

心理学における 3 次元視研究の動向—2004

3-Dimensional Perception:2004 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 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、奥行距離知覚に分類して報告した。

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 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 2003 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. 両眼立体視と 3 次元形状知覚のための神経生理的モデル

Grossberg & Howe (9) は、両眼立体視と 3 次元形状知覚の両方を説明できる神経生理的階層モデルを提唱した (図 1)。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。このモデルは、次に挙げる 5 つの知覚心理的な要請を満たす。(1) 両眼融合するためには、各眼からのパターンの明るさコントラストは対応していなければならない一方で、パターンとその背景 (図と地) との比率が不変であれば (contrast-invariant)、両眼融合が可能となる (same sign hypothesis)。このモデルでは、この 2 つの要請を

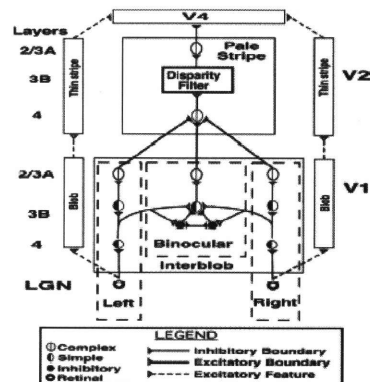


図 1

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。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 (Grossberg & Howe 2003)。

説明するために、V1 の 4 層、3B 層と 2/3 層との相互作用を仮定する。(2) このモデルでは、両眼立体視における対応問題での same sign 仮説にもとづく明るさコントラスト拘束条件を解決するために、V1 の 3B 層での興奮細胞と抑制細胞の相互作用を仮定する。(3) 両眼立体視の対応問題では、左右眼のどの要素が対応するかを解決しなければならないが、そのためにはユニークネス拘束条件 (片眼のひとつの要素は他眼のひとつの要素とのみ対応する) を満たすことが

必要となる。しかし、パヌムの限定条件 (limiting case) に示されるように、視覚システムは片眼のひとつの要素が他眼の複数の要素と対応できる。このモデルでは、V2の3B層で両眼視差フィルター (disparity filter) を仮定し、ここでは、各眼の視線方向の背後にある要素、あるいはキクロピアン事態で奥行方向にある要素を抑制するはたらきをもつ。(4) 視覚システムは、片眼からは見えている対象のエッジが他眼には遮蔽されて見えなくても、その対象の全体を復元できる (ダ・ヴィンチ ステレオプシス)。これは両眼立体視情報が一部欠如していても、その他の領域からの情報を得て、片眼でのみ観察された領域に明瞭な奥行をもたせることができることを示す。単眼立体視情報は明確な立体視量を指し示さないの、視覚システムはどのようにして単眼立体視情報と両眼立体視情報を結びつけるのかという問題 (monocular-binocular interface problem) が生じる。このモデルでは、これを解決するために、ひとつの単眼立体視情報を担う細胞からの出力は、その視線上にあるすべての立体面に送られ、さらに両眼視差フィルターの働きと連動し、対応問題で無関係にされた部分は、自動的に除去される。これらは、V2の4層にある Pale stripe で行われると仮定される。(5) このような段階を経て処理された対象の輪郭線は、V4で結合され対象の面を成立させる。このとき、明るさと色の充填 (filling-in) のプロセスが必要となる。

このモデルは、4つの処理段階から構成されている。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) である。

さらに、このモデルは、両眼立体視の成立に関わる次のような問題、すなわち、dichoptic masking (McKee et al. 1994)、両眼立体視対応問題における対応しない明るさコントラストの効果 (Smallman & McKee 1995)、両眼立体視力における眼球間の明るさコントラストの差の効果

(Smallman & McKee 1995)、パヌムの限界条件、Venetian blind 効果 (Howard & Rogers 1995)、反対極性をもつ明るさコントラストから構成されたステレオグラムの立体視問題、ダ・ヴィンチステレオグラム問題 (Nakayama & Shimojo 1990)、クレーカーオブライエンコーンスイート錯視 (Craik-O'Brien-Cornsweet lightness illusion) に対して説明することができるという。

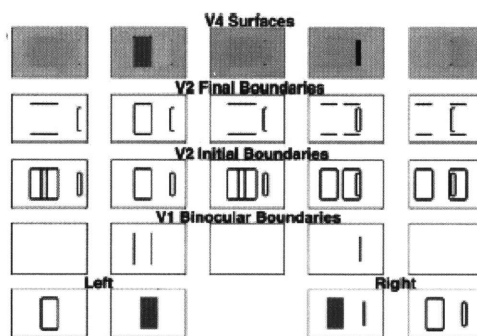


図 2

神経生理的階層モデルを用いたダ・ヴィンチ ステレオグラム立体視成立過程のシミュレーション (Grossberg & Howe 2003)。

図2は、このモデルを用いたダ・ヴィンチステレオグラム立体視成立過程のシミュレーションである。V1の Binocular Boundaries では、左右ステレオグラムの矩形の垂直輪郭線が検出され、比較的小さい視差を示す領域に書き込まれる (各行の5つの領域は左側から視差が小さい順に配列されている。ただし、中央の領域は注視点距離を表す)。また細い棒刺激の右側の輪郭線は矩形の右側の輪郭線と対応づけられて比較的大きい視差領域に書き込まれる。また、細い棒刺激の左側の輪郭線は、両眼で対応をもたないので、V2の Initial Binocular Boundaries のすべての視差領域に視線と対応づけられて書き込まれる。V2の Final Boundaries では、垂直輪郭線は両眼視差フィルターを通すことによって誤った対応は抑制され正しい対応のみが残される。最後に、V4の Surface において、矩形と細い棒が検出され、それぞれが示す視差領域の位

置に書き込まれる。この場合には矩形が観察者の手前に、細い棒がその後ろに定位して知覚される。

このモデルは、視覚心理学的問題から神経生理学的問題まで広範囲に説明できる可能性をもつと考えられる。

2.2. 視差対応のない条件での認知的補完による立体復元

いま、対象が観察者の正中線上に存在し、かつ観察者の両眼間距離よりもその大きさが小さい場合には、その対象によって左眼では背景面の右半分の視野が、右眼では背景面の左半分の視野が遮蔽されてしまう。それにもかかわらず、観察者には背景面がすべて見える。あたかも、対象が透明になったような見え方が生起する。この問題をはじめめて指摘したのは、レオナルド・ダ・ヴィンチであり、ダ・ヴィンチ・パラドックスと呼ばれる。これは視覚上の単眼遮蔽に関わる問題を指摘する。

Nakayama & Shimojo (1990) は、各眼に対応しない領域がある場合で、それらが観察者の前方の対象によって生じる遮蔽された領域を示す場合には、両眼立体視システムは、遮蔽によるこの種の左右で対応しない領域からの情報を立体、輪郭、表面の再現に利用していることを明らかにした。さらに Gillam & Nakayama (1999) は、図3に示したように、観察者の前方に、あたかもある長方形が存在し、それによって各眼に生じる遮蔽領域をもつ一種のステレオグラムを作成し両眼立体視すると、このステレオグラムには、遮蔽する対象である長方形が実際には存在せず、また視差対応が全くないにもかかわらず、仮想の白色長方形 (phantom surface) が出現することを示した。この結果は、両眼立体視システムが1対1対応をもたないステレオグラムでも立体視が可能で、また実際には存在しない対象を出現させる視覚的補完作用があることを示す。

Bacon & Mamassian (2) は、同様に、一対一

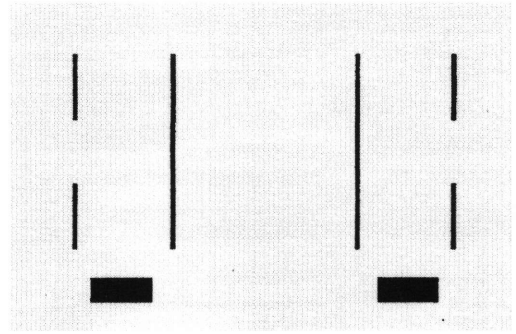


図3

仮想の白色長方形形状の面 (phantom surface) が出現するステレオグラム (Gillam & Nakayama, 1999)

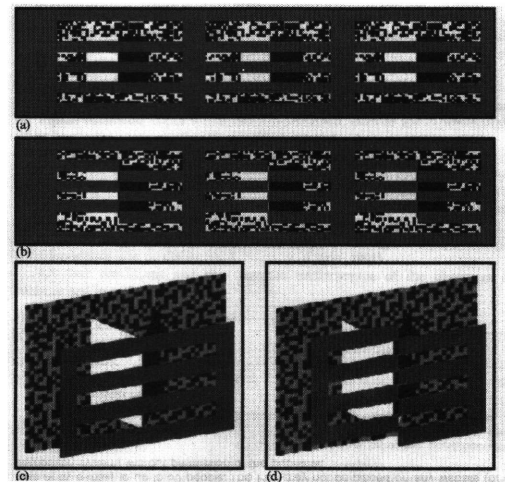


図4

両眼視差対応が遮蔽対象によって遮蔽されたステレオグラム。(a): 楔形の角度をもつ矩形、格子状の遮蔽対象には、それぞれ視差がついていて、両眼立体視すると (c) のように見える。(b) 遮蔽対象である格子が互い違いに配置されているために、楔形の矩形を示す視差を遮蔽しているが、これを立体視すると、同様に楔形の矩形の出現方向が、視差が遮蔽されているにもかかわらず、正しく知覚される (Bacon & Mamassian, 2002)。

の視差対応をもたないステレオグラムで認知的補完によって立体視が生じることを示した。実験に使用したステレオグラムは、図4に示したように、ランダム・ドットの背景、その手前に楔形の角度をもつ矩形、さらに手前には格子状の遮蔽対象が置かれている。図中 (a) では、楔形の角度をもつ立体矩形には視差、またこの矩形と遮蔽格子の間にも視差がつけられている。

このステレオグラムを両眼立体視すると、(c)に示されたような背景面、楔型角度をもつ矩形、そして遮蔽格子がそれぞれ立体的に配置されて出現する。一方、(b)では、遮蔽格子の横格子は、中央で互い違いにずらすことによって、楔形角度をもつ矩形の視差を遮蔽し、一対一の視差対応を完全に妨害している。したがって、矩形の角度（楔形角度が凹か凸か）を担う視差は存在しない。これを立体視すると、矩形の角度を示す部分に一対一の視差対応が妨害されているのに、楔形の角度を示す視差を交差から非交差に変化すると、それに対応した立体角度が出現することが明らかにされた。しかし、楔形の矩形と遮蔽格子との位置関係を逆転し、楔形の矩形が遮蔽格子の前に出現する視差に設定すると、楔形の矩形は正しく知覚されないことも明らかにされた。これらの結果から、人間の両眼立体システムは、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ことを示す。

一方、Ono, et al. (16) は、ダ・ヴィンチが設定した事態で、もし奥行距離が異なる 2 つの不透明な対象が観察者の正中線上の方向に存在する場合には、遠くに位置する対象は近くに位置する対象を透明にしないと見えないことになるので、これら 2 つの対象は同一の方向には知覚されないはずであると考えた（ダ・ヴィンチの拘束条件）。これを実験的に検討するために、図 5 に示されたような実験事態を考案した。図中、A では、遠、近に位置する 2 つの対象とさらにそれらの前にある遮蔽対象が両眼立体視条件で提示され、さらに、遮蔽対象の左右端からわずかに離れた位置に垂直線分が単眼視で（両眼視差をつけないで）それぞれ提示された。観察者は、近くにある対象もしくは遠くに位置した対象を注視しながら、中央に提示した比較線分を左、もしくは右に移動し、単眼視線分と方向が一致するように調整する。B では、同様に、観察者は近くに位置した対象もしくは遠くに位置し

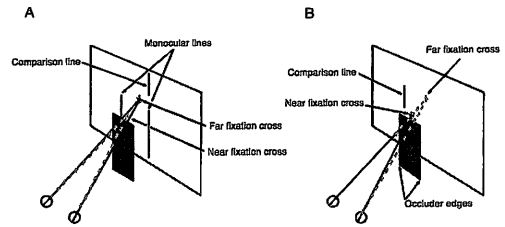


図 5

ダ・ヴィンチの拘束条件を検討する実験条件。A では、遠、近に位置する 2 つの対象とさらにそれらの前に遮蔽対象が両眼立体視条件で提示され、さらに、遮蔽対象の左右端からわずかに離れた位置に垂直線分が単眼視で（両眼視差をつけないで）それぞれ提示される。観察者は、近くにある対象もしくは遠くに位置した対象を注視しながら、中央に提示した比較線分を左、もしくは右に移動し、単眼視線分と方向が一致するように調整する。B では、同様に、観察者は近くに位置した対象もしくは遠くに位置した対象を注視しながら、遮蔽対象の左あるいは右端が比較線分と視えの方向が一致するように調整する（Ono, et al. 2003）。

た対象を注視しながら、遮蔽対象の左あるいは右端が比較線分と視えの方向が一致するように調整する。実験の結果、(1) 遠・近に位置する 2 つの対象間の距離が大きい場合には、非注視対象は二重にしかもボケて見えること、したがって、視覚システムは近くに位置する対象を二重にしかも透明に知覚させることによって、もしくは遠くに位置する対象を二重にしかも重なり合うように知覚させることによってダ・ヴィンチの拘束条件を解決していること、(2) 遠・近に位置する 2 つの対象間の距離が小さい場合には、非注視対象の視かけの方向を転位させ、しかもその一部を見えないように抑制することによってダ・ヴィンチの拘束条件を解決していることが、それぞれ明らかにされた。

2.3. 手の届く範囲にある対象の奥行手がかりとしての両眼視差と運動視差

手の届く範囲にある対象を実際に手に取る場合には、主として両眼視差と運動視差が奥行手がかりとして利用される。Watt & Bradshaw (19) は、対象をバーチャル・リアリティ空間内に提

示し、観察者には液晶シャッター眼鏡を装着して立体視させ、バーチャル・リアリティ空間内の対象を手で取るように求めた。奥行手がかりとしては、両眼視差単独条件、運動視差単独条件、両眼視差と運動視差が共に利用可能な条件がそれぞれ設定された。また、対象を手で掴む場合に、初めから終わりまで観察者の手、対象がともに観察できる視覚-運動フィードバック条件と、観察者の手、および対象を除去して視覚-運動フィードバックに利用できない条件とが設定された。後者の条件では、観察者は、初めに観察した対象までの距離にのみもとづいて手のばし反応を行わなければならない。奥行距離知覚の指標としては、手のばし反応の時の観察者の手首の速度（これは距離に比例して変化する）を、対象の大きさ知覚の指標としては、手のばし反応の時の親指と人差し指の間のギャップ（これも対象の大きさに比例して変化する）を、それぞれ利用した。実験の結果、(1) 両眼視差単独条件では、対象の奥行と大きさは正常に知覚されること、(2) 運動視差単独条件では、対象までの奥行知覚は正常であるが、対象の大きさ知覚は正常ではないこと、(3) 両眼視差と運動視差が共に利用できる条件では、両眼視差単独条件と同様に対象の奥行と大きさは正常に知覚されるものの、それ以上に加算されるプラスの効果は示されないことなどが明らかにされた。これらの結果から、両眼視差と運動視差は奥行手がかりとして、ほぼ同等の手がかり効果をもつが、対象の大きさ知覚に関しては両眼視差が強い手がかり効果をもっている。

2.4. 両眼立体視異常の程度と、両眼視差と運動視差の両要因による立体視の程度との相関

両眼立体視異常 (stereoanomalous) は、約 30 % のものに生じ、この場合、交差視差、あるいは非交差視差のどちらかによる立体視ができない。また、両眼立体視能力を完全に欠いている者 (stereoblind) は約 3 % と報告されている

(Richards, 1970 1971)。Ee (6) は、両眼視差で提示した刺激に運動を付加すると両眼立体視異常者でも、立体を正しく知覚できるかを検討した。実験は、図 6 に示されたように、奥行方向 (Z 軸上) にそって不規則に配置された 46 本の棒状刺激でそれぞれに両眼視差をつけて提示される。棒状刺激群によって提示された奥行距離は、提示面の前後 50cm ずつ 100cm である。また、各棒状刺激には、運動視差がつけられ、それらは両眼視差で規定された奥行と一致するように速度勾配をもって左右に反転しながら運動する。奥行距離は、棒状刺激群の最前列に提示された測定用に提示した矩形枠を上方向に広げ、その上下の幅を調整させることで再現された。被験者は 30 人で、すべてにステレオアノマリ・テストを実施し、ステレオアノマリの程度を評点をつけて評価した。

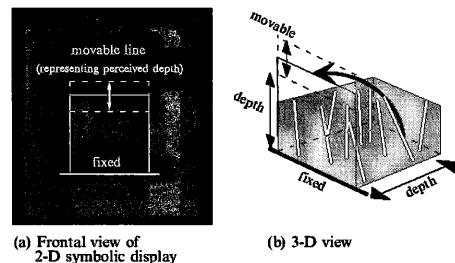


図 6

両眼立体視異常の程度と両眼視差と運動視差両要因からの立体視の程度をさぐる実験事態。刺激は奥行方向 (Z 軸上) にそって不規則に配置された 46 本の棒状刺激でそれぞれに両眼視差をつけて提示される。また、各棒状刺激には、運動視差がつけられ、それらは両眼視差で規定された奥行と一致するように速度勾配をもって左右に反転しながら運動する (Ee, R. van 2003)。

その結果、ステレオアノマリの程度と運動要因と両眼視差で提示された立体視の程度との間には強い相関があり、ステレオアノマリの程度が高いと立体視が悪くなることが示された。ステレオアノマリの高い者は運動視差を追加しても、立体視は向上しないことが明らかにされた。

2.5. 窓問題とプルフリッヒ効果

プルフリッヒ効果とは、左右水平方向に運動する振り子を片眼にのみデンシティ・フィルターをかけて観察すると、振り子が奥行方向に回転して見える現象を言う。これは、片眼にデンシティ・フィルターをかけるため、刺激が視覚領に到達する速度が遅延し、結果として両眼間に擬似的な両眼視差が生まれるためと説明される。プルフリッヒ効果が最大となるのは、振り子の運動方向が水平の場合で、それが垂直の場合には非常に弱い。この効果は、刺激の運動方向に特異的であるといえる。

プルフリッヒ効果では、両眼視差検出過程と運動方向検出過程は、相互に関連し合っているのであろうか。それとも、それぞれが独立して処理されているのであろうか。運動方向は、窓を通して観察すると、その運動方向が曖昧になることが知られている。そこで、図7の左図に示されたように、円形の窓のなかに1本の斜線を提示し、例えば、それを斜め左方向に運動させると、斜線の視かけの運動方向は、水平、斜め、垂直の3方向のいずれかで、多義的となる。仮に右眼にデンシティ・フィルターを装着して観察すると、図の右図に示されたように、左右眼間に両眼視差が生じる。

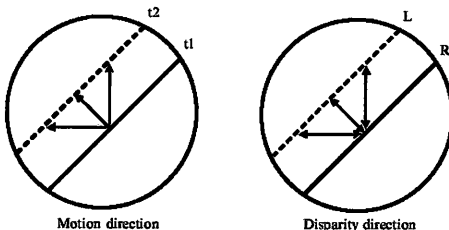


図7

プルフリッヒ効果と運動方向との関係。運動方向は、窓を通して観察すると、その運動方向が曖昧になることが知られている。そこで、図の左図に示されたように、円形の窓のなかに1本の斜線を提示し、例えば、それを斜め左方向に運動させると、斜線の視かけの運動方向は、水平、斜め、垂直の3方向のいずれかで、多義的となる。仮に右眼にデンシティ・フィルターを装着して観察すると、図の右図に示されたように、左右眼間に両眼視差が生じる (Ito, 2003)。

Ito (13) は、このような窓を通して斜線を運動させ、その視かけの運動方向とプルフリッヒ効果の出現程度との関係をしらべた。視かけの運動方向は、斜線とは別に窓内に提示した垂直、水平、斜め方向 (片眼にのみ提示) に運動するランダム・ドットで判定させ、またプルフリッヒ効果の奥行は、同様に、窓内に水平方向、5段階の奥行で提示した5個の小さな対象のいずれに一致するかで判定させた。その結果、物理的には同一の運動方向をもつ斜線でも、知覚的には水平、垂直、斜め方向に見えるが、しかし、この見えの方向とプルフリッヒ効果とは全く関連しないことが示された。このことから、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ている。

2.6. 注意過程と両眼立体視残効

前注意過程は、両眼視差や運動視差からの立体視過程と同様に視覚情報処理過程の低次過程と位置づけられている。しかし、高次過程である注意過程が運動残効を変えたとの結果が報告され、高次過程から低次過程へのフィードバックが示唆されている (Chaudhuri 1990)。

そこで、両眼立体視残効が高次注意過程の挿入で変容を受けるかが検討された (Rose, et al. (17))。検査ステレオグラム (図8のa) と順応ステレオグラム (図8のb) は、RDS図形である。30秒間の順応後に検査ステレオグラムが提示され、残効持続時間が測定される。

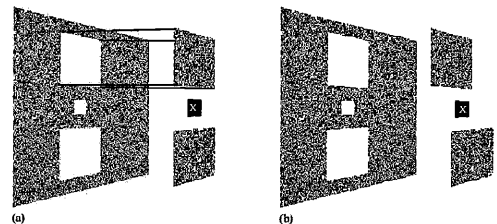


図8

両眼立体視残効のためのRDSステレオグラム (Rose et al. 2003)。

高次注意過程の挿入は、凝視点（図中のX）に2つの数字と10個のアルファベットを不規則な順序で提示し、数字が提示されたらキー・ボタンを押すことで行われた。また数字あるいは文字の提示の速度は、2段階に設定され、課題の困難度が操作された。

実験の結果、残効の持続時間は高次注意過程を挿入すると、有意に減少すること、この減少は、注意過程が難しいほど大きくなることが示された。これらの結果から、両眼立体視過程においても、高次注意過程から低次の視覚情報処理過程へのフィードバックの存在が支持されている。

2.7. 両眼立体視で提示された凹面に対する統合失調症患者の知覚特性

人間の顔など熟知した対象を両眼立体視で凹面提示（hollow mask）しても、視覚システムは凸面に反転させて知覚する傾向をもつ（Gregory 1998）。ところが、統合失調症患者の場合には、この種の反転が抑制される傾向が高い。Schneider et al. (18) は、統合失調症と診断された患者18名（平均年齢38.45歳）に対して、熟知対象が凹面表示されるように両眼立体視で提示し、それが凹面、凸面のいずれに視えるかを判断させた。その結果、健常者、鬱病患者と比較し、統合失調症患者は凹面の反転視が優位に抑制されることが示された。視覚システムは、熟知した対象が凹面で提示されていても、過去経験や知識などによる概念が駆動し、日常経験とは異なるデータ駆動型による情報処理を修正すると考えられている。統合失調症患者で熟知対象の凹面表示が修正されないことは、概念駆動型による知覚が働きにくくなっていることを示唆する。

3. 運動要因による3次元視

3.1. オプティック・フローにもとづく観察者の移動距離知覚

観察者がどの位の距離を移動したかの手がかりとしては、前庭器官からの情報、歩行時の自己受容感覚情報があるが、さらに、観察者の移動によって生み出されるオプティック・フローも、手がかりとして有効である。これまでの研究によれば、オプティック・フローは、歩行者がまっすぐ前を向いているかについての知覚（Warren & Hannon, 1990）、歩行速度の調整（Prokop, et al. 1997）、あるいは事物との接触までの時間の見積もり（Tresilian, 1999）に有効であることが示されている。

そこで、オプティック・フローの速度と歩行者の移動距離との間に有効な関係があるかが確かめられた（Frenz et al. (8)）。実験条件のオプティック・フローとして、テクスチャで構成された地面（テクスチャ勾配、刺激の大きさ変化、運動視差、運動による刺激要素の軌道変化の手がかりが存在）ドットで構成された地面（テクスチャ勾配、運動視差、運動による刺激要素の軌道変化の各手がかりが存在）、縮減されたドット数（運動視差のみが存在）で構成された地面、そして霧に囲まれたようにドット（運動視差、運動による刺激要素の軌道変化の手がかりが存在）を配置したものを作成し、移動距離知覚に關係する手がかりが操作された。実験は、はじめに先行条件としてのオプティック・フローを提示し、次いで後行条件としてのオプティック・フローを提示する。先行条件と後行条件のオプティック・フローは、4種類の実験条件の中から同種の組み合わせの場合とそれらが異なる組み合わせの場合とが設定された。先行条件として提示するオプティック・フローは、速度（2m/s）、時間（2s）、視点の高さ（2.6m）が一定である。観察者は先行条件としてスクリーンに投影されたオプティック・フローを観察し、次に、後行のオプティック・フローを観察し、先行条件の

オブティック・フローに較べて後行条件のオブティック・フローの方が、より長い距離を移動したように知覚されたかが尋ねられた。実験は、実験条件のオブティック・フローの移動速度、移動時間、そして、観察者の視点（地面からの視点までの高さ）、観察者の視野範囲、俯角の各要因を変えて行われ、奥行手がかりの効果が吟味された。その結果、観察者は、運動視差のみが手がかりである条件を含めて、すべての実験条件で自己が前方に移動しているように知覚できた。また、観察者の視点の高さ、観察者の視野範囲、俯角の各要因を変えることによってオブティック・フローから知覚できる速度情報を変化させたところ、観察者の移動距離知覚は、観察者が知覚した移動速度に依存して変化することが示された。このことから、観察者がどのくらい移動したかの見積もりは、観察者が周囲からのオブティック・フローにもとづき、自身の移動速度をどの程度と見積もるかによって規定されている。

3.2. 奥行方向への運動要因と両眼視差による奥行定位との関係

奥行方向への運動要因が両眼視差による奥行定位を変位させるかが、Edwards & Badcock (5) によって検討された。実験は、図9に示されたように、ランダム・ドットで構成されたオブティック・フローを奥行方向に運動させて行われた。両眼視差は、5'、10'、15'の3段階に変化させ、交差、非交差で提示された。運動方向は、観察者に向かってくる方向（FW条件）、観察者から遠ざかる方向（BW条件）が設定された。被験者は、はじめに、FW条件（BW条件）を観察、次いで直ちにBW条件（FW条件）を観察した後、後者の条件に比較し前者の方が運動対象がより手前に見えるかいなかの判断が求められた。その結果、FW条件の方が、BW条件に比較して、いっそう手前に運動対象が知覚されることが示され、奥行方向への運動要因が両眼視差による奥行定位を変位させることが明らか

にされた。この結果は、運動要因の処理過程（モジュール）と両眼視差の処理過程（モジュール）との間に相互作用が存在することを示唆する。

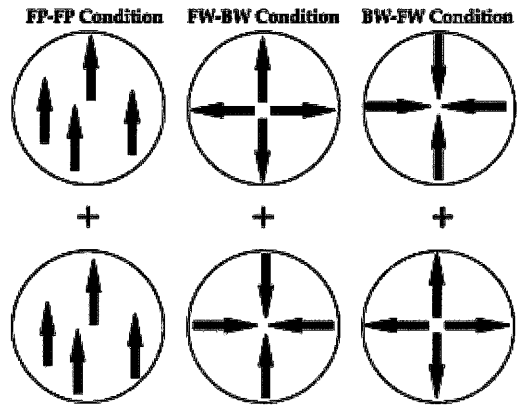


図9

奥行方向への運動要因と両眼視差による奥行定位との関係をさぐる実験事態。

ランダム・ドットで構成されたオブティック・フローを、前額平行（FP）、観察者に向かってくる方向（FW条件）、観察者から遠ざかる方向（BW条件）に運動させる（Edwards & Badcock 2003）。

3.3. 視覚野（VI）における相対的運動に対するニューロンの応答反応

同一パターン内にある複数の対象の相対的運動の検出は、運動視差、あるいは運動に誘導されて出現する図-地分離にとって重要である。そこで、アカゲザルの視覚野（VI）の単一ニューロンの相対的運動に対する応答特性がしらべられた（Cao & Schiller (3)）。

相対的運動は、図10に示したように、ランダム・ドットで構成されたパターンの中の地と図（矩形で表示）のドットの運動速度（運動方向は同一）を違えることで提示された。このとき、図（矩形）は円（受容野を示す）で示された中心に向かって移動する。

実験の結果、測定したニューロンのうち、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すること、またニューロンの応答特性には3種類あり、その1は、V型応答特性を示すもので、図と地の速度が等価の時に応答が小さく、それらの相対的速度差が大きいと

きに強く応答する。その2、は逆V型応答特性を示すもので、図と地の速度が等価の時に応答が強く、それらの相対的速度が小さくなるとしだいに弱く応答する。その3は、図と地の相対的速度差が増大するに比例して応答も強くなる型である。これらのニューロンは、図と地の分離、そして運動速度の不連続の検出に重要であると考えられる。

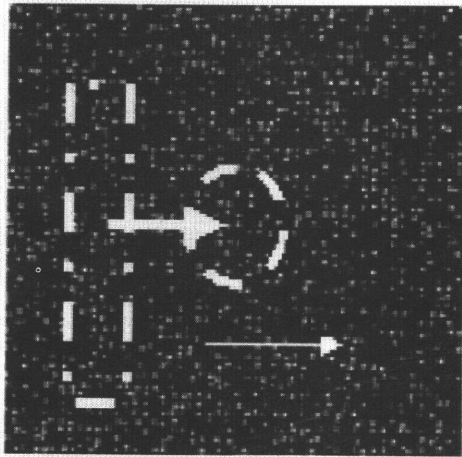


図 10

相対的運動のニューロン特性を測定するための刺激。相対的運動は、ランダム・ドットで構成されたパターンの中の図(矩形で表示)と地のドットの運動速度(運動方向は同一)を違えることで提示された。このとき、図(矩形)は円(受容野を示す)で示された中心に向かって移動する(Cao & Shiller 2003)。

3.4. 3次元方向に運動する対象の方向知覚

Harris & Dean (10) は、3次元方向に運動する対象の方向に関する知覚がどの程度正確に行われるかについて実験的に検討した。対象は両眼視差だけを用いて提示され、観察者は液晶シャッター眼鏡を装着して観察者した。運動対象の方向は、図11に示されたように、観察者に向かって正面、右方向、左方向(β)である。観察者は、運動する対象の方向を図に描くように、さらに回転するポインターを調整して再現するように求められた。その結果、対象の運動方向は正確に知覚されず、方向角度(β)の過大視

が起きることが示された。この結果から、3次元方向に運動する対象の方向知覚は、両眼視差だけでは十分ではないことが示唆されている。

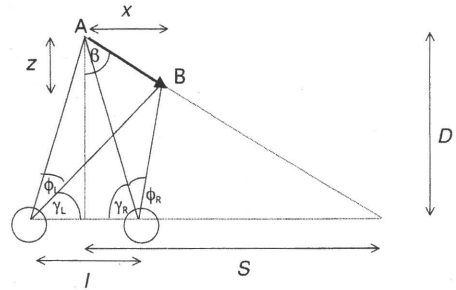


図 11

3次元方向に運動する対象の方向知覚の実験条件。運動対象の方向は、図に示されたように、観察者に向かって正面、右方向、左方向(β)である。図中、Zは奥行方向、Xは水平方向、Dは対象までの奥行距離、Iは眼球間距離、Sは対象と左右の眼球の結節点を結ぶ線との交点を指し、対象はAからBまで運動する(Harris & Dean, 2003)。

4. 奥行距離の知覚

4.1. フィートミュラー円と等距離円 上における対象の視えの奥行距離

フィートミュラー円とは、左右眼と対象との間の輻輳角(γ)を等角度に取ったときに形成される円をいい、また等距離円とは左右眼と対象との間の輻輳角(γ)を離心率(ϕ)の角度の余弦(cosine)に比例させたときに形成される円をいう(図12)。フィートミュラー円上の対象は、すべて、同一の輻輳角をなす。等距離円上の対象は、すべて、観察者の両眼の midpoint に仮定した擬似的視点から物理的に等距離となる。これらの2つの円は、観察者の視野が周辺に行くに従って乖離する。理論的には、フィートミュラー円上の対象は、輻輳角が等しいので、対象までの視えの奥行距離はすべて等しくなり、また等距離円上の対象は、観察者の擬似的視点からの物理的距離が等しいので、その視えの距離もすべて等しくなるはずと予測する。いずれが正しいかについては、多くの研究が行われた

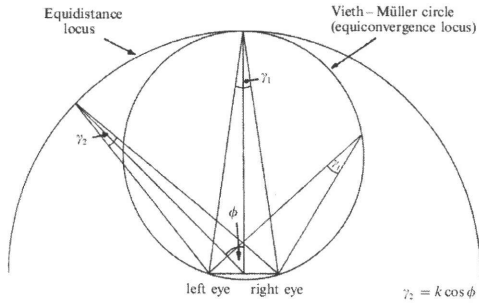


図 12

フィートミュラー円と等距離円 (Ebenholtz & Ebenholtz, 2003)。

が、明確な結果は得られていない。

そこで、Ebenholtz & Ebenholtz (4) は、正中線上の対象の距離を 35cm に設定し、それがフィートミュラー円上、あるいは等距離円上に位置するように配し、視えの奥行距離を測定した (図 13)。離心率は左側に 15°, 22.5°, 30°, 37.5°, 45° の 5 段階である。視えの奥行距離測定は、常に対象と同方向に設定された物差し (物差しは被験者には見えない) 上のマーカーを被験者自身の手でスライドさせる方法で調整させた。対象は、フィートミュラー円上、もしくは等距離円上に提示された。その結果、フィートミュラー円上の対象までの視えの奥行距離は、離心率が大きくなるにつれて減少すること、また、等距離円上の対象までの視えの奥行距離は離心率が大きくなると増大すること

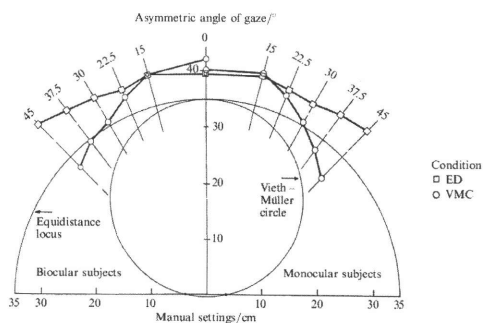


図 13

フィートミュラー円上と等距離円上の対象までの測定された視えの奥行距離 (Ebenholtz & Ebenholtz, 2003)。

が、それぞれ有意に示された。また、両眼観察条件と単眼観察条件とでは差が生じなかった。輻輳要因が一定のフィートミュラー円条件では離心率が増すとともに、調節要因の役割が高まるのに対して、等距離円条件では調節要因は一定を保つが、輻輳要因は離心率と共に小さくなる。したがって、両眼視と単眼視条件で差がないという結果は、単眼視では輻輳要因がほとんど働かないので、調節要因が視えの距離を優位に規定すると考えられる。

5. 絵画的要因による 3 次元視

5.1. 奥行、明るさそして透明性の知覚に及ぼすオクルージョンの役割

図 14 に示されたような主観的輪郭の矩形部分に両眼視差を付して立体視すると、図 B のよう

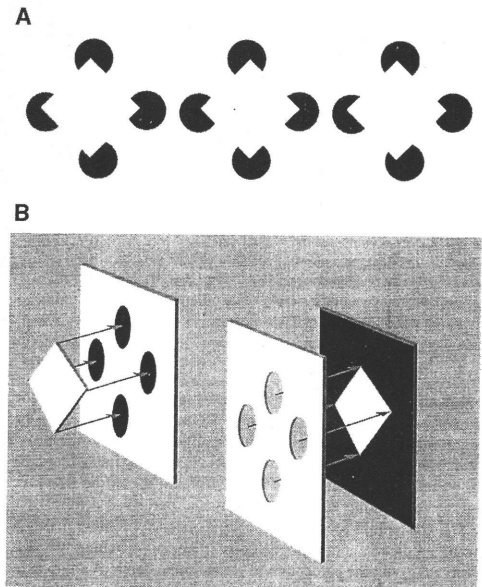


図 14

交差と非交差視差による奥行出現構造の相違。主観的輪郭の矩形部分に両眼視差を付して立体視すると、図 B のような立体が出現する。交差視差 (左端と中央のパターンで融合) では、白い矩形面が 4 つの黒い円盤をもつ白色面を遮蔽するように見えるが、非交差視差 (中央と右パターンで融合) では、4 つの円形の穴をもつ白色面が白い矩形面をもつ黒色面を遮蔽するように見える (Anderson, 2003)。

な立体が出現する。交差視差（左端と中央のパターンで融合）では、白い矩形面が4つの黒い円盤をもつ白色面を遮蔽するように見えるが、非交差視差（中央と右パターンで融合）では、4つの円形の穴をもつ白色面が白い矩形面をもつ黒色面を遮蔽するように見える。

図15Aの上図、中図のステレオグラムで両眼立体視すると、図Bの上図のように見える（前者の場合には右端、後者の場合には左端）。しかし、同様なパターンを右と中央（非交差視差）で立体視すると、図B下図のように視えてしまう（前者の場合には右端、後者の場合には左端）。これは、矩形の中の縦縞の明るさはサイン波形変化をもち、交差、非交差視差とも同一であるにも関わらず、奥行出現の方向を変えると、交差視差では湾曲した縦棒が矩形の背後に、非交差視差では黒い平板な棒が前面に出現して見えることを意味する。一方、図Aの下図のパターンでは、「地」となる部分の輝度は、矩形内の格子のサイン波形の輝度変化内にあるので、この場合には、両眼立体視しても複数の奥行に異なる層（レイヤー）は弱くしか出現しないか、まったく出現しない（Anderson, 2003）。

これらのステレオグラムは、いずれも、両眼視差を交差から非交差に操作することで、対象同士のオクルージョンの関係が変化し、さらに、そのことで視えの明るさと視えの透明性（transparency）が変化することを示す。Anderson (1) は、視覚システムが対象の奥行関係から、視えのオクルージョン関係、視えの明るさと視えの透明性がどのようにして規定されるかを考察し、2つの原理を提案した。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（一方の隣接領域がオクルードされている場合は別の片側領域）、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（contrast depth asymmetry）。図16のカニツツアパターンで説明すると、交差視差では、矩形を表す輪郭線は前

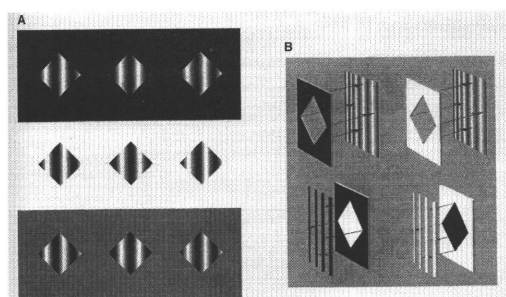


図15

交差と非交差視差による奥行出現構造の相違。図Aの上図、中図のステレオグラムの左と中央のパターン（交差視差）で両眼立体視すると、図Bの上図のように見える（前者の場合には右端、後者の場合には左端）。しかし、同様なパターンを右と中央（非交差視差）で立体視すると、図B下図のように視えてしまう（前者の場合には右端、後者の場合には左端）。図Aの下図のパターンのパターンでは、地となる部分の輝度は、矩形内の格子のサイン波形の輝度変化内にあるので、この場合には、両眼立体視しても複数の奥行に異なる層（レイヤー）は弱くしか出現しないか、まったく出現しない（Anderson, 2003）。

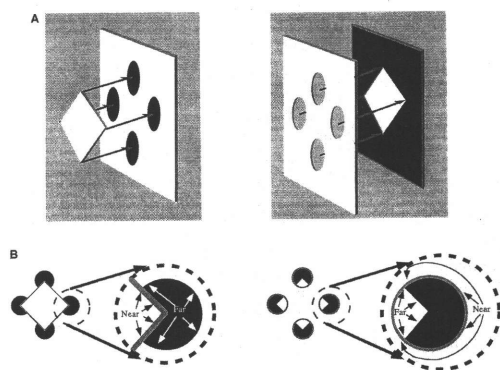


図16

contrast depth asymmetry原理の説明。交差視差では、矩形を表す輪郭線は前面に出現するので、後面の黒色円の輪郭線は自分を囲む2つの白色領域をキャプチャし、非交差視差の場合には、白色矩形が後面に配置されるので、その輪郭線は自分の隣接する黒色面をキャプチャする（Anderson, 2003）。

面に出現するので、後面の黒色円の輪郭線は自分を囲む2つの白色領域をキャプチャし、非交差視差の場合には、白色矩形が後面に配置されるので、その輪郭線は自分の隣接する黒色面をキャプチャするというわけである。

その2は、視えの透明性に関する原理で、隣

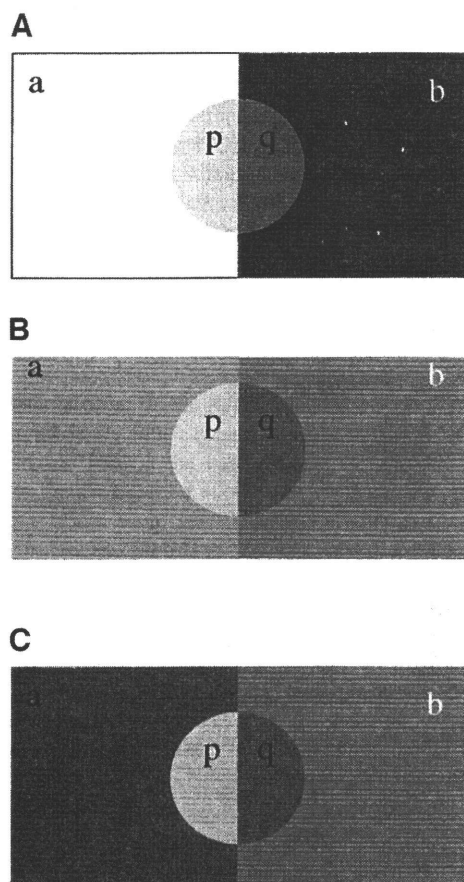


図 17

transmittance anchoring原理の説明。図のAでは、(a)と(b)面間の隣接する明るさコントラスト差がもっとも高いので、これらの面は平面的に知覚され、これより明るさコントラスト差が低い(p)と(q)面には複数の層が出現する。図のBでは、(p)と(q)面間の明るさコントラスト差がもっとも高いので平面的に見え、(a)と(b)面には複数の層が出現する。図のCでは、(a)と(b)面間と(p)と(q)面間の明るさコントラスト差に差異が無いので、視えの透明性は出現しない(Anderson, 2003)。

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)が出現するというものである(transmittance anchoring)。図17のAでは、(a)と(b)面間の隣接する明るさ

コントラスト差がもっとも高いので、これらの面は平面的に知覚され、これより明るさコントラスト差が低い(p)と(q)面には複数の層が出現する。図のBでは、(p)と(q)面間の明るさコントラスト差がもっとも高いので平面的に見え、(a)と(b)面には複数の層が出現する。図のCでは、(a)と(b)面間と(p)と(q)面間の明るさコントラスト差に差異が無いので、視えの透明性は出現しない。

これらの2つの原理は、3次元構造をもつパターンの視えの透明性と不透明性を一般的に説明できるかは、今後の検証による。

6. 奥行手がかりの統合

6.1. 左右反転眼鏡装着による3次元視過程の変容と統合

左右反転眼鏡装着による3次元視過程の変容がしらべられた(Ichikawa, et al. (12))。左右反転眼鏡は、左右眼の網膜に投影される位置を左右で反転させるために、対象の左右の位置、運動方向、両眼視差が装着前と装着後とで反転する。志願した4名の被験者は35日もしくは39日の間、連続して反転眼鏡を装着し日常生活を送る。通常の視覚経験を避けるために、就寝時にはアイマスクをかけさせた。反転眼鏡装着期間では、ステレオグラムテスト、複数の奥行手がかり間の相互作用に関するテスト、絶対奥行距離テストが、一定の間を置いて、3~5回、反復実施された。実験期間中のテスト結果の比較のために、眼鏡装着前後にも、同一のテストが実施された。

被験者すべてが報告した異様な経験は、左右反転眼鏡装着後には、対象までの視かけの絶対距離が縮小され、その結果、対象に手を伸ばして取ることに困難を感じたことである。この経験は修正されずに、装着期間を通して続いたという。装着時の異様な経験は、被験者ごとに異なるが、ある者は皿や葉っぱを見ると奥行反転が起きていることを報告したが、別の者はこの

種の奥行反転は限定されていて、パソコンの角を見たときにしか生じないと報告した。眼鏡装着解除後にも異様な体験をするが、とくに2名の被験者は奥行が極端に拡大誇張し、明瞭に知覚されたと報告したが、別の被験者は、逆に視えの奥行が抑制されていると訴えた。すべての被験者は、眼鏡装着解除後は、正常な視覚を取り戻している。

3種類の実験の結果は、(1) ステレオグラムテストでは、RDS とフィギュラル条件の両方に置いて、眼鏡装着数日後には、眼鏡装着前とは反対方向の奥行出現を示し、装着期間中、それが継続すること、(2) 両眼視差以外の手がかりの有効性をテストするために、両眼視差と運動視差、両眼視差と大きさ手がかりとが奥行方向指示に対して一致しない競合事態を設定して試したところ、両眼視差と運動視差が競合する事態では両眼視差が若干優位になること、しかし大きさ手がかりとの競合事態では大きさ手がかりが優位になることが示されること、(3) 視かけの奥行絶対距離は過小視され、眼鏡装着期間中、それに対する修正が起きないことが、それぞれ示された。

奥行や立体を知るための手がかり要因は、通常、複数個存在し、それらを統合して3次元視が成立する。このとき、複数の要因がどのようにして統合されるかについて、手がかりの弱い統合モデル (weak fusion model) と手がかりの強い統合モデル (strong fusion model) が考えられている (Clark & Yuille 1990)。手がかりの弱い統合モデルとは、その場面に存在するいくつかの手がかりがそれぞれ独立したモジュールで処理され、次いで、それぞれで算出された奥行が結合法則にもとづいて統合されると考えるものである。手がかりの強い統合モデルは、それぞれの手がかりからの情報が協調的に処理されてひとつの奥行を算出すると考える。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、視えの絶対的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

とを示し、諸手がかり間の相互作用の存在を示唆するので、強い統合モデルを支持する。

7. バーチャル・リアリティにおける3次元視

7.1. バーチャル・リアリティ空間、3次元ビデオカメラによる3次元空間、および現実空間の奥行距離特性

バーチャル・リアリティ (VR) で構成された3次元空間、3次元ビデオカメラによる3次元空間、および現実空間の3種類の空間の絶対的奥行距離知覚が測定され、相互に比較された (Hayashibe (11))。屋外空間 (奥行100mの道路を挟んで3階建てのビルが両側に並ぶ空間)、屋内空間 (奥行9mの教室空間) の2種類の現実空間が選択され、次いでこれと同一の空間がVRで作成され、また3次元ビデオカメラで撮影された。視かけの絶対的奥行距離は、マグニチュード評価法で測定され、その結果、屋内と屋外の現実空間のベキ指数は、0.95と1.01を示したが、VR空間とビデオカメラによる空間のベキ指数は0.53から0.80の範囲に落ちることを示した。これらの結果から、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、過小視されていることがわかる。

8. その他の研究

8.1. 歩行距離知覚におよぼす視覚の手がかりと非視覚の手がかりの比較

歩行距離知覚におよぼす視覚の手がかりと非視覚の手がかりの比較が、Ellard & Shaughnessy (7)によって試みられた。実験は、屋外で4, 6, 8, 10mに目標対象を設定して行われた。視覚の手がかり条件では、はじめに対象を注視し、次いで目隠しをして対象まで歩行することによって目標対象までの距離を再現した。非視覚の手がかり条件では、はじめから目隠しをして目標対象まで歩行し、出発点まで歩行して戻り、その

後、直ちに対象まで歩行することによって距離を再現した。その結果、両条件間には歩行距離に差が無く、極めて正確に目標対象までの歩行距離が再現された。そこで、視覚手がかり条件で提示する距離と、非視覚的手がかり条件で提示する距離とを不一致にし、どちらの手がかりが優位になるかを試した。被験者は、はじめに視覚的に目標対象を見て、次いで目隠しをして目標対象まで歩行し、その後、出発地点に戻り、再度、目標地点まで歩行することによって距離を再現した(この逆の手續群も構成された)。実験の結果、被験者達は、視覚の手がかり条件と非視覚的条件とで示された距離が食い違っていることに気がつかなかったが、再現された距離は、視覚の手がかり条件と非視覚の手がかり条件との平均となっていることが示された。

8.2. 昆虫、鳥類、哺乳類にける運動視差の有効性

昆虫、鳥類、哺乳類を対象とした運動視差の有効性についてのこれまでの研究がレビューされている(Kral, K. (14))。それによると、ハチ、バッタ、カマキリなどの昆虫類、ハト、フクロウなど鳥類、そしてネズミ、ウサギなど齧歯類は、頭部の運動と奥行視との間に明確な関係が見いだされ、運動視差を奥行手がかりとして利用している。しかし、ウマ、イヌ、ネコなどの大型哺乳類の一部には、頭部の上下運動が奥行視に役立っていると考えられているが、しかし、未だ十分な証拠はない。

また、Nieder (15) は、脊椎動物を対象とした3次元視研究をレビューし、運動による形状復元(kinetic depth)と両眼立体視とが相互に関係していることを指摘した。とくに、サル(monkey)は運動による形状復元(ランダム・ドットで提示したシリンダー)が可能であること、神経生理学的研究からもMT野とMST野が運動視差と両眼視差の立体視処理に関係していること、とくに、運動からの形状復元にはMST野が関係していること、MT野は運動視ばかり

でなく両眼立体視にも関係していることなどが、これまでに明らかにされているという。

9. 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) 両眼立体視と3次元形状知覚の両方を説明できる神経生理的階層モデルが提唱され、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。(2) 人間の両眼立体システムは、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) ダ・ヴィンチ・パラドックス問題において奥行距離が異なる2つの不透明な対象が観察者の正中線上の方向に存在する場合には、視覚システムは遠くに位置する対象は近くに位置する対象を透明にするか、もしくはこれら2つの対象を同一の方向に知覚しないようにすることで、この問題の知覚的解決をしている。(4) バーチャル・リアリティ空間内における対象の大きさ知覚、対象までの距離知覚では、両眼視差と運動視差は奥行手がかりとして、ほぼ同等の手がかり効果をもつが、対象の大きさ知覚に関しては両眼視差が強い手がかり効果をもっている。(5) ステレオアノマリの程度と、運動要因と両眼視差で提示された立体視の程度との間には強い相関があり、ステレオアノマリの高い者は運動視差を追加しても、立体視は向上しない。(6) 両眼立体視残効の持続時間は高次注意過程を挿入すると有意に減少すること、この減少は、注意過程が難しいほど大きくなることが示されたことから、両眼立体視過程においても、高次注意過程から低次の視覚情報処理過程へのフィードバックの存在が支持される。

運動要因による立体視問題では、次のことが明らかにされた。(1) 観察者の移動距離知覚とオプティック・フローとの関係は、周囲からの

オブティック・フローの変化と自身の移動速度によって規定される。(2) 奥行方向への運動要因が両眼視差による奥行定位を変位させることが明らかにされ、運動要因の処理過程(モジュール)と両眼視差の処理過程(モジュール)との間に相互作用が存在することが示唆された。(3) アカゲザルの視覚野(VI)における相対的運動に対するニューロンの応答反応の測定から、70%のニューロンは絶対的速度条件より相対的速度条件に強く応答し、しかも、その応答特性には3種類あり、その1は、V型応答特性を示すもので、図と地の速度が等価の時に応答が小さく、それらの相対的速度差が大きいときに強く応答する。その2は、逆V型応答特性を示すもので、図と地の速度が等価の時に応答が強く、それらの相対的速度が小さくなるとしだいに弱く応答する。その3は、図と地の相対的速度差が増大するに比例して応答も強くなる型である。

この他に、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、視えの絶対的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した。これは、諸手がかり間の相互作用の存在を示唆するので、手がかりの強い統合モデルを支持する。また、バーチャル・リアリティ(VR)で構成された3次元空間、3次元ビデオカメラによる3次元空間、および現実空間の3種類の空間の絶対的奥行距離知覚が測定され、相互に比較され、屋内と屋外の現実空間のベキ指数は、0.95と1.01を示したが、VR空間とビデオカメラによる空間のベキ指数は0.53から0.80の範囲に落ちることが示された。

10. 文献

- (1) Anderson, B. L. 2003 The role of occlusion in the perception of depth, lightness, and opacity. *Psychological Review*, 110,785-801.
- (2) Bacon, B. A. & Mamassian, P. 2002 Amodal completion and the perception of depth without

- binocular correspondence. *Perception*, 31,1037-1045.
- (3) Cao, A. & Schiller, P. H. 2003 Neural responses to relative speed in the primary visual cortex of rhesus monkey. *Visual Neuroscience*, 20,77-84.
- (4) Ebenholtz, S. M. & Ebenholtz, J. M. 2003 Distance perception for points at equiconvergence and equidistance loci. *Perception*, 32,707-716.
- (5) Edwards, M. & Badcock, D. R. 2003 Motion distorts perceived depth. *Vision Research*, 43,1799-1804.
- (6) Ee, R. van 2003 Correlation between stereoanomaly and perceived depth when disparity and motion interact in binocular matching. *Perception*, 32,67-84.
- (7) Ellard, C. G. & Shaughnessy, S. C. 2003 A comparison of visual and nonvisual sensory inputs to walked distance in a blind-walking task. *Perception*, 32,567-578.
- (8) Frenz, H., Bremmer, F. & Lappe, M. 2003 Discrimination of travel distances from optic flow. *Vision Research*, 43,2173-2183.
- (9) Grossberg, S. & Howe, P. D. L. 2003 A laminar cortical model of stereopsis and three-dimensional surface perception. *Vision Research*, 43,801-829.
- (10) Harris, J. M. & Dean, P. J. A. 2003 Accuracy and precision of binocular 3-D motion perception. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29,869-881.
- (11) Hayashibe, K. 2002 Apparent distance in actual, three-dimensional video-recorded, and virtual reality. *Perceptual and Motor Skills*. 95,573-582.
- (12) Ichikawa, M., Kimura, T., Egusa, H. & Nakatsuka, M. 2003 Modification of depth and distance perception caused by long-term wearing of left-right reversing spectacles. *Perception*, 32,131-153.
- (13) Ito, H. 2003 The aperture problems in the Pulfrich effect. *Perception*, 32,367-375.

- (14) Kral, K. 2003 Behavioural-analytical studies of the role of head movements in depth perception in insects, birds and mammals. *Behavioural Processes*, 64, 1-12.
 - (15) Nieder, A. 2003 Interrelation of kinetic and stereoscopic depth: Behavior and physiology in vertebrates. *Behavioural Processes*, 64, 13-16.
 - (16) Ono, H., Lillakas, L., Grove, P. M. & Suzuki, M. 2003 Leonardo's constraint: Two opaque objects cannot be seen in the same direction. *Journal of Experimental Psychology: General*, 132, 253-265.
 - (17) Rose, D., Bradshaw, M. F. & Hibbard, P. B. 2003 Attention affects the stereoscopic depth aftereffect. *Perception*, 32, 635-640.
 - (18) Schneider, U., Borsutzky, M., Seifert, J., Leweke, F. M., Huber, T. J. & Rollnik, J. D. 2003 Reduced binocular depth inversion in schizophrenic patients. *Schizophrenia Research*, 53, 101-108.
 - (19) Watt, S. J. & Bradshaw, M. F. 2003 The visual control of reaching and grasping: Binocular disparity and motion parallax. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 29, 404-415.
- 参考文献**
- Chaudhuri, A. 1990 Modulation of the motion aftereffect by selective attention. *Nature*, 344, 60-62.
- Clark, J. J. & Yuille, A. L. 1990 *Data Fusion for Sensory Information Processing System*. Boston, MA: Kluwer.
- Gillam, B. & Nakayama, K. 1999 Quantitative depth for a phantom surface can be based on cyclopean occlusion cues alone. *Vision Research*, 39, 109-112.
- Gregory, R. L. 1998 *Eye and Brain. The Psychology of Seeing*. Oxford University Press, Oxford.
- Howard, I. P. & Rogers, B. J. 1995 *Binocular Vision and Stereopsis*. Oxford University Press, New York.
- McKee, S. P., Bravo, M. J., Taylor, D. G. & Legge, G. E. 1994 Stereo matching precedes dichoptic masking. *Vision Research*, 34, 1047-1060.
- Nakayama, K. & Shimojo, S. 1990 da Vinci stereopsis: depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, 30, 1811-1825.
- Prokop, T., Schubert, M. & Berger, W. 1997 Visual influence on human locomotion-modulation to changes in optic flow. *Experimental Brain Research*, 114, 63-70.
- Richards, W. 1970 Stereopsis and stereoblindness. *Experimental Brain Research*, 10, 380-388.
- Richards, W. 1971 Anomalous stereoscopic depth perception. *Journal of the Optical Society of America*, 61, 410-419.
- Smallman, H. S. & McKee, S. P. 1995 A contrast ratio constraint on stereo matching. *Proceedings of the Royal Society of London B*, 260, 265-271.
- Tresilian, J. R. 1999 Visually timed action: time-out for "tau"? *Trends in Cognitive Sciences*, 3, 301-310.
- Warren, W. H. & Hannon, D. J. 1990 Eye movements and optical flow. *Journal of the Optical Society of America A- Optics Image Science and Vision*, 7, 160-169.