

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

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

**現所属：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 Viewing Distance and Past Experiences 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 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama 226-8503

**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 clear yet. We measured the weights of disparity and perspective (density gradient and trapezoidal distortion of outline) for perceiving slant for the random-dot pattern presented at the different distances, and compared them with the measured indices of the past viewing distance bias (accommodative far point and reading distance) for each subject. The results showed that the weight of disparity decreased as the viewing distance increased, and the correlations between the weight of disparity and each index were observed to some extent. These results suggest that the depth cue weight depends on both the geometrical precision of the cue and the extent to which the observer kept relying on the cue.

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

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、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、遠近法情報とよ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、最終的なひと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、まず光景の中からさまざまな手がかりが抽出され、次にそれらの各手がかりから互いに独立に奥行きを推定する。そして、それらの

E-mail: sakano@isl.titech.ac.jp

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幾何学的に大きくなる。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⁾。

しかし、手がかりの重みは、各手がかりの物理的な特性、すなわちそれを決定する視環境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挙げられる^{10,11)}。もし手がかりの重みが視環境だけに依存して決定されているのであれば、同じ視環境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、視環境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があるものの¹²⁻¹⁴⁾、立体視機能が正常な被験者間の個人差については、その原因はまだ明らかになっていない。単純に考えて、もし、被験者間で個人差が存在するものが手がかりの重みの決定に寄与するならば、手がかりの重みに個人差が存在することが説明される。被験者間で個人差があるものとしては、遺伝的な要因や、両眼間距離などの身体的な要因なども考えられるが、それ以外に、これまで生活してきた環境が考えられる。生活してきた環境が異なれば、その環境によって手がかりの物理的な精度も異なる。そのため、これまで特定の手がかりを信頼してきた度合いも個人により異なると考えられる。そこで、これ

までの生活の中で特定の手がかりを信頼してきた度合いが、現在のその手がかりの信頼性に寄与していて、そのために、手がかりの信頼性、すなわち重みに個人差が生じるということが考えられる。これはいい換えると、現在の手がかりの信頼性が特定の視環境への適応という経験に依存しているということである。

以上より、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は、手がかりの物理的な精度、すなわち視環境に加えて各個人の過去の経験にも依存して決定されていることが考えられる。そして、その過去の経験とは、特定の視環境へ適応するという経験である。

本研究では、この仮説を検証するために、まず実験1で、立体視機能が正常な多数の被験者を用いて異なる視距離での両眼視差と遠近法情報の重みを測定した。もし手がかりの重みがその手がかりの物理的な精度に依存するのであれば、両眼視差の幾何学的な性質より、両眼視差の重みは視距離が近距離になるほど大きくなるはずである。そして、もし手がかりの重みが特定の環境へ適応するという経験に依存するのであれば、各被験者の過去の経験における視距離の偏りによって、現在の両眼視差の重みには個人差が生じるはずである。次に実験2で、過去の経験における視距離の偏りの指標として調節遠点と読書中の視距離を各被験者で測定し、それを実験1で測定した両眼視差の重みと比較した。もし手がかりの重みが特定の環境へ適応するという経験に依存するのであれば、過去の経験における視距離が近距離に偏っている被験者ほど、現在の両眼視差の重みは大きくなることが予想される。

2. 実験1：奥行き手がかりの重みの測定

2.1 実験原理

重みづけ線形結合モデル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、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、そのときに2つの手がかりが示す傾きと知覚された傾き(0°)を、両眼視差と遠近法情報の2つの手がかりのみに手がかりを限定した重みづけ線形結合モデル(式(2))に代入することにより、手がかりの重みを測定した¹⁵⁾(Fig. 1)。

$$S = w_p S_p + w_b S_b \quad (2)$$

(ただし、 $w_p + w_b = 1$)

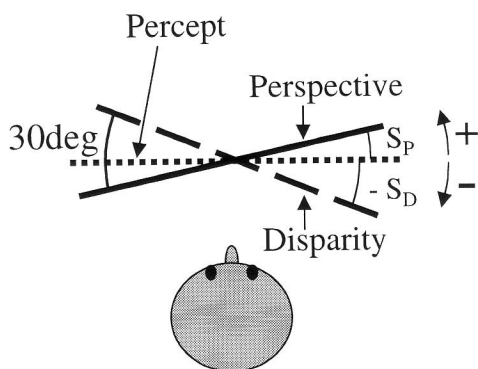


Fig. 1 Conceptual representation of the stimulus viewed from the top. The difference of the slant specified by disparity and that specified by perspective was always 30° . These slants were changed systematically from trial to trial according to the subject's response to the previous stimulus so that the subjective slant should get close to and converge at fronto-parallel plane at the end of a stimulus sequence.

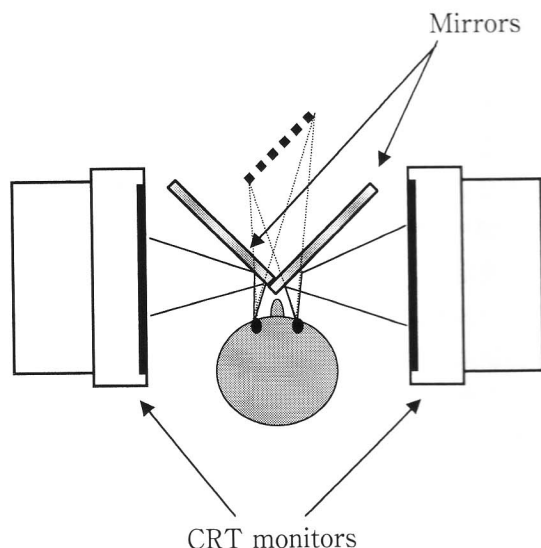


Fig. 2 Schematic representation of the apparatus (top view). Images were presented to the left and right eyes using a Wheatstone stereoscope.

ここで S_p , S_D はそれぞれ遠近法情報と両眼視差が示す傾き, 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. そして, 視距離を変数とし, この違いによる手がかりの重みの変化を調べた. また, 多くの被験者を用いることにより, 手がかりの重みの個人差も調べた.

2.2 実験方法

2.2.1 装置および呈示刺激

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 枚のミラーからなるホ

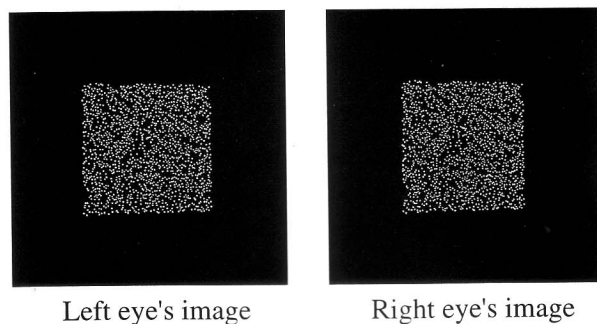


Fig. 3 An example of a pair of random-dot stereograms used in the main experiment. In this example, the slants specified by disparity and perspective are -15° and 15° , respectively (slant is positive when left side is in front).

イトストーン型ステレオスコープであった (Fig. 2). 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, 刺激以外のものはいっさい見えなかった. 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. 3). 刺激の視角サイズは, 平面が前額平行のときに一辺 12.6° であった. 各ドットの大きさは直径約 18.7 arcmin で, 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サイズは常に一定であり, 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. 各ドットの輝度はガウス状の分布をしており, これによりドットの位置を 1/100 画素の単位で仮想的に調節することができた. これは視角 1.6 arcsec の解像度に相当した. モニターまでの実際の視距離は 35 cm であった. 変数とした視距離は 23.3 cm, 35 cm, 70 cm の 3 種類であり, これらは, 左右眼にそれぞれ刺激を呈示する 2 台のモニター上での刺激画像の水平位置の違いによりシミュレートされた. これにより, 調節は画面上に固定されていたと考えられるが, 輻輳角と垂直視差勾配が示す距離が一致しながら操作された.

2.2.2 手順

各試行において, まずはじめに上記 3 種類のいずれかの

視距離をシミュレートした白いドット (2.66×2.66 arc-min) 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、白いドット (固視点) がシミュレートする視距離と同じ視距離で、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、最終的には知覚的に刺激が前額平行面に収束するようにした。30 回の刺激呈示からなる1つの刺激シーケンスにおいて、応答が折り返した点のうち、最後の4点における両眼視差と遠近法情報のそれぞれの平均の傾きと、最終的な知覚である前額平行面すなわち傾き0°を、重みづけ線形結合モデルの式(2)に代入することにより手がかりの重みを求めた。例えば、応答の折り返し点の最後の4点において、両眼視差と遠近法情報が示す傾きの組み合わせがそれぞれ(20°, -10°), (28°, -2°), (22°, -8°), (26°, -4°)であったとすると、それぞれの手がかりが示す傾きの平均は(24°, -6°)となるので、この値と知覚された傾き0°を式(2)に代入すると、両眼視差と遠近法情報の重みはそれぞれ0.2と0.8となる。

シミュレートされた視距離が3種類、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、合計6種類の刺激シーケンスが並行して進行した。6種類のシーケンスの呈示順序はランダムであった。シミュレートされた視距離が同一である刺激シーケンスの結果は平均された。

2.2.3 被 験 者

被験者は著者3名を含む23~38歳の12名(20代10名, 30代2名)で、視力正常もしくは矯正済みであった。また、1名(TA)を除く11名の被験者に対して立体視テストを行った結果、その11名の被験者において正常な立体視能力が認められた。被験者TAに対しては立体視テストを行わなかったが、被験者TAはこれまでにさまざまな両眼視差による奥行き知覚の実験の経験をもっており、その際に立体視能力の異常を示さなかった。そのため、本実験では、被験者TAは正常な立体視能力をもつとみなして実験を行った。

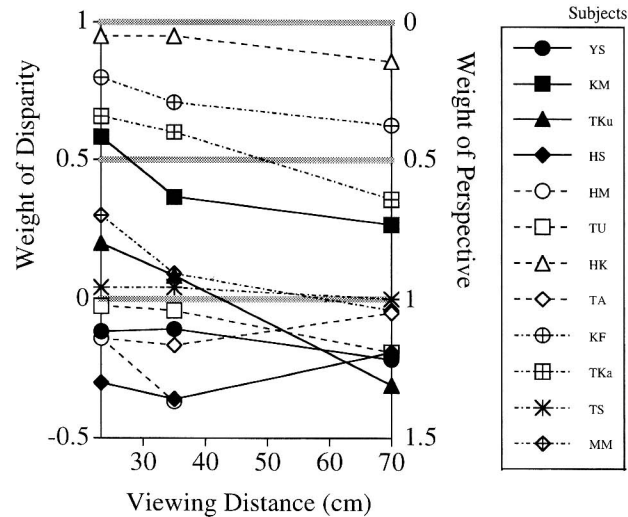


Fig. 4 Results of Experiment 1. The weight of disparity as a function of viewing distance for each subject. For subject HM, in the 70 cm condition, the weights of the depth cues couldn't be calculated, because the response went beyond the range of slant of the stimulus prepared.

2.3 結 果

Fig. 4に、全被験者の各奥行き手がかりの重みを視距離の関数として示す。横軸はシミュレートされた視距離、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いことを示している。各シンボルは各被験者の結果である。被験者1名(HM)において、視距離70 cm条件のデータがプロットされていないのは、この条件において被験者の応答が準備していた刺激の傾き範囲(両眼視差が示す傾き(S_D) $\leq 50^\circ$ かつ遠近法情報が示す傾き(S_P) $\leq 20^\circ$)を超えたためである。

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、視距離の増加に伴って、両眼視差の重みが減少する傾向がみられる。この結果を統計的に確かめるため、繰り返しのない二元配置分散分析(視距離3水準×HMを除く被験者11名)を行った。その結果、手がかりの重みに対する視距離の主効果($p=0.0045$, $F=7.162$)と被験者の主効果($p<0.0001$, $F=42.96$)が認められた。

しかし、両眼視差の重みがゼロよりも小さい被験者が多くみられた。これは単純に考えると、説明することが難しい。なぜなら、両眼視差と遠近法情報が奥行き手がかりとしてのみに利用されたとすると、両眼視差と遠近法情報の統合において、両眼視差が負の寄与をしたことになるからである。以下では、この原因について考察する。

2.4 考 察

両眼視差の重みがゼロよりも小さいということは、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

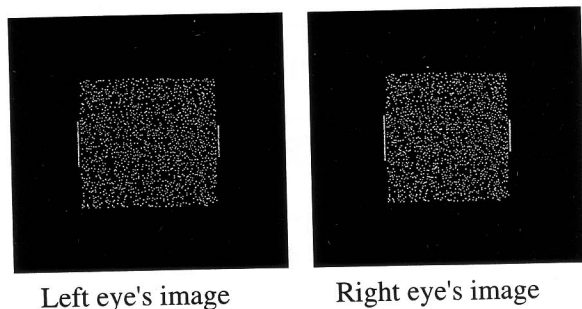


Fig. 5 An example of a stimulus used in the supplemental experiment. In this example, the slants specified by disparity and perspective are -30° and 0° , respectively. The two vertical lines are used to measure the magnitude of size distortion produced by disparity.

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った理由は、両眼視差と遠近法情報が傾きの手がかりとしてのみに用いられると考えると説明が難しい。しかし、両眼視差によって生じる知覚的な大きさ変化を考慮すると、以下のように説明することが可能である。遠近法情報が前額平行を示し両眼視差がある傾きを示す刺激が呈示された場合、前額平行面上において、物理的な像は長方形であるが、知覚的には、両眼視差が奥を示す側の辺が大きく反対側の辺が小さい台形となる。これは大きさの恒常性によって説明される現象である。そして、この両眼視差により生じる主観的な形状の歪みが新たな遠近法情報として用いられると考えると、この遠近法情報が示す傾きは、両眼視差が示す傾きとは反対向きになるので、知覚される傾きが両眼視差が示す傾きと反対向きになることが説明できる。すなわち、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観察したときに、知覚された傾きが両眼視差が示す傾きと反対向きであったのは、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。

この説明では、両眼視差により生じた知覚的な二次元形状が奥行き知覚に寄与することを仮定しているが、これに類似した事例として、同じ形状・視角サイズで異なる視距離にある2つの物体を観察すると、実際の物理的な配置とは異なり、より遠くの物体のほうがより近くに知覚されるという、size-distance paradox とよばれる現象が知られている¹⁶⁾。このことは、知覚距離が輻輳や調節などの直接的な距離手がかりからだけではなく、脳内で処理された二次的な大きさにも依存していることを示していると考えられる。本件の場合でも同様に、両眼視差により生じた二次元的な大きさの変化（二次元形状）により、物理的な二次

元形状と同様に奥行きが知覚されることは考えられることだと思われる。

そこで、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する。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、両眼視差によって生じる主観的な大きさ変化を考慮した新たな重みづけ線形結合モデル (式(3)) により改めて手がかりの重みを求めるためには、主観的な遠近法情報が示す傾き (S_{pD}) を求める必要がある。このため、以下に示す補足実験を行った。

2.4.1 補足実験

補足実験では、主観的な遠近法情報を示す傾き (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の傾き面上にある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、被験者に、この2本の線分の主観的な見えの長さを同じにするように教示した。ここで、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。

2.4.1.1 補足実験の実験方法

呈示刺激は主実験と同じランダムドット面（前額平行のときに $12.6^\circ \times 12.6^\circ$ ）と、その左右両端に接した太さ 18.7 arcmin の2本の垂直な白線であった (Fig. 5)。2本の白線の輝度は水平方向にガウス状の分布をしていた。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

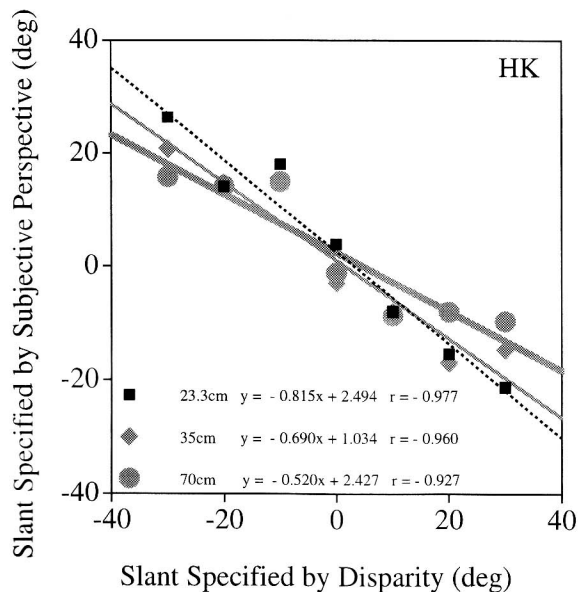


Fig. 6 Results of the supplemental experiment. The slant specified by the subjective perspectives as a function of slant specified by disparity for each viewing distance.

示す傾きの面上にあった。

各試行において、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10～30秒程度で調整が終了した。

42条件(7(両眼視差が示す傾き)×3(シミュレートされた視距離)×2(参照用の白線と応答用の白線の相対的な位置))を1セッションとして、各被験者ごとに4セッション行った。各セッション内の刺激呈示順序はランダムであった。

2.4.1.2 補足実験の結果と考察

視差をもつ2本の棒の見える長さを等しく調整したときの物理的な長さの比は、この2本の棒の物理的な長さを等しくしたときの主観的な長さの比の逆比になる。また、この主観的な長さの比を視角的な大きさの比と考えるなら、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を求めることができる。

Fig. 6に、一例として被験者HK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。プロット点の各シンボルは、シミュレートされたそれぞれの視距離(23.3cm, 35cm, 70cm)での結果である。破線、細実線、太実線はそれぞれのデータの回帰直線である。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

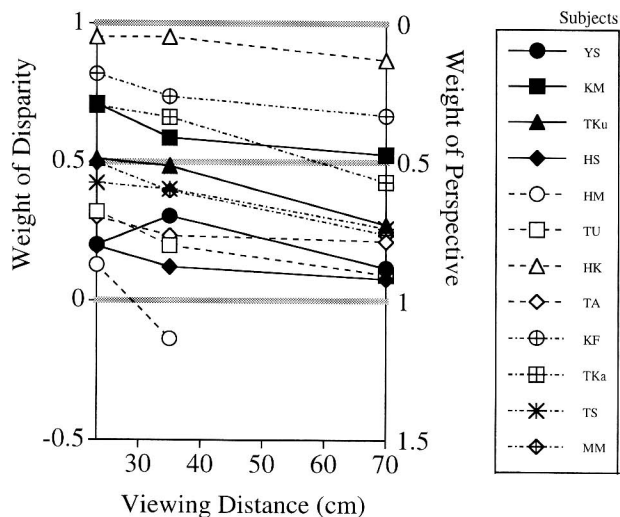


Fig. 7 Corrected results of Experiment 1. The weight of disparity as a function of viewing distance for each subject.

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 $-0.993 < r < -0.655$ であった。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。 α は比例定数であり、Fig. 6の回帰直線の傾きとして表れている。そして、補足実験の結果から、各被験者、各視距離で求めた α と主実験の結果を式(4)に代入し、各手がかりの重みを改めて求めた。

Fig. 7に、式(4)を用いて求めた各手がかりの重みを示す。各軸と各シンボルはFig. 4と同様である。これより、12名の被験者のうち11名において、両眼視差の重みが0以上になることがわかる。また、多くの被験者において、視距離が増加するにつれて両眼視差の重みが減少した。繰り返しのない二元配置分散分析(視距離3水準×HMを除く被験者11名)を行った結果、手がかりの重みに対する視距離の主効果が認められた($p < 0.0001$, $F = 34.32$)。これは、手がかり統合過程における手がかりの重みが、手がかりの物理的な精度に依存して決定されていることを示唆する。また、手がかりの重みには被験者間で有意な差があった($p < 0.0001$, $F = 77.64$)。これは、手がかり統合過程における手がかりの重みが、手がかりの物理的な精度以外の要因にも依存して決定されていることを示唆する。

3. 実験 2：経験の指標の測定

3.1 実験原理

実験 1 で得られた手がかりの重みの個人差が被験者の過去の何らかの経験の違いによるものであることを示すためには、各被験者の過去の視覚経験を推定する必要がある。しかし、各被験者の過去の経験を直接的に定量化することはできない。そこで筆者らは、各被験者の過去の経験の指標となり、現在測定することができるもののひとつとして調節遠点を用いた。一般的に近距離での作業は近視の原因であるという認識があり¹⁷⁾、先行研究からも、近距離観察を継続することにより調節遠点が近くなり^{18,19)}、また読書量が多い子供ほど近視であることが報告されている^{20,21)}。これらのことから、調節遠点が被験者の過去の視距離の偏りに関するある程度の指標になると考えられる。

また、各被験者の過去の視距離の偏りに関するもうひとつの指標として、読書時の視距離を用いた。日常生活では、本や新聞を読む機会は比較的多く、その際の視距離は習慣になっていると思われる。このため、読書時の視距離が各被験者の過去の視距離の偏りの指標になると考えられる。

3.2 実験方法

実験 2 は、実験 1 のすべての視距離条件において手がかりの重みを求めることができた被験者 11 名において行われた。

調節遠点の測定は、他覚的調節力測定装置 (Nidek accommodometer AA2000) により、各被験者において両眼それぞれ 5 回ずつ裸眼で行われた。近距離で行われる日中の仕事により一時的に調節遠点が近くなるのを防ぐた

め、測定は、各被験者が日常の作業を始める前に行われた。

読書中の視距離を測定する実験においては、被験者が自然な状態で読書資料を読む際の資料と眼の距離を測定した。読書資料は小説の一部分であり、プラスチック製の下敷きに張りつけられた 21 cm×29.7 cm の白色の用紙に黒字で明朝体 12 ポイントで印刷されていた。文字数は 1047 文字であった。内容はやや難しいものであったが、繰り返し読むことにより理解できる程度のものであった。被験者は、明るい部屋にある机に向かって、指定された位置に真っ直ぐに椅子にこしかけ、自由な姿勢で資料を黙読した。読書時間は無制限で、被験者は資料の内容をよく理解するまで熟読した。読書後、資料の内容に関する簡単なテストが行われた。これは、被験者には日常時と同じように内容を理解するために読書をしてもらい、読書中の姿勢を意識させないためのものであった。テストは二者択一の問題で 5 問出題された。その結果、被験者 11 名中 10 名が全問正解で、残りの 1 名が 4 問正解であった。このことから、被験者は、読書に集中していたと考えられる。被験者が読書をしている最中に、デジタルカメラ (Sony Cyber-shot DSC-P5) により被験者と資料全体を各被験者の左側から撮影した。この撮影により得られた画像上での被験者の眼と資料の距離を、校正画像と比較することにより、各被験者の読書中の視距離を求めた。校正画像は、被験者の正中面に相当する位置に、5 cm 間隔の平行線が印刷された用紙を配置し、デジタルカメラで撮影したものであった。

3.3 結果

Fig. 8 に、全被験者の調節遠点の測定結果を示す。横軸

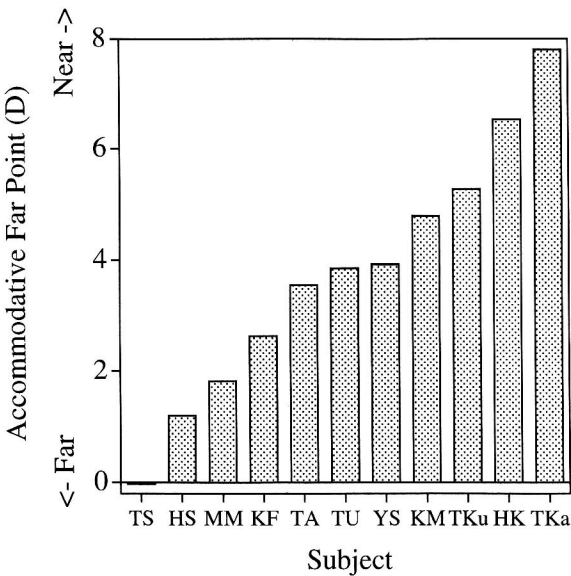


Fig. 8 Accommodative far point for each subject.

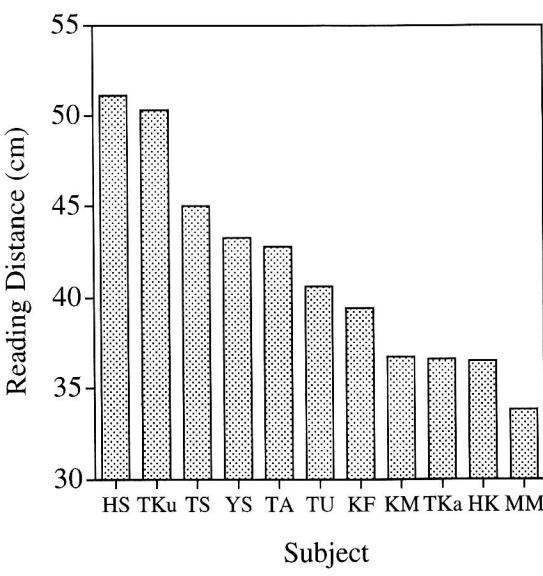


Fig. 9 Reading distance for each subject.

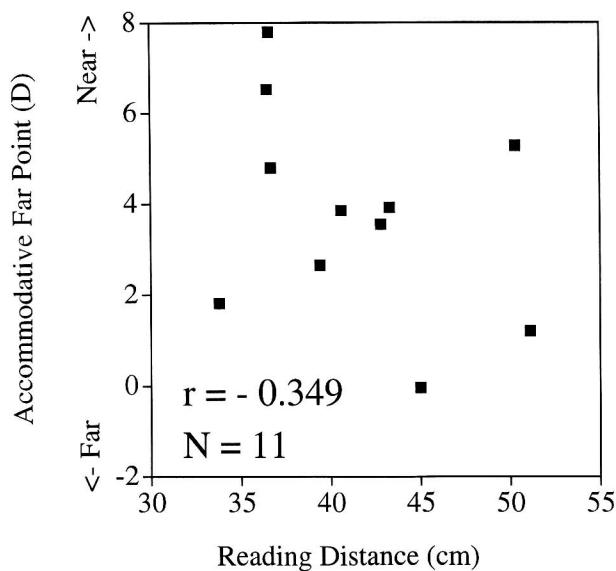


Fig. 10 The relation between the accommodative far point and the reading distance.

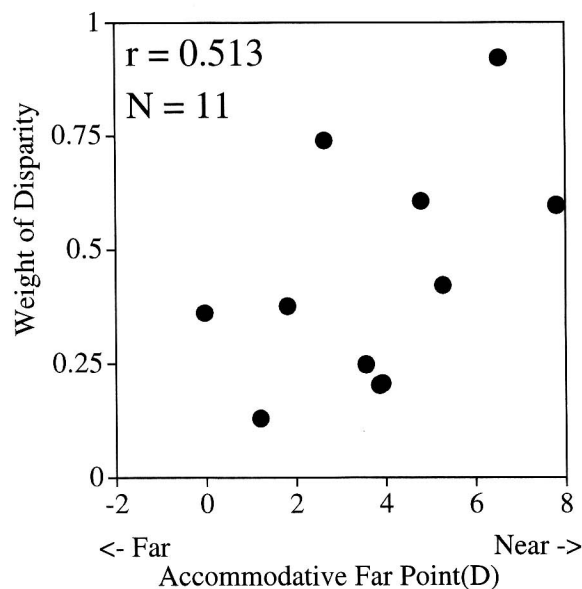


Fig. 11 The relation between the accommodative far point and the weight of disparity cue.

は被験者、縦軸は被験者から調節遠点までの距離（ジオプター表示）の左右眼の平均であり、縦軸の値が大きいほど調節遠点までの距離が小さい、つまり近視の度合いが強いことを示している。この結果より、調節遠点には大きな個人差が存在することがわかる。

次に、Fig. 9 に全被験者の読書中の視距離の測定結果を示す。横軸は被験者、縦軸は各被験者の読書中の視距離である。これより、読書中の視距離にも個人差が存在することがわかる。

また、Fig. 10 に各被験者の調節遠点と読書中の視距離の関係を示す。横軸は読書中の視距離、縦軸は調節遠点であり、各プロット点は各被験者の結果である。片側無相関検定を行った結果、両者の間に有意な相関はなかった ($r = -0.349$, $p > 0.05$)。

4. 手がかりの重みと過去の経験の指標との比較（実験 1 と実験 2 の結果の比較）

各被験者の手がかりの重みとその人の過去の視距離の偏りに依存するかどうかを調べるため、全被験者の手がかりの重みと調節遠点の関係を調べた。その結果を Fig. 11 に示す。横軸は実験 2 で得られた各被験者の調節遠点であり、縦軸は実験 1 で得られた各被験者のすべての視距離条件での両眼視差手がかりの重みの平均である。各プロット点は、各被験者の結果である。これをみると、5% 水準では有意な相関はないが、両者には正の相関傾向があることがわかる（片側無相関検定, $r = 0.513$, $p = 0.0533$ ）。

次に、全被験者の手がかりの重みと読書中の視距離の関

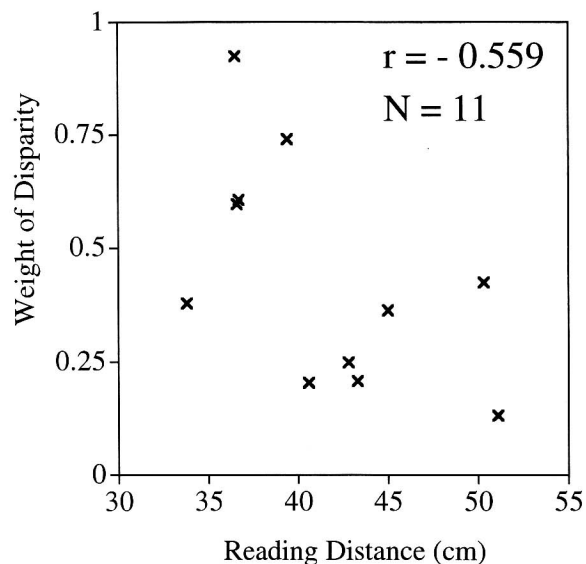


Fig. 12 The relation between the reading distance and the weight of disparity cue.

係を Fig. 12 に示す。横軸は実験 2 で得られた各被験者の読書中の視距離であり、縦軸は実験 1 で得られた各被験者のすべての視距離条件での両眼視差手がかりの重みの平均である。各プロット点は、各被験者の結果である。片側無相関検定を行った結果、両者には負の相関があった ($r = -0.559$, $p < 0.05$)。

調節遠点と読書中の視距離を過去の視距離の偏りの指標と考え、Fig. 11 と Fig. 12 より、過去の視距離が近方に偏っている被験者ほど、両眼視差の重みが大きくなる傾向があると考えられる。これより、奥行き手がかり統合過

程における手がかりの重みが、過去に偏った視距離で観察していたという経験に依存して決定されていることが示唆される。

5. 総合考察

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いて、両眼視差の相対的な重みは視距離の増加につれて減少することがわかった (Fig. 7)。また、両眼視差の相対的な重みには大きな個人差がみられた (Fig. 7)。実験2では、各被験者の調節遠点と読書中の視距離のそれぞれにおいて個人差がみられた (Fig. 8, Fig. 9)。また、両者には相関がみられなかった (Fig. 10)。さらに、実験1と実験2の結果の比較 (Fig. 11, Fig. 12) により、両眼視差の相対的な重みは、過去の視距離の指標である調節遠点と読書中の視距離のそれぞれとの間に相関傾向がみられた。これらより、奥行き手がかり統合過程における手がかりの信頼性が、視距離すなわち刺激の物理的な特性と、経験すなわち観察者側の要因に依存して決定されていることが示唆された。以下に、これらについてそれぞれ詳しく考察する。

5.1 手がかりの重みと視距離

実験1の結果において、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は視距離の増加につれて減少した (Fig. 7)。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視環境に依存して決定されていることを示している。このようなことが起こるのは、視環境が変化すると、特定の手がかりにノイズがのったときにその手がかりから推定される奥行きの精度、すなわち、その手がかりから推定される奥行きのロバスト性が変化し、それにより、その手がかりの信頼性が変化するためであると考えられる。本研究のように、奥行き手がかりとして両眼視差と遠近法情報が存在し、刺激の視角サイズが視距離によらず一定の場合、一定の傾きに対する両眼視差の大きさは視距離に反比例して減少するが、遠近法情報は一定のままである。

実験1の主実験では、シミュレートする視距離を変化させるために、モニター上での刺激の水平位置をずらしたので、常にモニター上に固定されていたと思われる調節と、シミュレートされた視距離に応じて変化した輻輳との間にコンフリクトが生じていた。そのため、このコンフリクトのために両眼視差が利用されなくなったという可能性も考えられる。しかし、実験1の主実験では、シミュレートされた視距離が35 cmのときに調節と輻輳が一致していたので、もし調節と輻輳のコンフリクトのために両眼視差が

利用されなくなったのであれば、シミュレートされた視距離が35 cmのときの両眼視差の重みがその他の視距離条件での両眼視差の重みよりも大きくなるはずである。しかし、実験結果 (Fig. 7) をみると、多くの被験者で、調節と輻輳との間のコンフリクトが存在するシミュレートされた視距離23.3 cmの条件のときのほうが、コンフリクトが存在しない35 cmの条件のときよりも両眼視差の重みが大きい。このことから、少なくとも両眼視差の重みは、調節と輻輳の間のコンフリクトの大きさだけに依存して変化したわけではないと考えられる。

この、手がかりの重みが視環境に依存しているという性質は、過去の研究でも報告されている。Johnstonら¹⁰⁾は、シミュレートされた視距離が50 cmと200 cmの2条件で、両眼視差とテクスチャーにより三次元的な形状が定義され、軸が前額平行面内にある水平の楕円柱を呈示した。そして、手がかりが示す奥行きが互いに異なる条件において、その楕円柱の高さの半分と同じ大きさに見える奥行き量を求め、そのときの両眼視差の重みを求めた。その結果、全4人の被験者において、視距離50 cmのときよりも200 cmのときのほうが両眼視差の重みが小さいと報告している。また、Johnstonら²²⁾は同様の実験を、両眼視差と運動性手がかりについて実験したところ、同じ傾向の結果が得られたと報告している。Youngら²³⁾は、刺激の奥行き判断タスクにおいて、テクスチャーと運動性手がかりの一方にノイズをのせるとノイズがのった手がかりの重みが減少すると報告している。本実験では、両眼視差と遠近法情報で定義された平面の傾き知覚について、これまでよりも近距離まで (23.3 cm, 35 cm, 70 cm)、また多くの被験者 (12名) で調べることで、視距離の増加に伴って両眼視差の重みが減少するという性質を、より広い条件で確かめたことになる。ただし、視距離の増加に伴い両眼視差の重みが減少したという結果は、重みづけ平均モデルの式 (4) における両眼視差が示す傾き (S_0) の減少を示す可能性もあるが、このモデルの式からは両者を分離することは難しい。

5.2 手がかりの重みの個人差と過去の経験

実験1において、両眼視差の相対的な重みには大きな個人差がみられた (Fig. 7)。すべての被験者が同一条件下で刺激を観察したにもかかわらず両眼視差の重みが被験者間で異なったということは、奥行き手がかりの重みが、その物理的特性だけでなく観察している被験者側の要因にも依存して決定されていることを示す。これまでも奥行き手がかりの重みにおける個人差の存在を報告した研究があるが^{10,11)}、その理由としては、立体視機能の欠如が挙げられ

ている¹²⁻¹⁴⁾。しかし、今回の実験に参加した被験者は1名を除き全員で立体視機能が正常であることが確認されているため、立体視機能の欠如によって今回みられた両眼視差の重みの個人差を説明することはできない。それでは、この個人差の原因は何だろうか。前述したように、実験1で得られた各被験者の両眼視差の重みは、実験2で得られた各被験者の調節遠点と読書中の視距離のそれぞれと相関傾向があること (Fig. 11, Fig. 12)、そして調節遠点と読書中の視距離が過去の経験における視距離の偏りの指標と考えられることから、手がかりの重みの個人差は、過去の経験における視距離の偏りの個人差により生じた可能性が考えられる。これはいい換えると、奥行き手がかり統合過程における手がかりの信頼性が、長期的に特定の視距離という環境に適応するという経験により変化する可能性を示している。

高齢でかつ調節遠点が遠い被験者の場合、視距離 35 cm では近すぎて調節機能が追いつかなかったために両眼視差が成立しにくかったので、両眼視差の重みが小さかった可能性も考えられる。しかし、本実験の被験者には高齢者はおらず、調節遠点は最も遠い被験者でも約 0 ジオプターであり、また全被験者の内観報告により刺激がぼやけて見えることはなかったため、この可能性は低いと考えられる。また、実験1の主実験においては、ひとつの試行の中で、ランダムドット刺激を呈示する前に、その刺激と同じシミュレート距離に固視点が1.5秒間呈示された。シミュレートした視距離が試行ごとに変化したため、固視点の呈示直後は固視点は両眼融合しなかったが、呈示の途中から融合して観察され、その後呈示されたランダムドット刺激は呈示中ずっと融合して観察されたことが被験者の内観報告より確認されている。以上より、両眼視差が成立しにくかったために手がかりの重みに個人差が生じたとは考えにくい。

しかし一方で、両眼視差の相対的な重みと過去の視距離の指標との間に相関傾向がみられたことから、もともと両眼視差の相対的な重みが生得的に決定されていて、それにより各個人が両眼視差の相対的な重みに適した視距離で観察することを促された可能性も考えられるので、両眼視差の相対的な重みと過去の視距離との因果関係に関してはさらなる研究が必要であると考えられる。

5.3 過去の視距離の偏りの指標

本研究では、調節遠点を過去の視距離の偏りの指標として扱ったが、これには少し注意が必要である。その理由はまず第一に、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

があるからである^{24,25)}。第二に、近視矯正用の眼鏡の長期的な着用により、調節遠点が近方に移動する可能性がある²⁶⁾。この場合、近距離観察をしている場合とは異なり、両眼視差は物理的に精度が高かったわけではない。そのため、ふだん近視矯正用の眼鏡を着用している被験者の場合には、調節遠点が過去の経験における両眼視差の有効性の指標とならない可能性も考えられる。

しかし、前述したように、近距離観察を継続することにより調節遠点が近くなり^{18,19)}、また読書量が多い子供ほど近視であることが報告されている^{20,21)}ため、少なくともある程度は調節遠点が視距離の偏りを反映すると考えられる。さらにつけ加えると、読書量と近視の関係は、大人よりも子供のほうが強いことが報告されている²⁷⁾。これらのことから、調節遠点は、特に若年期における視距離の偏りを反映すると考えられる。また、読書中の視距離も過去の視距離の偏りの指標として扱ったが、これは過去の視距離経験の偏りの指標というよりも、むしろ現在の習慣となっている視距離の指標であろう。調節遠点と読書中の視距離がそれぞれ両眼視差の重みとの間に相関傾向があるにもかかわらず、両者の間には明確な相関がないのは、それらが、このように異なる時期における視距離を反映していることが原因なのかもしれない。

いずれにしても、過去の経験を直接的に測定するのは不可能であり、その確かな指標を見つけることも困難であることから、経験による知覚の変化を調べるためには、短期的な学習による知覚の変化を調べる方法が有効であろう^{15,28,29)}。

5.4 両眼視差による傾きの逆転現象

実験1の主実験では、両眼視差の重みが0以下であった被験者が多かった (Fig. 4)。これは、例えば遠近法情報で前額平行を示し、両眼視差が30°の傾きを示したときに、被験者が両眼視差が示す傾きとは反対向きの面の傾きを知覚したことを意味する。この現象はこれまでもいくつか報告されており^{30,31)}、実験1の考察で述べたように、大きさの恒常性のメカニズムから説明が可能である。すなわち、日常の状況では多くの場合両眼視差と遠近法情報は一致しているため、奥行き方向に傾いた正方形を考えた場合、手前側の部分の網膜像は奥側の部分の網膜像よりも大きくなる。しかし、実験室的に両眼視差がある傾きを示し、遠近法情報が前額平行を示す平面では、両眼視差により手前に呈示された面の部分は日常とは異なり網膜上では大きくなる。つまり、手前側の辺が小さい台形の面をシミュレートしていることになる。そして、この形状の歪みが新たに脳内で奥行き手がかりとしての遠近法情報とし

て抽出され、最終的に両眼視差によって示される傾きとは逆の傾きが知覚されてしまうのである。このような説明は、知覚される angular size が両眼視差により変化することに相当する^{32,33)}。

本研究では、このような理由により両眼視差の重みが0以下になったと考え、両眼視差が刺激の二次元的な形状に与える影響を考慮した両眼視差と遠近法情報の新たな統合モデルを提案した。そして、このモデルに基づいて両眼視差の重みを求め直したところ、両眼視差の重みがほとんどの被験者においてゼロ以上になった (Fig. 7)。また、実験1の主実験で、両眼視差の重みがゼロ以下であった被験者は視距離が大きい (70 cm) ときに最も多かった。この結果は Gillam³⁰⁾ の報告と一致している。この理由は、視距離が大きくなるにつれて、両眼視差の信頼性が小さくなることにより奥行き手がかりの統合過程における両眼視差の重みが減少し、相対的に遠近法情報の重みが大きくなるためであると考えられる。このような傾き逆転現象の性質、論理の妥当性、新たな統合モデルによる重みの妥当性から、上記の理論によって傾き逆転現象が説明できると考えられる。

6. ま と め

奥行き手がかり統合過程における手がかりの重みは、環境と経験の両方に依存することが示唆された。また、奥行き手がかりの重みには大きな個人差が存在することがわかり、経験の個人差がその原因のひとつであることが示唆された。しかし、前述のように、本研究で経験における視距離の偏りの指標として扱った調節遠点と読書中の視距離には問題点もあるため、さらなる研究が必要である。

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) M. Sato and I. P. Howard: "Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast," *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.
- 12) 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," *Optometry Vision Sci.*, **75** (1998) 433-444.
- 13) 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," *Optometry Vision Sci.*, **66** (1989) 355-362.
- 14) R. van Ee and W. Richards: "A planar and a volumetric test for stereoaomaly," *Perception*, **31** (2002) 51-64.
- 15) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bulthoff: "Touch can change visual slant perception," *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
- 16) H. Ono, M. Paul and L. Mitson: "Size-distance paradox with accommodative micropsia," *Percept. Psychophys.*, **15** (1974) 301-307.
- 17) D. A. Goss: "Nearwork and myopia," *Lancet*, **356** (2000) 1456-1457.
- 18) S. M. Ebenholtz: "Accommodative hysteresis: A precursor for induced myopia?" *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **24** (1983) 513-515.
- 19) R. K. Tan and D. J. O'Leary: "Stability of the accommodative dark focus after periods of maintained accommodation," *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **27** (1986) 1414-1417.
- 20) L. Wong, D. Coggon, M. Cruddas and C. H. Hwang: "Education, reading, and familial tendency as risk factors for myopia in Hong Kong fishermen," *J. Epidemiol. Community Health*, **47** (1993) 50-53.
- 21) S. M. Saw, M. Z. Zhang, R. Z. Hong, Z. F. Fu, M. H. Pang and D. T. Tan: "Near-work activity, night-lights, and myopia in the Singapore-China study," *Arch. Ophthalmol.*, **120** (2002) 620-627.
- 22) E. B. Johnston, B. G. Cumming and M. S. Landy: "Integration of stereopsis and motion shape cues," *Vision Res.*, **34** (1994) 2259-2275.
- 23) 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.
- 24) B. E. Robinson: "Factors associated with the prevalence of myopia in 6-year-olds," *Optometry Vision Sci.*, **76** (1999) 266-271.
- 25) A. Wilson and G. Woo: "A review of the prevalence and causes of myopia," *Singapore Med. J.*, **30** (1989) 479-484.

- 26) A. Medina: "A model for emmetropization. The effect of corrective lenses," *Acta Ophthalmol.*, **65** (1987) 565-571.
- 27) S. M. Saw, W. H. Chua, C. Y. Hong, H. M. Wu, W. Y. Chan, K. S. Chia, R. A. Stone and D. Tan: "Nearwork in early-onset myopia," *Invest. Ophthalmol. Visual Sci.*, **43** (2002) 332-339.
- 28) 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.
- 29) R. A. Jacobs and I. Fine: "Experience-dependent integration of texture and motion cues to depth," *Vision Res.*, **39** (1999) 4062-4075.
- 30) B. Gillam: "Changes in the direction of induced aniseikonic slant as a function of distance," *Vision Res.*, **7** (1967) 777-783.
- 31) R. S. Allison, I. P. Howard, B. J. Rogers and H. Bridge: "Temporal aspects of slant and inclination perception," *Perception*, **27** (1998) 1287-1304.
- 32) H. Kaneko and K. Uchikawa: "Perceived angular and linear size: The role of binocular disparity and visual surround," *Perception*, **26** (1997) 17-27.
- 33) D. McCready: "On size, distance, and visual angle perception," *Percept. Psychophys.*, **37** (1985) 323-334.