

空間認識のための視覚情報処理

金子 寛彦

Visual Information Processing for Space Perception

Hirohiko KANEKO

Human can perceive three-dimensional structures of the outer world from the visual information. In this process, it is assumed that the information from various cues, such as shading, perspective, occlusion, oculomotor cues, motion parallax and binocular disparity, are used and integrated for the space perception. This article introduces some of the basic aspects of this visual information processing.

Key words: vision, psychophysics, depth cue, space perception, binocular disparity

人間は、視覚情報から外界の三次元空間を認識することができる。飛行機や自動車を運転できるのも、机の上のコーヒークップがつかめるのも、小さな針の穴に糸を通すことができるのも、空間を認識できるためである。

三次元空間認識がとても身近で当たり前に行っていること、それを実現することは一見容易であるように思われる。しかし、コンピュータービジョンなどの工学的な取り組みを通して、それが非常に困難な問題であることが認識されている。

空間認識のために視覚情報処理過程が行っていることは、網膜像から外界の空間構造を再構築することである。しかし、網膜像は外界空間の二次元投影像であるから、網膜像から外界の三次元空間構造を再構成することは幾何学的に不可能である。左右2枚の網膜像を用いるとしても、画像だけからは完全な再構成は不可能である。このため人間の視覚情報処理系は、網膜像からは得られない情報、たとえば人間を取り巻く環境において妥当な拘束条件や知識、眼球運動に起因する情報、前庭系や聴覚からの情報などを併せて用いることにより、外界の空間構造を「推定」していると考えられる。したがって、空間認識のための視覚情報処理過程を明らかにするには、外界の空間構造と網膜像の関係を記述するだけでなく、その情報処理過程の中で使われている、拘束条件、仮定や知識を明らかにする

ことが重要である。

空間認識のための視覚情報処理の機構に関して、現在幅広く受け入れられている考えは、網膜像や網膜像以外から得られる空間認識のためのいくつかの「手がかり (cue)」がそれぞれモジュールとして情報処理され、それらの出力が統合されて最終的な空間認識に至るというものである。本稿ではこの考えに基づいて、空間認識の各手がかりに関して概観する。その中で、これまでに多くの知見が得られている両眼網膜像差の情報処理に関して、より詳しく説明する。そして最後に、手がかりの統合過程、空間認識のための視覚情報処理機構の解明についての今後の課題に触れる。

1. 空間認識の手がかり

空間認識の手がかりは数多くあり、いくつかのカテゴリに分類できる。まず、網膜外手がかり (extra-retinal cues) と網膜像から得られる手がかり (retinal cues) に分けられる。さらに、網膜像手がかりには、絵画的手法 (pictorial cues)、動きによる手がかり (motion cues)、両眼網膜像差 (binocular disparity) がある。以下では、それぞれの手がかりについて説明する。

1.1 網膜外手がかり (extra-retinal cues)

ある対象を注視した場合、その対象が近づくに従って左

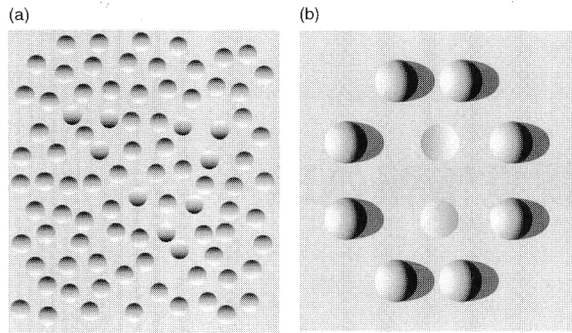


図1 陰影をもつ刺激の例。(a) 視覚的光源位置情報がない刺激、(b) 影による光源位置情報を含む刺激。

右眼は内転する。この眼球運動は水平輻輳 (horizontal vergence) とよばれる。注視する対象までの距離と輻輳の大きさが幾何学的に1対1に対応するため、輻輳時の眼筋の活動に伴う信号が空間知覚の手がかりのひとつであるとされる¹⁾。

ある対象を注視した場合、対象までの距離に応じて眼のレンズである水晶体の厚さが変わり、網膜像が鮮明になるよう眼光学系の焦点距離が変化する。この機能は調節 (accommodation) とよばれる。そして、対象の距離と調節量は1対1に対応するため、水晶体の形状を調整する毛様体筋の活動に伴う信号が空間知覚の手がかりのひとつとされる²⁾。輻輳と調節は、互いにリンクして変化するので、まとめて動眼性手がかり (oculomotor cues) とよばれる場合もある。

上に述べたように、輻輳と調節は、理論的に対象の距離の情報になりうる。しかし、それらが実際に対象の距離知覚にどの程度影響を与えるかということに関しては、多くの研究がなされているにもかかわらず明確な結論が出ていないといえる。少なくともいえることは、それらは距離知覚に関して強力な手がかりではない、個人差が大きい、近距離 (1 m 以下程度) においてある程度の効果がみられる、などである^{1,2)}。ただ、対象の視角を一定に保った場合、輻輳と調節を近距離方向に変化させることにより、対象の知覚的大きさが小さくなる方向に変化する現象は、一貫して報告されている^{3,4)}。これは、輻輳と調節による情報が直接的に対象の距離知覚に影響しなくとも、間接的に距離の情報となり、他の空間認識手がかりからの情報をスケールアップするために用いられていることを示唆している。

1.2 絵画的手がかり (pictorial cues)

絵画的手がかりとは、文字通り絵や写真の中で表現できる空間知覚手がかりである。その中には以下に述べるような手がかりがあるが、1つの絵からそれぞれを個別に取り出すこと、それぞれの量あるいは強さを制御することは困

難であるので、各手がかりの処理機構の定量的な理解は進んでいない。しかし、絵画の手がかりが知覚に大きく影響し、一見信頼性が高いと思われる両眼視差 (後述)、輻輳など他の手がかりに打ち勝つ状況も多い⁵⁾。

陰影 (shading) とは、光源の方向と物体形状によって形成される物体表面からの反射輝度の分布である。したがって、陰影は物体の三次元形状の情報を含んでおり、空間知覚手がかりのひとつであると考えられる⁶⁾。しかし、陰影手がかりは多義的であり、それだけでは三次元的な物体形状は一意に決まらない。陰影から正しい物体形状を推定するためには光源位置情報が必要である。そして、視覚系はいくつかの光源位置情報を用いて陰影手がかりを解釈し、空間知覚を生じさせると考えられている。光源位置情報のひとつは、光源が視野の上方に存在するという、経験的あるいは生得的な無意識の仮定 (光源上方仮定) である。図1(a)に、陰影をもった円形刺激を多数配置した画像を示す。これを観察すると、三角形に配置されるいくつかの円形刺激が凸形状に知覚される。この図の個々の円形図形の輝度の分布はすべて同一であるが、凸と知覚されるものは上方が明るくなっており、凹と知覚されるものは輝度の分布が逆方向である。このような空間形状と輝度の分布の関係は、光源が上方にあるときの凸や凹の実物体の形状とそれらから反射される表面輝度分布と同じである。そしてこの図を上下反転させると、奥行き形状は逆転する。この知覚も光源上方仮定と矛盾がない。他の光源位置情報のひとつは、周囲の視覚像によるものである。図1(b)に、図1(a)と同様の陰影をもった2つの円形刺激と、そのまわりに影 (cast shadow) によって視覚的に明確な光源位置情報をもった図形を示す。これを観察すると、円形刺激の形状が凸と凹に知覚される。この知覚は、周囲の図形の影の方向によって示される光源位置により陰影が解釈されたと考えると矛盾がない。このように、陰影手がかりは、光源位置に関する情報や仮定とともに解釈され、空間形状知覚を生じさせる⁷⁾。

テクスチャー勾配 (texture gradient) は、二次元画像中に広がる、個々の画像要素の大きさ (形状) とそれらの間隔の変化の分布である (図2)。この図を観察すると、テクスチャー密度が高い部分がより遠方にあるように知覚される。テクスチャー勾配は陰影と同様に多義的であり、それだけでは空間形状は決まらないが、実際の空間中で個々の要素は同じ大きさで一様な分布をもつ。すなわち、実空間でのテクスチャーの一様性を仮定して網膜像中のテクスチャー勾配を解釈することにより、空間知覚が生じると考えられる。

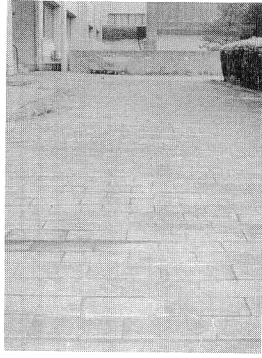


図2 テクスチャー勾配をもつ刺激の例.

陰影とテクスチャー勾配の他にも多くの絵画的手がかりが知られている。輪郭線形状 (contour shape) 手がかりは三次元形状の知覚を生み出し、輪郭線の接合形状による遮蔽 (occlusion) 手がかりは対象の前後関係の知覚を生み出す。直線がすべて1点に集束する傾向である線遠近法 (linear perspective) 手がかりからは奥行き方向の広がり知覚が生じる (図3)。また、画像中のぼけや不鮮明さ、全体的な色などの変化は空気透視 (atmospheric perspective) 手がかりとよばれ、非常に遠距離にわたる奥行き感を生み出す (図4)。

以上のような絵画的手がかりは、基本的には実際の三次元空間を観察したときに網膜上に投影される像を再現するような画像要素であるが、そのような画像要素が空間知覚の情報として活用されるためには、陰影やテクスチャー勾配手がかりの場合のように、実際の空間に関する仮定をもっていなければならない。それは、奥行きの異なる2つの物体が重なることによって生じるエッジは、手前の物体に属するという仮定(遮蔽手がかり)、実空間において平行線が多いという仮定(線遠近法手がかり)などである。これらの仮定は、外界の空間では物理的に妥当であると思われるが、視覚情報処理系がどのようにしてそれらを見いだしたのかは興味深い問題である。経験が関与していることは容易に想像がつくが、定性的な予測以上の議論をすることは困難である。

1.3 両眼視差

人間は左右に並ぶ2つの眼をもつため、異なる2枚の網膜像を得る。この左右の網膜像のわずかな違いは両眼視差あるいは両眼網膜像差とよばれ、空間認識の手がかりとなる。両眼視差が空間認識の手がかりになるということは紀元前に書かれた書物の中でも指摘されており、実験的にも古くから確かめられている⁸⁾。

両眼視差から空間認識に至る情報処理過程は、大きく2つの過程に分けられる⁹⁾。1つは、左右の網膜像から両眼視



図3 線遠近法手がかりをもつ刺激の例.

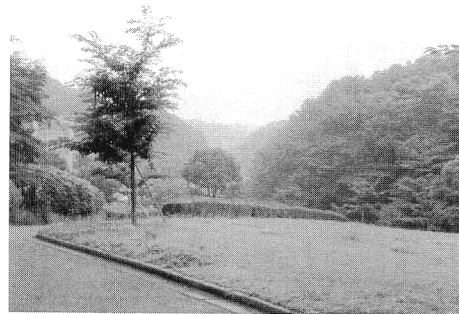


図4 空気透視手がかりをもつ刺激の例.

差を検出、計測する過程であり、網膜上の対応点の問題、両眼像から対応する点を検出するいわゆる対応問題、視差の符号化手法の問題などを含む。後者は、前者から得られた視差の二次元的なマップから三次元空間を再構築する過程であり、奥行きのスケールリングの問題、両眼非対応領域の問題、眼球運動との関連に関する問題などを含む。以下では、これらの問題の中で重要と思われるいくつかの項目に関して解説する。

1.3.1 両眼視差の幾何学

ここでは、外界の空間構造と水平視差 (horizontal disparity) および垂直視差 (vertical disparity) との幾何学的関係に関して述べる。

図5に、左右眼と同一平面上にある2つの対象の網膜像の位置を示す。観察者の正中面上に点Pをとり、その左右の網膜像をそれぞれPl, Prとする。また、Pより近距離で点Pと同じく正中面上にある点Nをとり、その左右像をそれぞれNl, Nrとする。このとき、PlとNlおよびPrとNrの網膜上の距離の違いを、点P, Nの2点が左右眼それぞれに張る水平方向の角度 (Hr, Hl) の違いとして、相対水平視差 h と定義される。 h は、点Pと点Nの奥行き距離

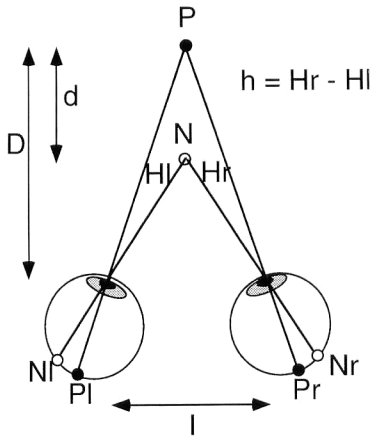


図5 外界の対象(点P, 点N), その網膜上の位置(PI, Pr, NI, Nr)と水平視差(h)の関係.

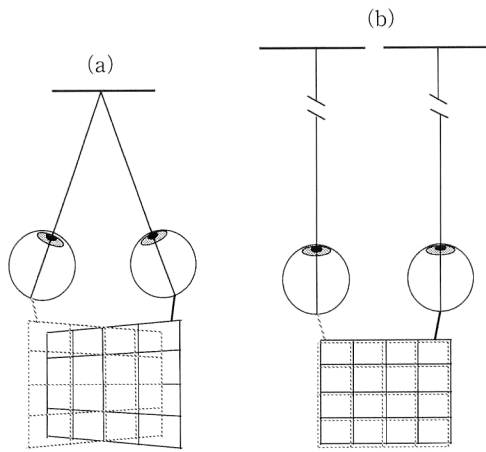


図6 近距離(a), 遠距離(b)にある額面平行面を観察した場合の左右網膜像パターン.

d , 両眼間の距離 I , 点 P までの距離 D の関数となり, I が D に比べて十分に小さい場合は近似的に以下のように書き表せる.

$$h \approx Id/D^2 \quad (1)$$

この式から, 水平視差は対象の奥行き量に比例し視距離の2乗に反比例することがわかる.

上の例で, 点 P を注視した場合, PI, Pr は左右それぞれの網膜の中心部(原点)にくることになり, 上の定義による両眼視差は NI, Nr の網膜座標上の位置の違いと考えることができる. この網膜座標上の位置の違いによって1点の対象に対して定義される両眼視差を絶対視差(absolute disparity)とよぶ. 一方, 網膜座標上の位置の違いではなく, 2点以上の対象に対して定義される両眼視差を相対視差(relative disparity)とよぶ¹⁰⁾. 絶対視差は眼球の位置によって変化するが, 相対視差は眼球位置による変化はない.

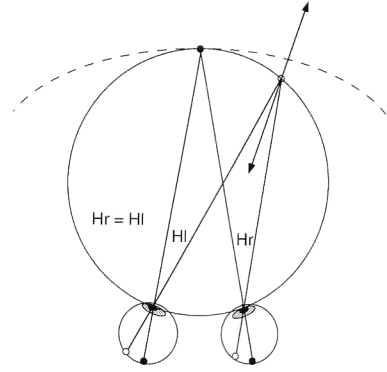


図7 水平面上の幾何学的ホロプター(Vieth-Mullerサークル)(実線)と心理物理的ホロプター(破線).

ある対象が正中面以外にある場合, その対象から左右の眼までの距離は異なる. したがって, その対象が垂直方向に広がりをもっている場合, 左右の網膜像は垂直方向に異なる大きさをもつ. 図6(a), (b)に, 近距離にある額面平行面と, 遠距離にある額面平行面を観察した場合の左右網膜像の二次元的パターンをそれぞれ示す. この図から明らかなように, 額面平行面は, 呈示される距離によって固有な両眼視差の分布パターンをつくり出す. 距離が遠い場合は水平, 垂直視差ともにゼロに近くなるが, 距離が近い場合は方位によって水平視差および垂直視差が異なる. そして, ある1つの対象が左右眼に投影する像の水平面からの垂直変位角の違いを垂直視差 v とした場合, v は両眼の midpoint から対象までの距離 D , 垂直方位 V および水平方位 H の関数として, 近似的に以下のように書き表すことができる¹¹⁾.

$$v \approx IHV/D \quad (2)$$

この式から, 垂直視差は対象の方位に比例し視距離に反比例することがわかる.

1.3.2 両眼対応点とホロプター

両眼視差と空間知覚の関係を考えるうえで, 左右眼の網膜上の対応点に像を投影する対象, すなわち両眼視差がゼロとなる対象の空間的位置を知ることは重要である. 両眼網膜上の対応点に像を投影する対象の集合はホロプターとよばれ, 幾何学的, 心理物理学的に定義することができる.

図7に示すように両眼で1点を見つめた場合, 注視点と両眼の節点を通る円(実線)上のすべての点は, 左右の眼から見た注視点とのなす角度が幾何学的に等しくなる. このため, それらの点は幾何学的な両眼対応点上に像をつくる. この円は Vieth-Muller サークルとよばれ, 幾何学的ホロプター(geometrical horopter)である. また, 注視点を通る垂直線分上の点もすべて, 左右の網膜座標上での位

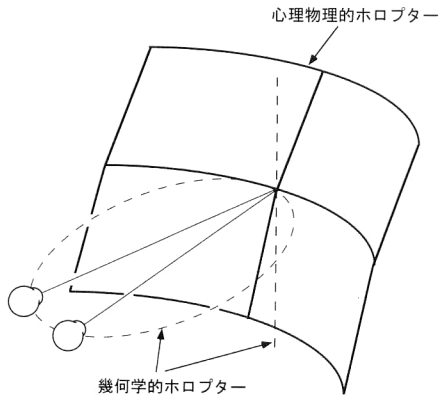


図8 幾何学的ホロプターと心理物理的ホロプター。

置が等しくなり幾何学的ホロプターとなる¹²⁾。

一方、心理物理的（経験的）ホロプター（empirical horopter）は、左右眼の像が「自己から見て同一方向に知覚される」という判断基準（他の判断基準も用いられる場合がある）に基づいて定義される。この判断基準を用いた心理物理的対応点の網膜上の分布は、水平軸上においては網膜上の左右で非対称であり、垂直軸上においては注視点の上下で横方向のずれが逆であることが知られている^{13,14)}。このため、心理物理的対応点に像をつくる空間中の点の集合、すなわち心理物理的ホロプターは、水平面上では Vieth-Muller サークル（幾何学的ホロプター）の外側（図7破線）に、正中面上では上方が遠方に傾いた線分となる¹⁴⁾。

心理物理的ホロプターは水平面、正中面上以外の場所にも存在する可能性があるため、視野の全域にわたって心理物理的対応点が測定されている¹⁵⁾。その結果、心理物理的ホロプターは、図8に示すような外側が手前に湾曲し上方が遠方に傾いた形状の面となることが推定されている。この面が心理物理的に定義された両眼視差ゼロの面、すなわち両眼視差検出の基準となると考えられる。

なぜ両眼視差ゼロとなる面がこのような形状なのであろうか。可能性のひとつとして、視覚系がわれわれを取り巻く空間的な環境に適応した結果であると考えられる。つまり、視覚系が両眼視差処理を効率的に行うために、両眼視差ゼロの面の形状を人間が通常生活する中で興味ある視覚対象が多い位置に対応させたのである¹²⁾。人間にとって興味のある対象の多い位置というのは地表面上であり、それは視線に対して傾いている。コンピューターディスプレイなどは傾き角を調整できることをセールスポイントとするが、これも人間が視対象を視線に対して少し傾けて両眼視差ゼロの位置に配置することを好む性質に対応するためかもしれない。

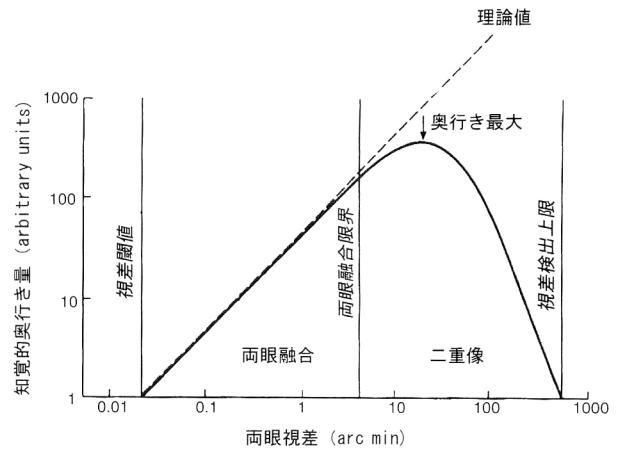


図9 水平視差量と奥行き知覚量の関係 (Tyler, 1991¹⁶⁾ をもとに作成)。

1.3.3 両眼視差と知覚

水平視差：2点の対象の間に水平視差（相対視差）が与えられた場合、それらの間の知覚的奥行き量は、基本的には前述の式（1）から予想されるように視差量に比例して増加する。しかし、その関係はある範囲内の視差量でのみ成り立つ。すなわち、奥行き知覚が生じる水平視差の閾値、知覚と視差量が線形の関係を保つ範囲、奥行き知覚が生じる水平視差の上限が存在する¹⁶⁾（図9）。

奥行き知覚が生じる水平視差の閾値は、最もよい条件下では、視角にして数秒（角度1秒は1度の360分の1）になることが報告されている¹⁷⁾。これは、視距離1mにおいて約0.5mmの奥行き量に対応し、非常に小さい値といえるだろう。そしてこの閾値は、刺激の輝度、空間周波数、呈示時間、網膜上の位置、方向（比較対象に対して交差か非交差か）など多くの要因に影響を受ける¹⁶⁾。水平視差が閾値を超えると、視差量に比例して奥行き量が増加する領域になる。さらに水平視差が増加すると、知覚される奥行き量が式（1）から予想される奥行き量より小さくなり、さらに視差量が増加すると水平視差の増加に伴って奥行き量が減少していくようになる。これらの点と前後して、単一像として知覚されていた対象の左右像が融合（binocular fusion）されなくなり、二重像として知覚されるようになる。そしてついに、両眼視差からは奥行き量が知覚されなくなる。この奥行き知覚を生み出す視差の上限は、刺激の形状にも大きく依存するが、数度程度である。これらの特性から、水平視差は対象の小さな奥行きを差異を知覚するために用いられていると考えられる。

一定の水平視差が与えられた場合、それらの間の知覚的奥行き量は対象の距離に影響を受ける。このとき式（1）から予想されるように、距離の増加に伴って知覚的奥行き

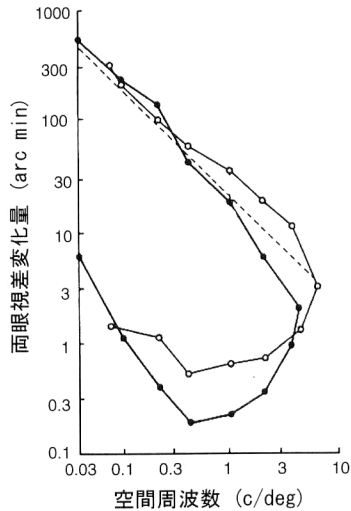


図10 水平視差変化の空間周波数と奥行き知覚が生じる閾値および上限視差量の関係。シンボルは2人の被験者の結果を示す (Tyler, 1975¹⁹⁾をもとに作成)。

量が増加する。この関係は、視差量の変化にかかわらず、空間中で一定の奥行き量に対して一定の知覚的奥行き量を保つ方向であり、奥行き恒常性とよばれる¹⁹⁾。

水平視差が二次元的な分布をもつ場合に知覚される空間形状は、基本的には各点の視差量から予想される奥行き量をつなげたものになる。しかし、水平視差の分布形状に応じた知覚特性があることも知られている。このような特性の主要な部分は、奥行き次元での空間周波数特性という形でまとめることができる。この一例¹⁹⁾を図10に示す。横軸は、両眼視差の二次元的変化の空間周波数、縦軸は視差変化の振幅である。そして、プロット点は視差から奥行き知覚が得られるか否かの境界を示しており、図中の曲線で囲まれた視差条件の場合のみ奥行き知覚が得られる。この曲線形状から二次元的な視差の分布と知覚の関係に関するいくつかの特性がみられる。

第1は、閾値感度の視差変化周波数依存性である。それは、この図の下側の曲線形状から明らかなように、0.3~1 c/deg付近に最大感度をもつバンドパス型の特性をもっている。第2は、奥行き知覚を生み出す視差変化周期の限界であり、図の右側の曲線形状よりそれが3~5 c/degであることがわかる。奥行き知覚を生み出す視差変化の限界が存在するという事は、視覚系が面の滑らかさに関する拘束条件、すなわち空間中には奥行きが小刻みに変化する対象は存在しないという仮定をもつとみなすこともできる。また、この拘束条件は両眼の対応点の可能性を大幅に減少し、いわゆる両眼対応点問題を解決するためにも役立つと考えられる。

二次元的な視差の分布と知覚の関係における第3の特性

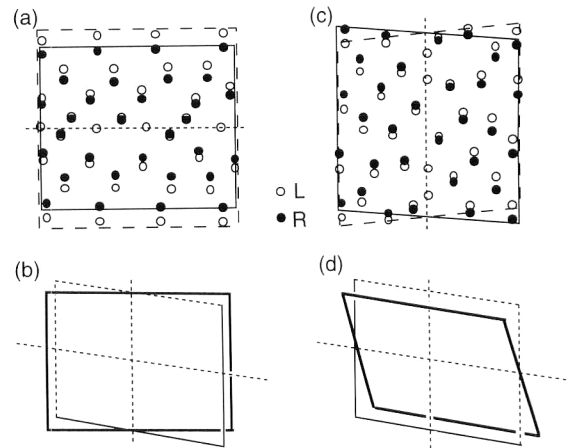


図11 垂直大きさ視差パターン (a) と、(a) から知覚される面の傾き (b)、垂直剪断視差パターン (c) と、(c) から知覚される面の傾き (d)。 (a)、(c) 中の黒丸と実線は右眼像の位置、白丸と点線は左眼像の位置を示す。 (b)、(d) 中の点線は額面平行面、実線は知覚される面を示す。

は、奥行き知覚を生み出す視差勾配の限界であり、図10の上方の直線形状から読み取れる。その直線が示すように、視差変化の空間周波数が低いほど大きな視差から奥行き知覚が生じるということは、ある点の絶対的な視差量ではなく、単位長さあたりの視差変化量 (視差勾配) によって奥行き知覚が生じる限界視差量が決まっているということである。これらの特性の他にも水平視差の分布形状に応じた知覚特性が数多く知られている^{8,16)}。以上のような特性の説明としては、視差検出の機構などからいわば副産物として生じるとするもの、視差の解釈として必然的に生じるとするものなどが提案されている^{16,17)}。

垂直視差：垂直視差は二次元的に特定の分布をもった場合に限り、三次元空間形状知覚に影響する。その特定の分布として、垂直大きさ視差 (勾配) と垂直剪断視差が知られている。

垂直大きさ視差 (vertical size disparity) とは、左右の網膜像の一方がもう一方に対して垂直方向に圧縮または拡大している視差パターンである (図11(a))。一様な垂直大きさ視差をもつ刺激を観察した場合、鉛直軸まわりに傾いた面が知覚される (図11(b))。図に示されるように、左眼像が右眼像よりも大きい垂直大きさ視差であれば、左端が手前に傾いた面が知覚される²⁰⁾。また、額面平行面を観察した場合に網膜上に生じる垂直大きさ視差勾配 (vertical size disparity gradation) パターンは、距離知覚および奥行き知覚と大きさ知覚の距離スケール効果に影響することも実験的に示されている。広い視野中の垂直視差勾配パターンが近距離面をシミュレートしたのから遠距離面をシミュレートしたものに変わると、面が遠く知覚さ

れ²¹⁾、その面の中心にある水平視差と視角一定の対象の知覚的奥行きと知覚的大きさが奥行きと大きさの恒常性を保つように増加する^{21,22)}。

垂直視差が水平軸に沿って徐々に変化する視差パターンである垂直剪断視差 (vertical shear disparity) をもつ刺激 (図 11(c)) を観察した場合、水平軸まわりに傾いた面が知覚される (図 11(d))。図中に示されるように、右眼像が左眼像に対して時計まわりの視差をもつ場合であれば、上端が手前に傾いた面が知覚される²³⁾。そして、空間知覚のための垂直視差処理の性質は、水平視差のそれとは大きく異なる。水平視差は基本的に局所的に処理されるのに対し、垂直視差は基本的に広域的に処理されることが知られている^{23,24)}。

なぜ垂直大きさ視差、垂直剪断視差から面の傾きが知覚されるのであろうか。垂直大きさ視差に関して、それが対象までの距離と方向の情報になることから (前述の式 (2))、視差処理過程においても垂直大きさ視差から距離と方向の値が計算され、それらによって水平視差による面の傾き、形状がスケールされるという機構が提案されている^{11,25)}。この考えは理論的に妥当であるが、現実にはありえない垂直大きさ視差 (図 11(a) もその一例である) からも奥行き感が得られることから、垂直大きさ視差の処理が機能的には対象の距離と方向による水平視差への影響を補正するのに役立つが、機構的には距離と方向の計算という直接的な形ではないアルゴリズムを用いていることも示唆されている^{23,26)}。垂直剪断視差に関しては、それが対象ではなく観察者自身の回旋輻輳眼球運動の指標になるので、垂直剪断視差によって回旋輻輳から生じる水平視差を補正する機構が存在し、その働きで傾いた面が知覚されるとする説が提案されている²³⁾。

1.4 動きによる手がかり (motion cues)

人間は、頭部や身体を動かして眼球位置を変えることにより、異なる位置から見た外界の像を得ることができる。この頭部・身体運動に伴った網膜像の変化は (観察者) 運動視差 (motion parallax) とよばれ、空間認識のための手がかりとなる。

観察者運動視差と奥行き量の幾何学的な関係は、図 5 に示した両眼視差と対象の奥行き量の関係の図における両眼間の距離 I を 1 つの眼の移動量 M に置き換え、頭部・身体運動時の点 P と点 N の網膜上の相対的な水平移動角度を運動視差 m と定義すると、両眼視差の場合と同様なものになる。したがって、運動視差は対象の奥行き量に比例し、視距離の 2 乗に反比例する。運動視差手がかりの空間知覚における有効性は、多くの研究から実験的に示されており、

その処理特性において、水平視差による奥行き知覚との類似性が指摘されている²⁷⁾。

頭部・身体を静止したままでも、網膜上の運動の分布により物体の三次元形状が知覚される現象がある。これは、運動性奥行き効果 (kinetic depth effect) とよばれる。二次元的な運動の分布は三次元情報としては多義的であるが、その運動が形状変化のない 1 つの三次元物体から生じるという仮定 (剛体性の仮定) とともに解釈され、三次元形状の知覚が生じると考えられる。

2. 空間認識手がかりの統合

これまで述べてきたように、多くの手がかりが空間認識において有効である。それでは視覚系は多くの手がかりからの情報をどのように統合して最終的に 1 つの空間を認識しているのだろうか。

まず、各手がかりは空間認識において異なる情報を持ち、それぞれが役割を分担し協調し合って 1 つの空間構造を推定しているという機構が考えられる。たとえば、水平視差や運動視差は相対的な奥行き情報しかもたないが、輻輳や垂直大きさ視差勾配は絶対距離の情報をもつ。また、水平視差は非常に小さな奥行き情報になるのに対し、空気透視は非常に遠距離での奥行き情報となる。あるいは、各手がかりが異なる観察条件に対応していることも考えられる。たとえば、運動視差は観察者が動いているときに空間情報を与えるのに対して、両眼視差は静止しているときにこそ信頼できる空間情報を与えるだろう。このように、各手がかりが情報の質、空間範囲、観察条件などに関してそれぞれ役割分担をもつという考えは、少なくとも部分的には正しいだろう。

しかし、複数の手がかりが同質の情報をもつ場合もあり、この場合は、各手がかりから得られる情報が重みづけ平均として統合されるという機構が提案されている²⁸⁾。そして、その重みはそれぞれの手がかりの信頼性に依拠して決定される。また、手がかりの信頼性は、ノイズの大小、刺激条件、各個人の視覚機能などに基いて決まる^{28,29)}。近年、いくつかの視覚手がかりのうちのひとつだけが、触覚的に与えられた空間情報と一致する環境下に置かれることにより、空間知覚におけるその視覚手がかりの信頼性が増加することが報告されている^{30,31)}。このような手がかり統合過程が学習や経験によって影響を受けるという考えは、各手がかりが役割を分担しているという考えも包括して説明できる可能性がある。

冒頭で述べたように、空間認識のための視覚情報処理過

程が行っていることは、刻々と変化する網膜像を中心とした情報に加えて、拘束条件や仮定、知識などを用いて空間構造を「推定」することである。そして、これまでの空間認識過程に関する研究の多くは、その拘束条件や仮定、知識などに関しては自明なものとして扱い、それらをいかにして獲得するかという点に関しては、十分に考察がされてこなかったように思われる。しかし、この点は視覚情報処理において非常に重要である。そこでは、経験、環境、適応などがキーワードである。今後は、このような視点から、空間認識過程を単に定まった1つのシステムとしてではなく、柔軟に変化するシステムと捉えることにより、その機構が解明されることが期待される。

本稿で述べてきたことは、空間認識機構の心理物理学的側面のごく一部であり、この他にも多くの心理物理学的知見があり、また生理学的、計算論的側面からも多くの知見が得られている^{8,32)}。そして、本稿で述べたような間接的な「手がかり」によって空間認識がなされるという考えの他にも、刺激中の不変項を直接的に抽出して外界を知覚する、という考え³³⁾があることも付記しておきたい。

文 献

- 1) J. M. Foley: "Binocular distance perception," *Psychol. Rev.*, **87** (1980) 411-434.
- 2) H. W. Leibowitz, K. Shiina and R. T. Hennessy: "Oculomotor adjustments and size constancy," *Percept. Psychophys.*, **12** (1972) 117-130.
- 3) H. Leibowitz and D. Moore: "Role of changes in accommodation and convergence in the perception of size," *Percept. Psychophys.*, **16** (1974) 175-181.
- 4) 金子寛彦, 内川恵二, 池田光男: "輻輳による距離知覚と大きさ知覚の比較", *光学*, **20** (1991) 285-293.
- 5) J. I. Yellott and J. L. Kaiwi: "Depth inversion despite stereopsis: The appearance of random-dot stereograms on surfaces seen in reverse perspective," *Perception*, **8** (1979) 135-142.
- 6) V. S. Ramachandran: "Perception of shape from shading," *Nature*, **331** (1988) 163-166.
- 7) 澤田忠正, 金子寛彦: "陰影による奥行き形状知覚に与える周辺刺激の影響", *電子情報通信学会技術研究報告*, **101** (2001) 31-36.
- 8) I. P. Howard and B. J. Rogers: *Binocular Vision and Stereopsis* (Oxford University Press, New York, 1995).
- 9) D. Weinshall and J. Malik: "Review of computational models of stereopsis," *Early Vision and Beyond*, eds. T. V. Papathomas, C. Chubb, A. Gorea and E. Kowler (The MIT Press, Cambridge, 1994) pp. 33-41.
- 10) H. Collewijn, R. M. Steinman, C. F. Erkelens and D. Regan: "Binocular fusion, stereopsis and stereoacuity with a moving head," *Binocular Vision*, ed. D. Regan (CRC Press, Boca Raton, 1991) pp. 121-136.
- 11) J. Mayhew: "The interpretation of stereo-disparity information: The computation of surface orientation and depth," *Perception*, **11** (1982) 387-403.
- 12) C. W. Tyler: "The horopter and binocular fusion," *Binocular Vision*, ed. D. Regan (CRC Press, Boca Raton, 1991) pp. 19-37.
- 13) K. N. Ogle: *Researches in Binocular Vision* (Hafner, New York, 1964).
- 14) K. Nakayama: "Geometrical and physiological aspects of depth perception," *Proc. SPIE*, **120** (1977) 1-8.
- 15) P. M. Grove, H. Kaneko and H. Ono: "The backward inclination of a surface defined by empirical corresponding points," *Perception*, **30** (2001) 411-429.
- 16) C. W. Tyler: "Cyclopean vision," *Binocular Vision*, ed. D. Regan (CRC Press, Boca Raton, 1991) pp. 38-74.
- 17) C. W. Tyler: "Stereoscopic vision: Cortical limitations and a disparity scaling effect," *Science*, **181** (1973) 276-287.
- 18) 中溝幸夫, 下野孝一: "視覚系による絶対距離情報を用いた奥行きスケール", *Vision*, **13** (2001) 163-180.
- 19) C. W. Tyler: "Spatial organization of binocular disparity sensitivity," *Vision Res.*, **15** (1975) 583-590.
- 20) K. N. Ogle: "Induced size effect. I: A new phenomenon in binocular vision associated with the relative sizes of the images in the two eyes," *AMA Arch. Ophthalmol.*, **20** (1938) 604-623.
- 21) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: "Disparity scaling and the perception of frontoparallel surfaces," *Perception*, **24** (1995) 155-179.
- 22) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw: "Vertical disparity, differential perspective and binocular stereopsis," *Nature*, **361** (1993) 253-255.
- 23) I. P. Howard and H. Kaneko: "Relative shear disparities and the perception of surface inclination," *Vision Res.*, **34** (1994) 2505-2517.
- 24) H. Kaneko and I. P. Howard: "Relative size disparities and the perception of surface slant," *Vision Res.*, **36** (1996) 1919-1930.
- 25) B. Gillam and B. Lawergren: "The induced effect, vertical disparity and stereoscopic theory," *Percept. Psychophys.*, **34** (1983) 121-130.
- 26) J. J. Koenderink and A. J. van Doorn: "Geometry of binocular vision and a model for stereopsis," *Biol. Cybern.*, **21** (1976) 29-35.
- 27) B. J. Rogers and M. Graham: "Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception," *Vision Res.*, **22** (1982) 261-270.
- 28) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: "Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion," *Vision Res.*, **35** (1995) 389-412.
- 29) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: "Integration of depth modules: Stereopsis and texture," *Vision Res.*, **33** (1993) 813-826.
- 30) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bulthoff: "Touch can change visual slant perception," *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
- 31) J. E. Atkins, J. Fiser and R. A. Jacobs: "Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts," *Vision Res.*, **41** (2001) 449-461.
- 32) 日本視覚学会編: 視覚情報処理ハンドブック (朝倉書店, 2000).
- 33) J. J. Gibson: *The Ecological Approach to Visual Perception* (Houghton Mifflin, Boston, 1979).

(2002年7月15日受理)