリッカー視差条件では、左右ペアで対応を持つフリッカーのエッジは浮き出るダイヤモンド形のエッジが水平方向に反復移動する際に、そのエッジの側の静止したドットを消失させることによって導入した。このようにすると、視かけ上、骨組みで構成されているが実際にはその輪郭が見えないダイヤモンドが通過すると、静

止した点は消失し、それが通過してしまうと再出現するように知覚され、その際に明瞭なダイヤモンド形が見える。この条件の視差は、ダイヤモンドの水平方向の位置視差で導入する。

実験は、立体出現するダイヤモンド形が基準として設けた斜め十字 (視差はゼロ) の前か後ろかを判断させ、その正確さを求めることによって行なわれた。その結果、キネティック・エッジ視差と対応のあるフリッカー視差条件では、正確な両眼立体視が出現したが、方向視差条件では視差が0.7度と1度の場合にのみほぼ正確な立体視が得られるにとどまった。

そこで、図4 (e, f) に示したように、テクスチャの無い領域 (ギャップ) をつくり、しかも左右のペアでテクスチャ領域と無テクスチャ領域を交互に配置したステレオグラムを作成した。また、テクスチャ領域と無テクスチャ領域の間の大きさ比が変えられ、テクスチャ領域が無テクスチャ領域を上回る場合 (ネガティブ条件) には、左右のステレオペア間のテクスチャ領域に重なる部分が生じる。先の実験と同様に、キネティック・エッジ視差、方向視差、フリッカー視差の各条件を設定して両眼立体視させたところ、すべての視差条件で、かつ左右ペアで重なる部分が無いテクスチャ領域を持つ条件 (ポジティブ条件) でも、立体視の出現方向の正確度は減じるものの、立体視が可能なが示された。

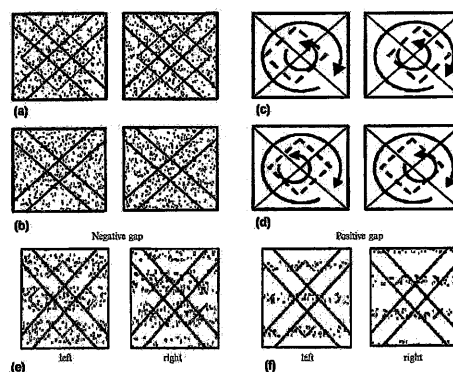


図4

キネティック・エッジ間の両眼視差による立体視のための刺激条件 (Poom, L. 2002)。

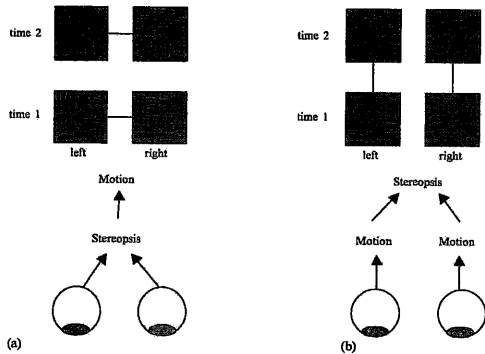


図 5

両眼立体視から運動視を復元する処理過程 (a) と運動視から両眼立体視を復元する処理過程 (b) (Poom, L. 2002)。

これらの結果は、左右眼ではテクスチャ対応を持たないが、各眼では継時的対応を持つステレオキネマトグラムで両眼立体視が可能なこと、すなわち、まず、各眼で運動要因に基づくエッジの検出がなされ、次いでこの検出されたエッジにもとづき左右眼で両眼視差の対応がなされ、立体視が出現することを示した。このプロセスを図示すると図 5 (b) となる。因みに図 5 (a) に示したものは、キクロピアン運動 (cyclopean motion, Patterson, 1999) の視覚処理過程で、ここでは、左右眼でテクスチャ対応を持つが、継時的には対応を持たないステレオキネマトグラムがあらわされている。これは運動視から立体視を復元する過程と立体視から運動視を復元する過程とがそれぞれ独立して存在することを意味する。

2.8. 垂直視差と対象までの絶対奥行距離

水平視差は対象間の相対奥行距離を規定するが、対象までの絶対奥行距離 (egocentric distance) を規定しない。絶対奥行距離を見積もるには他の付随的な奥行手がかり、たとえば、網膜像外の要因である眼筋の手がかりなどを必要とする。しかし、眼筋の手がかりのみでは、正確な絶対奥行距離の知覚には不十分なことが知られている (Benner & van Damme 1998)。これまでの研

究によれば、垂直視差は、水平軸を中心とした傾斜面 (slant) の知覚 (Backus, et al. 1999)、対象の大きさ知覚 (Bradshaw et al. 1996)、対象間の奥行 (Bradshaw et al. 1996)、対象面の湾曲性の知覚 (Rogers & Bradshaw 1995)、絶対奥行距離 (Rogers & Bradshaw 1993) が関係する。しかし、これらの結果は、必ずしも垂直視差が絶対奥行距離知覚を向上させることを意味しないし、また垂直視差が水平視差にもとづく距離知覚を向上させることも意味しない。そこで、垂直視差が絶対奥行距離知覚にどの程度の効力を持つかが、Brenner et al. (8) によって確かめられた。この研究では、水平視差の代わりに水平大きさ比 (horizontal size ratio) を、また垂直視差の代わりに垂直大きさ比 (vertical size ratio) を用いている。水平大きさ比とは両眼間の分離が、両眼間を結ぶ線分に平行な軸上に生じる比率を意味し、垂直大きさ比とは両眼間の分離が両眼間の線分に垂直な方向に生じる比率を指す (「片眼の網膜上に投影された対象の高度」対「他眼の網膜上に投影された対象の高度」)。とくに、垂直大きさ比は、対象までの絶対距離と対象の網膜上での偏心度で異なる (図 6 参照)。このグラフから垂直大きさ比は対象の網膜上での偏心度がわかれば、絶対距離を復元できることを示す (図 6 A)。また、垂直大きさ比は、対象までの観察距離が大きくなるに伴い増大する。垂直大きさ比の偏心度に伴う水平勾配は、ほぼ一定であり、したがって偏心度とは独立に対象の絶対奥行距離の知覚に、原理的には、これを利用できる。

そこで、視覚システムが対象までの絶対奥行距離を知覚する上で、垂直大きさ比を利用できるのか、あるいは垂直大きさ比の偏心度に伴う水平勾配を利用しているかが試された。提示した刺激は、楕円球であり、これはテニスボールをシミュレートしたものである。観察者には液晶シャッターを装着して、これを両眼立体視させ、また対象の絶対奥行距離の測度として、楕円球を実際のテニスボールに視えるように、そ

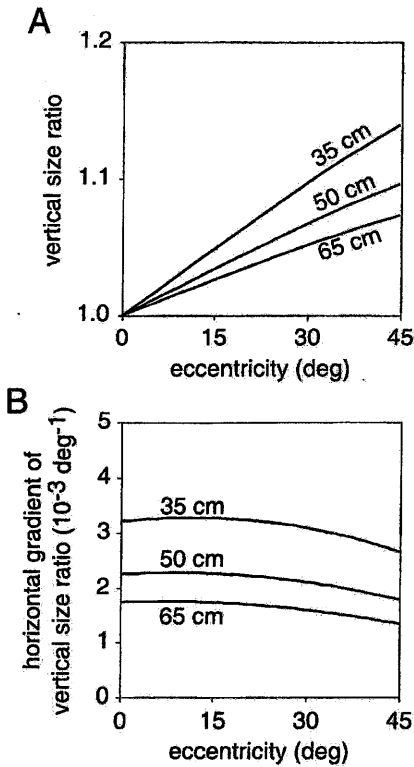


図 6

対象の網膜位置（偏心度）の関数としての垂直大きさ比。パラメータは対象までの観察距離（Brenner et al., 2001）。

の直径の大きさと深さを調整させた。楕円球は、正中線上に視線を配置した条件と視線を正中線から右方向30度に配置した条件とで提示され、また観察者からの距離は35、50、65 cmにシミュレートされた。その結果、実験で得られた絶対奥行距離測度は、正中線上に視線を配置した条件と視線を正中線から右方向30度に配置した条件とで同等であった。このことから、垂直大きさ比の偏心度に伴う水平勾配が絶対奥行距離に随伴して変化する形状や大きさを調整していると考えられる。

2.9. 垂直視差と方向の定位知覚

垂直視差要因単独で対象の視えの方向定位を規定するかが、Banks et al. (3) によって実験的に検討された。これまで、対象の視えの方向定位

を規定するのは、輻輳要因と網膜上の偏心度であることが確認されている。図7に示されたように、対象の方向定位（a）は、幾何学的には、左右眼の網膜上に投影された対象のそれぞれの偏心度の平均値（ γ ）および左右眼の対象に対する回転角度の平均値（ δ ）（対象と各眼を結ぶ線と視線との間になす角度の平均、図中の算出式を参照）をそれぞれ加算して2で除した値で規定され、次式のように表される。

$$\hat{a} = \hat{\gamma} + \hat{\delta}$$

一方、垂直視差要因単独での対象の視えの方向定位は、原理的には、垂直視差と絶対距離の手がかりである輻輳角（ μ ）とで規定される。この場合、垂直視差を、左右眼の網膜上の対象の投影位置の高度の比率（ $VSR = \beta_L + \beta_R$ ）である垂直大きさ比で規定すると便利である。したがって、垂直視差要因単独の場合、対象の方向定位は次式で表される。

$$a = \tan^{-1} (\ln VSR / \mu)$$

この場合、輻輳角が網膜イメージから推測できれば、垂直視差単独で方向定位がはかれることになる。

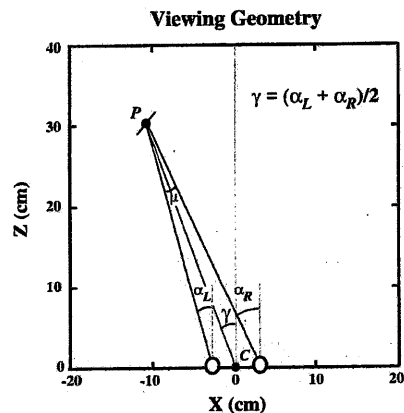


図 7

両眼観察事態の幾何学的関係（Banks, et al., 2002）。

刺激は、ハプロスコープを用いて提示された。ハプロスコープの左右の先端にはCRTが設置され、それらはハーフミラーとともに、垂直軸を中心に回転できる。刺激はランダム・ドットで構成された矩形面で、その傾斜 (slant) は-30度から30度の範囲で不規則に変化させ、また19 cmあるいは57 cmの距離に提示された。刺激の方向定位は、眼球位置による方向定位 (刺激を異なる方向に実際に位置させることで操作) と垂直視差にもとづく方向定位 (片眼の垂直方向を拡大することによって垂直視差を変化) とを独立に、しかも抗争的条件で操作された。実験の結果、視えの方向定位は、眼球位置にもとづく眼筋の手がかりと網膜上の対象の偏心度によって十分に規定されていて、垂直視差は、何らの役割も果たしていないことが確認された。

また、垂直視差が対象の方向の知覚に関わりがあるかについて、Berends, et al. (4) によってしらべられた。いま、対象が観察者の真正面に存在する時、左眼に垂直方向のみ拡大したステレオ画像を入力させれば、左右眼に垂直視差がつき、その結果、対象は左眼方向に変位して見えると予想される。ステレオグラムは赤あるいは緑のランダムドットで構成され、赤緑フィルターメガネを装着させて両眼立体視させた。左右ペアの拡大率は、3%と6%とし、視かけの方向変位は27度と64度になると計算された。実験の結果、9人の被験者の中で5名のは、片側拡大ステレオグラムに5分間順応させた場合にのみ、拡大率に応じた視かけの方向変位が生起すること、しかし、順応過程がなく直接観察させた場合には視かけの変位が起きないことが確認された。これらの結果から、視覚システムは、垂直視差にもとづいて方向定位を変位したのではなく、順応中に左右のステレオペアの不一致を解消するために遠心性の眼球位置情報を変更したと考えられる。

2.10. 両眼立体視が成立しないステレオグラム

ステレオグラムを構成する要素の中、視差対応部分の色相が異なるものの、等輝度に設定したステレオグラムでは、両眼立体視が成立しないとする報告 (Gregory 1977, Lu & Fender 1972) から、立体視が残存するという報告 (De Weert & Sadza 1983, Jimenz, et al. 1997) まであり、実験結果が一致しない。このような結果の不一致は、眼球の色収差の問題、あるいはモニター上に等輝度に刺激要素が提示されていないなどの人為的エラーが完全に除去しにくいと考える。そこで、Kim & Mollon (17) は、コントラスト比が高いために輪郭が明瞭な赤と緑の小矩形からなるステレオグラムを作成し、その赤と緑の小矩形の輝度を等しくしたところ、立体視は成立しないことを確かめた。さらに、彼らは、等輝度の赤と緑の小矩形から構成されたランダム・ステレオグラムのなかで緑の小矩形の大きさ (4 × 4 pixels) を赤の小矩形 (6 × 6 pixels) より小さくしたものを作成した。このステレオグラムでは、両眼立体視が可能であった。

そこで、同様に赤と緑の小矩形から構成されているが、緑の小矩形の全体の輝度を赤の小矩形の全体の輝度と一致するように高めたステレオグラムを作成して両眼立体視させたところ、立体視が成立しないことが示された。ここでは、視覚システムは、左右ステレオペア間の対応問題を解決するために、要素の属性の違いであるところの大きさ、明るさ、色相の3要因を利用できるにもかかわらず利用されず、対応に失敗する。同様な結果は、ランダム・ドット・キネマトグラムでも確認された。これらの結果は、大きさ、明るさ、色相の各モジュールは、両眼視差のモジュールとは直接関連せず、両眼立体視ではそれらのモジュールで検出された情報が利用できないことを示すと考えられる。

2.1.1. 両眼立体視における鉗状視差と圧縮視差

図8に示されたように、ステレオペアが鉗状 (shear) にあるパターン、あるいは一方の大きさが他方に比べて圧縮 (compression) されたパターンを両眼立体視すると、水平方向 (X軸) に傾斜 (inclination)、あるいは垂直軸 (Y軸) に傾斜した (slant) 面が視える。このとき、立体視された面が出現するまでの潜時は長く、また傾斜面が確定するまでも時間がかかる (Gillam, Chambers, & Russo 1988, Gillam, Flagg & Finlay 1984)。これは、両眼立体視の処理過程が、まず視差の対応問題を解決し、次いで奥行と形状を、不連続な視差、立体交差を持つ視差、相対的な視差量、視野を覆う視差などの視差特性から計算するためと考えられている。両眼立体視が成立するまでの潜時測定は、両眼立体視過程を分析するための格好の指標となる。

そこで、Bradshaw, et al. (5) は、図9に示されたように、鉗状要因と圧縮要因を操作し、左右ステレオペアの鉗状要因を同一とするが圧縮要因は異なるもの (AB, CD)、および鉗状要因を異なるが圧縮要因は同一としたもの (AC, BD) のステレオグラムをそれぞれランダムドットで作成し、両眼立体視までの潜時を測定した。その結果、鉗状要因が異なるステレオグラムの潜

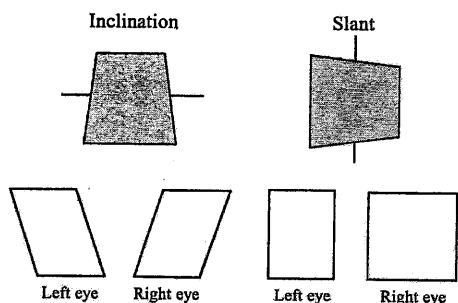


図8

鉗状視差と圧縮視差。ステレオペアが鉗状 (shear) にあるパターン、あるいは一方の大きさが他方に比べて圧縮 (compression) されたパターンを両眼立体視すると、水平方向 (X軸) に傾斜 (inclination)、あるいは垂直軸 (Y軸) に傾斜した (slant) 面が視える (Bradshaw, M. F., Hibbard, P. B. & Gillam, B. 2002)。

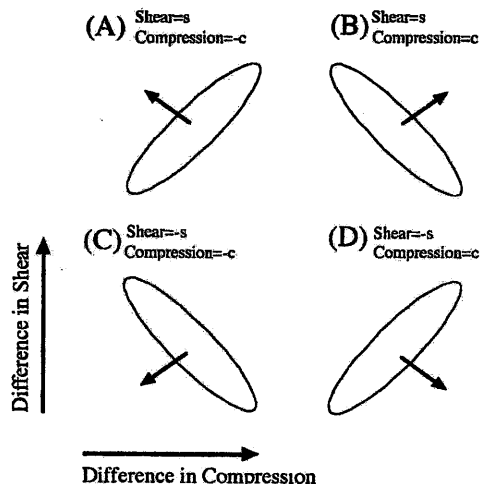


図9

鉗状要因と圧縮要因とを操作して作成されたステレオグラムの原理。左右ステレオペアの鉗状要因は同一とするが圧縮要因は異なるもの (AB, CD)、鉗状要因は異なるが圧縮要因は同一としたもの (AC, BD) (Bradshaw, M. F., Hibbard, P. B. & Gillam, B. 2002)。

時は圧縮要因が異なるステレオグラムのそれよりも小さいことが示された。この結果から、鉗状要因にもとづく立体視が圧縮要因のそれよりも速く処理されることは、出現させる面の傾き (inclination, slant) の軸を常に固定 (+45°, -45°) してあるので面の方向とは無関係に生じているといえる。また、潜時はドットで構成された枠組 (視差ゼロ) をランダムドットの周囲に提示すると顕著に減じることも示された。これらのことから、鉗状視差と圧縮視差は両眼立体視のための基本要因であると考えられる。

2.1.2. ダ・ヴィンチの提案した視覚上の拘束問題

ダ・ヴィンチは絵画制作上の観点から、人間の網膜に投影されているものを忠実にキャンバスに再現することはできない事態が2つあることを指摘した。その1は、2つの対象が画家の頭部に関して全く同一の方向にあり、したがって重なって存在する事態であり、その2は、対象の背後にある面の一部は一眼に見えているが、

他眼からは隠蔽されている事態である(図10)。ダ・ヴィンチは、これらの問題を観察者の眼球と対象との間の光学的関係の視点から提起した。これらの問題は、両眼から光景を観察した場合、両眼で見えている光景を正確にはキャンバス上には再現できないこと、したがって正しく再現するためにはある静止点を設定し、その位置から見える光景を再現しなければならないことから、キャンバスに描かれた奥行と実際の光景での奥行とは一致しないことを意味した。Ono, et al.⁽²⁰⁾ は、ダ・ヴィンチの2つの問題事態を考察し、眼球と対象との間の幾何光学的分析の他に、両眼融合視されたキクロピアンの視点からの分析が必要であることを指摘し、この考察を支持する実験的例証を幾つか提示している(Perception Website で体験可能)。

2.13. フクロウのブルスト(全頭膨大部 visual Wulst) ニューロンのランダム・ドット・ステレオグラムに対する応答特性

無麻酔下のフクロウ(barn owl)の視覚領(visual Wulst)のニューロンの垂直視差に対する応答特性が、Nieder & Wagner⁽¹⁸⁾によってしらべられた。垂直視差は、図11に示されているように、各眼の結節点が片眼側の視野にある対象(点P)と、このPから垂線を凝視点を通る前額平行面の水平線上に下ろした点との間になす角度(α , β)をさす。ランダム・ドット・ステレオグラムを提示した時の微小電極を通してのニューロンの反応傾向を見ると、調査したニューロンの約半数は垂直視差に応答すること、また垂直視差に応答する一個のニューロンの視差変化に伴う応答頻度は水平視差と同様に周期的に変化し、ガボール関数で良く記述できることが示された。さらに、水平視差に垂直視差を付加した条件でニューロンの応答をしらべると、ほとんどすべてのニューロンが両方向の視差に応答することが示された。このように、垂直視差に対する応答は、水平視差に対する応答が中

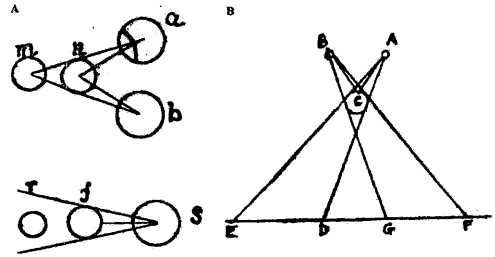


図10

ダ・ヴィンチの提起した絵画制作上の問題。(A)は、2つの対象が画家の頭部に関して全く同一の方向にあり、したがって重なって存在する事態であり、(B)は、対象の面の一部は一眼に見えているが、他眼からは隠蔽されている事態である(Ono, H., et al.. 2002)

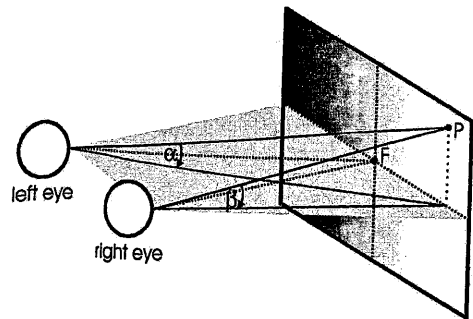


図11

垂直視差(Nieder, A. & Wagner, H. 2001).

断されたためではなく、その方向特性が変化し、その結果としてこれまでその存在が確認されていた視差検出器が応答したためと考えられる。

2.14. 両眼立体視に対応する人間の脳部位

両眼立体視を担うニューロンはV1領域で確認されているが、その詳細なしくみは不明である。そこで、機能的磁気共鳴画像法(fMRI)を用いて、両眼立体視中のV1とそれ以降の脳領域の機能的変化が、Backus et al.⁽²⁾によってしらべられた。MRIは脳の組織内に豊富にある水の水素核の磁気共鳴吸収を基にし、その吸収特性が水の置かれた環境によって変わることを利用して灰色質、白色質等の画像にコントラストをつけて表示する装置である。脳が機能活動を行うと

き、その神経電気活動に付随して局所的な血流や代謝の変化が起きる。これらの二次的現象は水の磁気共鳴特性を僅かながら変えるが、このときのMRI信号の変化を取り出して、対応する脳の機能活動の起きた部位を決める画像処理が機能的磁気共鳴画像法 (fMRI) である。ひとつの矩形が凝視点の前あるいは後に出現するランダム・ドット・ステレオグラムを両眼立体視中の脳活動を fMRI で測定した。

その結果、V1 領域の活動量は視差の増大に伴って高くなり、視差の上限に到達すると急激に低減すること、また、V3A 領域でも V1 と同様な反応が生じること、さらに MT+ 領域は観察者によっては顕著な反応が生起することなどが示された。fMRI によって示されるものが、該当する脳部位のニューロンの平均的な活動を示すと考えられているので、このデータからは複雑な両眼立体視過程のどの段階を明らかにしているかは分からない。動物を対象とした単一ニューロンの研究と対照させることが必要となる。

2.15. アカゲザルを対象とした両眼視差と運動視差の有効性

日常生活では、両眼視差と運動視差は共に強力な奥行手がかりとして作用し、また相互に影響し合って対象の立体性と奥行性を出現させる。両眼視差と運動視差のいずれが主たる要因であるかについては、両眼視差量が8分以上の場合には、運動視差の役割はほとんど無くなること、また両眼視差量が小さい場合には、運動視差量が増大すると視えの奥行も増大すること、さらに両眼視差量がゼロの場合には、視えの奥行は運動視差の規定する奥行の半分程度になることが報告されている (Rogers & Collett 1989)。これらの結果は、両眼視差と運動視差の加算的総和で視えの奥行が規定されることを支持する。一方、両眼視差と運動視差とは非線形的関係をもつとする実験結果も報告されている (Rogers & Graham 1982, Bradshaw & Rogers 1992, Johnston et al. 1994, Nawrot & Black 1998, Lankheet & Palmen

1998, Bradshaw & Rogers 1993)。

そこで、これら両要因の関係は、人間以外の動物ではどのようなになっているかについてアカゲザルを対象として、Cao & Schiller⁽⁹⁾ によって検討された。実験では、ダイナミック・ランダム・ドットで構成した刺激を単独で提示し、これに対する被験体の凝視点を観測するか、あるいは視野の4カ所のいずれか1カ所にターゲット刺激を他の3刺激とは奥行位置が異なるように提示し、その奥行弁別を求めるかして、検討された。ターゲット刺激は、両眼視差単独もしくは運動視差単独、あるいはこれら両方の要因で提示された。その結果、アカゲザルは両眼視差単独、運動視差単独、あるいはその両方の要因から作られたターゲット刺激を知覚あるいは弁別できることが示された。また、運動視差は両眼視差に比べて、奥行弁別が正確ではなく、また弁別成立までにより多くの時間がかかることも見いだされた。このことから、両眼視差と運動視差は、その初期段階で相互に関連しているものの、非線形的な関係にあると考えられる。

2.16. 両眼立体視に応答するマカクのV3領域の構造

マカク (*Macaca fascicularis*) の V3 領域 (prestriate area) の単一ニューロンおよび少数のニューロングループからの両眼立体視に対する応答特性が、Adams & Zeki⁽¹⁾ によってしらべられた。刺激はディスプレイ上に提示した矩形線分で、方向、大きさ、形状、色相がニューロンの受容野応答特性を最大にするように調整された。各眼の受容野が決定された後に、それぞれの受容野に対応する位置に矩形線分を別個に提示し、また両眼視差は2つの矩形間の分離距離を変えることによって操作された。

実験の結果、V3 領域のニューロンの大部分は、方向と視差の両方に選択的に応答し、しかも方向に関するコラムと視差に関するコラムとを形成していることが示された。このコラム構造は、図12に示されたように、方向はほぼ90度

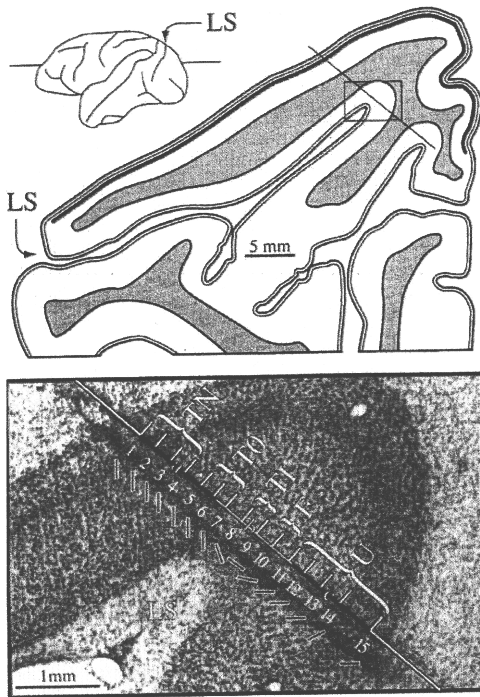


図 12

V3 領域のコラム構造 (Adams, D. L. & Zeki, S. 2001).

の範囲を連続的にカバーし、また 5 種類の仕方で視差に選択的に応答するニューロンで構成されている (図中の記号は次のようである. TO: 視差ゼロに興奮応答する細胞, TI: 視差ゼロに対する抑制応答, TF: 凝視点より遠くにある視差に応答, TN: 凝視点より近くにある視差に応答, U: 視差に応答しないもの). これらの構造から, V3 領域は両眼立体視の処理を担うとともに, 対象の立体量と 3 次元形状の分析にも関係していると推測される.

3. 運動要因による 3 次元視

3.1. 運動視差による奥行視閾におよぼす対象の相対的運動速度と頭部運動速度との関係

運動視差にもとづく奥行視閾 (2 つの対象間に奥行があるか否か) を決めている要因としては, (1) 2 つの対象間の速度差, (2) この対象間の速度差と観察者頭部運動速度との比がある.

これら 2 つの要因間の関係が, Ujike & Ono⁽³⁰⁾ によって実験的に検討された. 実験では, ディスプレー上に縦縞から構成された 2 本の帯状刺激を 2 組提示し, その 2 本の帯刺激間に速度差を設定すると共に, 観察者の頭部運動速度を統制するマーカーを提示した. 頭部運動は, 直線的もしくはサイン波形的に振幅させるとともに, 振幅頻度 (0.083 Hz から 1.30 Hz の間で 9 段階に変化) と振幅幅 (5 cm から 30 cm まで 4 段階に変化) も変えられた. 観察者は, マーカーの速度に合わせて頭部を左右に運動させると, その運動に連動してディスプレイ上の帯状刺激が運動するのが観察できる. 対象の運動速度と観察者頭部運動速度との比は, 観察者の手前に設置したノブを調整することで操作できる. 奥行視閾は, 明らかに帯状間に奥行が視える状態から, その奥行が消失するところを, このノブを調整させて求めた.

実験の結果, 頭部運動が直線的あるいはサイン波形的のいずれの条件においても, (1) 運動視差にもとづく奥行視は, 対象間の速度差と頭部運動速度の両要因によって規定されていること, (2) これら 2 つの要因の中で, どちらの要因が主要因となるかは, 頭部運動速度によって変わり, その速度が 13 cm/s 以下の場合には対象間の速度差 (0.26 arc min/s, これは運動視閾と同一) によって規定され, 頭部運動速度が 13 cm/s 以上の場合には, 対象間の速度差と頭部運動速度との比 (0.021 arc min/s) によって規定される. これらの結果から, 図 13 に示されたように, 運動視差にもとづく奥行視過程と対象の運動視過程は同一の過程であり, しかも運動視差による奥行視は, 対象間の速度差が運動視閾より大きく, かつ対象間の速度差と頭部運動速度との比がある値以上の場合 (図中の灰色領域) に生起すること, また運動視差による奥行は, 対象間の速度差が運動視閾以上でも対象間の速度差と頭部運動速度との比が一定値以下の場合 (領域 A), あるいは, 対象間の速度差と頭部運動速度との比が一定値以上でも対象間の速度差が運動視閾

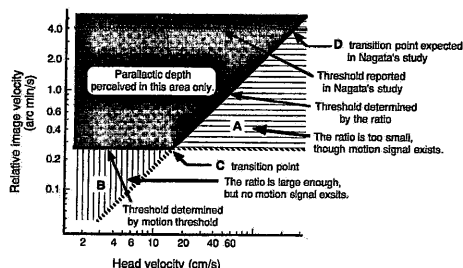


図 13

運動視差にもとづく奥行視を生じさせる対象間の速度差および頭部運動速度との関係 (Ujike, H. & Ono, H 2001)。

以下の場合(領域B)にはいずれも生じないことが明らかにされている。

3.2. 3次元シミュレーション・シーンにおける3次元対象の立体量の知覚

3次元にシミュレートされたシーン(場面)内に置かれた3次元対象の立体量が, Sauer, et al.⁽²⁷⁾によってしらべられた。3次元シミュレーション・シーンは、運動視差で作成され、そこにはドットで構成された天井面、床面、そして中央に円筒(シリンダー)が配置された。3次元シーンは、灰黒色の背景に提示した白いドットを水平方向に運動させることによって作成した。太さが異なり、そしていろいろな奥行位置に提示される円筒形の視かけの直径は、別に提示した直線の長さを観察者に調整させて求められた。刺激条件は、異なる奥行位置に提示した同一の大きさの円筒条件と同一の奥行位置に提示した太さの異なる円筒条件で、実験の結果、両条件とも円筒の視かけの直径は、円筒までの観察距離が増大すると減少すること、とくに後者の刺激条件ではシミュレートした円筒の直径を減少させると視かけの直径はより大きく減ることなどが示された。観察者から見て対象が回転して見えるように操作する条件(運動要因からの形状復元)を追加すると、円筒の視かけの直径は、追加条件が無い場合と比較し、増大した。これらの結果から、3次元にシミュレートされた

対象の立体量は、それが置かれた奥行距離の増大によって生じる対象の網膜像の大きさ変化によって、縮小されて知覚されることが明らかにされた。

また、運動視差による3次元シミュレーション条件での対象の立体量が、ローテーションとトランスレーションをそれぞれ変化させることによってしらべられた (Braunstein et al.⁽⁷⁾)。刺激パターンは、上述の Sauer et al. と同一のもので、シミュレートされた回転するシリンダーである。回転する速度の最大と最小の差、最大速度と最小速度の比、そして、その結果として変化するトランスレーション速度が変えられ、視かけのシリンダーの直径は、別に提示した線分の長さの調整で求められた。

その結果、シミュレートした対象のおおきさが一定の場合には、視かけの立体量は最大と最小の速度差およびその速度比が大きくなるに伴い増大することが示された。また、シミュレートするシリンダーの直径を大きくすると、それに伴い視かけの立体量も拡大した。このことは、シリンダーサイズが大きくなったという直感的な情報が、回転速度の情報よりも対象の立体の知覚により大きな影響を与えている。これらの結果から、シミュレートした対象の立体量は、その対象の立体量が画像情報から相対的に復元されるのではなく、速度差、速度比、そして対象の直感的な大きさ情報からヒューリスティックに復元されると考えられる。

3.3. 局所的な奥行手がかり情報の大局的レベルでの奥行知覚への伝搬

外界の奥行関係を知覚する手がかりは、大きく2つに大別され、その1は大局的な奥行関係に関わるもので運動視差が代表的なものであり、その2は局所的な奥行関係に関わるもので、それには局所的な部分の線遠近法的情報、局所的なテクスチャの変化などがある。視覚システムはこれら大局的手がかりと局所の手がかりとを統合して、全体のシーン構造を成立させる。

Sauer et al. (26) は、局所的手がかりが大局的な奥行関係にまで手がかり効果を伝搬するかについて実験した。実験に使用したシーンは、ドットで構成され、運動視差で3次的にシミュレートされる。シーン内には、局所の手がかりとして台形が提示され、その台形のパースペクティブが台形から矩形まで変形（上辺対下辺の比を変化）される。台形内とその外側に奥行位置の異なる2つのボールが配置され、そのボール間の視えの奥行距離が別に提示した線分の長さを調整させることによって求められた。

その結果、台形から矩形に変形するにつれてボール間の視えの奥行距離は縮小すること、またその縮小傾向はボールが台形の外側の領域に配置されても同一の傾向を示した。この傾向は実際のシーンを背景においた場合にも確認された。これらの結果から、局所の手がかりが大局的な奥行関係にまで手がかり効果を伝搬することが確認された。

3.4. 運動視差で提示した対象の絶対奥行距離知覚に影響する相対的奥行手がかりの効果

対象の絶対奥行距離知覚は絶対的奥行手がかりによって基本的には得られるが、相対的奥行手がかりによっても修正されることが知られている。例えば、複数の対象間の順序関係や奥行距離比率に関わる手がかりは、絶対奥行距離知覚を修正する (Foley & Held 1972, Gogel 1972)。図14は、運動視差で奥行をシミュレートした事態での対象までの絶対奥行距離と相対奥行距離との関係を示したもので、2つの対象の運動視差量が等しくても対象までの絶対奥行距離が大きければ、その相対奥行距離は大きくなることを示す。Ohtsuka et al. (19) は、運動視差要因のみで対象とその奥行をシミュレートした (図15)。ここでは上下に提示した2つのテスト対象（運動視差量は等価）とそれらの背面（運動視差量は異なるため、2つの背面の奥行は異なる）が提示され、観察者には上下2つのテスト対象のうち、

対象と背面の間の相対的奥行量はどちらが大きいく、また遠くに位置して見えるかの判断を求めた。相対的奥行手がかりとしては、オクルージョンとテスト対象の大きさが操作された。

その結果、相対的な奥行手がかりが指示する奥行関係と判断された対象の絶対的、相対的奥行距離とは一致することが示された。これらの結果から、相対的奥行手がかりは絶対奥行距離の知覚的算定を修正すると考えられる。

3.5. 課題依存性と運動視差と両眼視差

運動視差と両眼視差が、対象間の奥行、対象の大きさ、および対象までの絶対奥行距離について、どの程度正しく知覚するのに効果を持つかが、これまで数多く研究されてきたが、それらの結果が示すところは、奥行恒常性はあまり

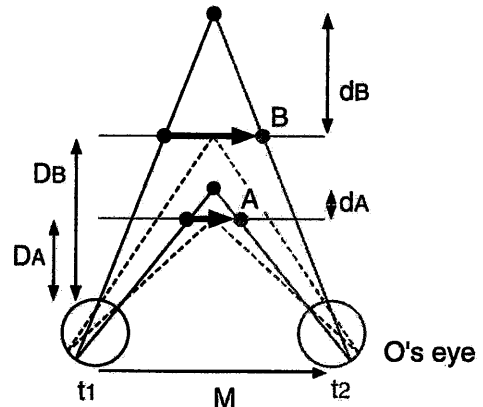


図 14

運動視差で奥行をシミュレートした事態での対象までの絶対奥行距離と相対奥行距離との関係 (Ohtsuka et al., 2002)。

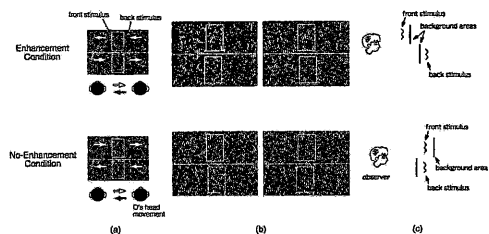


図 15

運動視差要因のみで対象とその奥行をシミュレートした実験事態 (Ohtsuka et al., 2002)。

成立して、対象の形状は歪んで知覚され、そして対象までの絶対奥行距離の見積もりは正確ではないということにある。

このような結果に対して、(1) コンピュータ・ディスプレイに提示することの問題、(2) 利用可能な奥行手がかり数の問題、(3) 観察者に求める視覚的課題の性質、(4) 刺激の大きさ、(5) 一般的な実験変数、などの観点から Bradshaw, et al. (1998) らによって検討されてきた。そこで、Bradshaw, et al. (6) は、観察者に求める3種類の視覚的課題を同一の実験事態で遂行させ、その際に利用できる奥行手がかりを操作して、運動視差と両眼視差の手がかり効果を吟味した。3種類の視覚課題は、両眼視力を測定する際に使用する3点法課題(Howard-Dolmann型両眼視力測定法)、標準刺激として提示した3角形の高さにあたる部分の再生課題、および観察者から見て前額平行にある2点間距離を視線方向で調整する課題である。各課題は、頭部運動随伴両眼観察(運動視差と両眼視差)、頭部運動随伴単眼観察(運動視差)、頭部静止両眼観察(両眼視差)、頭部静止単眼観察の各条件で試行された。

その結果、(1) 視覚課題の正確度は、観察条件によっては影響されないこと、(2) 3点法両眼視力課題と3角形高さ調整課題は正確に遂行されるが、前額平行2点間距離再生課題は正確さに欠くことが見いだされた。3種類の視覚課題に共通する視覚的誤謬が出現しないことから、視覚システムは視覚課題に対応して利用する奥行手がかりを替えていると考えられる。

4. 絵画的要因による3次元視

4.1. 陰影要因からの形状の復元問題

陰影要因は対象の3次元性を効果的に表現するが、このとき、照明方向を知ることが3次元性、とくに凹凸感を正確に知覚するのに必要か否かが問題となっている。これまで、照明方向に関する知識は形状の凹凸感を明瞭にするのに十分な条件であるが、必要条件ではないと考え

られている(Koenderink & van Doorn 1980, 1993)。そこで、Caudek, et al. (10) は、図16に示されたように、凹凸のあるパターンを作成し、その回転軸と光源方向とを操作した。パターン面は観察者の前額平行に位置させ、垂直軸を中心に時計あるいは反時計回りに10度回転して提示する。光源も垂直軸を中心に回転させることにし、面の回転方向と光源の回転方向との関係を、面の回転と光源方向の回転とが同方向条件、それらが反対方向条件、および光源が静止した条件の3通りに設定した。観察者には、パターンの視かけの奥行方向(凹あるいは凸)、パターンの回転方向(時計あるいは反時計回転)、パターンの視かけの回転角度の最大(別に提示した指標を用いての調整によって測定)を答えさせた。

その結果、光源静止条件と、パターンと光源同方向回転条件ではほぼ正確に凹凸感と最大回転角度を知覚できたが、一方、パターンの回転方向と光源の回転方向とが反対方向条件では、パターンの回転方向が光源の回転方向と同一と知覚されてしまい、凹凸感も不正確になることが示された。そこで、パターンと光源を回転した際の最終フレームの画像を静止画像として提示し、同様に凹凸方向、最大の回転角度を判断させたところ、3通りのすべての条件で正しく知覚できることが分かった。これらの結果から、陰

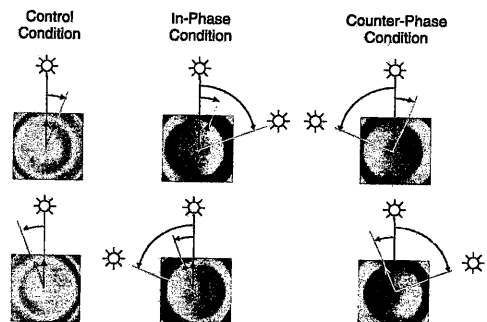


図16

陰影からの形状の復元。皿形状を持つ凹凸のあるパターンの回転方向と光源方向とが垂直軸を中心に回転操作される。面の回転と光源方向の回転とが同方向条件、それらが反対方向条件、および光源が静止した条件の3通りに設定された(Caudek, et al. 2002)

影からの形状復元の場合、静止画像条件とパターン面が運動するダイナミック条件では、そのプロセスが異なると考えられる。

4.2. 面の視えの奥行方向を規定する絵画的要因と運動要因との関係

一般に、「エームズの窓」と呼ばれる面の奥行方向に関する錯覚現象はよく知られている。これは前額に平行に位置させた台形面を提示し、それが静止した状態で観察すると、長方形が垂直軸を中心に傾いて見えるが、これを垂直軸中心に回転させると、長方形がその形状を変化させるように知覚される。これは、絵画的要因（パースペクティブ要因）と運動要因とは垂直軸に関する視えの奥行方向（tilt）について同方向の手がかりを与えるが、水平軸に関する視えの奥行方向（slant）については、絵画的要因はある傾きを持つが、物理的には前額に平行に配置してあることから、生じると考えられている。そこで、平らな面の奥行に関する視えの方向を規定する要因として、絵画的な要因が主要な役割を果たすのか、あるいは運動視差など運動要因が大きく関与するかが、Cornilleau-Pere et al.⁽¹¹⁾によってしらべられた。実験条件は、図17に示されたように、台形面にパースペクティブが描かれたものである(C)。図中、(A)は垂直軸に関する傾斜を、(B)は水平軸に関する傾斜を示す。面の運動方向は、前額平行面上の水平軸、垂直軸および45度軸に関して回転させる。面の視えの傾斜角度は、コンピュータでグラフィカルに提示した面をマウスあるいはジョイスティックで調整させる方法(D)で求められた。実験は単眼で行われ、また対象提示視野は小視野条件(6度)と大視野条件(60度)とが設定された。

実験の結果、(1)小視野条件の場合、運動要因のみによって誘導された視えの傾き(tilt)は、面の回転方向に規定されるが、面の傾きが回転軸と一致する場合には多義的にしか知覚されないこと、(2)一方、大視野条件の場合、運動要因による視えの傾きは回転方向軸によって規定

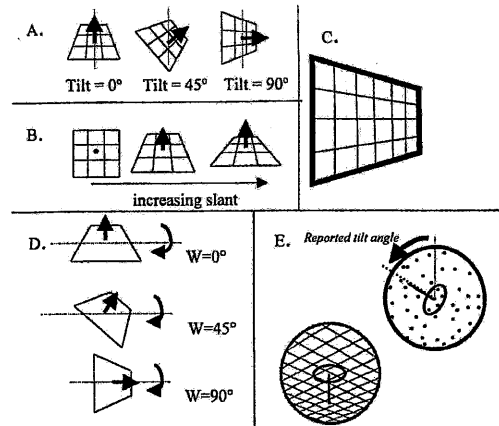


図 17

視えの傾きにおけるパースペクティブ要因と運動要因との関係。刺激条件は、台形面にパースペクティブが描かれたものである(C)。(A)は垂直軸に関する傾斜を、(B)は水平軸に関する傾斜を示す。面の運動方向は、前額平行面上の水平軸、垂直軸および45度軸に関して回転させる。面の視えの傾斜角度は、コンピュータでグラフィカルに提示した面をマウスあるいはジョイスティックで調整させる方法(D)で求められた(Cornilleau-Pere et al. 2002)。

されること、(3)小視野、大視野条件ともに、パースペクティブ要因は視えの傾きを強く規定すること、(4)パースペクティブ要因と運動要因とが抗争的条件にある場合には、視えの傾きはパースペクティブ要因によって規定されること、などが示された。これらのことから、静止の手がかり要因であるパースペクティブは運動要因に基づく手がかりに優越する手がかり要因と考えられる。

4.3. ハトのオクルージョン視

対象の一部が覆われているものの知覚(amodal perception)については、マウス(Kaniza et al. 1998)、ニワトリのヒナ(Forkman 1998)、赤毛ザル(Osada & Schiller, 1994)、ヒビ(Deruelle et al. 2000)、チンパンジー(Sato, et al. 1997)を対象にしらべられ、いずれもそれが可能であること、しかしハトを被験体にした研究(Cerella 1980, Fujita, 2001, Sekuler et al. 1996)では、オクルージョン視は不能であることが報告されてい

る。そこで、DePietro, et al. (12) は、ハトを、対象が被蔽されていない条件で訓練し、その後に対象の一部が被蔽された条件と、対象が別の面の上面に浮いたように置かれた条件（オントップ on top）でテストしたところ、オクルージョン視は明確には出現しなかったため、被蔽されていない条件およびオントップ条件で学習訓練を施行したところ、オクルージョン視は明確に出現することが示され、さらに新規な被蔽対象に対してもオクルージョン視が成立することを見いだした。ハトはオクルージョン視能力を持つと考えられる。

5. 奥行距離の知覚

5.1. 月の錯視

月の錯視を説明する仮説として、大きさ尺度仮説（size-scaling）と大きさ対比仮説（relative-size）とがある。大きさ尺度仮説によれば（Kaufman & Rock 1962a, 1962b, Kaufman & Kaufman 2000）、水平方向の奥行距離は、垂直方向よりも多くの対象が散在しているために奥行手がかりが多く、そのために垂直方向の距離より長く見積もられ、そして網膜に投影された対象の大きさが等しい場合には、大きさ-距離不変尺度が適用され、奥行距離が長い水平方向の月は過大視されると説明する。一方、大きさ対比仮説によれば（Restle 1970）、対象の大きさはそれが置かれた周囲の対象の大きさとの対比（コントラスト）に依存し、大きさ対比が大きいと対象は過大視されると考えられるため、水平方向にある月の場合にはテクスチャ勾配によって縮小されて網膜に投影された周囲の対象と月との大きさ対比が大きくなり、その結果、月の大きさが過大視されると説明する。

Redding (25) は、図18に示した2次元画像を作成し、水平方向と垂直方向に描いた月の視かけの大きさを測定した。実験に使用した2次元画像では、その地上面を示すテクスチャが正常方向で描いたものと、その上下方向を逆さまにし

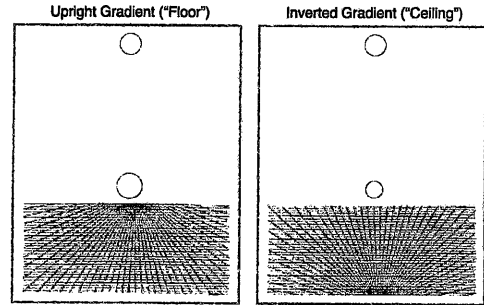


図18

月の錯視実験。地上面を示すテクスチャを正常方向で描いたものと、その上下方向を逆さまにしたものが用いられた（Redding, G. 2002）。

たものが用いられた。大きさ尺度仮説によれば、テクスチャ正常方向条件での奥行距離は遠くに知覚され、一方、テクスチャ逆転条件でのそれは短く知覚されるので、テクスチャ正常方向条件での水平方向での月の大きさは垂直方向のそれより大きく、逆にテクスチャ逆転条件での月の大きさは垂直方向のそれより小さく知覚されると予測される。また、大きさ対比仮説によれば、テクスチャ正常方向条件での月の大きさは、地上面を表すテクスチャの奥行距離に伴う勾配効果で大きさ対比が高くなり、垂直方向の月よりも過大視されるが、一方、テクスチャ逆転条件では、奥行距離に伴う勾配効果も逆転するので、水平方向と垂直方向の月の視かけの大きさには差が生じないと予測される。2次元画面を用い、テクスチャ正常方向とテクスチャ逆転の両条件で月の視かけの大きさを測定した結果、テクスチャ正常方向条件では視かけの大きさの過大視が生じたが、テクスチャ逆転方向条件では視かけの月の大きさは過小視されることが示された。この結果は大きさ尺度仮説を支持する。

5.2. 網膜像以外の要因による対象までの絶対奥行距離の知覚的算定

対象までの絶対奥行距離の知覚は、眼球調節要因、両眼輻輳要因の他に、(1) 垂直視差 (Rogers

& Bradshaw 1993), (2) シーン内に視えているグラウンド面あるいは水平線情報 (Sedgwick 1986), (3) 観察者の運動に連動したオプティック・フロー, である. Panerai et al.⁽²¹⁾ は, ランダムドットで構成された球を観察者の頭部運動と連動して提示した. 提示した球の大きさと奥行距離は網膜像の大きさが常に一定となるように変化させることによって相対的大きさ手がかりを除去してあるので, 対象までの奥行距離のための手がかりは, 運動視差と頭部運動から生じる網膜像以外の要因に限定された.

実験の結果, (1) 観察者はシミュレートした奥行距離を正確に知覚できること, (2) 知覚された奥行距離は, 対象の下方に地上面 (床面) を付加することによって若干増大すること, (3) 観察者の自己運動によらない場合 (対象事態が運動する事態) には, 正確な奥行距離知覚がなされないこと, などが見いだされた. これらの結果から, 対象までの絶対奥行距離の知覚的算定には, 対象の網膜像から得られる要因と観察者の運動に随伴する網膜像以外の要因とが関与し, とくに網膜像以外の要因としては前庭感覚と首の自己受容的感覚の役割が示唆されている.

5.3. 観察者の頭部運動要因と視えの絶対奥行距離

絶対奥行距離知覚に及ぼす観察者の頭部運動要因 (網膜像以外の手がかり) が, Peh, et al.⁽²²⁾ によって分析された. 対象はドットで構成された球で, 観察者が頭部を運動させながら観察すると立体的に視える. 対象までの観察距離は, 球の大きさを変化させることによって操作した. 観察者の頭部運動は, 対象に対して視線方向で前後に反復させ, また, その頭部運動に連動して対象の動きも変化させた (頭部運動条件). また, これの対照条件として, 頭部運動によらないで対象の動きが変化する条件 (対象運動条件) も設定された. 視えの絶対奥行距離は口答での報告によった.

その結果, (1) 頭部運動と対象運動の両条件

とも, 頭部運動の大きさを固定した場合には, 視えの絶対奥行距離は正確に見積もられること, (2) しかし, 頭部運動の大きさを試行ごとに変動させる場合には, 対象運動条件での視えの絶対奥行距離の見積もりは悪くなること, (3) 頭部運動の方向に関しては, 対象に対して前後方向の運動の方が, 左右方向のそれよりも効果的であること, などが見いだされた. これらの結果から, 頭部運動から発せられる自己受容的感覚情報は, 絶対奥行距離の見積もりに有効である.

5.4. ディスプレーに提示された対象の高さについての過大視

Yang et al. (1999) によれば, 水平—垂直錯視は, 2次元事態で提示されるよりも3次元環境のなかに提示された方が大きく出現するという. しかし, 2次元条件より3次元条件の方が, 一般的には刺激が大きく表現されるので, この結果からは, 2次元性対3次元性が結果に影響したのか, あるいは刺激の大小が関係したのかは不明である. そこで, Dixon & Proffitt⁽¹³⁾ は, 2次元の大スクリーン条件 (映画のスクリーンの大きさ), 3次元の小さなディスプレイ条件 (デスクトップ・ディスプレイの大きさ), 3次元の大きなディスプレイ条件 (バーチャル・フィールドの大きさ) を設定し, そこに水平—垂直刺激を提示し, 過大視の出現程度を測定した. すべての条件は, ヘッド・マウント・ディスプレイを通してバーチャル・リアリティの方法で提示された. 2次元の大スクリーン条件では, あたかも映画のスクリーンを見ているように, 3次元の小さなディスプレイ条件では, あたかもデスクトップ・ディスプレイをみているように, 3次元の大きなディスプレイ条件では, スクリーンあるいはディスプレイの枠組みが無く, 直接シーンをみているように, それぞれバーチャルでシーンが構成された. 実験の結果, 垂直成分の過大視は, 2次元の大スクリーン条件と3次元の大きなディスプレイ条件で大きいこ

とが示され、このことから、垂直成分の過大視は、提示した刺激の大きさに依存し2次元性対3次元性には依存しないことが明らかにされている。

6. おわりに

本年度報告した両眼立体視に関する研究で得られた成果をまとめて列挙すると、次のようである。(1) 低域濾過条件の場合の両眼立体視の下限閾は、濾過後にそのステレオグラムに含まれる最大の高空間周波数に依存して小さくなるが、高域濾過条件のそれは、低域空間周波数に依存しては変化しないこと、一方、両眼立体視の上限閾は低域濾過条件では変化しないが、高域濾過条件では空間周波数に依存して小さくなること、さらに上限閾は出現させるイメージの大きさに依存して変化したことから、両眼立体視の下限閾と上限閾はそれぞれ異なった処理過程に担われていると考えられる。(2) あいまいな視差対応点がある場合の視差対応は、視差を構成する刺激要素の形状性(形状の文脈効果)によって決定される場合がある。(3) トランジェント型立体視ではガボールパターンのエンベロープの大きさが、ステレオペアの対応問題解決の初期過程では重要な役割を果たしていること、したがってステレオグラムのガボールパターンのエンベロープの大きさとそのガボールパターンを構成する波形に関する情報は、粗い視差から細かな視差を検出する一連の過程で、ステレオペア間の対応を解決するために共に利用され、またエンベロープの大きさから抽出された2次的情報は、細かな視差対応を見つけ出すのに有効に働いている。(4) ステレオアノマリとバージェンスアノマリが存在し、ステレオアノマリの型(交差視差不能あるいは非交差視差不能型)とバージェンスアノマリの型(交差視差輻輳融合不能と非交差視差輻輳融合不能)との間には関連が無く、また、両眼立体視が正常な者にもバージェンスアノマリが存在する。

(5) 輝度対比条件でのステレオグラムに、反対極性をもつ色相対比を加えると、立体視は妨害されること、同様に、色相対比をもつステレオグラムに反対極性を持つ輝度対比を加えると、立体視は妨害されることから、両眼視差が検出され、そして立体視が成立する前の段階で働く色相対比感受メカニズムと輝度対比感受メカニズム間に、立体視成立にとってポジティブなそしてネガティブな相互作用が存在する。(6) 両眼視差と運動視差が提供する形状と奥行量は、それら両要因の加算の総和で規定される。(7) 左右眼ではテクスチャ対応を持たないが、各眼では継時的対応を持つステレオキネマトグラムで両眼立体視が可能であることから、まず、各眼で運動要因に基づくエッジの検出がなされ、次いでこの検出されたエッジにもとづき左右眼で両眼視差の対応がなされて立体視が出現すると考えられる。(8) 視えの方向定位は眼球位置にもとづく眼筋の手がかりと網膜上の対象の偏心度によって十分に規定されていて、垂直視差は何の役割も果たしていない。(9) 視覚システムは、ステレオグラムを構成する要素の中、視差対応部分の色相が異なるものの、等輝度に設定したステレオグラムの場合には、ステレオグラムを構成する要素の属性の違いであるところの大きさ、明るさ、色相の3要因を左右ステレオペア間の対応問題を解決するために利用できず、対応に失敗する。(10) ランダム・ドット・ステレオグラムを両眼立体視中の脳活動をfMRIで測定すると、V1領域の活動量は視差の増大に伴って高くなり、視差の上限に到達すると急激に低減、また、V3A領域でもV1と同様な反応が生じ、さらにMT+領域は観察者によっては顕著な反応が生起する。

運動要因による立体視研究の領域で得られた知見は、次のようである。(1) 運動視差にもとづく奥行視過程と対象の運動視過程は同一の過程であり、しかも運動視差による奥行視は、対象間の速度差が運動視閾より大きく、かつ対象間の速度差と頭部運動速度との比がある値以上

の場合に生起し、また運動視差による奥行は、対象間の速度差が運動視閾以上でも対象間の速度差と頭部運動速度との比が一定値以下の場合、あるいは、対象間の速度差と頭部運動速度との比が一定値以上でも対象間の速度差が運動視閾以下の場合には、いずれも生起しない。(2) 3次元にシミュレートされた対象の立体量は、それが置かれた奥行距離の増大によって生じる対象の網膜像の大きさ変化によって縮小されて知覚され、また速度差、速度比、そして対象の直感的な大きさ情報からヒューリスティックに復元される。(3) 対象の形状など局所的奥行手がかりが大局的な奥行関係にまで手がかり効果を伝搬する。(4) オクルージョンやテスト対象の大きさなどの相対的な奥行手がかりが、絶対奥行距離の知覚的算定を修正する。

この他に、月の錯視についての研究が、近年では珍しく報告され、大きさ尺度仮説 (size-scaling) と大きさ対比仮説 (relative-size) のいずれが正しいかが検討され、水平方向の奥行距離は、垂直方向よりも多くの対象が散在しているために奥行手がかりが多く、そのために垂直方向の距離より長く見積もられ、そして網膜に投影された対象の大きさが等しい場合には、大きさ-距離不変尺度が適用され、奥行距離が長い水平方向の月は過大視されるとする大きさ尺度仮説が支持されている。

7. 文献 (2003)

- (1) Adams, D.L. & Zeki, S. 2001 Functional organization of macaque V3 for stereoscopic depth. *Journal of Neurophysiology*, 86, 2195-2203.
- (2) Backus, B., Fleet, D. J., Parker, A. J. & Heeger, D.J. 2001 Human cortical activity correlates with stereoscopic depth perception. *Journal of Neurophysiology*, 86, 2054-2068.
- (3) Banks, M. S., Backus, B. T. & Banks, R. S. 2002 Is vertical disparity used to determine azimuth? *Vision Research*, 42, 801-807.
- (4) Berends, E. M., Ee, R. & Erkelens, C. J. 2002 Vertical disparity can alter perceived direction. *Perception*, 31, 1323-1333.
- (5) Bradshaw, M. F., Hibbard, P. B. & Gillam, B. 2002 Perceptual latencies to discriminate surface orientation in stereopsis. *Perception & Psychophysics*, 64, 32-40.
- (6) Bradshaw, M. F., Parton, A. D. & Glennerster, A. 2000 The task-dependent use of binocular and motion parallax information. *Vision Research*, 40, 3725-3734.
- (7) Braunstein, M. L., Sauer, C. W., & Feria, C. S. 2002 Perceived internal depth in rotating and translating objects. *Perception*, 31, 943-954.
- (8) Brenner, E., Smeets, J. B. & Landy, M. S. 2001 How vertical disparities assist judgments of distance. *Vision Research*, 41, 3455-3465.
- (9) Cao, A. & Schiller, P. H. 2002 Behavioral assessment of motion parallax and stereopsis as depth cues in rhesus monkeys. *Vision Research*, 42, 1953-1961.
- (10) Caudek, C., Domini, F. & Diluca, M. 2002 Illusory 3-D rotation induced by dynamic image shading. *Perception & Psychophysics*, 64, 366-379.
- (11) Cornilleau-Pere, Wexler, M., Droulez, J., Marin, E., Miege, C. & Bourdoncle, B. 2002 Visual perception of planar orientation: dominance of static depth cues over motion cues. *Vision Research*, 42, 1403-1412.
- (12) DePietro, N. T., Wasserman, E. A. & Young, M. 2002 Effects of occlusion on pigeon's visual object recognition. *Perception*, 31, 1299-1312.
- (13) Dixon, M. W. & Proffitt, D. R. 2002 Overestimation of heights in visual reality is influenced more by perceived distal size than by the 2-D versus 3-D dimensionality of the display. *Perception*, 31, 103-112.
- (14) Fredenburg, P. & Harwerth, R. S. 2001 The relative sensitivities of sensory and motor fusion to

- small binocular disparities. *Vision Research*, 41, 1969-1979.
- (15) Hess, R. F., Liu, C. H. & Wang, Y. 2002 Luminance spatial scale and local stereo-sensitivity. *Vision Research*, 42, 331-342.
- (16) Ichikawa, M. & Saida, S. Integration of motion parallax with binocular disparity specifying different surface shapes. *Japanese Psychological research*, 44, 34-44.
- (17) Kim, Y. & Mollon, J. D. 2002 Conditions under which stereopsis and motion perception are blind. *Perception*, 31, 65-71.
- (18) Nieder, A. & Wagner, H. 2001 Encoding of both vertical and horizontal disparity in random-dot stereograms by Wulst neurons of awake barn owls. *Visual Neuroscience*, 18, 541-547.
- (19) Ohtsuka, S., Ujike, H. & Saida, S. 2002 Relative distance cues contribute to scaling depth from motion parallax. *Perception & Psychophysics*, 64, 405-414.
- (20) Ono, H., Wade, N. J. & Lillakas, L. 2002 The pursuit of Leonardo's constraint. *Perception*, 31, 83-102.
- (21) Panerai, F., Cornilleau-Peres, V. & Droulez, J. 2002 Contribution of extra retinal signals to the scaling of objects distance during self-motion. *Perception & Psychophysics*, 64, 717-731.
- (22) Peh, C., Panerai, F. Droulez, J., Cornilleau-Pere, V. & Cheong, L. 2002 Absolute distance perception during in-depth head movement: calibrating optic flow with extra-retinal information. *Vision Research*, 42, 1991-2003.
- (23) Petrov, Y. 2002 Disparity capture by flanking stimuli: a measure for the cooperative mechanism of stereopsis. *Vision Research*, 42, 809-813.
- (24) Poom, L. 2002 Seeing stereoscopic depth from disparity between kinetic edges. *Perception*, 31, 1439-1448.
- (25) Redding, G. 2002 A test of size-scaling and relative-size hypotheses for the moon illusion. *Perception & Psychophysics*, 64, 1281-1289.
- (26) Sauer, C. W., Braunstein, M. L., Saidpour, A., & Andersen, G. J. 2002 Propagation of depth information from local regions in 3-D scenes. *Perception*, 31, 1047-1059.
- (27) Sauer, C. W., Saidpour, A., Braunstein, M. L. & Andersen, G. J. 2001 Perceived depth of 3-D objects in 3-D scenes. *Perception*, 30, 681-692.
- (28) Simmons, D. R. & Kingdom, F. A. A. 2002 Interactions between chromatic- and luminance-contrast-sensitive stereopsis mechanisms. *Vision Research*, 42, 1535, 1545.
- (29) Schor, C.M., Edwards, M. and Sato, M. 2001 Envelope size tuning for stereo-depth perception of small and large disparities. *Vision Research*, 41, 2555-2567.
- (30) Ujike, H. & Ono, H. 2001 Depth threshold of motion parallax as a function of head movement velocity. *Vision Research*, 41, 2835-2843.

8. 参考文献

- Backus, B., Banks, M. S., van Ee, R. & Cowell, J. A. 1999 Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, 39, 1143-1170.
- 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.
- Bradshaw, M. F., Parton, A. D. & Eagle, R. A. 1998 The interaction of binocular disparity and motion parallax in determining perceived depth and perceived size. *Perception*, 27, 1317-1333.
- Bradshaw, M. F. & Rogers, B. J. 1992 Subthreshold interactions between binocular stereopsis and motion parallax cues. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 33, 1332.
- Bradshaw, M. F. & Rogers, B. J. 1993 Elevation of depth thresholds following within and between

- cue adaptation of stereo and motion. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 34, 1036.
- Cerella, J. 1980 The pigeon's analysis of pictures. *Pattern Recognition*, 12, 1-6.
- Edwards, M., Pope, D R. & Schor, C. M. 1999 Orientation tuning of the transient-stereopsis system. *Vision Research*, 39, 2717-2727.
- Deruelle, C., Barbet, I., Depy, D. & Fagot, J. 2000 Perception of partly occluded figures by baboons (*Papio papio*). *Perception* 29, 1483-1497.
- De Weert, C. M. M. & Sadza, K. J. 1983 New data concerning the contribution of color difference to stereopsis. *Color Vision: Physiology and Psychophysics*, Eds. J. D. Mollon, et al. (London Academic Press), 553-562.
- Foley, J. M. & Held, R. 1972 Visually directed pointing as a function of target distance, direction, and available cues. *Perception & Psychophysics*, 12, 263-268.
- Forkman, B. 1998 Hens use occlusion to judge depth in a two-dimensional picture. *Perception*, 27, 861-867.
- Fujita, K. 2001 Perceptual completion in rhesus monkeys (*Macaca mulatta*) and pigeons (*Columba livia*). *Perception & Psychophysics*, 63, 115-125.
- Gillam, B., Chambers, D. & Russo, T. 1988 Postfusional latency in stereoscopic slant perception and the primitives of stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 14, 163-175.
- Gillam, B., Flagg, T. & Finlay, D. 1984 Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, 36, 559-564.
- Gogel, W. C. 1972 Scalar perception with binocular cues of distance. *American Journal of Psychology*, 85, 477-498.
- Gregory, R. L. 1977 Vision with isoluminat color contrast.: 1. A projection technique and observations. *Perception*, 6, 113-119.
- Halpern, D. L. 1991 Stereopsis from motion-defined contours. *Vision Research*, 31, 1611-1617.
- Jimenz, J. R., Rubino, M., Hita, E. & Jimenz, B. L. 1997 Influence of the luminance and opponent chromatic channels on stereopsis with random-dot stereograms. *Vision Research*, 37, 591-596.
- Johns, R. 1977 Anomalies of disparity detection in the human visual system. *Journal of Physiology*, 264, 621-640.
- Johnston, E., Cumming, B. G. & Landy, M.S. 1994 Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*, 34, 2259-2275.
- Kaniza, G., Renzi, P., Conte, S. & Guerani, L. et al. 1998 Amodal completion in mouse vision. *Perception*, 22, 713-721.
- Kaufman, L. & Rock, I. 1962a The moon illusion. *Scientific American*, 207, 120-130.
- Kaufman, L. & Rock, I. 1962b The moon illusion. *Science*, 136, 953-961.
- Kaufman, L. & Kaufman J.H. 2000 Explaining the moon illusion. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97, 500-505.
- Kingdom, F. A. A. & Simmons, D. R. 2000 The relationship between color vision and stereoscopic depth perception. *Journal of the Society for 3-D Broadcasting and Image*, 1, 10-19.
- Koendrink, J. J. & van Doorn, A. J. 1980 Photometric invariants related to solid shape. *Optica Acta*, 27, 981-996.
- Koendrink, J. J. & van Doorn, A. J. 1993 Illuminance critical points on generic smooth surfaces. *Journal of the optical Society of America A*, 10, 844-854.
- Lankheet, M. J. & Palmén, M. 1998 Stereoscopic segregation of transparent surfaces and the effect of motion contrast. *Vision Research*, 38, 659-668.
- Lee, D. N. 1970 Binocular stereopsis without spatial disparity. *Perception & Psychophysics*, 9, 216-218.
- Lu, C. & Fender, D.H. 1972 The interaction of color

- and luminance in stereoscopic vision. *Investigative Ophthalmology*, 11, 482-490.
- Nawrot, M. & Black, R. 1998 Neural integration of information specifying structure from stereopsis and motion. *Science*, 244, 716-718.
- Osada, Y. & Schiller, P., H. 1994 Can monkeys see objects under conditions of transparency and occlusion. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 35, 1664.
- Patterson, R. 1999 Stereoscopic (cyclopean) motion sensing. *Vision Research*, 39, 3329-3345.
- Pope, D. R., Edwards, M. & Schor, C. M. 1999 Extraction of depth from opposite-contrast stimuli: transient system can, sustained system can't. *Vision Research*, 39, 4010-4017.
- Restle, F. 1970 Moon illusion explained on the basis of relative size. *Science*, 167, 1092-1096.
- Richards, W. 1971 Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 410-414.
- Rogers, B. & Collett, T. S. 1989 The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 41, 697-717.
- Rogers, B. & Graham, M. 1982 Similarity between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270.
- Rogers, B. J. & Bradshaw, M. F. 1993 Vertical disparities, differential perspectives and binocular stereopsis. *Nature*, 361, 253-255.
- Rogers, B. J. & Bradshaw, M. F. 1995 Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces. *Perception*, 24, 155-179.
- Sato, A., Kanazawa, S. & Fujita, K. 1997 Perception of object unity in a chimpanzee (*Pan troglodytes*). *Japanese Psychological Research*, 39, 191-199.
- Schor, C. M. & Heckman, T. 1989 Interocular difference in contrast and spatial frequency: Effects on stereopsis and fusion. *Vision Research*, 29, 837-847.
- Schor, C. M., Edwards, M. & Pope, D. R. 1998 Spatial frequency tuning of the transient-stereopsis system. *Vision Research*, 38, 3057-3068.
- Schor, C. M. & Wood, I. 1983 Disparity range for local stereopsis as a function of luminance spatial frequency. *Vision Research*, 23, 1649-1654.
- Schor, C. M. & Wood, I. & Ogawa, J. 1984 Spatial tuning of static and dynamic local stereopsis. *Vision Research*, 24, 573-578.
- Sedgwick, H. A. 1986 *Handbook of perception and human performance: Sensory processes and perception*. New York, Wiley.
- Sekuler, A. B., Lee, J. A. & Shettleworth, S. J. 1996 Pigeons do not complete partly occluded figures. *Perception*, 25, 1109-1120.
- Simmons, D. R. & Kingdom, F. A. A. 1997 On the independence of chromatic and achromatic stereopsis mechanisms. *Vision Research*, 37, 1271-1280.
- Uomori, K. & Nishida, S. 1994 The dynamics of the visual system in combining conflicting KDE and binocular stereopsis cues. *Perception and Psychophysics*, 55, 526-536.
- Yang, T. L., Dixon, M. W. & Proffitt, D. R. 1999 Seeing big things: Overestimation of heights is greater for real objects than for objects in pictures. *Perception*, 28, 445-467.