

ファントム立体視に及ぼす輻輳および観察距離の効果

黒木 大一朗*・中溝 幸夫**

*九州大学 文学部 心理学研究室

**九州大学 大学院 人間環境学研究院

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-19-1

(受付：2003年5月5日；改訂稿受付：2003年12月14日；受理：2004年1月13日)

The Effects of Convergence and Viewing Distance on Perceived Depth of Phantom Stereopsis

Daiichiro KUROKI* and Sachio NAKAMIZO**

* Department of Psychology, Faculty of Letters, Kyushu University

** Department of Psychology, Faculty of Human Environment Studies, Kyushu University

6-19-1, Hakozaki, Higashi-ku, Fukuoka, 812-8581, Japan

(Received 5 May 2003; Received in revised form 14 December 2003; Accepted 13 January 2004)

We examined the effects of convergence and viewing distance on perceived depth of phantom and conventional stereopsis. Three stimuli were Gillam and Nakayama's (1999) and Liu et al.'s (1994) phantom stereograms, and RDS. In Experiment 1 and 2, the perceived depth was measured as a function of the convergence angle (4°, 8°, 12°, 16° and 20°) and the size of unpaired region (0.4, 0.7 and 1.0 mm) while the viewing distance was held constant. In Experiment 3, the perceived depth was measured as a function of the viewing distance (60, 80, 100, 120 and 140 cm) and the size of unpaired region (1.6, 1.8 and 2.0 mm). The results of the three experiments showed that: (a) the magnitude of perceived depth increased as the convergence angle decreased and (b) when convergence and the viewing distance covaried, the depth scaling by convergence information became more effective for both phantom and conventional stereopsis. We conclude that both the phantom and conventional stereopsis have similar processes to scale apparent depth by convergence or the viewing distance information.

1. はじめに

水平網膜像差（以下、網膜像差）を処理することによって事物間の奥行や事物の立体形状を出力する立体視は、伝統的に網膜像差立体視（あるいは両眼立体視 binocular stereopsis）と呼ばれてきた。網膜像差立体視は、両眼に対応して存在する網膜像の差を視覚系が検出し、“計算する”ことによって奥行が知覚される立体視であるため“両眼対応特徴”に基づく立体視である。図1は、網膜像差立体視における奥行と輻輳角および絶対距離（以下、距離）の幾何学的関係を表している。網膜像差立体視において

幾何学的に予測される奥行 d は、網膜像差を δ ($=\theta' - \theta$, ラジアン), 両眼距離を I , 輻輳角を θ (ラジアン), 距離を D としたとき, 近似的に次式で表すことができる (付録1参照).

$$d \cong \frac{I \times \delta}{\theta^2} \quad (1)$$

$$d \cong \frac{D^2 \times \delta}{I} \quad (2)$$

もし視覚系がこれらの式に一致するようにそれぞれのパラメータを処理していると仮定した場合, 奥行量は網膜像差の情報だけでは一意に決めることができず, 両眼距離 (I) および, 輻輳角 (θ) もしくは距離 (D) の情報が必要

である。これらの変数を操作して奥行量を測定したこれまでの研究結果に基づくと、視覚系はこれらの変数の一定範囲において、輻輳や距離の情報を用いて奥行量をスケールしていると考えられる¹⁻⁶⁾。

一方、近年、“両眼非対応特徴”に基づく立体視が両眼対応特徴に基づく立体視に匹敵する奥行感を生み出すことが報告された^{4,7-12)}。両眼非対応特徴は、一方の網膜像に存在する特徴がもう片方の網膜像に存在しないことを意味しており、視覚系は、不透明な物体が片方の眼に対して背景の一部を遮蔽するために両眼非対応特徴が存在すると解釈する。したがって、両眼非対応特徴は単眼遮蔽領域 (monocular occlusion zone⁴⁾) と表現される場合もある。これまでに報告された、両眼非対応特徴に基づく立体視を生み出す代表的なステレオグラムには次の三つがある。1) 左右のステレオグラムのそれぞれに両眼対応特徴として長方形の遮蔽面が存在し、片方のステレオグラムのみにも両眼非対応特徴として線分が存在するダ・ヴィンチステレオ

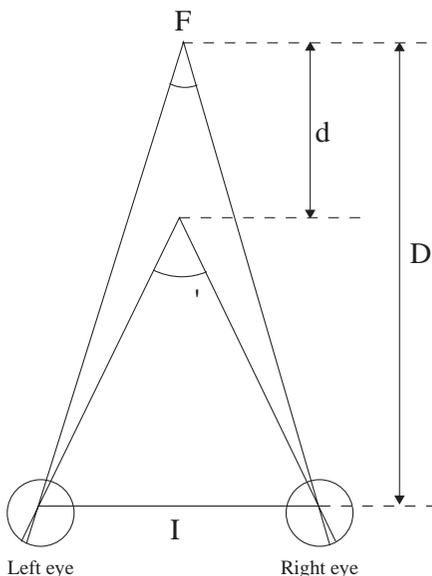


図1 両眼対応特徴に基づく立体視 (網膜像差立体視) の幾何学的関係。F: 凝視点 (Fixation point), θ : 輻輳角, D: 絶対距離, $\delta (= \theta' - \theta)$: 網膜像差, I: 両眼距離, d: 奥行量としたとき, (1) および (2) 式が成り立つ。

グラム¹²⁾, 2) 左右のステレオグラムのそれぞれに両眼非対応特徴が存在するファントムステレオグラム^{9,11)}, および 3) 片方のステレオグラムのみにも両眼非対応特徴として長方形を2分する垂直方向のギャップが存在する Gillam, Blackburn and Nakayama⁸⁾ のステレオグラムである。Nakayama and Shimojo¹²⁾ は、ダ・ヴィンチステレオグラムによる立体視をレオナルド・ダ・ヴィンチがはじめて報告した観察条件であることから、ダ・ヴィンチ立体視 (Da Vinci stereopsis) と呼んだ。また、Liu et al.¹¹⁾ や Gillam and Nakayama⁹⁾ は、ファントムステレオグラムによる立体視を主観的輪郭線によって“架空の”面が形成されるということから、ファントム立体視 (phantom stereopsis) と呼んだ。一方、Gillam et al.⁸⁾ のステレオグラムによる立体視が上で述べた両立体視とは異なるものなのか、それともそのどちらかと同種のものなのかについては、現時点では明白ではない。

Nakayama and Shimojo¹²⁾ はダ・ヴィンチ立体視における知覚奥行量の量的・質的特性について調べた。ダ・ヴィンチ立体視では、両眼対応特徴である遮蔽面と両眼非対応特徴である線分間に奥行が知覚される。幾何学的にこの奥行量を一意に決めることはできないが、両眼対応特徴 (遮蔽面) との遮蔽関係を満たす両眼非対応特徴 (線分) が存在し得る奥行領域 (奥行制約領域; depth constraint zone) が決まる。Nakayama and Shimojo¹²⁾ は、ダ・ヴィンチステレオグラムにおいて両眼対応特徴と非対応特徴の相対的位置関係を変化させることによって奥行制約領域を変化させると、それにもなって知覚奥行量が量的に変化すること、また両眼非対応特徴が奥行制約領域に存在しないときには、奥行が知覚されないことを報告した。

その後、Liu et al.¹¹⁾ によって図2aに示すファントムステレオグラムが考案された。両眼非対応特徴は、図2aにおいて、上下二つの長方形を結ぶ細い線分である。Liu et al.¹¹⁾ は、図2aを融合すると、黒色の背景面 (両眼対応特徴) 上に主観的輪郭によって形成される奥行き

をもった白色の遮蔽面（ファントム面 phantom surface）が“手前に”知覚されることを発見し、これをファントム立体視と呼んだ。ファントム立体視は、両眼対応特徴に対して非対応特徴が奥行を持って知覚されない点がダ・ヴィンチ立体視とは異なる。また、ファントム面の位置はダ・ヴィンチ立体視と同様に幾何学的に一意には定まらず、最小奥行量をもつファントム面の位置のみを決めることができる（図3参照）。Liu et al.¹¹⁾ は、図2aのステレオグラムが網膜像差を含まないにもかかわらず、その知覚奥行量が図2aの両眼非対応特徴と同じ大きさの網膜像差を含むステレオグラムの知覚奥行量（すなわち、幾何学的に予測される最小奥行量）と等しくなると主張したが、その後の研究で、視覚系がこのステレオグラムから網膜像差を検出することが可能であることが指摘された。Gillam¹³⁾ は、図2aのステレオグラムにおいて、コの字形を構成する水平方向の線分位置の差が網膜像差を生み出し、視覚系がこの網膜像差を処理することによって、白色面の奥行が知覚されると指摘した。その後、Liu et al.¹⁴⁾ は、両眼対応特徴に反応する皮質細胞が、図2aの水平

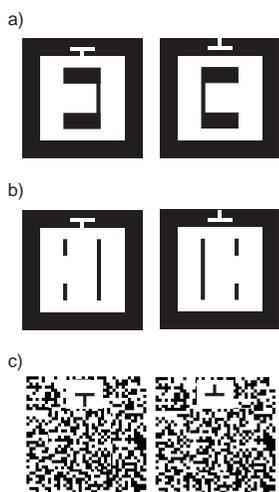


図2 実験に用いた3種類のスレオグラム（交差法用）。a) Liuタイプ、b) G&Nタイプ、c) RDSである。これらの刺激は実験1で用いられた。実験2および3でのG&Nタイプはb)と刺激サイズがわずかに異なった。

線分の両端において網膜像差を出力することをコンピュータシミュレーションによって検証した。

Gillam and Nakayama⁹⁾ は、Liu et al.¹¹⁾ とは異なるファントムステレオグラムを考案した（図2b）。このステレオグラムは水平方向線分の網膜像差を含まない“純粋な”両眼非対応特徴（および網膜像差のない両眼対応特徴）からなるステレオグラムで、両眼非対応特徴は垂直線分の中央のギャップ部分である。このステレオグラムを両眼融合視すると、2本の垂直線分（両眼対応特徴）の手前に主観的輪郭線からなる“架空の”矩形面が知覚される。Gillam and Nakayama⁹⁾ は、図2bのステレオグラムを用いて、線分の幅とファントム面の知覚奥行量との関係を調べた。その結果、線分幅の増加にともなって知覚奥行量は増加し、また知覚奥行量が幾何学的に予測される最小奥行量（図3参照）よりも大きく、同時に知覚奥行量の個人差が大

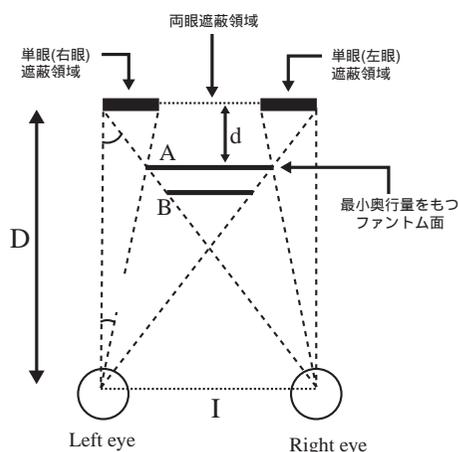


図3 ファントム立体視における両眼非対応特徴（単眼遮蔽領域）とファントム面の関係。両眼に両眼非対応特徴（単眼遮蔽領域）が呈示されたとき、主観的輪郭によってファントム面が生じる。図に示しているファントム面Aは両眼非対応特徴との遮蔽関係を満たす最小奥行量をもつファントム面である。ファントム面Bも遮蔽関係を満たすために、ファントムの知覚奥行量は幾何学的に一意に決まらない。 θ ：輻輳角、 δ' ：両眼非対応特徴の大きさ、 I ：両眼距離、 d ：最小奥行量としたとき、(3)式が成り立つ。

きいことを見いだした。この結果はファントム立体視の知覚奥行量が両眼非対応特徴の大きさ(線分幅)に依存する量的な奥行であることを示唆している。

Gillam et al.⁸⁾ は、a) 左右のステレオグラムのそれぞれに、両眼対応特徴として長方形を2分する大きさの異なる垂直方向のギャップが存在するステレオグラムと、b) 片方のステレオグラムのみ両眼非対応特徴としてギャップが存在するステレオグラム、c) b) のステレオグラムのギャップ部分を削除して2分された長方形を一つの長方形としたステレオグラム(つまり、左右のステレオグラムのそれぞれに、横幅の異なる長方形が存在する)を用いて知覚奥行量とギャップの関係を調べた。a) と b) のステレオグラムを融合すると2枚の奥行を持つ前額平行面が知覚され、c) のステレオグラムを融合すると傾いた面が知覚される。実験の結果、両眼非対応特徴に基づく立体視を生じるb) のステレオグラムにおいて、視覚系がギャップサイズを網膜像差と等価な情報として処理していることが明らかとなった。

本研究の目的は、ファントム立体視の知覚奥行量に及ぼす輻輳および観察距離の効果を調べ、両眼非対応特徴に基づく立体視と両眼対応特徴に基づく立体視を比較することであった。すでに述べたように、両眼対応特徴に基づく立体視(網膜像差立体視)においては、視覚系が網膜像差、輻輳、距離などの変数の一定範囲でこれらの情報を用いて奥行量をスケールアップしていることが示されているが¹⁻⁶⁾、ファントム立体視についてはいまだ明らかでない。ファントム立体視におけるこれらの変数の効果を調べ、両眼非対応特徴に基づく立体視と両眼対応特徴に基づく立体視を比較することは、両立体視を媒介するメカニズムを解明するうえで非常に重要である。実験1, 2では、輻輳の効果を分離するため、観察距離を固定し輻輳角だけを変化させてファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視(RDS)の知覚奥行量に及ぼす輻輳の効果を調べた。実験3では、日常観察条件に近づける

ために刺激の観察距離を変化させることによって輻輳角を変化させ、ファントム立体視に及ぼす輻輳と観察距離の効果を調べた。また実験2と実験3では、輻輳と同時に両眼非対応特徴の大きさを変化させて知覚奥行量を測定し、両眼非対応特徴の大きさの効果を調べた。

2. 実 験

2.1 実験1：知覚奥行量に及ぼす輻輳の効果

輻輳の効果を他の奥行手がかり効果から分離するため、観察距離を固定した条件下で輻輳角だけを変化させて知覚奥行量を測定し、ファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視の知覚奥行量に及ぼす輻輳の効果を比較した。

2.1.1 刺激と装置

刺激は、Liu et al.¹¹⁾ のステレオグラム(以下、Liuタイプ、)、Gillam and Nakayama⁹⁾ のステレオグラム(以下、G&Nタイプ、)、およびランダムドットステレオグラム(以下、RDS、)の計3種類を用いた。Liuタイプは、幅12mm(4.6°)×高さ5mm(1.9°)の黒色長方形二つを幅1mm(22.9′)×高さ10mm(3.8°)の黒色線分で見ない図形であった。G&Nタイプは、幅1mm(22.9′)×高さ20mm(7.6°)の線分からなり、片方の線分の中央部分[幅1mm(22.9′)×高さ9mm(3.4°)]が欠如していた。線分間距離は11mm(4.2°)であった。RDSは、幅30mm(11.3°)、高さ35mm(13.1°)であり、0.7mm(16.0′)の交差性網膜像差をもっていた。G&NタイプとLiuタイプには幅6mm(2.3°)、横40mm(14.9°)、縦40mm(14.9°)の黒色外枠を設け、すべてのステレオグラムには、に示す位置にノニウス線分[幅0.8mm(18.3′)、横7mm(2.7°)、縦2mm(45.8′)]を設けた。すべての刺激は白色と黒色で構成され、それぞれの輝度は17.87cd/m²、0.46cd/m²であった。

刺激はハプロスコープ(高田器械製シノプトフォア)を用いて提示され、被験者はハプロスコープの観察窓および6.5dioptrの凸レンズを通して、15cmの観察距離に呈示された刺激を

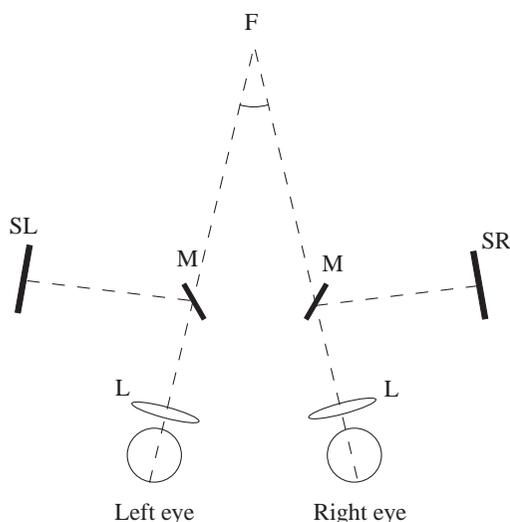


図4 ハプロスコープの概念図。M：ミラー，L：6.5ジオプターの凸型接眼レンズ，F：凝視点（Fixation point）， θ ：輻輳角，SL：Stimulus for Left eye，SR：Stimulus for Right eye。この装置では観察距離を一定にしたまま輻輳角をほぼ1°の精度で連続的に変化させることができた。

観察した*1（図4参照）。この装置では、観察距離を一定にしたまま輻輳角をほぼ1°の精度で連続的に変化させることができた。

2.1.2 手続き

被験者は、頭部をあご台によって固定し、ハプロスコープの接眼レンズを通して刺激を観察した。被験者の課題は、知覚された奥行量をノギスによって再生させることであった（ノギスの目盛りは被験者の眼から遮蔽されていた）。被験者は常にノニウス線分の交点を凝視するように教示されていた。実験1の独立変数は刺激の種類（Liuタイプ，G&Nタイプ，RDS）と輻輳角（4°，8°，12°，16°，20°）の二つであった。合計30試行（3刺激×5輻輳角×2繰り返し）をランダムな順序で行った。被験者は、矯正視力を含む正常視力を有する7名であった。7名

*1 被験者は6.5 diopterの凸レンズを通して刺激を観察したため、実際の刺激よりわずかに拡大した正立の虚像を観察した。2.3.1に記述した視角の値は、凸レンズによる拡大を考慮して計算された値ではない。

の被験者のうち、6名が実験の目的を知らないタイプな被験者であった。

2.1.3 データ解析：有効スケーリング輻輳角

実験に用いたそれぞれの刺激の知覚奥行量に及ぼす輻輳の効果を評定するために、有効スケーリング輻輳角（effective scaling vergence angle；以下、有効輻輳角）を用いた¹⁾。両眼対応特徴に基づく立体視（網膜像差立体視）において、奥行 d ，輻輳角 θ ，両眼距離 l ，網膜像差 δ の4者の数学的関係は（1）式で表される。Bradshaw et al.¹⁾はFoley¹⁵⁾が用いた有効両眼網膜像差（effective binocular disparity）の概念にならって、（1）式における d に“測定された知覚奥行量”を代入したときの θ の値を有効輻輳角として用いた。奥行スケーリングが（1）式に従っている（奥行恒常性が成り立つ）ならば、輻輳角の関数として表した有効輻輳角関数は傾きが1の線形関数となる¹⁾。この関数の傾きを指標にして、輻輳情報が奥行スケーリングに及ぼす効果を定量的に扱うことができる。有効輻輳角関数の傾きが大きいほど輻輳の効果が大きいことを意味する。

本研究では、ファントム立体視における有効輻輳角を次のように定義した。ファントム立体視では、幾何学的にファントム面の位置を一意に決めることができない⁹⁾。しかし、図3に示すように、幾何学的な遮蔽関係を満たす最小奥行量をもつファントム面の位置を決めることはできる。最小奥行量 d は両眼非対応特徴（単眼遮蔽領域）の大きさを δ' （視角ラジアン）、両眼距離を l ，輻輳角を θ （視角ラジアン）としたとき、次の式で表すことができる。

$$d \doteq \frac{l \times \delta'}{\theta^2} \quad (3)$$

もし両眼非対応特徴の大きさを網膜像差と等価な変数と仮定すると、ファントム立体視での最小奥行量は両眼対応特徴に基づく立体視での幾何学的予測値と一致する。本研究ではファントム立体視における有効輻輳角を（3）式の最小奥行量 d に知覚奥行量を代入したときの θ の値とした。ファントム立体視における知覚奥行

量が計算された最小奥行量と等しいとき、有効輻輳角関数の傾きは1となる。

2.1.4 結果

各被験者についてそれぞれの下位条件における2回の試行の平均知覚奥行量から有効輻輳角関数を求めた。すべての刺激について、有効輻輳角関数は高い決定係数 (R^2) で線形増加関数となった(表1, 図5a参照。表1の値は、有効輻輳角関数の傾きのグループ平均値を示す)。有効輻輳角関数の傾きを分析の基本単位として、1要因(刺激の種類—3水準)の繰り返し分散分析を行った結果、刺激の種類の主効果が統計的に有意であった [$F(2, 12)=12.06; p<.005$]。また下位検定の結果G&Nタイプの関数の傾きは、RDSおよびLiuタイプのそれよりも有意に小さかった[それぞれ、 $t=4.89, p<.001; t=2.88, p<.05$]。また、Liuタイプの有効輻輳角関数の傾きがRDSのそれよりも有意に小さくなる傾向があった [$p=0.068$]。図5aは、輻輳角の関数として表された有効輻輳角関数の傾きのグループ平均値を示す。上の統計的分析結果は、図5aにおけるそれぞれの刺激ごとの平均値に当てはめた直線の相対的傾きの違いに表されている。図5bは輻輳角の関数として表したG&NタイプとLiuタイプの知覚奥行量のグループ平均値で、図5cは輻輳角の関数として表したRDSの知覚奥行量のグループ平均値である。G&Nタイプの知覚奥行量はLiuタイプのそれより大きくなった。またすべてのステレオグラム¹³⁾の知覚奥行量は輻輳角の非線形減少関数であった(表2参照)。

2.1.5 考察

ファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視は、輻輳情報を用いて見かけの奥行をスケールアップするという点で共通した特性をもっている。このことは、ファントム立体視において、(a) 知覚奥行量が輻輳角の非線形減少関数であった、(b) 有効輻輳角関数が線形であったという二つの結果から明らかである。

Liuタイプのステレオグラムの結果は、Gillam¹³⁾やLiu et al.¹⁴⁾が指摘するように、視

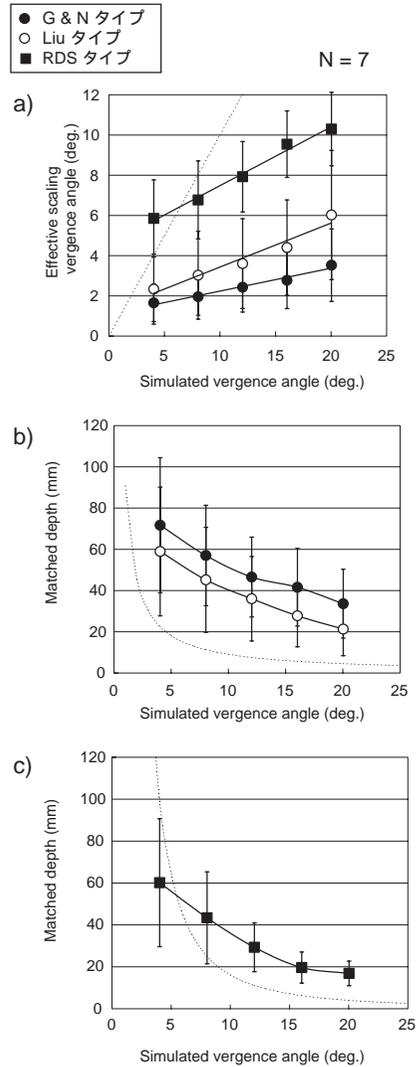


図5 実験1の結果。●はG&Nタイプ、○はLiuタイプ、■はRDSを表す。a)は輻輳角の関数としてプロットした有効輻輳角である。点線は傾きが1の有効輻輳角関数である。b)は輻輳角の関数としてプロットしたG&NタイプとLiuタイプの知覚奥行量で、点線は(3)式で計算された最小奥行量を表す。c)は輻輳角の関数としてプロットしたRDSの知覚奥行量で、点線は(1)式で計算された幾何学的予測値を表す。誤差棒は標準誤差を表す。

覚系がLiuタイプのステレオグラムから網膜像差を検出している可能性を示唆している。刺激の種類の主効果に対する下位検定の結果は、G&NタイプとLiuタイプにおける有効輻輳角関

表 1 有効輻角関数の傾きと決定係数

実験 1

刺激の種類	有効輻角関数の傾き	R^2	被験者数
G&N タイプ	0.114	0.973	7
Liu タイプ	0.219	0.951	
RDS	0.292	0.989	

実験 2

線分幅 (mm)	有効輻角関数の傾き	R^2	被験者数
0.4	0.104	0.981	5
0.7	0.137	0.967	
1	0.189	0.901	

実験 3

線分幅 (mm)	有効輻角関数の傾き	R^2	被験者数
1.6	0.772	0.999	6
1.8	0.814	0.999	
2	0.805	0.998	

表 2 決定係数の比較

実験 1

刺激の種類	線形回帰	非線形回帰
G&N タイプ	0.963	0.993
Liu タイプ	0.979	0.999
RDS	0.941	0.999

実験 2

線分幅 (mm)	線形回帰	非線形回帰
0.4	0.994	0.999
0.7	0.952	0.999
1	0.981	0.999

実験 3

線分幅 (mm)	線形回帰	非線形回帰
1.6	0.926	0.998
1.8	0.924	0.994
2	0.938	0.993

それぞれの刺激の知覚奥行量に対して線形回帰と非線形回帰を行い、決定係数の比較を行った。すべての条件で、非線形回帰を行った場合の決定係数の方が高いので、すべての刺激の知覚奥行量は輻角の非線形関数であると言える。

数の傾きの差が統計的に有意であることを示した。もし両ステレオグラムの立体視において、奥行手がかりとして網膜像差の情報が用いられていないと仮定すると、両ステレオグラムの両眼非対応特徴の大きさ（線分幅）は等しいので、それぞれの立体視における最小奥行量は等しくなり、その結果、知覚奥行量も等しくなるはずである。最小奥行量と知覚奥行量が等しいとき、有効輻角は等しくなり、有効輻角関数の傾きに違いは見られないはずである。一方、Liu タイプと RDS との間で有効輻角関数の傾きが有意に異なる傾向があった理由は、本実験の結果からは特定できない。一つの可能性としては、Liu タイプの両眼非対応特徴の大きさ（23'）と RDS の網膜像差の大きさ（16'）の差が有効輻角関数の違いを生んだことが考えられる。視覚系が Liu タイプの両眼非対応特徴の大きさを網膜像差と同等の奥行手がかりとして見なしたとすれば、有効輻角関数の傾きに違いがでてくるであろう。ファントム立体視に及ぼす両眼非対応特徴の大きさについては、Gillam and Nakayama⁹⁾によって両眼非対応特徴の大きさが増加するほど知覚奥行量が増加することが報

告されているが、両眼非対応特徴の大きさと輻輳との相互関係についてはまだ調べられていないので、実験2では、両眼非対応特徴の大きさと輻輳が知覚奥行量に及ぼす効果を調べて、網膜像差立体視の場合と比較した。

本実験の両眼対応特徴に基づく立体視(RDS)において、奥行恒常性が成立しなかった(有効輻輳角関数の傾きが1に近くなかった)主要な理由としては、輻輳距離と観察距離が対応していなかったことが考えられる。このような実験環境では、輻輳手がかりが生み出す距離情報と調節手がかりが生み出す距離情報は一致していないので、視覚系は(1)もしくは(2)式に従って奥行量を復元することが困難になるのかもしれない。従来の研究も同じ結果を示している。例えば、本研究と同様の実験環境を用いたBradshaw et al.¹⁾の結果は、本実験におけるRDSの有効輻輳角関数の傾きと、ほぼ同じであった。Bradshaw et al.¹⁾の有効輻輳角関数の傾きは0.34(網膜像差20')で、本実験での有効輻輳角関数の傾きは0.29(網膜像差16')であった。上に述べた輻輳距離と観察距離の非対応は、両眼対応特徴に基づく立体視の場合と同様に、ファントム立体視の知覚奥行量にも影響を及ぼしている可能性がある。後に述べるように、実験3では、輻輳と観察距離が共変する場合の知覚奥行量を測定し、輻輳距離と観察距離の対応がファントム立体視にどのような影響を及ぼすのかを調べた。

2.2 実験2：知覚奥行量に及ぼす輻輳と両眼非対応特徴の大きさの効果

Gillam and Nakayama⁹⁾は、両眼非対応特徴の大きさが増加するほど知覚奥行量が増加することを報告したが、両眼非対応特徴の大きさと輻輳の相互関係については調べていない。そこで実験2では、観察距離を固定し輻輳角だけを変化させて、両眼非対応特徴の大きさが異なるファントムステレオグラムを用いて、知覚奥行量に及ぼす輻輳および両眼非対応特徴の大きさの効果を調べた。

2.2.1 方法

刺激と装置、手続きは基本的に実験1と同じであった。以下、実験1と異なる方法についてのみを述べる。刺激は、線分幅の異なる3種類のG&Nタイプのステレオグラムであった。線分幅は0.4mm(9.2'), 0.7mm(16.0'), 1.0mm(22.9')であった。実験2の独立変数はG&Nタイプの線分幅(0.4mm, 0.7mm, 1.0mm)と輻輳角(4°, 8°, 12°, 16°, 20°)の二つであった。合計30試行(3線分幅×5輻輳角×2繰り返し)をランダムな順序で行った。被験者は、矯正視力を含む正常視力を有する5名であった。5名の被験者のうち、4名が実験の目的を知らないナイーブな被験者であった。また、5名の被験者のうち、4名は実験1の被験者と共通していた。

2.2.2 結果

各被験者についてそれぞれの下位条件における2回の試行の平均知覚奥行量を計算し、その値を分析の基本単位として、2要因(輻輳角と両眼非対応特徴の大きさ)の繰り返し分散分析を行った結果、2要因の主効果は統計的に有意[輻輳角： $F(4, 16)=12.96, p<.001$; 両眼非対応特徴の大きさ： $F(2, 8)=11.25, p<.005$]であった。また下位検定の結果、線分幅(両眼非対応特徴の大きさ)が0.4mmと1.0mmの間と0.7mmと1.0mmの間で知覚奥行量が統計的に有意に異なった[それぞれ、 $t=4.72, p<.005$; $t=2.76, p<.05$]。図6aは、輻輳角の関数として表された知覚奥行量のグループ平均値を示す。すべてのステレオグラムの知覚奥行量は輻輳角の非線形減少関数であった(表2参照)。輻輳角の主効果は平均値を結んだ曲線の勾配に表されており、両眼非対応特徴の大きさの主効果は平均値の相対的高さに表されている。また実験1と同様に平均知覚奥行量から有効輻輳角関数を求めた(図6b参照)。すべての条件において有効輻輳角関数は高い決定係数(R^2)で線形増加関数となった(表1参照)。

2.2.3 考察

ファントム立体視における輻輳と両眼非対応

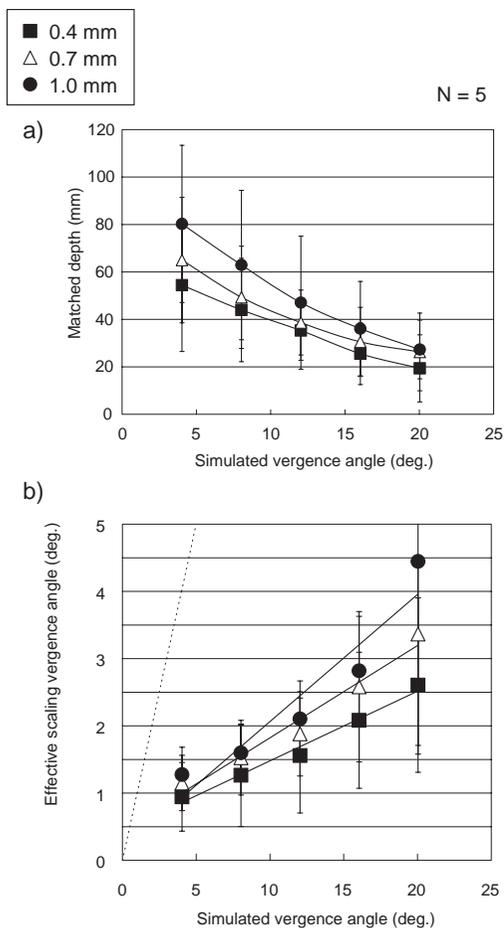


図6 実験2の結果。■は線分幅が0.4mm, △は線分幅が0.7mm, ●は線分幅が1.0mmを表す。a)は輻輳角の関数としてプロットした知覚奥行量である。b)は輻輳角の関数としてプロットした有効輻輳角である。点線は傾きが1の有効輻輳角関数である。誤差棒は標準誤差を表す。

特徴の大きさの関係は、両眼対応特徴に基づく立体視（網膜像差立体視）における輻輳と網膜像差の関係³⁾に非常に類似している。2要因（輻輳角と両眼非対応特徴の大きさ）の分散分析の結果、2要因の主効果が統計的に有意であり、輻輳角が小さいほど、また両眼非対応特徴が大きいくほど知覚奥行量は大きくなった（図6a参照）。このことは、ファントム立体視において視覚系が輻輳情報と両眼非対応特徴の大きさの情報を用いて奥行スケールを行っている

ことを意味する。この処理過程は、輻輳情報と網膜像差を用いた奥行スケールに酷似している。また、両眼非対応特徴の大きさの増加とともに知覚奥行量が増加したという本実験の結果は、両眼非対応特徴の大きさを0.77'から3.87'まで変化させたときのファントム立体視の知覚奥行量を測定した Gillam and Nakayama⁹⁾の結果とも一致した。

実験1におけるG&Nタイプと実験2における線分幅1mmのG&Nタイプは全く等価な刺激条件であったにもかかわらず、結果に基づいて計算された有効輻輳角関数の傾きが異なっていた（実験1では0.114, 実験2では0.189）。その理由は明白ではないが、一つの可能性は、Gillam and Nakayama⁹⁾が指摘しているファントム立体視の個人差の大きさである。実験1と実験2では用いた被験者の数が異なり、なおかつ両実験に共通の被験者は4名であった。この被験者の差が等価の条件での結果の差を生み出したのかもしれない。

2.3 実験3：知覚奥行量に及ぼす観察距離と両眼非対応特徴の大きさの効果

日常環境下では、観察距離の変化に対応して、輻輳とともに調節などの他の奥行手がかりが同時に変化する。実験3では、ファントム立体視の知覚奥行量に及ぼす観察距離の効果を調べた。同時に、両眼非対応特徴の大きさが異なるファントム立体視の知覚奥行量に及ぼす観察距離の効果を調べた。

2.3.1 刺激と装置

刺激は線分幅の異なる3種類のG&Nタイプを用いた。線分幅は1.6mm, 1.8mm, 2.0mmで、線分の高さは30mmであった。片方の線分の中央部分（幅1.8mm×高さ12mm）が欠如しており、線分間距離は17mmであった。さらに二つの線分は、幅11mm（上下）と幅7mm（左右）の線分で囲んだ外枠（外枠の大きさは幅55mm×高さ76mm）とノニウス線分（線分幅1.5mm, 幅10mm, 高さ8mm）を設けた。ノニウスは外枠の下端から18mm上方に設けた。すべての刺激は白色と黒色で構成され、

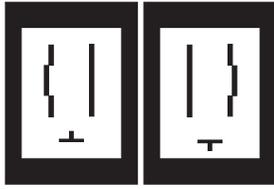


図7 両眼対応特徴に基づく立体視を生み出すステレオグラム、G&Nタイプの両眼非対応特徴に網膜像差を生み出す線分を付け加えたものである。ファントムステレオグラムに非常に類似した両眼対応特徴をもつステレオグラムである。

それぞれの輝度は 53.45 cd/m^2 、 0.10 cd/m^2 であった。

偏光フィルタを利用したステレオスコープを用いて刺激を呈示した*2。刺激はパーソナルコンピュータ (SOTEC: PC STATION G7100RW) に接続した 17 インチの CRT ディスプレイ (SONY: Trinitron Multiscan E230) に呈示された。左右のステレオグラム間の距離は 58mm であった。実験プログラムは Borland 社の Delphi 5 で作成された。画面と観察窓 (片眼の観察窓の大きさが幅 4cm × 高さ 3.6cm の長方形) の前に偏光フィルタが設置され、被験者は交差法 (視軸を交差させて刺激イメージを融合させる) によってステレオグラムを両眼融合させた (したがって、観察距離と輻輳距離は完全には一致していなかった。図8と付録2参照)。ディス

*2 偏光フィルタを利用したステレオスコープを用いて実験1と同様の追加実験を行った。刺激として、線分幅が等しいG&Nタイプ、Liuタイプ、両眼対応特徴をもつステレオグラムを用いた。両眼対応特徴をもつステレオグラムには、図7に示すようにG&Nタイプのギャップ部分に線分幅だけずれた線分が存在し、この部分が網膜像差を生み出した。この刺激を用いた理由はG&Nタイプと非常に類似した両眼対応特徴をもつステレオグラムを用いてG&Nタイプとの比較を行うためであった。実験の結果、ファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視の知覚興行量は輻輳角の非線形減少関数として表されることが確認された。そして、G&Nタイプの知覚興行量は他のステレオグラムのそれに比べ非常に大きく、Liuタイプと両眼対応特徴をもつステレオグラムの知覚興行量はほぼ等しかった。この実験の結果は、実験1の結果と等価であると見なせる。

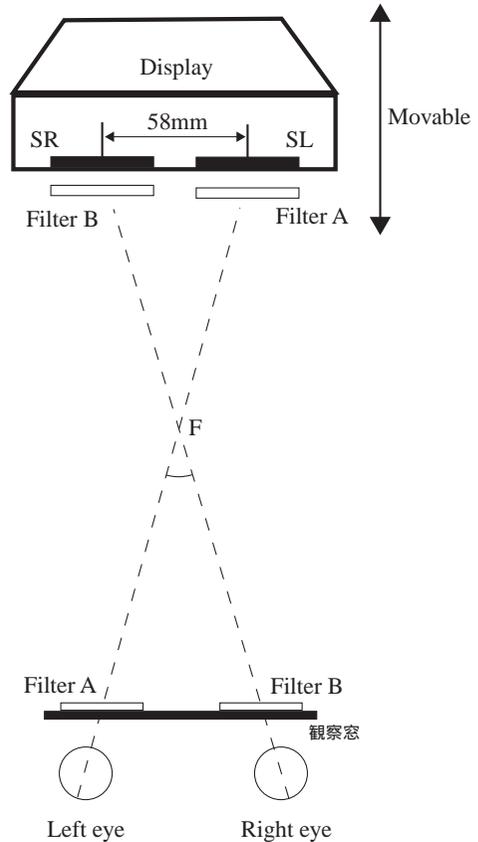


図8 偏光フィルタを用いたステレオスコープの概念図。F：凝視点 (Fixation point), θ ：輻輳角, SL：Stimulus for Left eye, SR：Stimulus for Right eye。被験者は対になっているフィルタの背景のみを観察することができ、視軸を交差させることによってステレオグラムを両眼融合させた。またディスプレイの位置が可変であり、実験3ではディスプレイを移動させることで観察距離を変化させた。

プレイの位置を変化させることによって観察距離を 60 cm から 140 cm まで 20 cm 間隔 (5 水準) で変化させた。この 5 カ所の観察距離にディスプレイを設置し、刺激を両眼融合したときの輻輳角は、それぞれ、11.6, 8.7, 7.0, 5.9, 5.0 deg, 輻輳距離は、31.7 cm, 42.5 cm, 52.9 cm, 62.9 cm, 74.3 cm に対応した (これらの値は両眼距離を 6.5 cm, 左右のステレオグラム間の距離を 58mm として付録2の計算式より求めた)。実験は刺激以外の視覚情報の入力がない

よう準暗室の中で行われた。

2.3.2 手続き

被験者は、頭部をあご台によって固定し、偏光フィルタを装着した観察窓から刺激画面を観察した。被験者の課題は、知覚される奥行面と同一平面上に見えるようにキーボードを操作して外枠（プローブ）の位置を調節することであった（図9参照）。プローブ刺激を矩形の枠にした理由は、予備観察の結果、ファントム面の知覚された位置と枠の位置とを一致させる課題が他の形態のプローブ（例えば、Gillam and Nakayama⁹⁾ が用いた円図形など）を用いた場合よりも容易であるためであった。被験者がキーボードを押すと各刺激と外枠（プローブ）の網膜像差が変化し、刺激と外枠の相対的な奥行量が変化した。外枠の網膜像差は、1回のキー押しによって視角約1'ずつ変化した。被験者は常にノニウス線分の交点を凝視するように

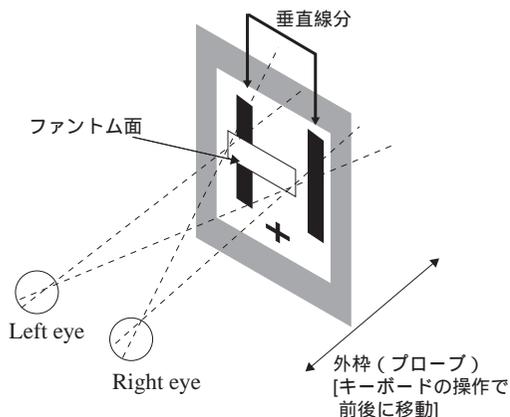


図9 調整法の概念図。刺激としてG&Nタイプを提示したときの概念図である。調整法では被験者は知覚される奥行面と同一平面上に見えるようにキーボードを操作して外枠（プローブ）の位置を調節した。被験者がキーボードを押すと各刺激と外枠（プローブ）の網膜像差が変化し、刺激と外枠の相対的な奥行量が変化した。外枠の網膜像差は、1回のキー押しによって視角約1'ずつ変化した。プローブ刺激を矩形の枠にした理由は、予備観察の結果、ファントム面の知覚された位置と枠の位置とを一致させる課題が他の形態のプローブより容易であるためであった。図では便宜上外枠と刺激の色を変えているが、実際には同色であった。

教示されていた。

独立変数はG&Nタイプの線分幅（1.6mm, 1.8mm, 2.0mm）と観察距離（60cm, 80cm, 100cm, 120cm, 140cm）であった。被験者は合計75試行（3線分幅×5観察距離×5繰り返し）を行った。観察距離の呈示順序は被験者ごとにランダムであった。被験者は矯正視力を含む正常視力を有する6名であった。6名の被験者のうち、4名が実験の目的を知らないナイーブな被験者であった。

2.3.3 結果

各被験者についてそれぞれの下位条件における5回の試行の平均知覚奥行量を計算し、その値を分析の基本単位として、2要因（輻輳角と両眼非対応特徴の大きさ）の繰り返し分散分析を行った。その結果、2要因の主効果は統計的に有意〔輻輳角： $F(4, 20)=18.70, p<.001$ ；両眼非対応特徴の大きさ： $F(2, 10)=13.27, p<.005$]であった。また下位検定の結果、線分幅（両眼非対応特徴の大きさ）が1.6mmと1.8mmの間と1.6mmと2.0mmの間で平均知覚奥行量の差が有意であった〔それぞれ、 $t=2.92, p<.05$ ； $t=5.14, p<.001$ 〕。図10aは、輻輳角の関数として表された知覚奥行量のグループ平均値を示す。すべてのステレオグラムの知覚奥行量は輻輳角の非線形減少関数であった（表2参照）。輻輳角の主効果は平均値を結んだ曲線の勾配に表されており、両眼非対応特徴の大きさの主効果は平均値の相対の高さに表されている。また実験1と同様に平均知覚奥行量から有効輻輳角関数を求めた（図10b参照）。すべての条件において有効輻輳角関数は高い決定係数（ R^2 ）で線形増加関数となった（表1参照）。

2.3.4 考察

観察距離に対応して輻輳角が変化するとき、視覚系は輻輳または距離情報を用いてファントム立体視の奥行スケールリングを行っていると言える。ファントム立体視の知覚奥行量は、観察距離が一定の場合と同様に、輻輳角が小さい（距離が大きい）ほど、また両眼非対応特徴の大きさが大きいほど増加した。これは2要因（輻輳

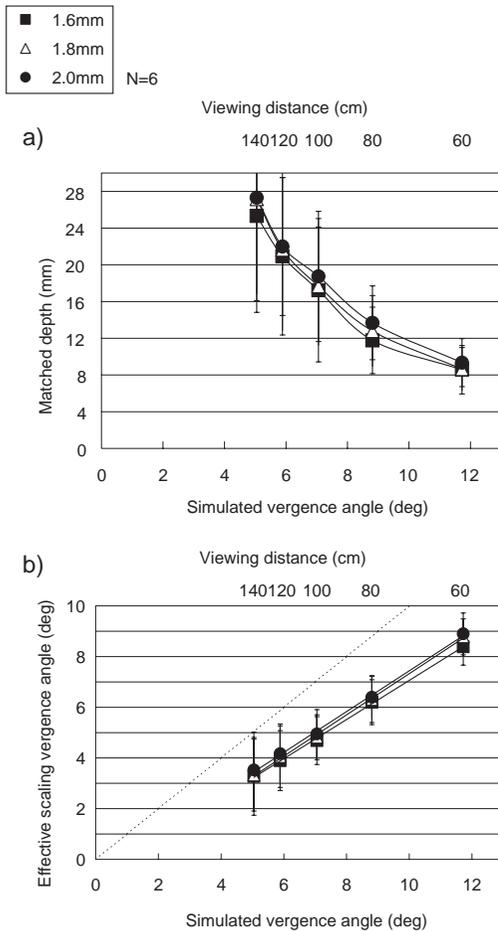


図10 実験3の結果。■は線分幅が1.6mm, △は線分幅が1.8mm, ●は線分幅が2.0mmを表す。a)は輻輳角の関数としてプロットした知覚奥行量である。b)は輻輳角の関数としてプロットした有効輻輳角である。点線は傾きが1の有効輻輳角関数である。誤差棒は標準誤差を表す。

角と両眼非対応特徴の大きさ)の分散分析の結果および図10aから明らかである。この処理過程は、両眼対応特徴に基づく立体視における輻輳情報と網膜像差を用いた奥行スケージングに酷似している。

ファントム立体視において輻輳と観察距離が共変したとき(実験3)の有効輻輳角関数の傾きが、観察距離一定で輻輳だけを変化させた場合(実験2)のそれよりもかなり大きくなった(表1参照)。この事実に基づいて、ファントム

立体視において輻輳または距離情報を用いた奥行スケージングには観察距離と輻輳距離の対応が必要であると言える。このことも両眼対応特徴に基づく立体視と共通した特徴である。さらにまた、ファントム立体視の奥行スケージングにおいて、視覚系が輻輳や調節などの奥行手がかりから得られる距離情報を用いていると結論できる。すなわち、両眼対応特徴と非対応特徴に基づく立体視が、輻輳または距離情報を用いた共通の奥行処理メカニズムをもつことが示唆される。

3. 全体的考察

両眼非対応特徴に基づく立体視を媒介する過程が“従来型の”両眼対応特徴に基づく立体視を媒介する過程と共通性をもつかどうかという問題の解明は、両眼非対応特徴に基づく立体視のメカニズムを理解するうえで非常に重要である。そのためには、それぞれの立体視の時間空間的特性を比較したり、順応法や相殺法を用いたりすることによって両システムの相互作用を調べる方法がある。本研究では、両眼非対応特徴に基づく立体視(ファントム立体視)の知覚奥行量に及ぼす輻輳、あるいは観察距離の効果を調べた実験結果に基づいて、両立体視が輻輳または距離情報を用いた共通の奥行処理メカニズムをもつと結論する。

両眼非対応特徴に基づく立体視と両眼対応特徴に基づく立体視が共通の奥行処理メカニズムをもつという結論は、Pianta and Gillam¹⁶⁾の結果からも支持される。Pianta and Gillam¹⁶⁾は、Gillam et al.⁸⁾が用いたステレオグラムを用いて交差順応法を用いた実験を行った。実験の結果、両眼対応特徴に基づく立体視と非対応特徴に基づく立体視のどちらに順応したときも、両眼対応特徴に基づく立体視の奥行量に同様の順応効果を与えたことから、両立体視は奥行スケージングの初期段階において共通のメカニズムに基づいていると結論した。

一方、Gillam, Cook and Blackburn¹⁷⁾は、両眼非対応特徴が量的な奥行を生み出さないこと

を報告している。Gillam et al.¹⁷⁾ はダ・ヴィンチ立体視の刺激条件¹²⁾ 下において、両眼非対応特徴である線分を両眼対応特徴である遮蔽面の縁（垂直線）と両眼融合することができない円図形に変えた場合、知覚奥行量が遮蔽面と円図形間の距離に依存しないことを見いだした。この結果は、本研究の結果や Pianta and Gillam¹⁶⁾ の結果とは異なり、両眼非対応特徴に基づく立体視が両眼対応特徴に基づく立体視とは異なる奥行処理過程を含んでいることを示している。しかし、Gillam et al.¹⁷⁾ は、ダ・ヴィンチ立体視では両眼非対応特徴が奥行をもって知覚される点がファントム立体視とは異なることを指摘している。

本実験の結果から、ファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視の両方において、“知覚奥行量が輻輳角の非線形減少関数であること”，および“輻輳または距離情報を用いた奥行スケージングには観察距離と輻輳距離の対応が必要であること”が示された。これらの結果からファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視の両方において、輻輳または距離の情報をういた奥行スケージングが共通に存在していると結論できる。さらに、両眼非対応特徴の大きさと網膜像差がファントム立体視と両眼対応特徴に基づく立体視のそれぞれに及ぼす効果が類似していることも明らかとなった。以上のことから、視覚系は両眼非対応特徴の大きさが入力されたとき、その大きさを網膜像差と等価な情報として扱い、輻輳または距離情報を用いて両眼対応特徴に基づく立体視と同様な奥行スケージングを行っていることが示唆される。

謝 辞 統計的分析については九州大学大学院人間環境学研究院の中村知靖先生，論文については九州大学大学院人間環境学府の光藤宏行氏，河邊隆寛氏，Md. Kamal Uddin 氏，および査読者に有意義なコメントをいただきました。深く感謝いたします。

文 献

- 1) M. F. Bradshaw, A. Glennerster and B. J. Rogers: The effect of display size on disparity scaling from differential perspective and vergence cues. *Vision Research*, **36**, 1255–1264, 1996.
- 2) T. S. Collett and A. J. Parker: Depth constancy. *V. Walsh and J. Kulikowsky (eds): Perceptual constancy: why things look as they do*. Cambridge University Press, 1998.
- 3) 東 巧, 中溝幸夫: 輻輳と網膜像差と知覚された奥行量の関係. *VISION*, **8**, 87–95, 1996.
- 4) I. P. Howard and B. J. Rogers: *Seeing in Depth v. 2. Depth Perception*, I Porteous, Toronto, 119–122, 2002.
- 5) 中溝幸夫, 下野孝一: 視覚系による絶対距離情報を用いた奥行のスケージング. *VISION*, **13**, 163–180, 2001.
- 6) H. Ono and J. Comerford: Stereoscopic depth constancy. *W. Epstein (ed): Stability and constancy in visual perception: mechanisms and processes*. Wiley-Interscience Publication, New York, 1977.
- 7) B. L. Anderson and K. Nakayama: Toward a general theory of stereopsis: Binocular matching, occluding contours, and fusion. *Psychological Review*, **101**, 414–445, 1994.
- 8) B. Gillam, S. Blackburn and K. Nakayama: Stereopsis based on monocular gaps: Metrical encoding of depth and slant without matching contours. *Vision Research*, **39**, 493–502, 1999.
- 9) B. Gillam and K. Nakayama: Quantitative depth for a phantom surface can be based on cyclopean occlusion cues alone. *Vision Research*, **39**, 109–112, 1999.
- 10) P. M. Grove, B. Gillam and H. Ono: Content and context of monocular regions determine perceived depth in random dot, unpaired background and phantom stereograms. *Vision Research*, **42**, 1859–1870, 2002.
- 11) L. Liu, S. B. Stevenson and C. M. Schor: Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence. *Nature*, **367**,

66-69, 1994.

- 12) K. Nakayama and S. Shimojo: Da Vinci stereopsis: Depth and subjective occluding contours from unpaired image points. *Vision Research*, **30**, 1811-1825, 1990.
- 13) B. Gillam: Matching needed for stereopsis. *Nature*, **373**, 202-203, 1995.
- 14) L. Liu, S. B. Stevenson and C. M. Schor: Binocular matching of dissimilar features in phantom stereopsis. *Vision Research*, **37**, 633-644, 1997.
- 15) J. M. Foley: Binocular distance perception. *Psychological Review*, **87**, 411-434, 1980.
- 16) M. J. Pianta and B. J. Gillam: Paired and unpaired features can be equally effective in human depth perception. *Vision Research*, **43**, 1-6, 2003.
- 17) B. Gillam, M. Cook and S. Blackburn: Monocular discs in the occlusion zones of binocular surface do not have quantitative depth—a comparison with Panum's limiting case. *Perception*, **32**, 1009-1019, 2003.

付 録

付録 1

図 1 において,

$$\theta \doteq \frac{I}{D} \Leftrightarrow D \doteq \frac{I}{\theta}$$

$$\theta' \doteq \frac{I}{D-d} \Leftrightarrow D \doteq \frac{I}{\theta'} + d$$

$$D = \frac{I}{\theta} = \frac{I}{\theta'} + d$$

$$d = \frac{I}{\theta} - \frac{I}{\theta'} = \frac{I \times (\theta' - \theta)}{\theta \times \theta'}$$

ここで、網膜像差 $\delta = \theta' - \theta$ であり、 $\theta \times \theta' \doteq \theta^2$ の近似式を用いると、

$$d = \frac{I \times \delta}{\theta^2}$$

付録 2

図 11 において

$$\frac{d_1}{I} = \frac{D-d_1}{a+w} \Leftrightarrow d_1 = \frac{I \times D}{a+I+w}$$

$$\frac{d_2}{I} = \frac{D-d_2}{a} \Leftrightarrow d_2 = \frac{I \times D}{a+I}$$

ここで $d = d_2 - d_1$ であるから、偏光フィルタを用いたステレオスコープで刺激を呈示したときの最小奥行量が求まる。また輻輳角 θ は次のように表せる。

$$\tan(\theta) \doteq \frac{I}{d_2} \Leftrightarrow \theta \doteq \tan^{-1}\left(\frac{I}{d_2}\right)$$

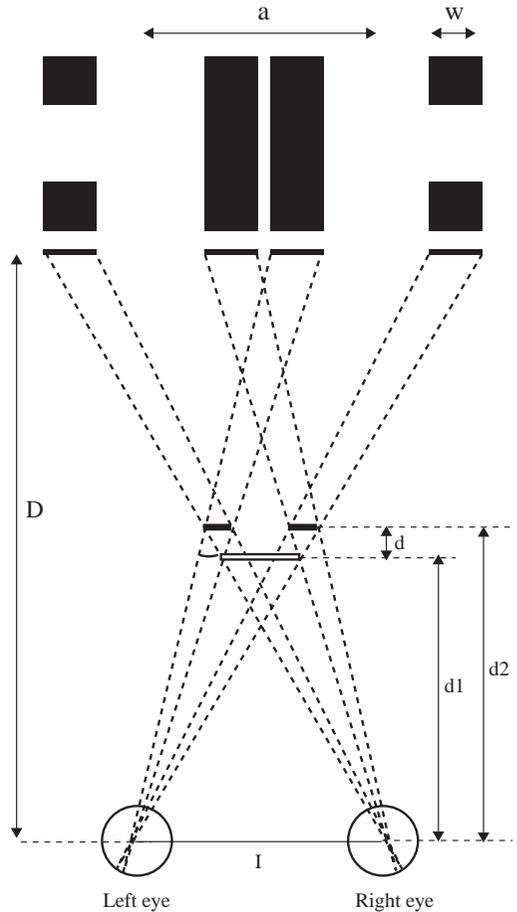


図 11 偏光フィルタを用いたときの幾何学的関係。上図の黒い四角形は幾何学的関係が分かりやすいように G&N タイプのステレオグラムを模式的に描いたものである。下図が上図のステレオグラムを融合させたときの像とその位置である。 θ : 輻輳角, 両眼距離: I , a : 刺激間距離, 線幅: w であり, 最小奥行量 d は $d_2 - d_1$ で求まる。