

刺激の大きさと呈示位置が両眼網膜像差による奥行き知覚におよぼす効果

佐藤 雅之*・須長 正治**

*北九州市立大学国際環境工学部 〒808-0135 北九州市若松区ひびきの1-1

**九州大学大学院芸術工学研究院 〒815-8540 福岡市南区塩原4-9-1

The Effects of Stimulus Size and Retinal Position on Depth Perception from Binocular Disparity

Masayuki SATO* and Shoji SUNAGA**

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

**Department of Human Science, Kyushu University, 4-9-1 Shiobaru, Minami-ku, Fukuoka, 815-8540

The effects of stimulus size and retinal position on apparent depth from binocular disparity were measured using a random-dot stereogram with one dimensional DoG (difference of Gaussian) disparity modulation along either horizontal or vertical direction. The standard deviations of two Gaussians were 1 deg and 1.5 deg respectively, corresponding to 0.18 cpd peak spatial frequency. The stimulus subtended 10 deg to the direction with disparity modulation and the size perpendicular to that direction was varied from 0.25 deg to 20 deg in Experiment 1. The central area of 2, 6, 10, or 14 deg was blanked in the 20-deg test stimulus in Experiment 2. The results showed that stimulus size larger than 6 deg was necessary to detect disparity modulation along the horizontal direction, whereas to detect vertical modulation much smaller stimulus size was enough. Further analysis indicated that the cooperative interaction between the central and peripheral visual field in stereopsis was well explained by probability summation of outputs from insensitive local disparity detectors.

Key words: binocular disparity, depth perception, stimulus size, retinal eccentricity, anisotropy

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ことが知られている¹⁻⁷⁾。一般に、水平方向の奥行きの変化(右に行くほど近い,あるいは遠い)に対する感度は、垂直方向(上に行くほど近い,あるいは遠い)に比べて低いことが数多くの研究により明らかにされている。RogersとGraham¹⁾は、網膜像差による Craik-O'Brien-Cornsweet 錯視の効果の大きさがエッジの方向に依存し、エッジが垂直のとき、すなわち水平方向に網膜像差が変化するとき効果が大きいことを報告している。BradshawとRogers²⁾は、網膜像差による奥行き知覚の空間周波数特性における網膜像差の変調方向による感度の違いを検討している。低空間周波数領域において、水平方向の変調に

対する感度が垂直方向のそれに比べて著しく低いことを報告している。Hibbardら³⁾は、網膜像差による奥行き知覚における異方性とその個人差が、輝度の次元における空間周波数と方位に対する感度の違いで、少なくとも部分的には、説明できることを明らかにしている。著者らは、近年、奥行き知覚の異方性の個人差とその要因について、詳細な検討を行っている⁴⁻⁶⁾。

Gillamらは、網膜像差による奥行き知覚の時間特性における異方性を検討している⁷⁾。ランダムドットに一次関数で記述される網膜像差変調を与え、テスト刺激が融像した後、面の傾斜が知覚されるまでの時間遅れを測定し、網膜像差の変調方向による違いを検討している。垂直方向の変調に対しては、多くの場合9秒以内で応答が生じているに

もかわらず、水平方向の場合には、1分以上の時間遅れが生じることも珍しくないことを明らかにしている。しかし、1分以上の長い時間にわたってどのような処理が行われているのか、また、何を行うためにそのような長い時間を要するのかについては明らかにされていない。

ここでは、網膜像差による奥行き知覚の空間特性における異方性を検討する。実験1では、テスト刺激の大きさを変数とし、知覚される奥行きとの関係を明らかにする。呈示時間の場合と同様に、刺激の大きさについても、課題の遂行において冗長と思われる情報を付加することによりパフォーマンスが向上するだろうか。実験2では、視野の中央領域にブランクを設け、奥行き知覚の視野特性を検討する。そして、中心視野と周辺視野の相互作用のメカニズムを検討する。

2. 実験方法

2.1 実験装置

立体視対応のグラフィックスカード(Cambridge Research Systems 社, VSG 2/5)を用いて、計算機により生成した刺激パターンを22インチのCRTモニター(三菱電機, RDF22H)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, Crystal-Eyes 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。CRTモニターの空間解像度は1024×768ピクセルであり、1ピクセルの大きさは2.3 arc minであった。実験で用いたランダムドットの密度は20個/deg²であった。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。黒い背景上に2×2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3×3ピクセルの領域の輝度を調整した。モニターのフレームレートは120 Hzであった。したがって、右目用と左目用のパターンは、それぞれの目に毎秒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^{*1}。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1.3 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。

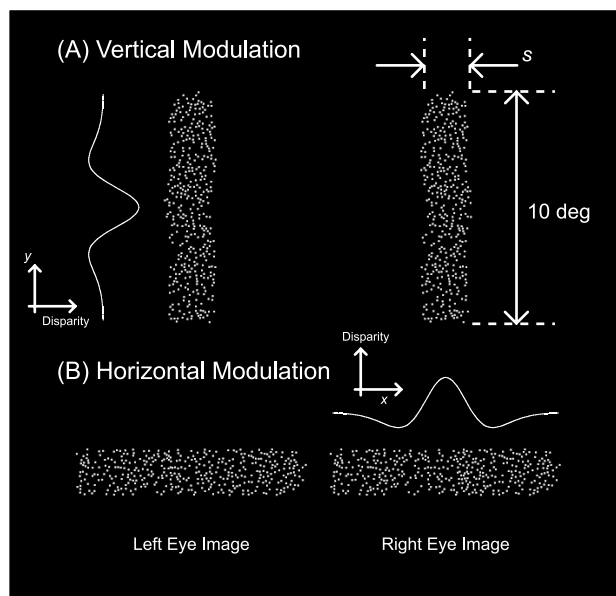


Fig. 1 Random dot stereogram illustrating an example of test stimulus used in (A) the vertical modulation condition and (B) the horizontal modulation condition in Exp. 1.

2.2 被験者

著者2名を含む20代から40代の4名の被験者(男性3名, 女性1名)が実験に参加した。すべての被験者は正常視力(矯正視力を含む)を有していた。著者以外の被験者は実験の目的を知らなかった。

3. 実験1: 刺激の大きさの効果

3.1 刺激と手続き

Fig. 1に、実験1で用いたテスト刺激の例をステレオグラムにより示す。垂直変調条件では、Fig. 1 (A)のように、y軸方向に網膜像差を変化させた。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は一次元DoG関数

$$d = A \left[3 \exp \left\{ -\frac{y^2}{2\sigma^2} \right\} - 2 \exp \left\{ -\frac{y^2}{2(1.5\sigma)^2} \right\} \right]$$

により記述される。ここで、Aは網膜像差変調の振幅を表している。この値を±3.3 arc sec ~ ±1790 arc secの範囲で変化させた。ここでは、dの値が正の場合を非交差視差、負の場合を交差視差とする。ガウス関数の標準偏差σは1 degであった。水平変調条件では、Fig. 1 (B)のように、x軸方向に網膜像差を変化させた。

網膜像差を変化させる方向におけるランダムドットパ

^{*1} 赤、緑、青の蛍光体をそれぞれ単独で用いた場合、液晶シャッターを通して単眼に呈示できる刺激の輝度の最大値はそれぞれ1.8 cd/m², 6.1 cd/m², 1.0 cd/m²であった。同じ刺激をもう一方の目から観測したときの輝度値はそれぞれ0.036 cd/m², 0.44 cd/m², 0.071 cd/m²であった。

ターンの大きさは 10 deg であった。そして、それと直交する方向における大きさ s を 0.25 deg~20 deg の範囲で変化させた。

1 回の試行の手順と被験者の課題は次の通りである。各試行の開始時には、初期画面としてクロスハッチパターンが呈示された*²。被験者がパターンの中央を固視して刺激呈示ボタンを押すと、テスト刺激が 0.5 秒間呈示され、その後、再びクロスハッチパターンが呈示された。被験者の課題は、(1) ランダムドットパターンの中央部分が手前に膨らんで見えた、(2) 奥に凹んで見えた、(3) 凹凸が知覚されず、平面が見えた、(4) 像が融合せず、数多くのドットが見えた、(5) 面が知覚されず、ドットが奥行き方向にランダムに分布して見えた、の 5 つの選択肢から 1 つを選択することであった。

68 回の試行を 1 セッションとした。1 つのセッション内では、網膜像差変調の方位と刺激の大きさ s の値は 1 つに固定された。網膜像差変調の振幅 A の大きさについては、0.176 log 刻み (1.5 倍) で 17 の条件があり、 A の極性については正と負の 2 つの条件があった。この 34 の条件について、ランダムな順序でそれぞれ 2 回ずつ試行を行った。

垂直変調条件に関しては、刺激の大きさ s の値は 0.25 deg, 2 deg, 6 deg の 3 種類であった。水平変調条件に関しては、2 deg, 6 deg, 10 deg, 14 deg, 20 deg の 5 種類であった。各被験者は、それぞれの条件について 4 セッションずつ、合計 32 セッションの実験を行った。

3.2 結果と考察

Fig. 2 に被験者 SS の実験結果を示す。横軸は、網膜像差変調の振幅 A の大きさを表している。縦軸は、(i) 正答率 (交差視差に対して「近い」、あるいは非交差視差に対して「遠い」と応答した確率)、(ii) 反対の応答確率 (交差視差に対して「遠い」、あるいは非交差視差に対して「近い」と応答した確率)、(iii) 凹凸が知覚されず、平面が知覚された確率、(vi) 像が融合せず、数多くのドットが知覚された確率、(v) 面が知覚されず、ドットが奥行き方向にランダムに分布して知覚された確率をそれぞれ表している。

垂直変調条件では s の値を 0.25 deg~6 deg の範囲で変化させ、水平変調条件では 2 deg~20 deg の範囲で変化させた。両方に共通する 2 deg (◇) と 6 deg (□) の条件で比較すると、Fig. 2 (i) からわかるように、垂直変調条件において、水平変調条件よりも高い正答率が得られた。これ

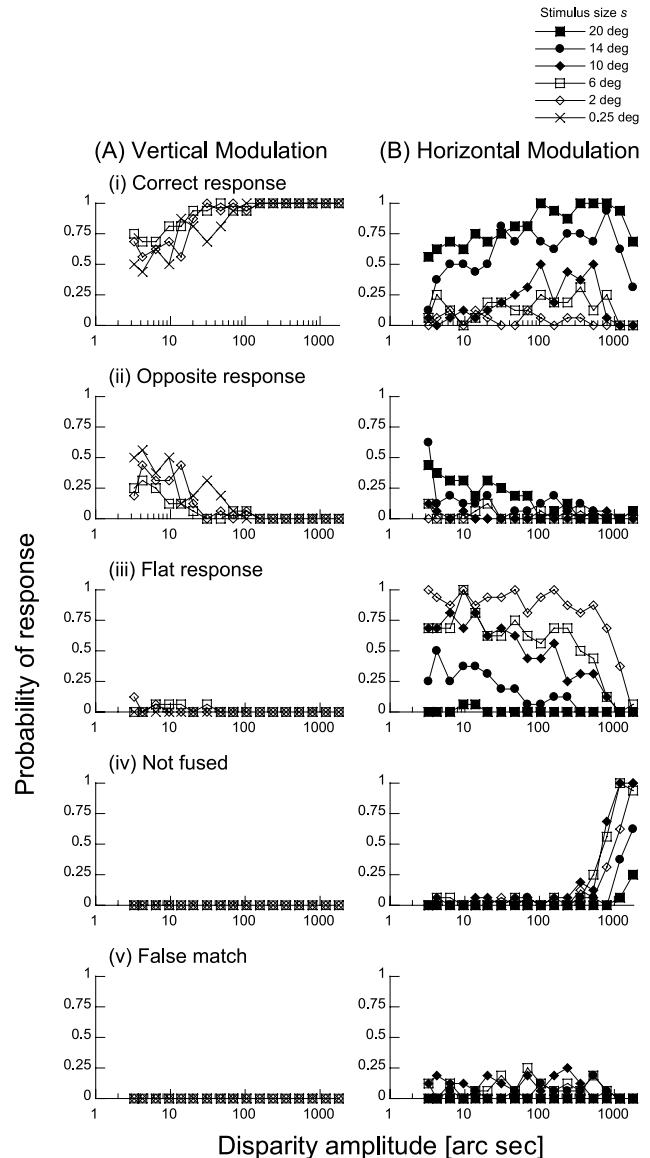


Fig. 2 Probability of (i) correct response, (ii) opposite response, (iii) flat response, (iv) not fused response, and (v) false match response for observer SS.

は、これまでによく知られている立体視の異方性と一致する傾向である¹⁻⁷⁾。垂直変調条件では、 s の値を 0.25 deg (×) に下げても正答率は高いままであった。一方、水平変調条件では、 s の値が 2 deg (◇) のときには正答率は非常に低かったが、 s の値を大きくしていくと正答率が徐々に上昇した。この傾向は、 s が 20 deg (■) にいたるまで続いている。反対の応答については、Fig. 2 (ii) からわかるように、網膜像差変調の振幅が小さいときに反対の応答確率が高くなる傾向がみられた。平面が知覚される確率

*² 被験者に固視位置と前額平行面を明示するために、スクリーン上の 20 deg×20 deg の領域に、斜めの線分を格子状に配置した。両眼融像における対応誤り (いわゆる壁紙錯視) を防ぐために、2.4 deg の線分の間隔に 1 割程度のゆらぎを与えた。

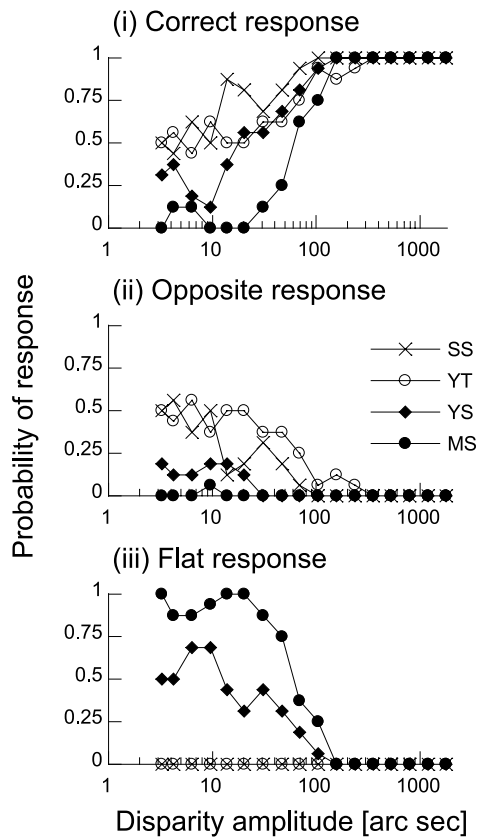


Fig. 3 Probability of (i) correct response, (ii) opposite response, and (iii) flat response for four observers ($s=0.25$ deg, vertical modulation condition).

については、Fig. 2 (iii) からわかるように、条件に大きく依存していた。垂直変調条件では平面の応答はほとんどみられなかったが、水平変調条件では s の値が小さいときに平面の応答確率が高かった。

(i) 正答率、(ii) 反対の応答確率、(iii) 平面が知覚された確率には個人差があり、正答率が高い被験者は平面の応答確率が低い一方で、反対の応答確率が高くなる傾向がみられた。また、反対の応答が生じるのは、網膜像差変調の振幅が小さい場合に限定されていた。Fig. 3 に、結果の一例として、垂直変調条件における s の値が 0.25 deg の刺激に対する被験者 4 名の応答確率を示す。(i) 正答率だけをみると、被験者 SS や YT は網膜像差変調に対する感度が高く、MS は低いように見えるが、(ii) 反対の応答確率をみると、一概にそうとはいえないことに気づく。

正答率、反対の応答確率および平面の応答確率は、なぜこのような関係になっているのであろうか。網膜像差変調の振幅が奥行き検出の閾値よりも十分に小さい場合であっても、ランダムドットの面が完全な平面として知覚されることはむしろ稀で、何らかの凹凸が知覚されることが多い。その原因として、ドットの分布が不均一であることが

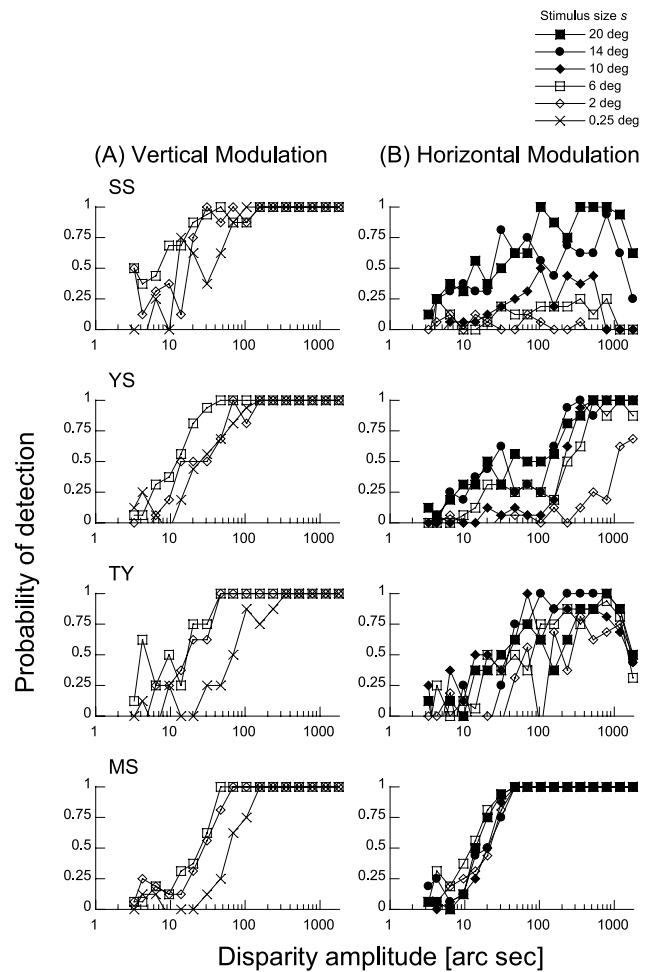


Fig. 4 Effects of stimulus size s on the probability of detection.

単眼性の奥行き手がかりとして機能している可能性が考えられる。また、各被験者が奥行きの知覚において、何らかの固有のバイアスをもっている可能性も考えられる。ここでは、これらを含む網膜像差以外の要因を一括して非網膜像差要因とよぶ。非網膜像差要因の影響が大きいの、もしくは平面という応答に対する判断の基準がきびしい被験者は、非網膜像差要因に基づいて「凹」または「凸」の応答をする確率が、そうでない被験者に比べて高いと考えられる。その結果、平面の応答確率が低くなるとともに、正答率と反対の応答確率が高くなると考えられる。

網膜像差に基づいて奥行きが正しく検出される確率を検出率 p_d とする。網膜像差に基づいた奥行きが検出されずに、非網膜像差要因に基づいて応答する確率を p_{nd} とする。 p_{nd} のうち半分は正答率、残りの半分は反対の応答確率に加算されるので、正答率は $p_d + p_{nd}/2$ 、反対の応答確率は $p_{nd}/2$ となる。したがって、正答率から反対の応答確率を引くことにより、網膜像差に基づいて奥行きが正しく検出される確率 p_d を知ることができる。厳密に考えると、網

膜像差要因と非網膜像差要因の相互作用や、それらが競合した場合の応答決定のあり方などについても考慮しなくてはいいないが、ここでは簡単のために、正答率から反対の応答確率を引いた値を検出率と定義し、網膜像差に基づいて奥行きが正しく検出される確率の指標として用いる。Fig. 4 に被験者 4 名の検出率を示す。

Fig. 4 から、奥行き知覚の異方性とその個人差、および刺激の大きさの効果を見て取ることができる。MS のように、 s の値が 2 deg の条件においても、網膜像差変調の方向によらず高い検出率を示す被験者がいる一方で、SS や YS のように顕著な異方性を示す被験者も存在する。また、そのような被験者においても、 s の値を大きくすることによって、水平変調条件における検出率が大きく上昇することがわかる。立体視力は偏心度が大きくなると急激に低下することが知られているが^{8,9)}、実験 1 の結果から、周辺視も奥行きの検出に大きく寄与することが明らかになった。

4. 実験 2：周辺視の奥行き知覚

実験 1 により、周辺視が網膜像差の検出に協調的に寄与することが明らかになった。それでは、周辺視野のみに刺激を呈示したとき、奥行きはどのように知覚されるのだろうか。ここでは、テスト刺激の中央にブランク領域を設け、その大きさを変数として奥行きが知覚される確率を測定した。

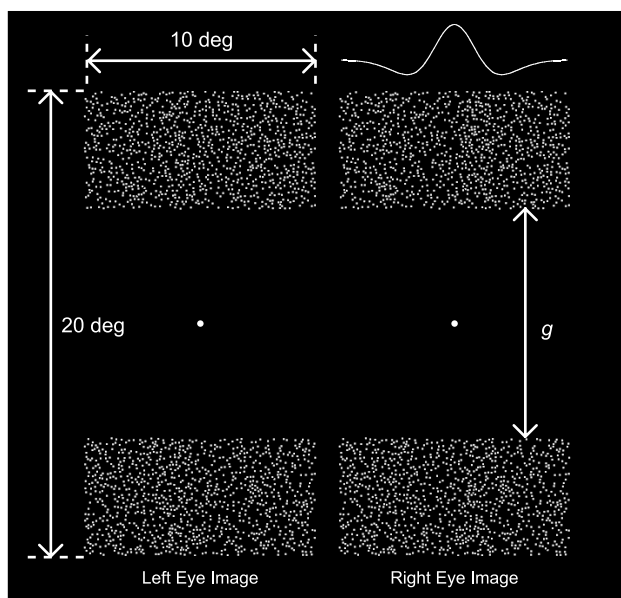


Fig. 5 Random dot stereogram illustrating an example of test stimulus used in the horizontal modulation condition of Exp. 2.

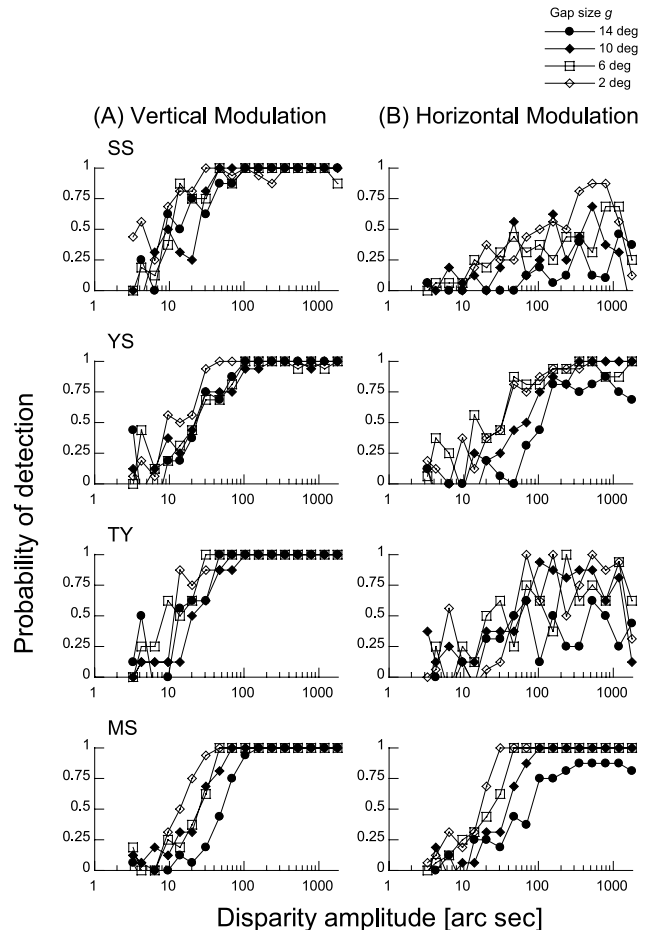


Fig. 6 Effects of gap size g on the probability of detection.

4.1 刺激と手続き

Fig. 5 に、実験 2 で用いたテスト刺激の例をステレオグラムにより示す。ここでは、テスト刺激の中央に固視点を呈示した。

実験 2 の手順は実験 1 と同様であった。垂直変調条件と水平変調条件について、テスト刺激の中央のギャップの大きさ g を 2 deg, 6 deg, 10 deg, 14 deg の 4 段階で変化させた。各被験者は、それぞれの条件について 4 セッションずつ、合計 32 セッションの実験を行った。

4.2 結果と考察

Fig. 6 に被験者 4 名の検出率を示す。図の見方は Fig. 4 と同様である。 g の値が等しい条件で、垂直変調条件と水平変調条件における奥行きの検出率を比べると、どの g の値においても垂直変調条件で検出率が高い。これは、立体視の異方性としてよく知られた特性と一致する傾向であり¹⁻⁷⁾、また実験 1 の結果ともよく一致している。

垂直変調条件では、 g の値を大きくしていくと検出率の低下がみられる。しかし、14 deg という比較的大きなギャップがある条件でも、検出率は高い値に保たれてい

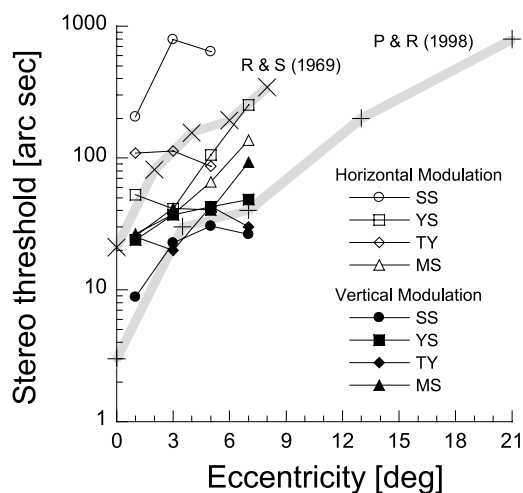


Fig. 7 Stereo thresholds as a function of eccentricity.

る。実験1の結果と比較すると、中心に2 degの刺激を呈示したときの検出率は、中心に6 degのギャップを設けた条件のそれと同等であることがわかる。水平変調条件でも、垂直変調条件と同様に、 g の値を大きくしていくと検出率の低下がみられる。しかし、大きなギャップがある条件でも、検出率は高い値に保たれている。実験1の結果と比較すると、中心に10 degの刺激を呈示したときの検出率は、中心に10 degのギャップを設けた条件のそれと同等であることがわかる。

これまでの研究^{8,9)}により、周辺視野では偏心度の増加にともない立体視力が低下することが明らかにされている。ここでは、Fig. 6に示した曲線から、検出率が50%となる網膜像差変調の振幅の閾値をプロビット法により算出し、先行研究の結果と比較した。Fig. 7に立体閾 (stereo threshold) を偏心度の関数として示す。横軸の偏心度はギャップの大きさ g の半分に相当する。縦軸は、網膜像差変調の山から谷までの閾値を表している。これは振幅の2倍に相当する。偏心度の増加にともない立体閾が大きくなること、また、水平変調条件 (白シンボル) では垂直変調条件 (黒シンボル) に比べて閾値が大きいことがわかる。

PrinceとRogers⁸⁾は、リング状のランダムドット刺激を用いて、正弦波状の網膜像差変調の閾値を空間周波数と偏心度の関数として測定している。本研究で用いたDoG関数は0.18 cpdに空間周波数成分のピークをもつので、PrinceとRogersの結果からこの周波数における閾値を読み取りFig. 7にプロットした。刺激の形状や大きさなど、多くの点で実験条件が異なっているにもかかわらず、PrinceとRogersの結果は、本研究における垂直変調条件の閾値と比較的によく一致している。PrinceとRogersが用いたリング状の刺激にはあらゆる方向の網膜像差変調成分

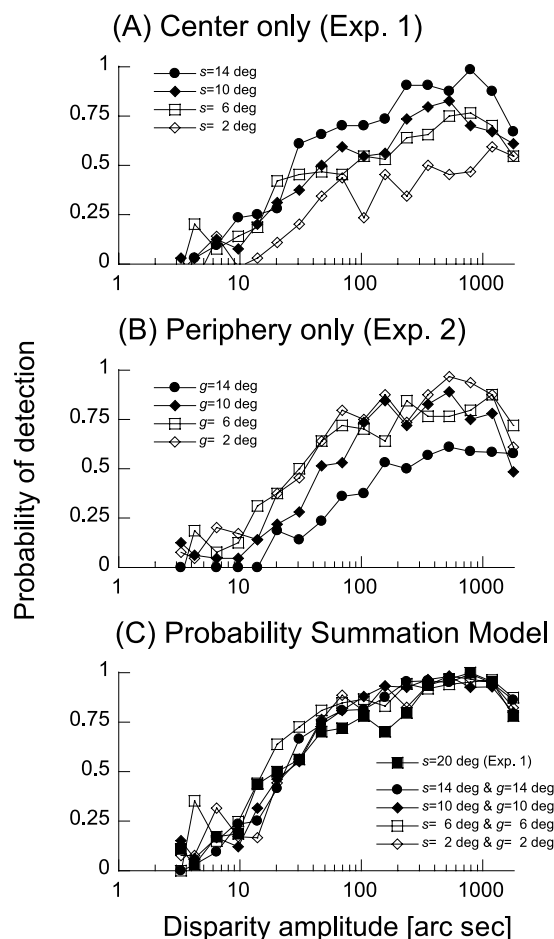


Fig. 8 (A) Probability to detect horizontal depth modulation for the central stimulus (Exp. 1). (B) That for the peripheral stimulus (Exp. 2). (C) Probability of depth detection predicted by the probability summation model. $N=4$.

が含まれているが、感度の高い垂直方向の変調成分が刺激の検出に寄与したと考えられる。これは、被験者の内観報告によっても支持されている。

RawlingsとShipley⁹⁾は、水平方向に1 deg離れた2つの光点を用いて、立体閾を水平方向の偏心度の関数として測定している。本研究における水平変調条件の閾値と比較的によく一致しているようにもみえるが、2つの光点を垂直方向に並べたときに、閾値がどの程度小さくなるのかは明らかでない。

5. 総合考察

実験1と実験2の結果から、中心視野のみに刺激を呈示した場合にも周辺視野のみに刺激を呈示した場合にも立体視が成立すること、また、中心視野と周辺視野を覆う、 s が20 degの刺激を呈示した場合に、最も奥行きの検出率が高くなることが明らかになった。この立体視における中心視と周辺視の協調的な相互作用は、どのようなメカニズ

ムによるのであろうか。

ここでは、確率的足し合わせの可能性を検討する。例えば、実験1の s が6 degの刺激と実験2の g が6 degの刺激を組み合わせると、実験1の s が20 degの刺激となる。したがって、 s が α degにおける検出率と g が α degにおける検出率および s が20 degの検出率を比較することにより、中心視と周辺視の相互作用の様式を検討することができる。ここでは、実験1の中心視野と実験2の周辺視野の結果から、確率的足し合わせによる予測値を算出し、実験1の s が20 degの実測値と比較した。ただし、垂直変調条件では s が20 degの条件で検出率を測定していないので、この解析は水平変調条件の結果に対してのみ行った。Fig. 8に結果を示す。Fig. 8 (A)は、実験1で得られた中心視野における検出率の4名の被験者の平均値を表している。Fig. 8 (B)は、実験2で得られた周辺視野における検出率の4名の被験者の平均値を表している。Fig. 8 (C)は、これらの結果から、確率的足し合わせによる予測値と実験1の s が20 degの実測値を表している。シンボルの違いは s と g の組み合わせの違いである。 s と g の組み合わせによらず、確率的足し合わせによる予測値が実測値とよく一致することがわかる。

これは、大きな刺激に対して高い感度が得られるのは、局所的で、独立した、感度の低い奥行き検出器群の出力の確率的足し合わせで説明できること、すなわち、大域的で、単一の感度の高い奥行き検出器を想定する必要がないことを示唆している。

6. ま と め

ランダムドットに比較的低周波の空間的網膜像差変調を与え、① 網膜像差の変調方向、② 刺激の大きさ、③ 刺激呈示位置が知覚される奥行きにおよぼす効果を測定した。その結果、

- (1) これまでに報告されてきた立体視の異方性が確認された。水平方向の網膜像差変調に比べて、垂直方向のそれに対して高い確率で正しく奥行きが知覚された。
- (2) 網膜像差の変調方向と直交する方向の刺激の大きさが奥行きの検出に大きな影響をおよぼすことが明らかになった。水平変調条件の場合、刺激の高さが2 degの条件では十分な検出率が得られなかったが、刺激を

大きくしていくと、測定した20 degの範囲で検出率は上昇を続けた。よって、空間的に非常に広い範囲からの情報が、立体視のパフォーマンスに影響をおよぼすことが明らかになった。これは、立体視の異方性について検討する際に注意しなければならない重要なポイントを示している。すなわち、水平方向の網膜像差変調に対する立体視のパフォーマンスは刺激の大きさの影響を受けやすいので、刺激が小さいときには異方性が顕著になり、大きいときには方向による差が小さくなる。

- (3) 立体視における中心視野と周辺視野の相互作用は、確率的足し合わせによって説明できることを示した。これは、少なくとも20 degにおよぶ広い範囲からの視覚入力の影響を受ける立体視のメカニズムを考察するうえで重要な知見である。局所的な凹凸を決めるために受容野の大きいメカニズムをもつメリットは考えにくい。大きな刺激に対する高い感度は、局所的で、独立した、あまり感度の高くない網膜像差検出器群の出力の確率的な足し合わせによるものであると考えることができる。

文 献

- 1) B. J. Rogers and M. E. Graham: "Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces," *Science*, **221** (1983) 1409-1411.
- 2) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: "Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity," *Vision Res.*, **39** (1999) 3049-3056.
- 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) 佐藤雅之, 北崎加代子: "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", *光学*, **37** (2008) 292-301.
- 7) 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.
- 8) S. J. D. Prince and B. J. Rogers: "Sensitivity to disparity corrugations in peripheral vision," *Vision Res.*, **38** (1998) 2533-2537.
- 9) S. C. Rawlings and T. Shipley: "Stereoscopic acuity and horizontal angular distance from fixation," *J. Opt. Soc. Am.*, **59** (1969) 991-993.