

両眼網膜像差で定義された曲面における知覚された奥行き の反転

佐藤 雅之・北崎加代子

北九州市立大学国際環境工学部情報メディア工学科 〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1

Depth Reversal in a Curved Surface Defined by Binocular Disparity

Masayuki SATO and Kayoko KITAZAKI

Department of Information and Media Sciences, Faculty of Environmental Engineering, University of Kitakyushu, 1-1 Hibikino, Wakamatsu-ku, Kitakyushu 808-0135

In order to reveal the extent of the anisotropy and individual differences in stereoscopic depth perception, stereo thresholds were measured for 18 observers. Sinusoidal disparity modulation along a horizontal or a vertical meridian was introduced onto a random dot surface subtending $20^\circ \times 20^\circ$. The spatial frequency of disparity modulation was 0.05 c/deg. Some observers showed very prominent anisotropy while the others showed similar sensitivities in both directions. In addition, a matching experiment for suprathreshold stimuli was executed for the observers who showed prominent anisotropy. Reversed depth was perceived by two of the observers for the surfaces with the disparity modulation along a horizontal meridian. As a whole, the well-known anisotropy was confirmed but it also appears that very prominent individual differences exist in perceived depth for the gently curved surfaces.

Key words: stereopsis, binocular disparity, depth reversal, anisotropy, individual difference

1. はじめに

人間の両眼網膜像差による奥行きの知覚には異方性があるといわれている¹⁻⁴⁾。一般に、上下方向の面の傾斜（上に行くほど近い、あるいは遠い）に比べて、左右方向の面の傾斜（右に行くほど近い、あるいは遠い）に対する感度は低いとされている。BradshawとRogers¹⁾は、ランダムドットパターンに正弦波状の網膜像差変調を与え、立体閾の空間周波数特性を測定している。高空間周波数領域では波の方向による感度の違いはみられなかったが、低空間周波数領域では顕著な差があることを示している。また、RogersとGraham²⁾は、網膜像差による奥行きのCornsweet錯視における奥行きのエッジの方向による効果の違いを報告している。エッジが水平の場合に比べて、垂直の場合に顕著な錯視効果が得られるとしている。

しかし、最近の研究³⁻⁵⁾は、網膜像差による奥行き知覚の異方性に大きな個人差があることを示している。著者らのこれまでの研究^{4,5)}は、奥行きのCornsweet錯視におけ

る異方性の存在に疑問を呈している。26名⁴⁾もしくは33名⁵⁾の被験者について水平と垂直の2つのエッジ方向における錯視量を比較したところ、RogersとGraham²⁾が示したのと同様の異方性を示す被験者もいるが、反対の異方性を示す被験者も少なからずおり、全体としては異方性があるとはいえないという結果を示している。BradshawとRogers¹⁾が報告した立体閾の空間周波数特性の異方性は、Cornsweet錯視の異方性を説明する基本的な視覚特性であると考えられる⁴⁾。BradshawとRogersの研究では6名の被験者全員が一致して異方性を示しているが、奥行きのCornsweet錯視に関する研究結果^{4,5)}をみると、立体閾の異方性にも個人差があり、より多くの被験者について詳細に測定すれば違った結果が得られるのではないかという疑問が生じる。

本研究の第1の目的は、この疑問に答えることである。実験1としてBradshawとRogersの研究の追試を行った。本研究では、18名の被験者が実験に参加した。感度

E-mail: msato@env.kitakyu-u.ac.jp

の違いが顕著に表れると考えられる 0.05 c/deg の空間周波数を選択し、2つの網膜像差変調の方向について立体閾を測定した。これまでに報告されているのと同様の異方性を示す被験者がいる一方で、異方性を示さない被験者もいることが明らかになった。さらに興味深いことに、幾何学的に予測されるのとは反対の奥行きを知覚する被験者がいることが明らかになった。網膜像差による奥行き知覚の反転という現象はこれまでも報告されているが^{6,7)}、それらは平面の傾斜に限られており、曲面でも反転が起こるとい報告は例がないと思われる。本研究の第2の目的は、この現象についてさらに詳しく調べることである。実験2では、面の凹凸が正しく知覚される確率を網膜像差変調の振幅の関数として測定した。実験3では、知覚された面の形状をマッチング法により測定した。また、これらの実験とは別に、立体視に関する基礎的なデータとして(1)立体視力⁸⁾および(2)網膜像差と遠近法情報の重み付け^{9,10)}をすべての被験者について測定した。

本研究の目的は、これらの実験により、網膜像差による奥行き知覚の異方性と反転およびその個人差の程度を詳細に明らかにすることである。網膜像差による奥行き知覚の異方性や反転は、人間の奥行き知覚のメカニズムを明らかにするための重要な手がかりであるが、ここで報告する実験の結果からも明らかのように、網膜像差による奥行きの知覚には非常に大きな個人差がある。異方性や反転の要因を詳しく調べるためには、そのような特性を顕著に示す被験者を探し出すことが先決である。ここで報告する実験の結果は、この問題に踏み込むための重要な基礎データになるものと考えられる。

2. 実験装置

VSG 2/5 グラフィックスカード (Cambridge Research Systems 社) を用いて計算機により生成した刺激パターンを 21 インチの CRT モニター (ソニー, GDM-F520) に呈示した。被験者は、あご台により頭部を固定し、液晶シャッターメガネ (StereoGraphics 社, CrystalEyes 3) を用いた時分割立体方式により立体画像を観察した。観察距離は 57 cm であった。画像の空間解像度は 1024×768 ピクセルであった。1 ピクセルの大きさは 2.3 arcmin であった。モニターのフレームレートは 120 Hz であった。したがって、右眼用と左眼用のパターンはそれぞれの眼に毎秒 60 フレームずつ呈示された。左右の画像のクロストークを軽減するために、残光時間の短い赤色の蛍光体のみを用いて刺激を呈示した。また、赤い刺激と背景のコントラストを高めるために、被験者の目の前にオレンジ色のフィル

Table 1 Stereo thresholds and weights of disparity of 18 observers.

Participants	Stereo threshold [arcsec]	w_d	
		H	V
MS	10.1	0.93	0.98
KU	10.6	0.93	0.97
ENo	29.6	0.91	0.85
SS	8.7	0.98	0.67
HM	10.2	0.90	0.64
KK	6.7	0.90	0.15
AN	6.8	0.73	0.29
AK	16.4	0.55	0.40
MT	10.9	0.82	0.03
HO	15.2	0.48	0.23
EU	13.2	0.60	-0.12
YW	38.2	0.43	0.03
CM	23.9	0.38	0.00
ENa	5.7	0.22	0.06
TM	21.9	0.03	0.16
YI	40.0	0.18	-0.08
HK	14.8	0.15	-0.33
HJ	11.2	-0.28	-0.24

ターを置き、被験者の視野を覆った。刺激の輝度は、液晶シャッターを開閉しながらオレンジ色のフィルターを通して測定した実効的な値が 1.8 cd/m² であった。黒い背景の輝度は 0.0 cd/m² であった。実験は暗室の中で行われ、被験者には刺激以外のものは何も見えなかった。

3. 被験者

20代前半から30代後半までの18名(男性6名,女性12名)が被験者として実験に参加した。著者2名を含む3名の被験者は実験の目的をよく理解していたが、それ以外の被験者は実験の目的を知らなかった。すべての被験者は正常な視力もしくは矯正視力を有していた。

本実験に先がけて立体視に関する2種類の予備的な検査を行った。Table 1に測定結果を示す。第1の検査は立体視力の検査であった。CoutantとWestheimer⁸⁾のhexagon dot stereo testを参考にして同様の検査を行った。この検査では、Fig. 1のように7個の光点が呈示され、中央の光点に交差もしくは非交差の網膜像差が与えられる。光点の間隔は20 arcminで、1つの光点は σ の値を2.3 arcminとするガウス関数状の輝度分布をもっていた。被験者は中央の光点が周辺に比べて近くに見えるか遠くに見えるかを応答する。ここでは、上下法により網膜像差量を変化させ、75%の正答率が得られる網膜像差量をプロビット解析により推定し、閾値とした。

第2の検査として、網膜像差と遠近法的な奥行き手がかりの情報統合の際に各被験者がそれぞれの情報に与える重み w_d および $w_p (=1-w_d)$ を測定した^{9,10)}。この手がかり

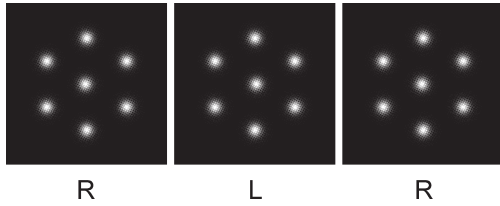


Fig. 1 Stimulus configuration used to determine stereo thresholds. Crossed or uncrossed disparity was given to the central dot. The dot interval was 20 arcmin.

の重み付けには個人差があり^{9,11)}、奥行き知覚の個人差を決定する基礎的な要因であることが示唆されている¹¹⁾。ここでは、Ernst ら⁹⁾と同様の方法を用いた。Fig. 2のようなパターンに網膜像差と遠近法的な奥行き手がかりを、それぞれの情報による平面の傾斜角が互いに30°ずれるように与えた。被験者はパターンが前額平行面上に知覚されるようにこれらを調整した。パターンの大きさについては、網膜像差と遠近法的な手がかりによる傾斜角が0°の場合における高さと同幅が7.5°であった。水平な軸を中心にして面が傾斜する条件(H)と垂直な軸を中心とする条件(V)について8回ずつの試行を行った。 w_d が1に近い被験者は網膜像差を重視して奥行きを判断しており、0に近い(すなわち w_p が1に近い)被験者は遠近法的な情報を重視しているといえる。

しかし、実際には、 w_d が負の値を示すケースが少なからずみられる。これは、知覚される奥行きが網膜像差と遠近法的な奥行き手がかりの加重平均で決まるとする理論の限界を表している。この網膜像差が負の寄与をもつという現象は、これまでにも報告例があるよく知られた現象である^{9,10)}。Ernst ら⁹⁾は、 w_d が負になる頻度を減少させるために、刺激を観察する際に円形の窓を用いるという工夫を加えている。坂野ら¹⁰⁾は、網膜像差が主観的な遠近法情報を生じることにより間接的に負の寄与をしたと考え、その効果の大きさを別の実験により評価している。ここでは、簡単のために、単純な実験により得られたデータをそのまま示している。

4. 実験1：低空間周波数領域における両眼網膜像差変調に対する感度の異方性と個人差

4.1 目的

Bradshaw と Rogers は、両眼網膜像差変調に対する感度には、低空間周波数領域において異方性があることを報

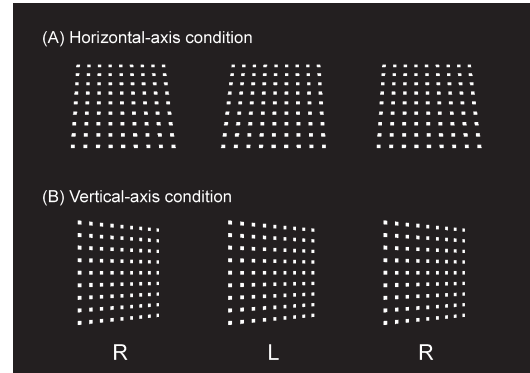


Fig. 2 A grid pattern used to determine each observer's weights given to disparity and perspective depth information.

告している¹¹⁾。しかし、1章で述べたように、その後の研究からこの異方性には個人差があることが予想される。実験1の目的は、この予想を確かめることである。

Bradshaw と Rogers は、0.0125~3.2 c/deg の範囲で立体閾を測定している。 x 軸方向に網膜像差を変化させる縦縞(vertical corrugation)条件と y 軸方向に変化させる横縞(horizontal corrugation)条件の両方で、0.5 c/deg付近に感度のピークをもつバンドパス型の感度関数が得られている。1 c/degよりも高周波の領域では感度に違いはみられないが、低周波の領域では横縞条件において一貫して高い感度が得られている。ここでは、空間周波数を0.05 c/degにしぼり、縦縞条件と横縞条件における感度を多くの被験者で比較した。

4.2 刺激と手続き

Fig. 3に実験1で用いた刺激をステレオグラムにより示す。8191個のドットを一辺20°の正方形の範囲内にランダムな配置で提示した。このとき、刺激の空間解像度を擬似的に向上させるために、アンチエイリアシングを行った^{*1)}。

横縞条件では、Fig. 3(A)のように y 軸方向に網膜像差の変調を与えた。縦縞条件では、Fig. 3(B)のように x 軸方向に与えた。刺激パターンの中心を原点とする座標 (x, y) における網膜像差量 d は横縞と縦縞の条件において、それぞれ

$$d = A \cos(2\pi fy), \quad d = A \cos(2\pi fx)$$

の式により記述される。ここで A は網膜像差変調の振幅、 f は空間周波数を表している。空間周波数は0.05 c/degであった。

*1 黒い背景上に1ピクセルの大きさをもつドットを描画するために、実際には2行2列の4つのピクセルの輝度を256階調で調整し、その輝度比を操作することにより、ピクセルサイズ以下の刺激提示位置制御を擬似的に実現した。4つのピクセルの輝度の和が、仮想的なドットの輝度に等しく、輝度の比が、仮想的なドットが各ピクセルを占有する面積の比と等しくなるように、4つのピクセルの輝度値を決定した。

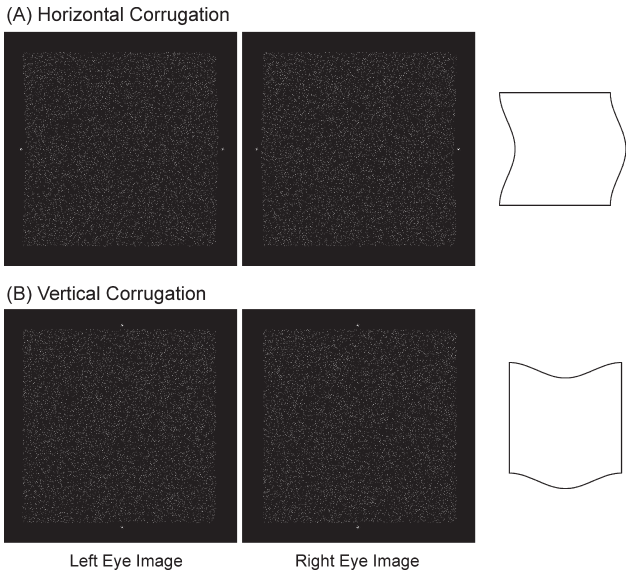


Fig. 3 A random-dot pattern used to measure disparity-modulation sensitivity in experiment 1. (A) Horizontal corrugation condition. Disparity was modulated along y axis. (B) Vertical corrugation condition. It was modulated along x axis.

曲面を知覚するために必要な網膜像差変調の振幅 A の閾値を測定した。1回の試行では、まず、初期画面としてテスト刺激と同じ大きさのグリッドパターンが呈示される。被験者が刺激呈示ボタンを押すと2秒間テスト刺激が呈示され、その後初期画面に戻る。 A の正負を試行ごとにランダムに変化させた。被験者の課題は、刺激パターンの中央部分が凹であったか凸であったかを応答することであった。 A の絶対値を上下法^{*2}により0.176 log 刻み(1.5倍)で変化させた。横縞条件と縦縞条件の2系列を1試行ごとに交互に行った。被験者にその試行がどちらの条件であるかを知らせるために、Fig. 3のようにランダムドットパターンの両端に2つの光点を呈示した。それぞれの条件で20回以上の折り返しが生じるまで試行を繰り返し、75%の正答率が得られる A の大きさをプロビット解析により推定し、閾値とした。 A の閾値は正と負で大きく異なる可能性があるため、それぞれを別々に測定するののひとつの方法であるが、本研究の目的は交差視差と非交差視差の閾値を比較することではないので、ここでは被験者の負担を軽減することを優先した。なお、先行研究¹⁾でも同様の方法が用いられているので、比較するという観点からはここで用いた方法のほうがよい。

^{*2} 通常このようなチャンスレベルが50%である実験条件で上下法を用いる場合には、2回あるいは3回続けて正答した場合に刺激強度を下げるのが一般的であるが、その場合、正答率が70.7%あるいは79.3%となる刺激強度に試行が集中することが予想される。ここでは、3回続けて正答した場合に刺激強度を低下させたが、75%となる刺激強度に試行を集中させるために、2回の時点でも60%の確率で刺激強度を低下させた。

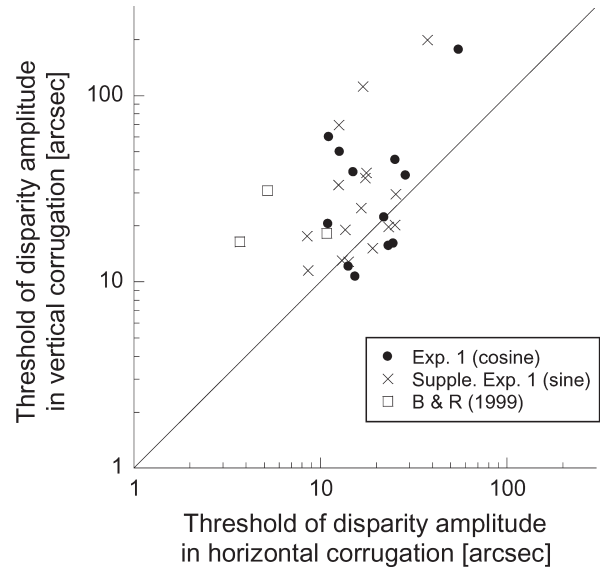


Fig. 4 Disparity thresholds.

4.3 結果と考察

Fig. 4に実験1の結果を示す。横軸は横縞条件、縦軸は縦縞条件における網膜像差変調の振幅の閾値を表している。●が本実験の結果である。□は比較のためにプロットしたBradshawとRogers¹⁾の実験結果である。実験に参加した18名の被験者のうち、縦縞と横縞の両方の条件において閾値を測定することができた12名のデータがプロットされている。傾き1の直線よりもデータ点が上にプロットされていれば、これまでに報告されているのと同様の異方性があるということが出来る。そのような傾向を示す被験者もみられるが、そうでない被験者も少なくない。5名の被験者では、横縞条件における閾値よりも縦縞条件における閾値が0.1%の危険率で有意に大きかったが、残りの7名では、閾値に有意差はなかった¹²⁾。

Fig. 4にデータを示すことができない6名のうち、4名については横縞条件では閾値を測定することができたが縦縞条件ではできなかった。この4名は顕著な異方性を示す被験者であるということが出来る。残りの2名は両方の条件で閾値を測定することができなかった。Table 2に、この6名の結果を示す。×およびRは、閾値が測定できなかったこと、すなわち測定した30 arcminまでの網膜像差振幅の範囲で正答率が75%に到達しなかったことを表している。Rは、閾値が測定できなかっただけでなく、網膜像差振幅30 arcminにおける正答率が0.1%の危険率で有

Table 2 Disparity thresholds in seconds of arc.

Partici- pants	Exp. 1		Supple. Exp. 1		Supple. Exp. 2	
	H	V	H	V	H	V
AK	×	×	23	20	9	23
HK	×	×	68	×	×	×
ENa	31	×	13	33	22	×
SS	52	R	13	70	21	61
YI	18	R	17	112	20	R
HJ	12	R	9	×	5	R

×s and Rs indicate that thresholds were not determined in the conditions. Rs indicate that depth reversal was observed in the conditions.

意に 50% を下回ったことを表している。被験者 HJ, YI, SS の網膜像差振幅 30 arcmin における正答数/試行数はそれぞれ 1/60, 13/79, 5/34 であった。これは、これらの被験者が網膜像差に対して単に感度が低いのではなく、網膜像差から幾何学的に予測されるのとは反対の奥行きを知覚していることを意味している。この奥行きの変換に関しては、実験 2 と実験 3 でさらに詳しく調べる。

Bradshaw と Rogers の実験では、6 名の被験者全員が一致して異方性を示している¹⁾。6 名のうち 3 名は、横縞条件では閾値を測定することができたが、縦縞条件ではできなかった。残りの 3 名についても、Fig. 4 に示すように横縞条件よりも縦縞条件において大きな閾値を示した。本実験の結果は、全体としては Bradshaw と Rogers が示した異方性を支持しているが、同時に、異方性に個人差があることも示している。2004 年の論文⁴⁾でも詳しく述べたように、彼らと著者らの実験結果の違いがどこに起因するのかは明らかでないが、本実験の結果は、Bradshaw と Rogers の研究から考えられるよりも、異方性が観察者個人に依存したものであることを示している。逆に、Bradshaw と Rogers の研究と本実験の条件の違いを詳細に検討することにより、異方性の原因を明らかにすることができるかもしれない。

4.4 補足実験 1：位相の効果

実験 1 では、Bradshaw と Rogers¹⁾の実験方法に従い、被験者は曲面の中央が凹であるか凸であるかを判断した。刺激全体の大きさに対して空間周波数が比較的高く複数の波が呈示される場合には、正弦波の位相は感度に大きな影響を及ぼさないとと思われるが、本実験のように正弦波が 1 周期分しか呈示されない場合には、位相により面の形状が大きく変化するので、位相も感度に影響を及ぼす重要な要素となるかもしれない。ここでは、網膜像差変調の位相によって閾値が変化するかどうかを明らかにするために、位相を $\pi/2$ ずらして同様の実験を行った。空間周波数は実

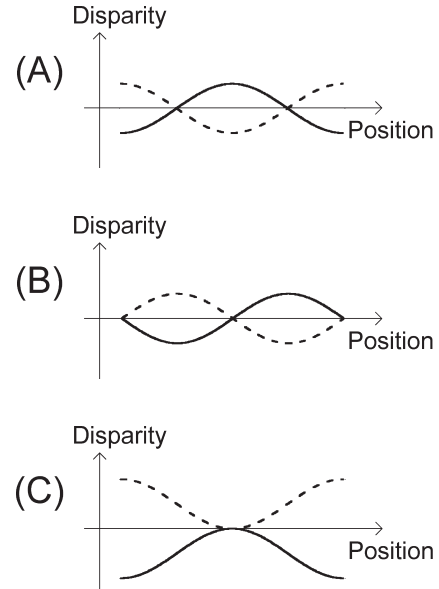


Fig. 5 Disparity profile in (A) experiment 1, (B) supplemental experiment 1, and (C) supplemental experiment 2.

験 1 と同じであるが、面の形状が異なる刺激が呈示された。

刺激パターンおよび実験手続きは実験 1 と同様であった。実験 1 では、Fig. 5 (A) のように、刺激の中央が網膜像差変調の山か谷であったが、ここでは、Fig. 5 (B) のように位相を $\pi/2$ ずらし、中央における網膜像差量を 0 とした。被験者の課題は、刺激のどちら側の半分が凸であるかを応答することであった。

Fig. 4 に補足実験 1 の結果を示す。補足実験 1 のデータ点 (×) の分布は実験 1 (●) とよく似ている。しかし、データ点の数が若干異なっている。実験 1 では少なくとも 1 つの条件で閾値を測定することができなかった被験者が 6 名いたが、補足実験 1 ではそのような被験者は 2 名のみであった。両方の条件で閾値を測定することができた 16 名の被験者のうち、5 名の被験者では、横縞条件における閾値よりも縦縞条件における閾値が 0.1% の危険率で有意に大きかったが、残りの 11 名では、閾値に有意な差はみられなかった¹²⁾。また、Table 2 に示すように、閾値を測定することができなかった 2 名の被験者に関しても、この条件において奥行きの変換を示す被験者はいなかった。網膜像差変調の空間周波数が低い場合には、空間周波数のみでなく、位相もまた閾値や知覚される奥行きの方を決める重要な要素であると考えられる。ただし、補足実験 1 は実験 1 の後に行っているため、練習の効果により被験者の応答が安定した可能性も否定できない点に注意を払う必要がある。

4.5 補足実験2：オフセットの効果

実験1で閾値を測定することができなかった被験者6名のうち4名は、補足実験1では閾値を測定することができた。網膜像差変調の位相の違いは、具体的にはどのように刺激の検出に影響を及ぼすのであろうか。実験1と補足実験1で用いた刺激は2つの点で異なっている。1つは、刺激の対称性である。実験1で用いた刺激は上下左右ともに対称であったが、補足実験1で用いた刺激はそうではなかった。もう1つは、刺激の中央における網膜像差の大きさである。実験1では、刺激の中央において網膜像差量が最大となったが、補足実験1では、中央における網膜像差量は0であった。この違いにより融像が容易になり、曲面の知覚が容易になったのかもしれない。ここでは、実験1で用いた刺激に網膜像差変調のオフセットを与え、刺激の中央における網膜像差量を0にした場合に刺激の検出が容易になるかどうかを明らかにする。

刺激パターンおよび実験手続きは実験1と同様であった。実験1では、Fig. 5 (A) のように、刺激の中央が網膜像差変調の山か谷であったが、ここでは、Fig. 5 (C) のようにオフセットをずらし、中央における網膜像差量を0とした。実験1で閾値を測定することができなかった6名の被験者が実験に参加した。

Table 2 に補足実験2の結果を示す。補足実験1に比べて、補足実験2では、閾値を測定することができない条件が増加していることがわかる。また、補足実験1ではみられなかった奥行きが反転現象が再び観察された。位相の効果として重要なのは、刺激の中央において網膜像差量が0であるかどうかではないことがわかる。

5. 実験2：恒常法による心理測定関数

5.1 目的

実験1では、上下法により曲面が知覚されるために必要な網膜像差変調の振幅の閾値を測定した。多くの場合この方法で閾値を測定することができたが、おそらくは心理測定関数が単調増加でない場合があるために、この方法がうまく機能しない場合もあった。興味深いことに、正答率がチャンスレベルである50%以下になること、すなわち幾何学的な予測とは反対の奥行きが知覚される場合があることを示すデータも得られた。ここでは、実験1で閾値を測定することができなかった6名の被験者について、網膜像差変調の振幅と知覚される曲面の凹凸の関係を恒常法により明らかにすることを目的とする。比較のために、実験1で閾値を測定することができた被験者のうち2名についても実験を行った。

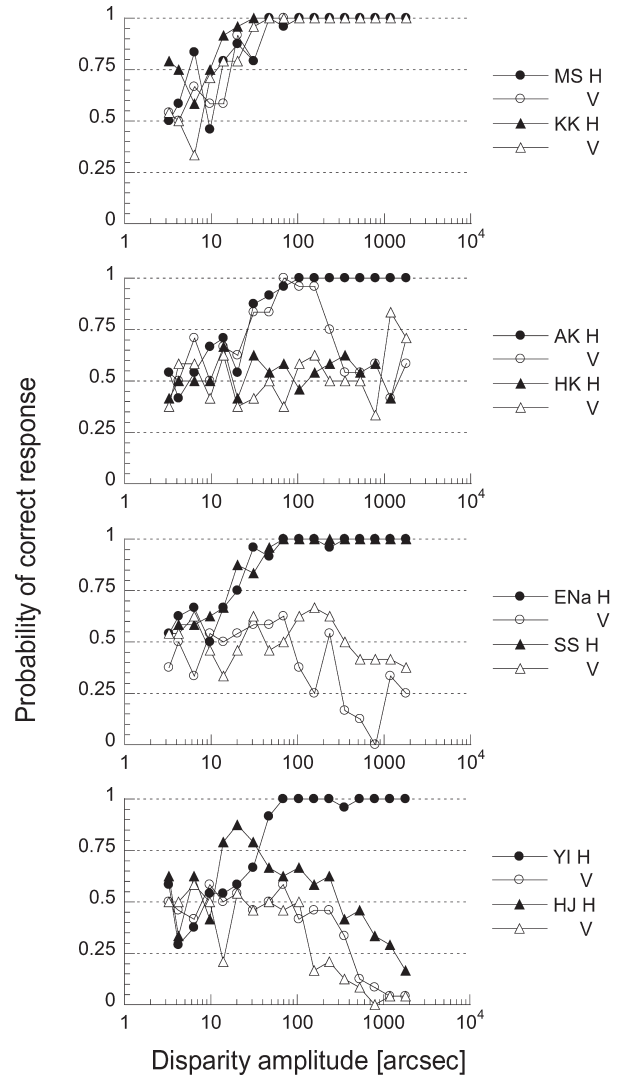


Fig. 6 Probability of correct response as a function of disparity amplitude.

5.2 刺激と手続き

実験で用いた刺激パターンおよび1回の試行における手続きは実験1と同じである。204回の試行を行い、1セッションとした。実験1と同様に横縞と縦縞の条件を1試行ごとに交互に行い、網膜像差変調の振幅を0.176 log 刻み(1.5倍)で変化させた17条件をランダムな順序で行った。同一条件の繰り返しは6回であった。各被験者は4セッションずつの実験を行った。

5.3 結果と考察

Fig. 6 に実験2の結果を示す。横軸は網膜像差変調の振幅を表している。縦軸は、24試行の繰り返しに対して、知覚された凹凸が幾何学的な予測と合っていた確率を表している。凡例のHとVはそれぞれ横縞と縦縞の条件を表している。

被験者MSとKKは、実験1において両方の条件で閾

値を測定することができた被験者である。心理測定関数は単調増加の傾向を示し、10~20 arcsec の付近で75%の正答率に到達している。これは実験1の結果とよく一致している。

被験者 AK と HK は、実験1において両方の条件で閾値を測定することができなかった被験者である。HK の正答率は、網膜像差の振幅によらず、チャンスレベルである50%前後であった。HK は、Table 1 に示すように hexagon dot stereo test に関しては特に低いとはいえない立体視力を示しているが、ランダムドットによる曲面を知覚することは苦手なようである。奥行き変調の空間周波数成分の違いは重要な要素かもしれない。一方、AK の正答率は、縦縞と横縞の両方の条件で20~30 arcsec の付近で75%に到達している。それよりも大きい網膜像差振幅に対しては、縦縞条件では正答率が50%前後にまで低下しているが、横縞条件では広い範囲にわたって高い正答率を維持している。これは、閾値を測定することができなかった実験1の結果とは明らかに矛盾している。AK は、ランダムドットステレオグラムや心理物理実験に慣れていなかったため、実験1を経験したことによる練習の効果により、実験1を行ったときよりも見えが安定したのかもしれない。実験に参加した被験者の多くは、ランダムドットステレオグラムを用いた心理物理実験の被験者の経験をほとんど有していなかったが、多くの被験者は、特に練習を必要とする事もなく、実験の課題を説明する段階から刺激の凹凸を正しく応答することができた。その一方で、AK のように、ある程度の経験を経ることにより知覚が安定する被験者もいるようである。

残りの4名の被験者は、実験1において横縞条件では閾値を測定することができたが、縦縞条件ではできなかった被験者である。被験者 ENa, SS, YI の心理測定関数は、横縞条件では単調増加の傾向を示しているが、縦縞条件では、明らかにそれとは異なる傾向を示している。正答率はチャンスレベルである50%の付近を推移しているが、網膜像差の振幅が大きい場合に、正答率が50%を下回る傾向がみられる。HJ に関しては、両方の条件で正答率が50%を下回っている。彼に関しては、横縞条件で網膜像差の振幅が小さい場合に正答率が75%を超えている点も特徴的である。実験1で閾値を測定することができたのはこのためであると思われる。

一部の被験者において、正答率が50%を下回る条件が存在することが確認された。反転が起こるのは、網膜像差の振幅が非常に大きい場合のみであることが明らかになった。知覚される奥行き反転を生み出すメカニズムの網膜

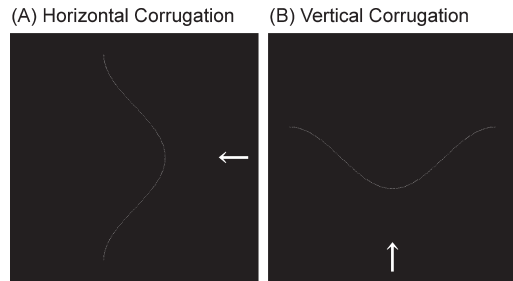


Fig. 7 Matching stimulus used in experiment 3.

像差に対する感度はあまり高くないと考えられる。次の実験では、閾上における奥行き量をマッチング法により定量化する。

6. 実験3：閾上の網膜像差変調に対して知覚された奥行き量

6.1 目的

実験2により、一部の被験者において両眼網膜像差で定義された正弦波状の曲面の凹凸が幾何学的な予測とは反対に知覚されることが明らかになった。しかし、実験2では曲面の凹凸を答えることのみが被験者の課題であったため、閾上の刺激に対して知覚された奥行き大きさを知ることにはできない。ここでは、実験2で奥行き反転の傾向を示した4名の被験者について、知覚された奥行き量をマッチング法により定量化することを目的とする。比較のために、実験2で通常の上昇の心理測定関数を示した2名の被験者についても実験を行った。

6.2 刺激と手続き

テスト刺激はこれまでの実験で用いたパターンと同じである。テスト刺激が2秒間呈示された後、Fig. 7のようなマッチング刺激が呈示された。正弦波状の曲線はテスト刺激の曲面を横からあるいは上から見た様子を表しており、白い矢印は被験者の視線の方向を表している。被験者の課題は、2つのボタンを操作してマッチング刺激の曲線の振幅を調整することにより、テスト刺激に知覚された曲面の振幅を応答することであった。マッチング刺激の調整を行っている間、被験者は必要であれば何度でもテスト刺激を観察することができた。被験者がテスト刺激呈示ボタンを押すとテスト刺激が2秒間呈示され、その後再びマッチング刺激が呈示され、引き続き調整を行うことができた。

12回の試行を行い、1セッションとした。横縞と縦縞の条件を1試行ごとに交互に行い、網膜像差変調の振幅について±1, 4, 30 arcmin の6条件をランダムな順序で行った。各被験者は3セッションずつの実験を行った。

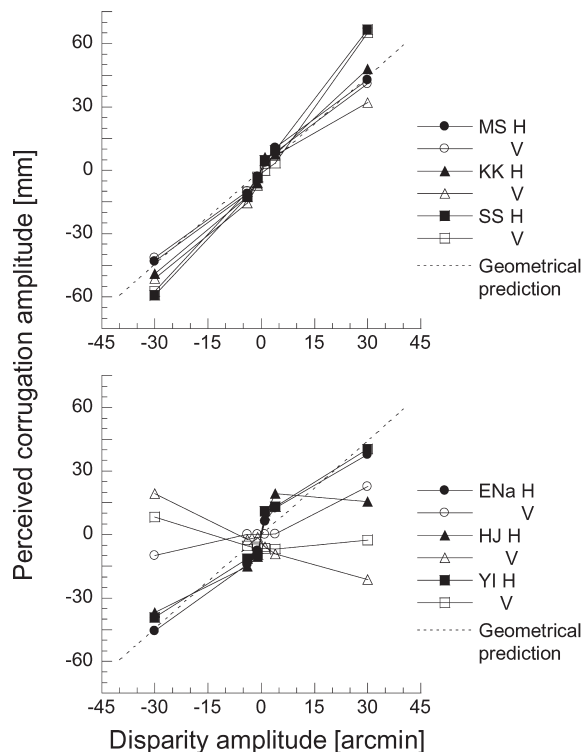


Fig. 8 Perceived depth as a function of disparity amplitude.

6.3 結果と考察

Fig. 8 に実験 3 の結果を示す。横軸は網膜像差の振幅を表している。正の値は、刺激の中央において非交差視差が与えられたことを表している。縦軸は知覚された曲面の奥行き振幅を表している。正の値は、凹面が知覚されたことを表している。破線は幾何学的な理論値を表している。

被験者 MS, KK, SS の 3 名は、両方の条件で同様に右上がりの関数を示した。知覚された奥行き量も両方の条件において幾何学的な予測に近いものであった。残りの 3 名の被験者は、顕著な異方性を示している。特に、HJ と YI は縦縞条件において右下がりの関数を示している。これは幾何学的な予測と反対の凹凸が知覚されたことを表している。網膜像差によって知覚される奥行きが幾何学的な予測と反対になるという現象はこれまでも報告されているが^{6,7)}、それらは平面の傾斜に限られており、曲面でも反転が起こると報告は例がないと思われる。

Gillam は、奥行き反転現象を説明する 2 つの理論を提案している。1967 年の説⁶⁾は、網膜像差に由来する遠近法情報の寄与を仮定している。網膜像差は奥行き感に影響を及ぼすと同時に大きさ感にも影響を及ぼす。例えば、同じ視角的大きさをもつ 2 つの視対象のうちの一つに交差性の網膜像差を与えると、その視対象は通常もうひとつに比べて近く見えると同時に小さく見える。一部の個人

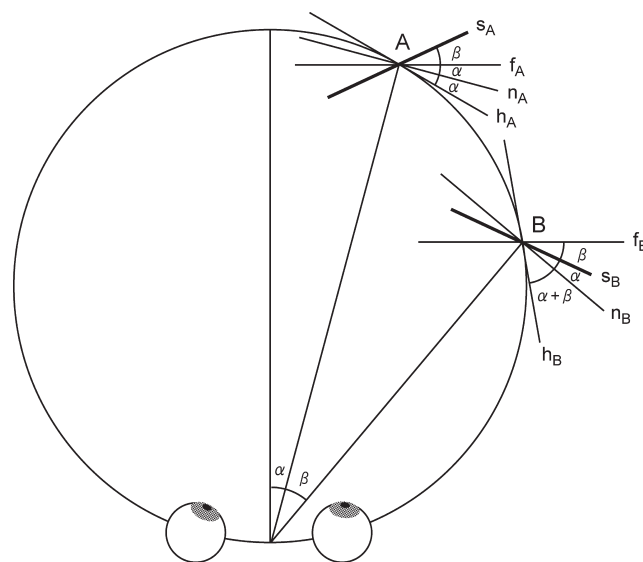


Fig. 9 The relationship among the disparity-specified surface (s_x), the frontoparallel plane (f_x), the normal (n_x) and the horopter (h_x) in the eccentric visual field.

ではこの小さく見える効果が間接的に遠くに見える効果を生み、奥行き反転が生起すると考える。1993 年の説⁷⁾も、奥行き反転における遠近法情報の寄与を仮定するが、その寄与のしかたが 1967 年の説とはまったく異なっている。通常、ランダムドットステレオグラムに網膜像差勾配を与えると、網膜像差勾配から予測される面の傾斜角とランダムドットのテクスチャー勾配から予測される面の傾斜角の間にずれが生じる。Fig. 9 のように、前額平行面 f_A 上にランダムドットを呈示し、点 A における傾斜角が β になるように網膜像差勾配を与えると、網膜像差勾配は s_A を示すが、テクスチャー勾配は f_A を示すので、2 つの奥行き情報の間に角 β のずれが生じる。しかし、これと同じ網膜像差勾配とテクスチャー勾配をもちながら 2 つの奥行き情報の間にずれがない面が必ず存在し、反転も説明できるというのがこの理論の要点である。Fig. 9 の場合は、 s_B がこの条件を満たす面である。注目すべき点は、前額平行面 f_B に対する s_B の傾斜方向が f_A に対する s_A の傾斜方向と反対になることである。このように、網膜像差情報と遠近法情報を矛盾なく統合するために s_B のような面が知覚されると考えれば奥行き反転を説明することができる。

Gillam の 1967 年の説⁶⁾は、網膜像差勾配の局所的な効果のみを仮定するので本実験で示した曲面における奥行き反転と矛盾しないが、実験 1 で示したように奥行き反転の生起が面の形状に依存することは説明できない。この点は今後の重要な研究課題である。1993 年の説⁷⁾は、幾

何学的な理論としてはおもしろいが、刺激の横方向の位置の錯誤を仮定する点に問題があるように思われる。面の傾斜角が小さい場合には位置の錯誤量も小さく、面の傾斜角が一定である平面の場合には、位置の錯誤量も刺激の位置によらず一定になるので大きな問題はないのかもしれない。しかし、本実験で用いたような振幅の大きい曲面の反転を説明するためには、位置の錯誤量が刺激パターンの位置により傾斜角に応じて変化することになり、これは、単純に考えると、空間的に様なドットの分布に偏りが知覚されることを予測する。本実験が示した曲面における奥行き反転は、この1993年の説に対する致命的な反証ではないが、証拠としては否定的であると思われる。今後、曲面における奥行き反転現象の成立条件をさらに詳細に調べることにより、奥行き反転のメカニズムが解明できるのではないかと考える。

実験3で得られた結果の一部は実験2の結果と矛盾しているように思われる。SSは、実験2の縦縞条件では、測定したすべての網膜像差の範囲において高い正答率を示さなかったが、実験3の縦縞条件に関しては、横縞条件と同様に右上がりの関数を示している。ENaは実験2の縦縞条件において、HJは実験2の横縞条件において、それぞれ右下がりの結果を示しているが、実験3では右上がりの結果を示している。全体的に、実験2よりも実験3において正しい奥行きが知覚される傾向があるといえる。この矛盾した実験結果が得られた原因は、おそらくは刺激の呈示時間の違いによるものであると思われる。実験2では、刺激の呈示は1回だけであったが、実験3では、マッチングが終了するまで何回でも繰り返し刺激を観察することができた。被験者SSの内観報告によれば、最初に刺激を観察したときには凹凸がわからないことが多かったが、繰り返し観察しているうちに鮮明に奥行きが知覚されたとのことである。ENaも同様に、何回か刺激を繰り返し観察しているうちに最初の印象とは反対の奥行きが知覚されることがあったと報告している。この場合、後から知覚された奥行き印象のほうが鮮明で、再び反転することはなかったとのことである。奥行き知覚が成立するための刺激の呈示時間にも大きな個人差があると考えられる¹³⁾。

7. ま と め

18名の被験者について低空間周波数領域(0.05 c/deg)における網膜像差変調の閾値を測定した。7名から9名の被験者は、これまでに報告されているのと同様に、網膜像差変調の方向による感度の違いを示したが、残りの被験者では異方性を示す証拠は得られなかった。横縞条件(垂直

方向の網膜像差変調)における閾値より縦縞条件(水平方向の網膜像差変調)における閾値が大きい被験者がいる一方で、閾値に差がみられない、あるいはどちらの条件でも閾値が測定できない被験者も少なくなかった。本研究の結果は、全体的な傾向としてはBradshawとRogersの実験結果¹⁾と一致しているが、網膜像差変調に対する感度の異方性が被験者に強く依存することを示している。今後、彼らの研究と本研究の実験条件の違いを詳細に検討することにより異方性の要因が解明できると考える。

奥行きCornsweet錯視の異方性について調べた著者らのこれまで研究^{4,5)}では異方性の存在を示す証拠は得られなかったが、個人差はあるものの全体としては異方性があることを示している。本実験の結果は、Cornsweet錯視に関する著者らのこれまでの研究結果とも整合しないように思われる。閾値において異方性があるのにCornsweet錯視において異方性が表れないのは、Cornsweet錯視が閾上での効果であるからかもしれない。しかし、実験3の結果をみると、閾値において異方性を示す被験者は閾上でも異方性を示しており、これが結果の不整合の原因ではないようである。この問題について考えるときに、Cornsweet錯視の場合は、エッジに対する感度となだらかな変化に対する感度の違いが効果として表れるという点は重要かもしれない。Cornsweet錯視の場合は、正弦波を用いて閾値を測定する場合よりもいろいろな要素が複雑に影響を及ぼし、異方性が表れにくいのかもかもしれない。

縦縞条件あるいは両方の条件で閾値を測定することができなかった6名の被験者はいわゆる立体盲ではない。6名のhexagon dot stereo test⁸⁾による立体視閾は5.7~40.0 arcsec(平均16.1 arcsec)で、両方の条件で閾値を測定することができた12名の被験者の立体視閾6.7~38.2 arcsec(平均16.4 arcsec)に比べて特に高いとはいえない。hexagon dot stereo testは、光点の間隔が20 arcminであったので、0.05 c/degの正弦波よりも高い空間周波数領域におけるテストであったといえる。網膜像差に対する感度の個人差は低空間周波数領域において顕著であるようだ¹⁾。

18名のうち2名の被験者は、縦縞条件において幾何学的な予測と反対の凹凸を知覚した。曲面においても奥行き反転が起こること、反転の生起が正弦波状の網膜像差変調の位相に依存することは、反転の原因を探るうえで重要な手がかりになると思われる。曲面において反転した奥行きを知覚した2名の被験者HJとYIは、別に測定した網膜像差と遠近法情報の重み付けにおいて網膜像差情報に負の重みを与えている点特徴的である。しかし、そのよう

な被験者はほかにもいることから、網膜像差に対する重みが負であることは曲面において反転した奥行きが知覚されるための必要条件であるが十分条件ではないといえそうである。

文 献

- 1) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: "Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity," *Vision Res.*, **39** (1999) 3049-3056.
- 2) B. J. Rogers and M. E. Graham: "Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces," *Science*, **221** (1983) 1409-1411.
- 3) P. B. Hibbard, M. F. Bradshaw, K. Langley and B. J. Rogers: "The stereoscopic anisotropy: Individual differences and underlying mechanisms," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **28** (2002) 469-476.
- 4) 佐藤雅之: "奥行き次元の同時対比効果と Cornsweet 錯視における異方性と個人差", *光学*, **33** (2004) 667-677.
- 5) 佐藤雅之・安部弘人: "奥行きの対比効果と Cornsweet 錯視における刺激の形状の効果", *光学*, **34** (2005) 606-613.
- 6) B. Gillam: "Changes in the direction of induced aniseikonic slant as a function of distance," *Vision Res.*, **7** (1967) 777-783.
- 7) B. Gillam: "Stereoscopic slant reversals: A new kind of 'induced' effect," *Perception*, **22** (1993) 1025-1036.
- 8) B. E. Coutant and G. Westheimer: "Population distribution of stereoscopic ability," *Ophthalmol. Physiol. Opt.*, **13** (1993) 3-7.
- 9) M. O. Ernst, M. S. Banks and H. H. Bühlhoff: "Touch can change visual slant perception," *Nat. Neurosci.*, **3** (2000) 69-73.
- 10) 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.
- 11) M. Sato and I. P. Howard: "Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast," *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.
- 12) 永井岳大・星野崇宏・内川恵二: "恒常法により推定された閾値間の統計的有意差検定法", *Vision*, **18** (2006) 113-123.
- 13) B. Gillam, D. Chambers and T. Russo: "Postfusional latency in stereoscopic slant perception and the primitives of stereopsis," *J. Exp. Psychol. Hum. Percept. Perform.*, **14** (1988) 163-175.