

心理学における 3 次元視研究の動向—2000—

3-Dimensional Perception:2000 research Trends

林 部 敬 吉

Keikichi HAYASHIBE

抄録：2000年における視覚心理学における3次元視研究の動向を運動要因による3次元視，両眼立体視，眼筋的要因による3次元視，絵画的要因による3次元視などに分類して報告した。運動視差要因や両眼視差要因のそれぞれにおける処理過程の研究とともに，それらに共通する処理過程の存在が神経生理学的に，また精神物理学的に明らかにされた。

Abstract: The papers of 3-dimensional visual perception in 2000 were reviewed in the fields of depth from motion cue, stereoscopic vision, pictorial cues and virtual reality. Between 3-dimensional vision by motion parallax and stereoscopic vision by binocular parallax, there was a common processing stage in both neurophysiology and psychophysiology.

1. はじめに

本報告には，視覚心理学における3次元視研究を，Psychological Abstract誌の2000年版から抽出し主要な研究領域に分類して紹介した。文献検出は，DIALOGの文献検出システムを利用し，検索は，Distance Perception, Depth Perception, Stereoscopic Visionである。

2. 運動要因による3次元視

2.1. 運動からの構造復元

運動からの構造復元は，2段階の過程，すなわち，はじめに2次元での方向と速度の検出過程（2次元の速度検出過程）があり，次いでその速度検出にもとづいて3次元構造の復元の過程が続くと考えられている。このボトムアップのモデルに対して，この両過程の相互作用の存在も仮定される。Mukai & Watanabe⁽²¹⁾は，図1に示されたような運動刺激パターンを用いて，2次元の速度検出過程と3次元の構造復元過程との相互作用の存在を検討した。図1-(a)で

は，両端の刺激要素（小さな矩形）が他の要素より細くし，奥行手がかり要因を導入してあるのに対して，図1-(b)その種の奥行手がかり要因は存在しない。この刺激パターンの運動速度を変化させ，奥行のある構造の出現率，奥行のない構造の出現率，一方向への運動出現率，両方向への反復運動の出現率を測定した。その結果，奥行手がかりを付加した条件では，奥行のある構造の出現率以上に一方向への運動出現率

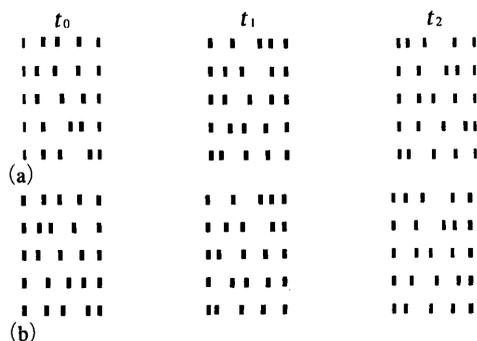


図1 2次元の速度検出過程と3次元の構造復元過程の相互作用。

図の(a)では，両端の刺激要素（小さな矩形）が他の要素より細くして，奥行手がかり要因を導入してあるのに対して，図の(b)では，その種の奥行手がかり要因は付加されていない(Mukai & Watanabe, 1999)。

が増大することが示された。逆に両方向への反復運動と奥行のない構造出現の出現比率は著しく低下した。また、運動速度を増大させると、この関係は顕著に出現した。これらのことから、高次過程である3次元の構造復元過程が低次過程である2次元の運動検出過程に影響する可能性が示唆されているが、ただ奥行手がかり要因が直接に運動検出過程に影響した可能性もあり、この点の検討が残されている。

2.2. 運動視差による対象の奥行定位

運動視差による対象の奥行定位は、観察者の頭部運動方向、対象の網膜上でのシフト方向で規定される。図2に示されたように、観察者が、右方向に頭部を運動させ、そのとき網膜上で2つの対象のうち、左側の対象が頭部運動と同方向に、右側の対象がそれとは逆方向にシフトするならば、左側の対象は注視点より遠方に、右

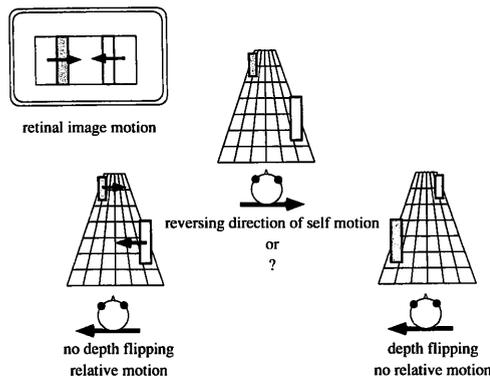


図2 観察者の頭部運動、対象の網膜上でのシフト方向と対象の奥行定位との関係。観察者が、右方向に頭部を運動させ、そのとき網膜上で2つの対象のうち、左側の対象が頭部運動と同方向に、右側の対象がそれとは逆方向にシフトするならば、左側の対象は注視点より遠方に、右側の対象は注視点より近方に定位している（上図）。観察者が頭部を左方向に反転運動したとき、2つの対象の網膜上でのシフト方向が変わらないと仮定すると、対象の奥行定位について2通りの見え方が生じる。その1は、左右の対象の奥行定位はそのまま、その2つの対象が相対的に移動している場合（下図の左側）であり、その2は、左右の対象の奥行位置が逆転した場合（下図の右側）である（Kitazaki & Shimojo 1998）。

側の対象は注視点より近方に定位している（上図）。そこで、今度は観察者が頭部を左方向に反転運動したとき、2つの対象の網膜上でのシフト方向が変わらないと仮定すると、対象の奥行定位について2通りの見え方が生じる。その1は、左右の対象の奥行定位はそのまま、その2つの対象が相対的に移動している場合（下図の左側）であり、その2は、左右の対象の奥行位置が逆転した場合（下図の右側）である。Kitazaki & Shimojo⁽¹⁷⁾らは、この種の見え方を規定する条件を検討した結果、ダイナミック・オクルージョン（2つの対象の境界線上で、不規則に配置されたドットが消失と出現を反復する）、あるいは2つの透明な面が存在する場合のように、2つの対象間のシフト速度が不連続な場合には前者の見え方が、また、シフト速度がサイン状あるいは3角形状に連続しているひとつの面の場合には、後者の見え方が出現した。このことから、運動視差における奥行定位の曖昧性を解決する一つの要因として、運動速度の連続性／非連続性があると思われる。

2.3. 運動の検出と両眼視差との関係

V1, V5/MT, MST野には、運動と両眼視差の両方に応答するニューロンが存在することが報告されている（Poggio & Talbot 1981, Maunsell & van Essen 1983, Bradley et al 1995, Roy et al 1992）。精神物理学的にも同様な事実が見いだされるかが、ランダム・ドット・キネマトグラムで試された（Hibbard & Bradshaw⁽¹²⁾）。ランダム・ドット・キネマトグラムとは、図3に示されたように、不規則なドットで構成されているが、その内の1群のドットは左方向に、他の群は右方向に、それ以外は不規則方向にそれぞれシフトする。このランダム・ドット・キネマトグラムを観察すると、一方向のみにドットがシフトする条件では、単一面が、両方向にシフトする条件では透明な2面が知覚できる。実験では、左右方向にシフトする条件に交差視差を導入（左方向のドット群には交差視差、他方には非交差

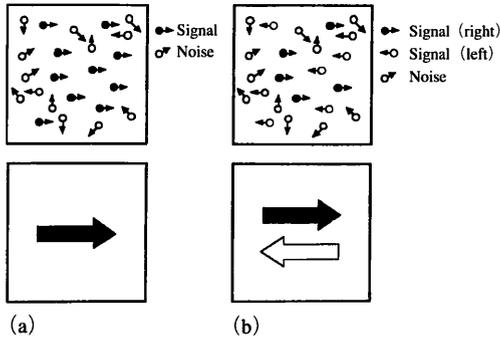


図3 ランダム・ドット・キネマトグラム。不規則なドットで構成されているが、その内の1群のドットは左方向に、他の群は右方向に、それ以外は不規則方向にそれぞれシフトする。このランダム・ドット・キネマトグラムを観察すると、一方向のみにドットがシフトする条件 (a) では、単一面が、両方向にシフトする条件 (b) では透明な2面が知覚できる (Hibbard & Bradshaw 1999)。

視差) し、透明な2面が出現するまでの閾値を、シフトするドット数と不規則に運動するドット数の比率を変化させて測定した。その結果、両眼視差を導入しない場合には、透明な2面が出現するためには、全体のドット数のなかでのシフトするドット数の比率を単一面のそれより1.84倍に高めなければならなかったが、両眼視差を導入した場合には、この差は解消されることが示された。このことから、運動方向と両眼視差の検出は密接に関連していることが精神物理学的にも実証されている。

上記と同様な結果が、Snowdon & Rossiter⁽²⁷⁾ によっても報告されている。そこでは、Titmusの立体視力検査にもとづき、正常な両眼立体視力をもつ者とその能力をもたない者と同様な実験を試みた。その結果、正常な立体視力をもつ者では、両眼視差が導入されれば運動方向の識別能力が高まるのに対して、立体視力をもたない者では両眼視差が導入されても運動方向の識別は高まらないことが示されている。

2.4. 運動からの構造復元と新しい奥行運動錯視

人間の視覚システムは、奥行手がかりが全く

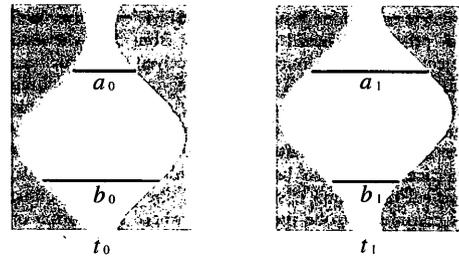


図4 新しい運動—奥行錯視。

刺激パターンの外側領域 (aperture) の形状をサイン波形状に変形させ、その領域を地として知覚するとき、水平線分が奥行方向に回転して見える (Itoh & Kawabata 1998)。

存在しない場合にも、対象が運動していれば、その構造を知覚的に復元できる。しかし、このとき検出した運動成分が曖昧な要素を含んでいると、復元された構造も曖昧となる。Ito & Kawabata⁽¹⁴⁾ は、図4に示されたような刺激パターンの外側領域 (aperture) の形状をサイン波形状に変形させると、2通りの見え方が生じることを見いだした。その1は、観察者が外側領域を図 (figure) とし、内側領域 (background) を地 (ground) と知覚した場合には、内側の水平線分はその長さを伸縮させるように見える。その2は、観察者が外側領域を地、内側領域を図と知覚した場合には、内側の線分は奥行方向に回転して見える。後者の見え方が出現する割合は、線分間の輝度差が大きいほど、また外側に比較して内側領域の輝度が高いほど増大した。この新しい運動奥行錯視は、運動からの構造復元には図と地の分擬が関係することを示している。

2.5. 頭部運動に連動した対象の拡大／縮小運動の奥行効果

運動視差は、観察者が頭部を横方向に運動させることによって生じる対象の網膜上での横方向の角速度差をいうが、頭部運動に連動した対象の拡大／縮小運動の奥行効果は、観察者が頭部を前後に運動させたときに生じる対象の網膜上での拡大と縮小にもとづくものをいう。

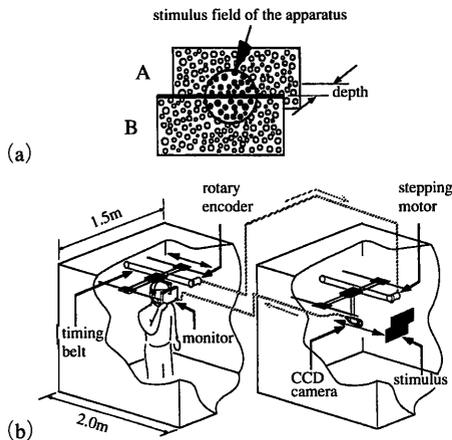


図5 対象の拡大／縮小運動による奥行効果のための実験装置。

対象の拡大／縮小運動は、観察者の頭部の前後運動と連動した小型CCDカメラを移動させて撮影した映像をヘッド・マウント型のディスプレイに提示する(Yajima, Ujike & Uchikawa 1998)。

Yajima et al⁽³¹⁾ は、図5に示されたような実験装置を用いて、この拡大／縮小の運動効果を検討した。対象の拡大／縮小運動は、観察者の頭部の前後運動と連動した小型CCDカメラを移動させて撮影した映像をヘッド・マウント型のディスプレイに提示する方法によった。拡大縮小する対象は、不規則なドットから形成された矩形である。観察者は、頭部を前後に移動させながら、眼前のディスプレイに提示された対象の拡大／縮小運動を手がかりに、矩形の奥行相対距離を別に用意したスケールに再生させる。その結果、視えの相対的奥行距離は、過小視されるが、特に頭部が静止した条件、あるいは頭部運動速度が小さい場合(10cm/s以下)にそれが顕著であることが示された。頭部運動に連動した対象の拡大／縮小運動要因による奥行効果が確認されている。

2.6. 奥行相対距離と大きさ知覚に及ぼす運動視差、両眼視差の手がかり効果

運動視差と両眼視差が、それぞれ単独で提示された場合、あるいは両要因が同時に提示され

た場合のそれぞれで、奥行絶対距離と大きさ知覚をどのように規定するかについての検討が行われた(Bradshaw, et al⁽⁴⁾)。実験は、暗室で3個の発光ダイオードで3角形の頂点を形成するように提示し、視えの大きさは3角形の底辺の長さ(15cmと30cmの2種類)を、奥行相対距離はその底辺と頂点との間の奥行距離(15cmと30cmの2種類)のマッチングによって求められた。マッチングは、同様に3個の発光ダイオードで提示された3角形の底辺の長さを調整、あるいは頂点を奥行方向に調整させる方法によった。観察距離は、150cmから300cmの間で5段階に変えられた。実験条件は、単眼視で頭部静止条件、単眼視で頭部運動による運動視差条件、両眼視で頭部静止条件は、両眼視で頭部運動条件の4条件であった。実験の結果、大きさと奥行相対距離知覚は、両眼視差と運動視差がともに働く両眼視頭部運動条件でのみ、観察距離の変化にも関わらず、ほぼ完全な恒常性を示した。このことから、運動視差と両眼視差の合算効果の存在が示唆される。

2.7. 運動視差による立体視能力と両眼立体視能力との関係

運動視差による立体視と両眼立体視とは、空間周波数に対する感度、視覚的残効に対する相互効果など類似性が高い。とくに、運動視差による立体視閾と両眼立体視閾とは関係があることが報告されている(Rogers 1984)。そこで、両眼立体視能力に障害のある弱視者の運動視差による立体視能力がしらべられた(Thompson & Nawrot⁽³⁰⁾)。はじめに、RDSによる両眼立体視能力がしらべられ、次いで運動視差による立体視能力が検査された。運動視差による立体視能力は、観察者の頭部運動に連動してシフトする多数の速度差のつけられたドットを提示して行われた。運動視差による立体視能力があれば、頭部運動を起こすと、凹凸のある横波状の面が観察できる。検査の結果、両眼立体視能力に障害のある弱視者は、運動視差による立体視能力も

障害があることが確認された。このことから、運動視差による立体視と両眼立体視との間には、神経生理学的レベルでの関連があると考えられる。

3. 両眼立体視

3.1. 両眼立体視モデルにおける線形

(一次) 機構と非線形 (二次) 機構

Marr & Poggio (1979) をはじめとする従来の両眼立体視モデルでは、両眼視差の計算は左右ステレオグラムの輝度の相関にもとづいて処理され(線形機構、フーリエ機構または一次機構)、また対応問題における誤対応は空間周波数選択性を仮定することで解決されていた。しかし、人間の視覚システムでは、両眼視差が輝度の相関に基づかない視差、すなわちテクスチャ境界(texture boundaries, Frisby & Mayhew 1978)、運動境界(motion boundaries, Halpern 1991)、振幅包絡(contrast envelop, Liu et al 1992, Sato & Nishida 1994)にもとづく視差からも両眼立体視が可能である。両眼立体視過程は、線形機構に加えて非線形機構(二次機構または非フーリエ

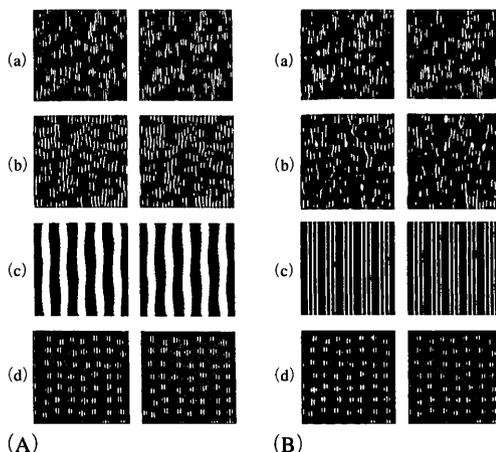


図6 線形要素または非線形要素から構成されたステレオグラム。

図(A)はすべて輝度相関をもつもので、線形機構で処理されるステレオグラム。図(B)は輝度相関を無くし、代わりに、ガウスの振幅包絡を導入し、これに視差をもたせたステレオグラム(Ziegler & Hess 1999)。

機構)をもつと考えられる。

Ziegler & Hess⁽³²⁾は、この種の非線形機構が3次元形状の知覚を可能にするか否かについて、図6のようなステレオグラムを考案して検討した。図6-(A)は、すべて輝度相関をもつもので、線形機構で処理されるステレオグラムである。図6-(B)は、輝度相関を無くし、代わりに、ガウスの振幅包絡を導入し、これに視差をもたせたステレオグラムである。図6-(A)のステレオグラムではすべて3次元形状が出現するが、図6-(B)では、奥行は出現するものの形状は知覚できない。そこで、非線形要素をもつステレオグラムを構成する要素数を変えたところ、2個以上の非線形要素になると、3次元形状知覚が悪化することが示された。これらのことから、両眼立体視過程では、奥行と形状とはそれぞれ別個に処理されていると考えられる。また、Langley et al⁽¹⁸⁾は、この非線形機構が前中枢段階で生じるか、あるいは中枢段階で生じるかについて検討した。実験は、あらかじめサイン波形の格子パターンに順応させ、その後、振幅包絡にもとづいた両眼視差を弁別するためのコントラスト閾が測定された。その結果、振幅包絡にもとづく両眼視差立体視は、順応格子の方向と周波数がステレオグラムの振幅包絡を担うキャリアのそれと同等の場合に、もっとも影響を受けることが示された。このことは、両眼立体視過程における非線形機構は、方向と周波数に選択的な線形機構の処理の後に生起する中枢の処理であることを示唆する。

3.2. ランダム・ドット・ステレオグラム (RDS)における単眼非対応領域の役割

両眼で複数の対象を観察するとき、対象が他の対象を隠蔽するが、その隠蔽領域は左右眼で異なる。この隠蔽領域は、左右で対応をもたない単眼非対応領域と呼んでも良い部分であるが、この部分が両眼立体視に果たす役割についてはいまだ明らかにされていない。RDSではこの単

眼非対応領域は両眼立体視成立までの潜時を減少させ、結果的に立体視を促進するように働くとの結果 (Gillam & Borsting (1988)) が報告された。これに対して、Grove & Ono⁽¹¹⁾ は、単眼非対応領域が両眼立体視の潜時を長くすると指摘した。それによれば、RDSの片方にのみ単眼非対応領域を設定し、その領域を、(1)空白にした条件、(2)背景領域と同等の密度のドットで埋めた条件、(3)背景より高密度のドットで埋めた条件の3種類のステレオグラムを作成し、立体視成立までの潜時を測定した結果、3条件のステレオグラムでは有意な差が生じなかった。そこで、RDSを立体視したとき出現する2つの矩形領域に密度差を導入し、単眼非対応領域の密度を、(1)遠くに視える背景領域と同等にした条件、(2)近くに視える矩形領域と同等の密度にした条件を設定し、その潜時を測定した。単眼非対応領域の密度を、遠くに視える背景領域と同等にした条件は、単眼非対応領域と矩形領域とが自然な関係を保つが、しかし、近くに視える矩形領域と同等にした条件では、単眼非対応領域と矩形領域とがめったに成立しない偶然的関係となる。両眼立体視成立までの潜時を測定したところ、単眼非対応領域の密度を遠くに視える背景領域と同等にした条件で有意に小さいことが示された。このことから、単眼非対応領域のテクスチャが生動的に不自然な場合には、それは両眼立体視を妨害すると考えられる。

3.3. パナムの半端ステレオグラム (Panum limiting case)

パナムの半端ステレオグラムとは、一方のステレオグラムに2本線分を、他方に1本の線分をもつステレオグラムをいい、これを両眼立体視すると両眼視差をもたないのに、奥行の異なる2本の線分が出現して視える。この現象の説明仮説には、2重融合仮説、オクルージョン仮説 (Nakayama & Shimojo 1990)、カモフラージュ仮説 (Howard & Ohmi 1992)、輻輳誘導視差仮説 (Howard & Ohmi 1992, Howard & Rogers 1995) が

ある。2重融合仮説とは、片方の単一の線分が、他方の両方の線分と対応をもち融合すると考えるものである。この仮説は、対象の奥行定位とその奥行距離を説明できない点に弱点をもつ。オクルージョン仮説では、図7-(A)に示されたように、片眼の1本線分は他眼の2本線分の中、こめかみ側の線分とのみ融合して近方に定位され、したがって融合しない線分は融合した線分の背後に重なって定位されると仮定する。一方、カモフラージュ仮説 (図7-(B)) では、片眼の1本線分は他眼の2本線分の中、鼻側の線分とのみ融合して遠方に定位され、したがって融合した線分は融合しない線分を偽装的に前方に定位する仮定する。輻輳誘導視差仮説では、

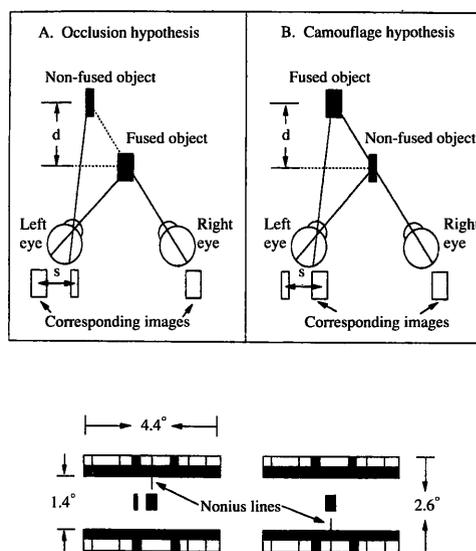


図7 パナムの半端ステレオグラムの説明仮説。(A) オクルージョン仮説では、片眼の1本線分は他眼の2本線分のうちこめかみ側の線分とのみ融合して近方に定位され、融合しない線分は融合した線分の背後に重なって定位されると仮定する。(B) カモフラージュ仮説では、片眼の1本線分は他眼の2本線分の中、鼻側の線分とのみ融合して遠方に定位され、融合した線分は融合しない線分を偽装的に前方に定位すると仮定する。(C) 輻輳誘導視差仮説では、片眼の1本線分は他眼の2本線分中のいずれかと融合し、その融合対象は仮定された輻輳角(凝視点)との関係で誘導される両眼視差量に規定された奥行位置に定位され、一方、融合しない線分は凝視点に定位されると仮定する (Shimono et al 1999)。

図7-(C)に示されたように、片眼の1本線分は他眼の2本線分中のいずれかと融合し、その融合対象は仮定された輻輳角(凝視点)との関係で誘導される両眼視差量に規定された奥行位置に定位され、一方、融合しない線分は凝視点に定位されると仮定する。Shimono et al⁽²⁵⁾は、オクルージョン仮説、カモフラージュ仮説のいずれが妥当かを検討するために、2本線分の線分の幅をオクルージョン条件ではこめかみ側を広く、カモフラージュ条件では鼻側を広くして1本線分との対応関係を誘導した上で、2本線分の間隔距離を変化させ、この間隔距離と両眼立体視で出現した対象間の視えの奥行相対距離との関係をしらべた。その結果、オクルージョン条件では融合対象は非融合対象の前に定位され、カモフラージュ条件では融合対象は非融合対象と同等の奥行位置に定位されて視えた。また、2本線分の間隔距離を変えても、出現した2本の線分間の奥行相対距離は変化しなかった。さらに、輻輳誘導視差仮説の検証のために、凝視点を設定することによって両眼視差を導入した。実際には、オクルージョン条件、カモフラージュ条件の両方に、ノニウス線を導入して凝視点を設置することによって、融合対象との間に両眼視差を導入し、その凝視面を操作することで両眼視差量を変化させた。実験結果は、オクルージョン条件、カモフラージュ条件のいずれにおいても、融合対象と非融合対象間の奥行相対距離は両眼視差量に対応して変化すること、また2本線分の間隔距離の変化に対応して、2本の線分間の奥行相対距離も変化することが示された。これらの結果から、オクルージョン仮説は、出現する2つの対象の奥行位置を予測できるが、その奥行相対距離を示せないこと、カモフラージュ仮説は奥行位置と奥行相対距離の両方を予測できないこと、輻輳誘導視差仮説はその両方を予測できることが示されている。

3.4. 両眼視差にもとづかないステレオグラム¹の立体視

Gillam et al⁽⁹⁾によれば、図8-(b)のようなステレオグラムを両眼立体視すると、2つの対象が奥行位置を異にして見える(図8-(a))。この変則的ステレオグラムにも、両眼視差が存在するが、もしそれにもとづいて立体視が生起するのであれば、図8-(c)のように、左ステレオグラムには中央に細い間隙があるので、黒の領域が抑制されるものの、垂直軸を中心とした一様な傾斜線分が視えると予想される。これは、前述したパヌムの半端ステレオグラムとも異なる。なぜならば、もし2個の矩形が他方の1個の矩形と対応をもつならば、その視差はもっと大きくなり、出現する2個の対象間の奥行間隔もそれと対応して大きくなるはずと考えられるからである。この種のステレオグラムでは、出現する2個の対象の奥行間隔は、片方のステレオグラムにある2個の矩形間の細い間隙の大きさによって変化し、間隙が大きいほど奥行相対距離も深くなる。これは、図9に示されたようなしくみで左右のステレオグラム間で融合が起きるためと考えられる。ここでは、片方のステレオグラムの中の1個の矩形は、他方の2個のステレオグラムの中央に位置することが仮定されていて、2個の対象は左眼と右眼のそれぞれで対応が一致した投影位置に定位して知覚される。さらに、この種のステレオグラムで両眼視差を完全に無くした場合には、図9に示されたようなしくみで、左右眼に投影された対象は対応関係を持つので、2個の傾斜面が奥行を異にして定位されて見えると予想される。観察の結果は、この仮説を支持している。これらのステレオグラムでも立体視が可能なのは、両眼立体視のしくみでの主たる課題が対応問題にあるのではなく、形状の復元問題ととらえるべきであるとGillamらは主張している。

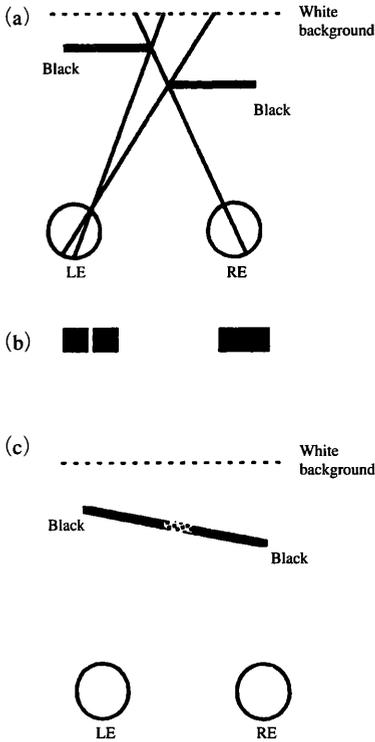


図8 変形ステレオグラム。

図 (b) のようなステレオグラムを両眼立体視すると、2つの対象が奥行位置を異にして見える (図 a)。この変形的ステレオグラムにも、両眼視差が存在するが、もしそれにもとづいて立体視が生起するのであれば、図 (c) のように、左ステレオグラムには中央に細い間隙があるので、黒の領域が抑制されるものの、垂直軸を中心とした一様な傾斜線分が視えると予想される (Gillam et al 1999)。

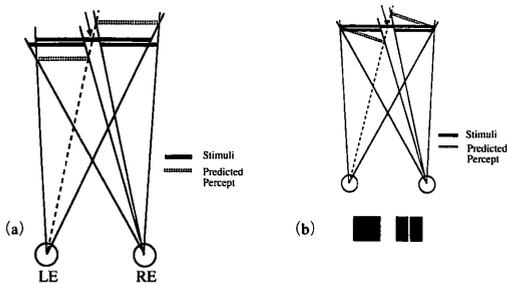


図9 変形ステレオグラムでの立体視のしくみ。片方のステレオグラムの1個の矩形は、他方の2個のステレオグラムの中央に位置することが仮定されていて、2個の対象は左眼と右眼のそれぞれで対応が一致した投影位置に定位して知覚される (図 a)。この種のステレオグラムで両眼視差を完全に無くした場合には (図 b)、左右眼に投影された対象は対応関係を持つので、2個の傾斜面が奥行を異にして定位されて視えると予想される (Gillam et al 1999)。

3.5. 反対極性の輝度対比をもつステレオグラムの立体視

ステレオグラムの片方の背景を黒、形状輪郭を白とし、他方の背景を白、形状輪郭を黒としたステレオグラムからも両眼立体視が可能である。しかし、この反対極性の輝度対比をもつステレオグラムをRDSで構成した場合には、両眼立体視は不可能である (Julesz 1971, Stuart, et al 1992)。両眼立体視過程は、2段階の処理、すなわちトランジエント処理過程 (transient process) とサステインド処理過程 (sustained process) からなる。トランジエント処理過程では、短時間提示された刺激のみが処理され、出現した奥行はすみやかに消失してしまい、また主として大きな視差 (視差 10° 以内) に対応している。サステインド処理過程では、持続的に提示された刺激に対応し、出現した奥行を持続的に維持し、融合可能な視差をすべて処理する (Ogle 1952)。Pope et al (23) は、トランジエント処理過程では、左右ステレオグラムに大きな反対の輝度対比があっても、そのような反対極性輝度対比に対して選択性が小さいのではないかと考えた。そこで、ガウス関数で記述したステレオグラムの左右に反対極性の輝度対比をつけた上で、また左右ステレオグラムの輝度対比を40, 60, 80, 100%の4段階に、ステレオグラムの提示時間を0.2, 0.5, 1, 2, 4 secに、また時間軸に対する輝度の変化をコサイン波形 (高時間周波数と低時間周波数の2段階を設定) と矩形波形に変化し、両眼立体視が成立するかを試した。その結果、両眼立体視は、次の条件のときに成立することが示された。(1)コサイン波形の刺激パターンで、刺激提示時間が短く、輝度コントラストが低い場合、(2)コサイン波形の刺激パターンで刺激提示時間が長い場合でも、輝度コントラストが高い場合、(3)矩形波形の刺激パターンでも、刺激提示時間が長く、輝度コントラストが低い場合。コサイン波形の刺激パターンで輝度コントラストが高い場合また、矩形波形の刺激パターンでは、輝度コントラストに関係なく、どちらも刺

刺激時間が長くなると高空間周波数成分での刺激エネルギーが増大するので、これらの結果は反極性の輝度対比をもつステレオグラムがトランジエント処理過程で処理されることを支持する。

3.6. トランジエントな両眼立体視過程での方向選択性

Edwards et al⁽⁷⁾ は、トランジエントな両眼立体視過程には、刺激の方向性に対して選択性が有るか否かを検討した。ステレオグラムは、標準偏差 1° をもつ狭帯域のガボールパターンで構成し、左右のステレオグラムのガボールパターンの方向を 90° に交叉させて提示した。提示時間は 140ms 、両眼視差は 4° から 8° の間に設定した。被験者には、視野の上下に出現する2つの面の遠近を答えさせた。実験の結果、方向が直交したステレオグラムからの奥行検出は、(1)チャンスレベル以上にはあるが、極めて悪いこと、(2)左右ステレオグラム間の輝度コントラストをアンバランスに変えるとさらに奥行検出は悪くなること、(3)左右ステレオグラム間の空間周波数をアンバランスにするとさらに奥行検出は悪くなること、(4)左右ステレオグラム間の輝度コントラストをアンバランスにし、同時に左右ステレオグラム間の空間周波数をアンバランスにすると、今度は奥行検出は改善されることがそれぞれ示された。これらの結果から、左右のステレオグラムが、その刺激の方向性に関して直交する方向性をもつ場合には、それが水平-水平あるいは垂直-垂直に一致する方向性をもつ場合とは異なる過程で処理されていると考えられる。

3.7. 交差視差と非交差視差における時間的処理の相違

両眼立体視の成立するためには、ステレオグラムは、ある一定の時間提示されている必要がある。もし、 80ms 程度の提示であれば、交差あるいは非交差視差のいずれかの立体視が成立しない (Patterson & Fox 1984)。これは、交差視差

と非交差視差の時間的処理に対して差があることを示唆する。Becker, et al⁽³⁾ は、このことを確認するために、RDSの提示時間を $67, 167, 417, 5000\text{ms}$ に操作し、正しい立体視 (2個の矩形を提示し、どちらが手前に見えるかをテストする) が得られる反応比率をしらべたところ、交差視差に対して非交差視差は、すべての提示範囲で有意に成績が悪いことが示された。さらに、図10に示されたように、観察者の凝視点をディスプレイ上に置くか、その前後に置くかを操作して、

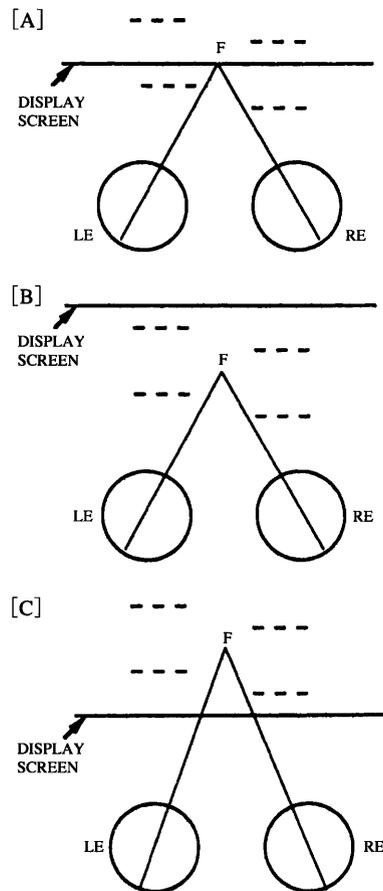


図10 オクルージョン要因と交差、非交差視差。(A)凝視点をディスプレイ上に置く場合には、交差視差がついた対象はディスプレイの手前に、非交差視差のついた対象は、その背後に出現、(B)凝視点をディスプレイの前に置いた場合には、交差視差、非交差視差の対象はすべてディスプレイより手前に出現、(C)凝視点をディスプレイの後ろに置いた場合には、交差視差、非交差視差の対象はすべてディスプレイより後ろに出現してそれぞれ見える (Becker et al 1999)。

同様な実験を試みた。凝視点をディスプレイ上に置く場合には、交差視差がついた対象はディスプレイの手前に、非交差視差のついた対象は、その背後に出現、凝視点をディスプレイの前に置いた場合には、交差視差、非行差視差の対象はすべてディスプレイより手前に出現、凝視点をディスプレイの後ろに置いた場合には、交差視差、非行差視差の対象はすべてディスプレイより後ろに出現してそれぞれ見えることになる。実験の結果は、観察者の凝視点をディスプレイ上に置いた場合は非交差視差の正答率が悪くなること、凝視点をディスプレイの後ろに置いた場合には、交差、非交差視差の正答率はともに悪くなること、しかし凝視点をディスプレイの手前に置いた場合には交差、非交差視差の正答率はともに良好なことが示された。正答率が悪くなる条件は、両眼立体視の結果として出現する対象が凝視点を置いた面の背後にある場合である。このことから、オクルージョンの要因が、交差、非交差視差条件間での立体視成立における時間的処理の差をもたらしていると考えられる。

3.8. 両眼立体視融合と両眼輻輳

ステレオグラムを融合させるためには、両眼を輻輳させる必要がある。両眼輻輳は融合させる刺激の大きさと関係し、刺激が大きくなるにつれて輻輳が正確になる (Poppo, et al.1998)。そこで、融合刺激の大きさと両眼立体視閾との関係が検討された (Poppo & Findlay⁽²⁴⁾)。ステレオグラムは、同心円上に配置された大小2つの円盤が出現するパターンで、両眼立体視融合のための刺激としては大きい方の円盤を利用し、その大きさ (両眼視差24min固定) は、2.6から8.0degの範囲で変えられた。小さい方の円盤は両眼立体視閾を測定する刺激として利用された。測定の結果、両眼視融合のための刺激の大きさが増大するに伴って両眼立体視閾は小さくなることが示された。さらに、両眼立体視融合のための刺激の視差を2.4minに縮めたところ、両眼

視融合のための刺激の大きさの増大に伴う両眼立体視閾効果は消失した。この種の両眼立体視閾効果は、おもに両眼輻輳に起因すると考えられるが、しかし、この種の効果は、両眼輻輳を起こすのに必要とされる所要時間 (100smin以下) でも存続することから、両眼立体視の統合のための高次過程の関与も示唆される。

3.9. 両眼立体視における傾斜面の視えの角度を規定する要因

両眼立体視における垂直軸を中心とした傾斜面の視えの角度を規定する要因について、Backus et al⁽²⁾によって分析された。この種の傾斜面の視えの角度を規定する要因は、図11に示されているように、輻輳角 (γ)、輻輳角と正中線との間にできる角度 (μ)、水平視差 (各眼と対象の横幅との間にできる角度の比 (HSR), α_L / α_R)、垂直視差 (各眼と対象の縦幅との間にできる角度の比 (VSR), β_L / β_R)、そしてVSRの勾配 ($\delta VSR / \delta \gamma$) であり、この他に、対象のもつ形状に関わるパースペクティブ要因がある。これらの要因は、網膜像内要因と網膜像外要因に分けて別々に処理され、また網膜像内要因は水平視差要因 (HSR) と垂直視差要因 (VSR) とが網膜像外要因の中の μ と関連しながら処理される。これらの要因はそれぞれ重み付けされてから加

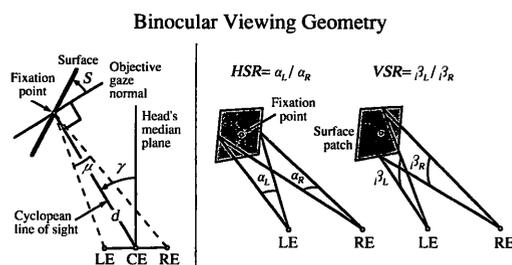


図11 傾斜面の視えの角度を規定する要因。

これらの要因としては、輻輳角 (γ)、輻輳角と正中線との間にできる角度 (μ)、水平視差 (各眼と対象の横幅との間にできる角度の比 [(HSR), α_L / α_R], 垂直視差 (各眼と対象の縦幅との間にできる角度の比 [(VSR), β_L / β_R], そしてVSRの勾配 ($\delta VSR / \delta \gamma$) であり、この他に、対象のもつ形状に関わるパースペクティブ要因が加わる (Backus, et al 1999)。

Theory of Stereoscopic Slant Perception

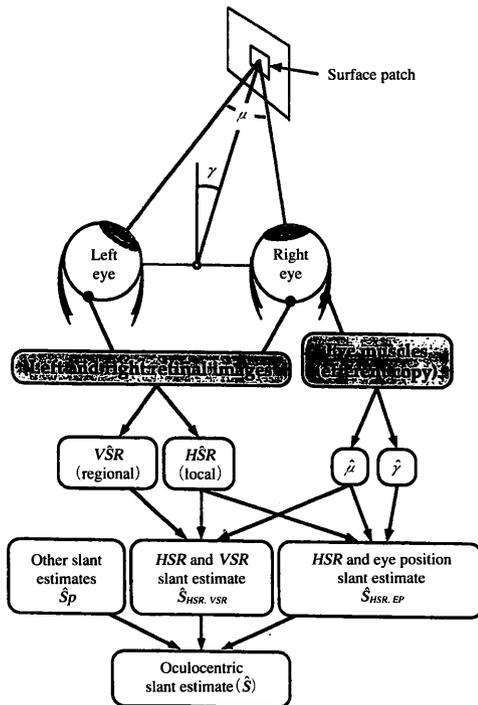


図12 両眼立体視における傾斜面角度の処理過程。処理過程では網膜像内要因と網膜像外要因に分けられ、そのなかでHSRと μ にもとづく傾斜面角度の算出、HSRとVSRにもとづく傾斜面の角度算出、そしてパースペクティブなど非視差的要因による傾斜面角度の算出が行われる (Backus, et al 1999)。

算されて、最終的な出力である傾斜面の視えの角度が規定されると仮定された (図12)。これによれば、傾斜面の視えの角度は、HSRと μ にもとづく傾斜面角度の算出、HSRとVSRにもとづく傾斜面の角度算出、そしてパースペクティブなど非視差的要因による傾斜面角度の算出という3種類の算出過程の加算で決まる。実験では、これらの要因が独立に操作され、傾斜面の視えの角度が測定され、その結果、この仮説が支持されている。

3.10. 大きな眼球運動と両眼立体視における傾斜面の視えの角度

両眼立体視で出現させた水平軸あるいは垂直軸に関する傾斜面の視えの角度が、両眼立体視

の観察時間 (10秒) を長くすると、短時間提示 (100ミリ秒) に比較して20—55%程度も増大することが見いだされた (Gillam, Flagg & Finlay 1984, Gillam, Chamber & Russo 1988, van Ee & Erkelens 1996)。両眼立体視においては、安定した傾斜面の知覚が成立するためには、ある一定時間、刺激面を眼球が走査 (scanning) する必要があるために、このような現象が生じるのではないかと考えられた。そこで、van Ee & Erkelens⁽⁶⁾ は、視野の中心に凝視点がある条件、視野の周辺に凝視点を与えた条件、そして自由な眼球走査条件を設定し、比較的大きなステレオグラム (視角40度) を両眼立体視させ、傾斜面の視えの角度を測定した。その結果、自由な眼球走査条件でも、視えの角度は、凝視点がある条件と変わらないことが示され、この種の現象に対する眼球運動の関与が否定された。

3.11. 両眼立体視での運動残効と空間周波数選択特性

両眼立体視下で両眼視差をもつ対象が、その視差を維持したまま横方向に運動させ、それを持続的観察後、静止パターンをテスト刺激として提示すると、運動残効が生起する。Shorter et al⁽²⁶⁾ は、両眼立体視下で一定の空間周波数 (0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6 c/deg) をもつ運動縦縞パターンが出現するRDSを順応刺激として3分間提示し、次にテスト刺激として、0.2, 0.4, 0.8 c/degの静止縦縞パターンが出現するRDSを提示したところ、運動残効は順応刺激とテスト刺激とが一致した条件でのみ生起することを見いだした。また、運動する縦縞の角度を変えた条件 (0度を垂直とし、時計回り30度、60度、90度、反時計回り30度、60度) での運動残効も、順応刺激とテスト刺激 (0度と90度) の角度が一致した条件でのみ生起した。このことから、両眼立体視下での運動残効は、空間周波数と方向に特異的であり、低次の空間周波数チャンネルに媒介されて生じると考えられる。

3.12. 両眼立体視下での仮現運動 (stereoscopic apparent motion)

運動視の処理過程には2種類の過程が想定されていて、その1は輝度差あるいは色の差によるエッジや形状の検出にもとづくものと、その2は両眼視差による奥行の検出にもとづくものである(Cavanagh et al 1989)。さらに運動視の処理過程には2つの側面があり、その1は能動的過程(active aspect)とよばれるものであり、その2は受身的過程(passive aspect)とよばれるものである(Cavanagh 1991)。能動的過程とは、焦点的注意にもとづく形状の追跡過程をさし、一方、受身的過程とは形状知覚を伴わない非認知的な運動視の過程をいい、たとえばランダム・ドットによるパターンの輝度が時間的に反転する場合に視えの運動が生じるような場合をさす。Ito⁽¹³⁾は、両眼立体視下での仮現運動においても、この能動的、受身的過程が存在するかについて検討した。実験は、図13に示されたように、ドットで構成されたパターンの中に256個の小

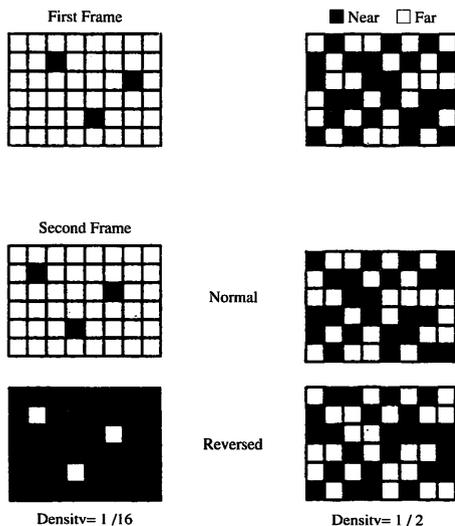


図13 両眼立体視下での仮現運動。

ドットで構成されたパターンの中の256個の小立方体に両眼視差で遠近を付けて提示され、観察者からみて手前に見える小立方体(交差視差をもつ)の数(1/16と1/2)、運動時の奥行反転の有無が変えられ、また小立方体は、2フレームで提示され、その間に小立方体は左右いずれかにシフトされる(Ito 1999)。

立方体に両眼視差で遠近を付けて提示した。実験条件として、観察者からみて手前に見える小立方体(交差視差をもつ)の数(1/16と1/2)、小立方体の大きさ、運動時の奥行反転の有無が設定された。小立方体は、2フレームで提示され、その間に小立方体は左右いずれかにシフトされる。観察者は、両眼立体視しながら、パターンが左右方向のいずれに運動して見えるかを報告した。実験の結果、手前に見える小立方体の数が少ないときは、運動時に小立方体の奥行反転があっても正しい運動方向が知覚されること、しかし、手前に見える小立方体の数と後ろに見える小立方体の数が等量の場合には、運動時に奥行反転させると、運動方向も反転して見えることが見いだされた。これらの結果は、両眼立体視下での仮現運動には2つの過程、すなわち奥行出現方向とは独立して2次元形状を検出しマッチングをする能動的過程と、2次元形状とは独立に奥行出現方向を検出してマッチングする受身的過程とが存在することを示唆する。

3.13. 両眼立体視における奥行恒常性

両眼立体視における奥行恒常性と奥行手がかりの多寡との関係が検討された(Glennester et al⁽¹⁰⁾)。両眼立体視における奥行恒常性とは、両眼立体視での奥行は観察距離の二乗に比例して変化するが、実際には知覚恒常性が生起するので、ある立体量が保持されることを言う。奥行手がかり条件には、すべての手がかりが存在する条件(full cue)と手がかりを制限した条件が設定された。対象はディスプレイ上に提示されたRDSで構成されたシリンダー形状のもので、その深さがディスプレイまでの観察距離を変化して測定された。制限された手がかり条件では、観察窓を設置してディスプレイまでの視野が制限された。実験の結果、奥行手がかりが制限された条件とすべての手がかりが利用できる条件では、奥行恒常の程度に関して差が生じなかった。このことから、大きさや形の恒常性は奥行手がかりの多寡に依存して変化するが、両眼立

体視における奥行恒常性は奥行手がかりの多寡とは関係なく、別の要因が作用していると考えられる。

4. 眼筋的要因による奥行視

4.1. 両眼輻輳要因と奥行絶対距離

手が届く範囲内での奥行絶対距離の知覚に対する両眼輻輳要因の効果が、再吟味された (Mon-Williams & Tresilian⁽²⁰⁾)。実験は、長細い箱状の装置の中で行われ、ターゲットは観察者の 16.6cm から 50cm の範囲で提示された。視えの奥行絶対距離は、観察者がターゲットまでの距離を指さすことで測定された。測定条件としては、すべての手がかりが働く条件 (full cue)、両眼輻輳単独手がかり条件、眼球調節単独条件などが設定された。両眼輻輳単独条件での輻輳は、プリズムによって操作され、ターゲットも小光点が用いられた。実験の結果、両眼輻輳単独手がかり条件では、ターゲットが置かれた距離と知覚された距離との誤差は、2cm 以下であり、すべての手がかりが働く条件 (full cue) と同等であった。これに対して、眼球調節単独条件は、過小視が著しく、また個人差が大きい結果となった。これらのことから、両眼輻輳は、手が届く範囲の奥行絶対距離の手がかりとして有効である。

4.2. 眼球調節作用と視えの奥行距離

遠近描写のある 2次元の画像の近点と遠点を注視したときの眼球調節の働きがしらべられた (Takeda et al⁽²⁸⁾)。眼球調節は、赤外線を角膜にあて、その反射像を得る方法で測定された。2次元の画像としては、北斎の富士などが用いられた。測定の結果、2次元画像で近点から遠点に視点を変えたときには、両眼輻輳を伴わない眼球調節の変化が生じることが示された。これとの比較で行われた現実場面での測定では、輻輳の伴う眼球調節の変化が生じること、またステレオグラムによる両眼立体視では輻輳の変化

は伴わないが、はじめに大きな変化が起き、その後は減衰する眼球調節変化が生じること、運動視差による立体視では両眼輻輳を伴わない眼球調節の変化が生じることがそれぞれ観察された。このことから、奥行の認知が眼球調節に大きな影響を持つことが示唆されている。

5. 絵画的要因による 3次元視

5.1. テクスチャと運動視差要因の最適な手がかり統合

人間の視覚システムは、複数の手がかりを統合して奥行知覚を成立させている。Jakobs⁽¹⁵⁾は、複数の手がかりを統合して対象の奥行知覚を得るとき、常に、それがその知覚的文脈に照らして最適であることに注目した。そして、この手がかり統合の最適性を、ベイズの確率定理で記述できるのではないかと考えた。もし、2つの手がかりであるテクスチャと運動視差とが利用できる場合を想定し、これにベイズの定理をあてはめると、 $P(d|m, t)$ の確率を次式のように最大にすれば良いことになる。

$$P(d|m, t) \text{ 最大化 } P(m, t|d)P(d)$$

ここで、 m : 運動視差、 t : テクスチャ
もし、 $P(d)$ 、 $P(m)$ 、 $P(t)$ の生起確率が等価であれば、次式が成立する。

$$P(d|m, t) \text{ 最大化 } P(m|d)P(t|d)$$

これを検証するために、ランダム・ドットで構成されたシリンダー (円筒) を、テクスチャ要因のみで提示、運動視差要因のみで提示、あるいは両要因を複合して提示し、その深さのマッチングを求め、そのデータを解析を試みた。その結果、ベイズの確率定理から予測する奥行と被験者の奥行とは良く適合することが示された。

5.2. 観察者の経験方略にもとづく複数の手がかりの統合

運動視差と両眼視差とがともに有効なとき、運動視差の手がかりを 2 フレームに限定して弱

化すれば、観察者は両眼視差に強く依存した形状知覚をすることが知られている (Johnston et al 1994)。同様にテクスチャ要因と運動視差要因のいずれかひとつがノイズで妨害されると、観察者は非妨害要因の手がかりに強く依存した奥行知覚をする (Young, et al 1993)。

Jakobs & Fine⁽¹⁶⁾ は、観察者がどのようにして奥行手がかりの統合方略をもつようになるかを検討し、経験による学習説を考えた。それによれば、人間の視覚システムは、奥行手がかりの統合に際して学習可能性が高く、知覚的文脈のなかでもっとも蓋然性の高い手がかりに依存することを修得すると仮定する。検証実験のために、図14に示されたようなシリンダー(円筒形)をテクスチャと運動視差で提示し、どちらかの要因がシリンダーの有効な形状情報を、他の要因は無関係な形状情報を与えるように設定した。実験は学習過程とテスト過程からなり、テスト過程ではどちらの手がかりに依存した知覚が生じるかが試された。実験結果は学習過程との整合を示し、したがって被験者の奥行統合方略は学習による経験に依存して決定されることが示された。

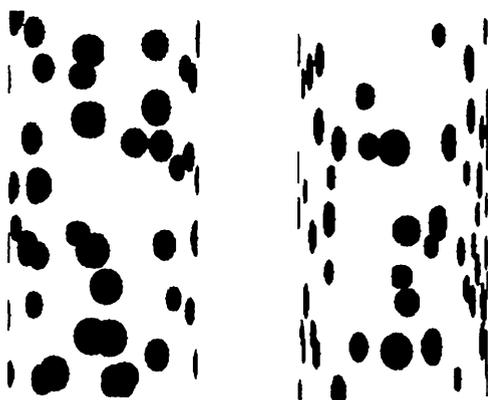


図14 経験方略にもとづく複数の手がかりの統合のための刺激パターン。

シリンダー(円筒形)をテクスチャと運動視差で提示し、どちらかの要因がシリンダーの有効な形状情報を、他の要因は無関係な形状情報を与えるように設定する (Jakobs & Fine 1999)。

5.3. 奥行距離、形状、大きさの処理過程の独立性

対象の網膜像の大きさと知覚された大きさとの関係は、視えの奥行距離と一致していないこと (Gogel 1990)、また知覚された運動と対象の視かけの位置の変化との関係も一致していないこと (Brenner et al 1996) が明らかにされ、これらのことから、それぞれの処理過程は独立的であると考えられている。そこで、もし奥行距離、対象の形状と大きさが網膜像内と網膜像外の手がかりにもとづいてそれぞれ独立に処理されているならば、ひとつの処理過程での誤りは他の過程の誤りに結びつかないと予測される。Brenner, et al⁽⁶⁾ は、奥行距離、形状、大きさ知覚に付加情報(手がかり)が他の処理過程にどのように影響するかを分析する方法でこの予測の検証を試みた。実験では、被験者はランダム・ドット・ステレオグラムで提示された楕円球をテニスボールになるように形状と大きさを調整し、その後で実際のテニスボールをシミュレートしたテニスボールのある位置に置いた。このとき、形状と奥行距離についての手がかりを操作し、それがそれぞれの知覚判断に与える影響(誤り)が分析された。その結果、奥行距離についての付加情報は、対象の形状、大きさ、奥行距離の知覚判断に影響すること、しかし形状についての付加情報は形状知覚に影響するものの、大きさと奥行距離知覚には影響しないことが示された。このことから、対象の形状、大きさ、奥行距離の処理過程は独立性をもち、総合的知覚判断の一貫性を求めないことが確認されるとともに、さらに形状や大きさの知覚判断過程に比較して、奥行距離の知覚判断過程はすべての知覚判断に共通の特性をもつことも示唆されている。

5.4. テクスチャ勾配要因の奥行効果

室内や屋外の空間を3次元的に視えるように構成する場合、床面や天井面にテクスチャ勾配を導入すると、奥行効果が増強される。テク

スチュア勾配にも、図15に示されたように、遠方に行くに従って収斂するテクスチュア勾配、水平線分間のみによるテクスチュア勾配、格子状のテクスチュア勾配、そして木目状のテクスチュア勾配などいくつかのパターンがある (Andersen et al.⁽¹¹⁾)。これら4種類のテクスチュア勾配のいずれがもっとも奥行効果を示すが検討された。室内空間の奥行は、4種類のテクスチュア勾配ごとに、別に用意したスケールで再生させる方法で測定した。その結果、水平線分間のみによるテクスチュア勾配が、もっとも奥行効果が高いことが示された。

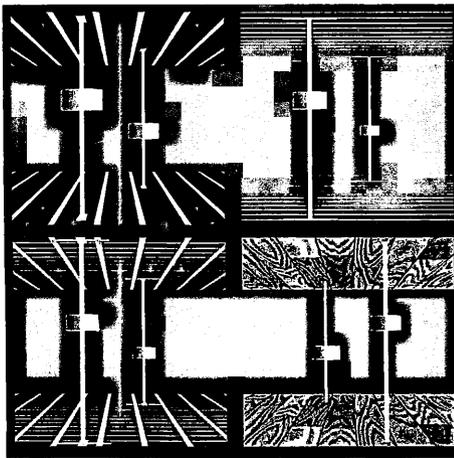


図15 4種類のテクスチュア勾配。

遠方に行くに従って収斂するテクスチュア勾配、水平線分間のみによるテクスチュア勾配、格子状のテクスチュア勾配、木目状のテクスチュア勾配 (Andersen et al 1998)。

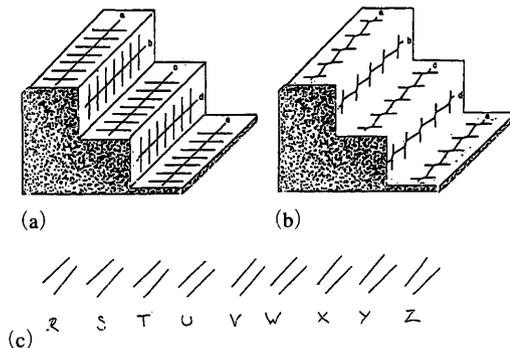


図16 階段に描かれたツェルナー錯視。

階段の凸面にツェルナー錯視が描かれた場合には錯視が生起するのに対して、凹面に描かれた場合には錯視が抑制される (Phillips, 1999)。

5.5. 錯視と恒常性尺度 (constancy scaling)

図16-(A)では、階段の各段上にツェルナー錯視が描かれている。ツェルナー錯視は、周知のように、長い方の平行線分が短い斜線分の影響を受けて輻輳／開散して見える錯視であるが、図16-(B)のように階段の段上に描くと、階段の凸面に描かれた場合には錯視が生起するのに対して、凹面に描かれた場合には錯視が抑制される (Phillips⁽²²⁾)。この現象は、シュレーダーの階段にみられるように、奥行反転が生起し、階段の凹凸が反転すると、錯視結果も逆転する。この結果は、ツェルナー錯視の潜在的な3次元性を保持するが、しかし階段の凹面での錯視の抑制はGregoryの錯視の遠近性理論と抗争し、恒常性尺度の適用の他に錯視パターンに固有な刺激特性処理とくに方向に関するパターン処理が関与することを示唆する。

6. その他の研究

6.1. 逆転視事態での視覚—運動協応反応と知覚反応

逆さ眼鏡による逆転視事態で、約1週間程度にわたって順応させると、視覚—運動協応関係は、すみやかに学習されるが、視野の再逆転やその他の知覚反応については変化が起きないと言われている。Linden et al.⁽¹⁹⁾は、4人の被験者に6日から10日間にわたって上下左右逆転の眼鏡に順応させ、視覚—運動協応、視野の再逆転、陰影による凹凸知覚テスト、そして視覚領の機能的磁気共鳴撮影 (fMRI) を行った。その結果、視覚—運動協応はすみやかに形成されたが、その他には変化が生じていない。

6.2. ウマの両眼立体視能力

ウマは両眼が前額に対して平行についていないので、両眼立体視能力は有していないと考えられてきた。しかし、両眼融合視野は65度程度もっているため、両眼立体視能力の存在も推定

される。これまで、ハヤブサ (Fox et al 1977) とハト (McFadden 1987) には両眼立体視能力が備わっていることが確認されているが、霊長類以外の哺乳類での両眼立体視能力についての行動学的検証はなされていない。そこで、Timney & Keil⁽²⁹⁾ は、ウマのランダム・ドット・ステレオグラム (RDS) による両眼立体視能力 (global stereopsis) についてしらべた。2頭の被験体は、はじめに平らな面と凸状の突起物のあるパネルが提示され、平らな面のパネルを選択したら強化される。この弁別学習が完成したら、弁別テストに移行し、被験体の片眼に緑のフィルターを他眼に赤のフィルターを装着し、両眼立体視が成立すると凸状の突起物が出現するRDSの張り付けたパネルと両眼視融合の生起しないRDSの張り付けたパネルとの弁別テストを試行した。その結果、2頭のウマは有意に強化刺激を選択することを示し、両眼立体視能力 (global stereopsis) を有していることが明らかにされている。

6.3. ニワトリとオクルージョン要因

ニワトリがオクルージョン(対象の重なり)を奥行手がかりとして利用できるかについて実験が試みられた (Forkman⁽⁸⁾)。刺激は、図17-(A)に示されたような平面画像で、タッチパネル式のディスプレイ上に提示される。刺激は同大の

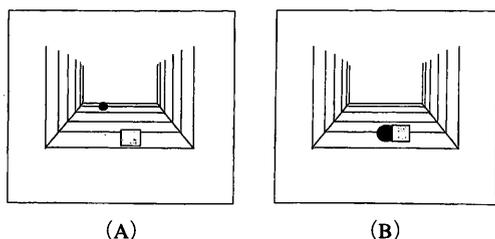


図17 ニワトリにおけるオクルージョン(重なり要因)の奥行効果を見るための刺激パターン。

刺激は同大の小円と矩形のいずれかを奥行的配置に描かれた線上に配置し、遠方に位置された刺激を啄ついた時に報酬で強化する (図A)。テスト刺激 (図B) には、小円と矩形を重ねたパターンが用いられた (Forkman 1998)。

小円と矩形のいずれかを奥行的配置に描かれた線上に配置し、遠方に位置された刺激を啄ついた時に報酬で強化する。テスト刺激 (図17-(B)) として、小円と矩形を重ねたパターンを提示したところ、重ねられた方の刺激対象を有意に啄つくことが見いだされた。このことから、ニワトリはオクルージョンを奥行の手がかりとして利用できると思われる。

7. おわりに

運動要因にもとづく3次元視の研究領域で新たに得られた主な知見は、(1)V1, V5/MT, MSTでは、運動と両眼視差の両方に応答するニューロンの存在が報告されているが、ランダム・ドット・キネマトグラムで、両眼視差と運動するドット数との関係をしらべた結果、両要因の補完的關係が明らかにされ、精神物理学的にも神経生理学的事実を裏付ける結果が示されたこと、(2)両眼立体視能力に障害のある弱視者は、運動視差による立体視能力も障害があることが確認され、運動視差による立体視と両眼立体視との間には、神経生理学的レベルでの関連があること、(3)運動からの構造復元には、低次の運動検出にもとづく3次元構造復元というボトムアップ経路のみではなく、その逆の高次過程である3次元形状過程が運動検出にトップダウン的に影響をもつ可能性があること、などである。

両眼立体視に関する研究領域では、(1)線形機構 (フーリエ機構) と非線形機構 (非フーリエ機構) を操作したステレオグラムの観察から、線形機構のステレオグラムでは形状と奥行が出現するが、非線形機構のそれでは奥行しか出現しないこと、(2)非線形機構は、方向と空間周波数に特異的な線形機構の後に生起する中枢的处理過程であること、(3)RDSにおける単眼非対応領域は、生態的に不自然な場合には立体視を促進するのではなく、妨害すること、(4)パナムの半端ステレオグラム (limiting case) の説明仮説には、2重融合説、オクルージョン説、カモフラ

ジュ説, 輻輳誘導視差仮説があるが, 輻輳誘導視差仮説が支持されること, (5)反極性の輝度対比をもつステレオグラムは, サステインド処理過程ではなくトランジェント処理過程で処理されていること, などが明らかにされた。

絵画的要因による3次元視での研究領域では, (1)複数の奥行きがかりの統合は, たとえば, 運動視差とテクスチャの手がかりの統合は, ベイズの確率定理で記述できる可能性があること, (2)奥行きがかりの統合は, 人間の経験方略にもとづく学習によって決定されていること, (3)対象の形状, 大きさ, 奥行き距離はそれぞれ独立したモジュールで処理され, それらの間に統合的な知覚処理過程は存在しないが, 奥行き距離の処理過程はすべての他の処理過程に影響を与える特性があること, などが新たに見いだされた。その他に, ウマはRDSの両眼立体視能力 (global stereopsis) をもつこと, ニワトリはオクルージョンを奥行きがかりとして利用できることが示された。

引用文献 (2000)

- (1) Andersen, G. J., Braunstein, M. L. & Saidpour, A. 1998 The perception of depth and slant from texture in three-dimensional scenes. *Perception*, 27, 1087-1106.
- (2) Backus, B. T., Banks, M. S., van Ee, B. & Crowell, J. A. 1999 Horizontal and vertical disparity, eye position, and stereoscopic slant perception. *Vision Research*, 39, 1143-1170.
- (3) Becker, S., Bowd, C., Shorter, S. King, K. & Patterson, R. 1999 Occlusion contributes to temporal processing differences between crossed and uncrossed stereopsis in random-dot displays. *Vision Research*, 39, 331-339.
- (4) Bradshaw, M. F., Parton, A. D. & Eagle, R. A. 1998 The interaction of binocular disparity and motion parallax in determining perceived depth and perceived size. *Perception*, 27, 1317-131.
- (5) Brenner, E., & van Damme, Wim J. M. 1999 Perceived distance, shape and size. *Vision Research*, 39, 975-986.
- (6) Ee, van, R. & Erkelens, C. J. 1999 The influence of large scanning eye movements on stereoscopic slant estimation of large surfaces. *Vision Research*, 39, 467-479.
- (7) Edwards, M., Pope, D. R. & Schor, C. M. 1999 Orientation tuning of the transient-stereopsis system. *Vision Research*, 39, 2717-2727.
- (8) Forkman, B. 1998 Hens use occlusion to judge depth in a two-dimensional picture. *Perception*, 27, 861-867.
- (9) Gillam, B., Blackburn, S. & Nakayama, K. 1999 Stereopsis based on monocular gaps: Metrical encoding of depth and slant without matching contours. *Vision Research*, 39, 493-502.
- (10) Glennster, A., Rogers, B. J. & Bradshaw, M. F. 1998 Cues to viewing distance for stereoscopic depth constancy. *Perception*, 27, 1357-1365.
- (11) Grove, P. & Ono, H. 1999 Ecologically invalid monocular texture leads to longer perceptual latencies in random-dot stereograms. *Perception*, 28, 627-639.
- (12) Hibbard, P. B. & Bradshaw, M. F. 1999 Does binocular disparity facilitate the detection of transparent motion? *Perception*, 28, 183-191.
- (13) Ito, H. 1999 Two process in stereoscopic apparent motion. *Vision Research*, 39, 2739-2748.
- (14) Ito, H. & Kawabata, E. 1998 Illusory three-dimensional rotation of horizontal lines: a new motion-depth illusion. *Perception*, 28, 1203-1207.
- (15) Jakobs, R. A. 1999 Optimal integration of texture and motion cues to depth. *Vision Research*, 39, 3621-3629.
- (16) Jakobs, R. A. & Fine, I. 1999 Experience-dependent integration of texture and motion cues to depth. *Vision Research*, 39, 4063-4075.
- (17) Kitazaki, M. & Shimojo, S. 1998 Surface discontinuity is critical in a moving observer's per-

- ception of objects' depth order and relative motion from retinal image motion. *Perception*, 27, 1153-1176.
- (18) Langley, K., Fleet, D. J. & Hibbard, P. B. 1999 Stereopsis from contrast envelopes. *Vision Research*, 39, 2313-2324.
- (19) Linden, D., Kallenbach, U., Heinecke, A., Singer, W. & Goebel, R. 1999 The myth of upright vision. A psychophysical and functional imaging study of adaptation to inverting spectacles. *Perception*, 28, 469-481.
- (20) Mon-Williams, M. & Tresilian, J. R. 1999 Some recent studies on the extraretinal condition to distance perception. *Perception*, 28, 167-181.
- (21) Mukai, I. & Watanabe, T. 1999 The influence of structure from motion correspondence. *Perception*, 28, 331-340.
- (22) Phillips, D. 1999 Constancy scaling and conflict when the Zollner illusion is seen in three dimensions. *Perception*, 28, 375-386.
- (23) Pope, D. R., Edwards, M. & Schor, C. F. 1999 Extraction of depth from opposite-contrast stimuli: transient system can, sustained system can't. *Vision Research*, 39, 4010-4017.
- (24) Popple, A. V. & Findlay, J. M. 1998 'Coarse-to-fine' cyclopean processing. *Perception*, 28, 155-165.
- (25) Shimono, K., Tam, W. J. & Nakamizo, S. 1999 Wheatstone-Panum limiting case: Occlusion, camouflage, and vergence-induced disparity cues. *Perception & Psychophysics*, 61, 445-455.
- (26) Shorter, S., Bowd, C., Donnelly, M. & Patterson, R. 1999 The stereoscopic (cyclopean) motion aftereffect is selective for spatial frequency and orientation of disparity modulation. *Vision Research*, 39, 3745-3751.
- (27) Snowdon, R. J. & Rossiter, M. C. 1999 Stereoscopic depth cues can segment motion information. *Perception*, 28, 193-201.
- (28) Takeda, T., Hashimoto, K., Hiruma, N. & Fukui, Y. 1999 Characteristic of accommodation toward apparent depth. *Vision Research*, 39, 2087-2097.
- (29) Timmney, B. & Keil, K. 1999 Local and global stereopsis in the horse. *Vision Research*, 39, 1861-1867.
- (30) Thompson, A. M. & Nawrot, M. 1999 Abnormal depth perception from motion parallax in amblyopic observers. *Vision Research*, 39, 1407-1413.
- (31) Yajima, T., Ujike, H. & Uchikawa, K. 1998 Apparent depth with retinal image motion of expansion and contraction yoked to head movement. *Perception*, 27, 937-949.
- (32) Ziegler, L. R. & Hess R. F. 1999 Stereopsis depth but not shape perception from second-order stimuli. *Vision Research*, 39, 1491-1507.

参考文献

- Bradley, D. C., Qian, N. & Andersen, R. A. 1995 Integration of motion and stereopsis in middle temporal cortical area of macaques. *Nature (London)*, 373, 609-611.
- Brenner, E., van den Berg, A. V., & van Damme, W.J. 1996 Perceived motion in depth. *Vision Research*, 36, 699-706.
- Cavanagh, P. 1991 Short-range versus long-range motion: not a valid distinction. *Spatial Vision*, 5, 303-309.
- Cavanagh, P. & Mather, G. 1989 Motion: the long and short of it. *Spatial Vision*, 4, 103-129.
- Fox, R., Lehmkuhle, S. & Bush, R. C. 1977 Stereopsis in the falcon. *Science*, 197, 79-81.
- Frisby, J. B. & Mayhew, J. E. W. 1978 The relationship between apparent depth and disparity in rivalrous-texture stereograms. *Perception*, 7, 661-678.
- Gillam, B. & Borsting, E. 1988 The role of monocular regions in stereoscopic displays. *Perception*, 17, 603-608.

- Gillam, B., Chamber, D. & Russo, B. 1988 Postfusional latency in stereoscopic slant perception and the primitive of stereopsis. *Journal of Experimental Psychology and Human Perceptual Performance*, 14, 163-175.
- Gillam, B., Flagg, T. & Finlay, D. 1984 Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, 36, 559-564.
- Gogel, W. C. 1990 A theory of phenomenal geometry and its applications. *Perception and Psychophysics*, 48, 105-123.
- Gregory, R. L. & Harris, J. P. 1975 Illusion destruction by appropriate scaling. *Perception*, 4, 203-220.
- Halpern, D. L. 1991 Stereopsis from motion defined contours. *Vision Research*, 31, 1611-1620.
- Howard, I. P. & Ohmi, M. 1992 A new interpretation of the role of dichoptic occlusion in stereopsis. *Investigative Ophthalmology & visual Sciences*, 33, 1370.
- Howard, I. P. & Rogers, B. 1995 *Binocular vision and stereopsis*. New York: Oxford University Press.
- Johnston, E. B., Cumming, B. G. & Landy, M. S. 1994 Integration of motion and stereopsis cue. *Vision Research*, 34, 2259-2275.
- Julesz, B. 1971 *Foundations of cyclopean perception*. Chicago: University of Chicago Press.
- Liu, L., Schor, C. W. & Ramachandran, V. S. 1992 Positional disparity is more efficient in encoding depth than phase disparity. *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 33, 1373.
- Marr, D. & Poggio, T. 1979 A computational theory of human stereovision. *Proceedings of the Royal Society (London), Series B*, 204, 301-328.
- McFadden, S. A. 1987 The binocular depth stereoacuity of the pigeon and its relation to the anatomical resolving power of the eye. *Vision Research*, 27, 1967-1980.
- Mansell, J. H. R. & van Essen, D. C. 1983 Functional properties of neurons in the middle temporal area of the macaque monkey II: Binocular interactions and sensitivity to binocular disparity. *Journal of Neurophysiology*, 49, 1148-1167.
- Nakayama, K. & Shimono, S. 1990 Da Vinci stereopsis: Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, 30, 1811-1825.
- Ogle, K. 1952 On the limits of stereoscopic vision. *Journal of Experimental Psychology*, 44, 253-259.
- Patterson, R. & Fox, R. 1984 The effect of testing method on stereoanomaly. *Vision Research*, 25, 403-408.
- Poggio, G. E. & Talbot, W. H. 1981 Mechanisms of static and dynamic stereopsis in foveal cortex of the rhesus monkey. *Journal of Physiology (London)*, 315, 469-492.
- Popple, A. V., Smallman, H. S. & Findlay, J. M. 1998 The area of spatial integration for initial horizontal disparity vergence. *Vision Research*, 38, 319-326.
- Rogers, B. J. 1984 Thresholds for discriminating depth differences in motion and stereoscopic surfaces. *perception*, 13, 20-24
- Roy, J. P., Komatsu, H. & Wurts, R. H. 1992 Disparity sensitivity of neurons in monkey extrastriate area MST. *Journal of Neuroscience*, 12, 2478-2492.
- Sato, T. & Nishida, S. 1994 Does an envelope detecting mechanism mediate stereopsis for band-limited stimuli? *Investigative Ophthalmology and Visual Science (Suppl.)*, 35, 1916.
- Stuart, G. W., Edwards, M. & Cook, M. L. 1992 Color inputs to random-dot stereopsis. *Perception*, 21, 717-729.
- Van Ee, & Erkelens, C. J. 1996 Temporal aspects of binocular slant perception. *Vision Research*, 36,

43-51.

Young, M. J., Landy, M. S. & Maloney, L. T. 1993 A
perturbation analysis of depth perception from

combinations of texture and motion cues. *Vision
Research*, 33, 2685-2696.