

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

坂野 雄一^{*,**}・金子 寛彦^{*}・松宮 一道^{*,***}

* 東京工業大学像情報工学研究施設 〒226-8503 横浜市緑区長津田町 4259-R2-60

** 現在: Dept. of Computer Science and Engineering, York University 4700 Keele St., Toronto, Ontario M3J 1P3, Canada

*** 現在: ATR 人間情報科学研究所 〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台 2-2-2

Effects of Learning under the Biased Depth Cue Circumstances on the Integration Process of Binocular Disparity and Perspective for the Perception of Surface Slant

Yuichi SAKANO^{*,**}, Hirohiko KANEKO^{*} and Kazumichi MATSUMIYA^{*,***}

* Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology, 4259-R2-60 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

** Present address: Dept. of Computer Science and Engineering, York University, 4700 Keele St., Toronto, Ontario M3J 1P3, Canada

*** Present address: ATR Human Information Science Laboratories, 2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288

The human visual system is assumed to integrate different cues for depth perception. Although the weighted linear combination rule can account for many properties of the cue integration process, how the weight of each cue is determined is not clearly known yet. We measured the relative weights of perspective (density gradient and trapezoidal distortion of outline) and disparity for perceiving slant of a random-dot pattern before and after the learning phase in which one of the cues was effective. The results showed that the weight of perspective increased gradually in 7 days of perspective learning period while it tended to decrease after each perspective learning phase in each day. These results suggest that the depth cue weight is affected positively by the dominant use of the cue in the long term, and could imply that the weight is affected temporarily and negatively by that in the short term.

Key words: depth cue integration, binocular disparity, perspective, slant perception, perceptual learning

1. はじめに

人間は、奥行きを知覚する際にさまざまな手がかりを利用している。例えば、前額平行面上にある長方形の平面を、垂直軸のまわりに右端が奥、左端が手前になるように傾けて、それを両眼で観察する場合を考える。この場合、右眼の網膜像の横幅は左眼の網膜像の横幅よりも大きくなる。このような両眼網膜像の差異（両眼視差）は、奥行き手がかりのひとつである。次に、同じ対象の片眼の網膜像に着目すると、観察者から遠い平面の右側ほどその網膜像は小さくなり、左側ほどその網膜像が大きくなる。このよ

うな単眼性の絵画的な情報は、遠近法情報と呼ばれる奥行き手がかりのひとつである。

それらさまざまな奥行き手がかりによる情報は脳内で統合され、最終的な1つの奥行きが知覚されていると考えられている¹⁻⁷⁾。この奥行き手がかり統合過程のメカニズムに関しては、これまでいくつかのモデルが提案されているが^{7,8)}、その中のひとつである重みづけ線形結合モデルが多くの現象を説明できるといわれている⁷⁾。そのモデルは以下の式で表される：

$$S = w_A S_A + w_B S_B + w_C S_C + \dots \quad (1)$$

(ただし、 $\sum w_i = 1$)

ここで、 S_A , S_B , S_C は各手がかりから推定される奥行き

E-mail: yuichi@cs.yorku.ca

量, w_A , w_B , w_C はそれらの重み, S は最終的に知覚される奥行き量である. このモデルによると, まず網膜像からさまざまな手がかりが抽出され, それらから独立に奥行きが推定される. 次に, それら個々の奥行きに対して重みをつけて平均することにより, 最終的に奥行きが知覚される.

このモデルにおいて, 各手がかりの重みがどのようなルールに従って決定されるかは, 最終的な知覚に影響を与える重要な問題である. このモデルの提案者たちは, ある手がかりの重みは, 他の手がかりに対するその手がかりの相対的な信頼性に依存して決定されるとしている^{7,9)}. 奥行き手がかりの信頼性とは, その手がかりの奥行き情報としての利用価値の度合いと考えることができ, その手がかりに基づく奥行きの推定の精度により評価されるとしている.

それでは, 手がかりの信頼性は, どのような要因に依存して決定されるのであろうか. 考えられるひとつの要因は, 各手がかりが各視環境でもつ物理的な精度である. 例えば, 両眼視差による奥行き知覚の場合であれば, 視距離が小さくなるほど, 一定の奥行き量に対する両眼視差量が大きくなる. そのため, 視距離が小さくなるほど, 両眼視差から計算される奥行きに対するノイズの影響が小さくなり, より精度の高い奥行きの情報が得られるので, 両眼視差の信頼性が大きいと考えられる. このことは, 実験的にも確かめられている^{10,11)}.

しかし, 手がかりの重みは, その手がかりの物理的な精度だけに依存しているわけではないと考えられる. それを示す現象の一例として, 奥行き手がかりの重みには個人差が存在することがあげられる¹⁰⁻¹²⁾. もし手がかりの重みはその手がかりの物理的な精度だけに依存して決定されているのであれば, 同じ条件で刺激を観察した被験者間には, 手がかりの重みの個人差は生じないはずである. したがって, 手がかりの信頼性は, その手がかりの物理的な精度以外の要因にも依存していて, それが手がかりの重みの個人差を生み出していると考えられる.

それでは, 手がかりの重みの個人差を生み出している要因は何であろうか. これまで, 手がかりの重みの個人差の原因については, それを両眼立体視の能力の欠如とする過去の研究はいくつかあるが¹³⁻¹⁵⁾, 立体視機能が正常な被験者間の個人差の原因についてはほとんど報告されていない. 立体視機能が正常な被験者間の個人差を生み出している要因としては, 遺伝的要因や両眼間距離などの身体的要因, 経験的要因などが考えられる. 経験的要因に関しては, 筆者らの以前の研究において¹¹⁾, 両眼視差と遠近法情

報によって定義された面から傾きを知覚する際の各被験者の両眼視差の相対的な重みと, 過去の経験における視距離の偏りの指標として考えられる調節遠点および読書中の視距離との間に相関傾向がみられた. このことから, 奥行き手がかりの重みはその被験者の過去の特定の視環境へ適応した経験に依存していて, それが手がかりの重みの個人差を生み出す要因のひとつになっていることが示唆される.

しかし, その研究では, 調節遠点と読書中の視距離を過去の経験における視距離の偏りの指標として扱ったが, この仮定はいくつかの問題点を含んでおり, 必ずしも確かなものであるとはいいがたい. この問題点とは具体的には, まず第1に, 調節遠点が必ずしも経験のみに依存して決まっているわけではなく, 遺伝的な要因にも依存する可能性があることである. 第2に, 近視矯正用の眼鏡着用時には, 調節機能としてピントを合わせている距離が実際の視距離よりも近い. そのため, 近視矯正用の眼鏡着用時期のあった被験者の場合には, 過去の調節変化の範囲を反映すると考えられる調節遠点が過去の視距離の偏りを正確に反映していない可能性がある. また, もし上記の仮定が確かなものであったとしても, 過去の視距離の偏りと両眼視差の重みに相関傾向がみられたことから, どちらが原因でどちらが結果であるのか, もしくはどちらも他の同一な要因により影響を受けているのかはわからない.

そこで本研究では, 奥行き手がかり統合過程における各手がかりの信頼性, すなわち重みづけ線形結合モデルの重みが, 各個人の特定の視環境へ適応した経験に依存して決定されるという仮説をより直接的に調べることを目的とする. このため, 特定の奥行き手がかりの物理的な精度が高い(もしくは低い)視環境において空間知覚を要するタスクを行い, その前後で手がかりの重みを測定した. もし手がかりの重みが特定の視環境へ適応した経験に依存して決定されるなら, タスクを行った視環境において物理的な精度が高い手がかりの重みは, タスク前よりもタスク後のほうが大きくなることが予想される. 本研究では特に, 成人について学習実験を行い, 成人後の経験が手がかりの重みに与える影響について調べた. もし, この学習により, 予想と一致した変化がみられれば, 少なくとも成人後の経験が手がかりの重みの個人差の一因となっていることが示唆される.

2. 実験1: 近距離・遠距離観察学習

2.1 実験原理

まず, 垂直軸まわりに傾いた平面の傾きを知覚する際の両眼視差と遠近法情報の統合過程における両眼視差と遠近

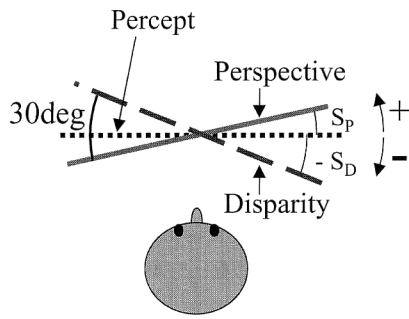


Fig. 1 Conceptual representation of the stimulus viewed from the top. The difference of the slant specified by disparity and that specified by perspective was always 30 deg. By using the staircase method, we determined the combination of the slants specified by the two cues which caused the percept of fronto-parallel plane.

法情報の相対的な重みを測定し、次に近距離もしくは遠距離観察を継続する学習を行い、最後に再び両手がかりの相対的な重みを測定した。もし手がかりの重みが特定の視環境へ適応して変化するなら、近距離観察を継続する学習中は、前述のような両眼視差の幾何学的な特性から、両眼視差の物理的精度が高くなると考えられるので、人間の視覚系はこの環境に適応して、学習後では両眼視差の重みが学習前よりも大きくなるのが予想される。逆に遠距離観察を継続する学習中は、両眼視差の物理的精度が低くなると考えられるので、学習後は両眼視差の重みが学習前よりも小さくなるのが予想される。

両眼視差と遠近法情報の統合過程における両眼視差の相対的な重みを求めるときに、両眼視差と遠近法情報の2つのみに手がかりを限定した一般的な重みづけ線形結合モデル(式(2))を用いた。

$$S = w_p S_p + w_D S_D \quad (2)$$

(ただし、 $w_p + w_D = 1$)

ここで、 S_p 、 S_D はそれぞれ遠近法情報と両眼視差から推定される傾き、 w_p 、 w_D はそれらの重み、 S は最終的に知覚される傾きである。 S_p 、 S_D はいずれも感覚量であるが、それらをそれぞれ単独で測定することが困難であるため、各手がかりから傾きは正しく推定されていると仮定し、 S_p 、 S_D には物理量を代入することにより重みを求めた。この仮定は、手がかり統合過程に関する過去の多くの研究で用いられ、おおよそ正しいことが知られている¹⁶⁻¹⁸⁾。このようにして両眼視差の相対的な重みを求めると、両眼視差の重みが負になる被験者が存在することが、以前の筆者らの研究でわかっている¹¹⁾。このことは、例えば遠近法情報が前額平行を示し両眼視差がある傾きを示している刺激を呈示すると、両眼視差が示す傾きとは反対向きの傾きを知覚することを意味する。このような現象が起こるの

は、両眼視差が知覚的な二次元形状の歪みを生み出し、これが両眼視差とは反対向きの傾きを示す遠近法情報として作用したためであると考えられる^{11,19,20)}。そこで、以前の研究¹¹⁾と同様に、両眼視差によって生じる主観的な大きさ変化を考慮し、重みづけ線形結合モデルを補正した。定式化するために、この主観的な大きさ変化による形状の歪みが遠近法情報として用いられ、それが物理的な遠近法情報(S_p)と同じ働きをし、またこの両者が二次元形状から三次元的な面の傾きを計算しているという点において同質のものであることから、これらが加算的に統合されてから両眼視差による傾き(S_D)と統合されると仮定すると、新たな重みづけ線形結合モデルは、

$$S = w_p (S_p + S_{pD}) + w_D S_D \quad (3)$$

(ただし、 $w_p + w_D = 1$)

となる。ここで、 S_{pD} は、両眼視差による主観的な大きさ変化によりできた主観的な遠近法情報が示す傾きである。そしてさらに、主観的な遠近法情報が示す傾き(S_{pD})は、両眼視差が示す傾きにほぼ比例している($S_{pD} = -\alpha S_D$)ことがわかっている¹¹⁾。そこで、重みづけ線形結合モデルの式(3)を

$$S = w_p (S_p - \alpha S_D) + w_D S_D \quad (4)$$

(ただし、 $w_p + w_D = 1$)

のように変形した¹¹⁾。 α は比例定数である。

補正された重みづけ線形結合モデルの式(4)によって両眼視差と遠近法情報の相対的な重みを測定するため、手がかりの重み測定フェーズでは、学習前後で両者を実験室的に矛盾させて、そのときの知覚量を測定した。刺激としては、垂直軸のまわりに傾いた正方形の平面をシミュレートしたものを使用した。そして、両眼視差と遠近法情報が示す平面の傾きの差を30°で一定に保ったまま傾きを変化させて、平面が知覚的に前額平行面になる点を求めた^{11,21)}(Fig. 1)。

それに続き、両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定フェーズでは、主観的な遠近法情報が示す傾き(S_{pD})を求めるため、両眼視差による主観的な大きさ変化の量を各被験者ごとに測定した。刺激として、遠近法情報が前額平行を示し両眼視差がある傾きを示しているランダムドット面と、その左右にその面と同じ両眼視差による傾きをもつ面上にある2本の垂直な線分を呈示した。このとき、線分の長さもランダムドット面と同程度だけ歪むと考えられる。そして、被験者は、この2本の線分の主観的な見えの長さが同じになるように、線分の長さ自体を調整した。このとき、応答として得られる2本の線分の物理的な長さの比は、求めたい主観的な長さの比の逆比となる。そ

して、この主観的な長さの比が物理的な長さの比と同様に遠近法情報として働くと考えるなら、両眼視差から生じるランダムドット面の主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{PD}) を求めることができる¹¹⁾。

データ解析時には、手がかりの重み測定フェーズで得られた、知覚的に前額面となるときのそれぞれの手がかりが示す傾き (S_p, S_b)、最終的な知覚である前額平行面すなわち傾き 0° ($S=0^\circ$)、そして両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定フェーズで得られた、両眼視差による主観的な大きさ変化により生じた主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{PD}) と両眼視差が示す傾き (S_b) の比 (α) を、それぞれ重みづけ線形結合モデルの式(4)に代入することにより、学習前後それぞれにおける各手がかりの重み (w_p, w_b) を求めた。

2.2 実験方法

2.2.1 被験者

被験者は、筆者1名を含む20歳代の7名で、視力正常もしくは矯正済みであった。また、全被験者に対して立体視テストを行った結果、全被験者において、20.4 arcmin もしくはそれ以下の両眼視差をもつ2本の垂直な白線の奥行き順序を正確に判断することができた。2本の白線は水平方向に79.8 arcmin 離れ、呈示時間は100 msであった。

2.2.2 実験全体の手順

まず両眼視差と遠近法情報の相対的な重みを測定し、次に両眼視差による主観的な大きさ変化の量を測定した。そして、近距離もしくは遠距離観察を継続する学習を行い、その後再び両眼視差と遠近法情報の相対的な重みの測定と、両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定を行った。後日、もう一方の観察条件による学習で、同様の手順により実験を行った。被験者KS, YS, IN, KKは、近距離観察学習を行ってから、それぞれ1日後、3日後、7日後、14日後に遠距離観察学習を行った。被験者KU, HH, ATは、遠距離観察学習を行ってから、それぞれ1日後、2日後、4日後に近距離観察学習を行った。以下に、各手続きについて説明する。

2.2.3 手がかりの重みの測定

刺激作成には、コンピューター (Macintosh G4) を使用した。刺激呈示に使用した装置は、2台のCRTモニター (Sony GDM-F400, 19 inch) と2枚のミラーから成るホイートストーン型ステレオスコープであった¹¹⁾。被験者からモニターまでの視距離は35 cmであった。2台のCRTモニター画面上の画像がミラーを介して幾何光学的に同一の位置に配置されるように、2台のCRTモニターの物理

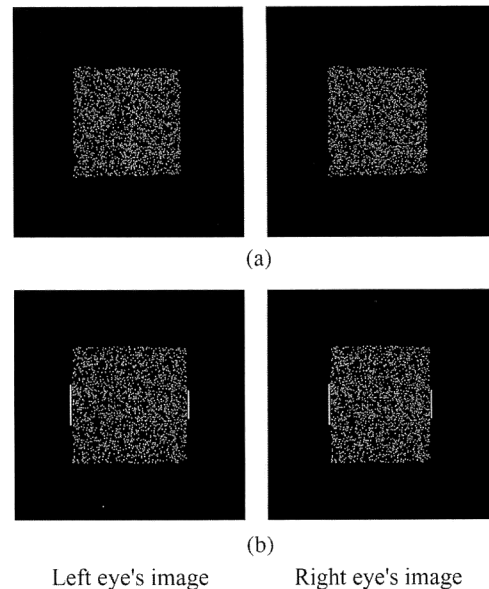


Fig. 2 (a) An example of a pair of random-dot stereograms used to measure the weights of the depth cues. In this example, the slants specified by disparity and perspective are -15° and 15° , respectively (slant is positive when left side is in front). (b) An example of a stimulus used to measure the magnitude of the subjective size distortion produced by disparity. In this example, the slants specified by disparity and perspective are -30° and 0° , respectively.

的な位置と向きは厳密に微調整され、また画面上でもモニターの補正機構により微調整が施された。この結果、両眼視差がゼロの刺激は、凹凸のない平面として観察された。被験者の頭部はあご台と額当てにより固定された。周囲は暗黒で、刺激以外のものは一切見えなかった。

呈示刺激は垂直軸のまわりに傾いた正方形の平面をシミュレートしたもので、黒地に円形の白いドットがランダムに配置されたものであった (Fig. 2 (a))。刺激の視角は、平面が前額平行のときに 1 辺 12.6° で、ドットは全部で 1500 個あった。この刺激がもつ奥行き手がかりとしては、両眼視差と遠近法情報があり、それらは独立に変えることができたが、本実験の条件としては、2つの奥行き手がかりが示す面の傾きの差は常に 30° であった。ただし、各ドットの形状と視角は常に一定であり、各ドットの中心位置のみが2つの手がかりによって変化した。したがって、本実験における遠近法情報は、ドットの密度勾配とランダムドット領域の輪郭における線遠近法であった。

各ドットの輝度は二次元的なガウス状の分布をしており、これにより、ドットの中心位置、すなわちガウス分布の位置を仮想的に 1 pixel 以下の単位で調節できた。この方法では、ドットの中心位置の仮想的な空間解像度は各画素の輝度階調値に依存する²²⁾。今回は各画素における輝度

階調に 256 段階という制約があったため、その制約の中で達成できかつ簡便な値ということで、仮想的に調節することができるドットの中心位置の最小単位を 1/100 pixel とした。これは視角 1.6 arcsec の解像度に相当した。各ドットのガウス分布の標準偏差は 2.66 arcmin であった。

各試行において、はじめにモニターの中央部に白いドット (2.66×2.66 arcmin) が 1.5 秒間呈示され、被験者はその白いドットを固視した。次に、両眼視差と遠近法情報の示す傾きの差が 30° である平面が 3 秒間呈示された。被験者は固視点の呈示されていた位置 (刺激の中心) を固視しながら刺激を観察し、刺激が消えた後に、刺激が消える直前にそれが左手前あるいは右手前のどちらに傾いて見えたかを、二者強制選択でキーボードを押すことにより応答した。

呈示される刺激の傾きは、両眼視差と遠近法情報が示す傾きの差が常に 30° に保たれたまま、ランダムな傾きから開始し、1 試行ごとに被験者が応答した傾きと反対向きに、すなわち知覚的に前額平行面に近づく方向に 2° ずつ変化した。この手順を繰り返す階段法により、知覚的に前額平行面となるような刺激の傾きの周辺での応答データを、1 つの刺激系列につき 45 試行分収集した。両眼視差と遠近法情報が示す傾きの相対関係が 2 種類で、それらがそれぞれ 2 つずつあり、合計 4 つの刺激系列が並行して進化した。4 種類の刺激系列の呈示順序はランダムであった。

2.2.4 両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定

両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定フェーズにおける呈示刺激は、手がかりの重み測定フェーズで使用したのと同じランダムドット面 (前額平行のときに 12.6°×12.6°) と、その左右両端に接した 2 本の垂直な白線であった (Fig. 2 (b))。2 本の白線の輝度は水平方向にガウス状の分布をしており、その標準偏差は 2.66 arcmin であった。2 本の白線とランダムドット面の中心はすべて同じ高さに位置していた。2 本の白線のうち 1 本は参照用の白線で、その長さは 4.44° で固定であった。もう 1 本の白線は応答用の白線で、その長さは被験者が調整できた。ランダムドット面の遠近法情報は常に前額平行を示し、両眼視差は -30°, -20°, -10°, 0°, 10°, 20°, 30° のいずれかの傾きを示した。2 本の白線は、ランダムドット面の両眼視差が示す傾きの面上にあった。

各試行においては、まずランダムドット面と白線が同時に呈示された。被験者は手もとのトラックボールを動かすことにより、左右 2 本の棒の見える長さが同じになるように応答用の白線の長さを調整した。刺激は被験者の応答が

終了するまで呈示され、応答時間は無制限であった。実際は、1 試行につき 10~20 秒程度で調整が終了した。

14 条件 (7 (両眼視差が示す傾き)×2 (参照用の白線と応答用の白線の相対的な位置)) をランダムな順序で行い、それを 4 回繰り返した。

2.2.5 近距離観察学習

近距離観察学習の目的は、一定時間、被験者に近距離観察をさせることにより、両眼視差の物理的精度を高い状態に保つことであった。

各被験者には、1 時間の学習時間が与えられ、高さ 194 cm、直径 84 cm の閉じられた円筒空間の中で椅子に座り、三次元的な知覚を要する下記の 2 種類のゲームを自由な順番と時間配分で行うように教示された。1 つ目のゲームは、赤い半透明のプラスチックでできた 50 ピースから成る高さ 7 cm のリングの形をした立体式ジグソーパズルであった。2 つ目のゲームは、表面が透明なプラスチックでできた直径約 18 cm の球形の立体式迷路ゲームで、被験者は、その中に入っている直径約 5 mm の銀色の玉を決められたコースからはずれないようにしてゴールを目指した。また、それらのゲームの成績に応じて報酬が与えられた。これらの三次元的な知覚を要するタスクが課せられることにより、被験者はおおよそ 20~50 cm 程度の視距離を保ち続け、学習時間中は両眼視差の物理的精度が比較的高い状態に保たれたと考えられる。

2.2.6 遠距離観察学習

遠距離観察学習の目的は、一定時間、被験者に遠距離観察をさせることにより、両眼視差の物理的精度を低い状態に保つことであった。

各被験者には、1 時間の学習時間が与えられ、大学キャンパス内の所定の屋外の場所で、三次元的な知覚を要する 3 つのタスクが課せられた。1 つ目のタスクは、キャンパス内のレンガが敷いてある歩道に立ち、実験者が指示したレンガに対して顔を向け、そのレンガが自分の前額面からどれだけ傾いているかを応答するというものであった。応答に用いたレンガまでの観察距離はおおよそ 2~8 m であった。2 つ目のタスクは、キャンパス内のレンガが敷いてある歩道に立ち、散在するマンホールの蓋のうち、実験者が指示したものをよく観察し、目を閉じた後、その状態でそのマンホールの蓋まで歩行するというものであった。観察時のマンホールの蓋までの距離はおおよそ 4~30 m であった。3 つ目のタスクは、キャンパス内のさまざまな建物や掲示板の前で被験者がさまざまな向きで立ち、それらの建物の壁や掲示板が自分の前額面からどれだけ傾いているかを応答するというものであった。壁や掲示板までの観

察距離はおおよそ2~10 mであった。これらのタスクを行う際、もしくはキャンパス内の移動中には、被験者は1 m以内と思われるものを観察しないようにあらかじめ教示された。そして、すべてのタスクが終了して再び手がかりの重みの測定のために屋内にある実験ブースに戻る際には、近距離のものを観察しないように、被験者は目を閉じた状態で実験者に付き添われて移動した。これらの三次元的な知覚を要するタスクが課せられることにより、被験者はおおよそ1~30 m程度の視距離を保ち続け、学習時間中は両眼視差の物理的精度が比較的低い状態に保たれたと考えられる。

2.3 結 果

手がかりの重み測定フェーズの各刺激系列において得られたすべてのデータのうち、両眼視差と遠近法情報が示す傾きの相対関係が同一である刺激系列のデータは、同一条件でのデータであるため、これらはまとめた。そして、各手がかりが示す傾きごとに被験者が左手前と応答した割合を求め、それをプロビット解析により累積正規分布でフィッティングを行い²³⁾、被験者が左手前と応答した割合が50%、すなわち刺激が知覚的に前額面となると考えられるときのそれぞれの手がかりが示す傾き (S_P , S_D) を求めた。そして2つの手がかりが示す傾きの相対関係が反対である刺激の結果どうしは、一方の刺激の傾きの符号を反転して平均した。

Fig. 3に、両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定結果の一例として、被験者KSの近距離観察学習前の結果を示す。横軸は両眼視差が示す傾き、縦軸は主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{PD}) である。プロット点は実際のデータ、実線はデータの回帰直線、太い破線は視角に基づいて応答した場合、すなわち大きさの恒常性がない場合の

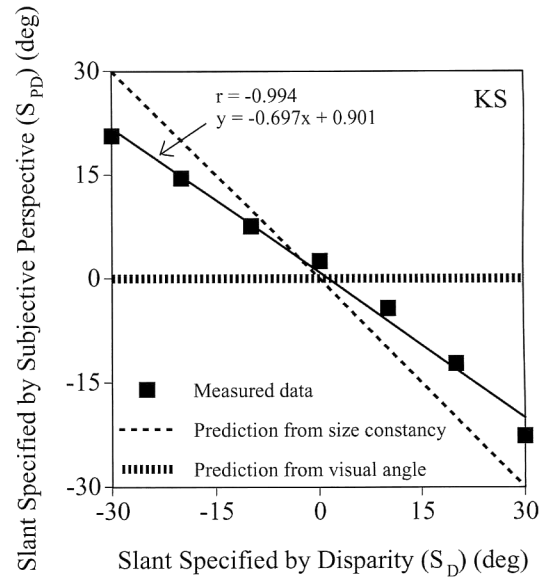


Fig. 3 The magnitude of the subjective size distortion produced by disparity in Experiment 1. The slant specified by the subjective perspective plotted as a function of slant specified by disparity.

理論値、細い破線は両眼視差による奥行きを加味して応答した場合、すなわち大きさの恒常性である場合の理論値である。結果をみると、主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{PD}) は、両眼視差が示す傾きにほぼ比例している ($S_{PD} = -\alpha S_D$) ことがわかる。この結果は他の被験者でも同様で、すべての被験者、視距離条件において、相関係数は $-0.995 < r < -0.860$ 、回帰直線の傾きとして表れている α は $0.416 < \alpha < 0.697$ であった。そこで、この α と、手がかりの重み測定フェーズで得られた、知覚的に前額面となるときのそれぞれの手がかりが示す傾き (S_P , S_D) を重みづけ線形結合モデルの式(4)に代入す

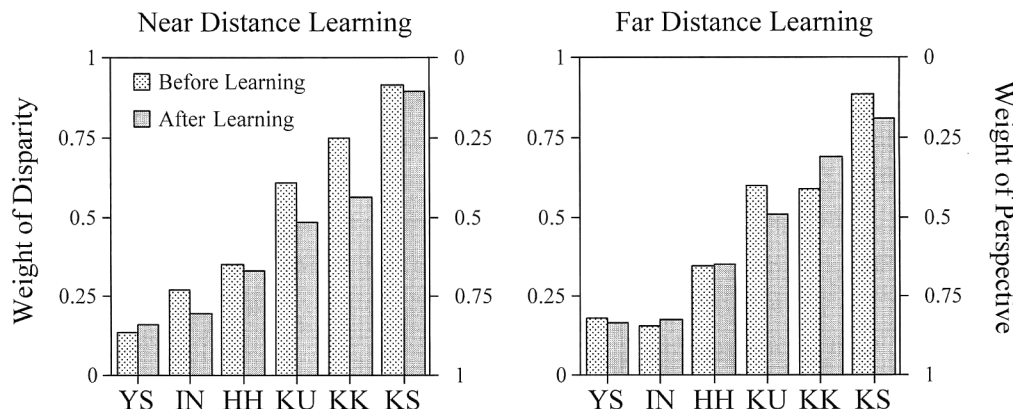


Fig. 4 Results of Experiment 1. The weights of disparity and perspective for each subject before and after the learning phases in which the subjects observed at near (left panel) and far (right panel) distances.

ることにより、学習前後それぞれにおける各手がかりの重み (w_p , w_b) を求めた。被験者7名のうち1名のデータはプロビット解析によるフィッティングができなかったため、解析から除外した。

Fig. 4 に、各学習前後において測定された各手がかりの重みを示す。左右のパネルはそれぞれ、近距離観察学習と遠距離観察学習の結果である。横軸は被験者、縦軸は各手がかりの重みであり、グラフの上方ほど両眼視差の相対的な重みが大きいことを示している。ドットのついたバーと一様な灰色のバーは、それぞれ学習前と学習後の結果である。

この結果より、まず、被験者により手がかりの重みが大きく異なることが明らかである。次に、近距離観察学習により、被験者6名中5名において両眼視差の重みが減少する傾向がみられる。一方、遠距離観察学習により手がかりの重みはあまり変化していない、もしくは変化していてもその方向が被験者間で一致していない。

2.4 考 察

両眼視差の重みに大きな個人差がみられた。これは先行研究と一致する結果である¹¹⁾。

また、近距離観察学習により、両眼視差の重みが減少する傾向がみられた。先行研究では、その中で用いた各指標が過去の経験における視距離が近くに偏っていたことを示す被験者ほど、両眼視差の重みが大きい傾向がみられた¹¹⁾。したがって、本実験における両眼視差の重みの変化の方向は、予想される変化の方向とは反対向きである。では、なぜ両眼視差の重みは近距離観察学習により減少したのであろうか。少なくとも、2つの可能性が考えられる。1つ目は、本実験の近距離観察学習では、意図とは異なり、用いた観察刺激における遠近法情報の物理的な精度、すなわち有効性が高かったためという可能性である。今回学習タスクに用いた観察刺激は、立体式のパズルと迷路であり、いずれも平行線や一様なテクスチャーのついたものではなかったため、遠近法情報が非常に有効なものであるとは考えにくい。否定はできない。2つ目の可能性は、近距離観察学習中は意図したように両眼視差の物理的な精度が高かったが、1時間も続けてその状態が続いたため、両眼視差にかかわるメカニズムが一時的に疲労し、そのため一時的に両眼視差の重みが減少したという可能性である。

一方、遠距離観察学習による手がかりの重みの変化については、被験者間で一致した傾向はみられなかった。これは、遠距離観察を続ける学習により手がかりの重みが増加しないことを示しているのかもしれないが、一方では、学習中に意図とは異なって近距離を観察してしまったため

に、奥行き手がかりの物理的な精度の制御が十分ではなかった、もしくは制御されていたとしても、手がかりの物理的な精度が各被験者固有の日常環境におけるものとあまり変わらなかった可能性もある。また、以前の筆者らの研究において示唆されたことは、長期的な経験により手がかりの重みが増加することであると考えられるため¹¹⁾、本実験の遠距離観察学習の学習時間が短すぎた可能性もある。

3. 実験2：片方の手がかりのみによる傾き調整学習

3.1 目的と実験原理

以前の筆者らの研究において、両眼視差の重みと、調節遠点、読書時の視距離それぞれとの間に相関傾向がみられたことから、奥行き手がかり統合過程における各手がかりの重みが、被験者の過去の偏った視距離観察の経験に依存して決定されていることが示唆された¹¹⁾。これはすなわち、手がかりの重みはその手がかりの過去の長期的な物理的な精度、すなわち有効性に依存しているということの間接的に示唆していると考えられる。そこで実験1では、より直接的にこの仮説を調べるため、視距離を制限することにより特定の奥行き手がかりの物理的な精度を高い状態に制御することを意図した学習を行い、その前後で手がかりの重みを測定した。しかし、遠近法情報の有効性を高めることを意図した遠距離観察学習において、被験者間で一貫した重みの変化はみられなかった。この原因としては、視距離制限という手法では学習中における手がかりの物理的な精度が十分に制御されていなかった、もしくは制御されていたとしても、各被験者固有の日常環境におけるものとあまり変わらなかった可能性が考えられる。また、学習時間が短すぎた可能性もある。一方、両眼視差の有効性を高めることを意図した近距離観察学習により、両眼視差の重みが減少した。これは、予想とは反対向きの変化である。そして、その原因として、両眼視差にかかわるメカニズムが疲労したために、両眼視差の重みが一時的に減少した可能性が考えられる。また、意図に反して、用いた観察刺激における遠近法情報の物理的な精度が高かったためという可能性もある。

そこで実験2では、まず学習中の手がかりの物理的な精度、すなわち有効性を、各被験者固有の日常環境におけるものと大きく異なる状態となるように十分に制御するため、片方の手がかりがほとんど存在しない状況で傾きを調整する学習を行った。この学習は、いいかえると、存在する片方の手がかりのみを利用し、もう片方の手がかりの物理的な精度がゼロである環境での学習ということである。

また、実験1の遠距離観察学習で重みの変化がみられな

かったのは学習時間が短すぎたためである可能性と、近距離観察学習後で重みが予想と逆方向に変化したのは学習直後の一時的なものである可能性を調べるため、学習とその前後での各手がかりの重みの測定という手順を数日間繰り返した。もし、手がかりの重みが、長期的にその手がかりを利用し続けるという経験により大きくなる一方、利用直後においては一時的に小さくなるのであれば、両眼視差と遠近法情報のうちの片方の手がかりのみに基づいて傾きを調整する学習期間中は、各日の学習フェーズの前後で比較するとその手がかりの重みは小さくなるが、学習期間全体としては大きくなるのが予想される。

以上より、実験2では、両眼視差学習と遠近法情報学習のそれぞれにおいて、手がかりの物理的精度を十分に制御した学習と、その直前直後における各手がかりの相対的な重み測定という手順を数日間繰り返すことにより、奥行き手がかり統合過程における各手がかりの重みが学習により変化する可能性を調べることを目的とした。

3.2 実験方法

3.2.1 被験者

被験者は筆者を含む20歳代の3名で、視力正常もしくは矯正済みであった。また、全被験者に対して立体視テストを行った結果、実験1と同様に、全被験者において正常な立体視能力が認められた。

3.2.2 実験全体の手順

本実験では、すべての手順において、実験1の手がかりの重み測定フェーズで用いられたホイートストーン型ステレオスコープを用いた。

まず両眼視差の重みを測定し、次に両眼視差による主観的な大きさ変化の量を測定した。そして、両眼視差もしくは遠近法情報に基づいて傾きを調整する学習を行い、その後再び両眼視差の重みの測定と、両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定を行った。この手順を、同一の手がかりに基づく学習で7~8日間繰り返した。さらに後日、もう一方の手がかりの学習で、同様の手順を7日間繰り返した。被験者ATは、遠近法情報学習期間終了から8日後に両眼視差学習期間を開始した。被験者YS、KKは、両眼視差学習期間終了からそれぞれ8日後、4日後に遠近法情報学習期間を開始した。ただし、学習を行う日は必ずしも連続ではなく、同一手がかり学習実験の間に実験を行わない日が1~3日間続くこともあった。以下に、各手続きについて説明する。

3.2.3 手がかりの重みの測定と両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定

手がかりの重み測定フェーズにおける呈示刺激と手順

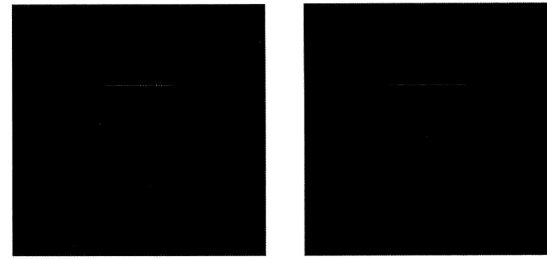


Fig. 5 An example of a stimulus used in the disparity learning in Experiment 2.

は、実験1におけるものと同一であった。ただし、測定時間短縮のため、刺激の呈示時間は0.5秒間であり、階段法の各刺激系列において応答が6回折り返したらそれぞれ終了となった。刺激系列は全部で12であった。

両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定フェーズにおける呈示刺激と手順は、実験1におけるものと同一であった。

3.2.4 両眼視差学習

両眼視差学習の目的は、一定時間、遠近法情報の物理的精度をゼロに保ち、両眼視差情報のみが有効な状態で、被験者に刺激の傾きを判断させることであった。

両眼視差学習で用いられた刺激は、モニターの中心に呈示された2.66 arcmin (1 pixel) 四方の白い固視点と、幅2.66 arcminの水平な白線であった (Fig. 5)。白線の垂直方向の位置は、モニターの中心を範囲の中心として、12.55°の範囲で試行ごとにランダムであった。白線の中心の水平方向の位置は常にモニターの中心で、その長さは1.77°~12.55°の範囲で試行ごとにランダムに変化した。2つのモニターに呈示された白線には、上記の標準の長さから-54.4~+54.5 arcminの長さの違い (水平大きさ視差; 右眼-左眼) を6.38 arcsec (1/25 pixel) の単位で仮想的につけることができた。これは、水平大きさ視差を1段階変化させる際に、おのおのの眼に呈示する白線の両端の位置 (4か所) を同時に、画像位置の最小単位である1/100 pixel だけ仮想的に変化させたことによる (2章2節3項参照)。このような刺激には、遠近法情報はほとんど含まれないと考えられる。

両眼視差学習フェーズの各試行においては、まず固視点0.5秒間呈示され、被験者はそれを固視した。次に、固視点が呈示された状態のまま、白線が呈示された。白線の両眼視差は、呈示直後は試行ごとにランダムに決定され、被験者がトラックボールを動かすことにより-54.4~+54.5 arcminの範囲で変化させることができた。被験者は、固視点を固視しながら、白線が前額面になるように

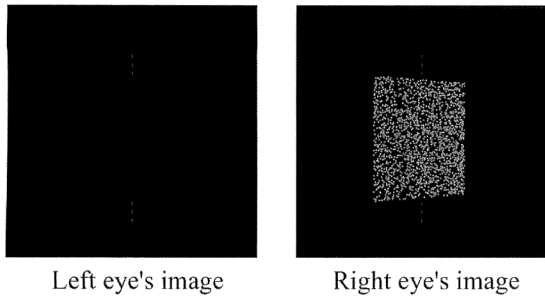


Fig. 6 An example of a stimulus used in the perspective learning in Experiment 2.

トラックボールを調整した。刺激は被験者の応答が終了するまで呈示され、応答時間は無制限であった。実際は1試行につき4~20秒程度で調整が終了した。

両眼視差学習フェーズは全体で43分間であり、開始から10分おきに各1分間の休憩時間がとられた。被験者はこの間、閉眼するよう教示された。

3.2.5 遠近法情報学習

遠近法情報学習の目的は、一定時間、両眼視差の物理的精度をゼロに保ち、遠近法情報のみが有効な状態で、被験者に刺激の傾きを判断させることであった。

遠近法情報学習では、片方のモニターには手がかりの重み測定時と同じ刺激(ランダムドットパターン)と、その上下に幅2.66 arcmin (1 pixel)の破線が呈示され、もう片方のモニターには同じ破線のみが呈示された(Fig. 6)。ランダムドットパターンが呈示されるモニターは試行により左右ランダムに変化した。

遠近法情報学習フェーズの各試行では、ランダムドットが単眼に、垂直な破線が両眼に呈示され、被験者は刺激の中心付近を固視するように教示された。ランダムドット面の遠近法情報が示す傾きは、呈示直後は試行ごとにランダムに決定され、被験者がトラックボールを動かすことにより $-35^{\circ} \sim +35^{\circ}$ の範囲で変化させることができた。被験者は、ランダムドット面が前額面になるようにトラックボールを調整した。刺激は被験者の応答が終了するまで呈示され、応答時間は無制限であった。実際は、1試行につき2~20秒程度で調整が終了した。

遠近法情報学習フェーズ全体での所要時間と休憩の時間配分、休憩時の被験者への教示は、両眼視差学習フェーズにおけるものと同一であった。

3.3 結果

手がかりの重み測定フェーズにおける階段法の各刺激系列の折り返し点の最後の4点における遠近法情報と両眼視差のそれぞれの平均の傾き(S_p , S_b)と、最終的に知覚的に刺激が収束する点である前額平行面すなわち傾き 0°

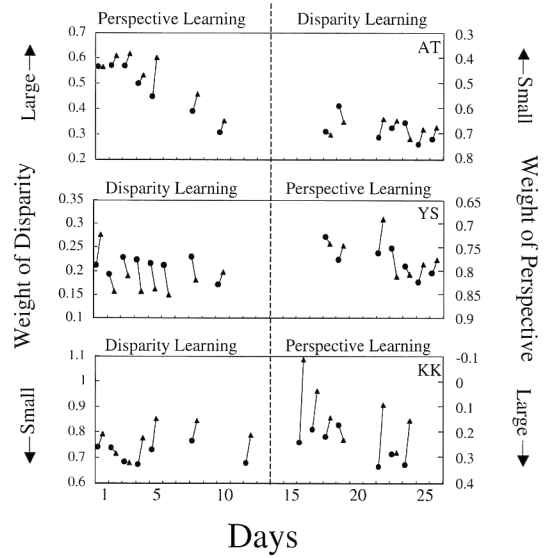


Fig. 7 Results of Experiment 2. The weights of disparity and perspective for each subject before and after the disparity and perspective learnings.

($S=0^{\circ}$),そして両眼視差による主観的な大きさ変化の量の測定から得られる α を重みづけ線形結合の式(4)に代入することにより、各手がかりの重みを求めた。

Fig. 7に、式(4)を用いて求めた各手がかりの重みを示す。各パネルは各被験者の結果である。横軸は学習を開始した日からの日数であり、それぞれのパネルの縦の破線の左右は、異なる学習期間での結果である。例えば、被験者ATの場合、遠近法情報学習期間の結果が破線の左側、両眼視差学習期間の結果が破線の右側にプロットされているが、これは被験者ATでは遠近法情報学習期間終了後に日をおいて両眼視差学習期間を開始したことを意味する。他の2名の被験者では、学習期間の順序がその反対となっている。縦軸は各手がかりの重みであり、グラフの上方ほど両眼視差の相対的な重みが大きいことを示している。各シンボルは2つずつ実線により結ばれているが、その対となったシンボルのうち、左側(●)が学習前、右側(▲)が学習後の結果である。

この結果より、まず、被験者により手がかりの重みが大きく異なることが明らかである。

次に、学習の直前と直後において、また学習の日数を重ねることによって、手がかりの重みが変化することがわかる。まず、遠近法情報学習期間では、それぞれの学習直前と直後を比べると、特に被験者ATとKKでは遠近法情報の重みが減少する傾向がみられるが、遠近法情報学習期間全体でみると、遠近法情報の重みが増加していることがわかる。各日の学習直前の遠近法情報の重みの変化をみると、遠近法情報の重みの増加が顕著になるのは、遠近法情

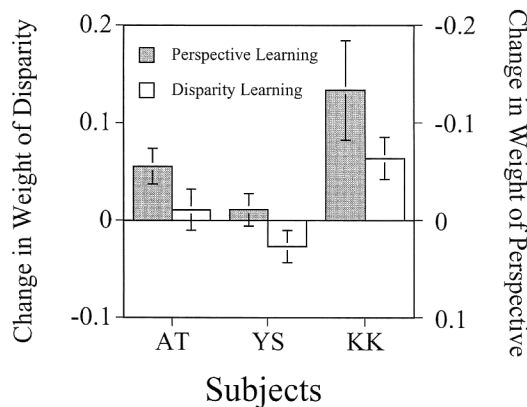


Fig. 8 Changes in the weight of disparity across the learning phases. The abscissa indicates the difference between the weights of disparity measured just before and after each learning phase (after-before). The error bars represent standard errors of the mean of the differences.

報学習を始めて4~5日目である。一方、両眼視差学習期間では、それぞれの学習直前と直後を比べると、被験者YSでは両眼視差の重みが減少する傾向がみられるが、逆に被験者KKでは両眼視差の重みが増加する傾向がみられる。また、両眼視差学習期間全体でみると、両眼視差の重みに目立った変化はみられない。

学習による手がかりの重みの短期的、長期的な変化をそれぞれ詳しく調べるため、Fig. 8には各学習フェーズの直前直後での、Fig. 9には学習期間1, 2日目と6, 7日目の両眼視差と遠近法情報の相対的な重みの変化をそれぞれ示す。Fig. 8の縦軸は、各日の学習フェーズの直前直後における各手がかりの重みの差を平均した値である(学習後-学習前)。Fig. 9の縦軸は、各学習期間1, 2日目の学習前後の各手がかりの重みの平均値と6, 7日目の平均値の差である(6, 7日目-1, 2日目)。いずれのグラフでも、灰色のバーと白色のバーはそれぞれ、遠近法情報学習と両眼視差学習の結果である。これらの結果より、遠近法情報学習フェーズ直前直後においては、2名の被験者(AT, KK)において遠近法情報の重みが減少し(対応のあるt検定; $p < 0.05$)、遠近法情報学習期間全体でみると、遠近法情報の重みが全被験者で増加していることがわかる(対応のあるt検定; $p < 0.05$)。一方、両眼視差学習フェーズ直前直後においては、被験者YSでは両眼視差の重みの減少傾向がみられたが($p = 0.077$)、反対に被験者KKにおいては両眼視差の重みの増加がみられた($p < 0.05$)。両眼視差学習期間全体では、両眼視差の重みに有意な変化はみられなかった。

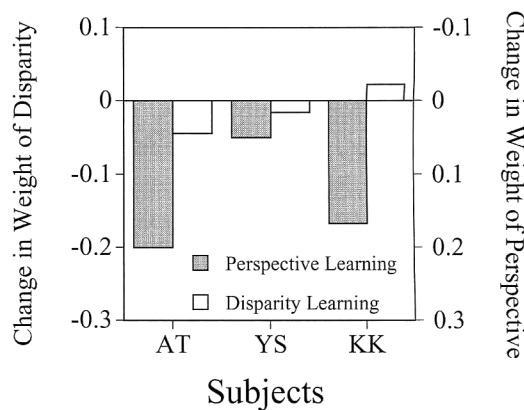


Fig. 9 Changes in the weight of disparity in the whole learning period. The abscissa indicates the difference between the weights of disparity measured in the first and second days and the 6th and 7th days (Day 6, 7-Day 1, 2).

3.4 考察

3.4.1 手がかりの重みの長期的な変化

遠近法情報学習期間全体において、遠近法情報の重みが増加した。この結果は、奥行き手がかり統合過程における手がかりの重みが、長期的にその手がかりを利用し続けるという経験により大きくなる、すなわち手がかりの重みが過去の長期的な利用により正の影響を受けることを示唆する。では、どのようにしてこのような現象が起こるのであろうか。統計学的には、最も精度の高い傾き知覚を生み出すためには、各手がかりによる傾きの推定値の分散に反比例した重みを各手がかりにつける必要がある⁷⁾。そのため、遠近法情報の重みが過去の長期的な利用により正の影響を受けるのは、遠近法情報による傾きの推定精度が上昇することにより、遠近法情報の信頼性が大きくなるためかもしれない。しかし、本実験では学習期間全体における各手がかりに基づく傾きの知覚的精度の変化は測定していないので、この可能性に関してはさらなる研究が必要である。

また、なぜ遠近法情報学習の正の効果が現れるまでに日数が必要なのであろうか。その理由のひとつとして、学習には睡眠が必要であるから、という可能性が考えられる。先行研究において、知覚学習後に睡眠をすることが、学習の効果にとって重要であることが示唆されている²⁴⁻²⁸⁾。本実験の遠近法情報学習期間においても、遠近法情報学習を始めて4~5日目にその効果が出はじめており、学習を行った日より後の日に学習の効果が現れたという点において先行研究の結果と一致する。

しかし、遠近法情報学習期間全体において遠近法情報の重みが増加した原因として、本研究で用いた刺激の遠近法情報が特殊であったことによる可能性も考えられる。すな

わち、本研究で用いた刺激では、遠近法情報がある傾きを示しても、ドットのサイズと形状が一定であったため、遠近法情報内に矛盾が存在していた。そして、そのような特殊な遠近法情報を奥行き手がかりとして利用するには学習が必要であり、学習が効果的であった可能性がある。この可能性を検討するには、本実験と同様の遠近法情報学習を、ドットの密度勾配とともにドットのサイズと形状も変化する刺激を用いて行うのが有効であろう。

一方、両眼視差学習期間全体では、両眼視差の重みの変化はほとんどみられなかった。このことは、両眼視差のみを用いる学習が、両眼視差と遠近法情報の相対的な重みに影響を与えないことを示唆しているのかもしれない。しかし、被験者 YS, KK においては、両眼視差学習期間が終了して、それぞれ7日間と3日間あけてから遠近法情報学習期間が始まったが、両眼視差学習期間終了時に比べて遠近法情報学習期間の初期において、両眼視差の重みがやや大きくなった。このことから、両眼視差学習の効果が出るまでには、今回実験を行った7日間以上の時間がかかる可能性も考えられる。学習によって両眼視差の重みが増加することを示した先行研究としては、van Ee の研究がある²⁹⁾。彼は、両眼視差がさまざまな傾きを示し、遠近法情報が常に前額面を示す直径約 65° の円形の面を呈示し、被験者にその傾きを応答させた。これを1日に147 試行、1週間ごとに3日間行った。その結果、応答された傾きが1週間ごとに増加したが、1日の中ではほとんど変化しなかった。この結果は、学習による両眼視差の重みの増加にはある程度の時間が必要であることを示していると考えられ、本研究における両眼視差学習の効果が出るのに学習開始から最低7日間程度の時間が必要であるという考えと一致する。また、以前の筆者らの研究において、両眼視差の重みと調節遠点、読書時の視距離との間に相関傾向がみられたことより¹¹⁾、奥行き手がかり統合過程における手がかりの重みが、長期的にその手がかりを利用し続けるという経験により大きくなることが示唆されたが、調節遠点や読書時の視距離は数日というよりは、より長い期間における過去の視距離の偏りの指標と考えられる。そのため、本研究で行ったような両眼視差学習の効果が出るのには、学習開始後最低7日間もしくはそれ以上の時間が必要なのではないだろうか。

3.4.2 手がかりの重みの短期的な変化

各学習フェーズの直前と直後を比べると、遠近法情報学習では、被験者3名中2名において遠近法情報の重みの有意な減少がみられた。この結果は、短期的にある特定の手がかりを利用し続けることにより、手がかりの重みが負の

影響を受ける場合があることを示唆する。そして、その原因としては、学習中に40分も続けて単独で有効であった手がかりにかかわるメカニズムを酷使する状態が続いたため、そのメカニズムが一時的に疲労し、その手がかりの重みが一時的に減少したという可能性があげられる。しかし、各両眼視差学習フェーズの直前と直後を比べると、被験者間で一貫した両眼視差の重みの変化はみられなかった。このため、上記の考えはすべての場合には適用できない。

また、この両眼視差学習による両眼視差の重みの短期的変化が被験者間で一貫していないという結果は、両眼視差の物理的精度を高くするという同じ目的をもった実験1の近距離観察学習により、両眼視差の重みがほぼ一貫して減少したという結果と矛盾している。では、なぜ学習中の物理的精度を十分に制御した実験2の両眼視差学習直後では被験者間で一貫した両眼視差の重みの変化がみられなかったにもかかわらず、手がかりの物理的精度の制御が十分であったか疑問が残る実験1の近距離観察学習後では両眼視差の重みがほぼ一貫して減少したのであるだろうか。実験1の近距離観察学習中の遠近法情報の物理的精度が高かったためなのであるだろうか。しかし、実験2の遠近法情報学習における被験者2名の結果から、学習中に遠近法情報を利用し続けると学習直後は学習前に比べて遠近法情報の重みが減少する、すなわち両眼視差の重みが増加する傾向がみられる。したがって、実験1の近距離観察学習において、遠近法情報の物理的精度が高かったとは考えにくい。この結果の違いの原因に関しては、今のところ、これ以上は明らかではない。

3.4.3 手がかりの重みの個人差

本実験においても、先行研究と同様に、被験者により手がかりの重みが大きく異なった¹⁰⁻¹²⁾。このことは、奥行き手がかり統合過程における手がかりの重みが被験者側の要因に依存して決定されていることを示している。そして、筆者らの以前の研究により、その要因のひとつが長期的にその手がかりを利用し続けるという経験である可能性が示された¹¹⁾。そしてさらに、本実験において7~8日間、1日につき40分間、遠近法情報を利用し続ける学習を続けた結果、遠近法情報の重みが増加した。両眼視差情報を利用し続ける学習によっては、その期間中は両眼視差の重みの増加はみられなかったが、被験者 YS, KK においては、続く遠近法情報学習期間の初期において両眼視差の重みの増加傾向がみられた。本実験のこれらの結果は、奥行き手がかり統合過程における手がかりの相対的な重みの個人差の原因のひとつが、長期的に特定の手がかりを利用し

続けるという経験の程度の被験者間での違いであることを示唆する。

3.4.4 手がかりの重みに影響を与える各要因の役割

本研究と筆者らの以前の研究によって¹¹⁾、各手がかりの現在の物理的精度と過去の長期的な利用はその手がかりの重みに正の影響を与えることが示唆され、逆に直前の短期的な利用は、条件によっては負の影響を与えることが示唆された。では、これらの要因は手がかりの重みに影響を与えることによりどのような役割を担っているのだろうか。筆者らは、以下のように推測する。

まず、各手がかりの現在の物理的精度はその手がかりの重みに正の影響を与えることにより、最終的に知覚される傾きの精度を高くしている⁷⁾。次に、過去の長期的な利用が、その手がかりの重みに正の影響を与える。各人固有のこれまで生活してきた視環境が今後も続く確率が高いと考えれば、これまでの視環境に適した重みづけをベースとすることにより、知覚精度を確率的に高く保つことができる。そして最後に、直前の短期的な利用がその手がかりの重みに負の影響を与えることにより、疲労したメカニズムの出力の一時的な劣化が知覚に与える影響を小さく抑えている。したがって、これら3つの要因が手がかりの重みに影響を与えることにより、傾き知覚の高い精度が保たれていると考えられる。ただし、前述のように、本実験では学習期間全体において各手がかりに基づく傾きの推定精度の変化は測定していないので、これらの可能性に関してはさらなる検討が必要である。

4. ま と め

本研究で得られた結果を以下にまとめる。実験1では、傾き知覚のための両眼視差と遠近法情報の統合過程における両眼視差の相対的な重みが、近距離観察を継続する学習により減少した (Fig. 4 左)。実験2では、単一の手がかりのみに基づいて傾きを調整する学習を7日間 (もしくは8日間) 続けることにより、遠近法情報学習では遠近法情報の重みが学習期間全体では増加し、両眼視差学習ではその期間中は両眼視差の重みの変化に被験者間で一貫した傾向はみられなかったが、被験者YS, KKでは、両眼視差学習期間が終了してからそれぞれ7日間と3日間あけてから両眼視差の重みが若干増加する傾向がみられた (Fig. 7, Fig. 9)。一方、各学習フェーズの直前と直後を比べると、遠近法情報学習では被験者3名中2名において遠近法情報の重みが減少し、両眼視差学習では被験者1名で両眼視差の重みの減少傾向がみられ、他の1名では両眼視差の重みが増加した (Fig. 7, Fig. 8)。

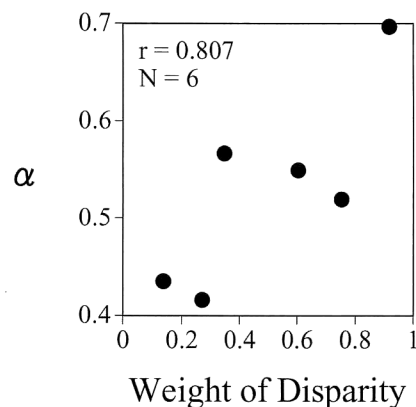


Fig. 10 The relation between the weight of disparity and ' α ' ($-S_{PD}/S_D$) measured before any learnings for each subject.

以上の結果より、奥行き手がかり統合過程における手がかりの重みは過去の長期的な利用により正の影響を受けることが示唆され、直前の短期的な利用により、条件によっては負の影響を受けることが示唆された。しかし、実験2の両眼視差学習による両眼視差の相対的な重みの長期的な変化やすべての実験における短期的な変化には、被験者による違いや不明瞭な点もある。また、奥行き手がかりの重みが、各要因に影響を受けるメカニズムの詳細に関してはまだ明らかではない。例えば、ある手がかりの重みが増加した場合、それがその手がかりに基づく傾きの推定精度の上昇によるのか、もしくは単に手がかりの重みのみが増加するののかという問題がある。これらの点に関しては、さらなる研究が必要である。

付 録

Fig. 10 に、両眼視差の重みと α (主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{PD}) と両眼視差が示す傾き (S_D) との比例係数) との関係を示す。横軸と縦軸はそれぞれ、各被験者において最初に行われた学習の直前に測定された両眼視差の重みと α の値である。各プロット点は各被験者の結果である。この結果より、両者には正の相関があることがわかる ($r=0.807$, $p<0.05$)。この結果は、本実験における被験者1名のみを含む11名の被験者を用いた先行研究の結果と一致する ($r=0.617$, $p<0.05$ 。ただし、先行研究ではその結果は示されていない¹¹⁾。

文 献

- 1) M. L. Braunstein: "Motion and texture as sources of slant information," J. Exp. Psychol., **78** (1968) 247-253.
- 2) B. A. Doshier, G. Sperling and S. Wurst: "Tradeoffs between

- stereopsis and proximity luminance covariance as determinants of perceived 3D structure,” *Vision Res.*, **26** (1986) 973-990.
- 3) N. Bruno and J. E. Cutting: “Minimodularity and the perception of layout,” *J. Exp. Psychol. Gen.*, **117** (1988) 161-170.
 - 4) H. H. Bulthoff and H. A. Mallot: “Integration of depth modules: Stereo and shading,” *J. Opt. Soc. Am. A*, **5** (1988) 1749-1758.
 - 5) B. J. Rogers and T. S. Collett: “The appearance of surfaces specified by motion parallax and binocular disparity,” *Q. J. Exp. Psychol. A*, **41** (1989) 697-717.
 - 6) M. Nawrot and R. Blake: “On the perceptual identity of dynamic stereopsis and kinetic depth,” *Vision Res.*, **33** (1993) 1561-1571.
 - 7) 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.
 - 8) K. Nakayama and S. Shimojo: “Experiencing and perceiving visual surfaces,” *Science*, **257** (1992) 1357-1363.
 - 9) L. T. Maloney and M. S. Landy: “A statistical framework for robust fusion of depth information,” *Proc. SPIE*, **1199**, (1989) 1154-1163.
 - 10) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: “Integration of depth modules: Stereopsis and texture,” *Vision Res.*, **33** (1993) 813-826.
 - 11) 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.
 - 12) M. Sato and I. P. Howard: “Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast,” *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.
 - 13) R. S. Harwerth, M. C. Moller 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.
 - 14) M. W. Rouse, J. S. Tittle and M. L. Braunstein: “Stereoscopic depth perception by static stereo-deficient observers in dynamic displays with constant and changing disparity,” *Optom. Vis. Sci.*, **66** (1989) 355-362.
 - 15) R. van Ee and W. Richards: “A planar and a volumetric test for stereoanomaly,” *Perception*, **31** (2002) 51-64.
 - 16) J. S. Tittle, J. F. Norman, V. J. Perotti and F. Phillips: “The perception of scale-dependent and scale-independent surface structure from binocular disparity, texture, and shading,” *Perception*, **27** (1998) 147-166.
 - 17) R. van Ee, M. S. Banks and B. T. Backus: “An analysis of binocular slant contrast,” *Perception*, **28** (1999) 1121-1145.
 - 18) 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.
 - 19) B. Gillam: “Changes in the direction of induced aniseikonic slant as a function of distance,” *Vision Res.*, **7** (1967) 777-783.
 - 20) R. S. Allison, I. P. Howard, B. J. Rogers and H. Bridge: “Temporal aspects of slant and inclination perception,” *Perception*, **27** (1998) 1287-1304.
 - 21) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bulthoff: “Touch can change visual slant perception,” *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
 - 22) M. Bach: “Anti-aliasing and dithering in the ‘Freiburg Visual Acuity Test’,” *Spat. Vis.*, **11** (1997) 85-89.
 - 23) D. J. Finney: *Probit Analysis*, 3rd ed. (Cambridge University Press, London, 1971).
 - 24) A. Karni and D. Sagi: “The time course of learning a visual skill,” *Nature*, **365** (1993) 250-252.
 - 25) A. Karni, D. Tanne, B. S. Rubenstein, J. J. M. Askenasy and D. Sagi: “Dependence on REM sleep of overnight improvement of a perceptual skill,” *Science*, **265** (1994) 679-682.
 - 26) R. Stickgold, L. James and A. Hobson: “Visual discrimination learning requires sleep after training,” *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 1237-1238.
 - 27) P. Maquet: “The role of sleep in learning and memory,” *Science*, **294** (2001) 1048-1052.
 - 28) S. Mednick, K. Nakayama and R. Stickgold: “Sleep-dependent learning: A nap is as good as a night,” *Nat. Neurosci.*, **6** (2003) 697-698.
 - 29) R. van Ee: “Perceptual learning without feedback and the stability of stereoscopic slant estimation,” *Perception*, **30** (2001) 95-114.