

両眼視差が隣接する単眼視領域の奥行き知覚に与える影響

藤井 芳孝*・金子 寛彦・福田 一帆

東京工業大学大学院総合理工学研究科物理情報システム 〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259-G2-3

*現所属：Centre for Vision Research, York University

Effect of Binocular Disparity on the Depth Perception in Adjacent Monocular Region

Yoshitaka FUJII,* Hirohiko KANEKO and Kazuho FUKUDA

Department of Information Processing, Interdisciplinary Graduate School of Science and Engineering, Tokyo Institute of Technology, 4259-G2-3 Nagatsuta-cho, Midori-ku, Yokohama 226-8502

*Present affiliation: Centre for Vision Research, York University, 4700 Keele St., Ontario, M3J 1P3, Canada

In monocular regions, such as blind spot or half occluded region, binocular disparity is not defined because the corresponding retinal image is absent. In this study, we investigated whether depth perception in a monocular region adjacent to binocular regions is affected by binocular disparity in the binocular regions or it depends only on the monocular cues in the monocular region. The results showed that perceived surface in the monocular region appeared to curve to the binocular surface smoothly. These results indicate that depth perception in the monocular region depends not only on the monocular cues but also on the adjacent disparities in the binocular regions.

Key words: human vision, disparity, depth perception, monocular field, binocular field

1. 序 論

人間の視覚系は、三次元空間である外世界を知覚するために、さまざまな奥行きに関する情報（奥行き手がかり）を用いている。網膜像から得られる奥行き手がかりとしては、片眼の網膜像で得ることができる線遠近法・遮蔽・陰影・相対的大きさといった単眼奥行き手がかりや、左右両眼の網膜像の差異を用いる両眼視差などの両眼奥行き手がかりなどがある。網膜外情報としては、眼筋の情報を用いた眼球輻輳角・レンズの調整強度なども奥行きの知覚に用いていることが知られている。人間の視覚系はこのようさまざまな奥行き手がかりを用いて奥行きを知覚している¹⁾。しかし、複数の奥行き手がかりが存在する場合、それぞれの手がかりは異なる処理系を経るため、そこから得られる奥行きは必ずしも同じとは限らない。そこで、人間の視覚系は、それぞれの奥行き手がかりを最終的に1つに統合していると考えられる。

複数の奥行き手がかりがどのように統合されるかについ

での研究は、これまで数多くなされている。その中でもよく知られているのが、Landyらによる加重平均モデルである²⁾。Landyらは、互いに矛盾する奥行き手がかりをもつ刺激の奥行き知覚がどのように統合されるのかを明らかにするために、テクスチャーの付いた円筒が回転する刺激を用いた実験を行った。円筒に付いたテクスチャーの形状分布が示す奥行きの大きさと、テクスチャーの速度分布が示す奥行きの大きさを矛盾させて実際に知覚される奥行きがどのようになるかを調べ、その結果、被験者が知覚する奥行き量は、テクスチャーの形状分布による奥行きと運動分布による奥行きの加重平均で表されることを発見した。また、その加重平均の重み付けは、テクスチャーに付けたノイズの量で増減することから、重み付けは手がかりごとの信頼度に基づいていると結論づけた。この信頼度に基づいた加重平均モデルは、その後の研究でさまざまな奥行き手がかりの組み合わせに適用されている³⁾。Landyらをはじめ、奥行き手がかりの統合に関する研究は多数行われてい

E-mail: yoshitaka.fujii@ip.titech.ac.jp

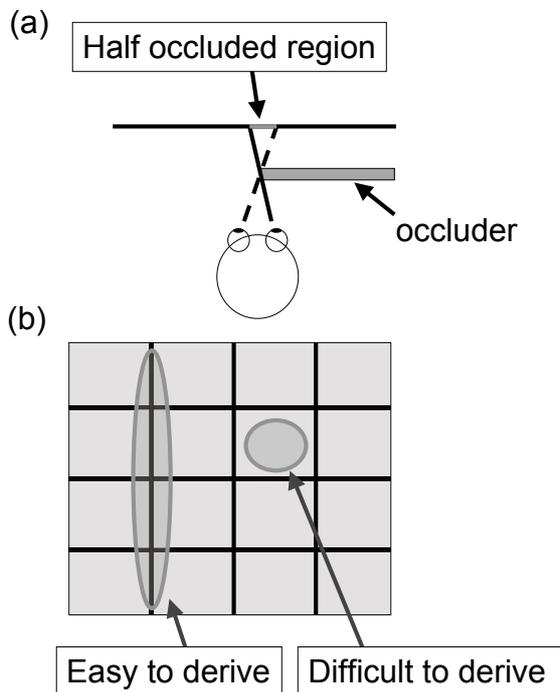


Fig. 1 Examples of the situations to derive binocular disparities. (a) Half occluded region: The marked region is observed with only one eye (in this case left eye only). (b) The surface with grid on a uniform texture: At the grid, it is easy to derive disparity although it is difficult to derive disparity in other parts of the surface.

るが、それらはいずれも、特定の物体や領域（例えば Landy らの研究の場合の円筒）において複数の奥行き手がかりが重なっている場合の統合であり、複数の異なった領域間で、単一もしくは複数の奥行き手がかりがどのように統合されるかについては明らかではない。

しかしながら、奥行き手がかりはすべての領域に存在しているわけではない。各奥行き手がかりが空間的にどのように分布するかを考えた場合、それぞれの奥行き手がかりには得やすい場所・得づらい場所が存在していることがわかる。例えば、両眼視差を奥行き知覚に用いるためには、当然ながら左右両眼に対応する網膜像の入力が必要である。しかし、対応する網膜像は常に得られるわけではない。例えば、左右眼の視野の耳側の外縁部は、鼻によって片眼の視線が遮蔽されることにより単眼にしか像の入力が得られない⁴⁾。このような片眼の視線のみが遮蔽される領域は、奥行き方向に面が重なる場合にも生じ、半遮蔽領域とよばれる (Fig. 1(a))。そのほかにも、盲点に対応する場所は単眼のみの入力となり、網膜がケガや病気などで損傷を受けた場合などにも、両眼の対応は得られなくなる。このように一方の入力が完全に得られない場合でなくとも、両眼の対応をとりづらい場合は起こる。Fig. 1(b) のようなタイル貼りの面を見ている状況を考えると、タ

イルの面の部分は特徴に乏しくほぼ一様な面となっているため、左右の網膜像での対応がとりづらく、両眼視差の検出は非常に困難である。一方で、タイルの継ぎ目の部分については対応が非常にとりやすく、わずかなずれでも検出しやすい。このように、両眼視差の手がかりは空間的に偏在しているといえる。しかし、われわれは普段、この情報の部分的な欠落や偏在を意識することはない。このことから、人間の視覚系は両眼視差が得られない場合、なんらかの方法で欠落を補っているのではないかと考えられる。この考えを示す現象として、ステレオキャプチャーという現象がある⁵⁾。この現象は、両眼視差によって奥行きが定義されない領域の奥行きが、両眼視差による周辺領域の奥行きと同じになる（捕獲される）現象である。すなわち、この現象は、両眼視差の情報は両眼視差が定義される場所のみではなく、周辺の領域に影響を与えることを示唆している。両眼視差の情報が周辺の領域に影響を与えるのであれば、局所的に両眼視差が定義できない場合でも、周辺の領域から補うことで、両眼視差の欠落の影響は緩和されるであろう。視差の情報がどれくらいの範囲まで影響を与えるかという問題に関して、Georgeson ら⁶⁾の実験においては、両眼視差を伝搬しやすいと考えられる水平線のテクスチャーを用いた場合、単眼視領域における影響範囲は数 deg 以上にも及ぶことが示唆されている。これらの研究においては、両眼視差が欠落している領域では、両眼視差が得られる領域から両眼視差が伝搬し、視差が定義できる領域と同じ奥行きとして処理されることが示唆されているが、他の奥行き手がかりが存在していた場合については考慮されておらず、伝搬した両眼視差と他の奥行き手がかりがどのように統合されるかについては明らかではない。

そこで、本研究では、両眼視差情報の存在しない単眼視領域の知覚的奥行きが、周辺の両眼視領域の両眼視差によって影響を受けることを明確にし、その影響が、単眼視領域の両眼視差以外の奥行き手がかりとどのように統合されるのかを検討した。また、単眼視領域への両眼視差情報の伝搬の性質を明らかにするために、両眼視領域の両眼視差の分布の影響も調べた。

2. 実験 1

本実験では、両眼視領域と単眼視領域を隣接させることにより、単眼視領域での奥行き知覚が単純に単眼奥行き手がかりで決まるのか、それとも隣接する両眼視領域の両眼視差の影響を受けるのか明らかにし、さらに、その両眼視差情報が単眼視奥行き手がかり（相対的大きさ手がかり）とどのように統合されるかを調べることを目的とした。

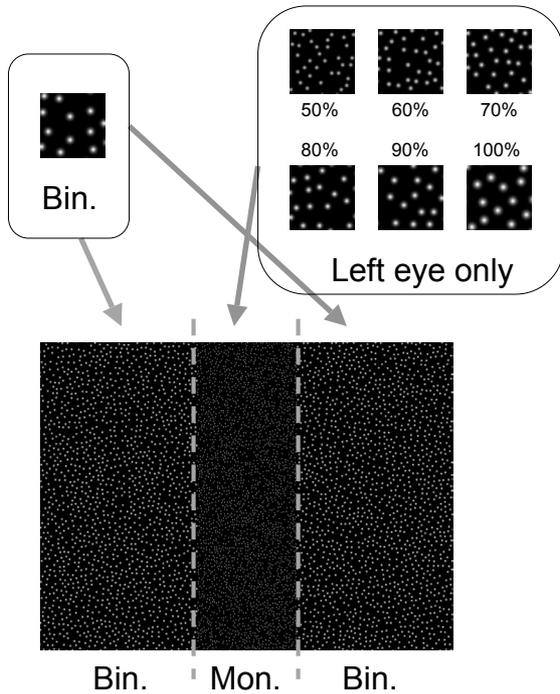


Fig. 2 Stimulus configuration in the experiment 1. The central region specified by dashed lines (not shown in the actual stimulus) is the monocular region adjacent to binocular regions. The size of dots in the monocular region varied from 50% to 100% of those in the binocular regions.

2.1 実験方法

実験刺激は、Fig. 2 に示すようなランダムドットパターンを用いた。中央の単眼視領域は、左眼のみにドットを呈示することで両眼視差を排除した。単眼視領域の両側に、ランダムドットステレオグラムによって両眼視領域を設けた。この領域の視差は、実験 1 においては常にディスプレイと同じ奥行きの前額平行面を示していた。刺激全体の大きさは横 40.6 deg×縦 31.0 deg で、単眼視領域はその中央の横 10 deg×縦 31.0 deg であった。

刺激を構成するドットは、アンチエイリアスの手法を用いて、二次元ガウス分布状の輝度（最高輝度 54.5 cd/m²）をもっていた。ドットの大きさ（ガウス分布の σ 値）は両眼視領域で 4.9 arcsec で、単眼視領域のドットの大きさは、両眼視領域のドットの大きさの 50, 60, 70, 80, 90, 100% の 6 条件であった。ドットの密度は、両眼視領域および単眼視領域の 100% 条件で、約 6.2 dots/cm² であった。単眼視領域のドットの密度は、ドットの大きさが小さくなるに従って増加した。これは、テクスチャーをもった面が異なる奥行きをもっている場合と同じ状況を模擬するためであった。

単眼視領域と両眼視領域のドットの相対的な大きさの違いは奥行き手がかりを与える。この手がかりは、ドットの

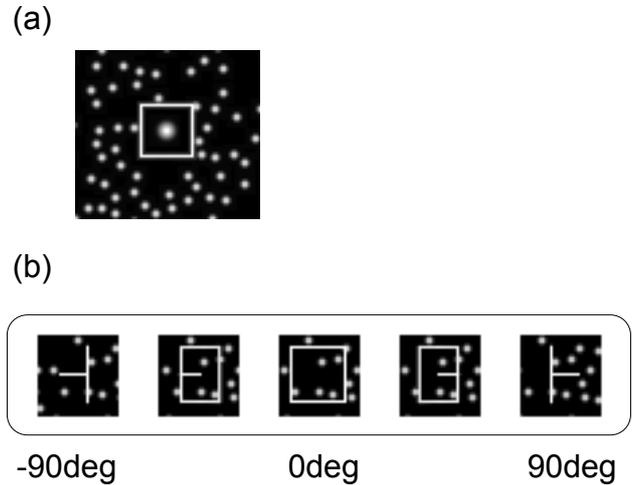


Fig. 3 The configurations of probe stimuli used in the experiment 1 and 2. (a) The probe used in the depth response task. Depth of the dot surrounded by the square was adjusted to perceived depth at the target position. (b) The probe used in the slant response task. Slant angle of “pushed pin” was adjusted to the local slant of the perceived surface about the vertical axis. These stimuli were defined with binocular disparity and perspective cues.

大きさが等しい 100% 条件で単眼視領域は両眼視領域と同じ奥行きであることを表し、小さくなるに従ってより遠方にあることを表している。ドットの大きさは各領域内では一定なので、それぞれの領域で単眼奥行き手がかりは平面であることを示している。すなわち、単眼視領域での奥行き知覚が単眼奥行き手がかりのみで決まるのであれば、単眼視領域で知覚される形状は平面であると予想される。しかし、もし、単眼視領域での奥行き知覚が、隣接する両眼視領域の奥行きから外挿して類推するような処理により決定されているのであれば、単眼視領域で知覚される奥行きは、単眼視領域と両眼視領域の境界付近では両眼視領域の奥行きに近くなり、境界から離れていくに従って、徐々に単眼奥行き手がかりによる奥行き面に近くなるような形状が知覚されると予想される。

被験者が知覚した奥行き形状を調べるために、2 種類の応答方法を行った。それらは、知覚形状の奥行きを直接応答する depth 応答と、知覚形状の奥行き方向の傾きを応答する slant 応答であった。depth 応答では、被験者は刺激上に呈示される応答用プローブドット (Fig. 3(a)) を用いて、単眼視領域におけるその位置の知覚的奥行きを調整法で応答した。被験者は、手もとのトラックボールを用いて、そのプローブの視差を変えることで奥行きを自由に变化させることができた。プローブの奥行き初期値は、トライアルごとにランダムであった。プローブドットの大きさは両眼視領域の他のドットと同じ大きさであったが、正

方形のインジケータ (1 辺 49 arcmin, 両眼視差によって常にディスプレイ面と等しい奥行きに呈示) に囲まれて呈示されたため見分けることができた。プローブの呈示位置は、被験者の眼の高さ (=スクリーンの中心の高さ) で、正面 (0) および正面から水平に左右に $\pm 1.3, 2.7, 3.3, 4.0, 4.7$ cm の 11 か所のいずれかであった。単眼と両眼の境界は、正面から ± 3.6 cm (5.0 deg) の位置に存在した。一方の slant 応答では、Fig. 3(b) のような四角形の画鋸状の応答プローブを用いた。画鋸状プローブは、その中心がディスプレイ面と等しい奥行きに呈示された。被験者は手もとのテンキーでプローブを垂直軸のまわりに回転させることができ、画鋸プローブの底面をプローブの中心位置の面の傾きと平行になるように (すなわち、画鋸のピンの方向を知覚面の法線となるように) 調整することで、プローブ位置での面の知覚的傾きを応答した。画鋸の奥行き形状は、平行投影による遠近法と両眼視差を用いて定義された。いずれの応答方法も応答時間に制限はなく、被験者は刺激を見ながら納得がいくまで調整することができた。実験条件は、各応答方法に対して 66 条件 (単眼ドットの大きさ 6 条件 \times 応答位置 11 条件) で、各条件 10 回 (YF のみ 5 回) ずつ行った。2 種類の応答方法は別のブロックで行い、応答の混乱が起らないようにした。

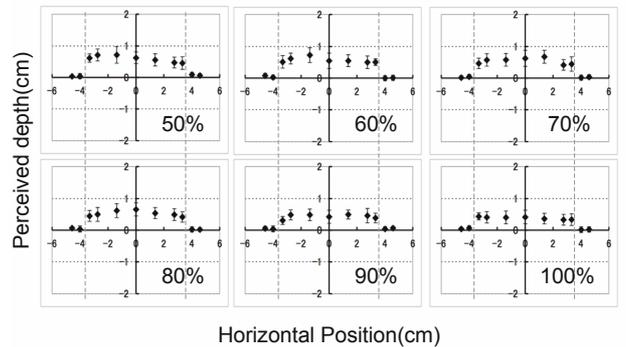
実験は暗室内で行った。刺激はコンピューター (Apple Computer 製 Power Mac G4, Mac OS J1-9.1) を用いて生成し、ミラーステレオスコープ (Sony 製 21 インチ CRT ディスプレイ GDM-F520 を 2 台用いて構成) に呈示した。視距離は 40 cm であった。被験者は 6 名で、うち 2 名 (YF, KF) は著者であった。被験者は全員が視力正常または矯正視力正常であり、事前に両眼立体視が可能であることを確認した。

2.2 実験結果・考察

被験者 IN の各ドットの大きさ条件に対する depth 応答の結果を Fig. 4(a) に、slant 応答の結果を Fig. 5(a) に示す。Fig. 4 の縦軸は奥行き (ディスプレイの奥行きが 0 で、被験者から見て奥が正) を表し、横軸はディスプレイ上の応答位置で、プロットは被験者の応答、エラーバーは標準偏差を表す。Fig. 5 は、縦軸が傾き (左手手前の傾きが正) を表す以外は Fig. 4 と同じである。

被験者 IN の depth 応答の結果にみられるように、単眼視領域が全体として奥方向に知覚された。そして、この結果は、ドットの大きさ条件であまり違いがみられなかった。この結果について、応答領域 (単眼視領域か両眼視領域かの 2 水準) と単眼視領域のドットの大きさ (6 水準) の 2 要因で分散分析を行った。その結果、応答領域 ($F_{(1, 648)}$

(a) IN: all conditions



(b) All observers: average of dot size conditions (except 100%)

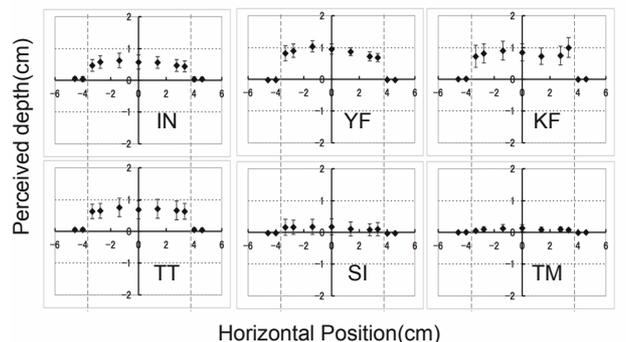


Fig. 4 Results of depth response task in experiment 1. (a) Each panel shows the result of each dot-size condition for subject IN. (b) Each panel shows the results of each observer. The data show the average of all dot-size conditions, except 100% condition. Gray dashed lines indicate the boundary between binocular and monocular regions. See the text for the details of the figures.

$= 1245.45, p < 0.01$) とドットの大きさ ($F_{(5, 648)} = 6.12, p < 0.01$) のいずれも主効果がみられた。ドットの大きさについてさらに Ryan 法による多重比較を行った結果、100% 条件と 50%~80% 条件との間、および、90% 条件と 50% 条件の間でのみ有意な差がみられた ($p < 0.05$)。いずれの場合でも、両眼領域と単眼領域のドットの大きさの違いが小さい場合のほうが、それらの領域の奥行きの違いが小さくなる方向である。同様に、IN 以外の 5 人についても検定を行った結果、全員で IN 同様に応答領域の有意な主効果 (YF: $F_{(1, 318)} = 2272.50$, KF: $F_{(1, 648)} = 1573.61$, TT: $F_{(1, 648)} = 1226.34$, SI: $F_{(1, 648)} = 97.61$, TM: $F_{(1, 648)} = 270.4$, いずれも $p < 0.01$) がみられた。一方で、ドットの大きさについては、3 名の被験者 (YF, SI, TM) で有意な主効果 (YF: $F_{(5, 318)} = 3.39$, SI: $F_{(5, 648)} = 3.06$, TM: $F_{(5, 648)} = 6.58$, いずれも $p < 0.01$) がみられた。ドットの大きさに関しての多重比較を行ったところ、ほとんどは 100% 条件と他のドットの大きさの間で差がみられたものであり、100% 条件以外の条件間での有意な差は 1 項目 (TM の 70% 条件と 80% 条件の間) のみであった。他の 2 名の被験者 (KF, TT) で

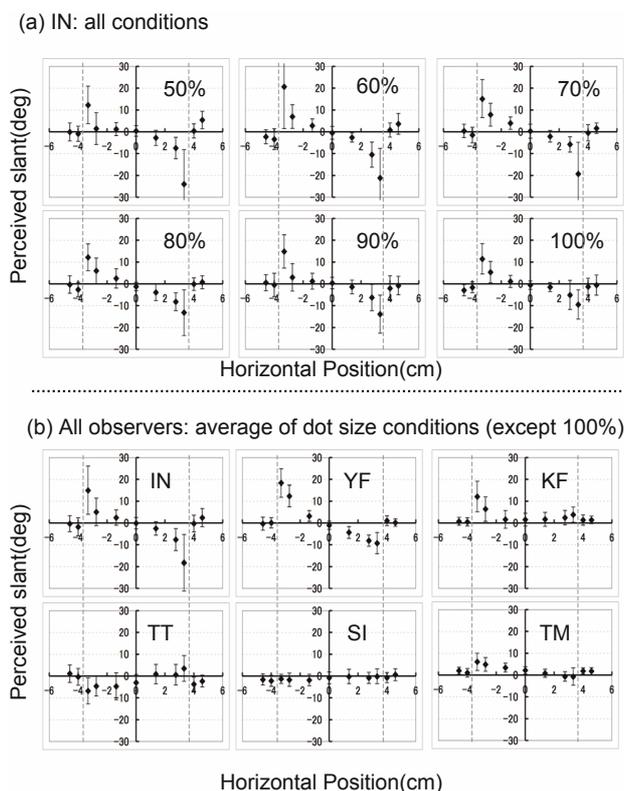


Fig. 5 Results of slant response task in experiment 1. (a) Each panel shows the results of each dot-size condition for subject IN. (b) Each panel shows the results of each observer. The data show the average of all dot size conditions, except 100% condition. Gray dashed lines indicate the boundary between binocular and monocular regions. See the text for the details of the figures.

は、ドットの大きさの有意な主効果はみられなかった (KF: $F_{(5, 648)} = 1.29$, TT: $F_{(5, 648)} = 1.30$, いずれも $p > 0.05$). そのため、すべての被験者において、少なくともドットの大きさ 100% 以外の条件に対する結果には差がないと考え、各被験者について 100% 条件以外の結果を平均し、この結果を Fig. 4(b) および Fig. 5(b) に示す。グラフの見方は、Fig. 4(a) および Fig. 5(a) と同様である。

これらのグラフにおいて、単眼視領域が奥に見えるという傾向は、IN, YF, KF, TT の 4 名の被験者について特に顕著に現れている。しかし、この傾向をドットの大きさ手がかりのみで説明することは難しい。上述のように、2 名の被験者においてはドットの大きさの有意な影響はみられず、他の 3 名の被験者においても、90% 以下のドットの大きさ条件間で有意な奥行き差がみられなかったことから、ドットの大きさの奥行き手がかりとしての影響が非常に弱かったと考えられる。この原因としては、ドットの相対的な大きさの違いが、奥行きの違いではなく、異なる大きさのドットが付いたテクスチャーだと判断されてしまったためであると考えられる。

ドットの相対的な大きさ以外に、単眼視領域が全体的に奥に見える原因として考えられるのが、単眼視領域が半遮蔽領域として解釈された可能性である。前述の通り、面が重なるなどして片方の眼からの視野を遮るような場合には、単眼視の領域が生まれる。今回の実験では遮蔽物を用いたわけではないが、中央の単眼視領域右側の両眼視領域との境界においては、両眼視領域の面がそれより奥にある面を遮蔽しているという状況（左眼のみに像が見える）と一致している。左側の境界においては半遮蔽領域としての解釈ができず、奥行き情報は得られないが、相対的な大きさがかりや面の連続性から、右境界と同じ奥行きと解釈されたと考えることで説明できる。その結果、遮蔽されるドットの面が両眼視領域より相対的に奥に存在すると判断され、単眼視領域のドット面が両眼視領域よりも奥に知覚される可能性がある。

知覚された面の形状については、被験者 IN の depth 応答 (Fig. 4(a)) の結果からはあまり明確ではないが、slant 応答 (Fig. 5(a)) の結果をみると、単眼視領域の左側の境界付近での応答は正 (= 右側が奥) の傾きを、右側の境界では負 (= 左側が奥) の傾きを知覚していたことがわかる。そして、この傾きは単眼と両眼の境界から離れるに従って減少している。すなわち、単眼視領域で知覚された面の形状は、単眼視領域中央部分の奥行きと単眼視領域に接する両眼視領域との境界での奥行きのギャップを減少させるように湾曲していることがわかる。単眼視領域の奥行き手がかりが平面を示しているにもかかわらず、曲面的に知覚されるというこの結果は、単眼視領域の奥行き知覚が単眼奥行き手がかりのみではなく、両眼視領域の影響を受けており、その影響は境界からの距離が離れるに従って小さくなるということを示している。

各被験者について、各位置における slant 応答の結果を Fig. 5(b) に示す。depth 応答と同様に、100% 条件以外の結果の平均である。この結果より、被験者 YF は被験者 IN と同様の結果を示している。被験者 KF と TM については、左側の境界のみ明確に同様の傾向がみられる。この結果については、前述の単眼視領域が半遮蔽領域として解釈されているという考えで説明ができる。本実験においては、単眼視領域の刺激は左眼のみに呈示を行った。左眼のみ見えて右眼に見えないという半遮蔽面は、右側の面が左側から見える面を遮蔽する場合に生じる。すなわち、本実験の右側の境界ではこの状況と一致するため、一致しない左側の境界よりも、単眼視領域が半遮蔽領域としてより解釈されやすいと考えられる。その結果、右側においては、半遮蔽領域として解釈される効果が強く、単眼視領域

と両眼視領域でより明確に異なる面として知覚されたと考えられる。被験者 SI については、曲面的に知覚されるような傾向はみられなかった。これは、被験者 SI がそもそも、単眼視領域が奥に見えるという傾向が非常に弱いためであると考えられる。また、TT については、逆方向の傾きをもつ傾向も若干みられる。

以上に述べた各被験者の結果について、単眼視領域の面の傾き知覚における、1 要因（単眼視領域内の応答位置 7 水準）の分散分析を行った。その結果、すべての被験者で応答位置の主効果がみられた (IN: $F_{(6, 343)}=98.93$, YF: $F_{(6, 168)}=165.06$, KF: $F_{(6, 343)}=38.52$, TT: $F_{(6, 343)}=26.45$, SI: $F_{(6, 343)}=2.70$, TM: $F_{(6, 343)}=43.01$, SI のみ $p<0.05$, それ以外は $p<0.01$)。さらに多重比較を行った結果のうち、単眼視領域内での境界に最も近い左右の点 (± 3.3 cm 条件) と中央 (0 条件) の間の比較に注目すると、IN, YF, TM, TT の 4 名は左右いずれの境界付近でも、KF については左側の境界付近のみ、中央と有意な差 ($p<0.05$) がみられた。すなわち、単眼視領域が同じ傾きをもった平面に知覚されるのではなく、両眼視領域との境界に近い位置と中央部分との知覚的な局所的な傾きは有意に異なる。このことから、個人差があるものの、単眼視領域において知覚される奥行き形状に、隣接する両眼視領域の奥行きが影響することが示されたと考えられる。

3. 実験 2

本実験では、単眼視領域の奥行き知覚が両眼視領域の両眼視差の影響を受けることをより明確にするために、単眼視領域の奥行き手がかりは変化させずに隣接する両眼視領域の視差分布を変化させた。単眼視領域の奥行き知覚が両眼視差の影響を受けるのであれば、単眼視領域での奥行き知覚が隣接する両眼視領域の視差分布の影響を受けて変化することが予想される。

3.1 実験方法

実験刺激は、実験 1 と同様に、刺激中央の単眼視領域には左眼のみにランダムドットを呈示し、その両側を両眼視領域とし、両眼視領域はランダムドットステレオグラムによって両眼視差による奥行き曲面形状を与えた。単眼視領域の範囲は実験 1 と同じであった。本実験では、単眼視領域のドットの大きさは、常に 4.9 arcsec で、両眼視領域のドットの大きさと等しかった。

両眼視領域で両眼視差により示された面の奥行き形状は正弦波状で、振幅が 2 cm、波長は単眼視領域の 2 倍 (14.6 cm)、すなわち単眼視領域に半波長の正弦波が入るようにした。位相は画面中央で 0, $\pi/2$, π , $3\pi/2$ となる 4 条件

で行った。刺激を構成するドットの密度は実験 1 より低く、約 1.4 dots/cm² であった。これは、視差の変化に伴う密度変化の影響を小さくするためであった。

本実験では、被験者は depth 応答のみを行った。しかし、実験 1 の depth 応答とは異なり、応答用のプローブは画面中央に固定し、応答する位置を示すドットを刺激中の各位置に置きこれを点滅させた。これは、予備実験で境界付近に注目している場合と、そうでない場合で知覚形状が変化するという内観報告があったため、視線方向を一定に保つためにすべての条件で応答用プローブを正面に呈示するためであった。また、実験 1 の depth 応答で応答用ドットの呈示位置を示すために囲っていた正方形のうち、垂直線を排除した。これは、実験 2 の奥行き応答レンジが実験 1 より大きく、ドットの奥行きが大きい場合に、視差による変位によって応答用ドットと垂直線が干渉してしまうことを避けるためであった。それ以外は実験 1 の depth 応答と同じであった。応答する場所は、刺激中央から水平方向に $\pm 0.91, 2.7, 3.3, 4.0$ cm の 8 か所であった。合計の条件数は 32 (位置 8 × 位相 4) で、各条件を 5 回ずつ行った。被験者は 5 名で、YF, SI, TT の 3 名は実験 1 にも参加していた。AK, KK の 2 名は新規の被験者であった。

3.2 結果・考察

結果を Fig. 6 に示す。グラフの軸およびエラーバーは Fig. 4 と同様である。曲線は、両眼視領域に呈示した両眼

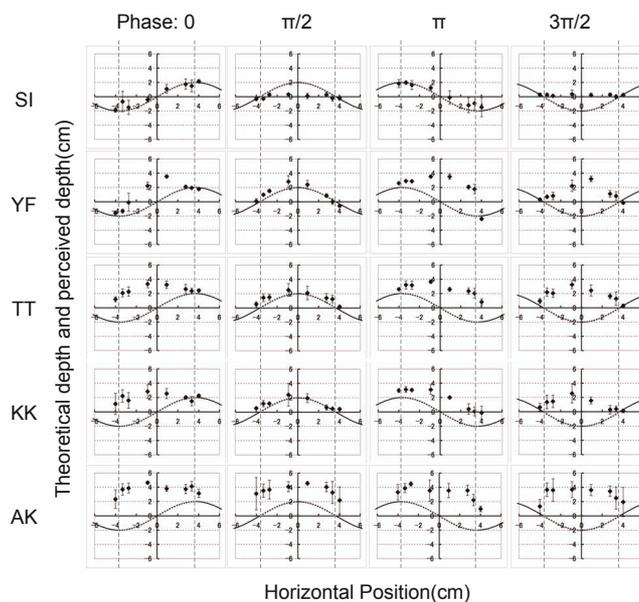


Fig. 6 Results of experiment 2. Panels in each column show the results of each condition of phase of disparity modulation in the binocular regions. Panels in each row show the results of each subject. Gray dashed lines indicate the boundary between binocular and monocular regions.

視差から予想される奥行き（両眼視領域の実線）とその正弦波を、単眼視領域まで延長したものである（単眼視領域の点線）。多くの被験者で、位相条件の違いによって単眼視領域で知覚される形状が変わる傾向がみられる。単眼視領域における情報は、位相条件にかかわらず全く同じなので、この形状の変化は両眼視領域の違いによって生じていると考えられる。したがって、この結果は、単眼視領域が両眼視領域の影響を受けるという実験1の結果をより明確に支持している。

まず、被験者SIの結果をみると、単眼視領域の奥行きは、位相 $\pi/2$ と $3\pi/2$ の条件でほぼ平面、位相0と π の条件では全体的に傾いた面の形状となっているが、すべての条件で両端の両眼視差により定義される奥行き位置と点が連続的につながるような知覚形状になっている。次に、被験者YFの結果をみると、SIの結果でみられた両眼の奥行きと連続的につながる傾向に加えて、単眼視領域で全体的に奥方向に知覚する傾向がみられた。これらの結果は、実験1のYF、INでみられたのと同様の傾向であるが、本実験のほうがより顕著であった。被験者SIは、実験1でも単眼視領域が奥に見える傾向はみられなかったため、被験者内での傾向は同じである。被験者TTの結果においてもYFと同様の傾向がみられたが、位相0条件の右側の境界、位相 π 条件の左境界では、単眼視領域の見えが両眼視領域の見えにつながるといふより、むしろ、両眼視領域の点が単眼視領域に引っ張られている傾向がみられる。いずれにしても、単眼視領域と両眼視領域の知覚が連続的となる傾向はみられる。被験者KK、およびAKの結果においても、単眼視領域と両眼視領域の見えがつながる傾向と、単眼視領域全体が奥に知覚される傾向がみられた。このことは、単眼視領域が両眼視領域に影響を受けるだけでなく、その逆に両眼視領域が単眼視領域の知覚に影響を与えているともいえる。一方で、この傾向は、実験1ではいずれの被験者にもみられなかった。この原因は、実験1の両眼視領域の形状が前額平行面であったことによるかもしれない。実験2では、両眼視差による両眼視領域の形状が曲面であるため、両眼視領域の奥行きが多少変化しても、面の特徴が大きく変化するわけではない。一方で、平面の刺激の場合、境界付近の両眼視領域が単眼視領域に引きずられると、曲面として知覚されることになるため、その性質が大きく変化する。その結果、両眼視領域が単眼視領域に引きずられると、前額平行面であることを明示する両眼視差やドットの相対的奥行き手がかかりなどと大きく性質が異なる面を知覚することになるため、そのようなことが起こりづらかったのではないだろうか。

以上に述べた、単眼視領域の奥行き知覚に与える両眼視領域の視差分布の違いによる影響を、視差分布の位相と単眼視領域内の位置の2要因の分散分析により検討した。その結果、TTを除くすべての被験者で、位置と位相の交互作用が有意であった(SI: $F_{(15, 96)}=15.87$, YF: $F_{(15, 96)}=15.45$, KK: $F_{(15, 96)}=3.02$, AK: $F_{(15, 96)}=2.30$, いずれも $p<0.01$)。この結果は、単眼視領域の奥行き形状が、周囲の両眼視差の分布形状によって変化することを示すといえる。

上で述べたように、単眼視領域の奥行き知覚には個人差がみられた。これは主として、半遮蔽領域手がかかりや、両眼視領域の単眼視領域への影響の相対的な強度における個人差に起因すると思われる。奥行き手がかかり強度に個人差があるのは、これまでの研究からも知られている⁷⁻⁹⁾。ただ、知覚される形状には個人差があるものの、単眼視領域で知覚された面は、単眼奥行き手がかかりが示す平面ではなく、両眼視領域の奥行きに近づくように湾曲した曲面として、すべての被験者で知覚されていた。このことは、単眼視領域への両眼視領域の影響が境界から遠くなるに従って小さくなるという定性的な傾向に関しては、被験者間で一貫していることを示唆している。

4. 総合考察

実験1、2より、単眼視領域の知覚形状は単眼奥行き手がかかりのみではなく、両眼視領域の影響を受けることが明らかになった。そして、今回の実験から、単眼視領域の知覚形状は次のような特徴をもつと考えられる。第1に、単眼視領域の奥行きは、両眼視領域との奥行きのギャップがなるべく小さくなるように知覚される。第2に、単眼視領域が両眼視領域に引きつけられる効果は、両眼視領域からの距離が増加すると減少する。第3に、単眼視領域は全体的に奥に見える傾向がある。

このうち、第3の特徴については、実験1の考察で述べたように奥行き知覚における半遮蔽領域手がかかりが関連すると思われるが、本論文で問題としている視差情報の単眼視領域への影響という観点には直接関連しないと考えられる。一方で、第1と第2の特徴は、両眼視領域が欠落している領域の奥行き知覚を決定する際に、視覚系がその欠落を補うための処理として有用なものであると考えられる。盲点や半遮蔽領域など、両眼視領域内での視差の欠落領域は一般的にそれほど大きくないため、その内部での奥行きが変化することも少ない。奥行きが変化する場合、エッジやテクスチャーの変化など単眼でも検出可能な領域の変化を伴うことが多いと考えられ、そのような変化の情報がない場合には、その領域での奥行きを周辺両眼視可能な

領域から延長的に推定することは妥当であると考えられる。このように、視差の情報が欠落している領域の奥行き知覚が周囲と同じ奥行きで補完されるというのは、ステレオキャプチャーなどの先行研究と同様の結果である。

一方で、知覚される奥行きが曲面的に変化するという結果は、単眼視領域の影響は両眼視領域からの距離に依存するというを示している。このことは、両眼視差の情報が欠落している領域への補完は、境界から単純に同じ奥行きで類推するわけではないことを示している。すなわち、単眼視領域と両眼視領域の境界に近い領域では、隣接する両眼視領域の影響を顕著に受けるが、その重みは境界から離れるに従って減衰するというを示している。この、両眼視差の欠落領域で知覚される奥行きが距離によって変化するという結果は、ステレオキャプチャーなどこれまでに知られていた現象にはみられない特徴であるが、奥行き情報の伝搬や領域間での奥行き手がかりの統合のメカニズムを検討するうえで重要な性質であると考えられる。

以上の特徴を総合すると、視差の欠落領域では、減衰する重み付けで延長推定した両眼視差の情報と他の奥行き手がかり（本実験の場合、おもに半遮蔽領域として解釈されることで奥に見える効果）との統合により知覚的奥行きを決定するモデルを考えることができる。Landyらの奥行き手がかり間の加重平均モデルに基づくと、その重み付けは、手がかりの信頼度によって決まる。延長推定した両眼視差の信頼度は、両眼視領域に近いほど高く、離れるに従って減少すると考えられるであろう。そのため、単眼視領域で知覚される形状は、両眼視領域に近い領域では両眼

視領域の奥行きに近いように知覚され、離れるに従って両眼視差の影響が小さくなり、次第に他の奥行き手がかりが示す奥行きとなる。このように考えると、本実験でみられた知覚形状の特徴を説明することができる。

この研究の一部は、日本学術振興会グローバル COE プログラム“フォトンクス集積コアエレクトロニクス”の支援を受けて行った。

文 献

- 1) I. P. Howard: "Introduction," *Seeing in Depth*, Vol. 1 (I. Porteous, Thornhill, 2002) p. 5.
- 2) M. S. Landy, L. T. Maloney, E. B. Johnston and M. J. Young: "Measurement and modeling of depth cue combination: In defense of weak fusion," *Vision Res.*, **35** (1995) 389-412.
- 3) I. P. Howard and B. J. Rogers: "Interactions between depth cues," *Seeing in Depth*, Vol. 2 (I. Porteous, Thornhill, 2002) pp. 469-494.
- 4) M. Hershenson: *Visual Space Perception: A Primer* (MIT Press, Cambridge, 1998) p. 12.
- 5) 塩入 論: "奥行き (立体) 視", 視覚情報処理ハンドブック (朝倉書店, 2000) pp. 294-296.
- 6) M. A. Georgeson, T. A. Yates and A. J. Schofield: "Depth propagation and surface construction in 3-D vision," *Vision Res.*, **49** (2009) 84-95.
- 7) 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.
- 8) E. B. Johnston, B. G. Cumming and A. J. Parker: "Integration of depth modules: Stereopsis and texture," *Vision Res.*, **33** (1993) 813-826.
- 9) M. Sato and I. P. Howard: "Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast," *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.