

空間知覚の適応的側面

金子 寛彦

Adaptability of Space Perception

Hirohiko KANEKO

The characteristics of human space perception change temporally adapting to visual environments. The adaptation effects in space perception are classified into some categories, such as development, experience, learning, aging, depending on the time span and the stage in life. In this article, I describe the aspects of temporal changes in space perception of adults showing recent psychophysical data and discuss the significances of the functions.

Key words: space perception, adaptation, perceptual learning, depth cues, individual differences

われわれは視覚情報から得られるさまざまな手がかりをもとに、外界の空間構造を認識する。その手がかりとは、陰影や投射影、遠近法的成分、テクスチャー勾配、エッジ形状といった二次元画像中に含まれるいわゆる絵画の手がかり (pictorial cues), 対象の運動成分に基づく運動手がかり (motion cues), 左右眼像のわずかな差異に基づく両眼網膜像差 (binocular disparity) などである。これら網膜像から得られる手がかりに加えて、網膜像以外から得られる、輻輳や調節といった眼球運動に起因する動眼的手がかり (oculomotor cues) や人間を取り巻く環境において幾何学的あるいは確率的に妥当な拘束条件や知識、前庭系や聴覚からの手がかりも空間構造の認識に寄与すると考えられる。

それぞれの手がかりとそれによって生起される空間知覚との関係に関しては、これまでに多くの研究によって調べられ、さまざまな性質の詳細が明らかにされてきた¹⁾。しかし、これまでの研究の多くは、手がかりと空間知覚の関係についての、いわば時間的な定点観測に基づいてその機能と機構を推定するものであり、その関係の時間的変化に着目した研究は、その重要性を考えると比較的少ないといわざるをえない。また、われわれの空間知覚に関する機能や機構が、なぜそのようなものであるのか、すなわちその

必要性や意義に関する考察も十分であるとはいえない。

本稿では、成人の空間知覚における個人差やその経験による変化に関する最近の心理物理的知見から、空間知覚の比較的長期的な時間的変化の性質を探るとともに、それらの性質の意味するところを「視環境への適応」という観点から考察する。本特集全体としても、空間知覚の時間的変化と適応が主題であり、幼児の空間知覚における発達や、逆さ眼鏡を用いた実験による知覚の可塑性などに関する詳しい議論は他稿を参照していただきたい。

1. 奥行き手がかりの統合過程

空間知覚の時間的な変化の特性は、最終的な空間知覚における各手がかりの寄与度の変化から探ることができる。それを示すため、ここではまず手がかりの統合の方略と、その中での各手がかりの寄与度に関する基礎的な事項について説明する。

最終的な空間知覚のために、先に述べた多くの手がかりがいろいろな形で統合される。この手がかり統合の性質は、われわれの通常の奥行き知覚を知るうえで重要な問題である。また、感覚情報の統合は、空間知覚のみならずあらゆる知覚過程、例えば運動知覚や色覚、また視覚以外でも音声認識や自己運動感覚などにおいてもみられ、知覚系

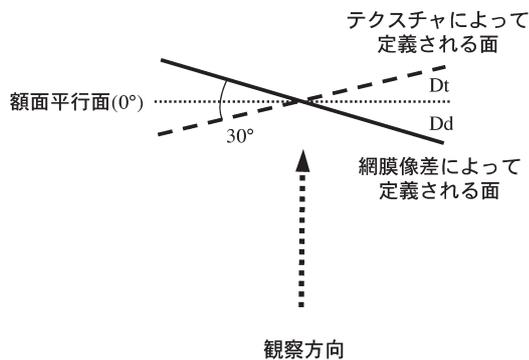


図1 面の傾きに関する2つの手がかり間の重みを測定する実験の原理図。詳細は本文参照。

全体を理解するうえでも本質的で重要な問題である。

手がかりの統合にはいくつかの形がみられるが、ここでは連続的で同質な情報をもつ手がかりが統合される際によくみられる、平均統合 (averaging) とそのときの各手がかりの寄与度 (重み) に関して述べる。

平均統合において、最終的な奥行き知覚量と各手がかりの示す奥行き量の関係は、一般的に以下のような式で示される。

$$D = w_1 D_1 + w_2 D_2 + w_3 D_3 + \dots + w_n D_n \quad (\sum w_i = 1) \quad (1)$$

ここで、 D は知覚される奥行き量、 D_n は各手がかりの示す奥行き量、 w_n は各手がかりの重みである²⁾。ただし、 D および D_n は、奥行き量の代わりに、例えば面の傾き量など、空間における他の変量に置き換えてもかまわない。このような各手がかりからの情報の線形加算処理を用いた場合、適当な重みを選べば、最終的な奥行きの信頼性 (推定精度) はそれぞれの手がかり単独の情報による奥行きの信頼性よりも理論的に高まる¹⁾。実験によって実際に重みを測定する方法はいくつか提案されているが、2つの手がかりによる面の傾き知覚の場合は、手がかりそれぞれが示す傾きの差を一定 (例えば 30° 程度のあまり大きくない角度) に保ったまま、知覚される1枚の面の傾きを額面平行になるよう調整する手法が用いられることが多い (図1)。この場合、最終的な面の傾き (0°) とそのときのそれぞれの手がかりによる傾き (D_t , D_d)、重みの拘束条件 ($w_t + w_d = 1$) より、それぞれの重みを求めることができる。

Young らは、テクスチャー勾配と運動情報によって表現された円筒形刺激を用い、それぞれの示す奥行きを独立に操作して円筒の半径を基準とした奥行き量を測定する実験を行った³⁾。この実験により、最終的な奥行き知覚は式 (1) に示されるように、それぞれの手がかりからの情報の重み付き平均となることを示した。さらに、どちらかの

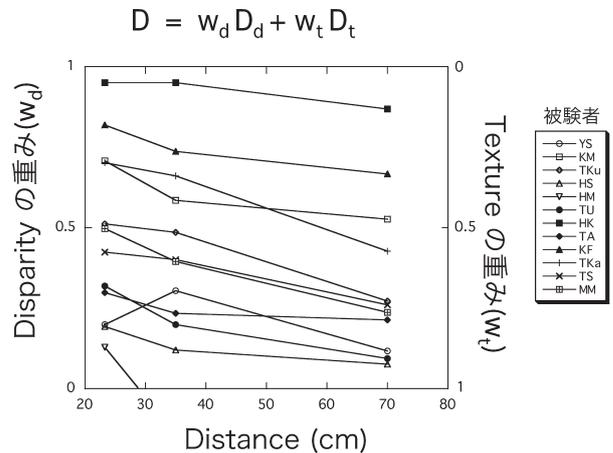


図2 各個人の空間知覚手がかり統合における、両眼網膜像差に対する重み (w_d) とテクスチャーに対する重み (w_t)。坂野ら⁵⁾ の Fig. 7 を改変。

手がかりに画像的ノイズを加えた場合、その手がかりの重みが減少することも示している。また、テクスチャーと水平網膜像差手がかりの統合の場合にも、同じように平均統合によって奥行き知覚が決まることが示されており、この場合は視距離が近くなるほど網膜像差に対する重みが大きくなることも報告されている^{4,5)}。これらの結果は、刺激の手がかりが平均統合される場合、各手がかりの寄与度 (重み) はその刺激における手がかりの信頼性に依存することを示唆している。

以下では、上に述べた各手がかりの重みの変化として表れる、空間知覚の比較的長期的な時間的変化の性質に関して述べる。

1.1 手がかり寄与度の個人差

手がかりの統合過程における各手がかりの重みには、大きな個人差があることが知られている⁴⁻⁸⁾。例えば、テクスチャー勾配と水平網膜像差の統合による面の傾き知覚を調べた坂野らによるデータ (図2) からは、一方の手がかりの重みは、12名の被験者間で0~1の間にほぼ均等に分布することが見て取れる⁵⁾。また、Sato と Howard は、同様な刺激に対する6名の被験者のデータから、テクスチャー型と網膜像差型の2種類の被験者に分けられるとしている⁹⁾。ここで、これらの研究での個人差の主要原因は、それぞれの手がかりに対する検出能力の違いによるものではないことを述べておきたい。水平網膜像差を検出する能力にも個人差があり、人口に対してその5%前後が、両眼網膜像差を奥行き知覚のために用いることが全くできないといわれる⁹⁾。このような状態は、立体盲 (stereo blind) あるいは立体障害 (stereo anomaly) とよばれる。しかし、先に紹介した研究⁴⁻⁸⁾ における被験者には、それぞれの手

がかりに対する検出能力があることは確かめられていることから、統合過程における重みに個人差があるといえる。

坂野らは、手がかり統合過程における重み付けの個人差の原因を探るため、各被験者の個人的な指標（調節遠点、両眼間距離、読書中の視距離）と手がかりの重みの相関関係を調べた。その結果、調節遠点および読書中の視距離と手がかりの重みの間に、弱いながらも相関関係があることを見いだした⁹⁾。調節遠点が近いほど、また読書中の視距離が近いほど、網膜像差手がかりの重みが大きいという対応である。読書中の視距離が短い、すなわち対象を近距離で観察することが習慣となっている人ほど網膜像差手がかりの重みが大きいのは、冒頭で述べた被験者内での視距離と網膜像差の重みの関係と一致しており、理にかなっているといえるだろう。また、調節遠点が近くなること（近視になる）が対象を近距離で観察する習慣によると考えると、やはり理にかなっている。実際に、近視になるための原因のひとつとして、対象の近距離観察の継続が挙げられている¹⁰⁾。親が子供に向かって、「近くで見ると目が悪くなるから、テレビを見るときは離れなさい」というのは、ほぼ常識のように一般的に浸透している。すなわち、対象を近距離で観察する習慣が、調節遠点を近づけ、また同時に両眼網膜像差手がかりの重みが高い状態の時間を増すことにより通常の重みも増加させるため、これらの間に相関がみられるという解釈が可能である。

上の例とは逆に、対象を遠距離で観察するという経験が、網膜像差の重みを減少させるという解釈が可能な実験データも報告されている。鶴原らは、CGによるステレオ画像を用いて、運転席から対向車までの距離の判断（理論的距離が約150mまで）における運転熟練度による影響を調べた。その結果、運転熟練者（週に一度以上は車を運転する者）は非熟練者（運転免許非取得者もしくは免許取得以来ほとんど運転機会がないペーパードライバー）と比較して、対向車までの距離応答が正確であることを示した¹¹⁾。具体的にいうと、運転熟練者の結果において、知覚距離と理論距離の関係を直線で近似した場合、その傾きの平均は1に近い値となったのに対し、非熟練者の場合の近似直線の傾きは0.5~0.6程度であった。さらに、運転熟練者の距離応答においては、対向車の大きさ（トラック、乗用車、バイク）の違いによってわずかであるが統計的に有意な影響がみられるが、非熟練者の場合には大きさの影響がみられないことも示した。ここでの大きさの影響とは、同じ理論距離に刺激が呈示された場合、小さい対象（バイク）を大きい対象（トラック）より遠くに応答するという傾向である。これらの結果から、対向車など視距離

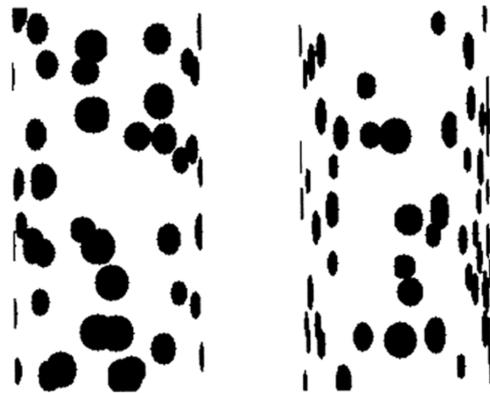


図3 長円型の半円筒を模擬したテクスチャーの例。左の円筒は奥行きと横幅が理論的に等しい。右の円筒では奥行きが横幅に対して理論的に3倍である。JacobsとFine¹²⁾のFig. 1から引用。

が遠い対象を観察する経験が豊富な運転熟練者では、距離応答における大きさ手がかりに対する寄与が大きい、すなわち遠距離において相対的に信頼性の高い大きさ手がかりに対する重みが増加するという解釈が可能である。大きさ手がかりの重みが増加することで、基本的には遠距離の対象の距離を正しく知覚できるようになるが、その副作用として、同じ距離にあるより小さい対象を若干遠く知覚してしまうということである。

以上の結果から、空間知覚手がかりの統合過程における各手がかりの寄与度（重み）には大きな個人差がみられることが明らかであり、その原因のひとつとして、各個人の視空間環境に各個人の空間知覚が適応するという可能性が示唆される。

1.2 経験による手がかり寄与度の変化

空間知覚手がかりの統合過程における各手がかりの重みは、実験室的に設定したいろいろな知覚経験の前後で変化することが示されている¹²⁻¹⁴⁾。それらの研究において設定された経験プロセスにおいては、各手がかりの空間情報としての信頼性が、通常の視覚環境と異なるように制御される。

JacobsとFineは、テクスチャーと運動によって定義される円筒型の刺激を用い（図3）、それらの手がかりを独立に変化させて、奥行きと横長の弁別実験を行った。そのひとつの条件では、テクスチャー手がかりによる奥行きが常に一定になるように、またもう一方の条件では、運動手がかりによる奥行きが常に一定になるよう制御した。そして、その弁別実験の前後で、空間知覚におけるそれら手がかりの相対的な重みを測定した。その結果、弁別実験中に変化した手がかりに対する相対的な重みが実験後に増加した¹²⁾。坂野らは、水平網膜像差もしくはテクスチャー手がかりの

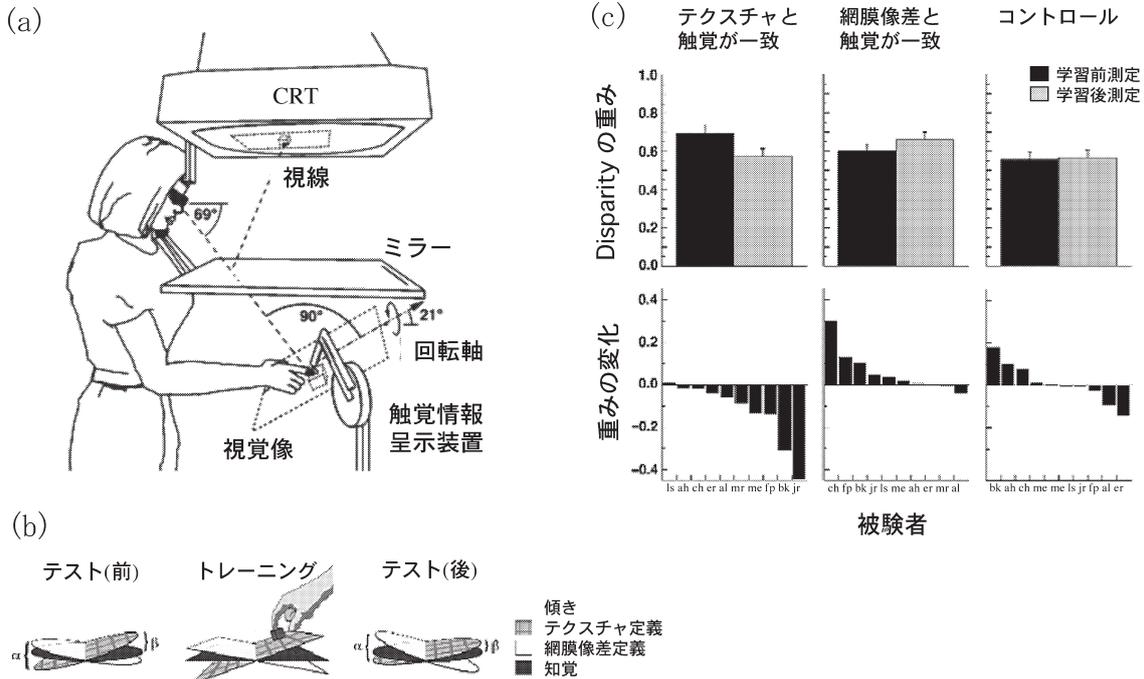


図4 奥行き手がかりと触覚情報の一致による手がかりの重みへの影響を調べた実験の (a) 装置図, (b) 実験原理図と (c) 結果. (a) 視覚刺激と触覚刺激はそれぞれCRTと触覚情報呈示デバイスにより空間的に同じ位置に呈示される. (b) この図では, トレーニングにおいて視覚情報の中のテクスチャー情報のみが触覚情報が一致した条件を示している. (c) トレーニングにおいて, テクスチャーと触覚が一致した場合は網膜像差の重みが減少し, 網膜像差と触覚が一致した場合は網膜像差の重みが増加する. 上段は被験者間の平均, 下段は各被験者の重みの変化量を示している. Ernstら¹⁵⁾のFigs. 2, 3, 4を改変.

みによって定義される平面刺激に対して面の傾きを応答する課題を行い, その前後で, 両方の手がかりによって定義される平面の傾き知覚における, それら手がかりの重みを測定した. そしてこの一連の実験を1日に1回, 7日間にわたって繰り返した. その結果, 実験を始めて3~4日後に課題で用いられる手がかりの重みが増加しはじめ, 以後もその重みの増加が続く傾向がみられた¹³⁾. これらの研究の結果は, 課題に対して有効な, すなわち信頼性の高い空間知覚手がかりの寄与度 (重み) が増加していくことを示している.

奥行き知覚のための視覚の手がかりの重みの変化は, ある手がかりと触覚情報を一致させる学習によっても起こることが報告されている^{15,16)}. Ernstらは, 水平網膜像差とテクスチャー手がかりによって定義される面の傾きが矛盾している視覚刺激と, どちらか一方の視覚手がかりによる面の傾きと一致する触覚刺激を同時に呈示した. 被験者はその視覚刺激を眼で観察しながら, 触覚フィードバック装置を用いて呈示された触覚刺激から知覚される面を指でなぞる課題を行った (図4 (a), (b)). そして, その課題の前後で視覚手がかりの重みを測定した. その結果, 触覚情報と一致した手がかりの重みが増加することが明らかにな

った (図4 (c))¹⁵⁾. このことから, 触覚情報と一致することは, 視覚手がかりの信頼性を増すことになると推測される. また, Atkinsらは, テクスチャー手がかりと動きの分布手がかりによって定義された円筒型を用いて, 上の研究と同様に触覚情報と一致する手がかりの重みが増加することを示し, さらに刺激のコンテキスト (ここでは色) ごとに異なる2組みの手がかりの重みを割り付ける学習が可能であることも示した¹⁶⁾.

以上の結果から, 空間知覚手がかりの統合過程におけるある手がかりの寄与度 (重み) は, その手がかりの空間情報としての信頼性が高い状態を経験することによって, 増加することが明らかである. これは, われわれの成人における空間知覚が, 手がかりの重みの調整をすることによって, 数時間から数日のタイムスパンで環境に適応していくことを示している.

2. 奥行き手がかりと知覚の対応

空間知覚の長期的な時間変化と環境適応の特性は, 1章2節で述べた手がかりの重みの変化のみならず, 各手がかりと空間知覚との直接的な関係の変化からも探ることができる. ここでは, 手がかりと知覚の対応関係自体が変化する

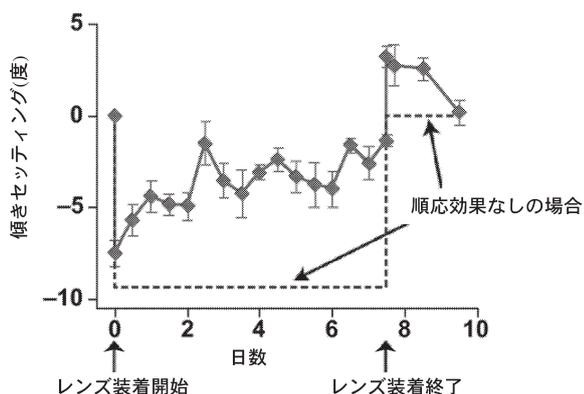


図5 水平方向に像を拡大するレンズを片眼に装着した場合に、額面平行面に知覚される網膜像差定義面の傾き角度の推移。詳細は本文参照。Adamsら¹⁷⁾のFig. 2を改変。

ることを示す例を紹介し、その意味を考える。

2.1 手がかり-知覚間対応の校正

矛盾する空間知覚手がかりによって定義された刺激を観察する経験により、手がかりの統合における重みの変化ではなく、各手がかりと空間知覚の関係性が校正される事例が報告されている¹⁷⁻¹⁹⁾。

Adamsらは、視対象を水平方向に一樣に3.8%拡大するレンズを被験者の片眼に装着し、水平網膜像差と垂直軸周りの面の傾き量の関係が通常とは異なる状態にした。そして、そのレンズを装着したまま数日間生活させ、テクスチャー手がかり単独、網膜像差手がかり単独、およびそれら両者の手がかりによって定義される面の傾き知覚を測定する実験を行った¹⁷⁾。その結果、レンズを装着した当初感じられる違和感はしばらくすると消えるが、それは水平網膜像差の重みが減少したためではなく、網膜像差と傾きの関係の再校正が起こったためであることが明らかになった。図5に示されるように、レンズ装着当初は、網膜像差によって定義される刺激が額面平行に知覚されるために、レンズによって導入される網膜像差をほぼ100%打ち消すように刺激の傾き(網膜像差)を調整する必要があった。しかしその後、その調整のための傾き量が徐々に減少し、7日後にはほぼゼロ、すなわちレンズを装着した状態において額面平行となる刺激をそのまま額面平行に知覚するようになった。この実験のような状況では、ある網膜像差量に対応する面の傾き量は通常時と異なるが、新しい環境の中ではそれらの量の関係性は一貫しているため、網膜像差が傾きの情報にならないというわけではない。このため、再校正が起こるといふ結果は理にかなったものであるといえるだろう。新しい眼鏡やコンタクトレンズをかけはじめた当初は違和感があるが、すぐに慣れて気にならなくなる

ことは、多くの人が経験的に知っている。この場合も、上の実験と同様に手がかりの再校正が起こっていると考えられる。

奥行き手がかりの再校正は、視覚情報と触覚情報が通常とは異なる関係になる場合にも起こることが報告されている^{18,19)}。花野らは、垂直軸周りの回転角度に応じて映像が変化するディスプレイを用いて、実際より大きな回転角度に対応するようなテクスチャー勾配が生じるよう、ディスプレイ上に画像を呈示した(図6)。ここで被験者は、ディスプレイを直接手で回転しながら刺激を観察した。そして、この観察の前後で、額面平行に固定されたディスプレイ上に呈示されるテクスチャー勾配から知覚される面の傾き角度を測定しその変化を調べた¹⁸⁾。この実験の結果、あるテクスチャー勾配から知覚される面の傾き量は、上の刺激の観察の後に減少した。この結果は、テクスチャー勾配と面の傾き量の関係が再校正されたことによると解釈できる。また、Atkinsらは、ステレオスコープと触覚フィードバック装置を組み合わせることによって、水平網膜像差と触覚情報それぞれによる奥行き量を矛盾させた2枚の面を呈示し、奥行き知覚の変化を調べた¹⁹⁾。その結果、網膜像差による奥行き知覚量が通常の状態から変化する、すなわち触覚情報を基準として網膜像差情報と奥行き量の関係が再校正されることを示した。

奥行き手がかりと知覚との関係における再校正は、それらの量的な対応だけでなく、手がかりが空間知覚を生じさせるための条件の範囲においても起こることが報告されている。図7に示す円図形のように、明るさが鉛直方向に徐々に変わる画像を観察すると、その変化が上から下に徐々に暗くなる場合は凸に、その逆に上から下に徐々に明るくなる場合は凹に知覚される。これは、光源が視野の上方に存在するという仮定(光源上方仮定)により明るさのグラデーションを解釈し、奥行き手がかりとしているためである。Adamsらは、この陰影手がかりにおける光源上方仮定が経験によって変化するのかを調べた²⁰⁾。彼女らはまず、図7と同様の刺激を用い、画像の明るさ変化の方向を変数として凸(凹)と知覚される確率を求め、各被験者が仮定として持っている光源方向を正確に測定した。次に、光源が右もしくは左30°にあるとして、明るさグラデーションの方向と触覚フィードバック装置による触覚情報を対応させ、被験者に凸凹の知覚判断を課した。その後、再び明るさグラデーションの解釈のための光源方向を測定した。その結果、学習課題の前後で、仮定される光源方向が10~15°程度変化することが明らかになった。変化の方向は、学習課題中における陰影方向と触覚情報の対応から

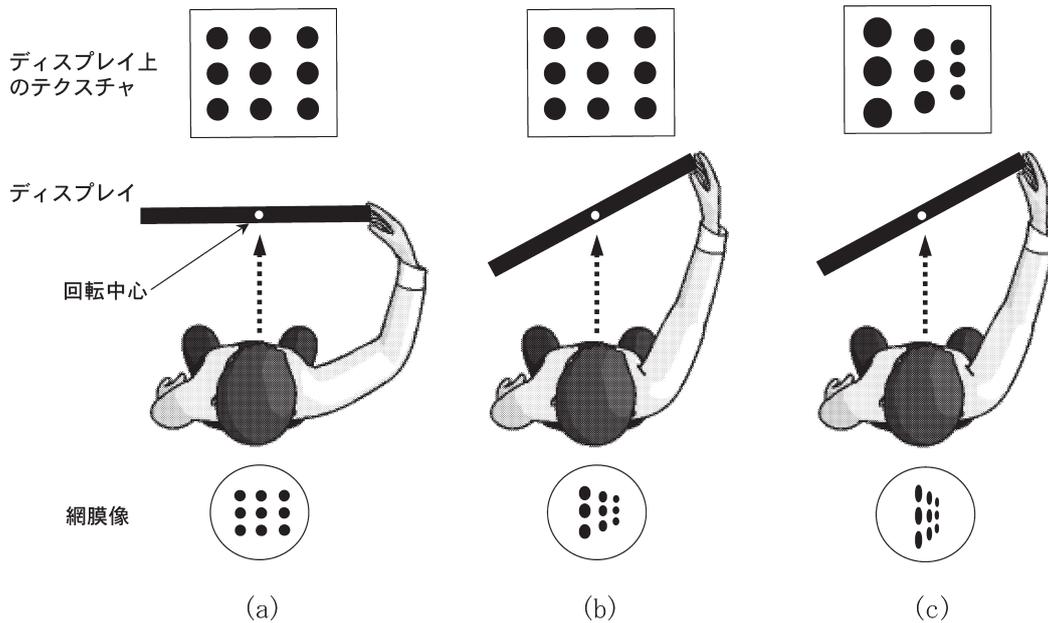


図6 花野らの研究¹⁸⁾の実験原理図。(a) 被験者に対して額面平行のディスプレイ面上の等方的テクスチャー分布およびその刺激によって生じる網膜像。(b) (a)のディスプレイをそのまま垂直軸周りに傾けた場合の網膜像。(c) (b)の回転位置で、ディスプレイ面上のテクスチャー分布が変化したときの網膜像。ここでは、実際のディスプレイの傾きより大きな傾きをもった面を観察した場合の網膜像が生じている。

予測される方向であった。ちなみに、ニワトリの場合は、経験によって仮定される光源方向は変化しないことが報告されている²¹⁾。

以上の結果から、ある手がかりとその手がかりから知覚される空間知覚の間の関係は、量的および質的に再校正されることが明らかである。再校正が起こるためには、もちろん他の手がかりが必要であり、その信頼性が、少なくとも再校正が起こる手がかりの信頼性よりも高いことが必要であろう。触覚と視覚というように異なるモダリティーによって情報が得られる場合、どちらの情報が必ず優位であり基準となるといった議論がなされる場合もあるが、モダリティーによってではなく情報の信頼性によって決まると考えるほうが妥当であるように思われる。このような知覚情報の再校正が起こることを端的に示す例が、逆さ眼鏡による知覚/行動の変化である（本特集の解説「立体視の可塑性」参照）。

2.2 新しい手がかりの獲得

もともと空間知覚手がかりではなく、幾何学的、理論的にも空間知覚手がかりになりえない刺激要素が、空間知覚と関連づけられる経験により、新しい奥行き手がかりとして働くようになる例が近年報告されている²²⁻²⁵⁾。

Haijiangらは、知覚される奥行きが曖昧であるワイヤーフレームで描かれたネッカーキューブ図形を鉛直軸の周りに回転させた刺激（図8）を用い、図形とは本来全く関

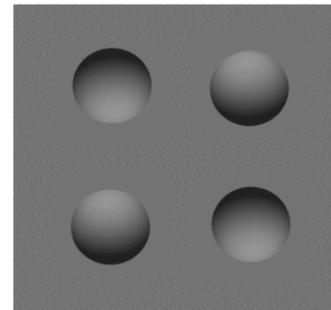


図7 陰影をもつ画像。上方から下方に向かって徐々に暗くなる場合は凸に、その逆の場合は凹に知覚される。

係のない情報が学習により図形の奥行きを確定するために用いられるようになるかどうかを検討した²²⁾。学習期間においては、その図形が呈示される画面上の位置（上または下位置）、運動する方向（上または下方向）あるいは同時に呈示される音刺激のピッチ（高または低音程）を、水平網膜像差と遮蔽手がかりが付加されることにより明確になったネッカーキューブの奥行きと対応させた。その学習の後に、網膜像差と遮蔽手がかりのない二次元画像のネッカーキューブを観察すると、音刺激の高低はその奥行き知覚に影響しなかったが、学習時の呈示位置と運動方向に依存して奥行き知覚が定まるようになった。この結果は、奥行き知覚のための新しい奥行き手がかりが獲得可能であることを示唆している^{22,23)}。

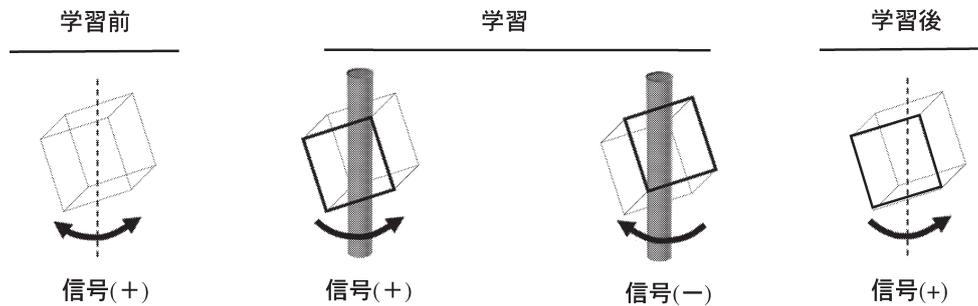


図8 空間知覚と関連づける学習により、新しい奥行き手がかりを獲得可能であることを示した実験の概要図。学習前は、画面上の位置、運動する方向、音刺激のピッチといった信号と、刺激として用いられたネッカーキューブの奥行きとは関連がない。学習中は、それらの信号と網膜像差と遮蔽手がかりにより明確になったネッカーキューブの奥行きとの間に一定の対応関係があった。学習後は、明確な奥行きを示す手がかりがなくなっても、画面上の位置と運動する方向の信号により、ネッカーキューブの奥行きが定まるようになった。詳細は本文参照。Haijiang ら²²⁾の Fig. 1 を改変。

学習によって新しい手がかりが奥行き知覚に寄与するようになることを示唆するデータは、ほかにもいくつか報告されている。Scilipoti らは、特定のワイヤフレームの形状と特定の奥行きを対応させる学習により、そのワイヤフレームの二次元的な形状から対応させた奥行きが生じる可能性があることを示した²⁴⁾。上村と金子は、ランダムドットからなる二次元的刺激の回転方向（時計回りもしくは反時計回り）とその刺激の被験者から見た奥行き運動の方向を対応させる学習により、二次元的な回転を観察しただけで、学習期間中にその回転方向と対応していた奥行き運動が知覚されるようになる被験者がいることを報告している²⁵⁾。

以上の結果から、本来空間形状とは全く関係のない刺激要素と、他の視覚もしくは触覚による明確な空間知覚（情報）を人工的に対応させることにより、空間形状と関係のなかった刺激要素が、奥行き知覚に寄与するようになる可能性があるといえる。これは、われわれの空間知覚機構が、成人においてもかなりの柔軟性をもち、環境に適応できることを示している。ただし、上に紹介した研究^{22,25)}で示されているように、どんな情報でも新しい空間知覚手がかりとして働くようになるわけではない。空間知覚手がかりとなりうるためには何かしらの条件があると考えられるが、その条件は現段階では明らかではない。

2.3 手がかりと視環境

奥行き手がかりとして広く知られる画像要素が奥行き知覚を生み出すのは、空間と網膜像の幾何学関係から考えて妥当なことである。さらに、それら手がかりと奥行き知覚の関係は、幾何学的のみならず、人間にとっての視空間に適応したものであるといえる。例えば、先に述べた陰影を解釈する際に用いられる光源上方仮定は、われわれの視環境において、太陽や蛍光灯といった光源が通常は視野の上

方に存在することと対応している。また、視野の上下に同じ大きさと形状をもった図形対象が呈示される場合、上方の対象が下方のものに比べて遠距離に知覚される傾向があり、位置の手がかりといわれる²⁶⁾。これも、地平面に対して垂直に立ち、前方数メートル先を見るときに視線方向で外界を観察する通常の状態での、視野内の上下位置と距離の関係と対応している（図9）。また、左右網膜の両眼対応点は、網膜の垂直線に沿って左右逆方向に傾いた線上に配置されており、その点に像をつくる外界空間中の位置（経験的ホロプター）は、視線に対して上方が遠方に傾いた線上、すなわちわれわれにとって必要性の高い情報がある地表面に近い（図9）²⁷⁾。

上の例のみならず、一般的にわれわれの空間知覚がわれわれの視空間に適応した性質をもっていることはおそらく確かであり、広く認識されていることであろう。しかし、その適応がどのようにしてなされたかという点を明らかにするためには、適応変化の時間的スパンが長いと直接的に調べるのはきわめて難しい。しかし、個体内での空間知覚の発達（本特集の解説「空間視の発達」参照）や進化論的な考察、視環境と視空間知覚の統計論的な解析²⁸⁾などによって、間接的な推論からアプローチできると思われる。

人間の空間知覚は経験によって変化する。そして、その変化は、各手がかりの統合過程における重み付けに、また、手がかりと知覚との量的および質的な対応関係に表出する。さらに、全く新しい手がかりと知覚との対応関係が創出される可能性もある。そして、経験の違いが空間知覚における個人差の原因のひとつになっていることも推測される。空間知覚のこのような視覚経験による変化、すなわち「視覚環境へ適応」する性質は、われわれ人間がさまざま

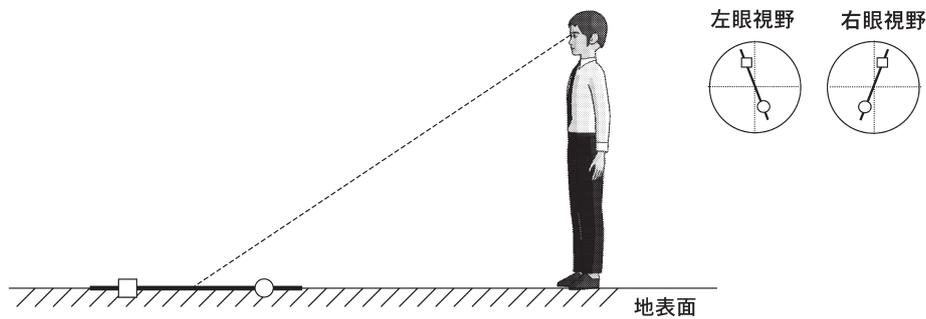


図9 観察者から見た、地表面上にある対象までの距離と視野内（網膜上）の位置との関係。観察者から遠い対象（□）の像は、視野内の上方に投影される。また、地表面上の対象が左右眼に投影する像の位置は、視軸を中心として互いに反対方向に傾いた線上である。詳細な説明は本文を参照。

まな環境で生きていくうえで合理的なものであり、そもそも生物が環境に適応しながら進化してきたことを考えると、当然だといえるであろう。

ただし、現段階では空間知覚の適応的変化の詳細が明らかであるとはいえず、今後以下のような問題の解明が望まれる。

- 視覚系が手がかりに重み付けする際に、どのようにして手がかりの信頼性を知るのか。
- 複数の手がかりに矛盾があり、その中のある手がかりと知覚の再校正が起こるとき、どのような手がかりが基準となるのか。
- 空間知覚の適応において、文脈依存性と一般性という相反する性質がみられるが、その境界はどのように決まるのか。
- 新しい空間手がかりを獲得できるのは、どのような条件がそろったときか。
- 空間知覚の適応的変化におけるタイムスパンはどのくらいの長さか。数秒から数分か、数時間から数日なのか、数年から数十年に及ぶのか、さらに世代を超えた進化的なものなのか。

空間知覚の環境適応の性質を明らかにすることは、視覚情報処理機構の解明のために非常に重要であるが、実用的にも大きな意義がある。近年、VRシステムや各種シミュレーター、遠隔操作など実空間から情報を抽出して視覚空間を再現するシステムが一般化し、その中で人間が知覚や行動をする機会が増えている。また、近い将来、宇宙飛行士のような特別の訓練を積まない一般の人々が宇宙空間で生活する可能性もある。宇宙空間で得られる感覚情報は、地球上で生活するとき得られる情報と大きく異なるのはいうまでもない。このような通常と異なる環境において人間の知覚や行動を適切なものにするためには、人間の知覚機構における環境適応の性質を理解し、それに応じた対策

を講じるが必要不可欠である。

いずれにしても、多種多様で複雑にみえる人間の知覚を統一的に理解し、人間に十分に適合した工学的システムを構築するためには、時間的な定点での観測ではなく、時間軸に沿った観測による、知覚の時間的（適応的）変化の性質とそのための機構の理解が必要であるように思われる。

文 献

- 1) I. P. Howard and B. J. Rogers: *Seeing in Depth*, Vol. 2 (I. Porteous, Toronto, 2002) pp. 469-493.
- 2) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. Young: "Measurement and modeling of depth cue combination: In defence of weak fusion," *Vision Res.*, **35** (1995) 389-412.
- 3) M. J. Young, M. S. Landy and L. T. Maloney: "A perturbation analysis of depth perception from combinations of texture and motion cues," *Vision Res.*, **33** (1993) 2685-2696.
- 4) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: "Integration of depth modules: Stereopsis and texture," *Vision Res.*, **33** (1993) 813-826.
- 5) 坂野雄一, 金子寛彦, 松宮一道: "両眼視差と遠近法情報の統合過程における視距離と過去の経験の影響", *光学*, **33** (2004) 110-121.
- 6) M. Sato and I. P. Howard: "Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast," *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.
- 7) D. Regan and K. I. Beverley: "Binocular and monocular stimuli for motion in depth: Changing-disparity and changing-size feed the same motion-in-depth stage," *Vision Res.*, **19** (1979) 1331-1342.
- 8) E. Brenner, A. V. van den Berg and W. J. van Damme: "Perceived motion in depth," *Vision Res.*, **36** (1996) 699-706.
- 9) W. Richards: "Stereopsis and stereoblindness," *Exp. Brain Res.*, **10** (1970) 380-388.
- 10) S. M. Ebenholtz: "Accommodative hysteresis: A precursor for induced myopia?" *Invest. Ophthalmol. Vis. Sci.*, **24** (1983) 513-515.
- 11) 鶴原亜紀, 金子寛彦, 鈴木雅洋: "対向車までの距離推定における運転経験の影響", *Vision*, **19** (2007) 55.
- 12) R. A. Jacobs and I. Fine: "Experience-dependent integration of texture and motion cues to depth," *Vision Res.*, **39** (1999) 4062-4075.

- 13) 坂野雄一, 金子寛彦, 松宮一道: “偏った奥行き手がかり環境下での学習が面の傾き知覚のための両眼視差と遠近法情報の統合過程に与える影響”, *光学*, **33** (2004) 490-502.
- 14) R. S. Harwerth, M. C. Moeller and J. M. Wensveen: “Effects of cue context on the perception of depth from combined disparity and perspective cues,” *Optom. Vis. Sci.*, **75** (1998) 433-444.
- 15) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bühlhoff: “Touch can change visual slant perception,” *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
- 16) J. E. Atkins, J. Fiser and R. J. Jacobs: “Experience-dependent visual cue integration based on consistencies between visual and haptic percepts,” *Vision Res.*, **41** (2001) 449-461.
- 17) W. J. Adams, M. S. Banks and R. van Ee: “Adaptation to three-dimensional distortions in human vision,” *Nat. Neurosci.*, **4** (2001) 1063-1064.
- 18) 花野秀行, 金子寛彦, 鈴木雅洋: “テクスチャによる傾き知覚における能動的動作による学習の影響”, *Vision*, **17** (2005) 92.
- 19) J. E. Atkins, R. J. Jacobs and D. C. Knill: “Experience-dependent visual cue recalibration based on discrepancies between visual and haptic percepts,” *Vision Res.*, **43** (2003) 2603-2613.
- 20) W. J. Adams, E. W. Graf and M. O. Ernst: “Experience can change the ‘light-from-above’ prior,” *Nat. Neurosci.*, **7** (2004) 1057-1058.
- 21) W. Hershberger: “Attached-shadow orientation perceived as depth by chickens reared in an environment illuminated from below,” *J. Comp. Physiol. Psychol.*, **73** (1970) 407-411.
- 22) Q. Haijiang, J. A. Saunders, R. W. Stone and B. T. Backus: “Demonstration of cue recruitment: Change in visual appearance by means of Pavlovian conditioning,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **103** (2006) 483-488.
- 23) B. T. Backus and Q. Haijiang: “Competition between newly recruited and pre-existing visual cues during the construction of visual appearance,” *Vision Res.*, **47** (2007) 919-924.
- 24) E. Scilipoti, F. Domini and C. Caudek: “Learning a new cue to depth,” *J. Vision*, **6** (2006) 342.
- 25) 上村理絵, 金子寛彦: “動作を伴う学習による連続的奥行き手がかり獲得の可能性の検討”, *Optics & Photonics Japan 2006 講演予稿集* (2006) pp. 82-83.
- 26) C. O. Roelofs and W. P. C. Zeeman: “Apparent size and distance in binocular and monocular vision,” *Ophthalmologica*, **133** (1957) 188-204.
- 27) K. Nakayama: “Geometrical and physiological aspects of depth perception,” *Proc. SPIE*, **120** (1977) 2-9.
- 28) Z. Yand and D. Purves: “A statistical explanation of visual space,” *Nat. Neurosci.*, **6** (2003) 632-640.

(2007年4月20日受理)