

Received August 23, 2003; Revised March 29, 2004; Accepted August 20, 2004

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

佐 藤 雅 之

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

Anisotropy and Individual Differences in Simultaneous Depth Contrast and Cornsweet Illusion in Depth

Masayuki SATO

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 depth contrast and Cornsweet illusion in depth, the magnitudes of these effects were measured with different slant orientations for 26 observers. About 30% observers showed a prominent anisotropy for depth contrast, while the anisotropy was not found for the Cornsweet illusion in depth when random-dot patterns were used. The results of an additional experiment using a grid pattern instead of the random-dot pattern showed a consistent anisotropy with the previous report for the Cornsweet illusion in depth, indicating that the anisotropy in depth perception depends on the stimulus patterns. The influence of conflicting perspective depth information on the anisotropy in depth perception is discussed.

Key words: stereoscopic depth perception, anisotropy, individual difference, depth contrast, Cornsweet illusion

1. はじめに

人間の両眼立体視による奥行きの知覚には異方性があると考えられている¹⁻⁹⁾。水平な軸を回転軸とする傾斜, すなわち上にいくほど遠い, あるいは近いというような面の傾きに比べて, 垂直な軸を回転軸とする傾斜, すなわち右にいくほど遠い, あるいは近いというような面の傾きに対する感度は低いといわれている。例えば, 傾斜が知覚されるまでの時間遅れが長く^{2,3)}, 網膜像差勾配の閾値が高いこと⁴⁻⁶⁾, また閾上の刺激では, 傾斜がより小さく知覚されること⁷⁻⁹⁾などが報告されている。Rogers と Graham¹⁾は, 明度の錯視としてよく知られている Craik-O'Brien-Cornsweet 錯視の奥行き版をランダムドットステレオグラムにより作成し, エッジの向きによる効果の違いを測定した。ランダムドットで構成される面に Fig. 1A に曲線で示すような網膜像差変調を加えると, 点 a と点 d の間には網膜像差がないのにもかかわらず, Fig. 1A' のように, d

のほうが a よりも近くに感じられる。これが奥行き版 Cornsweet 錯視である。Rogers と Graham は, エッジが水平の場合に比べて, エッジが垂直のときに効果が大きくなることを報告している(この図の例では, パターンの中央に垂直な奥行きのエッジが形成される)。また, 網膜像差に対する感度の空間周波数特性は, 輝度の場合と同様にバンドパス型であることが知られている^{5,10-13)}が, Bradshaw と Rogers⁵⁾はさらに, 奥行きの正弦波グレーティングの方位による感度の違いを測定し, 橫縞に対する感度に比べて縦縞に対する感度が低空間周波数領域で低いことを報告している。

奥行きの知覚においても, 色や明度の知覚と同様に, 同時対比効果が存在する¹⁴⁻²⁴⁾。例えば, Fig. 1B において線分 eh で示すような右が奥に傾いた平面が存在すると, 点 f と点 g の間には網膜像差がないのにもかかわらず, Fig. 1B' のように g のほうが f よりも近くに感じられる。

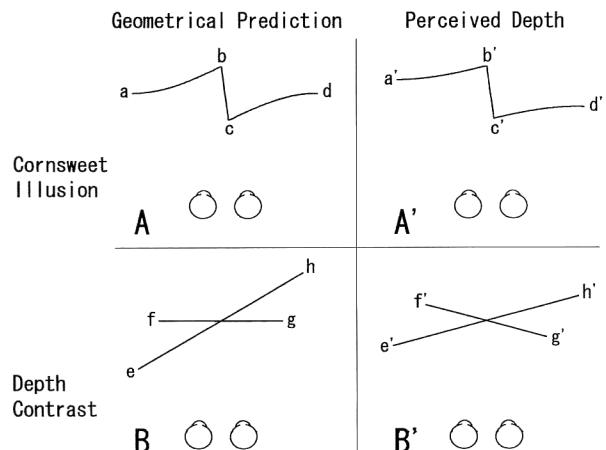


Fig. 1 Disparity profiles and perceived depth in Cornsweet illusion in depth and depth contrast.

同時対比や Cornsweet 錯視はなぜ生じるのであろうか。Cornsweet²⁵⁾は、これらの錯視現象が明度の次元において生じる原因として、側抑制によるエッジの強調を挙げている。輝度変化の空間周波数成分のうち、高周波成分が強調され、低周波成分が相対的に無視されることによりこれらの錯視現象が生じるというのが Cornsweet の説明である。奥行きの次元においても、同様のメカニズムを仮定することにより、これらの錯視現象を説明することができる。例えば、Fig. 1Aにおいて、点 b と点 c の間に存在するような網膜像差変化の高周波成分に対しては人間の視覚系が高い感度をもつので、Fig. 1A' のように奥行きの差が正しく知覚されるが、a と b や c と d の間に存在するような網膜像差変化の低周波成分に対しては視覚系の感度が相対的に低いので、Fig. 1A' のように奥行きの差が過小評価される。その結果として、a と d の間に奥行きの差が知覚される。同様に、Fig. 1B では、点 e と点 f、点 h と点 g の間の奥行きの差は正しく知覚されるが、点 e と点 h の間の奥行きの差は過小評価されるので、Fig. 1B' のように f と g の間に奥行きの差が知覚される。明度の次元と同様に、奥行きの次元においても空間周波数特性がバンドパス型になっているという事実^{5,10-13)}は、この説明とよく合致している。

奥行きの同時対比効果が奥行きの Cornsweet 錯視と同様のメカニズムによって生じているのであれば、奥行き対比においても、Cornsweet 錯視と同様に異方性が存在することが予想される。また、顕著な奥行き対比効果を示す被験者は、Cornsweet 錯視においても大きな効果を示すことが予想される。ここでは、これらの予想を確かめるために、奥行き対比と Cornsweet 錯視の効果の大きさを 2 つの傾斜の方向について測定し、異方性の有無や 2 つの錯視現象の効果の大きさの相関について分析した。

2. 実験 1：奥行き対比

2.1 目的

実験 1 の目的は、奥行きの同時対比においても異方性が存在するのかどうか、すなわち誘導刺激の傾斜の方向により効果が異なるのかどうかを明らかにすることである。これまでに報告されているのと同様の異方性が存在するならば、誘導刺激が垂直軸を中心に傾斜した条件において、効果がより大きくなることが予想される。

2.2 実験装置、刺激および手続き

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作成されたランダムドットステレオグラムは、CRT プロジェクター (Christie Digital Systems 社, Marquee8500/3D) により 100 インチの透過式スクリーンに投影された。被験者は、液晶シャッターゴーグル (Cambridge Research Systems 社, FE-1) を用いた時分割方式により立体画像を観察した。プロジェク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。シャッター開放時の液晶の透過率は約 30% であり、閉鎖時の透過率はその値のおよそ 1000 分の 1 であった。ここで報告するすべての実験において、被験者はちらつきや左右の画像のクロストークを知覚することはなかった。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. 2 に、実験 1 で用いた刺激を示す。刺激は、円盤状のテスト刺激とリング状の誘導刺激から構成された。テスト刺激の直径は 26°、誘導刺激の内径は 31°、外径は 36° であった。ドットの密度は 1.2%，観察距離は 115 cm であった。1 つのピクセルの大きさは、スクリーンの中央において 5.8 min 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。すなわち、黒い背景上に 1 ピクセルの大きさをもつ白いドットを描画するために、実際には 2 行 2 列の 4 つのピクセルを 256 階調のグレーで着色し、その輝度の比率を変えることにより、ピクセルサイズ以下の刺激呈示位置制御を擬似的に実現した。白色のドットの輝度は、定常的に液晶シャッターを開閉した状態でゴーグルを通して測定した値が 5.5 cd/m² であった。刺激観察時には半分の時間において液晶シャッターが閉じるので、実効的な輝度値はその半分の値となる。黒い背景の輝度は 0.0 cd/m² であった。

誘導刺激には、水平あるいは垂直な軸を回転軸とする +30° あるいは -30° (ここでは、正の値は上が遠いあるいは右が遠い傾斜を表し、負の値は上が近いあるいは右が近い傾斜を表すものとする) の傾斜に相当する網膜像差勾配

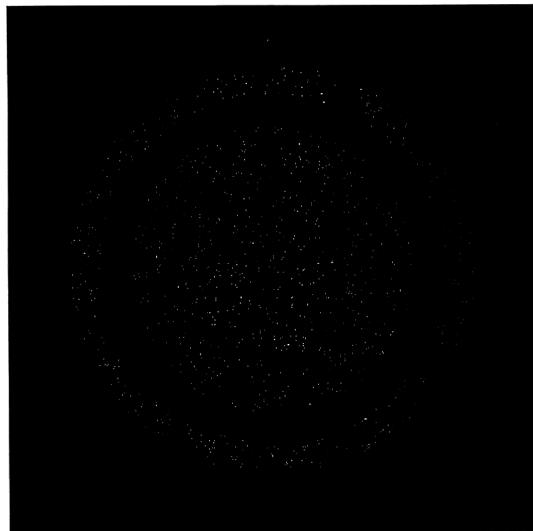


Fig. 2 Stimulus configuration used for depth contrast in experiment 1. Surrounding inducing surface had $\pm 30^\circ$ slant about a horizontal or vertical axis. The subject adjusted the disparity gradient in the central test stimulus until it appeared frontal.

(水平剪断視差あるいは水平大きさ視差^{26,27)}) が与えられた。対比効果の大きさは、キャンセレーション法により測定された。被験者は、手元にある2つのボタンを操作することにより、テスト刺激が前額平行面上に知覚されるように、テスト刺激に与えられた網膜像差勾配の大きさを調整した。テスト刺激の傾斜の初期値は、 -30° から $+30^\circ$ の範囲でランダムに選ばれた。1回のボタンの操作でテスト刺激の傾斜は 1° 変化した。視点の移動および観察時間は自由とした。刺激は、被験者が調整を終了し決定ボタンを押すまで持続的に呈示された。1回の試行に要する時間は10~20秒程度であった。

1つのセッション内では、テスト刺激と誘導刺激の傾斜の軸の方向は水平あるいは垂直のどちらか一方に固定された。正（上が遠いあるいは右が遠い）と負（上が近いあるいは右が近い）の傾斜をもつ誘導刺激について、4回ずつ合計8回の試行をランダムな順序で行い、1セッションとした。すべての被験者は、水平軸と垂直軸の2つの条件について2セッションずつ合計4セッションの実験を行った。本実験を開始する前に、練習のためのセッションを行った。練習セッションも、本実験と同様に、水平軸と垂直軸の2つの条件を2セッションずつ合計4セッション行ったが、練習セッションでは、1セッション内の試行回数は本実験の半分であった。練習や疲労の効果を実験結果から取り除くために、水平軸と垂直軸の条件は交互に行われ、半分の被験者は水平軸の条件から、残りの半分は垂直軸の条件から実験を開始した。

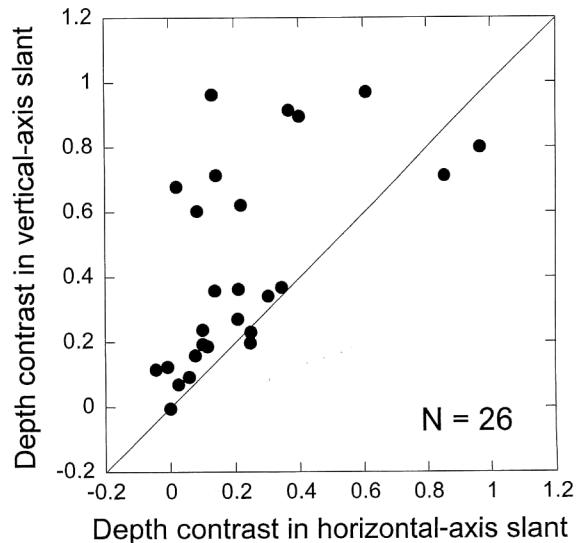


Fig. 3 The magnitudes of depth contrast compared between horizontal and vertical-axis slant. The anisotropy was prominent for about 30% observers.

2.3 被験者

被験者は、著者を含む北九州市立大学の教職員および学生26名であった。そのうち男性は14名、女性は12名であった。年齢の範囲は18~35歳であった。著者を除くすべての被験者は、実験の目的を知らなかった。また、心理物理実験の被験者の経験もなかった。ランダムドットステレオグラムを観察した経験は皆無かごくわずかである場合がほとんどであったが、すべての被験者は、実験の手順を説明する段階で、特に練習を必要とすることもなく、傾斜を幾何学的に予測される方向に正しく知覚することができた。

2.4 結果と考察

Fig. 3に実験1の結果を示す。横軸は、水平な軸を回転軸とする傾斜における奥行き対比効果の大きさを、縦軸は、垂直な軸を回転軸とする傾斜における効果の大きさを示している。ここでは、前額平行面上に知覚されたテスト刺激の傾斜角（被験者が与えた網膜像差勾配から幾何学的に計算される値）を誘導刺激の傾斜角で正規化した値を効果の大きさとして定義した。例えば、誘導刺激の傾斜角が $+30^\circ$ でテスト刺激の傾斜角が $+15^\circ$ のときにテスト刺激が前額平行面上に知覚されたとすれば、効果の大きさは0.5となる。それぞれのデータ点は、被験者1名分の結果を示している。誘導刺激が $+30^\circ$ の傾斜をもつ8回の試行と、 -30° の傾斜をもつ8回の試行の合計16回の結果の平均値をプロットした。被験者は、水平軸の条件から実験を開始した群と垂直軸の条件から開始した群に分けることができるが、2つの群の間で実験結果に系統的な差がみられなかっただので、実験結果を分けて表示することは行わな

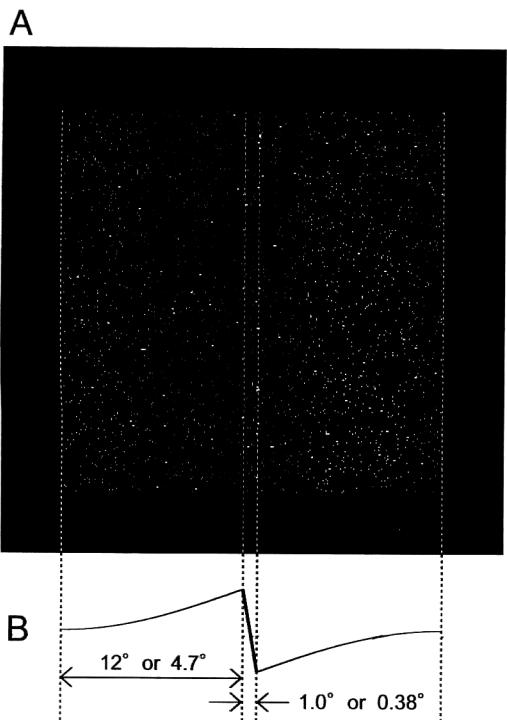


Fig. 4 Stimulus configuration used for Cornsweet illusion in depth in experiment 2.

かった。

26名分のデータ点は0~1の広い範囲に分布し、奥行きの対比効果に大きな個人差があることを示している。データ点が傾き1の直線からはずれていれば、異方性があるということができる。これまで報告されているのと同様の異方性があるとすれば、データ点は傾き1の直線よりも上にプロットされることが予想される。傾き1の直線より下にプロットされたデータ点の数に比べ、上にプロットされた点の数のほうが多いこと、特に26名の被験者のうち8名程度の被験者で顕著にこの傾向がみられたこと、さらにはつきりとした逆向きの傾向を示す被験者がいなかつことを考えると、奥行き対比においても、これまで知られているのと同様の異方性が確認されたということができる。異方性の存在は、統計的な検定によっても支持された。垂直軸条件における効果の大きさから水平軸条件における効果の大きさを差し引いた値^{*1}の26名の被験者の平均値は0.203であり、t検定の結果、0との間に有意な差が認められた($p=0.0006$)。

しかし、2名の被験者は水平軸と垂直軸の両方の条件で

顕著な対比効果を示し、どちらかといえば水平軸の条件での効果がより大きかったこと、残りの大多数の被験者では両方の条件で効果の大きさは0~0.4程度であり、異方性もあまり顕著ではなかったということも事実である。少なくともこの実験で用いた条件における奥行き対比効果においては、効果の大きさについても異方性についても個人差が大きく、異方性の有無に関して論じるには注意が必要であることがわかる。対比効果の大きさや異方性を測定する際に被験者の数が十分でないと、採用した被験者が①顕著な異方性を示すタイプ、②どちらの条件でも大きな対比効果を示すタイプ、③どちらの条件でも大きな対比効果を示さないタイプのいずれかに偏ってしまい、判断を誤る危険性がある。そういう意味において、個人差の程度と分布を示す本実験データは、限られた条件ではあるにせよ、今後の奥行き知覚研究において大いに参考になるものと考えることができる。

3. 実験2：奥行きのCornsweet効果

3.1 目的

実験1の結果から、奥行きの対比効果において、さまざまな刺激パターンについてこれまでに報告されているのと同方向の異方性が存在することが明らかになったが、効果の大きさについても異方性についても、顕著な個人差が存在することが明らかになった。奥行きのCornsweet効果についてもこれまでに異方性が報告されている¹⁾が、実験1の結果を考えると、奥行きのCornsweet効果においても顕著な個人差が存在するのではないかという疑問が生じる。奥行き対比効果とCornsweet効果が1つの共通するメカニズムにより生じていて、そのメカニズムに個人差があるのであれば、Cornsweet効果においても顕著な個人差が存在し、奥行き対比効果との間に高い相関があることが予想される。実験2の目的は、実験1に参加した被験者について奥行きのCornsweet効果の大きさを測定することにより、ここで述べた疑問に答えることである。

3.2 実験装置、刺激および手続き

Fig. 4Aに、実験2で用いた刺激を示す。正方形のランダムドットパターンは、上下もしくは左右に並ぶ3つの長方形の領域から構成された。ここでは、図のように長方形が左右に並ぶ条件を垂直エッジ条件、上下に並ぶ条件を水平エッジ条件と呼ぶ。周辺の2つの領域では、Fig. 4Bに

^{*1}異方性の尺度としては、効果の差よりも比のほうが妥当であるという考え方もある。しかし、効果がきわめてゼロに近い値を示したことにより、比が非常に大きな値となり、全体の平均や分散に大きく影響するケースが何件か認められた。そのようなデータは、適切な基準を設けて分析からはずすという方法もあるかもしれないが、ここでは、できるだけ例外をつくらずに多くのデータを含めて解析を行うために、効果の差をもって異方性の尺度とした。

示すように、網膜像差が正弦波状（それぞれ 1/4 波長分）に変化した。Cornsweet 効果の大きさは、キャンセレーション法により測定された。被験者は、手元にある 2 つのボタンを操作することにより、刺激全体の上端と下端（水平エッジ条件の場合）あるいは右端と左端（垂直エッジ条件の場合）が被験者から見て同じ距離になるように、刺激に与えられる網膜像差を調整した。被験者のボタン操作に伴い、正弦波の振幅を一定に保ったまま 2 つの周辺領域の相対的な距離が変化するように、2 つの周辺領域にそれぞれ同じ大きさで逆向きの一様な網膜像差が加えられた。中央の領域には、2 つの周辺領域が連続するように線形な網膜像差勾配が与えられた。

刺激の大きさについて、2 つの条件を設けた。1 つの条件では、Bradshaw と Rogers⁵⁾ のデータに基づき、奥行きの Cornsweet 錯視の効果が最大になるように刺激の大きさを決定した。すなわち、奥行きの変調に対する感度のピークは 0.5 c/deg 付近にあるので、中央領域の奥行きのギャップに対する感度を最大にするために、中央領域の幅を 1° (0.5 c/deg の正弦波の半波長分) とした。周辺領域の大きさは 12° × 25° であった。それぞれの周辺領域は正弦波の 1/4 波長分に相当したので、その周波数は 0.021 c/deg であった。振幅は 5.8 min であった。ランダムドットの密度は 3.0% であった。実験装置は実験 1 と同じで、刺激の観察距離も実験 1 と同じであった。ここでは、この条件を大刺激条件と呼ぶ。もう 1 つの条件では、Rogers と Graham¹⁾ の実験の追試を目的とし、刺激の大きさは彼らの実験条件に基づいて決定した。中央領域の幅は 0.38°、周辺領域の大きさは 4.7° × 9.8° であった。正弦波状の網膜像差変調の振幅は 4.0 min、ランダムドットの密度は 3.0% であった。刺激の観察距離は 57 cm であった。この条件では、刺激の空間解像度を向上させるために、実験 1 で用いた 100 インチのプロジェクションシステムのかわりに、21 インチの CRT モニターを用いて刺激を呈示した。1 ピクセルの大きさは 2.3 min であった。それ以外については、実験装置は実験 1 および大刺激条件と同じであった。ここでは、この条件を小刺激条件と呼ぶ。実験 2 においても、実験 1 と同様に、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。それにより、刺激には滑らかな曲面と中央領域におけるシャープなエッジが知覚された。

1 つのセッション内では、奥行きのエッジの方向は水平か垂直のどちらか一方に固定された。正弦波状に奥行きが変化する周辺領域が正（上が遠いあるいは右が遠い）の傾斜をもつ条件と負（上が近いあるいは右が近い）の傾斜を

もつ条件について、4 回ずつ合計 8 回の試行をランダムな順序で行い、1 セッションとした。すべての被験者は、水平エッジと垂直エッジの 2 つの条件について 2 セッションずつ合計 4 セッションの実験を、刺激の大きさに関する 2 つの条件についてそれぞれ行った。本実験を開始する前に、練習のためのセッションを行った。練習セッションも、本実験と同様に、水平エッジと垂直エッジの 2 つの条件を 2 セッションずつ合計 4 セッション行ったが、練習セッションでは、1 セッション内の試行回数は正と負の傾斜方向についてそれぞれ 1 回ずつであった。練習や疲労の効果を実験結果から取り除くために、水平エッジと垂直エッジの条件は交互に行われ、半分の被験者は水平エッジの条件から、残りの半分は垂直エッジの条件から実験を開始した。

実験を計画した段階では、小刺激条件を行うことは想定していなかった。大刺激条件の結果が当初の予想に反して Rogers と Graham¹⁾ による先行研究と大きく異なる結果であったため、彼らの実験をより忠実に再現するために、小刺激条件を設けた。したがって、ほとんどの被験者（26 名中 21 名）は、大刺激条件のすべてのセッションを終了してから小刺激条件を行った。

3.3 被験者

実験 1 と同じ 26 名が被験者として実験に参加した。

3.4 結果と考察

Fig. 5 に、実験 2 の結果を示す。上のグラフは大刺激条件の結果を、下のグラフは小刺激条件の結果を表している。両方のグラフにおいて、横軸は奥行きのエッジが水平であった場合の Cornsweet 錯視の効果の大きさを、縦軸はエッジが垂直であった場合の効果の大きさを表している。ここでは、刺激の上端と下端あるいは右端と左端が同じ距離に見えるために、被験者が必要とした網膜像差の大きさを正弦波の振幅の 2 倍で正規化した値を効果の大きさとして定義した。例えば、正弦波の振幅に相当する網膜像差が 2 つの領域に逆向きに与えられ、中央領域における奥行きのギャップが相殺された状態において、刺激の両端が同じ距離に知覚された場合（すなわち正弦波状の網膜像差の変化が完全に無視された場合）には、効果は 1 となる。それぞれのデータ点は、被験者 1 名分の結果を表している。周辺領域が正の傾斜をもつ 8 回の試行と、負の傾斜をもつ 8 回の試行の合計 16 回の結果の平均値をプロットした。被験者は、水平エッジの条件から実験を開始した群と垂直エッジの条件から開始した群に分けることができるが、2 つの群の間で実験結果に系統的な差がみられなかつたので、実験結果を分けて表示することは行わなかった。実験に参加した 26 名の被験者の中 1 名は、小刺激条件

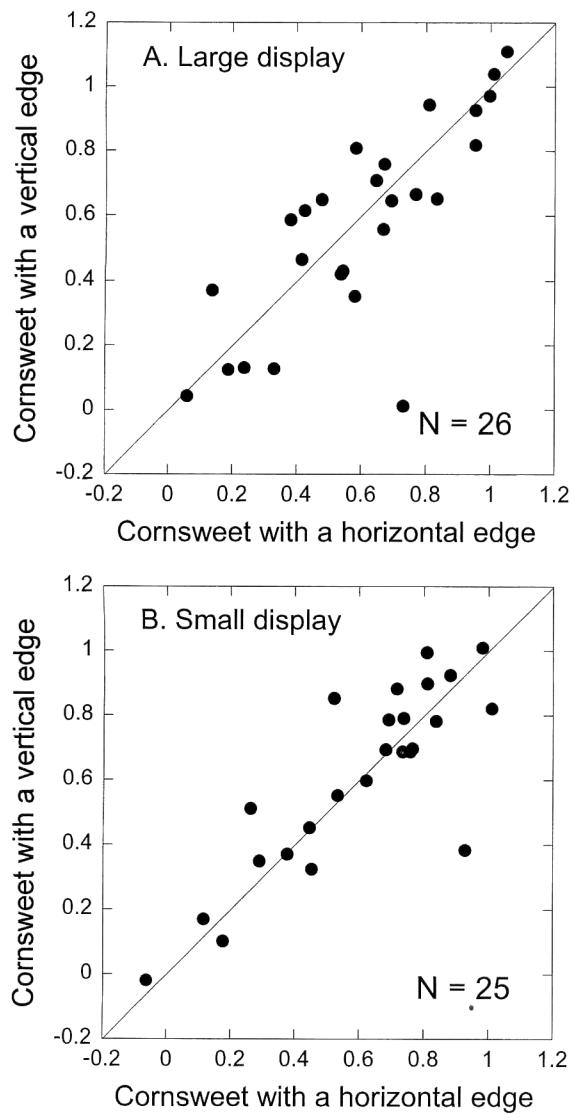


Fig. 5 The magnitudes of Cornsweet illusion in depth compared between horizontal and vertical-edge conditions. The anisotropy was not obvious in spite of previous studies.

において実験課題を行うことができなかった。理由は明らかではないが、この条件においてのみ、網膜像差の変化に対して刺激の周辺部における奥行きの変化を知覚することができなかった。

26名あるいは25名分のデータ点は0~1の広い範囲に分布し、奥行きの対比効果の場合と同様に、Cornsweet効果においても大きな個人差があることを示している。これまで報告されているのと同様の異方性があるとすれば、データ点は傾き1の直線よりも上にプロットされるはずである。しかし、データ点は、ばらつきはあるものの全体としては傾き1の直線上にあり、奥行きのCornsweet効果における異方性を報告したRogersとGraham¹⁾による先行研究とは異なる結果を示している。垂直エッジ条件における

効果の大きさから水平エッジ条件における効果の大きさを差し引いた値の26名あるいは25名の被験者の平均値は、大刺激条件、小刺激条件においてそれぞれ-0.028, 0.010であり、*t*検定によれば、0との差は有意ではない ($p=0.47$, $p=0.76$)。実験1の結果との相関については、補足的に行った実験3、実験4の結果を含めて、「総合的考察」で詳しく検討する。

なぜ、実験2はRogersとGrahamの研究と矛盾する結果になったのであろうか。本実験と彼らの実験とでは、いくつかの相違点が挙げられる。まず、被験者が異なっている。実験2の結果から明らかなように、Cornsweet効果は個人差が大きく、26名の被験者の中には異方性を示している被験者もみられる。RogersとGrahamの研究における被験者の数は明らかではないが、おそらく数名であると思われる。偶然、彼らの被験者が一致した異方性を示したという可能性は否定できない。しかし、同様の実験装置を用いて後に測定された網膜像差に対する感度の空間周波数特性⁵⁾においても、6名の被験者が一致した異方性を示しており、すべてを個人差や偶然に帰するには無理があるようと思われる。次に、実験装置の違いが挙げられる。彼らは、刺激の呈示にオシロスコープを用いている。オシロスコープの入力電圧を変えることにより連続的にドットの位置を変化させることができるので、コンピューターディスプレイを使用する際に通常発生するエイリアシングという問題がない。しかし、本研究で用いているアンチエイリアシングに問題があると考える根拠も特になく思われる。最後に、刺激の空間的な変数の違いが挙げられる。重要な変数として考えられるのは、刺激の大きさ（すなわち網膜像差変調の空間周波数）、網膜像差変調の振幅、刺激の観察距離などであろう。実験2の小刺激条件は、RogersとGrahamの実験の追試を目的としており、これらの変数は彼らの実験条件に一致させている。しかし、刺激のドット密度に関しては一致させていなかった。RogersとGrahamの実験では、刺激を構成するランダムドットは256行256列の行列上に50%の密度で呈示された。本実験で用いた刺激のドット密度は3.0%であり、彼らの実験に比べてかなり低かった。しかし、奥行きのCornsweet錯視が、これまで考えられてきたように、網膜像差処理メカニズムの空間周波数特性を反映していて、急峻な変化に比べて緩やかな変化が知覚されにくくことにより生じているのであれば、ドット密度が効果の大きさを決定する重要な要因であるとは考えにくい。ほかにも実験条件の違いを挙げることはできるが、実験結果の矛盾を明快に説明できる明白な相違点はないと思われる。

4. 実験3：グリッドパターンにおける奥行きのCornsweet効果

4.1 目的

ここでは、実験2がRogersとGraham¹⁾の研究と矛盾する結果になった原因が刺激のドット密度の違いである可能性について考えてみたい。ドット密度の効果を検証するためには、ドット密度を変数として異方性の変化を測定するのが最も直接的であると思われるが、ドット密度を高いために、特に垂直軸を中心とする傾斜に対応する水平大きさ視差を与えた場合には、隣どうしのドットが干渉し限られたピクセル数では刺激が表現できないという問題がある。RogersとGrahamの実験では、刺激の呈示にオシロスコープが用いられており、この問題を免れている。そこで、ドット密度の効果を直接的に検証することからはなれて、ドット密度がなぜ影響をもつのかということについて考えてみたい。まず、最初に確認したいことは、ランダムドットに与える網膜像差を操作し知覚特性を測定することにより、網膜像差処理メカニズムの特性を知ることができると考えがちであるが、実際には、得られた特性が網膜像差処理メカニズムの特性のみを反映しているとは限らないという点である。ランダムドットのきめの勾配は奥行き情報をもっていないのではなく、刺激が前額平行面上にあるという網膜像差とは矛盾する奥行き情報をもつと考えることができるので、ランダムドットを用いた実験の結果は網膜像差に対する感度特性のみならず、きめの勾配に対する感度の特性をも反映していると考えることができる。ドット密度が低くドットがまばらにしか存在しない場合には、きめの勾配は奥行き情報としての影響力が小さいが、ドット密度が高い場合には、刺激が前額平行面上にあることを示す強力な奥行き手がかりとして働くと考えることはできないだろうか。もし、ドット密度を上げることによりきめの勾配に対する感度特性が実験結果に強く影響を及ぼすようになり、その結果として異方性が表れるのであれば、網膜像差処理メカニズムではなく、むしろきめの勾配を処理するメカニズムのほうに異方性があることになる。本当にきめの勾配からの奥行き知覚に異方性があるのか、あるとすればそれはなぜなのかという点に関しては今後の研究を待たなければならないが、このように考えれば、実験結果の矛盾を説明することができる。

もし、ここで述べた仮説が正しいのならば、きめの勾配が奥行き情報として重要な影響をもつような条件では異方性が表れることになる。それは、例えば、刺激を構成するドットをグリッド状に配置することによっても可能なのではないだろうか⁸⁾。実験3の目的は、実験2で用いたラン

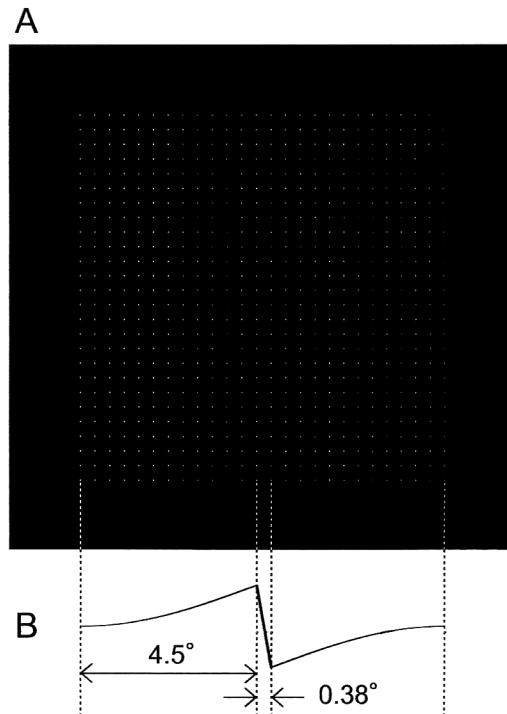


Fig. 6 Stimulus configuration used in experiment 3 to test the effects of dot arrangement on the anisotropy in Cornsweet illusion in depth.

ダムドットのかわりにグリッド状の刺激パターンを用いることにより、CornSweet効果に異方性が表れるかどうかを確かめることである。

4.2 実験装置、刺激、手続きおよび被験者

実験装置は、実験2の小刺激条件と同じである。Fig. 6に、実験3で用いた刺激を示す。実験手続きおよび被験者はこれまでの実験と同様であるが、被験者の負担を軽減するために、試行回数はこれまでの実験の半分とした。

4.3 結果と考察

Fig. 7に、実験3の結果を示す。実験結果の表示方法はFig. 5と同様である。データ点の分布が、全体として傾き1の直線よりも上に偏っていることがわかる。垂直エッジ条件における効果の大きさから水平エッジ条件における効果の大きさを差し引いた値の26名の被験者の平均値は0.129であり、t検定の結果、0との間に有意な差が認められた($p=0.0028$)。これは、これまでに報告されているのと同じ方向の異方性が確かに存在することを示しており、また異方性の有無が刺激のパターンに依存することを示している。

5. 実験4：グリッドパターンにおける奥行き対比

5.1 目的

実験2と実験3の結果から、奥行きのCornSweet錯視

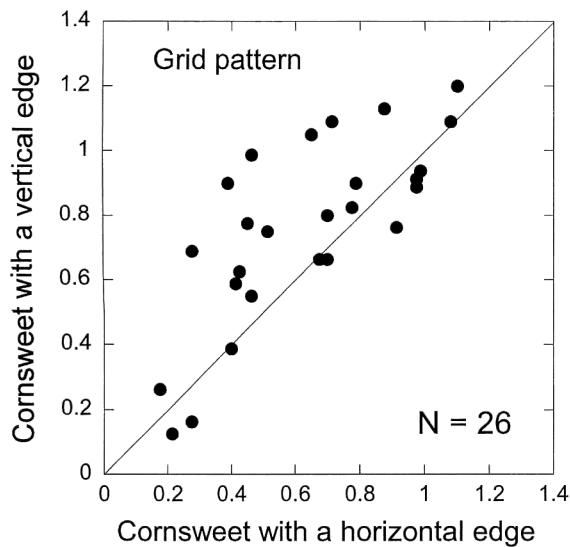


Fig. 7 The magnitudes of Cornsweet illusion in depth with the grid pattern. A consistent anisotropy with the previous studies was found.

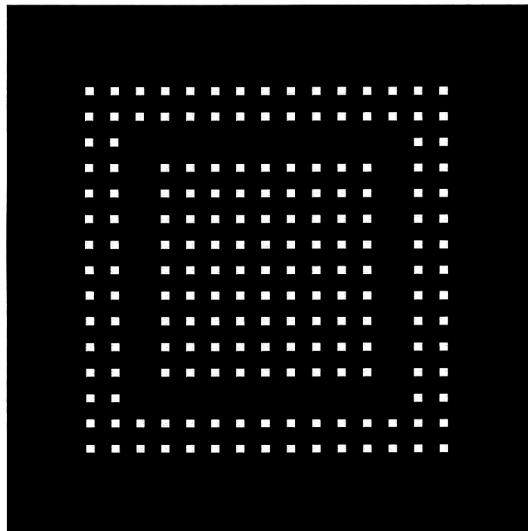


Fig. 8 Stimulus configuration used for depth contrast in experiment 4.

における異方性の有無が刺激のパターンに依存することが明らかになった。ランダムドットパターンを用いた場合には異方性は認められなかったが、グリッドパターンを用いた場合には、これまでの研究と一致する異方性が確認された。実験1の結果は奥行き対比における異方性を示すものであったが、対比効果の大きさは個人差が大きく、異方性を示さない被験者も少なくなかった。奥行き対比においても、刺激をグリッドパターンにすることによって、多くの被験者が一致して異方性を示すようになるであろうか。この実験の目的は、この点を明らかにすることである。

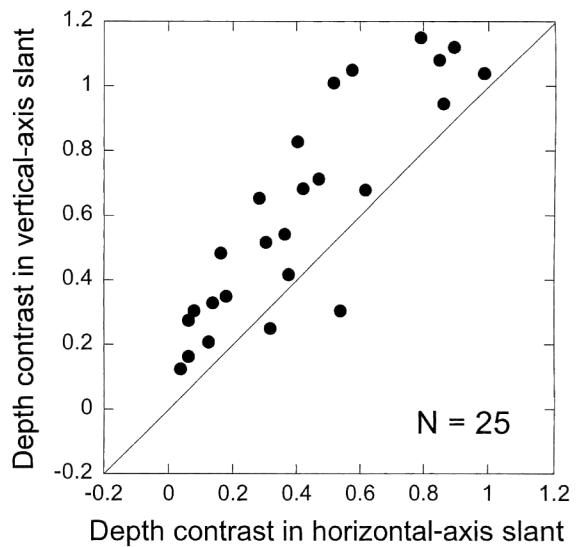


Fig. 9 The magnitudes of depth contrast with the grid pattern.

5.2 実験装置、刺激、手続きおよび被験者

実験装置は、実験1と同じである。Fig. 8に、実験4で用いた刺激を示す。中央のテスト刺激は一辺 19° の正方形であった。テスト刺激と周辺の誘導刺激の間のギャップは 3.7° であった。これらの刺激は、一辺8ピクセルの小さな正方形から構成された。これは、視野の中央において46 minに相当した。小さな正方形の間隔は、その辺の長さの2倍であった。実験手続きおよび被験者は実験1と同様であるが、被験者の負担を軽減するために、試行回数は実験1の半分とした。

5.3 結果と考察

Fig. 9に、実験4の結果を示す。実験結果の表示方法はFig. 3と同様である。この実験においても、実験課題を行うことができない被験者が1名いたので、データは25名分である。理由は明らかではないが、その1名の被験者は、テスト刺激の網膜像差を操作してもテスト刺激に知覚される傾斜を相殺することができなかった。なお、この被験者は、実験2の小刺激条件ができなかった被験者とは別の被験者である。

ランダムドットを用いた実験1では、多くのデータ点が0~0.4の範囲に分布していたが、グリッドパターンを用いた実験4では、実験1に比べて奥行き対比の効果が増加したことがわかる。水平軸と垂直軸の2つの条件で得られた対比効果の大きさのすべての被験者の平均値は、実験1では0.329であったが、実験4では0.510であった。t検定によれば、この差は有意である($p=0.0039$)。垂直軸条件における効果の大きさから水平軸条件における効果の大きさ

Table 1 Correlation coefficients between the results of different experimental conditions.

| | 1. DC-RD-L | 2. DC-G-L | 3. CS-G-S | 4. CS-RD-L | 5. CS-RD-S |
|---------------------------------|------------|-----------|-----------|------------|------------|
| 1. Depth contrast (RD, large) | | 0.777 | 0.438 | 0.267 | 0.163 |
| 2. Depth contrast (Grid, large) | 0.777 | | 0.536 | 0.111 | 0.233 |
| 3. Cornsweet (Grid, small) | 0.438 | 0.536 | | 0.450 | 0.604 |
| 4. Cornsweet (RD, large) | 0.267 | 0.111 | 0.450 | | 0.642 |
| 5. Cornsweet (RD, small) | 0.163 | 0.233 | 0.604 | 0.642 | |

さを差し引いた値の 25 名の被験者の平均値は 0.192 であった。*t* 検定の結果、0 との間に有意な差が認められた ($p=0.000006$)。この 0.192 という値は、実験 1 の結果である 0.203 よりわずかに小さい値であったが、2 つの結果の間には統計的に有意な差は認められなかった ($p=0.862$)。ただし、分散に関しては、実験 1 と実験 4 でそれぞれ 0.0686 と 0.0277 であり、有意な差が認められた ($p=0.0149$)。ランダムドットを用いた場合に比べて、グリッドパターンを用いると奥行き対比の効果は増加するが、異方性に関しては特に顕著になるとはいえないという結果であった。ただし、分散に関しては減少したので、グリッドパターンのほうがより多くの被験者が安定して異方性を示す条件であるといえるかもしれない。実験 1 と実験 4 で得られた効果の大きさの相関については、他の条件との相関も含めて「総合的考察」で詳しく検討する。

6. 総合的考察

奥行きの対比効果と Cornsweet 錯視について、刺激としてランダムドットを用いた場合とグリッドパターンを用いた場合、さらにランダムドットの Cornsweet に関しては、大きい刺激パターンと小さい刺激パターンを用いた場合について、全部で 5 つの条件について効果の大きさを測定した。どの条件においても大きな個人差がみられ、効果の大きさは 0~1 の範囲に広く分布した。これらの異なる条件で得られた結果の間には相関があるのだろうか。すべての被験者の水平条件と垂直条件の結果をまとめて、5 つの実験結果の間の相関係数を計算した。Table 1 に結果を示す。グレーの領域は、統計的に有意な相関が認められなかった組み合わせを示している ($p>0.05$)。それ以外の組み合わせでは、有意な相関が認められた ($p<0.01$)。ここでは、便宜的にランダムドットの奥行き対比を条件 DC-RD-L、グリッドの奥行き対比を条件 DC-G-L、グリッドの Cornsweet を条件 CS-G-S、ランダムドットの Cornsweet のうち、大刺激条件を条件 CS-RD-L、小刺激条件を条件 CS-RD-S と呼ぶ。条件 DC-RD-L と DC-G-L の間に高い相関が認められ、また条件 CS-RD-L と CS-RD-S の間にも高い相関が認められた。前者はどちらも奥行き対比の結果であ

り、後者はどちらもランダムドットを用いた Cornsweet の結果なので、条件 DC-RD-L と DC-G-L および CS-RD-L と CS-RD-S の間で相関が高いのは当然であるといえるかもしれない。興味深いのは、前者と後者の間、すなわち DC-RD-L と CS-RD-L, DC-RD-L と CS-RD-S, DC-G-L と CS-RD-L, DC-G-L と CS-RD-S の間で相関が低いことである。「はじめに」述べたように、奥行き対比と Cornsweet 錯視が、人間の網膜像差に対する感度の空間周波数特性が低周波領域で低いという共通の要因により生じていて、そこに個人差があるのであれば、両者の結果の間には高い相関があることが予想されるが、実際にはそれ以外の要因が重要な働きをしていることがわかる。

奥行き対比の個人差に重要な影響を及ぼす要因として、パースペクティブの効果が指摘されている²⁴⁾。刺激の網膜像差とパースペクティブを独立に操作すると、知覚される奥行きには大きな個人差が表れる。Sato と Howard²⁴⁾ は、パースペクティブを重視するタイプの被験者が、網膜像差重視型の被験者に比べて、大きな奥行き対比効果を示す傾向があることを報告している。また、van Ee ら²³⁾ は、奥行き対比の効果の大きさがパースペクティブに対する重みづけで決まるというモデルを提案している。本研究の実験 1 と実験 4 は、刺激をランダムドットからグリッドパターンにかえることにより奥行き対比の効果が増大することを示しており、パースペクティブが奥行き対比の重要な要因であるという仮説を支持している。奥行き対比と Cornsweet 錯視の効果の大きさの間で相関が低かったという今回の実験結果は、視差と矛盾するパースペクティブ情報は、Cornsweet 効果においては重要な働きをしていないことを示唆している。今回の実験結果から Cornsweet 効果に重要な影響を及ぼす要因を具体的に特定することは難しいが、奥行き対比と Cornsweet 効果で相関が低かった原因として、① 奥行き対比では線形な網膜像差勾配を用いていたのに対し、Cornsweet では正弦波状に網膜像差を変化させていたことや、② 刺激の形状の違いなどの点についても、今後検討する必要があると思われる。

奥行き対比の効果の大きさがパースペクティブに対する重みづけを表しているのであれば、奥行き対比の異方性を

示す実験 1 と実験 4 の結果は、網膜像差とパースペクティブから奥行きを知覚する際の情報の重みづけに異方性があることを示していることになる。すなわち、水平な軸を中心とする傾斜の知覚においては、網膜像差がより重要な働きをしているのに対し、垂直な軸を中心とする傾斜の知覚においては、パースペクティブがより重要な働きをしていると考えることができる。これまで考えられてきたように網膜像差の処理に異方性があるのであれば、その結果として、パースペクティブ情報との統合の際に重みづけに異方性があるのは当然かもしれない。しかし、網膜像差の処理に異方性があるという点に関して、疑問がないわけではない。これまでに報告された奥行き知覚の異方性を示す研究では、刺激としてランダムドットやグリッドパターンなどが用いられており、Gillam と Ryan^{8,9)} が指摘しているように、パースペクティブの効果は無視できないと思われる。網膜像差の処理にはそもそも異方性ではなく、異方性があるのは、網膜像差とは矛盾する奥行き手がかりを与えるパースペクティブ情報に対する知覚特性のほうであると考えても、これまでの研究と何も矛盾しない。奥行きの Cornsweet 錯視の異方性が刺激のパターンに依存し、まばらなランダムドットでは異方性が表れなかつたが、グリッドパターンでは異方性が表れたという実験 2 と実験 3 の結果は、実験 3 の「目的」でも述べたように、パースペクティブによる奥行き知覚特性のほうに異方性があることを示しているように思われる。パースペクティブによる奥行き知覚に異方性があるという仮説は、Gillam と Ryan^{8,9)} の研究によっても支持される。Gillam²⁸⁾ は、横方向に拡大するレンズにより水平大きさ視差を与えた場合、刺激が垂直線分から構成される場合よりも、水平線分から構成される場合において、奥行き方向の傾斜がより小さく知覚されることを示している。これは、パースペクティブの効果として、foreshortening よりも linear perspective のほうが重要であることを示していると考えができる。Gillam と Ryan^{8,9)} は、異方性の有無が刺激を構成する線分の方向に依存し、linear perspective による強力な奥行き手がかりを取り除いた条件では異方性が表れないことを示している。パースペクティブが奥行き手がかりとして働かない条件において、網膜像差に対する感度に異方性があることを示した研究は、これまでに報告されていないと思われる。奥行き知覚の異方性は網膜像差処理の特性なのか、パースペクティブの処理の特性なのかという問題は、今後さらに検討されるべき興味深い問題であると思われる。

7. まとめ

奥行きの対比効果と Cornsweet 錯視における異方性と個人差の程度を明らかにするために、26 名の被験者に対して異なる傾斜方向について、これらの効果を測定した。いずれの条件においても大きな個人差が認められたが、奥行き対比の実験では、これまでに報告されているのと同様の異方性が確認された。ランダムドットを用いた Cornsweet 錯視の実験では、異方性は認められなかつたが、刺激をグリッドパターンにかえることにより、これまでに報告されているのと同様の異方性が確認された。対比効果や Cornsweet 錯視は、人間の視覚系がバンドパス型になっていて、緩やかな変化が知覚されにくくことにより生じていると考えることができるが、2 つの効果の間で相関が低いという本研究の実験結果は、実際にはそれ以外の要因がこれらの効果に強い影響を及ぼしていることを示している。奥行き対比に影響を及ぼす要因として、パースペクティブの効果が指摘されている^{23,24)}。本研究で示した奥行き対比の異方性や Cornsweet 錯視における異方性の刺激パターン依存性は、パースペクティブの効果に異方性があることを示唆している。奥行き知覚の異方性は網膜像差処理の異方性として議論されることが多いが、パースペクティブの処理に異方性があるという可能性も、今後さらに詳しく検討する必要があると思われる。

文 献

- 1) B. J. Rogers and M. E. Graham: "Anisotropies in the perception of three-dimensional surfaces," *Science*, **221** (1983) 1409-1411.
- 2) H. Wallach and J. Bacon: "Two forms of retinal disparity," *Percept. Psychophys.*, **19** (1976) 375-382.
- 3) B. Gillam, T. Flagg and D. Finlay: "Evidence for disparity change as the primary stimulus for stereoscopic processing," *Percept. Psychophys.*, **36** (1984) 559-564.
- 4) R. Cagenello and B. J. Rogers: "Anisotropies in the perception of stereoscopic surfaces: The role of orientation disparity," *Vision Res.*, **33** (1993) 2189-2201.
- 5) M. F. Bradshaw and B. J. Rogers: "Sensitivity to horizontal and vertical corrugations defined by binocular disparity," *Vision Res.*, **39** (1999) 3049-3056.
- 6) 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.
- 7) G. J. Mitchison and S. P. McKee: "Mechanisms underlying the anisotropy of stereoscopic tilt perception," *Vision Res.*, **30** (1990) 1781-1791.
- 8) B. Gillam and C. Ryan: "Perspective, orientation disparity, and anisotropy in stereoscopic slant perception," *Perception*, **21** (1992) 427-439.
- 9) C. Ryan and B. Gillam: "Cue conflict and stereoscopic surface slant about horizontal and vertical axes," *Perception*, **23** (1994) 645-658.

- 10) C. W. Tyler: "Stereoscopic vision: Cortical limitations and a disparity scaling effect," *Science*, **181** (1973) 276-278.
- 11) C. W. Tyler: "Spatial organization of binocular disparity sensitivity," *Vision Res.*, **15** (1975) 583-590.
- 12) B. Rogers and M. Graham: "Similarities between motion parallax and stereopsis in human depth perception," *Vision Res.*, **22** (1982) 261-270.
- 13) R. A. Schumer and B. Julesz: "Binocular disparity modulation sensitivity to disparities offset from the place to fixation," *Vision Res.*, **24** (1984) 533-542.
- 14) H. Werner: "Dynamics in binocular depth perception," *Psychol. Monogr.*, **49** (1937) 1-127.
- 15) H. Werner: "Binocular depth contrast and the conditions of binocular field," *Am. J. Psychol.*, **51** (1938) 489-497.
- 16) N. Pastore: "Induction of a stereoscopic depth contrast," *Science*, **144** (1964) 888.
- 17) N. Pastore and M. Terwilliger: "Induction of stereoscopic depth effects," *Br. J. Psychol.*, **57** (1966) 201-202.
- 18) M. Graham and B. J. Rogers: "Simultaneous and successive contrast effects in the perception of depth from motion-parallax and stereoscopic information," *Perception*, **11** (1982) 247-262.
- 19) T. Kumar and D. A. Glaser: "Influence of remote objects on local depth perception," *Vision Res.*, **31** (1991) 1687-1699.
- 20) T. Kumar and D. A. Glaser: "Shape analysis and stereopsis for human depth perception," *Vision Res.*, **32** (1992) 499-512.
- 21) T. Kumar and D. A. Glaser: "Temporal aspects of depth contrast," *Vision Res.*, **33** (1993) 947-957.
- 22) R. van Ee and C. J. Erkelens: "Anisotropy in Werner's binocular depth-contrast effect," *Vision Res.*, **36** (1996) 2253-2262.
- 23) R. van Ee, M. S. Banks and B. T. Backus: "An analysis of binocular slant contrast," *Perception*, **28** (1999) 1121-1145.
- 24) M. Sato and I. P. Howard: "Effects of disparity-perspective cue conflict on depth contrast," *Vision Res.*, **41** (2001) 415-426.
- 25) T. N. Cornsweet: *Visual Perception* (Academic Press, New York, 1970) pp. 270-364.
- 26) I. P. Howard and H. Kaneko: "Relative shear disparities and the perception of surface inclination," *Vision Res.*, **34** (1994) 2505-2517.
- 27) H. Kaneko and I. P. Howard: "Relative size disparities and the perception of surface slant," *Vision Res.*, **36** (1996) 1919-1930.
- 28) B. Gillam: "Perception of slant when perspective and stereopsis conflict: Experiments with aniseikonic lenses," *J. Exp. Psychol.*, **78** (1968) 299-305.