

## 序 3次元視研究で得られた主な知見 (2001-2009)

### 1. 両眼立体視研究

#### 1.1 両眼視差の検出過程

(1) 窓枠で視野制限した事態で複数の視差の対応がある場合、窓枠の奥行が視差で明瞭に規定されている条件では窓枠内の視差対応は水平方向に取られるが、その奥行があいまいな場合には窓枠内の斜線と窓枠の縁との交差が左右のステレオペアの斜線の対応を規定する。

(2) RDS 立体視が初見時に成立するためには、左右の刺激対がパヌムの融合範囲内にあることが必要となるが、立体視が成立し形状をもった奥行面が出現すれば、左右対の視差がパヌムの融合範囲を超えても両眼視融合は維持され、立体視も持続する。

(3) パヌムの限定ステレオグラムにおいては、片眼の2本の線分のいずれかは他眼の1本の線分と融合して定位されるが、他方の線分は対応線分をもたず擬似的にも融合しない。そのために、融合線分は刺激面に定位されて知覚されるが、非融合線分は輻輳面に定位されるとする「誤った輻輳による奥行定位説」が提唱され、支持されている。

(4) 生態光学的原因で生起する単眼遮蔽領域は両眼立体視の成立を促進する。

(5) カモフラージュ型のダ・ヴィンチ・ステレオグラムで両眼立体視が可能となるのは、ステレオグラムのパターンのT型の不連続部分が蔽一遮蔽関係として認知的に解釈されるためである。

(6) ダ・ヴィンチ・ステレオグラムの解法のための新たなニューラルモデルが提唱された(Asse & Qian 2007)。このモデルでは、第1段階で第1次視覚野における視差エネルギーモデル(Ohzawa et al. 1990)によって視差が計算され、第2段階で第2次視覚野における「視差一境界一選択的ユニット(disparity-boundary-selective unit)」で視差が引き続いて計算される。

(7) 左右眼への網膜像がオクルージョンによって相違することを示すハーフオクルージョンは、テクスチャ勾配、パースペクティブ、陰影、重なりなど有力な奥行手がかりが存在する場合に手がかりとしての効力を持つ。

(8) 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。

(9) 左右眼への連続的提示による垂直線分の「非遮蔽一遮蔽一遮蔽解除」(sequential monocular decamouflage)は、ステレオグラムと同等の立体視を生起させる。

(10) 左右のステレオペアに対応がないのに立体視が成立する現象には、ファントム・ステレオ視、Stereoscopic Sliver 効果、篩い立体効果(Sieve effect)が報告されている。

(11) ステレオグラムの片ペアのみによって生起する立体視は、非入力眼の中心窩を通る視線に対して粗いレベルの一種の視差対応がとられることによって生じる。

(12) 一義的に奥行と運動方向を規定できない眼球間遅延条件でも、奥行方向と運動方向が正しく知覚されることから、その時間要因と空間要因の両方が初期視覚処理過程で統合されて符号化され、伝達されていると考えられる。

(13) プルフリッヒ効果は運動方向の処理過程とは独立に生起し、両眼間に生じる擬似的視差でのみ規定される。

(14) 窓問題条件のように視差の方向が一義的に決定できない刺激パターンでの両眼視差は、それが交差あるいは非交差のいずれでも、ある固定した視差量をもつもうひとつの刺激パターンの前方に視えるか、あるいは後方に視えるかを決定できないが、2つの刺激パターンの方向成分の差をとることでそれを決定できる。

(15) 持続系型（サステインド型）のステレオグラムは、パヌムの融合範囲内で通常の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、過渡系型（トランジェント型）の立体視では、二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る。立体視が生じ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問題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。

(16) 両眼視差処理過程では、第1次処理過程（輝度差に規定された特徴にもとづく両眼視差検出のモード）がサステインドな輻輳運動過程にのみ対応し、第2次処理過程（明るさコントラストに規定された特徴にもとづく視差検出モード）はトランジェントな輻輳運動過程にのみ対応する。

(17) 両眼立体視における立体の検出は、視差検出を可能にする要因と視差検出を困難にするノイズ要因とのトレードオフで決定される。ダイナミック・ステレオグラム条件での立体検出がスタティックのそれよりも困難なのは、連続して提示されるステレオグラムの観察時での視差検出妨害が蓄積され、結果として「視差検出」／「視差検出妨害」比を大きくするためと考えられる。

(18) 視差とコントラスト感度との関係は、(i)コントラスト感度は視差の増大に伴って変化し、ある視差値をピークとして低下すること、(ii)視差の増大に伴うコントラスト感度の最大値は空間周波数に応じて変わる（低空間周波数ほど視差の最大値は高くなる）、(iii)時間的変化要因の増大に伴うコントラスト感度は10 Hz までには一定、これ以降は低下、またこの感度変化は低空間周波数(0.23、0.94、3.75 c/deg)ほど高いこと、などが明らかにされた。これらの結果から、空間周波数および時間周波数にチューニングする両眼視差チャンネルは、ここではそれぞれ6本あるいは7本あることが示唆されている。

(19) 2種類の視差処理過程に関するこれまでの研究から、(i)細かな視差処理過程では相対的立体距離を量的に処理し、粗い視差処理過程では立体出現方向のみを処理する、(ii)両

眼立体視での1次的過程(輝度差で規定される刺激の処理過程)では融合範囲内で立体視が成立し観察時間が長いほど相対的立体距離の識別は向上する、(iii)2次的過程(各領域の平均輝度を一定にとった条件で明るさコントラストやテクスチャなどで規定された刺激特徴)では融合閾値を超えた領域で立体視が成立する、と考えられる。

(20) 両眼視差検出のモデルがHarvey(2008)によって提唱された。このモデルは特徴検出のために「網膜の光受容器」－「神経節細胞(ガングリオンセル)」－「外側膝状体」－「視覚第1次野」の「視覚のネットワークモデル」、刺激の形状特徴を検出する「特徴マッチングアルゴリズム」、そして「入力マッチングアルゴリズム」から成り立っている。

## 1.2 両眼視差の処理過程

(1) 垂直視差は水平視差(位置視差)を補完し、対象の絶対奥行距離、対象の大きさ、傾きそして湾曲の知覚を規定している。垂直視差が水平視差と異なる点は、垂直視差が有効なためには対象が大きな視角をとる必要があるが、ただ、対象の視角が小さい場合でも垂直視差で規定された背景面が大きければ、当該対象の形状と大きさ知覚に影響をもつ。

(2) 視差対応を計算すべき斜線(視差は設定されていない)の周囲にドットが配置され、しかもそれに垂直視差が設定されている場合、垂直方向の視差と水平方向の視差を成分とするバーチャルな斜方向視差が誘導される(ステレオキャプチャ現象)。

(3) 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率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。

(4) 水平視差の検出には非垂直方向の刺激に同期するニューロンが関与し、そこで検出しプールされた信号によって空間的に分布する水平視差量が計算される。

(5) 視覚システムは、まず運動要因による立体視のための対応を検出し、次いでその対応情報を両眼視差検出に役立てる。

(6) 3次元形状の復元に際して、両眼視差と運動要因は共に線形の間隔を保ちながら剛体性の拘束を受ける。

(7) 両眼視差の処理過程とオプティク・フローの立体視処理過程の間に相互作用が存在する。

(8) 両眼立体視における単眼的役割を、観察者と対象の奥行位置関係および単眼的役割を誘導するそれらの要因の形状に基づいて、(i)前面にある特定の大きさの遮蔽物とその遮蔽越しにある後面の背景から成立した3Dシーンで、左右眼には視差対応の無い完全に異なる領域から構成されているタイプ、(ii)前面にある矩形の遮蔽物とその背景面に位置する棒状の対象が配置された空間、あるいは矩形状に開いた窓から見える背景面とその横手前方向にある棒状の対象が配置された空間から成立した3Dシーン、(iii)背景面の前方に棒状の遮蔽物が単眼要因となって浮かび上がる3Dシーン、の3種類のタイプに分類できる。

(9) 両眼視差とパースペクティブ要因がコンフリクトした場合の知覚的解決では、その解決過程の初期、パースペクティブ要因が奥行方向を規定する。

(10) 両眼視差は陰影要因によって影響を受けず、立体形状を正確に伝達する独立した処理構造をもつ。

(11) 視差検出の初期過程では、ステレオグラムの左右対の位置による視差と左右のステレオグラムの枠内フェーズによる視差の両方が用いられている。

(12) 対象の奥行に関する視方向のキャプチャには水平方向の視差が関係するとともに、キクロピアン眼での視方向すなわち網膜位置情報(local sign)も関係する。

(13) 両眼視差による奥行弁別力は、刺激要素あるいは刺激形状に生態光学的配列に背反する部分があると妨害される。

(14) ステレオ立体視における学習は、ステレオペア間の非対応に関する耐性のしきみを変えるのではなく、視差検出の精度を高める。

(15) 立体視の閾値は、観察距離に伴っては変化しない最少の視差量と、立体視を識別するための最少の視差量の加算で決定される。

(16) ステレオアノマリの程度は、運動要因による立体視と両眼視差立体視の間で強い相関があり、ステレオアノマリの程度が高いと運動視差を追加しても立体視は向上しない。

(17) 両眼立体視と運動視過程は、発達上、密接に関係している。

### 1.3 両眼視差からの立体の復元

(1) 両視差に基づく立体面の伝播効果は、まず、誘導領域の視差が水平方向の輪郭線に沿って伝播される。次いで2次元形状であるテスト領域に立体面が構成されるが、このとき、誘導領域の立体形状がそのまま伝播されるのではなく、被誘導領域の陰影、ドット密度、線分などの形状によって立体面の形状構成が影響を受ける。

(2) 両眼立体視システムは、単眼的奥行情報にもとづいて、実際には左右眼で対応する視差部分が存在しない部分の形状を認知的内挿によって補完できる。

(3) 両眼視差と運動視差が同時に提示された事態での形状の復元では、後続する刺激に運動視差が伴わないと両要因の相互作用による効果は生起しない。

(4) ステレオグラムを構成する刺激が堅固な形状構造物を持つ場合には、両眼視差の示す形状を抑制し、刺激の構造特性が知覚的形状を規定する。

(5) ファントム・ステレオグラムで立体が出現するのは、観察者の面前にある対象によって視差対応をもつ線分の一部が遮蔽されていると視覚システムが解釈する場合である。

(6) 単眼ギャップ・ステレオグラムで立体が出現するのは、ステレオグラムペアの両方には、本来、対応するギャップがあるが、左/右鼻側にある対象によって遮蔽されるために、片眼のステレオグラムペアでギャップが欠けていると視覚システムが解釈するからである。

(7) ステレオグラムの両眼立体視での事態で対象の奥行関係を規定する基準面は、人間が行動する地上面から視覚的に形成される「面」である。

(8) 両眼立体視は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可能になる。

(9) 求心性の眼球情報が両眼視差の網膜情報を変容し、対象の方向知覚を変えることができる。

(10) 両眼立体視は左右眼の同時入力にもとづくことが基本で、左右眼の入力遅延による立体視はこの同時入力の一定の範囲内で可能となる。また、両眼立体視は、各眼での明るさ検出に関わる時間特性に拘束され、明るさを検出する一定の時間が必要となる。

(11) DRDS での両眼立体視は、左右眼に入力された刺激にもとづいてそれぞれの明るさが独立に処理され検出された後で、それら 2 つの単眼的入力が相互に照合されて時間的に統合されることによって可能となる。

(12) 両眼に投影された像は、視差の粗一密に基づく空間周波数に同期したチャンネルを通して分析され、両眼間で対応が検出される。この時、視差の粗一密に従い、粗い視差同士、細かい視差同士で対応が検出されるが、はじめに粗い視差が検出され、次いで粗い視差から細かな視差を反復して検出し、最終的にもっとも細かな視差を検出して検出過程を終える。粗い視差と密な視差の検出は、眼球運動に規定されて処理されるのではなく、高次視覚中枢での視差検出のための粗一密処理システムによっている。

(13) 両眼立体視では、奥行と形状要因は独立した過程でそれぞれ処理された後、ひとつの対象に知覚的に統合される。

#### 1.4 両眼立体視の神経生理機構

(1) マカクを対象とした単一ニューロンの研究および人間を対象とした fMRI の研究結果をまとめると、両眼立体視は視覚領の腹側と背側に関係する。これは初期視覚領である V1、V2、V3 での処理を受けたもので、腹側は V3A、V5/MT、MST、V7 が、背側は V4、IT、V8 がそれぞれ関係する。腹側の視覚領は輻輳運動を、背側のそれは 3 次元の形状をそれぞれ出力する。すなわち、両眼視差は、第 1 視覚野での処理を受けた後、ひとつは腹側の視覚野に伝達され、視差融合に関係した輻輳運動を誘導し、粗い視差の検出を行い、また背側に伝達された情報では、対象の形状表面の詳細な構造の検出と 3 次元光景内の対象の配置を検出する。

(2) マカクの単一ニューロンの研究によると、視差対応の第 1 段階では各眼からの刺激のエッジ部分が受容野内に揃った時に対応づけがなされ、第 2 段階では片眼のエッジ部分と他眼の他の部分との視差対応が行われる。この第 2 段階は V1 ではなく、これ以降の視覚領で行われる。

(3) マカクの単一ニューロンの研究によると、MT 野は細かな視差、つまり相対的な視差の検出を担わず、粗い視差の検出のみを担う。

(4) マカクの 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。

(5) 両眼立体視と 3 次元対象の知覚のための神経生理的階層モデルが提示された。このモデルでは、左右眼からの情報は、外側膝状体、V1、V2、V4 の各視覚領で段階的に処理される。そこでは両眼立体視に必要な処理、すなわち、両眼立体視のための輪郭線の検出 (V1)、

単眼立体視のための輪郭線の検出 (V1)、対応問題の解決と輪郭線の統合 (V2)、そして対象の面の構成 (V4) が行われる。

(6) 視野闘争過程を説明する神経生理モデル (3D LAMINART model) が提唱された。刺激が入力されると、V2 の 2/3 層で隣接し共線の関係にあるペア・ニューロン内での比較的長期の興奮と短期の抑制の相互作用によって知覚グルーピングがなされる。次に隣接した位置にありしかも刺激方向が異なる双極ニューロンは、自己の知覚グルーピングを優先支配させるために競合する。最後に順応過程が続き、時間経過に伴って最初に優先支配した知覚体制が妨げられて弱まり、別の知覚体制へと変わる。

### 1.5 両眼視融合と視野闘争

(1) 両眼間の視野闘争の説明には、眼球間抑制仮説と類似特徴抑制仮説がある。両仮説を検討した結果、誘導刺激とテスト刺激の類似性に関係なく、常に優位に出現している眼球側の刺激検出感度が高くなることが示され、眼球間抑制仮説が支持されている。

(2) この両眼間抑制は、単に抑制をもたらす刺激に関わる局所的な過程ではなく、その刺激から離れた位置にも影響する空間的伝搬効果もある。

(3) 初期の視覚野で単眼視を担うニューロン間での両眼間抑制過程が両眼間マスキングとそれに続く視野闘争に共通に関係している。

(4) 視野闘争条件での眼球間の抑制は、左右眼からの刺激の交叉領域を除いた領域で起きている。

(5) 視覚システムは、知覚的充鎮によってターゲット刺激が知覚的に消失していても、左右眼の対応／非対応情報を処理している。

(6) ステレオアノマリの型とバージェンスアノマリの型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。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ことから、両眼視差過程と視差輻輳融合過程は、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。

(7) 融合閾を越えているために両眼立体視しても融合しない刺激の奥行は、二重像となる刺激によって起きる輻輳性視差と刺激の視差量の両要因で規定されている。

(8) 両眼間で視差の強度が異なる場合ステレオグラムの片ペアのコントラスト比が平均 2.2 以上になると、垂直方向への眼球運動は、コントラストの高い側が主導して生起し、コントラストが弱い方の眼球運動はまったく生じない総取りの支配が起きる。

(9) 注視時視差は輻輳あるいは開散方向への非対称の輻輳運動に起因して生起する、つまり眼球開散運動の速度が輻輳運動の速度より大きいと外注視時視差が生じ、その逆になると内注視時視差が生じる。

(10) ステレオグラム観察時の初動の「水平視差に駆動された輻輳運動」は、初動の「垂直視差に駆動された輻輳運動」より優位であり、これは視差検出器の多くが水平方向の視差に対してバイアスをもつためと考えられる。

(11) 前額平行面が水平方向軸に対して傾斜した事態では視差シアが生起するが、日常ではこの歪みを補正してカウンターバランスするキクロバージェンスが生起する。このキクロバージェンスでは左右眼の各ステレオイメージにおけるキクロバージェンスを誘導する要素がはじめに検出され、その各眼から検出された要素が次に統合されてキクロバージェンスが生起すると考えられている。

(12) キクロ視差による立体視は、両眼間に眼球のねじれが起きてもエピソード線の方が網膜の子午線上に正確に固定され、その結果、両眼間で視差対応がとられるために生起する。

(13) 視野闘争における排他的抑制を説明する仮説として刺激特性依存説と高次過程説とがあるが、視野闘争は刺激特性間の距離が増大すると大きくなること、両眼間闘争ではなく刺激間闘争が生起していること、さらに色相差と奥行差はそれぞれ独立に排他的抑制に関係していることから、刺激特性依存説が支持される。

(14) 両眼立体視にはトランジェントとサステインドの2つのメカニズムが存在し、前者は反対輝度コントラストステレオグラムでも輪郭を検出できるが、後者は検出できない。

(15) 視覚システムは刺激要素の属性の違いである大きさ、明るさ、色相の3要因のうち色相要因を利用できずに左右ステレオペア間の対応に失敗することから、両眼立体視モジュールは大きさと明るさのモジュールとは連関するが、色相モジュールからの情報は利用できないと考えられる。

(17) 明るさコントラスト・パラドックスには、両眼立体視力、運動視閾、副尺視力に共通するメカニズムが働いていて、それは視覚情報処理の初期過程で作用する明るさコントラストの標準化処理に関係している。

(18) 視差のある空間周波数の比率が視野闘争を生起させる空間周波数より大きいときには、両眼立体視過程と視野闘争過程が共存するが、しかしそれらの空間周波数が同一比率の場合には相互に干渉する。

(19) 両眼立体視融合と視野闘争間にヒステリシス効果があり、この効果はフレーム提示持続時間0.5秒で最大となり、2秒では消失する。

(20) 単眼視野闘争と両眼視野闘争の間には類似した知覚特性があることから、図地反転などの知覚的多義性の解決に関わる高次の知覚過程が関与する。

(21) 両眼視野闘争は生態的に劣位な刺激パターンが抑制されることから、生態的に重要である知覚的特徴をもつ形状が入力されると抑制を解除するしくみがある。

## 2. 運動要因からの3次元視

### 2.1 運動視差の奥行手がかりの特性

- (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する。
- (2) 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。
- (3) 運動視差による奥行出現量や奥行出現方向などは、「『網膜運動速度』対『眼球追従速度』の比の原理 (M/PL)」で正確に予測できる。
- (4) 運動視差による3次元形状の復元においてパースペクティブ要因は比較的図形が小さいとき(視角 $8^\circ$ )に効果が高く、また加速度要因は形状復元のための知覚を容易にする。
- (5) 運動視差による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伴う網膜像外の要因とが関与し、とくに網膜像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。
- (6) 頭部運動から発せられる自己受容的感覚情報は、運動視差による絶対奥行距離の知覚に有効である。
- (7) 網膜像外の手がかりである眼球運動要因は、対象の奥行運動の方向の知覚において単独で有効な奥行手がかりとして機能している。
- (8) 第2順位運動刺激(等輝度分布をするテクスチャ、フリッカー、コントラスト・モジュレーション)で構成されたパターンの運動視差立体視は、それらの運動刺激を構成する要素を視覚的に追尾することで成立するが、しかし運動視差量に対応した奥行視はできない。
- (9) ステレオキャプチャ(両眼視差が存在しない領域が両眼視差のある領域に囲まれると、その部分が視差領域に捉えられて立体的に知覚される現象)と同様な現象が運動立体視でも生じることから、運動立体視と両眼立体視はともに共通のメカニズムを持つ。

## 2.2 運動視差の処理過程

- (1) 運動視差は狭い帯域幅を持つ複数のチャンネルで伝達されていて、これは両眼視差のそれと一致している。
- (2) 安定した奥行印象は頭部運動速度が奥行閾値と運動閾値(両眼視差量に換算)との間にある場合に生起する。また、視かけの奥行は、頭部運動速度が一定の場合で運動視差量が小さい条件ではその増大に伴って増量するが、視差量が大きくなると視かけの奥行量が減少するとともに運動印象も随伴する。
- (3) 運動視差による奥行視には眼球運動の方向とその大きさを示す網膜像外の情報が重要な手がかりとして組み込まれている。

### 運動視差と絵画的奥行手がかりとの関係

- (1) 視覚システムは、大局の手がかり(運動視差)と局所の手がかり(テクスチャ、対象の大きさ)とを統合して全体のシーン構造を成立させるが、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ある。



## オプティック・フローの3次元視効果

(1) 視覚システムがオプティック・フローを自ら解析して観察者自身の動きを抽出するためには、両眼視差と絵画的要因の両方が必要となる。

(2) 観察者自身の移動についての主観的距離算定は、観察者が周囲からのオプティック・フローにもとづき自身の移動速度をどの程度に見積もるかによって規定される。

## 2.3 運動要因による3次元視の生理的機構

(1) アカゲザルの視覚野 (V1) の単一ニューロンうち 70 % のものは、単一絶対的速度条件より相対的速度条件に強く応答し、図と地の分離、そして運動速度の不連続の検出に重要な役割を担う。

## 加齢と運動視差立体視

(1) 運動視差にもとづく立体視は加齢にともなって損なわれることはないが、しかし凹凸形状識別能力は低下する。

## 3. 絵画的要因からの3次元形状知覚

### 3.1 3次元形状知覚の絵画的要因

(1) 2次元画像における対象の面形成は、面、線、エッジ、頂点などの間で生じる奥行関係を曖昧なものにしないという内的拘束の枠内で処理されるが、もし2次元画像の奥行関係で複数の解釈が可能なときには、次の諸点からシーン理解が選択される。(1) 2つの対象が奥行関係で近接している (近接性)、(2) 形成された面が平面的で滑らかである (スムーズ性)、(3) 形成された面が前額平行な面、あるいは地面に近似している (前額平行面もしくは地面選択性)、(4) 観察者の関心、あるいは注視点。

(2) 2次元画像から3次元立体形状復元のためのコンピュータ・モデルでは、形状復元のために次のような3通りの拘束条件が設定された。(1) シンメトリ (対称性)、(2) 平面性 (planarity)、(3) 最大簡潔性 (maximum compactness) と最小表面積 (minimum surface)。簡潔性は  $V2 / S3$  (ここで  $V$  は対象の体積、 $S$  は対象の表面積) で表される。このモデルの特徴は奥行手がかりを一切利用していないことであり、また立体の復元計算にあたっては最大簡潔性と最小表面積との間で最適値を得ることにある。

(3) テクスチャ要素が輪郭図形の場合、フェーズスクランプリングによる奥行視妨害効果が最も小さいことから、テクスチャからの3次元形状復元のためのコンピュータ・モデルが提唱された。そのアルゴリズムは、はじめにテクスチャ要素の輪郭を検出し、次いでその要素の密度比を求めるというもので、密度比は、 $D_{min}$  (たとえばシリンダーの観察者側に最も近い位置の値) と  $D_{max}$  (シリンダーの観察者側から最も遠い位置の値) から求められる。

(4) 視覚野の V1、V2 そして V4 の働きから2次元イメージを3次元形状に復元するためのニューラルモデル (LIGHTSHAFT MODEL) では、まずイメージ内の2次元のテクスチャ要素からなるパターンを滑らかな3次元面上のパターンに変換、次いで3次元形状の空間内に散在するテクスチャの各要素を統計的な特性値に基づいて知覚的3次元形状に復元する。こ

のモデルは、3次元形状復元に関する神経生理的処理過程を踏まえたコンピュータ・モデルであり、シミュレーション実験の結果、テクスチャからの3次元形状復元に限定した場合、その復元に成功している。

(5) パースペクティブに対する強靱性は、視点が移動しても人間の視覚システムがあたかも投影の中心点から見たシーンであるかのようにシーン構造を補償するからと説明される。この理論を検証した結果、対象の面が視えない条件ではパースペクティブの強靱性は補償されないが、対象の面が視える条件では、それは十分に補償される。

(6) 陰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、その処理過程が異なる。

### 3.2 絵画的要因の奥行きがかり効果

(1) 静止的の手がかり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。

(2) 絵画的要因間に関する加算の効果のモデルには、「確率的加算効果モデル」、「理想的加算効果モデル」、そして「線形加算効果モデル」がある。これらのモデルの妥当性を検討した結果、2通りの包括的な奥行きがかり加算モデルが提示された。モデルAでは、2つの加算回路(S1、S2)が設定され、S1の回路のみが閉じていると「確率的加算効果」が、S1とS2の回路が閉じていると「理想的加算効果」が、そしてS2の回路のみが閉じていると「線形加算効果」が生起する。一方、モデルBは「理想的加算効果」の変形モデルであり、その違いはノイズの加わる位置が出力後に移されたこと、また加算後の出力後にもノイズが付加されたことである。これらのモデルでは、絵画的要因間に加算的效果が存在すること、さらに各絵画的要因は独立したモジュール構造をもつと共に加算回路も併設されている。

(3) 奥行きがかりの加算効果が奥行き順序の判断の正確度と速さに関するかを検討した結果、(i)視覚的な重なり順序の判断の正確度は複数の手がかりが組み合わせられた条件で高いが、オクルージョン単独条件は他の条件に比較して劣ること、(ii)重なり判断のための反応の速さの差は最初に反応するまでの潜時に表れ、単独手がかり条件に較べて3種類の手がかりが組み合わせられた条件の方が短いこと、などから各奥行きがかりは単独モジュールで処理され、それらが手がかりごとに重みづけられて加算され、最終的な奥行き・立体効果を生み出すと考えられる。

(4) 対象の奥行き関係から、視えのオクルージョン関係、および視えの明るさと視えの透明性の関係を規定するための2つの原理が提案された。その1は、両眼視差をもつ輪郭線の隣接部分の明るさコントラストが異なる場合、より遠くに配置された輪郭線はこれを囲む領域を取り込んで背景面とするという原理である。その2は、視えの透明性に関する原理で、隣接する領域間の連続する輪郭の明るさコントラストの差が全体のパターンのなかでもっとも高い場合には、その領域は平板な面として知覚され、別の隣接する領域間の連続する輪郭の明るさコントラストの差がこれより低い場合には、この領域には複数の層(レイヤー)が出現するという原理である。

(5) テクスチャにおいては、奥行傾き角度が大きくなると傾きは正確に知覚できること、奥行の傾きが前額に平行な傾き面の場合にはテクスチャの種類によって視覚的傾き判断に差が生じること、そして円形不規則配列がもっとも奥行効果が強く、ノイズパターンがもっとも弱い。

(6) 視えの相対的奥行にはテクスチャコントラストとエリアコントラストが相互に影響している。

(7) 視点が変化するとパースペティブ構造も変形するが、シーンの知覚は堅固である。これを説明する仮説には、「遠近－変形仮説」と「輻輳中心点補償仮説」という2つの仮説があるが、検証実験の結果、「遠近－変形仮説」が支持されている。

(8) 2次元画像の各対象の視えの奥行はその物理的奥行と一義的には対応しないが、その視えの奥行がユークリッド的特性をもつよりアフィン特性をもつと仮定すると、被験者間の視えの奥行は良く一致する。

### 3.3 絵画的要因と認知的要因

(1) 凹面の顔(hollow-face)」の錯視は、熟知度、正立提示条件、陰影効果、および面の着色の要因によって促進されることから、「トップダウン説」と「ボトムアップ説」の両説明仮説が支持されている。つまり、対象のあいまいな解釈が可能な条件を持つ場合に凸面を知覚するという一種の知覚的選好がはたらいて「凹面の顔」の錯視は生起するものと考えられる。

(2) 図と地の分擬の規定要因には、面積、明るさ、ゲシュタルト要因などがあるが、とくに凸形状要因は注意を集めやすいので図となりやすく、一方凹形状は地となりやすい。

(3) オクルージョン錯視の説明仮説として、部分的補填拡充仮説と視えの奥行距離仮説があり、両仮説を実験的に検討した結果、遮蔽対象の大きさは奥行距離を大きく取ると過大視されたが、しかしその視えの奥行距離は知覚的大きさの増大に対応しては大きくならなかったことから、部分的補填拡充仮説が支持されている。

(4) 図を規定するものはエッジと面である。エッジがどの形状に属するかは、ゲシュタルト要因の中の良い連続の要因によって規定され、面がどの形状に属するかは、面上の質的類似性（色、明るさ、テクスチャの類似性）によって規定される。

(5) 6月齢以後に白内障の手術を受けた被験者群は健常者群に比較して主観的輪郭の認知反応時間が長くなり、また誤認知が多くなることから、生後6月齢以内に正常な視覚経験をもたないと、視覚認知能力が永久に損なわれる。

### 3.4 絵画的要因の神経生理機構

(1) 奥行傾斜面や湾曲面を検出するための神経生理学的モデルである積層皮質モデル(Laminar cortical model)には、(i)刺激パターン内で共有される線分と角度を検出できる、(ii)奥行傾斜面刺激の角度と両眼視差勾配からパターン内の3次元境界を形成できる、(iii)充填効果が生起して面が形成できる、という特徴がある。

(2) バックワード・マスキングによって“shine-through effect”という図一地の分離が生起することからこの現象のシミュレーションを 3D-LAMINART 理論にもとづいて実施した結果、同様にこの種の現象が生じ、したがって図一地分離が生起することが確かめられた。

(3) 脳梁欠損児童群は健常児童群に比較して有意に反転回数が低いことから、脳梁が図形の反転の生起の有無には関係していないが、しかし 2 通りの安定した視えが生起した後での知覚反転に、注意の調整という役割を通して影響している。

#### 4. 奥行手がかりの統合モデル

(1) 奥行手がかりが複合している場合、それらの手がかりは非線形の相互作用をしていると「手がかりの強い統合モデル」は予測するが、「手がかりの弱い統合モデル」ではこのような相互作用は排される。2つの奥行手がかりを抗争させた結果は、その統合が複雑なことが示され、「手がかりの弱い統合の修正モデル」が提唱され、さらにこれを修正した新しいモデル”Intrinsic constraint model”が提案された。「手がかりの弱い統合の修正モデル」では、各奥行手がかりが単独で機能し、しかもバイアスのない奥行評価ができることを仮定して統合される奥行評価（復元される 3 次元形状）は統計的に最少の偏差をもつ最適なものになると考えるのに対して、新しいモデルでは各奥行手がかりが単独で機能することを仮定せずに、各奥行手がかりからの情報を統合することでもっとも妥当な奥行評価を計算することができると思う。

(2) 複数の奥行手がかりが観察シーン内に存在する場合には、視覚システムは個々の手がかりの奥行効果を評価し、次いでそれらの評価値に重みを付けて加算し、最終的にシーンの奥行値を算定するが、その重み付けは各手がかりにもとづく知覚値の分散値が最少となるときに最適となると仮定される。個々の奥行手がかり内で生起するこのような分散が重み付けの段階で生起するならば、分散の重み付けの結果として知覚された奥行値の分散値は個々の奥行手がかりで評価された奥行値間の差に比例して増大するので、両奥行手がかりが同一の奥行方向を示している場合にはこの分散値は小さく、両奥行手がかりが抗争している場合には大きくなると予測できる。したがって、個々の奥行手がかりが同一の奥行方向を示している場合には、知覚された奥行値は正確な値となる。実験で検証した結果、この予測に反して、知覚的抗争が明瞭に知覚されているにもかかわらず、複数の奥行手がかりの一方が除去されずに最適な奥行値を得るために加算されていることが明らかにされた。

(3) 3次元形状の復元は、「各奥行手がかりモジュールから出力された形状値の加算的総和 (shape by cue x, cue-dependent)」によるとする考え方と、「各奥行手がかり効果を相互作用させた上で得られる形状値 (shape by cue combination, cue-invariant)」によるとする考え方とがある。この両仮説を実験的に検証した結果、両方とも 3次元形状の復元に際しては奥行手がかりの統合過程で機能しているとの結果が得られた。

複数の奥行手がかりの統合

(1) 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形状の凹凸パターンを表示するとき、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的総和で規定される。

(2) 視覚システムは大きさ知覚と奥行距離知覚を分離して処理し、その際に働く奥行手がかりはそれぞれの知覚場面で異なっている。このことは、「大きさー距離不変仮説」を支持する。

## 5. 視空間の構造

(1) 両眼視差要因のみで作成された条件では、大きさの恒常性とは異なり、形の恒常性は生起しない。

(2) 近刺激のレベルでの相関分析では、視角は視覚的距離要因を考慮した後に視覚的大きさに変形処理されるとする視覚的距離考慮モデル(taking-into-account model)が支持される。ただし、遠刺激のレベルの相関分析では、視覚的大きさと視覚的距離との間に正の相関がみられず、直接知覚モデルが支持される。

(3) 観察者の眼前に水平と奥行方向への広がりをもつ視覚的な面がどのような視覚処理を経て構成されるかについての仮説「連続的の一面ー統合化仮説」が支持されている。

(4) 対象の形状知覚と絶対奥行距離知覚は、それぞれが異なる過程で処理されている。

(5) 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)があるが、大きさ尺度仮説が支持される。

(6) 月の錯視が生起する条件は、月が水平線の際に位置された場合、奥行手がかり数の多い場合、そして背景輝度が暗い場合で、とくに、「リニアパースペクティブ+重なり要因」は月の錯視を大きくさせるが、水平線の高さは影響しない。月の錯視が起きている条件では、月までの視えの距離は遠くなる。

(7) VR空間とビデオカメラによる空間での絶対的奥行距離知覚は、現実空間と較べて過小視されている。

(8) ガンツフェルト知覚現象は、「堅固なものの知覚」ー「視空間の面の歪み」ー「対象性の喪失」ー「何か漠然としたものの接近（何か障壁が形成されるような経験）」ー「何か漠然としたものの接触」ー「外界との一体化（融合）」といったフェーズで変化する。これらのフェーズの変化は、視覚が外の世界と自己の内界とが不可分に一体化した状態から、観察者のアクティブな行動によって外界と自己の内界とが分離し、最終的には外の世界の外在化が生起することを示唆する。

(9) 左右反転眼鏡着用実験の結果は、両眼視差の処理過程が変容するばかりではなく、視えの絶対奥行距離を規定する諸手がかりの優位順序が変化することを示す。これは諸手がかり間の相互作用の存在を示唆し、強い統合モデルを支持する。

- (10) 窓枠などで遮蔽され、それ以上は見ることができない視野の境界を、見かけ上、拡大し、実際は遮蔽されて見えない対象まで知覚させる「視野境界の拡大」の効果は、境界の枠外にある対象についての情報を提供する知覚あるいは記憶のスキーマの働きによっている。
- (11) あるエッジと他のエッジとの間にギャップがあっても、そのエッジは3次元空間内で方向と位置とが一致すれば、他のエッジに連結するしくみを、視覚システムはもつ（3次元関係づけ理論）。
- (12) オプティク・フローの放射状運動パターンにジッターあるいはオシレーション運動を追加すると、ベクシオンを増強する。
- (13) 対象の視覚認知では、対象のイメージデータと対象の構造的記述が相互に排除するものではなく、イメージデータから構造的記述へと移行して参照される。

## 6. 3次元視空間の発生と発達

- (1) 運動視差立体視は16週齢になると明確に可能になる。
- (2) 陰影要因は5月齢乳児では奥行手がかりとして無効であるが、7月齢乳児では有効となる。
- (3) おおよそ7月齢乳児はY構造要因から3次元形状を知覚できる。3月齢乳児は、線形Y構造が陰影によって強化されている場合に、それを3次元形状図形として知覚できる。
- (4) 陰影と隣接面接合要因が絵画的な3次元手がかりとして働く発達の臨界期は6月齢と7月齢の間にある。
- (5) 8月齢乳児は、主観的輪郭図形を物体が隠れるリアルな対象として知覚している。
- (6) 児童は、描画に際しては描画対象とその構造的表象との両方の影響を受けながら描画するが、このとき、その構造的表象は柔軟に変容すると考えられる。
- (7) 61～78歳の高齢者群は、テクスチャ、両眼視差、運動視差による傾斜面を正確に知覚できる。
- (8) 7～23週齢の乳児の調節と輻輳の潜時の間には強い相関があることが示されたことから、眼球の焦点調節作用と対象に対する両眼の輻輳作用とは視覚経験を通して発達し精緻化されていくと考えられる。
- (9) バブーンは、パースペクティブ要因とテクスチャ勾配要因をそれぞれ背景にもつパターンで、顕著に大きさ錯視を生起させている。