

垂直大きさを視差モジュレーションを持つ刺激による局所的な傾き知覚

福永克己^{*,***,****}・金子寛彦^{**,*}

* 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科

〒630-0101 奈良県生駒市高山町8916-5

** 東京工業大学 大学院理工学研究科 像情報工学研究施設

〒226-8503 横浜市緑区長津田町4259

*** (株) ATR 人間情報通信研究所・**** (株) ATR 先端情報科学研究部

〒619-0288 京都府相楽郡精華町光台2-2-2

(受付：2001年1月9日；改訂受付：2001年3月27日；再改訂受付・受理：2001年5月21日)

Perceived Local Slant for the Stimuli with the Modulation of Vertical-Size Disparity

Yoshiki FUKUNAGA^{*,***,****} and Hirohiko KANEKO^{**,*}

* Department of Information Science, Nara Institute of Science and Technology (NAIST)
8916-5 Takayama, Ikoma-shi, Nara 630-0101

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

*** ATR Human Information Processing Research Laboratories・**** ATR Information
Sciences Division

2-2-2 Hikaridai, Seika-cho, Soraku-gun, Kyoto 619-0288

(Received 9 Jan 2001; Received in revised form 27 March 2001, 21 May 2001; Accepted 21 May 2001)
Kaneko and Howard (1997) reported that the horizontal dimension of the integration area for vertical-size disparity information defining perceived surface slant is about 20 degrees. We examined the vertical dimensions of this integration area to extend this finding. We measured perceived slant of surfaces defined by vertical-size disparity modulations to determine the spatial properties of vertical-size disparity processing. The stimuli were random-dot stereograms containing a sinusoidal modulation of vertical-size disparity along horizontal and vertical axes. Subjects indicated local surface slant by adjusting the angle of a manual rod. The results show that vertical-size disparity modulation along a vertical axis, as well as a horizontal axis, produces a modulation of perceived slant, and that local slant depends on the vertical-size disparity within a local area. Therefore, the integration area for vertical-size disparity information defining surface slant has a vertical limit, as well as a horizontal limit. We conclude that vertical-size disparity information is not necessarily integrated over the entire visual field.

1. はじめに

一方の眼に呈示される像が、もう一方の像に対して水平または鉛直方向に縮小（拡大）されている刺激を持つ左右像の大きさの差は、それぞれ水平大きさ視差 (Horizontal-size disparity), 垂直大きさ視差 (Vertical-size disparity) と呼ばれる。右眼像が水平または鉛直方向に縮小されている場合に生じる個々の視差の分布を、それぞれ図1の左上図（一様な水平大きさ視差）、右上図（一様な垂直大きさ視差）に示す。ここで、各短線分の黒い円がついている端が右眼像の位置で、線分の方の端が対応する左眼像の位置である。

右眼像が左眼像に対して縮小されて生じる水平大きさ視差を持つ刺激を観察した場合には、左側が奥で、右側が手前となるような鉛直軸回りの面の傾きが知覚される（図1左下図）。この現象は、刺激を構成する個々の点の水平視差と奥行き量の間で幾何学的な対応があることからその意味が説明でき、水平視差は局所的に処理されることを示唆している。それに対して、垂直大きさ視差を持つ刺激を観察した場合も、鉛直軸回りの面の傾きが知覚される。しかし、水平大きさ視差の場合と異なり、右眼像が縮小された場合には、左側が手前で、右側が奥となるような傾きが知覚される（図1右下図）。そして、個々の点の垂直視差と奥行き量の間で幾何学的な対応がとれない。

垂直視差によって奥行き知覚が生じることを初めて発見したのは Lippincott¹³⁾ であり、初めて定量的に研究したのは Ogle¹⁵⁻¹⁶⁾ である。しかし、垂直大きさ視差によって面の傾きが生じることを否定する研究もあった^{2,24)}。Kanekoら⁸⁾ は、垂直大きさ視差によって生み出される面の傾きは、刺激サイズが小さくなったり、視差を持たない周辺刺激が存在したりすることによって減少することを示し、過去の研究結果の矛盾が刺激の空間的形状によることを明らかにし、垂直大きさ視差が確かに知覚的面の傾きを生み出すことを示した。

垂直大きさ視差と水平大きさ視差は異なる処理過程を持つと考えられる。例えば、刺激サイズが視角 80 度の時、垂直大きさ視差によって生じる知覚される面の傾き量は、水平大きさ視差によって生じる傾き量の 70% である¹⁹⁾。また、水平視差は 3 cpd (cpd: cycles per degree) の視差変調まで個々の視差に対応した奥行きが知覚される^{17,21-23)} のに対し、垂直視差はある領域内で垂直大きさ視差を構成してはじめて奥行き知覚に影響を与える。画面上で視差がないドットと視差を持つドットが混ざった刺激を観察した場合、水平視差の場合は傾いた面と平らな面の 2 枚が知覚されるが、垂直大きさ視差の場合は 1 枚の傾いた面しか知覚されない^{1,8,20)}。このことは垂直視差が個々の点で処理されているのではなく、視野

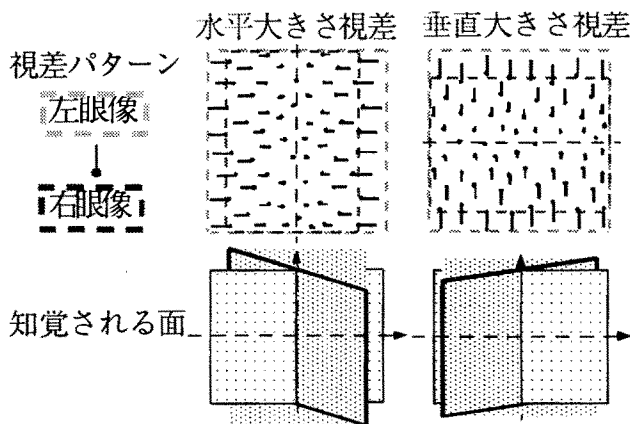


図1 視差パターンと知覚される面。左上図が水平大きさ視差パターンで、右上図が垂直大きさ視差パターン。その下の図がそれぞれの視差パターンに対して知覚される面。ここで、線分の黒い円がついている端が右眼像の位置で、線分の方の端が左眼像の位置を示す。

の広い範囲から抽出された垂直大きさ視差が、広い範囲の奥行き知覚に影響していることを示している。

この統合的垂直大きさ視差の抽出範囲の上限に関して次のような報告がなされている。

Rogers ら¹⁰⁾と Kaneko ら⁸⁾は視野の左右に、符号が逆の垂直大きさ視差を与え、それぞれの部分にその場所の周囲の垂直大きさ視差に対応した面の傾きが観察されることを報告した。また、Kaneko ら^{8,10)}は、垂直大きさ視差が水平方向に正弦波状に変化する刺激を用い、視差の変化の周波数が 0.04 cpd より低い場合に傾きが知覚されることを報告した。これらのことから、統合的垂直大きさ視差が抽出されるのは視野全体ではなく、水平方向に限定された領域であることが示唆される。

以上のようにこれまでの研究から、ある領域から抽出される統合的垂直大きさ視差が面の知覚の形状に寄与することがわかっている。しかし、その統合的垂直大きさ視差の決定がどれくらいの範囲からどのように行われているのかは明確ではない。特に、水平方向に関しては統合的垂直大きさ視差の抽出範囲が推定されているが¹⁰⁾、垂直方向に関しては調べられていない。また、垂直大きさ視差を持つ刺激の個々の場所における局所的な傾きを定量的に測定した研究も報告されていない。そこで本研究では、水平方向および垂直方向に変調された垂直大きさ視差を持つ刺激に対して、個々の場所で知覚される局所的な面の傾きを定量的に測定することにより、面の傾き知覚のための垂直視差処理過程の空間特性を詳しく調べ、水平のみならず垂直方向の統合的垂直大きさ視差の抽出範囲を探ることを目的とした。

2. 実験方法

本研究の実験では、視野内の垂直大きさ視差が二次元的に正弦波変化する刺激を用い、その刺激の局所的な面の傾きの知覚を測定することにより、垂直大きさ視差の分布と面の

傾き知覚の関係を定量的に調べた。ここでは、全ての実験に共通する、刺激の様相、刺激呈示装置、応答方法、応答装置、手続きについて記す。

2.1 刺激

刺激は、左右眼像用の2枚の画像からなるステレオグラムであり、暗黒の背景上に様々な視差を持った白色の円形のドットと、中心にある固視点で構成されていた。画像は縦1,022画素、横1,838画素で構成され、各画素は256階調のグレイスケールで表現されていた。各ドットは、直径1.03度(18.0mm)であり、固視点やドット同士が重なり合わないようランダムに配置されていた。各ドットの位置は本来1画素以下の精度で変えることはできないが、中心を最大輝度(20 cd/m²)とするガウス状の輝度分布を持たせたため位置を変えずに輝度に変化を持たせることにより、その位置を模擬的に1/100画素単位(視角2.83秒、画面上の距離0.0137 mmに相当)で制御できた。また、画面中央に、固視点として、他のドットより小さく一様な輝度(20 cd/m²)、直径20.6分の白いドット(6.0 mm)を呈示した。一つの刺激中にドットの数最大5,700個あった。

2.2 刺激呈示装置

ステレオグラムの作成と実験の制御にはパソコン(Power Macintosh 9500/150)を用いた。左右眼用の2枚の画像は、2台のプロジェクションモニタ(SANYO Hi-Vision LCD PROJECTOR HVP-100)で、リヤスクリーン(縦70.0度(1.40 m)、横101度(2.43 m))の範囲に偏光フィルターを通してそれぞれ投影された。被験者は、呈示した2枚の画像を左右眼に分離するため偏光フィルターを用いてこの刺激を観察した。視距離は1 mであった。被験者にはスクリーン枠を含めて刺激以外のものが見えないように、装置の周辺を暗幕で囲い、暗室で実験を行った。

2.3 応答方法および応答装置

面の傾きを応答するには、Gauge figure 法¹²⁾

や、経時比較法などがあるが、これらの応答法は、測定対象の刺激以外の画像が呈示されるため、調べたい刺激の見えが影響を受ける可能性がある。そこで、本研究では、被験者は視覚情報を使わず指示棒の角度を手で調節する角度応答法⁵⁾を用いて、知覚される面の傾き角度を応答した。

角度応答に用いた角度応答器には、水平の指示棒がその一端を中心に鉛直軸のまわりに回転できるように取り付けられていた。そして、指示棒は鉛直軸に対して ± 70 度まで自由に傾けられた。この装置は黒い布で覆われ被験者からは観察されなかった。ここで、指示棒を画面に対して垂直にしたときを0度とし、これに対して左に傾けた場合を負の傾き（知覚される面は左が奥で右が手前の場合）、右に傾けた場合を正の傾き（知覚される面は左が手前で右が奥の場合）とした。指示棒の傾きが0度になると引っかかりが感じられるように作られていたので、被験者はそれを手がかりとして用い、0度からの相対的な傾きであることを考慮して応答した。装置は、刺激の観察を妨げないように被験者の視線と刺激の中心を結ぶ線分の下方約30 cm 辺りに固定された。本実験で用いた応答法は、他の視覚刺激による本刺激の知覚への影響はないが、視覚情報を触覚情報に変換して応答するため、その変換に伴って生じる誤差（絶対量の増減、再現性）を考慮しなければならない。そこで、被験者毎に実際の対象物を観

察した時の対象物の角度と今回の方法により得られた触覚による角度の関数を求め、それにしたがって得られたデータを補正した²⁾。

2.4 手続き

実験において、被験者は椅子に座って顎台で頭部を固定した状態で刺激を観察した。このとき被験者の眼の位置を、刺激の中心と同じ高さ（床から1.42 m）になるように調整した。被験者は刺激が呈示されると、画面中央あるいは指定された点における局所的な面の法線方向の角度に、指示棒の角度が一致するように調節した。注視位置が変わることにより見かけの傾きが変化する可能性があるが、それらは量的な変化であり、傾きの方向、傾き量の相対的な関係は変化がないと考えられ、本実験の目的に対してこの方法を用いることは特に問題ないと思われる。調節時間は無制限であったが、通常5秒程で調節を完了した。この際、融像できない場合や、面が知

注) 予備実験において、実験者は角度呈示器の板（直径19.9度の円に内接する八角形、視距離1 m）を鉛直軸回りの任意の角度に傾け、被験者はそのとき視覚的に知覚される傾きを角度応答器により応答した。呈示された角度は、 -60 度から 60 度では 10 度刻み、 -30 度から 30 度では 5 度刻みの計 19 種類で、それぞれ 8 回繰り返した。各角度に対する応答の標準偏差の平均はHK:3.3, NU:3.3, YF:3.1度と小さく、本応答方法の再現性は高いと考えられる。この結果から得られた各被験者のデータを3次関数で近似し、これを用いて各被験者の本実験のデータを補正した。この関数の相関係数は全ての場合で 0.99 以上であり、近似の精度は高いといえる。

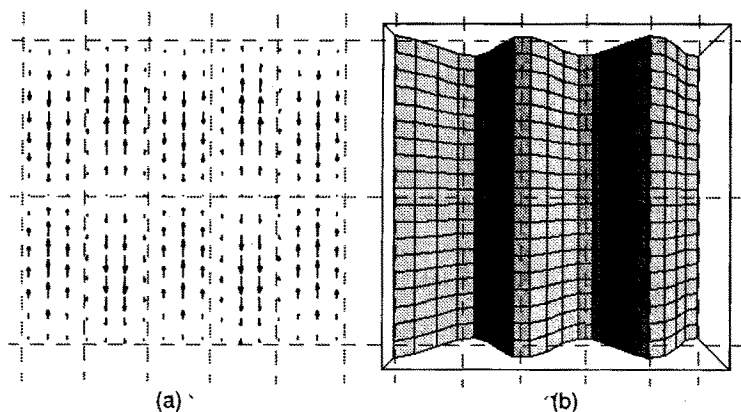


図2 実験1-aで用いられた刺激の視差の分布(a)と知覚された面の模式図(b)。横軸は画面上でのX座標、縦軸は画面上でのY座標、矢印の始点は左眼像の位置、終点は右眼像の位置、点線は視差がゼロの点の位置を示す。

覚できない場合は、その旨を応答した。応答後、被験者は指示棒を0度に戻してから、次の刺激に備えた。刺激の呈示が完了すると電子音がなり、被験者に応答入力待ち状態であることを知らせた。同様の手順で全ての刺激に対して面の傾きを応答した。

3. 実験

実験1-aでは、垂直視差の分布を水平方向に正弦波変化させて、知覚される面の傾きを水平線上で調べた¹¹⁾。また、実験1-bでは、垂直視差の分布を鉛直方向に正弦波変化させて、知覚される面の傾きを鉛直線上で調べた。実験2では垂直視差の分布の水平、鉛直

方向の周波数、最大視差量を様々に設定した時の、画面の中心点（固視点）での面の傾きを調べた。

3.1 実験1-a: 垂直大きさ視差を水平方向に正弦波変化させたときの面の傾き

3.1.1 刺激

縦70.0度(1.40 m)、横101度(2.43 m)の範囲内に約5,700個のドット(ドット密度1,680 dots/m²)から構成されるランダムドットのステレオグラムを用いた。画面上での水平方向のずれは0に固定し、画面上での垂直方向のずれVpは、式(1)にしたがって決定した。

$$Vp(x,y) = Md \sin(2\pi Fx x + Px) \times \sin(2\pi Fy y + Py) \quad \text{-----(1)}$$

ここで、Md(arc min)を画面上での最大視差量、Fx,Fy(cpd)をそれぞれ水平方向、鉛直方向の大きさ視差変化の空間周波数、Px,Py(deg)をそれぞれ水平方向、鉛直方向の位相とした。16種類の刺激[Md:1(20arc min)×Fx:6(0.0126, 0.0253, 0.0379, 0.0506, 0.0632, 0.0759

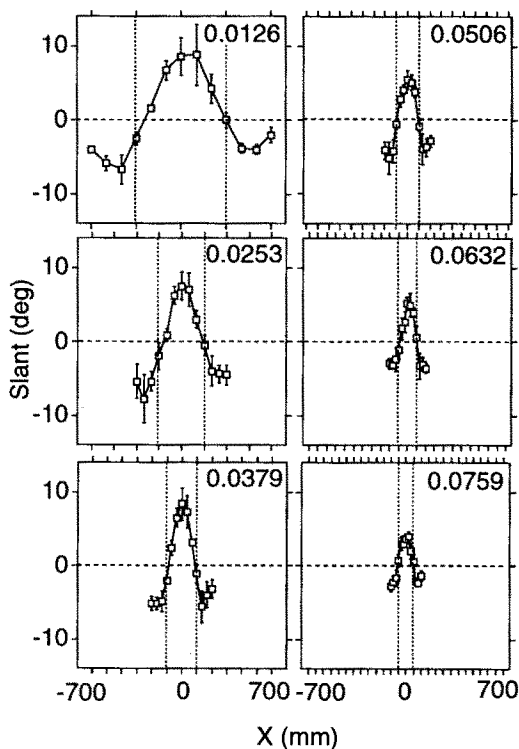


図3 実験1-aの結果[Md=20(arc min),Px=90(deg)]. 各グラフの横軸は画面上でのX座標、縦軸は固視点上で知覚された局所的な面の傾き、左肩の数字は水平方向の周波数Fx(cpd)、誤差棒は標準誤差、点線(縦線)は視差がゼロの点の位置を表す。ここで、正の場合は知覚された面が右方向を向いていること(右側が奥)、負の場合は知覚された面が左方向を向いていること(右側が手前)を表す。

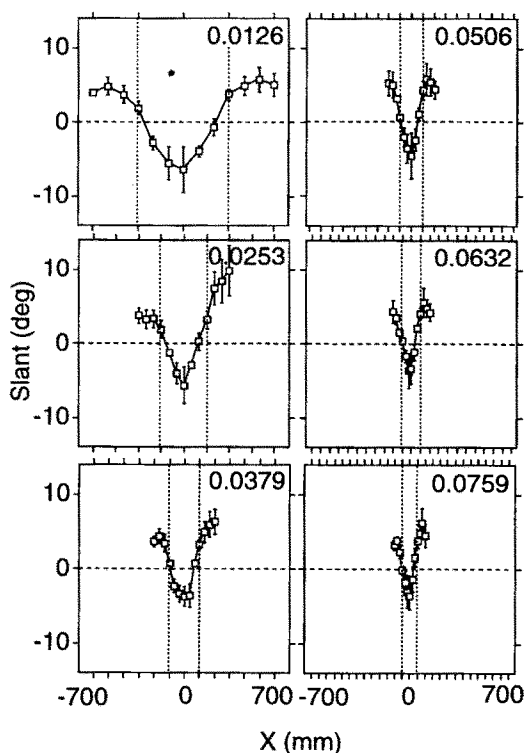


図4 実験1-aの結果[Md=20(arc min),Px=-90(deg)]. 他は図3と同様。

cpd) × Px:2 (90, -90 deg) + コントロール刺激 × 4] (Fy=0.0126 cpd, Py=0 degで固定) をランダムに4回づつ呈示した。図2(a)に刺激の視差分布の一例を示す。横軸は画面上でのX座標、縦軸は画面上でのY座標、矢印の始点は左眼像の位置、終点は右眼像の位置、点線は視差がゼロの点の位置を示す。この図から垂直大きさ視差がX軸に沿って変化しているのがわかる。

3.1.2 方法

被験者は、どちらか一方の眼に直径 20.6 (arc min) の白いドットを呈示することにより指定された応答場所での局所的な面の傾きを応答した。応答場所は、固視点を中心として水平方向の視差変化の一周期分を含む一直線上の13点であった。測定の順番はランダムであった。ただし、コントロール刺激の場合の応答場所は、 $F_x = 0.0126$ (cpd) のときの一周期分とした。

参加した被験者は3名 (HK, NU, YF) で、いずれも矯正視力1.0以上であった。その内1人 (NU) は実験目的を知らないナイーブな被験者であった。

3.1.3 実験結果

図2(b)に図2(a)の視差の分布を持つ刺激から知覚される面の形状の概略図を示す。横軸は画面上でのX座標、縦軸は画面上でのY座標、点線は視差がゼロの点の位置を表す。図2(a)と図2(b)を比べることにより、垂直方向に左眼像が右眼像より大きければ、右端

が遠く左端が近い面を、逆に右眼像が左眼像より大きければ、左端が遠く右端が近い面を、そして、左右像の大きさが同じであれば平らな面を局所的に知覚することがわかる。

図3に Md=20 (arc min), Px=90 (deg), 図4に Md=20 (arc min), Px=-90 (deg) の時の結果を示す。この結果は3名の被験者の平均であり、全ての被験者が4回中3回以上、面の傾きを知覚できたことを意味している。各パネルの横軸は画面上でのX座標、縦軸は固視点上で知覚された局所的な面の傾き、右上の数字は水平方向の周波数 F_x (cpd), 誤差棒は標準誤差、点線 (縦線) は視差がゼロの位置を表す。ここで、正の傾きは指示棒を鉛直軸に対して右に傾けたことを、負の傾きは指示棒を鉛直軸に対して左に傾けたことを表す。画像のひずみにより生じる視差の影響を除外するため、実際の測定値からコントロール刺激 (画面上で左右眼像に違いのない刺激) に対する応答値を差し引いた値をデータとして用いた。

図3, 4から、傾きの測定が行われた画面中央の水平線上では垂直視差がないにもかかわらず、面の傾きが知覚されることがわかった。また、水平方向の周波数の変化に対応して、知覚される面の形状が変化した。どのグラフにおいても、測定点を含む水平線上に沿って垂直大きさ視差の変化と、傾き量の変化の周期と位相が一致した。このことは図3, 4中の垂直の線分が引いてある点で傾きがゼロ

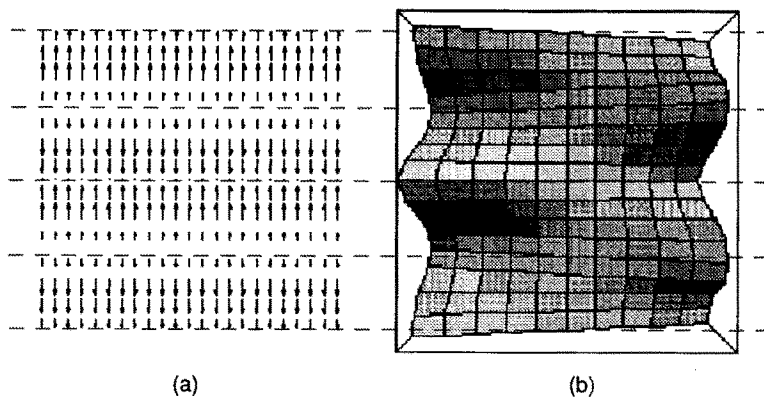


図5 実験1-bで用いられた刺激の視差の分布(a)と知覚された面の模式図(b)。他は図2と同様。

なることから明らかである。この垂直線分は図2に示すように、刺激中の垂直視差分布の垂直大きさ視差成分がゼロとなる位置を示している。これらの結果は、各測定点の標準偏差が小さいことから信頼できる。また、中央での面の傾き量は水平方向の周波数の増加に伴って減少する傾向が見られた。この傾向を分散分析によって調べると、水平方向の周波数の効果は、 $P_x=90$ では統計的に有意であったが ($F_{5,10}=7.61, p<0.01$)、 $P_x=-90$ では有意差は見られなかった ($F_{5,10}=2.01, p=0.16$)。

3.2 実験1-b: 垂直大きさ視差を鉛直方向に正

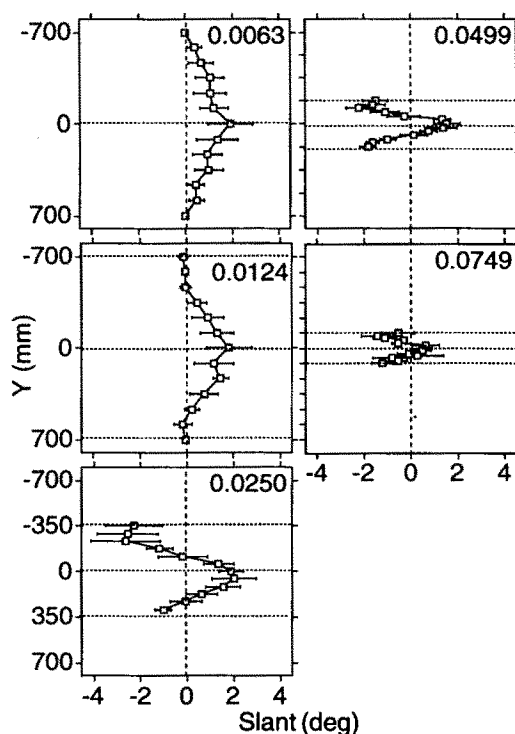


図6 実験1-bの結果[Md= 6 (arc min), $P_x=90(\text{deg})$]. 各グラフの縦軸は画面上でのY座標、横軸は固視点上で知覚された局所的な面の傾き、左肩の数字は鉛直方向の周波数 $F_y(\text{cpd})$ 、誤差棒は標準誤差、点線(横線)は視差がゼロの点の位置を表す。図3と同様に、正の場合は知覚された面が右方向を向いていること(右側が奥)、負の場合は知覚された面が左方向を向いていること(右側が手前)を表す。

弦波変化させたときの面の傾き

3.2.1 刺激

刺激は実験1-aと条件だけが異なっていた。式(1)の F_x を固定し、 F_y を変化させることにより、鉛直方向に垂直大きさ視差が変化する刺激を作成し本実験に用いた。34種類の刺激 [Md:3 (6, 20, 60 arc min) $\times F_y:5$ (0.0063, 0.0124, 0.0250, 0.0499, 0.0749 cpd) $\times P_x:2$ (90, -90 deg) + コントロール刺激 $\times 4$] ($F_x=0.0$ cpd, $P_y=0$ degで固定)をランダムに4回づつ呈示した。図5(a)に刺激の視差分布の一例を示す。横軸は画面上でのX座標、縦軸は画面上でのY座標、矢印の始点は左眼像の位置、終点は右眼像の位置、点線は視差がゼロの点の位置を示す。この図から垂直大きさ視差がY軸に沿って変化しているのがわかる。

3.2.2 方法

傾きを応答する場所は実験1-aと同様、どちらか一方の眼に呈示されるドットによって指定された。それらは固視点を中心として鉛

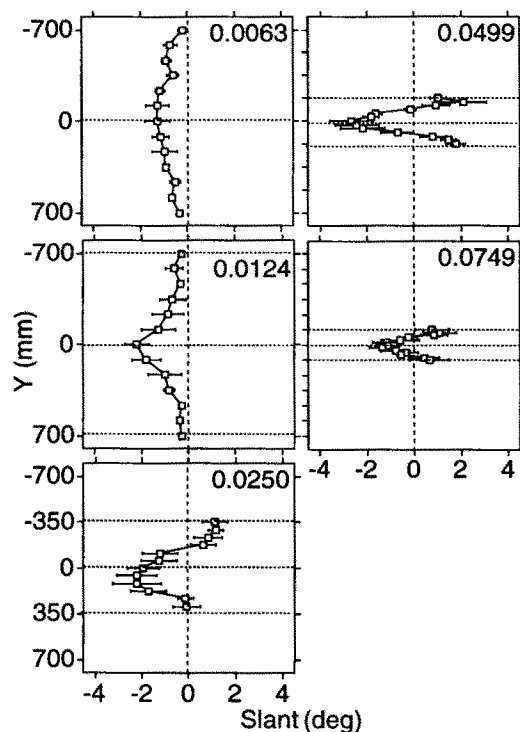


図7 実験1-bの結果[Md= 6 (arc min), $P_x=-90(\text{deg})$]. 他は図6と同様。

直方向の視差変化の一周期分を含む一直線上の13点であった。ただし、コントロール刺激の時と、刺激が半周期分しかない $F_y=0.0063$ (cpd) の時は、画面全体で13点とした。その他の方法は実験1-aと同様であった。参加した被験者は実験1-aと共通の3名であった。

3.2.3 実験結果

図5(b)に図5(a)の視差の分布を持つ刺激から知覚される面の形状の概略図を示す。図6に $M_d = 6$ (arc min), $P_x = 90$ (deg), 図7に $M_d = 6$ (arc min), $P_x = -90$ (deg), 図8に $M_d = 20$ (arc min), $P_x = 90$ (deg), 図9に $M_d = 20$ (arc min), $P_x = -90$ (deg), 図10の左段に $M_d = 60$ (arc min), $P_x = 90$ (deg), 右段に $M_d = 60$ (arc min), $P_x = -90$ (deg) の時の結果を示す。この結果は3名の被験者の平均である。各グラフの縦軸は画面上でのY座標、横軸は測定点上で知覚された局所的な面の傾き、左肩の数字は鉛直方向の周波数 F_y (cpd), 誤差棒は標準誤差、点線(横線)は視差がゼロの点の位置を表す。なお、 $M_d = 60$ (arc min), $F_y = 0.0499, 0.0749$ (cpd)

の条件では、視差が大きすぎたため左右像が融像できず、面が知覚されなかったため、結果から省いた。

これらの図から、鉛直方向の周波数の変化に対応して、知覚される面の形状が変化することがわかる。また、どのグラフにおいても測定点を含む鉛直線上での垂直視差の変化と、面の傾き量の変化とは周期が一致しているが位相は90度ずれている。しかし、垂直大きさ視差の観点で見ると実験1-aと同様に、面の傾き量はその点の周囲の垂直大きさ視差量に対応している。このことは図6-10中の水平の線分が引いてある点で傾きが最大になることから明らかである。この水平線分は図5に示すように、刺激中の垂直視差分布の垂直大きさ視差成分が最大または最小(逆符号)となる位置を示している。 $F_y = 0.0063, 0.0124$ の場合は画枠付近でその点の周囲の垂直大きさ視差量に関わらず、面の傾きが0度に近付いた。また、各測定点の標準偏差が小さいことからこの結果は信頼できる。

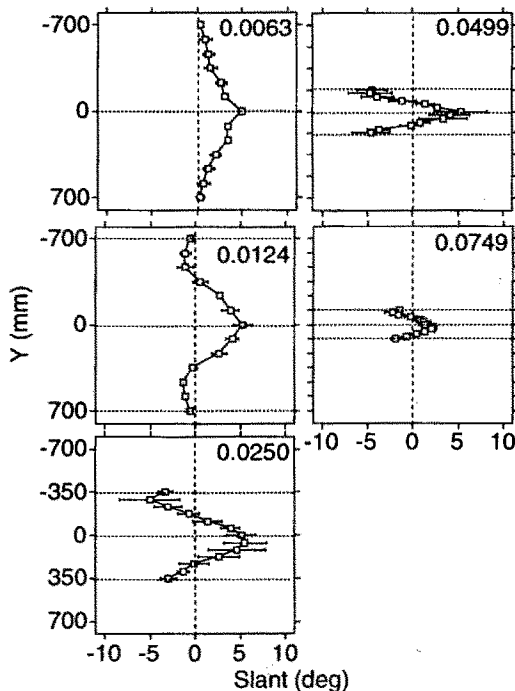


図8 実験1-bの結果 [$M_d=20$ (arc min), $P_x=90$ (deg)]. 他は図6と同様。

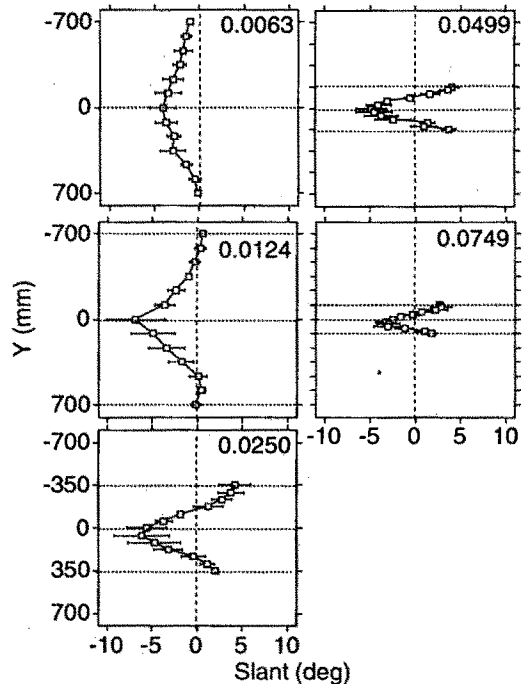


図9 実験1-bの結果 [$M_d=20$ (arc min), $P_x=-90$ (deg)]. 他は図6と同様。

3.3 実験2：最大視差，周波数特性

実験1-aの結果より画面の中心で測定された最大傾き量は水平方向の周波数の増加に伴って減少していく傾向がみられた。実験2では、この傾向を詳しく測定することを目的とした。そのために、実験1-a, bで変数とした垂直視差の分布の水平，鉛直方向の周波数に加えて，最大視差量も変数として，垂直視差変化を持つ刺激を観察した場合の知覚的な面の傾きを画面の中心点（固視点）のみで測定した。これにより，傾き知覚のための統合的垂直大きさ視差抽出の様式に関する知見が得られると考えられる。

3.3.1 刺激と方法

刺激の視差条件以外は実験1-a, bと同じであった。スクリーン上での左右眼像のずれは式(1)に従った。236種類の刺激 [Md:6 (3.75, 7.5, 15, 30, 60, 120 arc min) × { Fx:3 (0.0, 0.05, 0.1 cpd) × Fy:5 (0.00625, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1

cpd) + Fx:5 (0.0, 0.0125, 0.025, 0.05, 0.1 cpd) × Fy:2 (0.00625, 0.0125 cpd) - 共通部分 [Fx:2 (0.0125, 0.025 cpd) × Fy:3 (0.025, 0.05, 0.1 cpd)] } × Px:2 (90, -90 deg) + コントロール刺激 × 8] (Py=0 degで固定) をランダムに8回ずつ呈示した。傾きを応答する点は常に刺激の中心，固視点の位置であった。参加した被験者は実験1-a, bと共通の3名であった。

3.3.2 実験結果

図11, 12に実験2の結果を示す。この結果は3名の被験者の平均であり，全ての被験者が8回中6回以上，面の傾きを知覚できたことを意味している。図の上段はPx=90(deg)，下段はPx=-90(deg)の時の結果である。図11は鉛直方向の周波数一定の条件で，横軸は水平方向の周波数Fx (cpd)，縦軸は固視点上で知覚された局所的な面の傾き，グラフ上の数字は鉛直方向の周波数Fy (cpd)，各シンボルは6種類の最大視差量Md (arc min)，誤差棒は標

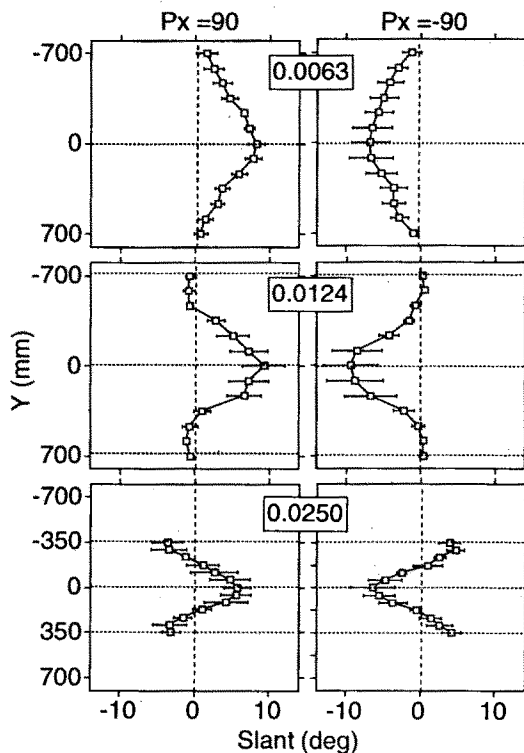


図10 実験1-bの結果[Md=60(arc min), Px=±90(deg)]. 左段がPx=90の時，右段がPx=-90の時では図6と同様。

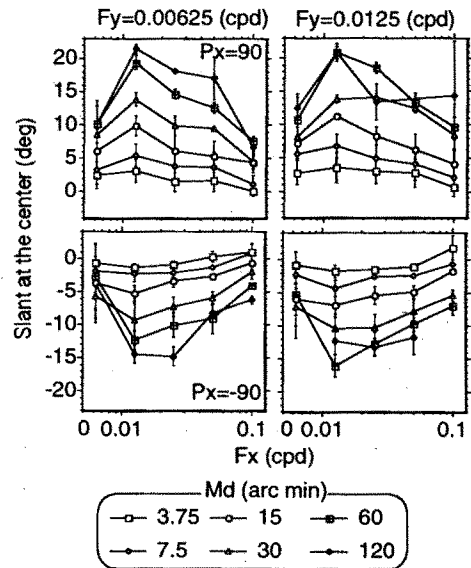


図11 水平方向の周波数特性。鉛直方向の周波数一定の条件で，図の上段はPx=90(deg)，下段はPx=-90(deg)の時の結果。横軸は水平方向の周波数Fx (cpd)，縦軸は固視点上で知覚された局所的な面の傾き，グラフ上の数字は鉛直方向の周波数Fy (cpd)，各シンボルは6種類の最大視差量Md (arc min)，誤差棒は標準誤差を表す。

準誤差を表す。図12は、水平方向の周波数一定の条件で、横軸は鉛直方向の周波数、縦軸は面の傾き、グラフ上の数字は鉛直方向の周波数を表す。ともに、各シンボルは6種類の最大視差量、誤差棒は標準誤差を表す。

図11から、垂直大きさ視差の水平方向の周波数が増大するにつれて、知覚される面の傾きの絶対量は $F_x=0$ (cpd) の場合を除いて減少することがわかった。また、図12から知覚される面の傾き量は、垂直視差の鉛直方向の周波数が低い時は増大し、周波数が高い時は減少することがわかった。そして、図11,12の両方から最大視差量の増大につれ、知覚される面の傾き量は増大することがわかる。各グラフの任意の周波数において最大視差量が小さいものから縦軸に沿って順に見ていくと、傾き量は最大視差量が小さい範囲ではほぼ線形に増加し、視差量が大きくなると、その増加率は下がり始め、ついには融像が困難となり、面の知覚さえできなくなる場合があることがわかる。これらの結果は多くの条件で統計的に確かめられた。分析は図11,12のパネルごとのデータに関して行った。この結果、水平方向の周波数の効果は4つのデータグループ中(図11の各パネルに対応)で、3条件で

統計的に有意であったが ($F_y=0.00625$, $P_x=90$ の場合 $F_{4,8}=12.62$, $p<0.01$; $F_y=0.00625$, $P_x=-90$ の場合 $F_{4,8}=4.15$, $p<0.05$; $F_y=0.0125$, $P_x=90$ の場合 $F_{4,8}=6.82$, $p<0.05$)、1条件では有意差は見られなかった ($F_y=0.0125$, $P_x=-90$, $F_{4,8}=2.59$, $p=0.12$)。また、鉛直方向の周波数の効果は、6つのデータグループ中(図12の各パネルに対応)で、4条件で統計的に有意であったが ($F_x=0.05$, $P_x=90$ の場合 $F_{4,8}=5.52$, $p<0.05$; $F_x=0.05$, $P_x=-90$ の場合 $F_{4,8}=14.76$, $p<0.01$; $F_x=0.10$, $P_x=90$ の場合 $F_{4,8}=7.34$, $p<0.01$; $F_x=0.10$, $P_x=-90$ の場合 $F_{4,8}=7.00$, $p<0.05$)、2条件では有意差は見られなかった ($F_x=0.00$, $P_x=90$ の場合 $F_{4,8}=2.66$, $p=0.11$; $F_x=0.00$, $P_x=-90$ の場合 $F_{4,8}=2.68$, $p=0.11$)。最大視差量の効果はどの条件でも5%水準において統計的に有意であった。

4. 考察

実験1-aより、垂直大きさ視差が最大となる固視点において面の傾きが最大となり、逆に固視点から視差変化の半周期分だけ水平方向に左または右に移動した点すなわち垂直大きさ視差が最小(逆符号)の点では、面の傾きが最小(逆向き)となることがわかった。

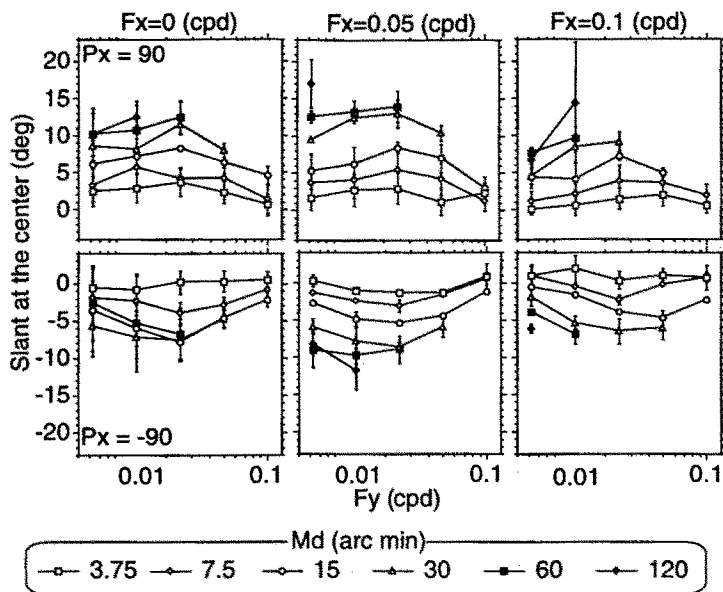


図12 鉛直方向の周波数特性。水平方向の周波数一定の条件で、図の上段は $P_x = 90$ (deg)、下段は $P_x = -90$ (deg) の時の結果。横軸は鉛直方向の周波数、縦軸は面の傾き、グラフ上の数字は水平方向の周波数を表す。各シンボルは6種類の最大視差量、誤差棒は標準誤差を表す。

また実験1-bより、垂直視差を鉛直方向に正弦波変化させたときも水平方向の場合と同様に、局所的なある点の知覚的傾き量が、その点の周囲の垂直大きさ視差量（統合的垂直大きさ視差量）に対応していることがわかった。また実験2において、垂直視差変化の周波数が低い領域では、周波数が増加するにつれて知覚される面の傾き量が増加し、垂直視差変化の周波数が高い領域では、周波数が増加するにつれて知覚される面の傾き量が減少することがわかった。また、垂直視差変化の周波数が同じ場合は視差量の増加に伴って傾き量も増加した。これらの結果は、Kanekoら¹⁰⁾の結果を、刺激中の異なる位置での局所的な面の傾きを測定するという異なった方法により確かめると同時に、傾き知覚のための統合的垂直大きさ視差の抽出範囲が垂直方向にも限定されていることを示唆するものである。

実験2の結果を、ある点の傾き知覚は、その点の周りの垂直視差分布から抽出された統合的垂直大きさ視差に対応するという考えから考察する。以下、鉛直方向視差変化の低周波数領域、鉛直および水平方向視差変化の高周波数領域、水平方向視差変化の低周波数領域、の3つの領域に分けて考える。まず、鉛直方向視差変化の低周波数領域では、周波数が増加するにつれて知覚される面の傾き量が増加したが、これは統合的垂直大きさ視差量が増加したためだと考えられる。すなわち、この周波数範囲では、鉛直方向視差変化の一周期が鉛直方向の統合範囲より大きい周波数領域であったため、統合範囲内に同符号の垂直大きさ視差のみが含まれ、周波数の増加と共に大きい値の視差がその領域に入ったためだと考えられる。次に、鉛直および水平方向視差変化の高周波数領域では、周波数が増加するにつれて知覚される面の傾き量が減少したが、これらは統合範囲内に正と負の垂直大きさ視差が同時に存在し、互いに打ち消し合って、統合的垂直大きさ視差量が減少した

ためだと考えられる。最後に、水平方向視差変化の低周波数領域では、周波数が増加するにつれて知覚される面の傾き量が増加したが、これは、上の2つの説明に用いた面の傾きは測定点周りの統合的垂直大きさ視差量に対応しているという考えには合致しない。いまのところこの結果に対する明確な説明はないが、この場合は水平方向に一樣に傾いた平面が知覚されるため、正弦波状に変化する曲面が知覚されるその他の場合に比べて、面の傾きを過小評価した可能性が考えられる。このように、垂直大きさ視差による面の傾き知覚は、視野の各位置において、その点を中心とする水平方向^{7),10)}、鉛直方向ともある広がりを持つ領域内での統合的垂直大きさ視差により決定されるという考えによってほぼ説明できる。実験1-a,1-bから得られた、水平方向および鉛直方向の垂直大きさ視差変化の空間周波数に対応して知覚される面の形状が変化するという結果もこの考えと矛盾がない。統合的垂直大きさ視差の抽出範囲が垂直、水平方向に限定されているということは、このメカニズムが、抽出範囲が視野全体だと考えられる垂直剪断視差（左右像の水平軸に沿った垂直軸方向のずれにより生じる視差分布）^{3,5,9)}のメカニズムとは異なることを示唆している。

垂直大きさ視差は現実には両眼から対象物への視距離の差によって生じる。現実には顔の正面付近ではゼロになり、それより左側になるにつれ左眼像がだんだん大きく、右側になるにつれ右眼像が大きくなるような分布を持つ。また垂直大きさ視差は抽出される面の鉛直軸回りの傾きにも影響を受けず⁶⁾、水平軸回りの傾きにも相対的には影響を受けない⁹⁾。このため、垂直大きさ視差は、ある距離での水平方向の離心角がわかっている場合は、絶対距離の判断の材料となる⁶⁾。このように、垂直大きさ視差を絶対距離と視方向の指標として用いれば、同じ傾きを持っているにも関わらず絶対距離と視方向の違いにより異なる値を持つ水平視差を補正でき^{4,14)}、物理的に一定

の面の傾きを常に一定に知覚させることが可能である。垂直大きさ視差は、このような理由で使われると考えられる。しかし、今回の実験で用いたような垂直大きさ視差の分布を生み出すような対象は、実際には存在しない。それにもかかわらず、面の傾きに影響を及ぼす。例えば、顔の正面に垂直大きさ視差が呈示されても、面の傾きが知覚される。また、位相を180度変えても、すなわち左眼像と右眼像の刺激を入れ替えても、面の傾きに同様の傾向が見える。これは、人間が垂直大きさ視差をその空間位置にかかわらず処理していることを示す。また、先に述べたように垂直大きさ視差は空間位置により異なる値で分布しているため、視野全体で一意に定まる垂直剪断視差とは異なり、水平、垂直方向にも限定された統合範囲が存在する、と考えられる。

今後の課題は、垂直大きさ視差処理の空間特性を説明するモデルの精緻化することである。本研究から、傾きを決定する統合的垂直大きさ視差の抽出範囲は水平方向、鉛直方向とも視野全体でなく、測定点を中心とするある広がりを持つ領域であることが示唆されたが、その領域が明確に限定されたわけではない。そこで、実験により得られたデータに合致するように定められた統合範囲を持つモデルを構築することが必要である。また、本研究とは直接関係はないが、垂直大きさ視差処理の時間特性を調べることも重要な課題である。多くの被験者は、垂直視差を持つ刺激を観察したとき、面の傾きを知覚するまでに水平視差に比べてより時間を要することを報告した。この事実から、水平視差処理過程と垂直視差処理過程の時間特性は異なっていると考えられる。このため、水平視差処理過程と垂直視差処理過程の時間特性の違いを定量的に調べ、その原因を明らかにすることが垂直視差処理過程全体の理解のために必要であろう。

謝辞

本研究を進める際に多くのご意見をいただきましただけでなく、被験者も引き受けてくださいました(株)三洋電気の宇和伸明氏に感謝いたします。

文 献

- 1) W. Adams, J. P. Frisby, D. Buckley, J. Garding, S. D. Hippensley-Cox and J. Porrill: Pooling of vertical disparities by the human visual system. *Perception*, 25, 165-176, 1996.
- 2) A. Arditi, L. Kaufman and J. A. Movshon: A simple explanation of the induced size effect. *Vision Research*, 21, 755-764, 1981.
- 3) C. J. Erkelens and R. van Ee: Stable stereopsis derived from retinal signals and noisy oculomotor signals. *ATR Workshop on Human Visual Perception*, 10-11, 1997.
- 4) B. Gillam and B. Lawergren: The induced effect, vertical disparity and stereoscopic theory. *Perception and Psychophysics*, 34, 121-130, 1983.
- 5) I. P. Howard and H. Kaneko: Relative shear disparities and the Perception of surface inclination. *Vision Research*, 34, 2505-2517, 1994.
- 6) I. P. Howard and B. J. Rogers: Binocular vision and stereopsis. Oxford University Press, New York, 1995.
- 7) H. Kaneko and I. P. Howard: Spatial organization of vertical disparity pooling. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 36, S230, 1995.
- 8) H. Kaneko and I. P. Howard: Relative size disparities and the Perception of surface slant. *Vision Research*, 36, 1919-1930, 1996.
- 9) H. Kaneko and I. P. Howard: Spatial properties of shear disparity processing. *Vision Research*, 37, 315-323, 1997.
- 10) H. Kaneko and I. P. Howard: Spatial limitation of vertical-size disparity processing. *Vision Research*, 37, 2871-2878, 1997.
- 11) H. Kaneko and Y. Fukunaga: Appearance of a surface defined by vertical- and horizontal-size disparity modulation. *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 38, S905, 1997.
- 12) J. J. Koenderink, A. J. van Doorn and A. M. L. Kappers: Surface perception in pictures. *Perception and Psychophysics*, 52, 487-496, 1992.
- 13) J. A. Lippincott: On the binocular metamorphopsia

- produced by correcting glasses. *AMA Archives of Ophthalmology*, 18, 18-30, 1889.
- 14) J. E. W. Mayhew and H. C. Longuet-Higgins: A computational model of binocular depth perception. *Nature*, 297, 376-378, 1982. -
 - 15) K. N. Ogle: Induced size effect. I: A new phenomenon in binocular vision associated with the relative sizes of the images in the two eyes. *AMA Archives of Ophthalmology*, 20, 604-623, 1938.
 - 16) K. N. Ogle: Researches in binocular vision. Hafner, New York, 1964.
 - 17) B. J. Rogers and M. Graham: Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception. *Vision Research*, 22, 261-270, 1982.
 - 18) B. J. Rogers and I. J. Koenderink: Monocular aniseikonia: A motion parallax analogue of the disparity-induced effect. *Nature*, 322, 62-63, 1986.
 - 19) B. J. Rogers and M. F. Bradshaw. Vertical disparities, differential perspective and binocular stereopsis. *Nature*, 361, 253-255, 1993.
 - 20) S. P. Stenton, J. P. Frisby and J. E. W. Mayhew: Vertical disparity pooling and the induced effect. *Nature*, 309, 622-623, 1984.
 - 21) C. W. Tyler: Stereoscopic vision: cortical limitations and a disparity scaling effect. *Science*, 181, 276-287, 1973.
 - 22) C. W. Tyler: Depth perception in disparity gratings. *Nature*, 251, 140-142, 1974.
 - 23) C. W. Tyler: Spatial organization of binocular disparity sensitivity. *Vision Research*, 15, 583-590, 1975.
 - 24) G. Westheimer: Vertical disparity detection: is there an induced size effect? *Investigative Ophthalmology and Visual Science*, 17, 545-551, 1978.