

# 心理学における 3 次元視研究の動向—2005

## 3-Dimensional Perception in Psychology: 2005 Research Trends

林部 敬吉

Keikichi HAYASHIBE

概要：視覚心理学における 3 次元視研究の 2004 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、3 次元視空間の知覚に分類して報告した。

キーワード：両眼立体視、運動視差、絵画的要因、3 次元視空間

**Abstract:** The papers of 3-dimensional visual perception in 2004 were reviewed in the fields of stereoscopic vision, depth from motion cue, pictorial cues and 3-dimensional space perception.

**Keywords:** binocular stereopsis, motion parallax, cues of picture, three-dimensional space

## 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 2004 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. 粗い視差と細かい視差の間の相互作用

ランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) の対応問題を解決するための Marr & Poggio (1979) によって提唱された計算モデルは次のような手順による。まず、両眼に投影された像は、視差の粗 - 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 - 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、これが眼球

輻輳運動を制御して次に細かな視差の検出を誘導する。両眼視差検出システムは、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過程を終える。

粗い視差から細かな視差へと対応問題を解決して視差検出がおこなわれるとするこのモデルは、マスキング法 (Campbell & Kulikovski 1966, Glennerster & Parker 1997, Julesz & Miller 1975, Prince et al. 1998, Shiori et al. 1994, Wilson et al. 1983, Yang & Blake 1991)、順応法 (Blakemore & Campbell 1969, Regan & Beverley 1983 1985, Regan 1982)、閾下刺激法 (Graham & Robson 1987) で検討され、広く受け入れられている。一方、「粗 - 密」視差間の相互作用については、いまだ明らかにされていない。Gheorghiu & Erkelens (5) は、刺激提示の時間を操作してサステインド型とトランジェント型の刺激に対する両眼立体視反応がどのように変わるかをしらべた。実験では、図 1 に示されたように、ダイナミック・ランダム・ドット・ステレオグラム (DRS) を反復して提示する条件 (トランジェント条件) と、1 回のみ提示する条件 (サステインド条件) と

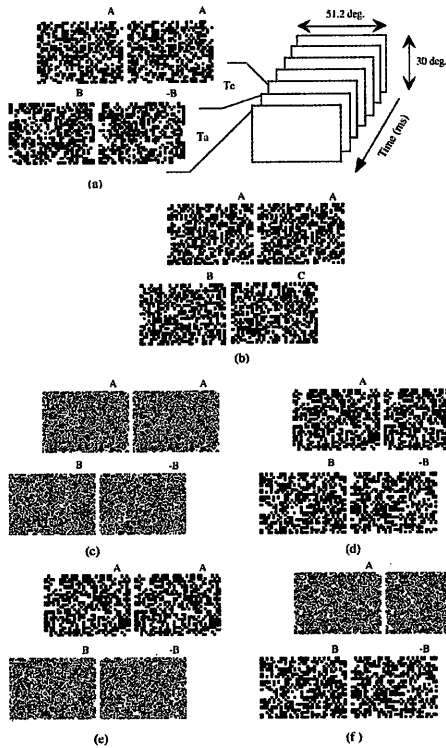


図1 サステインドとトランジェント刺激提示条件での視差検出におけるステレオグラムの構成要素の「粗-密」提示順序の影響を調べる実験パラダイム。A: コラレート・ステレオグラム、B: アンチコラレート・ステレオグラム、C: 左右ペアで対応のないステレオグラム(Gheorghiu & Erkelens 2004)

で、四角形が立体視されて検出できるかどうかがしらべられた。

サステインド条件では、最初に左右のステレオペアで対応のあるステレオグラムが提示された後、(1) 左右のペアで明るさコントラストが反対となるアンチコラレートステレオグラム (anticorrelated stereogram) を提示する条件、(2) 左右のペアで対応を持たないステレオグラムを提示する条件が設定された。ステレオグラムの粗-密は、ドット (実際は小さな矩形) の大きさを 24, 12, 6 arcmin の3段階に変化させ、前刺激と後刺激間の関係を (1) 両刺激とも等価、(2) 前刺激が粗ステレオグラム、後刺激が密ステレオグラム、(3) 前刺激が密ステレオグラム、後刺激が粗ステレオグラムの条件を設定した。こ

の時、粗ステレオグラムには24 minarcのドットから構成されたものを、密ステレオグラムには12 minarcと6 minarcのドットで構成されたものを使用した。前刺激が提示され次いで後刺激が提示されて終了するまでの時間は、14~168 msの範囲で14 msステップで12段階に変化した。トランジェント条件は、前刺激に続く後刺激の提示は1回のみとする以外は、サステインド条件と同等に設定された。

立体閾値の測定は、後刺激提示後の四角形がステレオグラムの右/左のいずれにあるかの判断を被験者に求めることで行われた。その結果、立体視のためのステレオグラムの左右ペア間の対応の検出には、(1) サステインド条件の時間特性とパターンの粗/密とは無関係であること、(2) サステインド条件で関係するのは、前刺激と後刺激間のパターンの粗-密の相対的な差であること、(3) トランジェント条件の時間特性とパターンの粗/密条件とは互いに無関係であること、(4) トランジェント条件で関係するのは前刺激と後刺激間のパターンの粗-密の相対的な差であること、(5) トランジェント条件での視差検出の抑制はコラレート・ステレオグラムとアンチコラレート・ステレオグラムの提示順序に規定されること、(5) 眼球運動はステレオグラムパターンの粗い条件から細かな条件への視差検出に関係しないこと、(6) 粗いステレオグラムの検出過程は細かなステレオグラムの検出過程を強力に抑制するが、細かなステレオグラムの検出過程は粗いステレオグラムの検出過程を抑制する力は弱いこと、などが明らかにされた。

これらの結果から、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-密処理システムによっていることが示唆されている。

## 2.2. 形状復元における両眼視差と運動視差の相互作用

両眼視差にもとづいて形状を復元する場合、

対象までの観察距離、眼球間距離などの手がかりが必要とされ、また、運動要因にもとづく形状復元でも眼球の回転、観察者の運動についての手がかりが必要とされる。しかし、両眼視差と運動視差とが同時に利用できる条件では、この両要因だけで形状の復元が可能となる (Richards 1985)。一方、両眼視差と運動視差の両方から得られた視覚的観察距離の手がかりは、形状復元には何らの影響を与えないことも報告された (Brenner & van Damme 1999, Brenner & Landy 1999)。

Champion et al. (2) は、両眼視差と運動視差の両要因による形状の立体視とこの条件から運動視差要因を除いた条件での形状の立体視を反復提示した場合の両要因の相互作用について検討した。実験は、楕円をシミュレートして提示し、X軸に関して回転させて提示した。楕円のX軸とY軸は等価に設定、Z軸 (奥行) を他の軸に対して長、短、等価に変化させた。楕円のテクスチャとしては小さな三角形を貼り付けた。この三角形は楕円が球の場合には正三角形とし、楕円の場合には長軸にあわせて三角形の一辺の長さを伸張させてそれぞれ提示した。実験では、楕円の視えの幅 (長軸) と奥行とをマウスの操作で視かけ上、球に復元する方法で形状知覚の正確度を測定した。楕円は両眼視差と運動視差とで作られているが、観察では運動する楕円と静止した楕円とが交互に提示された。楕円の提示距離は 40 cm と 80 cm とし、実験ではランダムに提示された。結果の予測としては、運動する楕円の観察後、静止した楕円を観察した場合、その楕円の提示距離が異なる条件に比較して運動する楕円と同一距離条件の方が形状復元は正確に行われると考えられた。しかし、実験結果はこの予測を支持しなかった。このことから、両眼視差と運動視差が同時に提示されても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ことが確認されている。

### 2.3. 両眼視差による対応検出と運動における立体視の対応検出での相互作用

両眼視差立体視が可能になるためにはステレオグラムの左右ペア間の対応問題を解決する必要がある。同様に運動視における立体視でも、運動を検出するためには時系列上で、ある時刻の運動要素とその後の運動要素の位置変化を検出する必要がある。とくに、運動視差立体視では、この対応問題を解決が求められる。両眼視差と運動視差とが密接に関連していることは、両眼視差と運動視差からの奥行情報が統合されてひとつの立体視が成立することからも明らかにされた (Bradshaw & Rogers 1996, Cornilleau-Peres & Droulez 1993, Hibbard & Bradshaw 2002, Johnston, et al. 1994, Landy, et al. 1995, Richards 1985)。また、運動刺激への順応はテスト刺激とした奥行方向に回転する多義的な 3次元形状の知覚に影響すること (Nawrot & Blake 1989, 1991a, 1991b)、さらに運動残効は両眼視差量に規定されて出現することなど (Anstis & Harris 1974, Verstraten, et al. 1994) が示され、いずれも両眼立体視と運動視との相互作用を支持した。

しかしながら、両眼視差の対応問題と運動視での立体視における対応問題が、視覚処理過程のどの段階で生起するかは、すなわち、両眼視差と運動視の対応が、それぞれ独立した過程で最初に処理され、その後で統合されるのか、あるいは最初から統合されて対応問題が処理されるのかいまだに不明である。Muller et al. (18) は、運動視と両眼立体視における対応がどの程度強固に結合しているかをノイズを妨害刺激として操作することで実験的にしらべた。刺激は、ランダム・ピクセル・パターンとし、それを 2 台のディスプレイを通し、ハーフミラーを挟んで融合させて提示された。ノイズパターンは、刺激パターンに重ねて提示された。実験条件は、左右眼への刺激が対応をもつ条件と対応をもたない条件が設定された。両眼視実験では、左右への刺激には視差は導入されず、また刺激は運動

条件と静止条件とで提示された。さらに、対応する刺激要素を制限するために矩形の観察窓が設けられ、その大きさと縦横比が変えられた。被験者は、この観察窓を通して左右眼に別々に提示される運動あるいは静止パターンを観察し、運動パターンでは運動が知覚できるかについて、両眼視差パターンではそれらに対応があるかについて判断した。刺激提示は、2つの刺激を継続的に提示し、どちらかの刺激を強制的に選択する2刺激強制選択法で行われた。運動視と両眼視差での対応問題を比較するために、刺激の平均輝度、運動速度、両眼視差（ゼロ視差）など時間的、空間的条件は、運動視実験と両眼視差実験とで同等に設定された。

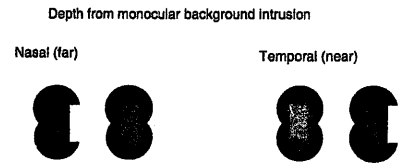
実験の結果、(1) ノイズを加えると、両眼視差対応の方が運動視での対応より強い影響を受けること、(2)、面積を固定したまま観察窓の形状（縦横比の変化）を運動方向に対する長さを短くするように変えると、運動視での対応の検出は減少するのに対して両眼視差での対応検出は低下しないこと、(3) 両眼視差と運動視での対応検出閾値がそれぞれ等価になる刺激条件を選び、両条件で両眼視差と運動視の対応検出力を比較すると、運動視の刺激条件は両眼視差の対応を促進するのにに対して、両眼視差刺激条件は運動視での対応を促進しなかった。これらの結果から、視覚システムは、まず運動視のための対応を検出し、次いでその対応情報を両眼視差検出に役立てていると推測される。

### 2.4. ダ・ヴィンチ ステレオプシスの条件

ダ・ヴィンチ ステレオプシスとは、両眼で光景を見るとき、近方にある対象が遠方の対象の一部を遮蔽するように片眼に投影され（単眼オクルージョン条件）、このときに両眼間に対応しない部分が生じて両眼立体視が成立することをさす。Cook & Gillam (6) は、ダ・ヴィンチステレオプシスには、単眼オクルージョンの他に、カモフラージュ・オクルージョンがある

と考えた。これは、近方の対象の色彩が遠方の対象の一部の色彩と同一な場合に、片眼に投影された遠方の領域の色彩は近方のそれと共有しあって融け合い、結果として一種のカモフラージュが生起し、両眼間で対応しない部分が生じることを言う。

(A)



(B)

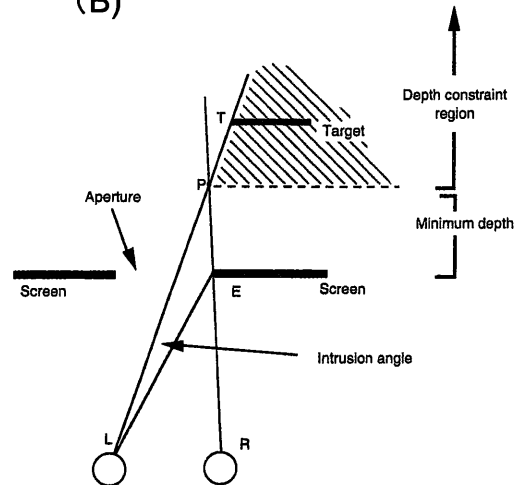


図2 (A) ダ・ヴィンチ ステレオプシスのためのステレオグラム、(B) 両眼立体視で生じる視え方。進入角度 (intrusion angle) を大きくすると出現する奥行が深くなる (Cook, M. & Gillam, B. 2004)

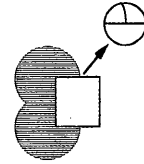
図2は、カモフラージュ・オクルージョンのステレオグラムである。図中 (a) のステレオグラムを両眼立体視すると、左右のステレオグラムで対応しない部分があるにもかかわらず、観察者の前方手前にスクリーンが視え、そのスクリーンの穴を通して背後にターゲットが出現するように見える。観察の結果、手前にあるスクリーンの穴を通して背後の対象が視える進入角度 (intrusion angle) を大きくすると、対象までの奥行も深くなることが示された。ただ、ステ

レオグラムは遠方の対象が鼻側に見える条件とこめかみ側に見える条件が作成されたが、少数の被験者は、一方の条件のステレオグラムしか立体視が出現しないことも明らかにされた。これらの結果から、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、図3に示されたように、ステレオグラムのパターンのT型の不連続部分が蔽-遮蔽関係として解釈されるためとCookらは説明する。平面図形の場合 (a)、T接合構造を持つ部分は蔽-遮蔽関係を持つ部分として解釈されるので立体的に知覚される。同様に、ステレオグラムの立体視の場合 (b) にも、右眼と左眼の網膜像からT型に類似した構造、キクロピアンT接合構造が生起し、これが蔽-遮蔽関係にあるものとして解釈される。この仮説は、カモフラージュ型のステレオプシスを認知的推理で説明するもので、興味深い。今後の検証が必要とされる。

## 2.5. 窓枠で視野制限した事態での 両眼視差対応

ステレオグラムの左右のペア間にある両眼視差対応が複数ある場合、視覚システムはどのような解決を図るのであろうか。図4に示したようなステレオグラム（黒色線は片方のステレオペアを、灰色線は他方のそれを示す）を両眼立体視すると、中央の斜線分が左右の窓枠の手前あるいは背後に立体出現する。このような窓枠で視野制限した事態での視差対応は、次のように4通りある。(1) 水平対応：観察者の水平方向で視差対応が図られる（図中1で表示）、(2) 左右ステレオペアの線分間の垂直方向で視差対応が図られる（図中2で表示）、(3) 左右のステレオペアの線分の先端で視差対応が図られる（図中3で表示）、(4) 窓枠の主方向で視差対応が図られる（図中4で表示）。視覚システムがどのような視差対応方略をとるかで立体出現時の奥行量が異なる。そこで、van Dam & van Ee (25) は、立体出現時の奥行量を別に提示したプローブ刺激の視差量とのマッチングで測定した。測定で

(a) T junction



(b) Cyclopean T junction

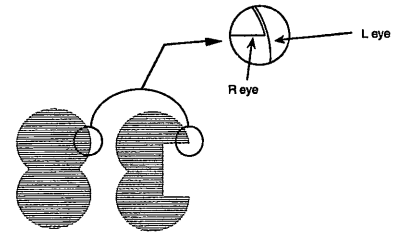


図3 カモフラージュ型のダ・ヴィンチ ステレオグラムで両眼融合が可能となる説明原理 (Cook, M. & Gillam, B. 2004)

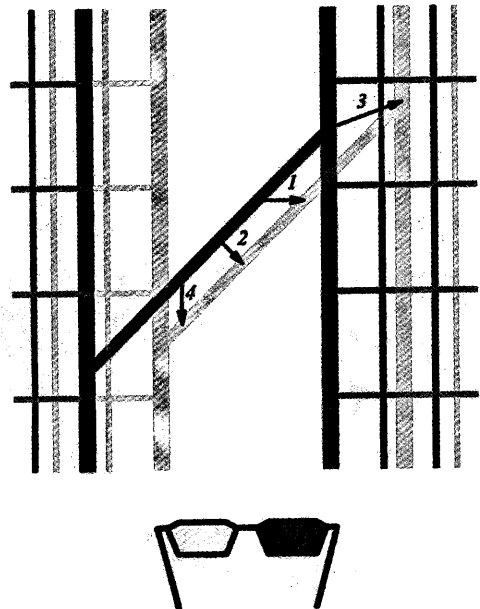


図4 窓枠で視野制限した事態での両眼視差対応。黒色線は片方のステレオペアを灰色線は他方のそれを表す。視差対応は次のように4通りある。(1) 水平対応：観察者の水平方向で視差対応が図られる、(2) 左右ステレオペアの線分間の垂直方向で視差対応が図られる、(3) 左右のステレオペアの線分の先端で視差対応が図られる、(4) 窓枠の主方向で視差対応が図られる (van Dam & van Ee 2004)

は、窓枠の主方向を左右で $0^\circ$   $20^\circ$   $45^\circ$   $90^\circ$  の8段階に変化し、窓枠も左右各1本の平行線分、左右で一对の格子縞パターン、および窓枠のない条件をそれぞれ設定した。格子縞窓枠では水平視差と垂直視差とで奥行が明瞭に規定されたが、平行線分窓枠では水平視差のみで奥行が規定された。実験の結果、測定された斜線分の奥行量は、窓枠のない条件では、左右ペアの斜線分の先端で視差対応がとられること、しかし格子縞窓枠条件では、斜線分の視差対応は水平対応が取られること、さらに格子窓枠が垂直方向から離れた条件および平行線分窓枠では斜線分の先端間で視差対応がとられていることをそれぞれ示した。これらの結果は、窓枠の奥行が視差で明瞭に規定されている場合に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ペアの斜線の対応の方向を規定することを示している。

## 2.6. 両眼視差と輝度要因間の手がかり相互作用

立体を復元するための手がかりには、両眼視差、運動視差、眼筋要因、絵画的要因があるが、これらは単独で手がかりとして機能すると同時に、手がかり間で相互に影響を与え合う。奥行手がかり間の相互作用については、これまで、両眼視差と運動視差間、両眼視差、パースペクティブとテクスチャ間、両眼視差と陰影間で明らかにされている (Rogers & Graham 1979, 1982, Bradshaw & Rogers 1996, Cumming et al. 1993, Johnstone et al. 1993, Bulthoff & Mallot 1988, Todd et al. 1997, Doorshot et al. 2001, Tittle, et al. 1998)。

Wright & Ledgeway (30) は、両眼視差と陰影要因間の手がかり相互作用について実験的に検討した。刺激パターンは、図5にあるようなサイン波形状の空間周波数 ( $0.2$ あるいは $0.4$  c/deg) で、両眼視差と陰影がパターンの凹凸に関して同方向あるいは異方向の奥行を提示するように作成された (視差は同方向、異方向条件とも同

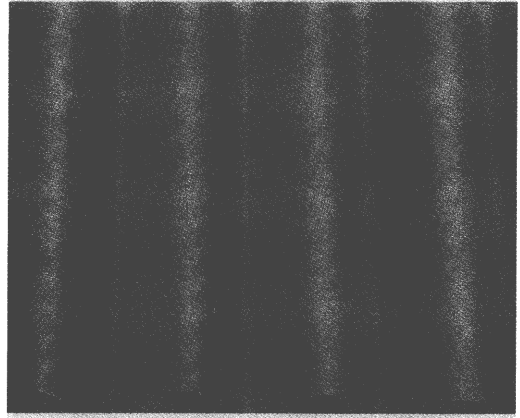


図5 両眼視差と陰影要因間の手がかり相互作用を調べるための空間周波数パターン (Wright & Ledgeway 2004)

一奥行方向を指示する)。実験では、信号検出理論の測定に準拠し、陰影が両眼視差と同方向の奥行をもつパターン、および陰影が両眼視差と異方向の奥行をもつパターンの2条件で、両眼視差検出閾値が2刺激強制選択法で求められた。その結果、視差検出閾値の低下は、予想に反して、陰影と視差が異方向条件で生じた。一方で、陰影と視差とが同方向条件と異方向条件とで、立体視出現時の立体感を評価させると、同方向条件での立体感は極めて高いことも示された。これらの結果から、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と示唆される。

## 3. 運動要因による3次元視

### 3.1. ファントム運動残効

運動視は中枢での階層的処理を経て成立する。まず、V1野で狭い受容野 (視角2度以下) にある検出器で対象の局所的な位置変化が検出される (Cavanaugh et al. 2002)。次にもう少し広い受容野 (視角20度まで) をもつMT野で大局的な運動が検出される (Tanaka et al. 1986)。さらに広い受容野を形成するMST野 (視角100度まで) では、観察者の自己運動や眼球運動によって生じたオプティク・フローを伴う複雑な運動を

大域的に検出する (Duffy & Wurtz 1991)。このように、運動視システムは局所的な処理から大域的運動、放射運動、回転運動へと段階を追って処理されてゆく。このような運動視システムの階層構造は神経生理学的方法で検証されるとともに、運動残効を利用した精神物理学的方法でも明らかにされている。運動視における残効であるファントム運動残効 (phantom motion aftereffect) も、運動視システムの階層構造を実証するものの一つである (Price, et al. (21))。

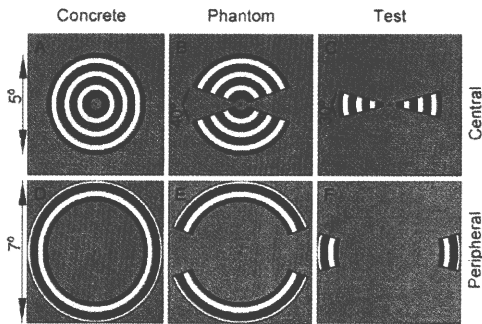


図6 ファントム運動残効のための順応刺激とテスト刺激。Concrete: 従来型の運動残効に使用する順応刺激とテスト刺激: Phantom: 順応刺激パターンが存在しない領域で生起させる運動残効。テスト刺激は視野の中心もしくは周辺に提示される。順応刺激は拡大運動で提示される (Price et al. 2004)

ファントム運動残効とは、図6に示されたように、順応刺激パターンが存在しない領域で生起する運動残効をいう。そのためには、順応刺激として使用するパターンの一部の領域を空白とし、一方、テスト刺激には、その空白領域にテストパターンを提示する。ファントム運動残効は、中心視領域 (テスト刺激の内円と外円の直径は $0.5^\circ$ と $5^\circ$ )と周辺領域 (テスト刺激の内円と外円の直径は $5^\circ$ と $7^\circ$ )でしらべられた。順応刺激の空間周波数は $1.5 \sim 18$  cpdの範囲で変化、また放散型拡大運動の時間周波数は $0 \sim 24$  Hzの範囲で変化した。順応刺激は30 s提示され、引き続きテスト刺激が $0.4$  s提示された。運動残効量はテスト刺激の縮小～拡大に関する時間周波数を変化 ( $-0.5 \sim 1$  Hz)させ、運動残効

がゼロになる時間周波数を求める方法で測定した。その結果、ファントム運動残効は、中心視より周辺視でよく生起し、従来型の運動残効と同様であること、また従来型の運動残効は時間周波数に規定されるが、ファントム運動残効は時間周波数に規定されないことが見いだされた。さらに、順応刺激パターンの弧の大きさを変化した追加実験 (従来型の順応刺激では $40^\circ \sim 360^\circ$ の範囲で変化、ファントム型では $80^\circ \sim 280^\circ$ の範囲で変化)を実施したところ、運動残効量は弧の大きさに依存して変化しなかった。これには個人差があり、ある観察者は弧の大きさが増大すると従来型での運動残効は増大し、ファントム型でのそれは減少を示したが、一方、別の観察者ではこの関係が反対となり、従来型では弧の大きさが増大しても運動残効は減少し、ファントム型でのそれは増大を示した。このことから、ファントム運動残効は、局所的な運動視処理過程ではなく大域的な過程で処理されていると考えられる。

### 3.2. フリッカー、テクスチャ、コントラスト・モジュレーションから構成された運動刺激による運動視差立体視

運動視の刺激には、第一順位運動刺激 (first-order-motion stimulus)と第二順位運動刺激 (second-order-motion stimulus)とが区別される。第一順位運動刺激とは、運動を知覚させる刺激要素が輝度要因で規定されているものをいい、とくに注意して観察しなくても位置変化が検出できて、運動視が成立するものをいう。一方、第二順位運動刺激とは、運動を知覚させる刺激要素がテクスチャ、フリッカー、コントラスト・モジュレーションなどで規定されていて、刺激を構成する分散配置された各要素の位置変化を視覚的に注意を集中して検出し追尾することで、運動が知覚できるものを言う。

第二順位運動刺激によって運動視差を誘導した場合にも、第一順位運動刺激と同等の奥行が出現するかが検討された (Ichikawa, et al. 2004

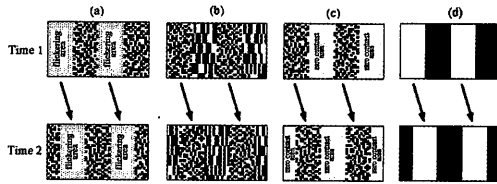


図7 第二順位運動刺激による運動視差立体視。(a)フリッカー刺激パターン、(b)テクスチャ刺激パターン、(c)明るさコントラスト刺激パターン、(d)輝度格子パターン(第一順位運動刺激)(Ichikawa et al. 2004)

(12)). 運動刺激としては、図7に示されたように、第二順位運動刺激であるフリッカー刺激、テクスチャ刺激、明るさコントラスト刺激が用いられ、対照刺激として輝度格子パターン(第一順位運動刺激)が加えられた。ディスプレイに提示された運動刺激を、観察者は顎のせ台に顎をのせ、頭部を運動させて観察し、運動視差を誘導した。運動視差量は運動速度を変えることで操作された。観察者には格子縞間の視えの奥行の順序、視えの奥行距離を報告させた。その結果、(1) 奥行順序は運動視差が規定する順序に正しく視えていること、(2) 格子縞間の視えの奥行量は運動視差量に依存しては変化しないこと、(3) 第二順位運動刺激の要素を操作して位置の視覚的追尾を困難にすると、奥行順序の判断ができなくなることが明らかにされた。このことから、第二順位運動刺激で構成されたパターンの運動視差立体視は、第二順位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と考えられる。これらの結果は、第二順位運動刺激を用いて回転した対象を提示するキネティック・デプス条件での結果(Prazdny 1986)とも一致する。

### 3.3. 観察者と対象との衝突知覚における自己運動と対象運動の相互作用

観察者が移動するとき網膜上には放射状の流動パターンが形成され、これが自己運動の速度、方向を決める手がかりとなる。同時に、自己運

動している最中に対象が観察者に対して近づいたり遠ざかったりする時、自己運動の網膜流動パターンに重ねられた運動による対象の網膜像の大きさや方向の変化は、移動する観察者が対象の運動速度と方向を知覚するための手がかりとなる。

Gray, et al. (7) は、図8に示されたような網膜流動パターンに対象の運動による変化を重ねて提示し、観察者に対して接近あるいは後退する対象の視えの速度と方向をしらべた。

その結果、(1) 自己運動と対象運動が同方向の場合には対象の速度が増大するに伴い、対象

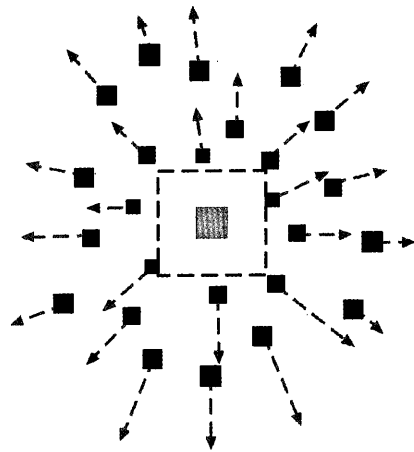


図8 自己運動と対象運動の相互作用をしらべるための刺激パターン。自己運動は放射状の流動パターンで表され、対象運動は中央の四角形の大きさ変化で示される(Gray et al. 2004)

の知覚速度も増大し、自己運動と対象運動が反対方向の場合には、対象の速度は遅く知覚されるようになること、(2) 自己運動と対象運動の速度比が増大すると対象の知覚速度はすみやかに刺激頂に達してしまうこと、(3) 対象の知覚された運動方向は、放射状流動パターンの中心に変位する傾向があること、(4) 対象の知覚された速度と方向の偏向は両眼視差要因を導入すると修正できること、などが明らかにされている。



### 3.4. 人型のモーション・キャプチャにおける姿勢の奥行方向判断

人間の頭、顔、四肢の主要部分を点光源のみで表示し、それらの点光源全体を協調して人間が歩行運動するように動かすと、それらはあたかも人間が歩行しているように知覚できることは、よく知られている。この事態で、点光源が奥行を示す手がかりが何も存在しない場合、人間は人型の点光源の運動パターンから、それがどちらを向き、どの方向に歩行すると知覚するのであろうか。Vanrie, et al. (20) は、図9に示したような人型の一組の点光源を作成し、人間が歩行するようにアニメーションを用いて動かした。ここではパースペクティブやオクルージョンなどの奥行手がかりは存在しないので、

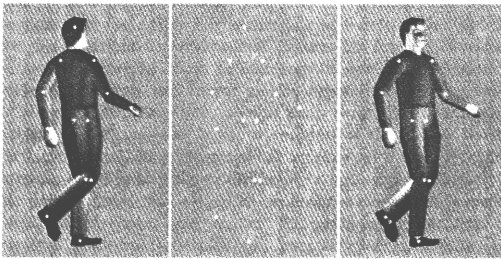


図9 人型のモーション・キャプチャにおける姿勢の奥行方向判断。これらの点光源を人間が歩行するようにアニメーションで提示すると、身体の姿勢の向きが観察者に向いているか（右側の図）あるいは向こう側に向いているか（左側の図）、2通りの知覚的解決が可能（Vanrie, et al. 2004）

図では、身体の姿勢の向きがこちら側（右側図）か向こう側（左側図）か、2通りの知覚的解決が可能である。観察の結果、身体の姿勢の向きは観察者側に向かって歩行するように知覚されることが頻繁に起きた。この姿勢の視えの向きは、後ろ向き方向でも同様であった。ただ、オクルージョンとパースペクティブを付加して奥行に関する曖昧性を除去すると、それらの奥行手がかりが指示する姿勢の向きを正しく知覚させる効果をもった。これらの結果から、視覚システムは、接近あるいは後退が曖昧なモーション・キャプチャ条件下では、観察者に接近する方略を第

一にとることが示唆される。

### 3.5. バーチャル・リアリティ条件での奥行方向での仮現運動

バーチャル・リアリティ条件での奥行方向の仮現運動の特性が検討された（Lewis & McBeath (14)）。バーチャル・リアリティ空間は、図10に示されたように、視野の周囲は、トンネル状に知覚できるように細長い二等辺三角形あるいはダイヤモンドで構成されたテクスチャで構成されパースペクティブをつけてある。仮現運動は、

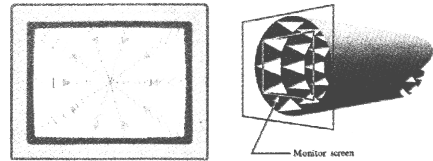


図10 バーチャル・リアリティ条件で奥行方向への仮現運動をしらべる実験事態（Lewis & McBeath 2004）

トンネルパターンで構成された配置を継時的（2フレーム）に変化して提示することで生じさせた。観察者は液晶シャッター眼鏡をかけ、奥行方向の仮現運動を報告する。刺激は、視覚的運動方向とは反対方向に段階的に位置変化を増幅させ、視覚的運動方向が反転するまで続けられる。実験の結果、トンネルの内壁は観察者に接近するように運動する偏向があること、また、トンネルの内壁の刺激要素をパースペクティブが強調されるように配置すると（たとえば二等辺三角形の鋭角を構成する頂点を観察者側に配置する）、運動方向の偏向は大きくなることが示された。2次元面上の仮現運動でも左右方向に対して視えの運動方向の偏向が存在すると同様に、奥行方向についても偏向が存在することをこの結果は示す。

### 3.6. 奥行絶対距離知覚に与える観察者の意図行動

奥行絶対距離知覚はそこに関与する奥行手がかりで規定されるだけでなく、観察者の意図的

行動が関係することを Witt, et al. (20) は明らかにした。それによると、対象までの奥行絶対距離を見積もらせる場合、事前に重いボールもしくは軽いボールを使用したボール投げをあらかじめ設定した目標に向かって反復して行くと、重いボールを使用した条件の方がボール投げの目標までの奥行絶対距離の過大視が生じた。一方、事前にボール投げを反復し、テストでは目隠ししてボール投げの目標までの奥行絶対距離の見積もりをさせると、事前のボール投げの影響はあらわれなかった。さらに、オプティックフローを除去してトッドミルで歩行させ、その後で目隠し歩行あるいはボール投げを実施、最後に奥行絶対距離の見積もらせたところ、目隠し歩行条件のみ過大視が生じた。

これらの結果から、奥行絶対距離知覚は、まず奥行手がかりによる処理過程があり、次に観察者が次にとる行動の意図、さらにはその意図にもとづく遂行行動によって規定されると考えられる。

### 3.7. 加齢要因と運動視差

運動視差にもとづく立体視が加齢によって影響を受けるか否かが検討された (Norman, et al (19))。運動視差は観察者の頭部運動に連動して画面のドットを運動させることで提示された。そこに出現する凹凸パターンは、水平方向にサイン波型の凹凸、水平および垂直方向の凹凸(縦と横に並列された卵状の凹凸)、同心円状に広がる凹凸のリングで遠方に行くにつれて凹凸程度が深くなるパターン、そしてその逆に近づくにつれて深くなるパターンの4種類である。観察者の頭部運動に連動して運動するドットの出現時間は、100 ms、600 ms、そして無制限の3条件が設定された。被験者は、高齢者群(平均年齢72.1歳)、若年者群(平均年齢22.9歳)である。実験では、4種類の凹凸パターンが正確に知覚できるかが試された。その結果、高齢者群の成績は若年者群に比較してドットの出現時間条件のいずれにおいても凹凸形状識別では劣ること

が示された。そこで、高齢者では運動視差に誘導された凹凸面の立体量が縮小されて知覚されているかが検討された。提示した凹凸面の深さは、2, 4, 6 cmで、測定は別に提示した棒状のものさしでのマッチングによった。その結果、高齢者群と若年者群との間では、知覚された奥行量に有意な差はみられなかった。このことから、運動視差にもとづく立体視は、基本的には、加齢にもなつ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こと示された。

## 4. 絵画的要因による3次元視

### 4.1. 奥行傾斜面と湾曲面の知覚のための積層皮質モデル (Laminar cortical model)

奥行傾斜面の知覚に関わる神経生理的領域は、外線状皮質にある。マカクのV2領域には両眼視差に応答する細胞 (Thomas et al. 2002)、両眼視差のエッジに応答する細胞 (von der Heydt et al. 2000)、角度に対する応答細胞 (Pasupathy & Connor 1999)、境界にある縁が2つの図形領域のどちらに属するかについて応答する細胞 (Zhou, et al. 2000)、図-地関係に対する応答細胞 (Bakin et al. 2000) が見つかっている。さらに、奥行傾斜面の境界に対する応答細胞はV4領域 (Hinkle & Connor 2001) に、湾曲面に対し応答するものもV4、IT、頭頂皮質の各領域 (Pasupathy & Connor 2001, Janssen et al. 2000, Taira, et al. 2000) に存在する。

奥行傾斜面の知覚に関する精神物理的研究では、両眼視差によって生成した奥行傾斜面上のターゲットは前注意的に検出されることから、視覚システムでの両眼視差が重要な手がかりであること (Holliday & Braddick 1991, He & Nakayama 1995, Nakayama & Silverman 1986)、また、3次元の視覚的残効は、順応刺激とした視差量に対応して変化すること (Ryan & Gillam 1993, Lee 1999) も見い出された。さらに、知覚的群化(グルーピング)では、奥行や立体がどのように

構成されているので群化の原理が異なることが示された (Nakayama & Shimojo 1992)。

これらの神経生理学的そして精神物理的研究の成果を踏まえ、Grossberg & Swaminathan (8) は、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) を提唱した。図 11 (a) に示されたように、このモデルでは、入力された刺激は外側膝状体 (LGN) のオン中心、オフ中心受容野で処理を受ける。次いで、刺激内の角度と線分によって V1 の 2/3A 領域で角度細胞 (angle cell) と線分共有両極細胞 (collinear bipolar cell) が活性化される。角度細胞と線分共有両極細胞とは V1 の 2/3A 領域内の水平方向の広範囲の層で相

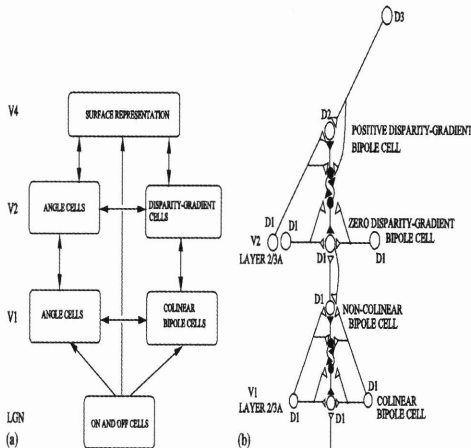


図 11 奥行傾斜面と湾曲面の知覚のための積層皮質モデル (Laminar cortical model)。 (a) モデルのブロックダイアグラム、 (b) 3 次元の領域群化のための積層型サーキット (Grossberg & Swaminathan 2004)

互に影響を与え合う。共有両極細胞は両眼視差勾配細胞を活性化し、V1 の角度細胞は V2 の角度細胞を活性化する。角度細胞と両眼視差勾配細胞とは V2 の 2/3A 領域内の水平方向の層の広範囲で相互に影響を与え合う。両眼視差勾配細胞のグループは、刺激の位置と視差にもとづき刺激パターンの境界を形成する。この刺激パターンの境界は V4 領域で行われる充填作用 (filling-in) の限界を決めるための一種の障壁となる。V4 での充填作用の情報は外側膝状体から

受ける。このモデルを神経生理学的構造に当てはめると図 (b) のようになる。図中、D1, D2, D3 は種々な奥行量を表し、白い円と三角は興奮を黒い円と三角は抑制を示す。

このモデルは、(1) 刺激パターン内で共有される線分と角度を検出できること、(2) 奥行傾斜面刺激の角度と両眼視差勾配からパターンの 3 次元境界を形成できること、(3) 充填効果が生起して面が形成できること、などを説明する。このモデルをネッカーの立方体知覚に当てはめると、その奥行反転がどのようにして生起するかも説明できるという。

これは神経生理学的根拠にもとづく実体モデルであり、奥行に関する他の知覚現象をどの程度まで説明できるか、今後の展開に関心を払いたい。

## 4.2. 絵画的要因間の加算効果

絵画的要因間の加算効果については、図 12 に示されたように、4 通りの加算方式が考えられる。その 1 は、「蓋然的加算効果」で、各絵画的要因はそれぞれがノイズの影響を受けるものの、独立したモジュールで処理される。したがって、ひとつの絵画的要因は他の絵画的要因の検出に全く影響を与えないので、加算の効果は生じない。その 2 は「理想的加算効果」で、各絵画的要因はそれぞれが単独で手がかり効果を持つと共に、加算された手がかり効果も持つ。ここでは、2 つの絵画要因があれば加算効果をもち、どちらかの要因のみがあっても、手がかり効果は失われない。その 3 は、「線形加算効果」で、各絵画的要因は単独では手がかり効果をもたず、各要因が加算されてはじめて手がかり効果が生じる。その 4 は、同様に「線形加算効果」であるが、ノイズは各要因の処理過程で掛かるのではなく、加算が行われた後に掛かる。Meese & Holmes (17) は、どの種類の加算方式が妥当かを図 13 に示されたようなパターンで実験的に検討した。ここでは、水平方向の勾配要因、大きさの勾配要因、そして明るさの勾配要因が操作

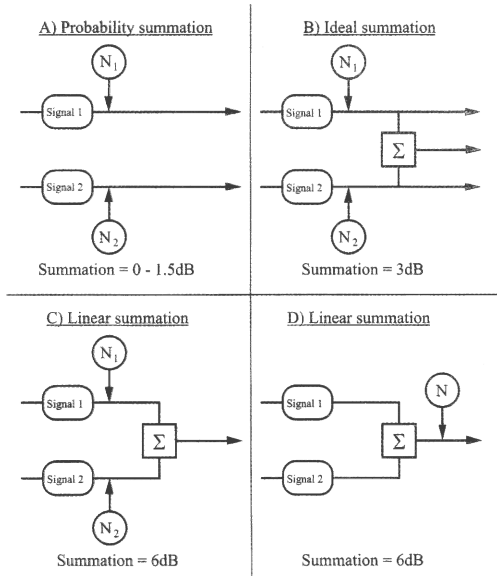


図12 奥行手がかりの加算モデル。A: 確率的加算モデル、B: 理想的加算モデル、CとD: 線形加算モデル (Meese & Homes 2004)

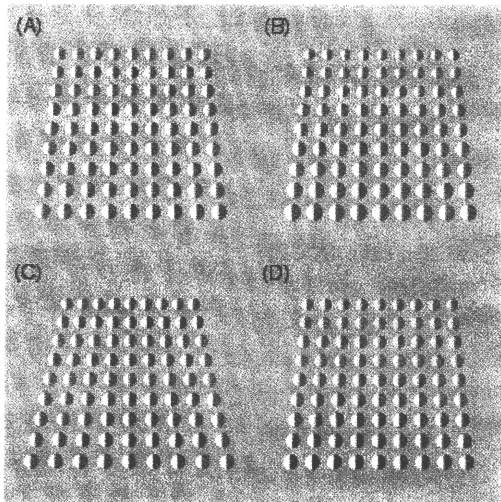


図13 絵画的要因から構成されたパターン。A: 奥行効力を持たないパターン (null-gradient pattern)、B: 大きさ勾配を付加したパターン、C: 水平方向の勾配を付加したパターン、D: 明るさコントラスト勾配を付加したパターン (Meese & Homes 2004)

されている。図中 (A) では、勾配要因が効力を持たないように操作されている。(B) では大きさ勾配が、(C) では水平方向の勾配が、(D) では明るさ勾配が、それぞれ (A) のパターンを基に増強されている。測定は、信号検出理論の2刺

激時間間隔強制選択法 (two-interval forced-choice, 2IFC) で行われ、一方の刺激は常に手がかり効力のない刺激を提示し、他方の刺激には手がかり効果を増強した刺激を提示した。その結果、(1) 大きさ勾配要因が明るさコントラスト勾配要因と組み合わせられた場合には、奥行方向の勾配変化が広範囲であっても「理想的加算効果」が示されること、(2) 大きさ勾配要因と線遠近的要因が組み合わせられた場合には、奥行方向の勾配が中程度の時のみ加算の効果が示され、奥行方向の勾配要因が小あるいは大の場合には加算効果は消失すること、(3) 一方の刺激が奥行手がかりを含んでいない場合、あるいは奥行手がかりが抗争的条件にあるときは、加算効果は消失すること、などが明らかにされた。

これらの結果を踏まえて、図14に示されたような2通りの包括的な奥行手がかり加算モデルが提示された。このモデルAでは、S1の回路のみが閉じていると「蓋然的加算効果」(図のAに該当) が生起し、S1とS2の回路が閉じていると「理想的加算効果」(図のBに該当) が生起し、S2の回路のみが閉じていると「線形加算効果」(図のCに該当) 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、それとの違いは、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。

この研究は、絵画的要因間に加算の効果が存在すること、さらに各絵画的要因は独立したモジュール構造を持つと共に加算回路も併設されていることを示唆している。

また、奥行手がかりの加算効果が奥行順序の判断の正確度と速度に関係するかが検討された (Mather & Smith (15))。奥行手がかりは明るさコントラスト、オクルージョンそして輪郭線のボケとし、テスト図形として、図15にあるように、これらの要因が単独、2要因の組み合わせ、3要因の組み合わせの各条件で、重なりをもつ3枚のプレートに視えるように刺激パターンが作成された。実験では、被験者は3枚のプレート

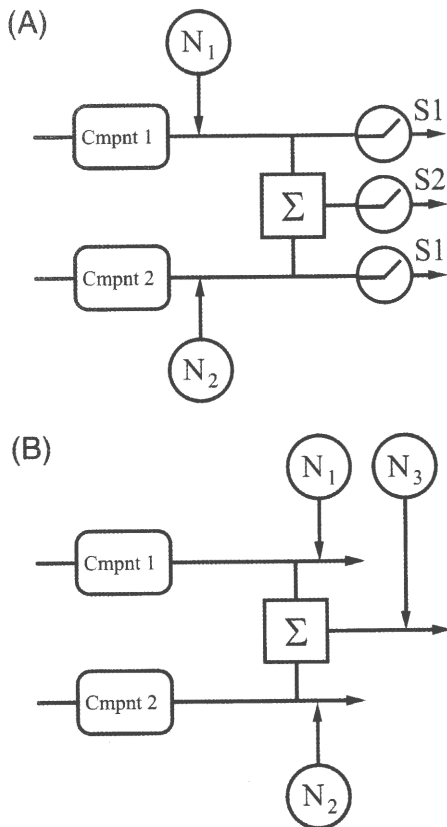


図 14 修正した 2 通りの奥行加算モデル (Meese & Holmes 2004)

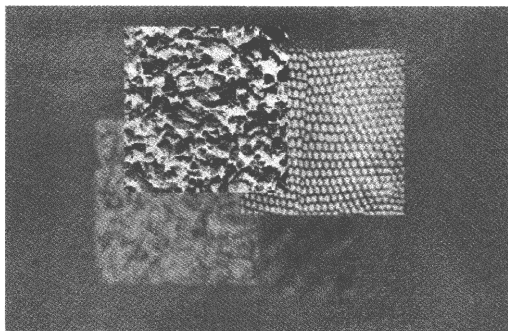


図 15 奥行手がかりの加算効果をしらべるために、明るさコントラスト、オクルージョンおよび輪郭のボケの各要因の組み合わせから作成したテスト図形 (Mathere & Smith 2004)。

のなかで上位にあるように見えるプレートにカーソルを置いてクリックし、次いで下位にあるように見えるものにカーソルを動かしてクリックするように求められ、さらにこれを可能な限り速く応答するように求められた。その結

果、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っていた。また、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 (1.41 s) に較べて 3 種類の手がかりが組み合わせられた条件 (0.84 s) の方が短いことが示された。このことから、各奥行手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・立体効果を生み出すと考えられる。

### 4.3. 色彩要因による立体効果

色彩要因の立体効果が実験的に確かめられた (Guibal & Dresch (9))。それによると、(1) 色彩 (赤) の明るさのコントラストは無色の明るさコントラストと同様な凸の立体効果を持つこと、(2) 色彩の明るさのコントラストを大きくすると立体効果は高まり、立体に気づくまでの潜時を短くすること、(3) 色彩の明るさのコントラストが弱くても、それにオクルージョン要因が加わると強い凸の立体効果が生起すること、(4) 明るさコントラストを固定した場合、明るい背景下の赤色は、オクルージョン、重なり、視野の配置のいずれかの奥行手がかり要因と組み合わせられ場合、緑色や白色の場合よりも強い凸の立体効果をもつこと、(5) 背景が暗い場合には、重なりと組み合わせられた赤色の場合より、オクルージョンと組み合わせられた緑色や白色の方が強い凸の立体効果が現れること、などが見いだされた。このことから、色彩要因は単独で立体効果をもたず、明るさコントラストとオクルージョン、重なり、視野の配置要因など他の奥行手がかりと組み合わせられた場合にのみ立体効果をもつと考えられる。

### 4.4. テクスチャの傾き効果

絵画的要因のなかでもテクスチャ要因は効果的な奥行印象を生起させる。テクスチャパターンには、図 16 に示されたように、様々な種類が

あり、それらがどれも同等の奥行効果を持つかは不明である。そこでRosas, et al. (22) は、9種類のテクスチャパターン（規則的ドット配列、5ピクセル逸脱ドット配列、10ピクセル逸脱ドット配列、円形不規則配列、亀甲配列、格子配列、1/fノイズ配列、パーリンノイズ配列、豹模様配列）を用いて、26°、37°、53°そして66°の奥行方向の傾き（数値が小さいほど前額に平行な面となる）をもつ面を作成し、その視覚的傾きを測定した。測定は、同種のテクスチャで構成された2通りの奥行傾き面を継時的に提示し、どちらの刺激の傾きが大きいかを強制的に選択する2刺激強制選択で行われた。その結果、(1) すべての種類のテクスチャにおいて、奥行傾き角度が大きくなると傾きは正確に知覚できるようになること、(2) 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、(3) 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こと、などが見い出されている。

#### 4.5. 形態盲患者の平面画像の立体視

形態盲患者の平面画像の立体視が報告されている (Turnbull, et al. (24))。患者は19歳で、交通事故で頭部損傷と脊髄損傷を調査の3年前に負った。この患者には言語障害は見られないし、視野も正常の範囲を持っている。また、短期記憶とワーキングメモリは正常であるが、数分前のものを記憶できない。さらに、形態知覚については、声を手がかりにすると家族を識別できるが、眼では家族の顔を認識できない。立体知覚について詳細に調べてみると、外界を線画で描くことはほぼ正常にできる。立体図形の心的回転テスト（メンタルローテーション）も回転軸がZ軸で、回転が前額に平行であれば問題はない。しかし、平面画像から立体を知覚することはできない。たとえば、図17のような立体図形に2点を描き、いずれの点の手前であるように見えるかをテストすると、正しく応えること

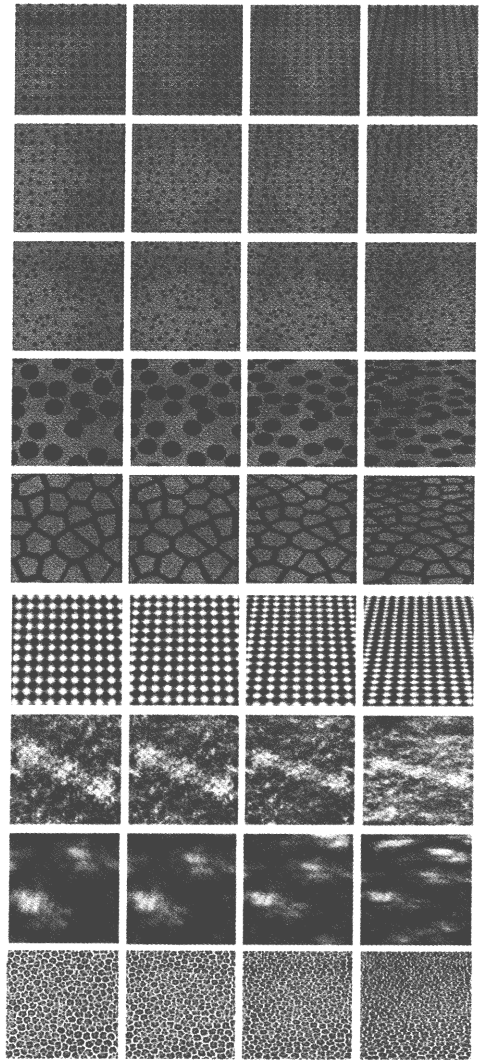


図 16 視覚的傾きを測定するための様々なテクスチャ。上から順に、規則的ドット配列、5ピクセル逸脱ドット配列、10ピクセル逸脱ドット配列、円形不規則配列、亀甲配列、格子配列、1/fノイズ配列、パーリンノイズ配列（有機的しみパターン）、豹模様配列である (Rosas, et al. 2004)

はできなかった。また、Y軸を中心とした奥行方向の心的回転で立体図形を同一と判断すること、不可能な立体図形（ペンローズの3角形）が描かれているかどうかを判断することも、それぞれ難しいことが示された。さらに、遠近法的錯視であるミュラー・リエル錯視、ポンゾ錯視を見せても、錯視が生起していないことがわかった。これらのことから、この形態盲患者

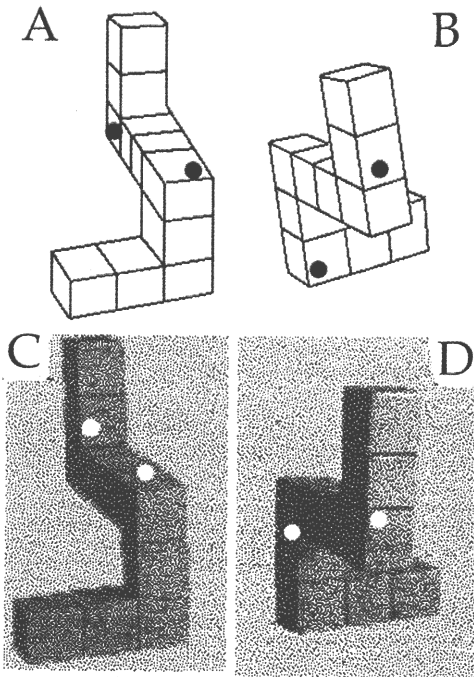


図 17 形態盲患者に対する平面画像からの立体視テスト (Turnbull, et al. 2004)

には、2次元画像から3次元知覚を得ることに対する障害が起きていると考えられる。

#### 4.6. 形の恒常性におよぼす対象の 大きさと形状

大きさの恒常性とは異なり、両眼視差要因のみで作成された条件では形の恒常性は生じにくい。これは、両眼視差の場合、観察距離が正しく知覚されないためと指摘されている (Johnston 1991)。また、対象の大きさは観察距離の知覚に影響し、このことが形の恒常性の成立に関与するとも考えられる (Collett et al 1991)。そこで、両眼視差で形状を作成し、その大きさを変化させた場合、形の恒常性がどのように成立するかが検討された (Champion et al. (4))。対象刺激は、ランダム・ドットで作成された直方体、三角柱 (横長のくさび形状)、半円の円柱 (横長のシリンダー形状) で、観察者に対して横長に提示された。それらの大きさは、横方向の長さを固定し (6.07°)、高さを 0.72° から 5.73° の範囲で 5 段階に変えられた。3 種類の刺激対

象の奥行は、両眼視差を操作して 0 から 17' の範囲で 7 通りに変えられた。観察者には、視覚的奥行の判断を対象の高さの半分との比較で「長い」か「短い」か、を求めた。実験の結果、対象が小さい場合には、対象の高さに対する視えの奥行比は、1 以下を示し、逆に対象が大きい場合には、それは 1 以上を示した。この傾向は、シリンダーとくさび形状で顕著に示され、直方体では示されなかった。直方体の場合には、個人差が顕著に出現した。これらの結果は、形の恒常性が成立しないことを示す。

### 5. 3次元視空間の知覚

#### 5.1. 対象までの視覚的絶対奥行距離と 対象の視覚的大きさとの関係

対象までの視覚的絶対奥行距離と対象の視覚的大きさとの関係は、従来、大きさ-距離関係の問題として検討されてきた。これまでは、次式でこの種の関係が規定されていた。

$$S' = D' (S/D) \text{-----} (1)$$

ここで、S' は視覚的大きさ、D' は視覚的絶対距離、S は対象の物理的大きさ、D は対象までの物理的距離を示す。「S/D (θ)」は、対象の視角に比例して変化するもので、S' は D' と θ の関数となる。

この式は、実測値に適合しないことがいくつかの研究で報告されている (Kaufman 1974, Foley 1968, 1972)。そこで、Foley et al. (3) は、(1) 式から次のような式を導出した。

$$S'_{ij} = \{(R'_i) + (R'_j) - 2 R'_i R'_j \cos \theta_{ij}\}^{0.5} \text{---} (2)$$

ここで、S'ij は、図 18 の B の 2 点 (I, J) 間の視覚的大きさ、R'i と R'j は、対象 Ri と Rj の視覚的奥行絶対距離距離、θ ij は対象 i と j の間の視角をそれぞれ示す。

さらに、(2) 式のなかの θ を次に示すものに

入れ替えた。

$$S''_{ij} = \{(R''_i) + (R''_j) - 2 R''_i R''_j \cos \theta''_{ij}\}^{0.5} \quad (4)$$

ここで、QとPは定数を表す。(2)と(3)から次式が導かれる。

$$\theta''_{ij} = \theta_{ij} + Q \theta^P_{ij} \quad (3)$$

また、R'は次式で求められる。

$$R'_i = R_i / (F + GR_i) \quad (5)$$

ここで、FとGは定数である。

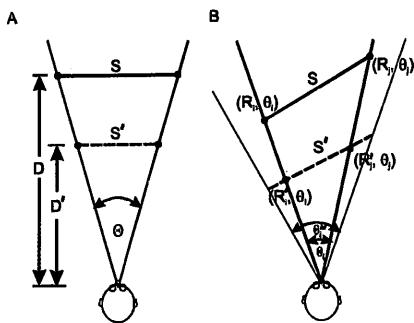


図 18 大きさ-距離関係のモデルのための概念図。(A)：旧モデルのための概念図、(B) 新たなモデル (tangle model) のための概念図 (Foley et al. 2004)

(4) 式の妥当性が実験的に検討された。実験は自然環境下、2個の対象(杭状の棒)までの視覚的奥行絶対距離及び2つの対象間の距離を、単眼視と両眼視条件を設定して言語報告(メートル単位で評価)で求めることによって行われた。その結果、(4)式と(5)式は測定値によく適合することが示された。

このモデル (tangible model) の特徴は、物理的視角(θ<sub>ij</sub>)に代えてθ''<sub>ij</sub>を用いていることである。「θ''<sub>ij</sub>」は「θ<sub>ij</sub>」の値より大きく、いわば視覚的視角を意味する。しかし、θ''<sub>ij</sub>のQとPの定数は測定値から直接求めるのではなく、(2)式から求められる実験式を実測値により近似させ

るべく求められるので、ここに、このモデルの問題が残ると考えられる。

## 5.2. 凸面鏡に投影された対象の視覚的 大きさと奥行距離

Higashiyama & Shimono (11) は、自動車のサイドミラーのような凸面鏡に投影された対象の視覚的大きさと視覚的奥行距離との関係を実験的にしらべた。凸面鏡の世界では、対象の鏡像の大きさは実距離が増大するに伴い急激に小さくなるのに対して、鏡像の距離(凸面鏡面から鏡像までの距離)は実距離が増大しても緩やかにしか縮小しない。一方、平面鏡の世界では、対象の鏡像の大きさは実距離が増大しても変化しないのに対して、鏡像の距離(凸面鏡面から鏡像までの距離)は実距離に正比例して増大する。実験1では、平面鏡と凸面鏡(大きさは直径25 cm、曲率は半径で0.65 mと1.0 mの2種類)に5種類の大きさの赤色の長方形(高さと同幅が10×15 cm、20×30 cm、30×45 cm、40×60 cm、58×72 cm)を鏡から10 mと20 mの距離から投影し、視覚的大きさと視えの奥行絶対距離をメートル尺の該当する目盛りを指さす方法でマッチングさせて測定、さらに実験2では、平面鏡と凸面鏡(大きさは直径20 cm、曲率は半径で0.22 mと0.60 mの2種類)に6種類の大きさの赤色の三角形(高さと同幅が32×16 cm、48×24 cm、72×36 cm、40×60 cm、108×54 cm、162×81 cm)を投影し、その実距離を2.5 mから45 mまで増大して、視覚的大きさと視えの奥行絶対距離をメートル尺で報告させた。その結果、まず、凸面鏡条件での視覚的大きさは、平面鏡と同様に、対象までの実距離が45 mまで増大しても一定の大きさを保つことが示された。平面鏡の場合には、理論的にも視覚的大きさは一定となるので妥当であるが、凸面鏡の場合には実距離の増大に伴って急激に縮小されるので理論的予測に反している。次に、視覚的奥行絶対距離は、実距離に比例して直線的に増大するが、すべて過小視される。また曲率が大きい凸



面鏡では、曲率が小さい鏡あるいは平面鏡に比較して過小視の程度が小さく、対象は遠くに定位されて視えた。さらに、大きさ-距離不変仮説に関しては、視覚的距離に対する視覚的大きさの比率は対象の視角のベキ関数になること、凸面鏡では平面鏡に比較してベキ指数値が小さいことが示された。

これらの結果から、近刺激 (proximal) のレベル (曲率と視角)、遠刺激 (distal) のレベル (実際の大きさと実距離)、そして鏡像 (virtual) のレベル (鏡像の大きさと距離) のそれぞれで、視覚的大きさと視覚的距離との相関関係が分析された。その結果、視角は視覚的大きさと正の相関を、視覚的距離とは負の相関を、また曲率は視覚的大きさと正の相関をそれぞれもつこと、さらに視覚的大きさと視覚的距離との間には正の相関があることが示された。これは、視角は視覚的距離要因を考慮して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, Epstein 1973) を支持する。ただ、遠刺激のレベルの相関分析では、実験 1 では視覚的大きさと視覚的距離との間に正の相関があったが、実験 2 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、したがって実験 2 の結果のみ直接知覚モデル (視覚的大きさは視覚的距離要因を推論するのではなく、実際の大きさと規定されるとする直接知覚モデル (direct perception model, Gibson 1979) を支持する。凸面鏡像にもとづく知覚世界は、実世界に近似した世界が知覚されている。

### 5.3. 観察者に対する接近対象の移動軌跡の知覚

観察者に対して接近する対象がどの時点で観察者と衝突するかの見積もり知覚は、正確であることが確認されている (Gray & Regan 1998, Rushton & Wann 1999)。そこで、接近対象の移動軌跡についても観察者は正確に知覚しているかが検討された (Welchman, et al. (28))。実験は球を観察者に接近させ、その際の球の移動軌跡

を報告させるものである。実験はバーチャル・リアリティ条件と、この条件を現実空間へと忠実に反映させた現実空間条件とで実施され、バーチャル・リアリティ条件では球はワイヤーフレームモデルで作成され、また両眼視差が奥行手がかりとして導入された。両条件とも球は、最初に観察者の正中線上に提示し、次いで観察者に対する移動角度を変えて提示された。観察者は球の移動後に、ポインタを回転させることで視えの移動角度を再現した。実験では、球の大きさ、観察者に対する移動軌跡の角度が操作された。その結果、バーチャル・リアリティ条件と現実空間条件とも対象の移動が正中線に近い場合には、視覚的移動角度は正中線方向に近寄るように逸脱することが示された。この結果は、球が移動した後で、その軌跡を再現して得られたものであり、対象が移動している最中でも対象の移動軌跡が逸脱しているかは不明である。キャッチボールにみられるように、人は正確にボールを捕捉することができるので、移動する対象の軌跡を逸脱して知覚しては、対象の捕捉は不可能であろう。

### 5.4. バーチャル・リアリティ空間での想定された観察位置と奥行絶対距離知覚

バーチャル・リアリティ空間で対象までの奥行絶対距離を知覚する場合、観察者は自己の位置をバーチャル・リアリティ空間内のどこかに想定して置かなければならない。このとき、バーチャル・リアリティ空間は視覚的情報のみで構成されているので、バーチャル・リアリティ空間という「場」に観察者は強く依存することになる。「場」依存に関しては個人差が大きく、「場依存型」と「場独立型」とが知られている。「場依存型」は視覚的「場」を構成する視覚情報に強く規定されて垂直方向などの視覚的判断がなされるのに対して、「場独立型」は視覚以外の重力的手がかりや身体的手がかりなどにも規定されて視覚判断をする (Witkin 1959)。Vianin et al.

(26) は、「場独立型」の観察者は「場依存型」の者より、自己の観察位置をバーチャル・リアリティ空間内に想定できないので、奥行絶対距離知覚が正確に行われないと予測した。実験では、撮影したカメラ位置を観察者の正中線から $31^\circ$  偏位させた実験シーンを提示し、その中の対象までの奥行絶対距離を距離等分法でマッチングさせた。この場合、正確な奥行絶対距離を知覚をするには、観察者の想定位置も $31^\circ$  偏位させたところに置く必要がある。実験の結果から、ロッドフレームテストで「場独立型」とされた者は、「場依存型」に比較して奥行絶対距離が正しく知覚されないことが示された。

### 5.5. 遮蔽物がある条件での対象までの奥行絶対距離知覚

地上の面を構成する規則的なテクスチャ勾配は、その面に置かれた対象までの奥行絶対距離の知覚を可能にする。He, et al. (10) は、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、「連続的一面—統合化仮説 (sequential-surface-integration hypothesis)」を提唱した。この仮説によれば、図 19 に示されたように、視覚的な広がりをもつ面は、まず、両眼視差、運動視差、眼筋的要因などの奥行手がかりを利用して 2 m から 5 m の範囲内の広がり面が形成される。その次に、この面を拠点(アンカー)にして、テクスチャ勾配の手がかりを用いて、これに隣接する広がり面に拡張しこの 2 つの面を

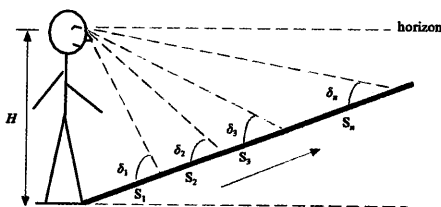


図 19 観察者の眼前に水平と奥行方向への広がりをもつ視覚的な面がどのような視覚処理を経て構成されるかについての「連続的一面—統合化仮説 (sequential-surface-integration hypothesis)」(He, et al. 2004)

統合する。このようにして、次々と広がり面の統合をはかり、眼前に水平と奥行方向に広がる面が形成される。この仮説によると、遠方に位置した対象と観察者の間にテクスチャの連続性を断ち切る遮蔽物があると、視覚的広がりが正しく形成できず、対象までの視覚的奥行絶対距離が不正確になると予想される。そこで、芝生が生えているグラウンド上に、観察者から 2 m に遮蔽物 (高さ 0.51m、横幅 1.65m、奥行 0.54m) を配置し、対象物を 4、5、6、7、8 m に設定し、別に比較刺激を 5、6、7 m に提示してマッチング法によって視覚的奥行絶対距離が測定された。その結果、遮蔽物がある事態では、視覚的奥行絶対距離の有意な過小評価が示された。これは、「連続的一面—統合化仮説」を支持する。

### 5.6. 自然空間における対象間を結ぶ方向の知覚判断

自然空間に置かれた対象の奥行絶対距離 (観察者と対象)、奥行相対距離 (対象と対象)、奥行絶対方向 (観察者と対象)、奥行相対方向 (対象と対象) についての知覚判断は、その物理的な対応とは異なる。Kelly et al. (13) は、自然空間における奥行相対方向の知覚判断について測定した。実験は、観察者の前方にポストを放射状 (正中線方向を $0^\circ$  とし、 $45^\circ$  のステップで左側 2 段階、右側 1 段階) に、奥行 5、10、15、20 m の各位置に設置して行われた。奥行相対方向の知覚判断は、16 本のポストから 2 本を実験者が任意に指定し、その 2 本を結ぶ方向の延長に見える物体を報告させる方法と観察者の姿勢の向きを変えることで示させる方法とで行われた。同時に、2 本のポスト間の視覚的な奥行相対距離、およびどちらかのポストまでの奥行絶対距離も報告させた。その結果、視覚的方向判断の逸脱が最も大きく生起するのは、2 つのポスト間の奥行絶対距離比 (観察者から各ポストまでの奥行距離の比) が 0.75 の場合であり、それよりも小さいのは、その距離比が 1.3 から 1.5 の条件であった。また、視覚的方向判断の逸脱

が無くなるのは、距離比が1（2つのポストが観察者から等距離に位置）あるいは2から3の条件（2つのポストが観察者からの放射線状に位置する）であった。対象までの奥行絶対距離と相対距離の判断は、視覚的な奥行相対方向に影響しないことも示された。これらの結果は、奥行相対方向判断は奥行絶対距離と相対距離の各判断とは異なる処理過程と考えられる。

### 5.7. 自然空間における前額方向での奥行相対的距離知覚

観察者から奥行方向にある対象を眼で観察し、その後閉眼してそこまでの奥行距離を歩行で再現させた場合、それが20 m程度離れていても、正確に再現されることが報告されている（Loomis et al 1992, Rieser et al. 1990, Thompson 1983）。この場合、対象までの視覚的な奥行絶対距離は過小視され、それは10 mから20 mの範囲では50%以上になる（Beusmans 1998, Loomis et al. 1992, Norman et al. 1996, Toye 1986, Wagner 1985）。そこで、奥行絶対距離ではなく奥行相対距離、とくに前額に平行な2つの対象間の視覚的距離と歩行再現距離とがしらべられた（Philbeck, et al. (20)）。2つの対象間距離は、4 m、7 m、10 mの3種類であり、観察者に対象間距離を観察させ、その後閉眼させ歩行でその距離を再現させた。併せて、視えの相対距離も言語報告させた。その結果、歩行再現距離は70%超の過大となるのに対して、視えの相対距離は幾分過小視されるものの正確であった。このことから、歩行再現距離の過大は、視覚情報が運動情報へと伝達される過程で起きていると示唆される。

### 5.8. 対象の形状知覚の歪みと奥行距離知覚との関係

対象の形状知覚は、観察距離が近いところでは、実際の形状より奥行方向に拡張するように知覚される。これは、奥行手がかりが両眼視差立体視条件の場合にも、また運動視差立体視条

件の場合にも生起する（Johnston 1991, Tittle et al. 1995, Norman & Todd 1993, Todd & Bressan 1990, Todd & Norman 1991）。それでは、対象の形状知覚の歪みが生起する場合、対象までの奥行絶対距離知覚の歪みも生起しているのであろうか。Bingham, et al. (1) は、バーチャルな球形を奥行距離を違えて提示し、形状知覚の歪みを測定した。対象までの提示距離は被験者の手の届く最大範囲の0.5から0.9 mの間で5段階に設定された。刺激対象はヘッド・マウント・ディスプレイに提示され、動的両眼立体視条件（観察者の頭部運動に伴い刺激対象が変化、両眼視差と運動視差有効）、動的単眼視条件（運動視差のみ有効）、静的両眼立体視条件（頭部静止条件、両眼視差のみ有効）で観察させた。対象の形状と奥行位置の測定は、バーチャルな鉄筆を動かして、対象として提示した球の前・後・左・右を触れさせる方法で行われた。測定では、バーチャルな鉄筆が測定中提示されない条件（非フィードバック条件）およびバーチャルな鉄筆で対象の各測定点に触れた後でそれをバーチャル空間に提示し、対象に正確に触れているかどうかを確認させる条件（フィードバック条件）を設定した。

測定したデータは、TPS (thin plate spline) 法で分析された。これは、まず、測定前の対象の標識を2次元の座標にプロットし、次いで標識の測定値を同様にプロットする。分析では、測定前の対象の標識を測定後の標識が一致する位置に座標の方眼線を変形させることで移動させる。このような座標の方眼線の変形は、その変形が最小になるように行われる。分析の結果、3通りの奥行手がかり条件のすべてで座標の方眼線の変形は、フィードバック条件と非フィードバック条件との間で相違することが示された。この相違は、フィードバック条件では対象の位置知覚を改善するが、対象の形状知覚を変えないことにはあられた。これらの結果から、対象の形状知覚と奥行絶対距離知覚は、それぞれが異なる過程で処理されていることを示唆する。

## 5.9. 視覚障害と手がかり効果

脳内出血、脳腫瘍などによって右脳が損傷を受けた患者は、いろいろな視覚障害が生じる。そのような障害のなかで、「線分の半等分テスト」(水平線分を半分に等分する)および両端に刺激があるのみで他は空白になっている「ギャップ半等分テスト」(水平に置かれた空白部分を半分に等分する)を実施すると、前者では、テストで見られた中点が右方向へ大きく逸脱してしまうが、しかし後者でのそれは逸脱するものの、小さい。この結果は、線分の半等分課題は大きさ知覚に、ギャップ半等分テスト課題は距離知覚に関係することから、この種の患者では大きさと距離知覚の分離が生起しているためと説明された。そこで、McIntosh et al (16) は、右脳に障害を持ち、かつ、「線分の半等分テスト」で逸脱を示す17名の患者に対して、「変形線分の半等分テスト」と「変形ギャップ半等分テスト」を実施した。「線分の半等分テスト」では、視覚的注意を引くために線分の各端に赤もしくは緑で彩色を施した。また「ギャップ半等分テスト」にも、各端の短線分を赤もしくは緑に彩色した。実験の結果、彩色条件では「線分の半等分テスト」および「ギャップ半等分テスト」とも、中点の右方向への逸脱は有意に減少した。このことから、線分半等分課題での逸脱がギャップ半等分課題よりも大きいという結果は、この種の患者が線分の全体を知覚することができないことによると考えられる。

## 5.10. ガンツフェルト条件で生起する知覚現象

ガンツフェルト(全体視野)とは、輪郭、テクスチャ、小刺激などをすべて除去した一様に照射された空間をいう。このような事態では、奥行の不明瞭な霧に囲まれたような視空間しか知覚できず、場合によっては明るさも感じられないブランクアウトが生じると報告されている。Tsujii, et al. (23) は、このようなガンツフェルト事態で生起する知覚現象について、照明の色を3

種類(赤、緑、青)用いてしらべた。40人の被験者には、自身が知覚している色彩、明るさ、空間特性、身体感覚、運動感覚そして情動状態を報告させた。その結果、視えの明るさの低下、色彩の退色と鮮明さの低下が頻繁に報告されるとともに、「霧に囲まれている」、「視空間が重たい」、「外の世界が目の前に近づいた」などの表現で報告された。赤色照明条件では、他の色彩条件に比較して、筋肉の緊張、不快感、身体の前傾が報告された。ガンツフェルトをはじめて体験した被験者は、ガンツフェルトについての知識をもつ者および知識と経験をもつ者に比較して、身体や情動に関する反応を多く報告した。また、ガンツフェルト観察時の瞳孔反応が測定され、照明が明るい場合には、最初に瞳孔の縮小が起き、やがて正常の大きさに復帰するのに対して、照明が暗い場合は終始一定の大きさで維持された。さらに、赤色照射条件で30分間の連続観察が実施され、その間に生起するすべての知覚体験の報告が被験者に求められた。その結果から、ガンツフェルト知覚現象は、次のようなフェーズで進行することが明らかにされた。「堅固なものの知覚」-「視空間の面の歪み」-「対象性の喪失」-「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)」-「何か漠然としたものの接触」-「外界との一体化(融合)」。これらのフェーズは、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。

## 6. おわりに

### 6.1. 両眼立体視問題

3次元視の今年度の動向をまとめると次のようになる。両眼立体視の研究分野での主要な研究課題は、視差の対応問題、視差からの立体の復元問題、視差の処理過程の問題、両眼視差と運動視差の相互作用の問題、両眼視差の検出の

ための神経生理学的過程の問題などである。

視差の対応問題では、粗い視差から細かい視差へと対応が解決され、処理されていくことが、サステインド条件とトランジェント条件での比較を通して明らかにされた。視差の検出は、視差の粗-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、これが眼球輻輳運動を制御して次に細かな視差の検出を誘導する。両眼視差検出システムは、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して検出過程を終える。Gheorghiu & Erkelens (5) は、刺激提示の時間を操作してサステインド型とトランジェント型の刺激に対しての視差検出がどのように変わるかをしらべた結果、視差検出に関係する要因は、サステインド条件では前刺激と後刺激間のパターンの粗-密の相対的な差であること、トランジェント条件では前刺激と後刺激間のパターンの粗-密の相対的な差であること、また、粗いステレオグラムの検出過程は細かなステレオグラムの検出過程を強力に抑制するが、細かなステレオグラムの検出過程は粗いステレオグラムの検出過程を抑制する力は弱いことなどを明らかにした。これらの結果から、粗い視差から細かな視差の検出は、高次視覚中枢での両眼立体視の粗-密処理システムによることが明らかにされている。

視差からの立体復元問題の領域では、立体復元に与える両眼視差と運動視差の手がかりの相互作用の問題が検討された。Champion et al. (2) は、はじめに両眼視差と運動視差から作成された立体を提示し、次いで運動視差要因のみを除去した場合、この操作が立体形状の復元にどのような影響をあたえるか否かについて検討した。実験の結果、両眼視差と運動視差の両要因による立体復元は、後続する刺激に運動視差が伴わなくなると、両要因の相互作用効果は消失してしまうことが明らかにされた。両要因はそれぞれ単独な処理過程を持ち、両要因が同時に存在する場合にのみ加算的手がかり効果をもつと考

えられる。

しかし、両眼視差と運動視における対応問題が、視覚処理過程のどの段階で生起するかは、すなわち、両眼視差と運動視の対応が、それぞれ独立した過程で最初に処理され、その後で統合されるのか、あるいは最初から統合されて対応問題が処理されるのかは、いまだに不明である。Muller et al. (18) は、運動視と両眼立体視における対応がどの程度強固に結合しているかをノイズを操作することで実験的にしらべた結果、ノイズを加えると、両眼視差対応の方が運動視での対応より強い影響を受けること、また両眼視差と運動視のそれぞれで対応関係を検出する力を相互に比較すると、運動視の刺激条件は両眼視差の対応を促進するのに対して、両眼視差刺激条件は運動視での対応を促進しないことを明らかにした。これらの結果は、視覚システムは、まず運動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ていると示す。

この他に、ダ・ヴィンチ・ステレオプシス問題、多義的視差の知覚的解決問題、両眼視差と輝度要因間の手がかり相互作用問題が検討されている。ダ・ヴィンチ・ステレオプシス問題では、単眼オクルージョン型の他にカモフラージュ・オクルージョン型があることを明らかにし、この型で両眼立体視が可能になるのは、ステレオグラムパターン内の不連続部分が蔽-遮蔽関係を持つと認知されることが示唆されている (Cook & Gillam (6))。両眼視差と輝度要因間の手がかり相互作用問題では、陰影が両眼視差と同方向の奥行をもつパターン、および陰影が両眼視差と異方向の奥行をもつパターンの2条件で両眼視差検出閾値を求めた結果、視差検出閾値の低下は、陰影と視差が異方向条件で生起した。この結果から、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ことを示す (Wright & Ledgeway (30))。

## 6.2. 運動立体視問題

運動立体視の研究領域では、フレーム間の刺激対応問題、運動視差からの立体復元問題、両眼視差など他の奥行きがかりとの相互作用問題、運動視の神経生理学的過程の問題などがある。

運動視の刺激には、第一順位運動刺激と第二順位運動刺激とが区別される。第二順位運動刺激によって運動視差を誘導した場合にも、第一順位運動刺激と同等の奥行きが出現するかが検討された (Ichikawa, et al. 2004 (12))。その結果、奥行き順序は運動視差が規定する順序に正しく視えていること、視えの奥行き量は運動視差量に依存して変化しないこと、第二順位運動刺激の要素を操作して位置の視覚的追尾を困難にすると、奥行き順序の判断ができなくなることが見いだされ、第二順位運動刺激で構成されたパターンの運動視差立体視は、第二順位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き視はできないことが明らかにされている。

運動視は中枢での階層的処理を経て成立する。まず、V1野で狭い受容野にある検出器で対象の局所的な位置変化が検出され、次にもう少し広い受容野をもつMT野で大局的な運動が検出され、さらに広い受容野を形成するMST野では、観察者の自己運動や眼球運動によって生じたオプティク・フローを伴う複雑な運動を大局的に検出する。Price, et al. (21) は、運動視における残効であるファントム運動残効を利用して、運動視システムの階層構造を精神物理学的方法で実証した。ファントム運動残効量は弧の大きさに規定して変化せずに、観察者ごとに異なり、ある観察者は弧の大きさが増大すると従来型での運動残効は増大し、ファントム型でのそれは減少を示すのに対して、別の観察者ではこの関係が反対となることが見いだされた。これはファントム運動残効が局所的な運動視処理過程ではなく大局的な過程で処理されることを示唆し、運動視の階層的処理を支持する。

人間の頭、顔、四肢の主要部分を点光源のみ

で表示し、それらの点光源全体を協調して人間が歩行運動するように動かすと、あたかも人間が歩行しているように知覚できることは、よく知られている。この事態で、点光源が奥行きを示す手がかりが何も存在しない場合、人間は人型の点光源の動きから、それがどちらを向き、どの方向に歩行すると知覚するかが Vanrie, et al. (27) によって明らかにされた。それによると、視覚システムは、接近あるいは後退のいずれかが曖昧なモーション・キャプチャ条件下では、観察者に接近する方略を第一にとっている。

## 6.3. 絵画的要因による立体視問題

絵画的要因による立体視問題には、絵画的要因の単独の奥行きがかり効果、奥行きがかりの加算効果、絵画の手がかりの生得対習得、絵画的要因の神経生理学的過程などの問題がある。

Grossberg & Swaminathan (8) は、これまでの神経生理学的そして精神物理学的研究成果を踏まえ、奥行き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) を提唱した。このモデルは、(1) 刺激パターン内で共有される線分と角度を検出できること、(2) 奥行き傾斜面刺激の角度と両眼視差勾配からパターンの3次元境界を形成できること、(3) 充填効果が生起して面が形成できること、などを説明できる。このモデルで奥行きに関する知覚現象をどの程度まで説明できるか、今後の展開に関心を払いたい。

次に、絵画的要因間の加算効果について、Meese & Holmes (17) は、実験結果を踏まえて、2通りの包括的な奥行きがかり加算モデルを提示した。モデルAでは、絵画的要因S1とS2が手がかりとして有効な場合、S1の回路が閉じていると「蓋然的加算効果」が生起し、S1とS2の回路が両方閉じていると「理想的加算効果」が生起し、S2の回路が閉じていると「線形加算効果」が生起する。モデルBは、「理想的加算効果」の変形モデルであり、それとの違いは、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。この研究は、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持つと共に加算回路も併設されていることを示唆している。

さらに、奥行手がかりの加算効果が奥行順序の判断の正確度と速度に関係するかが検討された (Mather & Smith (15))。奥行手がかりは明るさコントラスト、オクルージョンそして輪郭線のボケとし、これらの要因が単独、2 要因の組み合わせ、3 要因の組み合わせの各条件が設定され、各条件で重なりをもつ 3 枚のプレートに視えるように刺激パターンが作成された。実験の結果、視覚的な重なり順序の判断の正確度はすべての手がかり組み合わせ条件で高いが、オクルージョン単独条件は他の条件に比較して劣っていた。また、手がかりの組み合わせ条件による重なり判断のための反応速度の差は、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 つの手がかり組み合わせ条件の方が短いことが示された。このことから、各奥行手がかりは単独モジュールで処理され、それらがそれぞれ奥行手がかりごとに重みづけられて加算され、最終的な奥行・立体効果を生み出している。

この他、色彩要因の立体効果、テクスチャの傾き効果、形態盲患者の平面画像の奥行視が研究されている。

### 6.4. 3次元視空間の問題

3次元視空間に関わる研究問題としては、視覚的大きさや距離との関係、知覚恒常性問題、視空間の双曲特性、バーチャル・リアリティ空間と現実空間の比較などがある。

視覚的大きさや距離との関係については、大きさ - 距離不変仮説が Foley et al. (3) によって再検討され、新しいモデル (tangible model) が提唱された。このモデルの特徴は、物理的視角に代えて、いわば視覚的視角を用いていることにある。しかし、視覚的視角  $\theta$  の定数は測定値

から直接求められるのではなく、実験式を実測値により近似させて求められるので、ここに、このモデルの問題が残ると考えられる。

また、この視覚的大きさ - 距離不変仮説は、凸面鏡に投影された対象の視覚的大きさや奥行距離からも Higashiyama & Shimono (11) によって検討された。測定実験の結果にもとづき、近刺激 (proximal) のレベル (曲率と視角)、遠刺激 (distal) のレベル (実際の大きさや実距離)、そして鏡像 (virtual) のレベル (鏡像の大きさや距離) のそれぞれで、視覚的大きさや視覚的距離との相関関係が分析された。その結果、視角は視覚的大きさや正の相関を、視覚的距離とは負の相関を、また曲率は視覚的大きさや正の相関をもつこと、さらに視覚的大きさや視覚的距離との間には正の相関があることが示された。これは、視覚的距離考慮モデル (taking-into-account model) を支持する。ただ、遠刺激のレベルの相関分析では、一部のデータは直接知覚モデル (direct perception model) を支持している。

さらに、ガンツフェルトについての観察実験が報告された (Tsuji, et al. (23)) とくに、赤色照射条件で 30 分間の連続観察が実施され、その間に生起するすべての知覚体験の報告が被験者に求められた。その結果から、ガンツフェルト知覚現象は、次のようなフェーズで進行することが明らかにされた。「堅固なものの知覚」- 「視空間の面の歪み」- 「対象性の喪失」- 「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)」- 「何か」漠然としたものの接触」- 「外界との一体化 (融合)」。これらのフェーズは、視覚は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。

この他の研究では、観察者に対する接近対象の移動軌跡の知覚、バーチャル・リアリティ空間での想定された観察位置と奥行絶対距離知覚、遮蔽物がある条件での対象までの奥行絶対距離

知覚、自然空間における対象間を結ぶ方向の知覚判断などの問題が報告された。

## 7. 文献

- (1) Bingham, G. R., Crowell J. & Todd, J. T. 2004 Distortions of distance and shape are not produced by a single continuous transformation of reach space. *Perception & Psychophysics*, 66, 152-169.
- (2) Champion, R.A., Brenner, E., Mamassian, P. & Simmons, D.R. No evidence for sequential effects of the interaction of stereo and motion cues in judgements of perceived shape. *Vision Research*, 44, 483-487.
- (3) Foley, J. M., Ribeiro-Filho, N. P. & Da Silva, J. A. 2004 Visual perception of extent and the geometry of visual space. *Vision Research*, 44, 147-156.
- (4) Champion, R. A., Simmons, D. R. & Mamassian, P. 2004 The influence of object size and surface shape on shape constancy from stereo. *Perception*, 33, 237-247.
- (5) Gheorghiu, E. & Erkelens, C. J. 2004 Spatial-scale interaction in human stereoscopic vision in response to sustained and transient stimuli. *Vision Research*, 44, 563-575.
- (6) Cook, M. & Gillam, B. 2004 Depth of monocular elements in a binocular scene: The conditions for da Vinci stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 30, 92-103.
- (7) Gray, R., Macuga, K. & Regan, D. 2004 Long range interaction between object-motion and self-motion in the perception of movement in depth. *Vision Research*, 44, 179-195.
- (8) Grossberg, S. & Swaminathan, G. 2004 A laminar cortical model for 3D perception of slanted and curved surfaces and of 2D images: development, attention, and bistability. *Vision Research*, 44, 1147-1187.
- (9) Guibal, C. R. C. & Dresch, B. 2004 Interaction of color and geometric cues in depth perception: when does "red" mean "near", *Psychological Research*, 69, 30-40.
- (10) He, Z. J., Wu, B., Ooi, T. L., Yarbrough, G. & Wu, J. 2004 Judging egocentric distance on the ground: Occlusion and surface integration. *Perception*, 33, 789-806.
- (11) Higashiyama, A. & Shimono, K. 2004 Mirror vision: Perceived size and perceived distance of virtual images. *Perception & Psychophysics*, 66, 679-691.
- (12) Ichikawa, M., Nishida, S. & Ono, H. Depth perception from second-order-motion stimuli yoked to head movement. *Vision Research*, 44, 2945-2954.
- (13) Kelly, J. W., Loomis, J. M. & Beall, A. C. 2004 Judgments of exocentric in large-scale space. *Perception*, 33, 443-454.
- (14) Lewis, F. C. & McBeath, M. K. 2004 Bias to experience approaching motion in a three-dimensional virtual environment. *Perception*, 33, 259-276.
- (15) Mather, G. & Smith, D. R. R. 2004 Combining depth cues: effects upon accuracy and speed of performance in a depth ordering task. *Vision Research*, 44, 557-562.
- (16) McIntosh, R.D., McClements, K.I., Dijkerman, H.C. & Milner, A.D. 2004 "Mind the Gap": The size-distance dissociation in visual neglect is a cueing effect. *Cortex*, 40, 339-346.
- (17) Meese, T.S. & Holmes, D.J. 2004 Performance data indicate summation for pictorial depth-cues in slanted surfaces. *Spatial Vision*, 17, 127-151.
- (18) Muller, C., Lankheet, M. J. M. & van de Grind, W. A. 2004 Binocular correlation does not improve coherence detection for fronto-parallel motion. *Vision Research*, 44, 1961-1969.
- (19) Norman, J.F., Clayton, A.M., Shular, C.F. & Th-



- ompson, S.R. 2004 Aging and the perception of depth and 3-D shape from motion parallax. *Psychology and Aging*, 19, 506-514.
- (20) Philbeck, J. W. O'Leary, S. & Lew, A. L. B. 2004 Large errors, but no depth compression, in walked indications of exocentric extent. *Perception & Psychophysics*, 66, 377-391.
- (21) Price, N. S. C., Greenwood, J. A. & Ibbotson, M. R. 2004 Tuning properties of radial phantom motion aftereffects. *Vision Research*, 44, 1971-1979.
- (22) Rosas, P., Wichmann, F. A. & Wagemans, J. 2004 Some observation on the effects of slant and texture type on slant-from-texture. *Vision Research*, 44, 1511-1535.
- (23) Tsuji, K., Hayashibe, K., Hara, M. & Kato, M. 2004 Detailed analysis of Ganzfeld phenomena as perceptual events in stimulus-reductive situations. *Swiss Journal of Psychology*, 63, 217-223.
- (24) Turnbull, O. H., Driver, J. & McCarthy, R. A. 2004 2D but not 3D: pictorial-depth deficits in a case of visual agnosia. *Cortex*, 40, 723-738.
- (25) van Dam, L. C. J. & van Ee, R. 2004 Stereoscopic matching and the aperture problem. *Perception*, 769-787.
- (26) Vianin, P., Baumberger, B. & Fickiger, M. 2004 Distance estimation in a dynamic simulated environment: A visual field dependence problem. *Perception*, 33, 561-568.
- (27) Vanrie, J., Dekeyser, M. & Verfaillie, K. 2004 Bistability and biasing effects in the perception of ambiguous point-light walkers. *Perception*, 33, 547-560.
- (28) Welchman, A. E., Tuck, V. L. & Harris, J. M. 2004 Human observers are biased in judging the angular approach of a projectile. *Vision Research*, 44, 2027-2042.
- (29) Witt, J. K., Proffitt, D. R. & Epstein, W. 2004 Perceiving distance: A role of effort and intent. *Perception*, 33, 577-590.
- (30) Wright, M. & Ledgeway, T. 2004 Interaction between luminance gratings and disparity gratings. *Spatial Vision*, 17, 51-74.

## 参考文献

- Anstis, S. M., & Harris, J. P. 1974 Movement after effects contingent on binocular disparity. *Perception* 3, 152-168.
- Bakin, J. S., Nakayama, K. & Gillbert, C. D. 2000 Visual responses in monkey areas V1 and V2 to three-dimensional surface configurations. *Journal of Neuroscience*, 20, 8188-8198.
- Beusmans, J. M. H. 1998 Optic flow and the metric of the visual ground plane. *Vision Research*, 38, 1153-1170.
- Blakemore, C. & Campbell, F. W. 1969 On the existence of neurons in the human visual system selectively sensitive to the orientation and size of the retinal images. *Journal of Physiology*, 203, 237-260.
- Bradshaw, M. F. & Rogers, B. J. 1996 The interaction of binocular disparity and motion parallax in the computation of depth. *Vision Research*, 36, 3457-3468.
- Brenner, E. & Landy, M. S. 1999 Interaction between the perceived shape of two objects. *Vision Research*, 39, 3834-3848.
- Brenner, E. & van Damme, W. 1999 Perceived distance, shape and size. *Vision Research*, 39, 975-986.
- Bulthoff, H. H. & Mallot, H. A. 1988. Integration of depth modules: stereo and shading. *Journal of the Optical Society of America A5*, 1749-1757.
- Campbell, F. W. & Kulikovski, J. I. 1969 Orientational selectivity of the human visual system. *Journal of Physiology*, 187, 437-445.
- Cavanaugh, J. R., Bair, W. & Movshon, J. A. 2002 Nature and interaction of signals from the receptive field center and surround in macaque V1

- neurons. *Journal of Neurophysiology*, 88, 2530-2546.
- Collett, T. S., Schwarz, U. & Sobel, E. C. 1991 The interaction of oculomotor cues and stimulus size in stereoscopic depth constancy. *Perception*, 20, 733-754.
- 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, 223-238.
- Cumming, B. G., Johnston, E. B. & Parker, A. J. 1993 Effects of different texture cues on curved surfaces viewed stereoscopically. *Vision Research*, 33, 827 -838.
- Doorschot, P. C. A., Kappers, A. M. L. & Koenderink, J. J. 2001 The combined influence of binocular disparity and shading on pictorial shape. *Perception and Psychophysics*, 63, 1038 -1047.
- Duffy, C. J. & Wurtz, R. H. 1991 sensitive of MST neurons to optic flow stimuli. I. A continuum of response selectivity to large field stimuli. *Journal of Neurophysiology*, 65, 1329-1345.
- Epstein, W. 1973 The process of "taking-into-account" in visual perception. *Perception*, 2, 267-285.
- Foley, J. M. 1968 Depth, size and distance in stereoscopic vision. *Perception and Psychophysics*, 3, 265-274.
- Foley, J. M. 1972 Size-distance relation and intrinsic geometry of visual space: implication for processing. *Vision Research*, 12, 323-332.
- Gray, R. & Regan, D. 1998 Accuracy of estimation time to collision using binocular and monocular information. *Vision Research*, 38, 499-512.
- Gibson, J. J. 1979 *The ecological approach to visual perception*. Boston: Houghton Mifflin.
- Glennerster, A. & Parker, A. J. 1997 Computing stereo channels from masking data. *Vision Research*, 37, 2143-2152.
- He, Z. J. & Nakayama, K. 1995 Visual attention to surfaces in three-dimensional space. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 92, 11155-11159.
- Hibbard, P. B. & Bradshaw, M. F. 2002 Isotropic integration of binocular disparity and relative motion in the perception of three-dimensional shape. *Spatial Vision*, 15, 205-217.
- Hinkle, D. & Connor, C. E. 2001 Three-dimensional orientation tuning in Macaque area V4. In *Society for neuroscience abstract*, 286. 7, San Diego, USA.
- Holliday, I. E. & Braddick, O. J. 1991 Pre-attentive detection of target defined by stereoscopic slant. *Perception*. 20, 355-362.
- Janssen, P., Vogels, R. & Orban, G. A. 2000 Three-dimensional shape coding in inferior temporal cortex. *Neuron*, 27, 385-397.
- Johnston, E. B. 1991 Systematic distortions of shape from stereopsis. *Vision Research*, 31, 1351-1360.
- Johnston, E. B., Cumming, B. G., & Landy, M. S. 1994 Integration of stereopsis and motion shape cues. *Vision Research*. 34, 2259-2275.
- Johnston, E. B., Cumming, B. G. & Parker, A. J. 1993 Integration of depth modules: stereopsis and texture. *Vision Research*, 33, 813 -826.
- Julesz, B. & Miner, J. 1975 Independent spatial frequency tuned channels in binocular fusion and rivalry. *Perception*, 4, 125-143.
- Kaufman, L. 1974 *Sight and mind: An introduction to visual perception*. New York, Oxford University Press.
- Landy, M. S., Maloney, L. T., Johnston, E. B. & Young, M. 1995 Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion. *Vision Research*, 35, 389-412.
- Lee, B. 1999 Aftereffects and the representation of stereoscopic surfaces. *Perception*, 28, 1155-1169.
- Loomis, J. M., Da Silva, J. A., Fujita, N. & Fukushima, S. S. 1992 Visual space perception and visually directed action. *Journal of Experimental Psychol-*

- ogy: *Human Perception & Performance*, 18, 906-921.
- Marr, D. & Poggio, T. 1979 A computation theory of human stereo vision. *Proceedings of the Royal Society B (London)*, 204, 301-308.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. 1992 Experiencing and perceiving visual surface. *Science*, 257, 1357-1363.
- Nakayama, K. & Silverman, G. H. 1986 Serial and parallel processing of visual feature conjunctions *Nature*, 320, 264-265.
- Nawrot, M., & Blake, R. 1989 Neural integration of information specifying structure from stereopsis and motion. *Science*, 244(4905), 716-718.
- Nawrot, M., & Blake, R. 1991a The interplay between stereopsis and structure from motion. *Perception & Psychophysics*, 49, 230-244.
- Nawrot, M., & Blake, R. 1991b A neural network model of kinetic depth. *Visual Neuroscience*, 6, 219-227.
- Norman, J. F. & Todd J. T. 1993 The perceptual analysis of structure from motion for rotating objects undergoing affine stretching transformations. *Perception & Psychophysics*, 3, 279-291.
- Pasupathy, A. & Connor, C E. 1999 Responses to contour features in Macaque area V4. *Journal of Neurophysiology*, 82, 2490-2502.
- Pasupathy, A. & Connor, C E. 2001 Shape representation in area V4: position-specific tuning for boundary conformation *Journal of Neurophysiology*, 86, 2505-2519.
- Prazdny, K. 1986 Three-dimensional structure from long-range apparent motion. *Perception*, 15, 619-625.
- Prince, S. J. D., Eade, R. A. & Rogers, B. J. 1998 Contrast masking reveals spatial-frequency channels in stereopsis. *Perception*, 27, 1287-1293.
- Regan, D. 1982 Visual information channeling in normal and disordered vision. *Psychological Review*, 89, 407-444.
- Regan, D. & Beverley, K. I. 1983 Spatial frequency discrimination and detection: comparison of post-adaptation thresholds. *Journal of the Optical Society of America*, 73, 1684-1690.
- Regan, D. & Beverley, K. I. 1985 Post-adaptation orientation thresholds. *Journal of the Optical Society of America A*, 2, 147-155.
- Richards, W. 1985 Structure from stereo and motion. *Journal of the Optical Society of America*, 2, 343-349.
- Riesner J. J. Ashmead, D. H. Talor, C. R. & Youngquist, G.A. 1990 Visual perception and the guidance of locomotion without vision to previously seen targets. *Perception*, 19, 675-689.
- Rogers, B. J. & Graham, M. E. 1979 Motion Parallax as an independent cue for depth perception. *Perception* 8, 125-134.
- Rogers, B. J. & Graham, M. E. 1982 Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception, *Vision Research*, 22, 261-270.
- Rushton, S. K. & Wann, J. P. 1999 Weighted combination of size and disparity: a computational model for timing a ball catch. *Nature Neuroscience*, 2, 186-190.
- Ryan, C. & Gillam, B. 1993 A proximity-contingent stereoscopic depth aftereffect: evidence for adaptation to disparity gradients. *Perception*, 22, 403-418.
- Shiori, S., Hatori, T., Yaguchi, H. & Kubo, S. 1994 Spatial frequency channels for stereoscopic depth. *Optical Review*, 1, 311-313.
- Taira, M., Tsutshi, K.I., Jiang, M., Yara, K. & Sakata, H. 2000 Parietal neurons represent surface orientation from the gradient of binocular disparity. *Journal of Neurophysiology*. 83, 3140-3146.
- Tanaka, K., Hikosaka, K., Saito, H., Yukie, M., Fukuda, Y. & Iwai, E. 1986 Analysis of local and wide-field movements in the superior temporal visual areas of the macaque monkey. *Journal of Neuroscience*, 6, 134-144.

- Thomas, O. M., Cumming, B. G. & Parker, A. J. 2002 A specialization for relative disparity in V2. *Nature Neuroscience*, 5, 472-478.
- Thomson, J. A. 1983 Is continuous visual monitoring necessary in visually guided locomotion? *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 9, 427-443.
- Tittle, J. S., Norman, J. E., Perotti, V. J. & Phillips, E. 1998 The perception of scale-dependent and scale-independent surface structure from binocular disparity, texture and shading. *Perception*, 26, 147-166.
- Tittle, I. S., Todd, J. T., Perotti, V. J. & Norman, J. F. 1998 Systematic distortion perceived three-dimensional structure from motion and binocular stereopsis. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception & Performance*, 21, 663-678.
- Todd, J. T. & Bressan, P. 1990 The perception of 3-dimensional affine structure from minimal apparent motion sequences. *Perception & Psychophysics*, 48, 419-430.
- Todd, J. T. & Norman, J. F. 1991 The visual perception of smoothly curved surfaces from minimal motor sequences. *Perception & Psychophysics*, 50, 509-523.
- Todd, J. T., Norman, J. E., Koenderink, J. J. & Kappers, A. M. L. 1997 Effects of texture, illumination and surface reflectance on stereoscopic shape perception. *Perception*, 2, 807-822.
- Toye, R. C. 1986 The effect of viewing position on the perceived layout of space. *Perception & Psychophysics*, 40, 85-92.
- Verstraten, P., Verelinde, R., Fredericksen, R. E. & van de Grind, W. A. 1994 A transparent motion aftereffect contingent on binocular disparity. *Perception*, 23, 1181-1188.
- von der Heydt, R., Zhou, H. & Friedman, H. S. 2000 Representation of stereoscopic edges in monkey visual cortex. *Vision Research*, 40, 1955-1967.
- Wagner, M. 1985 The metric of visual space. *Perception & Psychophysics*, 38, 483-495.
- Wilson, H., McFarlane, D. K. & Phillips, G. C. 1983 Spatial frequency tuning of orientation selective units estimated by oblique masking. *Vision Research*, 23, 873-882.
- Witkin, H. A. 1959 The perception of the upright. *Scientific American*, 200, 50-56.
- Yang, Y. & Blake, R. 1991 Spatial frequency tuning of human stereopsis. *Vision Research*, 31, 1177-1189.
- Zhou, H., Friedman, H. S. & von der Heydt, R. 2000 Coding of border ownership in monkey visual cortex. *Journal of Neuroscience*, 20, 6594-6611.