

ファントム立体視における 輻輳情報を用いた奥行のスケーリング

中溝幸夫

九州大学大学院 人間環境学

〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-19-1

1. はじめに

両眼視において視野内の不透明な事物はその背後に単眼だけにしか見えない視野領域を生み出す。この領域のことを単眼ゾーン(あるいは半遮蔽領域)と呼ぶ¹⁾。両眼網膜像差はもたないが単眼ゾーンをもつステレオグラム(以下、ファントム・ステレオグラム)が提示されると、視覚系は単眼ゾーンの幅に依存して一定の奥行をもつ“架空の”遮蔽面(ファントム面)を生成する(Gillam and Nakayama, 1999)²⁾。この種の立体視を“ファントム立体視”と呼び、両眼網膜像差にもとづく“在来型の”立体視(conventional stereopsis, 以下、網膜像差立体視)と区別する。

ファントム立体視をはじめて報告したのは、Liu, Stevenson, and Schor (1994)³⁾であった。彼らは、図1 aに示すようなステレオグラムを両眼に提示すると、黒い矩形面を背景にして白い矩形面が浮き出て(あるいは奥に引っ込んで)知覚されることを示した。このステレオグラムは、両眼で非対応の関係にある垂直方向の輪郭線(つまり、両眼網膜像差)をもたないが、単眼ゾーン(上下の黒い矩形をつなぐ垂直線分)をもっているため、単眼ゾーンのみにもとづいて立体視が成立するとLiu et al. は主張した。その後、Gillam (1995)⁴⁾は、Liu et al. のステレオグラムは水平方向輪郭線の相対的位置の差が網膜像差(length disparity)を生み出すので、Liu et al. の報告した立体視は網膜像差立体視と同種のものであると主張した。Liu et al. のステレオグ

ラムがもつ問題点を改良して純粹に単眼ゾーンだけによって立体視が起ることをはじめて示したのはGillam and Nakayama (1999)²⁾である。彼らは図1 bに示すような1本の黒色垂直線分と線分中央が欠如している1対のステレオグラムをダイコプティックに両眼提示することによってファントム立体視が成立することを示した。

網膜像差立体視では、視覚系による輻輳情報を用いた奥行のスケーリングを示す事実が報告されている。Bradshaw, et al. (1996)⁵⁾や東・中溝(1996)⁶⁾は、刺激サイズと観察距離を一定にした条件下で、輻輳角を変化させて知覚された奥行量を測定した。その結果、知覚された奥行量は輻輳角の増加にともない減少した。この種の奥行スケーリングは、視覚系による外界の空間構造のヴェリディカルな(veridical)復元に貢献する重要な機能の一つである(中溝・下野、

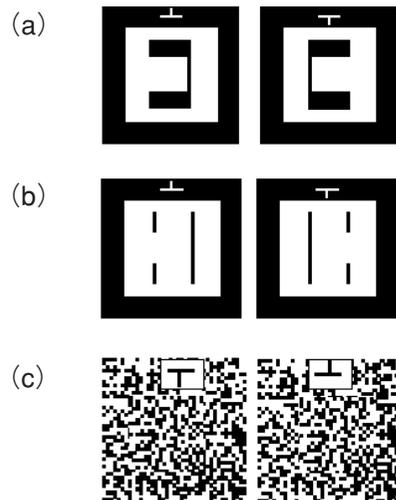


図1 実験に用いた3種類のステレオグラム。

2001)⁷⁾。ファントム立体視でも、網膜像差立体視と同様に輻輳情報を用いた奥行スケーリングが行われるだろうか。この問題の解明は、ファントム立体視を媒介するメカニズムの特性を理解する上で重要である。

本研究の主目的は、ファントム立体視において知覚されたファントム面の奥行き量と輻輳角の関係を調べることであった。実験1では、ファントム立体視と網膜像差立体視について輻輳角の関数として知覚された奥行き量を測定した。実験2では、ファントム立体視において単眼ゾーンの大きさおよび輻輳角の関数として知覚された奥行き量を測定した。

2. 実験1

実験1の目的は、Gillam and Nakayama²⁾のファントム・ステレオグラムを用いて、刺激サイズや観察距離を一定に保ち、知覚された奥行き量を輻輳の関数として測定し、網膜像差をもつランダムドットステレオグラムやLiu et al. タイプのステレオグラムを用いた結果と比較することであった。

2.1 方法

2.1.1 刺激と装置

3種類のステレオグラムが用いられた(図1参照)。(a)は、Liu et al. のステレオグラム、(b)はGillam and Nakayamaのファントム・ステレオグラム、(c)はランダムドットステレオグラムである。(a)は、横幅12 mm 縦5 mmの矩形2つを横幅1 mm 長さ10 mmの細い黒色線分をつないだ図形であった。(b)は、横幅1 mm 長さ20 mmの黒色線分とその中央9 mmが欠如した線分からなっていた。(a)と(b)のステレオグラムは、幅6 mm、横40 mm×縦40 mmの正方形の枠の中に図形が描かれていた。枠の上部に白色のノニウス線分が描かれていた。ランダムドットステレオグラムは、東・中溝(1996)が用いたものと同じステレオグラムで、上部にノニウス線分をもち、16'の交差性網膜像差をもっていった。これらのステレオグラムは、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

れた。本装置は観察距離一定で輻輳角をほぼ1°の精度で連続的に変化させることができる。

2.1.2 手続き

被験者は、頭部をチンレストで半固定して、ハプロスコープの接眼レンズ(6.5ジオプターの凸レンズ)を通してステレオグラムを観察した。観察距離は15cmであった。被験者の課題は、それぞれのステレオグラムについて観察された見かけの奥行き量をノギスを用いて再生することであった。全部で5水準の輻輳角が用いられた(4, 8, 12, 16, 20°)。1つのステレオグラムについて、5種の輻輳角がそれぞれ2回ずつランダムな順序で提示された。ステレオグラムの提示順序は被験者間で変えられた。各被験者は合計30試行(5輻輳角×2繰り返し×3ステレオグラム)を行った。

2.1.3 被験者

10名の被験者が実験に参加した。著者を含む3名以外の被験者はナイーブな観察者であった。

2.2 結果と考察

各被験者について、各下位条件の2回の試行の平均値を分析の基本単位とした。図2は、それぞれのステレオグラム別に再生された奥行き量について10名の被験者の平均値を輻輳角の関数としてプロットしたものである。(ファントム・ステレオグラムについては、3名の被験者だけは奥行を知覚することができなかったの以下の分析から省かれた。)3種類のステレオグラムのすべてについて奥行が知覚できた7名の被験者それぞれについて、輻輳角4°条件の平均奥行

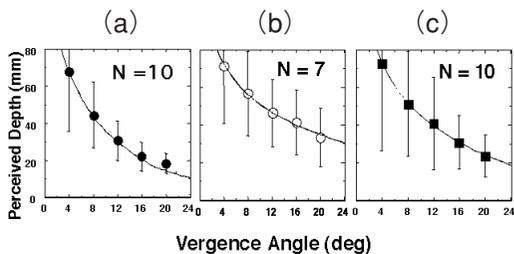


図2 それぞれのステレオグラムについて、輻輳角の関数としてプロットされた知覚された奥行き量のグループ平均。(a)はRDSのステレオグラム、(b)はファントムステレオグラム、(c)はLiu et al. のステレオグラム。

量を基準にして、他の全ての輻輳角条件の奥行量を比率に変換した。変換された奥行比率について、2要因繰返し分散分析(5輻輳角×3ステレオグラム)を行った結果、輻輳角とステレオグラムの種類の主効果が統計的に有意であった[輻輳角: $F(4, 24) = 139.628, p < .001$; ステレオグラムの種類: $F(2, 12) = 4.015, p < .05$] 交互作用効果も有意であった [$F(8, 48) = 2.289, p < .05$]。下位分析の結果、ファントム・ステレオグラムとランダムドット・ステレオグラムの間で比率の平均値間に有意差が得られた [$t(2) = 2.834, p = 0.0151$]。輻輳角の主効果は、図2において各ステレオグラム別の平均値にあてはめた曲線の勾配に表されており、またステレオグラム間の平均比率の差は図3の平均値を結んだ曲線の相対の高さに表されている。ランダムドットステレオグラムの結果は、Bradshaw, et al. (1996)³⁾ および東・中溝 (1996)⁴⁾ の結果を確認した。

3. 実験2

実験2の目的は、線分幅を3段階に変えたファントム・ステレオグラムを用いて、刺激サイズや観察距離を一定に保ち知覚された奥行量を輻輳角の関数として測定することであった。

3.1 方法

実験方法は刺激として用いたステレオグラムの外は実験1と同じであった。Gillam and Nakayamaのステレオグラムが用いられた。線分

幅は、1.00, 0.7, 0.4 mmの3種類であった。それぞれのステレオグラムについて5種類の輻輳角がランダムな順序で提示された。各被験者は、合計(5輻輳角×2繰返し×3ステレオグラム)30試行を行った。著者を含む5名の被験者が実験に参加した。

3.2 結果と考察

実験1と同様に各被験者について、各下位条件の2回の試行の平均値を以下の分析の基本単位とした。2要因繰返し分散分析(5輻輳角×3線分幅)の結果、2つの要因の主効果は統計的に有意であった[輻輳角: $F(4, 16) = 12.959, p < .005$; 線分幅: $F(2, 8) = 11.251, p < .001$]。図4は、知覚された奥行量について5名の被験者の平均値を輻輳角の関数としてプロットしたものである。輻輳角の主効果は各平均値を結ぶ曲線の勾配に表されており、線分幅の主効果はそれぞれの曲線の相対の高さに表されている。下位検定の結果、線分幅1 mmの知覚された平均奥行量と線分幅0.7 mm および0.4 mmのそれとの間に統計的有意差が得られた[それぞれ $t = 2.758, p < .024, t = 4.721, p < .001$]。

実験2の結果は、ファントム立体視において輻輳角が増加するとともに知覚された奥行量が減少するという実験1の結果を確認するとともに、線分幅が増加すると、ファントム面の知覚された奥行量も増加することがわかった。後者の結果は、Gillam and Nakayama (1999)²⁾ の結果を確認した。彼らは線分幅を0.225 mm から

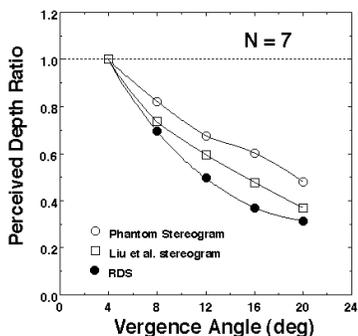


図3 輻輳角4°の平均値を用いて標準化された3種のステレオグラムの知覚された奥行量の平均比率。

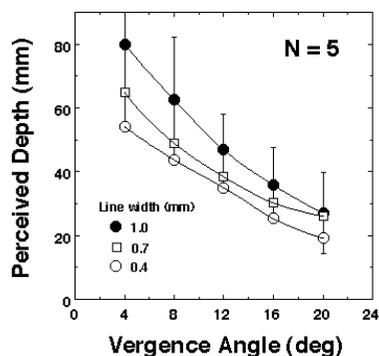


図4 線分幅の異なる3種のファントム・ステレオグラムについて、輻輳角の関数としてプロットされた知覚された奥行量のグループ平均。

1.125 mm の間で変化させ、ファントム面とプローブ刺激の見かけの奥行を一致させるという方法を用いて、知覚された奥行量を測定した。その結果、線分幅の増加にともなって知覚された奥行量もほぼ単調に増加するという結果を得た。

4. 結論

2つの実験の結果は、ファントム立体視における知覚された奥行量が輻輳角の増加にともなって非線形的に減少することを示した。この減少関数は、網膜像差立体視の場合の非線形関数とひじょうによく類似していた。これらの結果から、視覚系はファントム立体視において知覚されたファントム遮蔽面の奥行を輻輳情報を用いてスケーリングしていると結論することができる。

文 献

- 1) I. P. Howard and B. J. Rogers: Seeing in depth. Vol. 2: Depth perception. I. Porteous, Toronto, 2002.
- 2) 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.
- 3) L. Liu, S. B. Stevenson and C. M. Schor: Quantitative stereoscopic depth without binocular correspondence. *Nature*, **367**, 66-69, 1994.
- 4) B. Gillam: Matching needed for stereopsis. *Nature*, **373**, 202-203.
- 5) 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
- 6) 東 巧, 中溝幸夫: 輻輳と網膜像差と奥行の関係. *VISION*, **8**, 87-95, 1996.
- 7) 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リング. *VISION*, **13**, 163-180, 2001.

付録：ファントム立体視の幾何学

本研究で用いた Gillam and Nakayama (1999)²⁾ のステレオグラムによるファントム立体視において、ファントム面の奥行 (d) を幾何学的に表すことができる。図5は、dの最小値を表している。次式に示されるように、dは線分幅 (ω) と刺激の観察距離 (D) の関数である。

$$(1) \text{-----} d = \frac{\omega}{I + \omega} \times D$$

(1)式によると、ファントム面の知覚される奥行は、観察距離一定の場合、線分幅の増加に比例して増加することが予測される。Gillam and Nakayama (1999) や本研究の結果もこの予測をほぼ確認している。しかし、知覚された奥行の絶対量は、Gillam and Nakayama (1999) でも本研究でも(1)式の予測よりもかなり大きく、その理由については明らかではない。

一方、dと輻輳角 (θ) との関係は、次式で表される。

$$(2) \text{-----} d = \frac{I}{\theta_2} - \frac{I}{\theta_1} = \frac{I(\theta_1 - \theta_2)}{\theta_1 \times \theta_2} \cong \frac{I\alpha}{\theta^2}$$

(2)式によると、ファントム面の知覚される奥行は、線分幅が一定の場合、輻輳角の二乗に反比例することが予測される。本研究結果は、この予測をほぼ確認している。

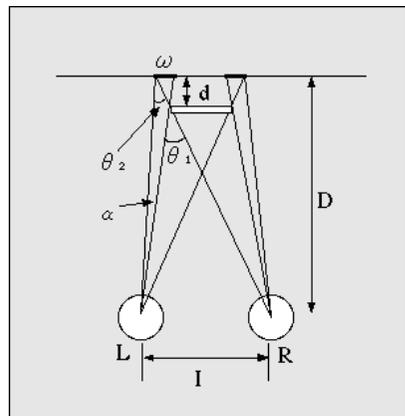


図5 刺激の観察距離 (D) と線分幅 (ω) とファントム面の奥行 (d) との関係を表す図 I は、両眼距離。