

## 両眼傾き対比の時空間特性

原田, 新也

<https://doi.org/10.15017/1931675>

---

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (心理学), 課程博士  
バージョン :  
権利関係 :



# 両眼傾き対比の時空間特性

原田 新也

## 概要

視覚系は、網膜において得られた光刺激の情報をもとに、外界の空間構造を推定している。現在、3次元空間の推定について広く受け入れられているのは、網膜像や網膜像以外から得られる複数の手がかりが、それぞれのモジュールで処理され、それらの出力が統合されて、最終的な空間認識に至るという考えである。奥行きに関する手がかりの代表的なものとして、両眼網膜像差や、遠近法手がかりが挙げられる。

加えて、空間知覚は、その対象物体が持つ手がかりのみでなく、周囲の空間的な文脈情報によっても影響を受けることが知られている。ステレオグラムの観察においては、両眼傾き対比または両眼奥行き対比という現象が知られている。これは、刺激内に両眼網膜像差を持たない、幾何学的には傾かないとされる刺激であっても、刺激内に相対的な像差を持つ刺激と同時に提示した場合に、傾いて知覚されるという現象である。この現象は、傾きの知覚が、判断対象である刺激内の手がかりのみでなく、周囲に存在する刺激の影響を受けることを示唆している。本稿は、この現象の生起メカニズムを検討することで、空間的

に離れた位置に存在する傾き知覚のための手がかりを、視覚系がどのように統合しているのかを明らかにすることを目的とした。

第2章においては、両眼傾き対比の生起メカニズムについて、Howard & Rogers (1995) が提唱した標準化理論に関する検討を行なった。Howard & Rogers (1995) は、標準化理論において、傾きの標準化と、相対的な傾きの保存という二つの段階に分けて両眼傾き対比の生起メカニズムを説明している。彼らは、傾きの標準化は局所的な効果であると述べているが、ステレオグラムの観察のみ行っており、正式な心理物理学的測定を行っていない。加えて、彼らのステレオグラムは、全体的な標準化の効果が弱く、局所的な標準化の効果が強くなるように誘導刺激が配置されていた。実験1においては、その問題を克服するため、ミュラー・リヤー錯視図形に類似したステレオグラムを用い、傾きの標準化が全体的な効果か、局所的な効果かを検討した。その結果、実験1では局所的な標準化が支持された。

実験2においては、実験1のステレオグラムにおける遠近法手がかりと、2次元的な長さの錯視の影響を検討するため、実験1のステレオグラムに改良を加えた平行条件、アンテナ条件、ピラミッド条件の3つを設定し、知覚される傾

き量を測定した。その結果、遠近法手がかりと2次元的な長さの錯視の影響はいずれも小さく、実験1と同様に局所的な標準化が支持された。

第3章においては、両眼傾き対比の生起メカニズムについてvan Ee, R, Banks,& Backus (1999) が提唱した傾き推定理論に関する検討を行なった。傾き推定理論において、傾きの標準化は、両眼性の手がかりと非両眼性手がかりの間の矛盾によって引き起こされると説明される。傾き推定理論を検証した先行研究では、1s以上の比較的長い刺激の提示時間を設定しているが、他の視覚的な対比現象の先行研究においては、提示時間が異なる場合、異なるメカニズムを含むことが提案されている。実験3においては、1s以下の比較的短い刺激の提示時間において、誘導刺激およびテスト刺激の知覚される傾き量を測定し、手がかり矛盾仮説が、短時間提示における両眼傾き対比を説明できるかを検証した。その結果、提示時間が短くなるほど、両眼傾き対比は減少した。加えて、誘導刺激の知覚される傾きよりも、テスト刺激の知覚される傾きの方が大きかった。この結果は、標準化理論、手がかり矛盾仮説の両方で説明できるものであった。

実験4では、テスト刺激の形状がドット2個である条件と、線遠近法手がかりを誘導刺激に付加した条件を設定し、手がかり矛盾仮説が短時間提示における両

眼傾き対比を説明できるかを検証した。その結果、誘導刺激に遠近法手がかりが付加されている場合に、知覚される誘導刺激の傾きが増加したにもかかわらず、両眼傾き対比はほぼ変化しなかった。この結果は、短時間提示における両眼傾き対比は、手がかり矛盾仮説によって説明できないことを示唆している。

実験4においては、誘導刺激を手がかり間の矛盾が大きいランダムドットステレオグラムに変更した。その結果、実験3、実験4の手がかり矛盾条件の結果がほぼ再現された。

第4章においては、第2章、第3章の実験結果をもとに、手がかり統合と標準化の仮説的モデルを提示した。このモデルは、初期から高次までの処理の流れの中で、手がかりの統合と標準化がどの段階で行われるかを説明するものである。本稿における研究は、視覚系の3次元空間の推定について新たな知見を加え、奥行き知覚メカニズム解明の一助となるものである。本研究は、VR空間等におけるよりリアルな3D体験を提供するための技術へと応用できる可能性がある。

## 第1章 序論

- 1.1. 3次元構造を推定する視覚情報処理 . . . . . 2
- 1.2. 両眼立体視と両眼網膜像差の種類 . . . . . 3
- 1.3. 遠近法手がかりと透視変換 . . . . . 7
- 1.4. 両眼傾き対比 . . . . . 9
- 1.5. 標準化仮説 . . . . . 12
- 1.6. 傾き推定理論 . . . . . 15
- 1.7. 時間的要因による傾き知覚の変化 . . . . . 18
- 1.8. 本研究の目的 . . . . . 20

## 第2章 局所的な標準化

- 2.1. 第2章の目的 . . . . . 22
- 2.2. 実験1 . . . . . 26
- 2.3. 実験2 . . . . . 38
- 2.4. 第2章の考察 . . . . . 46

## 第3章

- 3.1. 第3章の目的 . . . . . 53
- 3.2. 実験3 . . . . . 55
- 3.3. 実験4 . . . . . 66
- 3.4. 実験5 . . . . . 72
- 3.5. 第3章の考察 . . . . . 78

## 第4章 総合考察

- 4.1. はじめに . . . . . 88
- 4.2. 手がかり統合と標準化の仮説的モデル . . . . . 89
- 4.3. 奥行き知覚メカニズムの解明に向けて . . . . . 91
- 4.4. 応用可能性について . . . . . 91

引用文献 . . . . . 93

謝辞 . . . . . 99

# 第 1 章 序論

## 1.1. 3次元空間構造を推定する視覚情報処理

視覚系の目標は、物体の形状や位置、動きを認識し、知覚世界を作り出すことである。その第一段階として、視覚系は、外界からの光を眼球の瞳孔を通して受け取る。瞳孔を通過した光刺激は、水晶体、硝子体を通して、網膜の最奥部にある光受容細胞（錐体と桿体）において光から神経信号へと変換される。

この神経信号は、視神経を通り、脳の視床領域の一部である外側膝状体から第一次視覚野（V1）へと伝達され、さらに処理を経ることによって最終的な視空間の認識を形成するために用いられる。すなわち視覚系は、網膜において得られた光刺激の情報をもとに、外界の空間構造を推定していると言える。ここで問題になるのが、網膜像が2次元情報であるという点である。網膜像という2次元情報のみから3次元の空間構造を再構成することは何らかの制約条件なしには不可能である。さらに、視覚系は網膜像に含まれる情報のみではなく、網膜像以外から得られる様々な情報も利用し、外界の空間構造を推定しているのではないかと考えられる。

現在、3次元空間の推定について広く受け入れられているのは、網膜像や網膜像以外から得られる複数の手がかり（cue）が、それぞれのモジュールで処理さ

れ、それらの出力が統合されて、最終的な空間認識に至るという考えである（金子, 2007）。ここでの手がかり（cue）は、一般に奥行き手がかりと呼ばれ、大きく分けて2つに分類される。網膜像に基づいた情報である網膜像手がかり（retinal cue）と、網膜像以外から得られる情報である網膜外手がかり（extra-retinal cue）である。網膜像以外からの手がかりとして代表的なものは、水平輻輳や調節などが挙げられる。一方、網膜像手がかりは、両眼網膜像差、動きによる手がかり、絵画的手がかりの3つに分類される。以降では 網膜像手がかりである両眼網膜像差と絵画的手がかりについて詳しく述べる。

## 1.2. 両眼立体視と両眼網膜像差の種類

我々人間は、水平方向に約 6.5cm 離れて位置する 2 つの眼を持っている。そしてその 2 つの眼に投影される外界の像にはわずかな違いがある（金子, 2007）。この違いを利用して目の前の立体形状を認識する原理を両眼立体視と呼び、またその違いを両眼網膜像差あるいは両眼視差と呼ぶ。したがって、実際の立体を右眼で見て得られる投影像と左眼で見て得られる投影像をそれぞれの眼に提示できれば、人はもとの立体を見ているような錯覚にとらわれる。この方法で

人の眼に提示する右眼用の絵と左眼用の絵の対はステレオグラム (stereogram) と呼ばれる (杉原, 2006)。

両眼網膜像差は, その分布パターンの違いによって, いくつかの種類に分類されている。図 1 (a) においては, 一方の網膜像が, もう一方の網膜像に対して水平に移動している。このような網膜像差分布は変位網膜像差と呼ばれる。

また, 網膜像差量が位置によらず一定であるため, 0 次の網膜像差分布とも呼ばれている。この 0 次の網膜像差分布を持つステレオグラムは, 個々のドットが手前に飛び出しているように, あるいは奥に引っ込んでいるように知覚される。

また, 図 1 (b) においては, 一方の網膜像に対して, もう一方の網膜像が全体的に拡大 (縮小) している。このような分布は, 横軸を位置, 縦軸を網膜像差

量としてグラフを描いた場合, 網膜像差量が位置によって線形に変化しているため, 1 次の網膜像差分布と呼ばれる。この 1 次の網膜像差分布を持つステレオ

グラムは, 垂直軸周りの傾きを持つように知覚される。図 1 (b) における網膜像差は, 左右の網膜像の大きさ比によって定義することができる。この大きさ

比のことを水平大きさ比 (HSR) と呼ぶ。図 2 において,  $I$  を両眼間距離,  $D$  を

観察距離とした場合, この水平大きさ比 (HSR) と額面平行に対する面の傾き

角度 (S) は一般的に以下の式 (1) で表される (Howard & Kaneko,1999)。

$$\tan S = -\frac{2D(HSR-1)}{I(HSR+1)} \quad (1)$$

ここでは上から見て反時計回りの傾きを正とする。図1 (c) は、左側3列の網膜像差がゼロであり、右側の2列が1次の網膜像差分布を持っている。このような網膜像差分布は、網膜像差量が位置によって線形に変化しないため、高次 (2次以上) の網膜像差分布と呼ばれる。2次以上の網膜像差分布による傾き知覚は、0次または1次の網膜像差分布に比べ、傾きの知覚が安定するまでの時間が短くなることが知られている (Gillam, Chambers, & Russo, 1988; van Ee & Erkelens, 1996a)。また、刺激が0次または1次の網膜像差分布のみを持つ場合に比べ、2次以上の網膜像差分布を持つ場合には、知覚される傾き量が大きくなることが報告されている (van Ee & Erkelens, 1996a)。これらの報告は、0次または1次の網膜像差分布と比較して、視覚系が2次以上の網膜像差分布に対して高い感受性を持つことを示している。

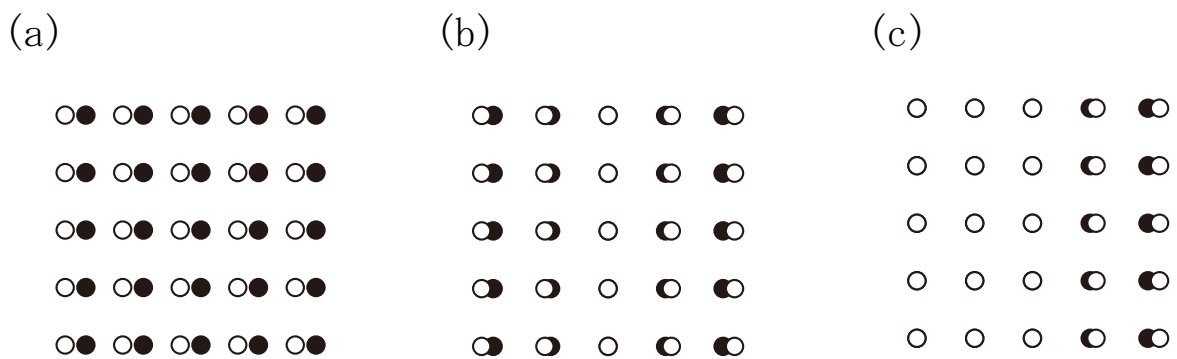


図1 網膜像差の種類。白丸は左眼像を，黒丸は右眼像を表す。(a)は0次の網膜像差分布を，(b)は1次の網膜像差分布を，(c)は2次の網膜像分布をそれぞれ示す。金子（2007）をもとに作成。

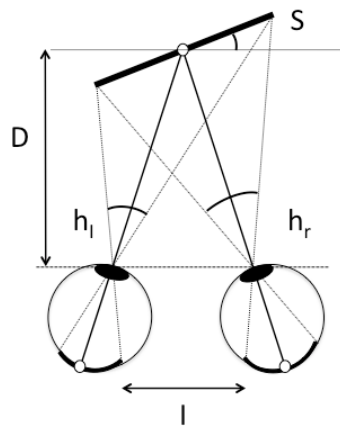


図2 水平大きさ比。金子（2007）をもとに作成。

### 1.3. 線遠近法手がかりと透視変換

前述した両眼網膜像差は、左右の網膜に投影される像の違いとして定義されるため、両眼性手がかりに分類される。一方で、単眼の網膜像のみから得られる奥行き手がかりも存在する。このような奥行き手がかりを単眼性手がかり、あるいは非両眼性手がかりと呼ぶ。単眼性の手がかりは、両眼で見ている場合にも有効である。非両眼性手がかりの代表的なものとして、前述した絵画的手がかりが挙げられる。絵画的手がかりとは、文字通り絵や写真など2次元平面上に表現できる空間知覚手がかりであり、画家やデザイナーたちによって絵画表現の際に用いられてきた手法と密接に関係している（金子，2007）。絵画的手がかりには陰影、大気遠近法、遮蔽、肌理の勾配など多くの種類が存在するが、ここでは線遠近法手がかりについて詳しく取り上げる。

前述したように、網膜像は2次元情報である。すなわち、外界の3次元空間を、2次元の平面に写し取ったものであると言える。この3次元空間を2次元情報へ写し取る手法を透視投影という。透視投影は、以下に示す透視変換という数学的処理によって再現することができる。図3において投影面の原点を $o$ 、投影面に垂直な線を $z$ 軸とする。投影面から距離 $f$ だけ離れたところに原点 $O$ をとり、投影

面上のx軸, y軸に平行にX軸, Y軸をとる。このXYZ座標系に対して投影面は $Z=f$ となる平面である。ここで, 空間中の点  $(X,Y,Z)$  は, この点と原点Oを結ぶ直線の投影面との交点に投影されるとする。その点を  $(x,y)$  とすると, 図3の幾何学的関係から, 以下の式 (2) によって求められる。

$$x = f \frac{X}{Z}, y = f \frac{Y}{Z} \quad (2)$$

この関係を3次元空間から2次元画像面への透視変換といい, 原点Oを視点とも呼ぶ(金谷, 1990)。この式から分かるように, 投影面上における点  $(x,y)$  は, 空間中の点  $(X,Y,Z)$  の位置や奥行きによって変化する。すなわち, 外界の3次元空間が2次元面である網膜像上に透視投影される際にも, 同様に距離や奥行きといった情報によって影響を受けていると言える。

刺激が垂直軸あるいは水平軸周りに傾きを持つ面である場合, 透視投影された網膜像の線分の角度は, 対象物体の傾きの情報を含むことになる。このような直線成分の形状は線遠近法的成分と呼ばれ, 対象の空間知覚に寄与していることが確かめられている (Alison & Howard, 2000)。

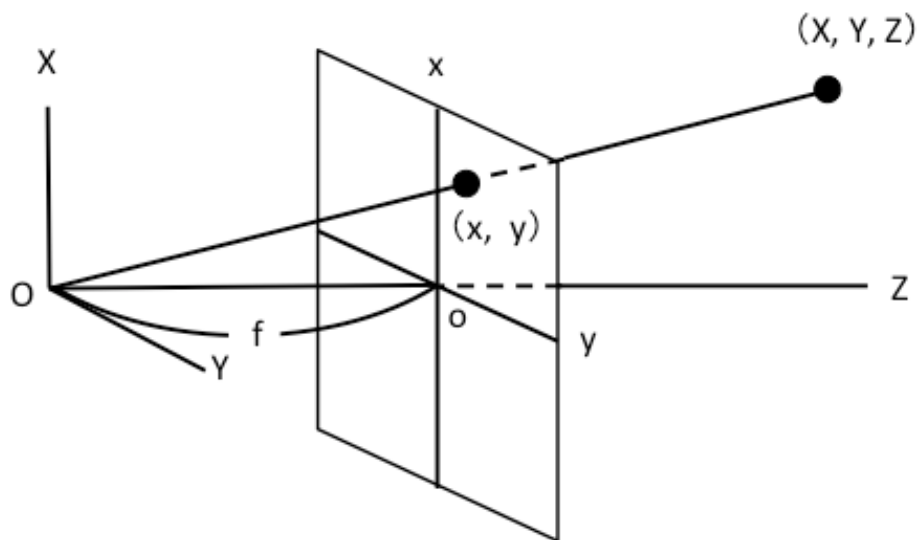


図3 透視変換。金谷（2009）をもとに作成。

#### 1.4. 両眼傾き対比

ここまで、視覚系が2次元情報である網膜像から外界の3次元空間を推定する際、その物体が持つどのような手がかりを用いているかを中心に述べてきた。しかし、空間知覚は、その対象物体が持つ手がかりのみでなく、周囲の空間的な文脈情報によっても影響を受けることが知られている。例えば、図4における中央の円形の領域に存在する線は物理的には垂直であるが、周囲の領域に存在する斜線の影響によって反時計回りに傾いて知覚される。この現象を方位の対比と呼ぶ。

ステレオグラムの観察においても、同様の現象が生じることが知られている (Howard & Rogers, 1995)。これは、刺激内に相対的な両眼網膜像差を持たない、幾何学的には傾かないとされる刺激（一般にテスト刺激と呼ばれる）であっても、刺激内に相対的な像差を持つ刺激（一般に誘導刺激と呼ばれる）と同時に提示した場合に、傾いて知覚されるという現象である。具体的には、図5のような刺激を提示した場合、白い面（テスト刺激）が黒い面（誘導刺激）と逆方向、すなわち対比方向に傾いて知覚される。この現象を両眼傾き対比または両眼奥行き対比といい、線分を配置したパターンや、ランダムドットのテクスチャを持つ面など、様々な形状をもつ刺激において確認されている (Gillam, Blackburn, & Brooks, 2007; Kumar & Glaser, 1993; Pastore, 1964; Sato & Howard, 2001; Sato, 2004; van Ee & Erkelens, 1996b; van Ee, R, Banks, & Backus, 1999; van der Kooij and Te Pas, 2009; van der Kooij and Te Pas, 2010; Werner, 1938)。この現象は、傾きの知覚が、判断対象である刺激内の手がかりのみでなく、周囲に存在する刺激の影響を受けることを示唆している。したがって、この現象の生起メカニズムを検討することで、空間的に離れた位置に存在する傾き知覚のための手がかりを、視覚系がどのように統合しているのかを明らかにすることが可能である。



図 4 方位の対比。 Schwartz, Hsu, & Dayan (2009) をもとに作成。



図 5 両眼傾き対比。平行法で融合すると，外側の黒い図形（誘導図形）の左側部分が手前に傾いて知覚される。内側の白い図形（テスト刺激）は，外側の図形とは逆方向，すなわち右側部分が手前に傾いて知覚される。

## 1.5. 標準化仮説

Howard & Rogers (1995) は、両眼傾き対比について、絶対的な網膜像差に対する感受性の低さと、刺激間の相対的な網膜像差に対する感受性の高さが要因ではないかと提案している。この場合の絶対的な網膜像差とは誘導刺激、テスト刺激それぞれが持つ網膜像差に相当し、また相対的な網膜像差とは誘導刺激とテスト刺激の間の相対的な網膜像差に相当する。Howard & Rogers (1995) は、この考えに基づいて、両眼傾き対比のメカニズムを標準化仮説としてまとめている。

標準化仮説では、3つの段階を仮定している。第1の段階として、0次の網膜像差分布が検出される段階が挙げられる。第2の段階は、1次の網膜像差分布を検出する段階である。この段階では、第1の段階において検出された0次の網膜像差の出力の違いが、局所的な網膜像差勾配検出器によって検出される。垂直軸周りにおいて作用する像差勾配検出器は、水平軸周りの傾きを出力するせん断像差を、水平軸周りに作用する像差勾配検出器は、垂直軸まわりの傾きを出力する水平大きさ像差をそれぞれ検出する。ここまでの段階において検出される0次または1次の網膜像差が、絶対的な網膜像差として定義される。第3

の段階は、高次の網膜像差分布を検出する段階である。この段階では、第 2 の段階における像差勾配検出器の出力の違いが、2 次微分検出器によって検出される。この 2 次微分検出器はその他の検出器よりもより広い領域において作用する。この段階において検出される高次の網膜像差が、刺激間の相対的な網膜像差として定義される。このように、Howard & Rogers (1995) は、網膜像差検出器が階層構造を持つと仮定している。

加えて彼らは、通常、絶対的な傾き（0 次あるいは 1 次の網膜像差分布による傾き）は、前額平行面に標準化される傾向にあると仮定している。すなわち、絶対的な網膜像差のみを与えた刺激（誘導刺激）における傾きは、幾何学的予測よりも過小評価される傾向にある（Howard & Kaneko, 1994; van Ee & Erkelens, 1996a）。この現象は、絶対的な網膜像差が、傾きの推定において軽視されるために起きると彼らは主張している。

最後に、絶対的な網膜像差とは異なり、2 次微分検出器によって検出される相対的な網膜像差（高次の網膜像差分布）は、傾きの推定において軽視されることはないと仮定している（Gillam et al., 1988; van Ee & Erkelens, 1996a）。すなわち、傾きが標準化される際に、隣接している両眼網膜像差を与えていない刺

激（テスト刺激）との間の相対的な網膜像差は保存されるが，誘導刺激の絶対的な網膜像差は軽視される。よって，誘導刺激の標準化とは反対の方向の傾きがテスト刺激に付加されることになる。

以上が Howard & Rogers (1995) によって提案された標準化仮説である。Howard & Rogers (1995, 2012) はさらに，図 6 のような図形を用いて，標準化が局所的な効果であると述べている。図 6 のステレオグラムは，網膜像差を持たない水平な直線（テスト刺激）と，その直線を囲む二つの四角形で構成されており，二つの四角形はそれぞれ大きさと，垂直軸周りの傾きが異なっている。Howard & Rogers (1995, 2012) の観察によれば，外側の四角形に比べ，内側の四角形はテスト刺激の知覚される傾きにより大きな影響を与えており，この観察から彼らは，標準化は刺激全体の奥行きを考慮した全体的な作用ではなく，刺激の一部のみの奥行きを考慮した，局所的な効果であると主張している。しかし，Howard & Rogers (1995, 2012) はこれらの図形について実験的に知覚される傾きを測定したわけではなく，これらの図形の観察のみを論拠としており，標準化が局所的な効果であると結論づけるのは早計であると考えられる。

標準化仮説については，視覚系がどのようにして絶対的な情報（0 次あるいは

1 次（一次）の網膜像差）と相対的な情報（高次（高次）の網膜像差）を統合しているか明らかではないという批判も存在する（van der Kooji et al., 2011）。加えて、相対的な網膜像差は絶対的な網膜像差をもとに検出されているにも関わらず、刺激間の相対的な傾きの情報が重視され、絶対的な傾きの情報が軽視される理由も明確ではない。

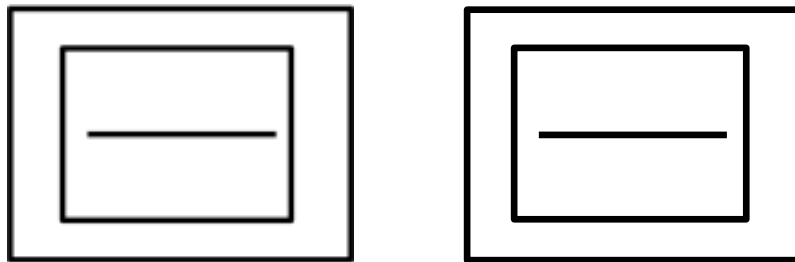


図 6 Howard & Rogers (1995, 2012) のステレオグラム。平行法で融合すると、外側の四角形の右側部分が手前に傾いて知覚される。一方で、内側の四角形は左側部分が手前に傾いて知覚される。

## 1.6. 傾き推定理論

van Ee et al. (1999) は、それまで提案されてきた両眼傾き対比の生起メカニズムについての理論について、以下の 2 つの現象的側面を説明するものだとま

とめている。第一の現象的側面は誘導刺激の傾きの過小評価であり、第二の現象的側面はテスト刺激の誘導された傾きである。Howard & Rogers (1995) は、誘導刺激の傾きの過小評価について、絶対的な像差 (0 次あるいは 1 次の網膜像差分布) に対する感受性の低さを原因だとしたが、van Ee et al. (1999) は全く異なる側面からの説明を試みている。彼らは、非両眼性の手がかりと両眼性の手がかりの矛盾が、誘導刺激の傾きの過小評価を引き起こしているのではないかと指摘した。この考えに基づき、彼らは両眼傾き対比の生起メカニズムについての理論をまとめている。本稿においては、彼らの理論を傾き推定理論と呼び、傾き推定理論から両眼傾き対比を予測する場合の仮説を、手がかり矛盾仮説と呼ぶこととする。以下において、その概要を簡潔に述べる。

図 7 では、上段左のパネルはテスト刺激における傾きの評価を、上段中央のパネルは誘導刺激における傾きの評価を、上段右は、相対的な像差勾配から得られる、誘導刺激とテスト刺激の間の相対的な傾きの評価を表している。各パネルにおける黒の破線は両眼性の手がかりを、灰色の破線は非両眼性の手がかりを、黒の実線は単眼性の手がかりと両眼性の手がかりが統合された結果である傾きの評価を表している。上段中央のパネルにおいて、非両眼性の手がかり

と両眼性の手がかりは異なる傾きを示している。矛盾したこれら2つの傾きが統合された結果、上段中央の黒の実線が示すような、誘導刺激の傾きの過小評価が起きると van Ee et al. (1999) は結論づけている。

さらに彼らは、誘導刺激における非両眼性の手がかりと両眼性の手がかりに矛盾がない刺激を用いた場合、両眼傾き対比が生起するのかを検討している。結果として、非両眼性の手がかりと両眼性の手がかりに矛盾がある場合に比べ、矛盾が無い場合に両眼傾き対比は減少することを見いだした。

van Ee et al. (1999) が提唱したこの傾き推定理論は、両眼傾き対比が、重視する手がかりの個人差に依存するという発見によって支持されている (Sato & Howard, 2001)。具体的には、観察者が両眼性の手がかりを重視する特性を持つ場合に比べ、非両眼性の手がかりを重視する特性を持つ場合には、両眼傾き対比が増加することが報告されている (Sato & Howard, 2001)。

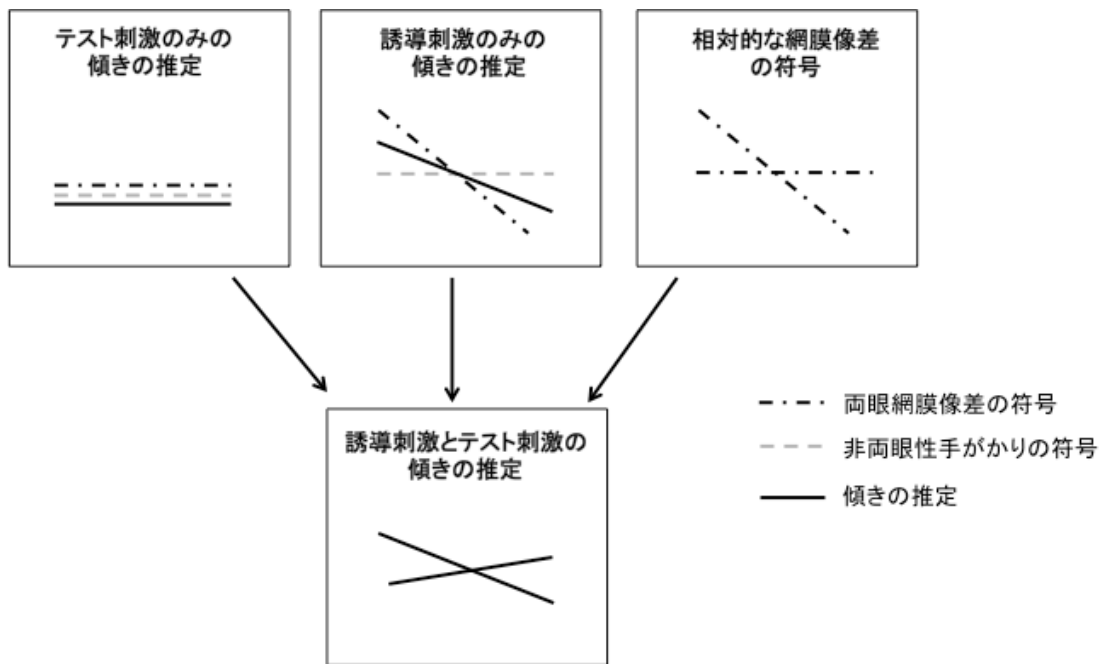


図7 手がかり統合理論の図。van Ee et al. (1999) をもとに作成。

### 1.7. 時間的要因による知覚される傾きの変化

ここまで、両眼傾き対比現象についての先行研究と、提唱された生起メカニズムに関する理論を述べてきた。前述したように、両眼傾き対比は、周囲の空間的な文脈情報が傾き知覚を変化させるという現象の一例である。しかし、傾き知覚は、時間的な要因によっても変化することが知られている。Ogle & Weil (1958) は、提示時間が増加するにつれて、相対的な網膜像差の検出閾値が減少することを明らかにしている。傾きの知覚についても、同様に時間特性に関

する研究がなされている。例えば、1次の網膜像差分布によって知覚される傾きは、提示時間の増加に伴って増加していくことが明らかになっている (Alison & Howard, 2000; van Ee & Erkelens, 1996a)。加えて、前述したように、1次の網膜像差分布に比べ、高次の網膜像差分布による傾きは、知覚が安定するまでの時間が短いことが知られている (Gillam et al., 1988; van Ee & Erkelens, 1996a)。

このような時間的要因に関する研究は、網膜像差を検出し、3次元知覚を作り出すメカニズムを推定する上で重要である。例えば、Ogle & Weil (1958)の研究からは、提示時間に伴い信号の加算が起こり、奥行き検出の精度が上昇するという特性を持つ単一の検出メカニズム、あるいは検出精度の異なる複数のメカニズムの存在が示唆される (塩入, 2000)。

両眼傾き対比現象においても、時間的な要因の影響が検討されている。Kumar & Glaser (1993) は図8のような刺激を用い、提示時間の変化が両眼傾き対比に与える影響を検討している。その結果、提示時間が増加するに伴って、両眼傾き対比は減少することを報告している。一方で、Kumar & Glaser (1993) は誘導刺激の傾きを測定していない。誘導刺激とテスト刺激の間の相対的な傾きにつ

いて検討するためには、誘導刺激とテスト刺激両方の知覚される傾きを測定する必要があると考えられる。

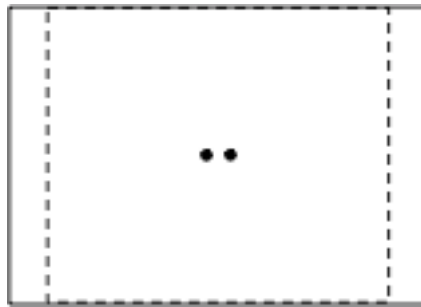


図8 Kumar & Glaser (1993) をもとに作成したステレオグラム。点線は右眼用に提示された図形を、実線は左眼に提示された図形を模式的に表している。外側の四角形が1次の網膜像差分を持つ誘導刺激であり、内側の2つのドットがテスト刺激である。

### 1.8. 本研究の目的

本稿の第2章では、Howard & Rogers (1995) が提案した奥行きの標準化について、線分で構成された刺激を用いることで、全体的な効果であるのか局所的な効果であるのかを検討する。第3章では、短時間提示において誘導刺激における手がかり間の矛盾が減少するときに、両眼傾き対比も減少するという手がかり矛盾仮説による予測を検証する。第4章では、第2章と第3章における検証をもとに奥行き標準化と手がかり統合についてのモデルを提案する。

## 第 2 章 局所的な標準化

## 2.1. 第2章の目的

前述したように、奥行き対比現象について説明するため、Howard & Rogers (1995, 2012) は標準化仮説を提唱している。この仮説によれば、立体的な対象の奥行きは知覚的に前額平行面へ標準化される傾向があるが、一方で、刺激間の相対的な奥行きは保存される。彼らは、標準化は刺激全体の奥行きを考慮した全体的な作用ではなく、刺激の一部のみの奥行きを考慮した、局所的な作用であると主張している。

一方で、近年、van der Kooij & te Pas (2010) は、心理物理学的に局所的な標準化仮説を検討している。彼女らのランダムドットステレオグラムにおいて、蝶番のような形状をしたテスト面は、異なる蝶番の角度を持つ10個の誘導刺激によって囲まれていた。彼女らは、テスト面の知覚される傾きを測定し、その傾きは隣接する2つの誘導刺激ではなく、10個の誘導刺激全ての平均的な傾きの影響を受けることを明らかにした。この結果から彼女らは、奥行き対比が誘導刺激の傾きを平均する全体的な効果であると主張している。

これらの研究を考慮すると、いまだに標準化が奥行き対比にどのように関わっているのかは明らかではない。先行研究では、以下の3つの理由から、この

問題について決定的な回答は得られていないと考えられる。第一に，Howard & Rogers (1995) は彼らの考えについて，正式な心理物理学的測定を行っていない。第二に，Howard & Rogers (1995) が提案したステレオグラムにおいて，外側の四角形は内側の四角形よりも，網膜像上においてテスト刺激から離れており，全体的な標準化の効果が比較的弱く，局所的な標準化の効果が支配的であった可能性がある。実際に，van Ee & Erkelens (1996b) はテスト刺激と誘導刺激間の距離が増加するにつれて，奥行き対比が減少することを明らかにしている。第三に，van der Kooij & te Pas (2010) のステレオグラムにおいては，網膜像差と遠近法手がかりの間の大きな矛盾が存在した可能性がある。網膜像差は，傾きがゼロではなく，かなり大きな量を持つことを示していた（視線と直角をなす面に対して，最大  $60^\circ$  の傾き）。その一方で，ランダムドット面は均一なドット密度であったため，遠近法手がかりは傾きがゼロであることを示している。奥行き対比は手がかり間の矛盾や標準化を含むいくつかの異なるメカニズムによって生起することが知られており，van der Kooij & te Pas (2010) では奥行きの標準化という問題について，決定的な結論を得られていないと考えられる。

本章の実験では、垂直線であるテスト刺激と、テスト刺激の両方の端点に接する短い誘導刺激によって構成されたステレオグラムを使うことで、手がかり間の矛盾ではなく、奥行き標準化の問題に焦点を当てる。Howard & Rogers (1995) が提案した『二重四角形』ステレオグラムにおいて、外側の四角形とテスト刺激の間の網膜上の距離は、内側の四角形とテスト刺激の間の距離よりも大きかった。本実験の刺激においては、テスト刺激と誘導刺激の間の網膜上の距離を統制するため、異なる誘導刺激をテスト刺激から等しい位置に置いた。図 9 の (a), (b) に示したように、片眼に提示される像はよく知られているミュラー・リヤーに類似している（しかし、長さの知覚的な効果は、本実験において重要ではない）。誘導刺激は、上部の誘導刺激と下部の誘導刺激において異なる符号を持つ交差あるいは非交差像差を持っており、刺激全体の傾きが特定の方向に偏っていた（図 10 の 1 列目において点線で示している）。全体的な標準化の効果統制することを目的として、全ての誘導刺激に対して、条件間で同じ量の相対的な網膜像差を加えた。さらに、網膜像差と遠近法手がかり間の矛盾を最小とするために、わずかな遠近法手がかりしか持たない、いくつかの線を配置した図形を刺激として用いた。二つの実験において、異なる局所的な

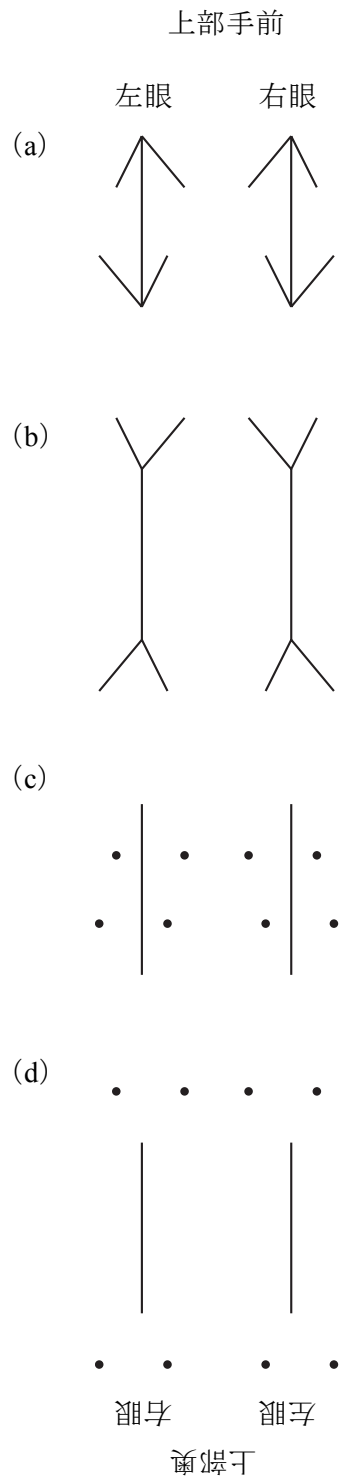


図9 実験1において使用したステレグラム

(a) 線内向図形, (b) 線外向図形, (c) 点内向図形, (d) 点外向図形。全てのパネルにおいて、非交差法による融合では、上部の誘導刺激が手前方向に知覚される。この図を上下逆方向にした場合、非交差法による融合では、上部の誘導刺激が奥方向に知覚される。網膜像差を持たない垂直線がテスト刺激であり、実験では観察者が傾きを調整した。

傾きによって奥行き対比が生み出されることを確認することによって、視覚系が奥行きを局所的に標準化することを明らかにしようと試みた。

## 2.2. 実験 1

### 2.2.1. 実験 1 の方法

実験1では、誘導刺激の形状（内向と外向，図9（a）と（b））と奥行き方向（上部手前と上部奥）を独立して変化させた。これらの形状が両眼奥行き対比を引き起こすかを確認するために、観察者にテスト刺激の水平軸周りの傾きを、主観的に垂直だと感じるまで調整してもらうように教示した。Van Ee et al. (1999) や Sato & Howard (2001) と同様に、キャンセル課題における調整量は、知覚されたテスト刺激の傾きを反映しているとみなした。

図 10 の上段は、テスト刺激が物理的に垂直である場合の、内向図形と外向図形を図示している。全体的な標準化仮説によれば、奥行き標準化は、内向図形と外向図形の両方において、テスト刺激の上部が奥になるような知覚を生み出す、上部手前の全体的な傾き（図 10 の上段の破線）において生じる（図 10 の中段）。それゆえ、もし視覚系が奥行きを全体的に標準化しているとすれば、

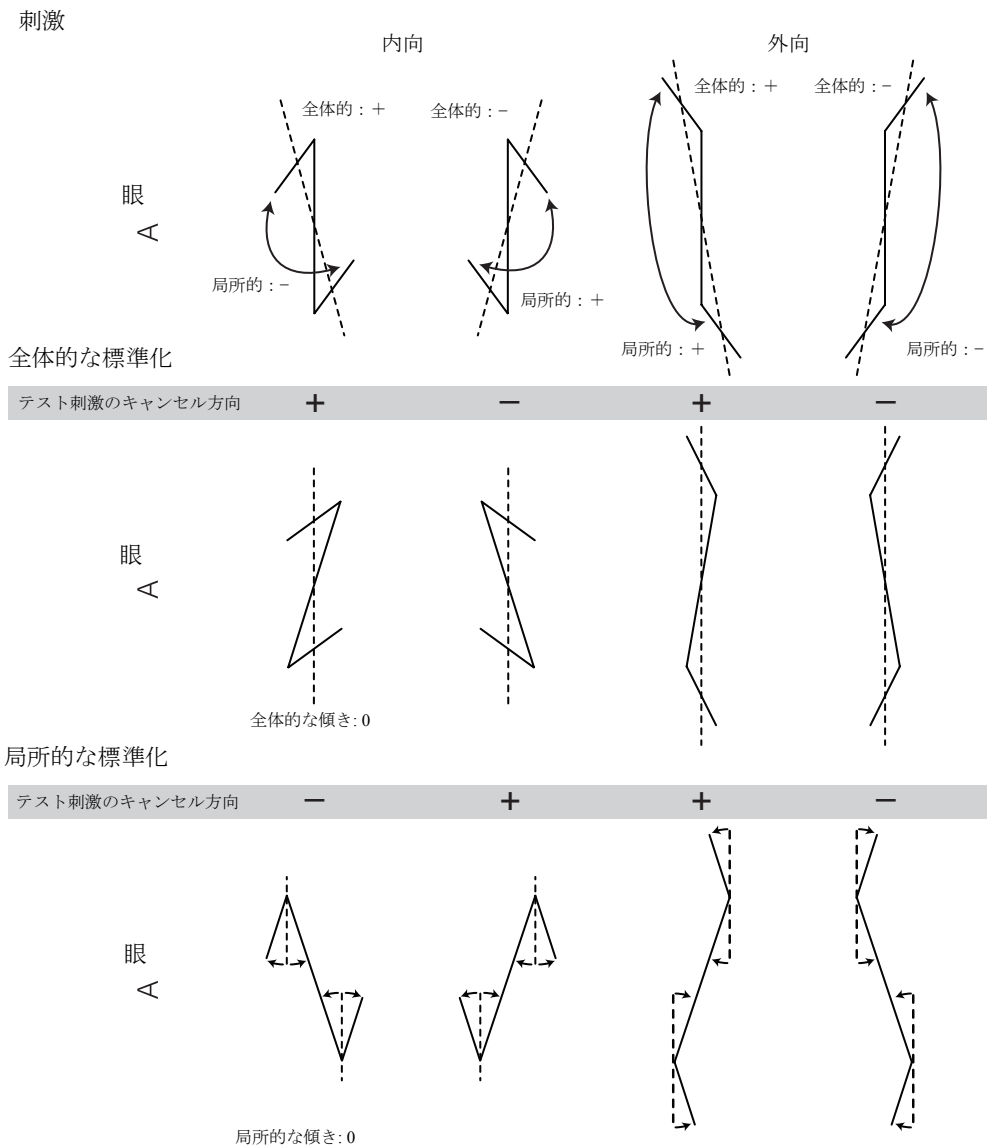


図 10 線刺激を横からみた場合の略図と、全体的あるいは局所的な標準化の結果

1 列目は、テスト刺激が物理的に垂直である場合（テスト刺激の傾きがゼロ）の 4 つの条件を示す。2 列目は、全体的な標準化が生じた場合の知覚的な解釈を示している（全体的な傾きがゼロ、破線）。3 列目は、局所的な標準化が生じた場合の知覚的な解釈を示している（局所的な傾きがゼロ、破線）。テスト刺激のキャンセル方向は+または-で示しており、それぞれ上部手前方向、上部奥方向に対応している。図示している傾きや距離は正寸ではなく、実際の刺激では調整中において一定を維持されることに注意が必要である。

誘導刺激の形状に関わらず、キャンセル課題による調整は、上部手前の誘導刺激に対して、上部手前に（逆もまた同様に）なるはずである。一方で、局所的な標準化仮説によれば、傾きの標準化は局所的な誘導刺激とテスト刺激の間に生じる。もし、視覚系が奥行きを局所的に標準化するのであれば、知覚されるテスト刺激の傾きは、それぞれの局所的な誘導刺激の傾きとは反対方向になるはずである。上部手前の内向図形と上部奥の外向図形において、全ての誘導刺激は上部になるほど離れる傾きを持っている。一方で、上部奥の内向図形と、上部奥の外向図形は、全ての誘導刺激が、上部になるほど近づく傾きを持っている。これらの誘導刺激の傾きがテスト刺激の知覚される傾きに影響を与えるため、キャンセル課題による調整は、それぞれの局所的な誘導刺激の傾きと同じ方向になるはずである。

本実験では、誘導刺激である線を点に置き換えたステレオグラムの両眼奥行き対比についても検討した。誘導刺激が線である場合と比較して、点に置き換えた場合に、全体の傾きについては変化がなかった。一方で、誘導刺激が線である場合に存在する、誘導刺激の局所的な傾きが排除された。すなわち、視覚系が奥行きを全体的に標準化している場合、線の誘導刺激とドットの誘導刺激

で同じ両眼奥行き対比が見られると予測される。視覚系が奥行きを局所的に標準化している場合には、ドットの誘導刺激は局所的な傾きが存在しないため、線の誘導刺激とドットの誘導刺激で異なる両眼奥行き対比が生じると予測される。

### 2.2.2. 実験1の方法

**観察者** 観察者は20歳から33歳までの男性6名，女性5名の計11名であった。うち男性2名のみが実験の意図を知っていた。すべての観察者が正常な視力（矯正を含む）を有しており，単純なステレオグラムから立体像を復元することが可能であった。

**装置と刺激** 刺激の提示とデータの収集に使用したパーソナルコンピュータはApple社製のiBook G4であった。ステレオグラムは21-inch CRT モニタ（Eizo FlexScan T961）上に表示され，ミラーステレオスコープを通して観察された。観察距離は67.5cmであった。CRTモニタの左部分に表示された刺激は左眼に，右部分の表示された刺激は右眼に提示されるように，左右2枚ずつ鏡を設置した。

鏡の位置は、67.5cm先において輻輳角が左右対称となるように調整した。刺激の表示領域外の部分については、観察者の視界に入らないよう、黒の段ボール紙で覆った。高い空間的解像度で刺激を提示するために、アンチエイリアスを用いた。表示領域の中心部分は目の高さより視角で $9^\circ$  低く、頭部の前額平行面に対して像差のない面に比べて、 $9^\circ$  傾いていた。頭部を固定するために顎台を用いた。

刺激は、垂直な線パーツ（視角で $5.2^\circ$  の長さ、以下テスト刺激と呼ぶ）及び、テスト刺激の上下に提示される比較的小さなパーツ（以下、誘導刺激と呼ぶ）によって構成されていた。全てのパーツの輝度は $14.75 \text{ cd/m}^2$ であり、背景の輝度は $0.06 \text{ cd/m}^2$ であった。線の太さは $3'$ であった。

観察者は、テスト刺激について、主観的に地面に対して垂直になるように調整することが求められた（キャンセル課題）。調整にはマウスを使用し、観察者がマウスを遠ざけるとテスト刺激の上部が後方に移動し、マウスを近づけると主線の上部が前方に移動した。マウス操作はテスト刺激の両眼像差に関連づけられており、カーソル（観察者には表示していない）が1ピクセル移動するご

とに、テスト刺激の上部と下部の間の像差が $0.62'$ 変化した。観察者が調整する間、テスト刺激の垂直方向の大きさは一定であった。

本研究では、水平大きさ像差ではなく水平せん断像差を用い、テスト刺激に水平軸周りの傾きを付加した。これは、線条件の刺激がミュラー・リヤー錯視図形と類似しており、2次元的な長さの錯視が、水平方向の像差に影響を与えることを避けるためであった。

誘導刺激には、テスト刺激の端点に対して $\pm 31'$ の水平せん断像差を付加した。相対的な像差の符号は、刺激の上部と下部で逆とした。調整の間、誘導刺激の像差は、テスト刺激の端点に対して一定とした。すなわち、それぞれの誘導刺激の立体的な位置は、テスト刺激の端点の立体的な位置と連動していた。言い換えると線形状の誘導刺激は、観察者がどの位置に傾きを調整しても、常にテスト刺激と接していた（図9）。

本実験では線とドット、2つのタイプの誘導刺激を用いた。線条件では、ミュラー・リヤー刺激と類似する形になるような、長さが $1.9^\circ$ の斜線を用いた（図9）。線条件の誘導刺激には線内向図形と線外向図形の2つの種類が存在した。内向図形におけるテスト刺激と誘導刺激の挟角の大きさは、画面上で約 $37^\circ$ であ

り、外向図形においては約 $143^\circ$ であった。幾何学的に予測される誘導刺激の傾きは、眼間の距離を6.5cmと仮定した場合、視線と直角をなす平面に対して水平軸周りに $\pm 72^\circ$ であった。点条件の誘導刺激に斜線はなく、線条件の誘導刺激の端点の位置に、 $16'$ のドットを配置した。この点条件の配置はPastore (1964) と類似していた。点条件においては、点内向図形と点外向図形の2種類が存在した(図9)。いくつかの試行で、誘導刺激を持たない、テスト刺激のみが観察者に提示された。この試行を行う事で、観察者が、試行を通してテスト刺激の傾きを判断する事に集中できるようにした。加えて、この試行を行う事で、知覚されるテスト刺激の傾きに基づかない調整(例えば、誘導刺激の相対的な位置を判断すること)を排除できることが可能であった。ただし、このような刺激においては知覚される傾きについて個人差が大きいという報告があり(Sato & Howard, 2001)、誘導刺激のない試行で得られたデータは統計的な分析に含めなかった。

手続き 観察者は、暗室でミラーステレオスコープを通して刺激を観察した。

観察者が輻輳を維持しやすくするため、ブロックの初めに灰色のドットが画面

の中央に提示された。観察者がマウスをクリックすると、ドットが消失し、刺激が提示された。観察者が、キャンセル課題における調整に満足したとき、マウスをクリックするように教示した。観察者がマウスをクリックすると、次の試行が開始された。

1ブロックは10試行によって構成されていた。4種類の誘導刺激の配置（線内向、線外向、点内向、点外向）×2種類の誘導刺激の奥行き方向（上部手前、下部手前）に加えて、誘導刺激を持たないテスト刺激が2種類のスタート位置（テスト刺激の上部と下部が±19′異なる位置）で提示された。それぞれのブロックで、10種類の試行の順番はランダムに決定された。線条件、点条件のそれぞれにおいて、練習試行1ブロック、本試行2ブロックの計3ブロックを行った。すなわち、観察者は実験全体で練習試行2ブロック、本試行4ブロック、計60試行を行った。それぞれの条件における最初のブロックが練習試行であった。線条件、点条件のどちらのブロックを先に行うかは観察者間でカウンターバランスをとった。

### 2.2.3. 実験1の結果と考察

各条件と各観察者における平均の調整量を求めた。この集計は、それぞれの条件における平均±2SDの範囲外であったデータを除いた後に行われた（範囲外のデータは、全体の3.4%であった）。集計に際して、調整の2つのスタート位置の値についてはまとめて計算した。線条件と点条件それぞれの調整値について、誘導刺激の形状（線内向、線外向、点内向、点外向）と誘導刺激の奥行き方向（上部手前、上部奥）を要因とする観察者内2要因分散分析を行なった。本稿の研究では、有意水準の $\alpha$ を0.05とした。これ以降の章においても有意水準の $\alpha$ は0.05とする。

図11 (a) は、11名の観察者の、線条件における調整値の平均を示している。調整値は、テスト刺激の傾きを打ち消すために必要とされる、テスト刺激の上部と下部の端点の間の、相対的な水平網膜像差として表される。正の値は、観察者の調整が上部が近づく方向に行われたことを示している。分散分析によると、誘導刺激の形状の主効果、誘導刺激の奥行き方向の主効果のいずれも有意ではなく、交互作用のみ有意であり ( $F(1, 10) = 8.3, p = .016, \eta^2 = 0.25$ )、効果量は大きかった。線内向図形において、上部手前の誘導刺激の場合よりも、

上部奥の誘導刺激の場合に、観察者は上部を手前に動かしていた ( $F(1, 20) = 12.5$ ,  $p = .002$ )。さらに、上部が手前にある条件において、観察者は、線内向図形よりも線外向図形の場合に、上部を手前に動かしていた ( $F(1, 20) = 6.8$ ,  $p = .017$ )。逆に、上部が奥にある条件において、観察者は、線外向図形よりも線内向図形の方がより上部を手前に動かしていた。上部手前の線外向図形と上部奥の外向図形の比較を除いて、得られた結果は、局所的な標準化仮説による予測と一致していた。

図11 (b) は、11名の観察者の、点条件における調整値の平均を表している。分散分析によれば、誘導刺激の形状の主効果、誘導刺激の奥行き方向の主効果のいずれも有意ではなく、交互作用のみ有意であり ( $F(1, 10) = 6.2$ ,  $p = .032$ ,  $\eta^2 = 0.050$ )、効果量は小さかった。点外向図形において、上部奥の誘導刺激の場合よりも、上部手前の誘導刺激の場合に、観察者はより上部手前に調整を行っていた ( $F(1, 20) = 4.5$ ,  $p = .046$ )。線条件とは異なり、その他の条件間の比較は有意ではなかった。

本実験では、点外向条件において、有意な両眼奥行き対比が見られた。この結果は、全体的な標準化仮説による予測と一致する。一つの解釈として、全体

的な標準化は、局所的な傾きが弱い、あるいは利用できない場合に生じることが考えられる。しかしながら、誘導刺激の全体の相対的な網膜像差は、線条件と点条件においてほぼ同一である。それゆえ、全体的な標準化は、線条件と点条件における全ての結果を十分に説明できない。

本実験の結果が、一般的には局所的な標準化を支持するのに反して、線条件における結果については二つの代わりとなる解釈が可能である。第一に、線内向図形と線外向図形における異なる結果は、矢印型接合やY接合とよばれる、局所的な絵画的手がかりの一種によるものかもしれない(たとえばRensink & Enns, 1995)。前述したように、いくつかの先行研究(たとえばvan Ee et al., 1999)は、両眼奥行き対比は、網膜像差と遠近法的手がかりの矛盾によって生じると主張している。実験1の結果から、遠近法手がかりが異なる調整値を生み出しているという可能性を除外することはできない。第二に、線条件における異なる結果は、誘導刺激によって引き起こされる二次元的な長さの錯視に関係している可能性がある。ミュラー・リヤー図形は長さの錯視を生み出すことが知られており、線内向図形の誘導刺激と、線外向図形の誘導刺激はそれぞれテスト刺激の長さの過小評価あるいは過大評価を引き起こした可能性がある。実際に、

Nijhawan (1995) は長さの錯視が、誘導刺激とテスト刺激が同じ平面状にない場合にも生じることを報告している。実験1の結果は、長さの知覚的な変化が、傾きの調整量に影響したという可能性を排除できない。

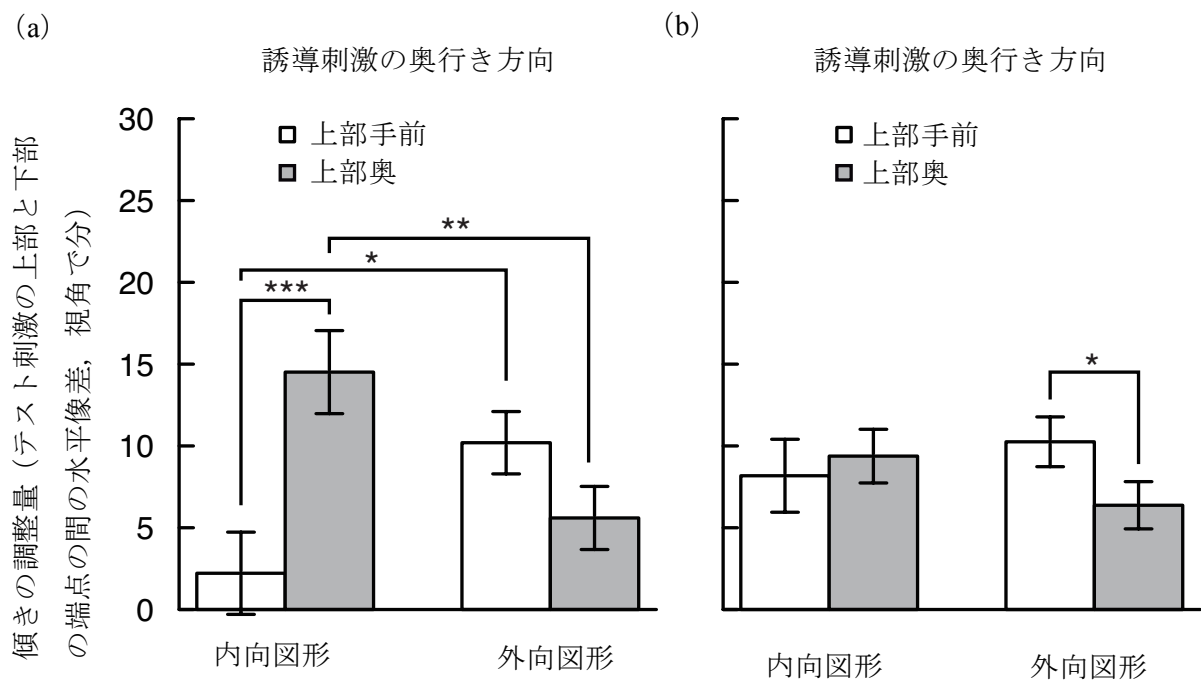


図11 実験1における、奥行き符号と誘導刺激の形状の4つの組み合わせ別の平均の傾き調整量 (n=11)

(a) は線条件を、(b) は点条件を示す。正の値は、テスト刺激の知覚される傾きを垂直に調整するために、上部を手前にする調整が必要であったことを示している。エラーバーは標準誤差を示している。\* $p < .05$ ; \*\* $p < .01$ ; \*\*\* $p < .005$ 。

## 2.3. 実験2

### 2.3.1. 実験2の目的

線条件の結果に対する、2つの代わりとなる解釈について検討するため、線条件を変化させた2種類の配置（平行と交差）を設定した。平行配置（図12（a），（b））においては、矢印型接合とY接合を排除するために、誘導刺激の端点とテスト刺激の端点の間に、水平方向の隔たりが出来るように配置した。もし、遠近法的な手がかりが線条件の両眼奥行き対比に何も影響を与えていない場合、線条件と平行配置の調整量は類似した結果になると予測される（図12）。交差配置（図12（c），（d））においては、誘導刺激による長さの変化を排除するため、線内向図形の誘導刺激と線外向図形の誘導刺激を、それぞれの端点で重なり合うように配置した。交差配置は、誘導刺激の三次元的な組み合わせがそれぞれ異なる2つの誘導刺激の形状を含んでいた。もし、知覚的な長さの変化が、線条件における両眼奥行き対比にあまり影響を与えていない場合、調整量は交差配置の誘導刺激の形状に依存すると予測される。表1は、交差配置の刺激に対して加えられる、傾きの調整量の予測を示している。

### 2.3.2. 実験2の方法

観察者 観察者は21歳から33歳までの男性7名，女性5名の計12名であった。うち男性2名のみが実験の意図を知っていた。すべての観察者が正常な視力（矯正を含む）を有しており，単純なステレオグラムから立体像を復元することが可能であった。12名のうち7名は実験1にも参加していた。

装置と刺激 装置と刺激は以下を除き，実験1と同様であった。実験2においては，誘導刺激を，平行配置と交差配置という2種類に変化させた。図12 (a)，図12 (b) に平行条件の刺激を示す。実験1の線条件において使用された矢羽状の誘導刺激が，平行条件では2つの傾いた直線に置き換えられている。誘導刺激の一つの端点は，テスト刺激の端点から右または左に $1.0^\circ$ 離れた位置に提示された。それぞれの誘導刺激は $1.6^\circ$ の範囲内に存在していた。平行条件の誘導刺激の最大の水平像差は，実験1の線条件と同一であった。加えて，実験1と同様に，誘導刺激について，内向図形と外向図形を設定した。図12 (c)，図12 (d) は交差配置を表しており，実験1における内向図形と外向図形を重ね合わせた刺激であった。この配置はピラミッド条件，アンテナ条件という二つの条件を含

んでいた。ピラミッド条件においては、奥行き方向が同じ内向図形と外向図形が、ピラミッドのように組み合わせられて配置された。アンテナ条件においては、内向の誘導刺激と外向の誘導刺激が奥行き方向に傾く、二つの連続した線を成す形状に配置された。

手続き 手続きは以下を除き、実験1と同様であった。それぞれの条件において、5回から10回の練習試行の後に、観察者は4ブロック計44の試行を行った。4つのブロックのうち2ブロックが平行条件のブロックであり、ピラミッド条件とアンテナ条件は1ブロックずつであった。平行条件のブロックは10試行で構成されており、8試行が誘導刺激とテスト刺激を同時に提示する試行であり、2試行がテスト刺激のみを提示する試行であった。ピラミッド条件とアンテナ条件においては、4試行がテスト刺激と誘導刺激を同時に提示する試行であり、2試行がテスト刺激のみの試行であった。この刺激形状の違いに加えて、2つの初期位置の違いを加えた12試行が、ピラミッド条件とアンテナ条件における合計試行数であった。

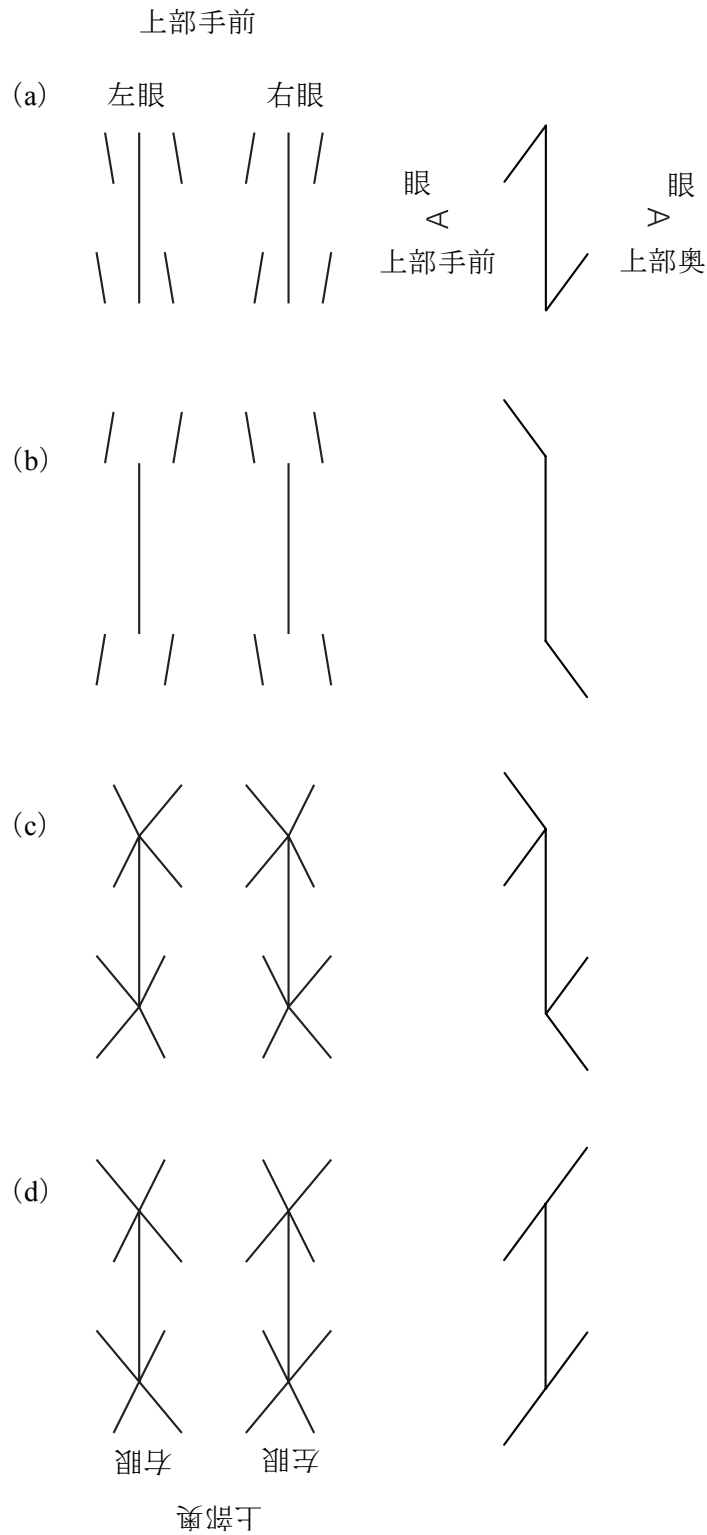


図 12 実験 2 において使用されたステレオグラム（左の列）と，側面から刺激を見た場合の略図。(a) は内向図形を，(b) は外向図形を，(c) はピラミット条件を，(d) はアンテナ条件を示

している。それぞれのパネルの左列において、非交差法による融合では、上部の誘導刺激が手前方向に知覚される（(c) と (d) においては、内向の誘導刺激が上部手前方向に知覚される）。この図を上下逆方向にした場合、非交差法による融合では、上部の誘導刺激が奥方向に知覚される。網膜像差を持たない垂直線分がテスト刺激であり、実験では観察者が傾きを調整した。

表1 実験2の交差配置におけるキャンセル課題における調整方向の予測

標準化	ピラミッド		アンテナ	
	上部手前	上部奥	上部手前	上部奥
全体的	+	-	0	0
局所的	0	0	-	+

+はテスト刺激のキャンセル方向が上部手前であることを、-はテスト刺激のキャンセル方向が上部奥であることを、0は垂直であることを示している。符号とゼロは、図12において、内向誘導刺激と外向誘導刺激の組み合わせから単純に求められている。上部手前と上部奥のラベルは、内向誘導刺激の奥行きの符号を示している。

### 2.3.3. 実験2の結果と考察

外れ値を取り除くため、実験1と同様の基準を用い、全データの3.9%を分析から除外した。

図13 (a) は、平行配置における12名の観察者の平均値を表している。誘導刺激の形状（線内向，線外向）と誘導刺激の奥行き方向（上部手前，上部奥）を要因とする観察者内2要因分散分析を行なった。誘導刺激の形状の主効果，誘導刺激の奥行き方向の主効果ともに有意ではなかった。交互作用のみ有意であり ( $F(1, 11) = 11.6, p = .006, \eta^2 = 0.25$ )，効果量は大きかった。線内向図形において，誘導刺激が上部奥の奥行きを持つ場合に，上部手前の誘導刺激を持つ場合よりも，上部が手前になるように調整された ( $F(1, 22) = 12.5, p = .002$ )。対照的に，線外向図形においては，誘導刺激が上部手前の奥行きを持つ場合に，上部奥の誘導刺激を持つ場合よりも，上部が手前になるように調整された ( $F(1, 22) = 8.5, p = .008$ )。さらに，誘導刺激が上部手前の奥行きを持つ場合，内向図形よりも外向図形においてより上部手前に調整が行われた ( $F(1, 22) = 6.3, p = .02$ )。対照的に，誘導刺激が上部奥の奥行きを持つ場合に，外向図形よりも内向図形においてより上部手前に調整が行われた ( $F(1, 22) = 12.5, p = .002$ )。これらの結果は，全般的に実験1の線条件の結果を再現したものであり，実験1の結果が線遠近法的手がかりの存在によるものではないことを示唆している。

この結果はまた、線条件と点条件における異なる結果が、誘導刺激とテスト刺激間の結合によるものであるという解釈が間違いであると指摘している。線条件において、誘導刺激とテスト刺激はつながっているが、点条件においてはつながっていない。平行条件においては、点条件と同様にテスト刺激と誘導刺激がつながっていないにもかかわらず、実験1の線条件と同様の結果であった。それゆえ、この条件における結果は、実験1における奥行き対比が、誘導刺激とテスト刺激の結合によるものではなく、局所的な傾き情報によるものであることを示唆している。

図13 (b) は交差配置における12名の観察者の平均値を表している。この交差配置におけるデータセットは、正規分布に従わなかったため(シャピロ-ウィルク検定,  $W = 0.0882, p = .0002$ ) , この配置における4つの条件において得られた調整量に対して、フリードマン検定を行なった。結果として、4つの条件における調整量は異なっていた ( $\chi^2(3) = 26.5, p < .0001$ ) 。多重比較 (Conover, 1999) によって、ピラミッド条件とアンテナ条件の内向図形が上部手前である場合を除き、4つの条件のすべての組み合わせにおいて調整量が異なることが明らかになった (すべて  $p < .0001$ ) 。

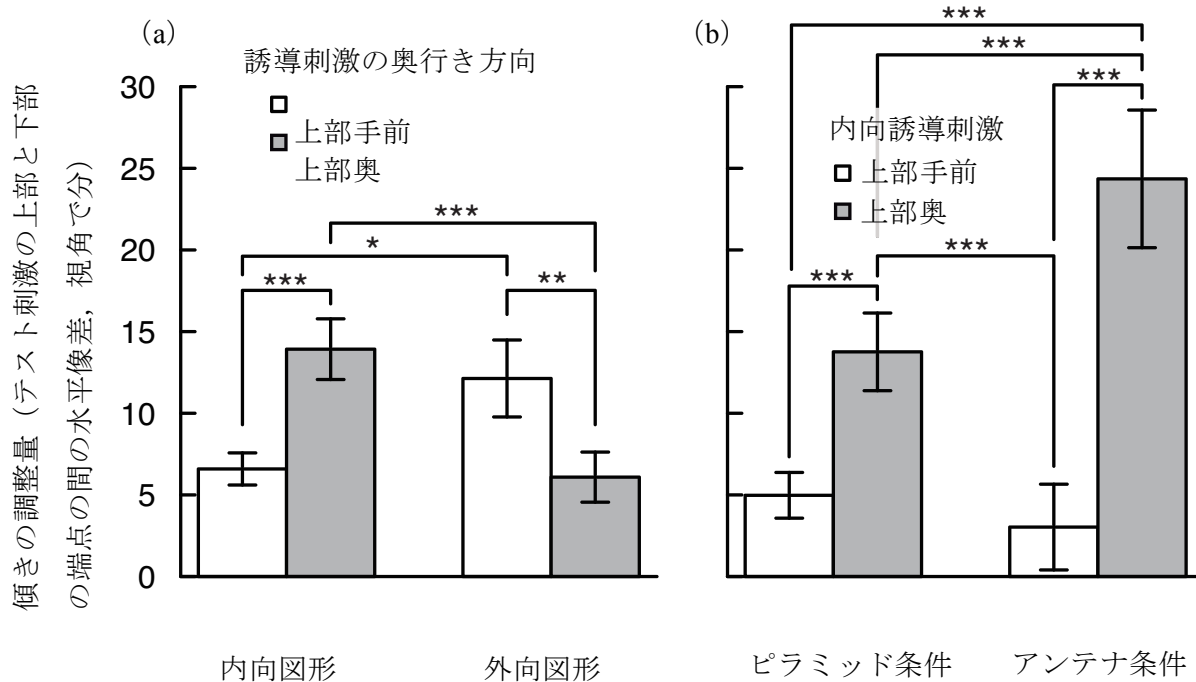


図13 実験2における、奥行き方向と誘導刺激の形状の4つの組み合わせ別の平均の傾き調整量 (n=12)

(a) は平行配置を、(b) は交差配置を示す。正の値は、テスト刺激の知覚される傾きを垂直に調整するために、上部を手前にする調整が必要であったことを示している。エラーバーは標準誤差を示している。\* $p<.05$ ; \*\* $p<.01$ ; \*\*\* $p<.005$ 。

交差配置における結果は、以下の3点にまとめることができる。第一に、ピラミッド条件、アンテナ条件の両方において、内向図形が上部手前である場合よりも、内向図形が上部奥である場合に、より上部手前に調整を行っていた。ピラミッド条件とアンテナ条件においては、実験1, 2の他の条件と異なり、内向図形と外向図形の両方をそれぞれの条件に含んでいる点に留意すべきである。

実験2では実験1の線条件と結果のパターンが一致しているため、本実験で用いた刺激においては、内向図形の局所的な傾きが重要な役割を果たしていると言える。第二に、実験1の線条件における調整量の差よりも、アンテナ条件における調整量の差の方が明らかに大きかったことである。この結果は、同じ傾きの外向図形を加えることで、奥行き対比が増強されたことを示唆している。第三に、上部奥の条件において、ピラミッド条件よりもアンテナ条件において上部手前に調整が行われたことである。この結果は、ピラミッド条件において、内向の誘導刺激による奥行き対比は、反対の傾きを持つ外向の誘導刺激を加えることによって弱められるという考えと一致している。これらの結果は、前述した表1の予測とは完全には一致しないが、交差配置における調整量は局所的な傾きに依存していることと、実験1の線条件における奥行き対比では、知覚される長さは重要な役割を果たしていないとまとめられる。

#### 2.4. 第2章の考察

二つの実験の結果から、調整量は、刺激の全体的な傾きではなく、誘導刺激の局所的な傾きに影響されることが明らかとなった。これは、Howard & Rogers

(1995) の、傾きの標準化は局所的なプロセスであるという考えに実験的データの裏付けを与えるものである。まとめると、少なくとも線の形状において、両眼奥行き対比は局所的な標準化に関係していると示唆される。

図11から図13において、全体の調整量は、すべての条件においてわずかに上部手前にシフトしていた。上部手前と上部奥の条件間において、調整量はゼロ（例えば、網膜像差を持たない面）において対称で、全体の調整量を平均すると0' になると予測される。実験1と実験2における重み付けをしていない調整量の平均は9.5' 上部手前方向であり、テスト刺激のみの調整量の平均（9.6' 上部手前方向）とほぼ同じであった。なぜこのような全体的な上部手前へのシフトが生じたのか？ 実験1、実験2における装置においては、理論的な網膜像差を持たない平面は、前額平行面に対して、手前奥方向に9° 傾いていた（実験1の装置と刺激を参照）。観察者は、前額平行面についてテスト刺激の傾きを判断していたため、観察者はこの9° を考慮してキャンセル課題を行なったと考えられる。この場合、すべての条件において4.8' 分上部手前に調整するはずである。よって、実験1,2において見られた全体的な上部手前方向へのシフトは、部分的に、実験に使用した装置によって説明できる。残り半分の上部手前方向へのシ

フトは解釈が難しいが、主観的垂直がわずかに手前奥方向にずれていることが報告されている（例えば、Cogan, 1979）。しかしながら、Cogan (1979) と本章における刺激には違いがある。第一に、本章における刺激は、Cogan (1979) の刺激に比べ、かなり高さが低いことである。本章における刺激は視角で $8^{\circ}$  以下である。Cogan (1979) の刺激は視角で $31^{\circ}$  である。第二に、Cogan (1979) の刺激に比べ、より複雑な3次元構造であることである。Cogan (1979) の刺激は単独の線であり、本章の刺激は、誘導刺激を伴う線分である。刺激の大きさや、周囲の刺激が知覚される傾きに影響することはよく知られており (Howard & Kaneko, 1994; van Ee & Schor, 2000), これらの違いが、つじつまの合わない結果を生み出しているのかもしれない。

本章において用いた刺激には、水平せん断像差が付加されており（両眼画像間の側方変位）、垂直網膜位置に対して連続的に変化している。いくつかの種類 of せん断像差は、回旋輻輳 (cyclovergence) として知られる両眼の眼球運動を引き起こすことがある (Howard & Rogers, 2012)。もし、回旋輻輳が実験1や実験2において生じていた場合、奥行き対比を生み出す、網膜上でのせん断像差がテスト刺激に付加されていたかもしれない。回旋輻輳によって本実験のデータを

説明することができるだろうか？ 後述する二つの理由によって、その可能性は低いと考えられる。第一に、刺激によって引き起こされる離反回旋は、刺激が高密度であり (e.g., Mitsudo, Kaneko, & Nishida, 2009), 大きいときに (視角で  $30^{\circ} \times 30^{\circ}$  以上の場合, Howard & Kaneko, 1994) 生じることが知られている。対照的に、本章で用いた刺激の密度は低く (例えば, いくつかの線分), かつ小さかったため (視角で約  $2^{\circ} \times 8^{\circ}$  以下), 本章の刺激によって離反回旋が引き起こされたとは考えにくい。第二に、本章で用いた刺激は、全体の大きさや構造という点で互いに類似している。それにも関わらず、本章では、実験1における線条件と点条件のような、局所的な誘導刺激の形状に依存した、異なる奥行き対比が見られた。このことから、本章の実験結果が離反回旋によって説明できるとは考えにくい。

本章の実験の結果は、近年、主張されている奥行き対比が全体的なメカニズムに関係しているという考えに反するものだろうか (Van der Kooij & te Pas, 2010) ? Van der Kooij & te Pas (2010) は、いくつかの離れた誘導刺激の異なる傾きが空間的に平均されることによって、奥行き対比が生じることを報告している。しかし、本章の実験と彼らの研究は、刺激という点で異なっている。

本章の実験と異なり、Van der Kooij & te Pas (2010) においては、網膜像差と遠近法手がかりが互いに矛盾するランダムドットのテクスチャを持つ刺激が使用された（例えば、網膜像差手がかりがゼロではない傾きを示しているのに対して、遠近法手がかりがゼロを示している場合等）。本章の実験においては、刺激がランダムドットのテクスチャを持つ面ではなく、線で構成されたパターンである場合に、遠近法手がかりが調整量に影響を与えないことが明らかになっており、局所的な奥行き対比において手がかり間の矛盾が大きな役割を果たしていないことが示唆される。本章の実験とVan der Kooij & te Pas (2010) の研究における違いは、手がかり間の矛盾は、面のパターンに対して全体的に作用し、一方で、奥行きの標準化は線分で構成されたパターンに対して局所的に作用するという考えで説明できるかもしれない。この考えを検討するために、今後の研究においては、手がかり間の矛盾がないテクスチャパターンに対して、全体的な奥行き対比が生じるかどうかを確かめる価値があるかもしれない。

本章の実験結果は、局所的な標準化仮説と一致していたが、奥行き対比が全体的な標準化を含むという可能性を排除するものではない。考慮すべき点が2つある。第一に、実験1において使用した点外向は、Pastore (1964) の先行研究と

同様、局所的な傾きが欠如しているにもかかわらず、奥行き対比が生じている。

この結果について考えうる一つの解釈として、全体的な奥行き標準化は、局所的な傾き符号が弱い、あるいは欠如している場合に生じるのではないかということが挙げられる。第二に、本章の刺激における局所的な傾きの符号が、奥行き対比を生み出すのに充分であり、全体的な傾きの情報による奥行き対比を上書きするほど、知覚的に顕著であったのかもしれない。この研究は、局所的な奥行き対比の原因となる局所的あるいは全体的な奥行き標準化という問題に着目していたため、本章の実験において明確な答えを出すことは出来ない。この問題について明らかにするため、全体のパターンと局所的な傾きの両方の知覚される傾きを測定するあるいは評価することが有用かもしれない。

### 第3章 短時間提示における両眼傾き対比

### 3.1. 第3章の目的

前述したように、van Ee et al. (1999) は、両眼傾き対比は、網膜像差や遠近法手がかりのような、いくつかの奥行き手がかりから傾きを推定する視覚系の戦略から生じるという傾き推定理論を提唱している。傾き推定理論によれば、誘導刺激の傾きは、網膜像差定義による誘導刺激のゼロではない傾きと、遠近法定義による誘導刺激のゼロの傾きとの間の重み付けによって知覚的に過小評価される。一方で、小さなテスト刺激の絶対的な傾きは、相対的に信頼できないとみなされる。両眼傾き対比は、両方が信頼できる手がかりとみなされる、過小評価された誘導刺激の傾きの付加と、テスト刺激と誘導刺激の間の相対的な傾きの付加によって、テスト刺激の傾きが評価されることで生じる。すなわち、誘導刺激の傾きと相対的な傾きは、テスト刺激の傾きよりもより大きな重みを割り当てられる。van Ee et al. (1999) は手がかり矛盾仮説を、網膜像差と遠近法手がかりの矛盾をなくすために、誘導刺激に遠近法手がかりを付加することによって検証している。彼らは、誘導刺激における手がかり間の矛盾が減少した場合、傾き対比は減少するという、手がかり矛盾仮説を支持する証拠を提出している。Sato & Howard (2001) も同様の結果を報告している。

二つの先行研究では、相対的に長い提示時間を使用している。Sato & Howard (2001) においては10s, van Ee et al. (1999) においては1.5 sの繰り返しである。

他の視覚的な対比現象においては、提示時間が異なる場合、異なるメカニズムを含むことが提案されている（例えば、明るさと色の対比現象, Kaneko & Murakami, 2012）。これらを考慮すれば、本来、提示時間の長い両眼傾き対比に対する説明として考案された手がかり矛盾仮説が、短時間の提示、特に1秒以下の提示における両眼傾き対比を説明できるかは明らかではない。Kumar & Glaser (1993) は短い提示時間における両眼傾き対比を測定し、提示時間が短くなるほど、両眼傾き対比が減少することを報告した。もし、両眼傾き対比が提示時間の関数として変化するのであれば、誘導刺激の知覚される傾きもまた提示時間の関数として変化する可能性がある。本章の実験は、提示時間と刺激形状を変化させ、誘導刺激とテスト刺激、両方の知覚される傾きを測定することによって、両眼傾き対比の基礎となるメカニズムを明らかにするために行われた。

特に、この研究の第一の目的は、短時間提示において誘導刺激における手がかり間の矛盾が減少するときに、両眼傾き対比も減少するという手がかり矛盾仮説による予測を検証することであった。

## 3.2. 実験3

### 3.2.1 実験3の目的

実験3は、刺激の提示時間の変化に応じて、両眼傾き対比と誘導刺激の知覚される傾きがどのように変化するかを確かめるため行われた。実験3に使われたステレオグラムは、van Ee et al. (1999) が用いた刺激の形状を一部変化させたものであった。テスト刺激はランダムドットで構成された面であり、網膜像差はゼロであった。誘導刺激は線が交差した格子状のフレームであり、垂直軸回りに前額平行面に対して $\pm 20^\circ$  あるいは $\pm 30^\circ$  の傾きを持っていた。図14 (a) にステレオグラムの例を示す。図14 (b) は、ステレオグラムの上面図と、そのステレオグラムの典型的な知覚を表した図である。テスト刺激、誘導刺激ともにゼロの傾きを示す線遠近法手がかりを持っており、すなわち、実験3は手がかり矛盾状況であった。100 msから800 ms、ステレオグラムを観察した後、観察者はマッチング課題によって知覚された傾きを報告した (図14 (c))。この実験において両眼傾き対比が生じる場合、テスト刺激の知覚される傾きは誘導刺激の知覚される傾きとは逆方向になることが予測される。

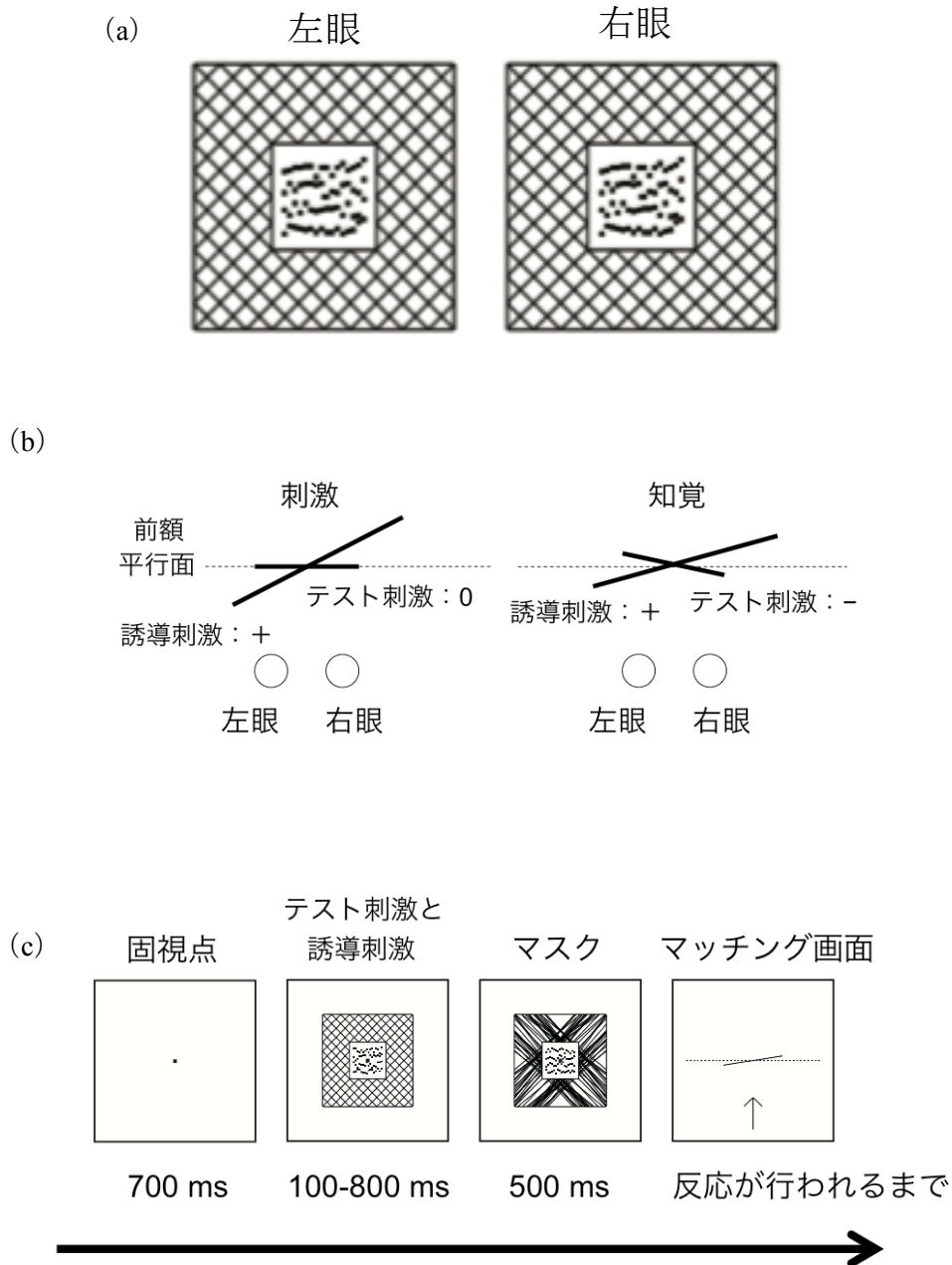


図14 実験3における刺激と方法

(a) 網膜像差を持たないテスト刺激（中央部分）と0.965の水平大きさ像差を持つ誘導刺激（周囲を囲む格子状のフレーム）で構成されるステレオグラム。交差法で融合すると、誘導刺激の左側が手前に来るように傾いて見え、テスト刺激が右手前の錯視的な傾きを持つ（両眼傾き対比）。このステレオグラムは正寸で描かれている。実際の実験において、刺激は黒色の背景に白色で書かれた。（b）ステレオグラム(a)を上部から見た場合の略図とその知覚。水平の破線

が前額平行面を表している。左のパネルが刺激を表しており（誘導刺激が左手前に傾き，テスト刺激が傾きを持たない），右のパネルがステレオグラムによって生み出される典型的な知覚を表している（実線で表している）。誘導刺激の傾きは過小評価されており，テスト刺激は右手前に傾いている。左手前と右手前の傾きは，それぞれ+と-の符号で表している。このパネルは正寸ではない。（c）実験における試行の流れの模式図。マッチング画面（右端のパネル）では，斜線の方位を観察者が調整し，テスト刺激または誘導刺激の知覚される傾きを報告した。

## 方法

**観察者** 観察者は22歳から34歳までの男性7名，女性1名の計8名であった。うち男性2名のみが実験の意図を知っていた。すべての観察者が正常な視力（矯正を含む）を有しており，通常の立体視力を有していた。

**装置と刺激** 刺激の提示とデータの収集に使用したパーソナルコンピューターはApple社製のiBook G4であった。ステレオグラムは21-inch CRT モニタ(Eizo FlexScan T961)上に表示され，ミラーステレオスコープを通して観察された。観察距離は67.5mmであった。立体視に関する装置の詳細は第2章と同様であった。刺激は，中央に表示された注視点のドットを除き，無色のドットと線（輝度は $14.75 \text{ cd/m}^2$ ）で構成されており，背景の輝度は $0.06 \text{ cd/m}^2$ であった。全てのドッ

トは $6.2' \times 6.2'$  の範囲に収まっていた。線の幅は $3.1'$  であった。刺激の描画にはアンチエイリアスを用いた。

ステレオグラムは、テスト刺激であるランダムドットのテクスチャを持つ四角形（視角で $1.7^\circ \times 1.6^\circ$ ）と、誘導刺激である格子模様のテクスチャを持つフレーム（視角で $5.2^\circ \times 5.2^\circ$ ）であった。テスト刺激は、像差を持たない64個のドットで構成されており、そのドットは（視角で $1.7^\circ \times 1.2^\circ$  の範囲内にある） $16 \times 4$  の見えない格子の交差上に配置されていた。それぞれのドットの垂直位置は、視角で $20'$  の範囲内でランダムに決定された。誘導刺激のフレームは、 $\pm 45^\circ$  の方向に傾きを持つ、等しい間隔で配置した38本の線で構成されていた。この誘導刺激の線は、テスト刺激と空間的に重ならないように、ステレオグラムの中央部分（ $2.1^\circ \times 2.1^\circ$ ）には描画されなかった。垂直軸周りの傾きを生み出すため、水平大きさ像差が付加された。両眼像間の水平大きさ像差は、0.946, 0.965, 1.036, 1.057であり、幾何学的に予測される傾きはそれぞれ $30^\circ$ ,  $20^\circ$ ,  $-20^\circ$ ,  $-30^\circ$  であった（両眼間距離を6.5cmと仮定した場合）。本章の実験において、正の角度は垂直軸周りの傾きで、左側が手前にあるものを指す。

マスク刺激も64個のドットと、80本の斜線で構成されていた。80本の斜線は、誘導刺激の四角形と直行する位置から、視角で $\pm 1.5^\circ$  の範囲内にランダムに描画された。これは誘導刺激の四角形の領域をカバーするためであり、像平面において $31^\circ$  から $59^\circ$  の傾きが与えられた。全てのマスク刺激はゼロ像差を持っていた。

マッチング課題の画面は、水平の破線（長さが視角で $7.8^\circ$ ）と短い線（長さが視角で $3.4^\circ$ ）で構成されていた。マッチングのための短い線は、テスト刺激の幅と誘導刺激の幅の中間の長さに設定された。本実験において、テスト刺激の像差を変化させるキャンセル課題ではなくマッチング課題（Gillam, Flagg & Finly, 1984によって発展した）を用いた理由は、ランダムドットのテクスチャを持つテスト刺激において、手がかり間の矛盾を起こさないようにするためであった。この事については、Sato & Howard（2001）で議論されている。Van Ee & Erkelens（1996a）やMitsudo, Sakai & Kaneko（2013）と同様に、観察者は短い線の方角を調整することが可能であった。調整のステップサイズは像平面において $1^\circ$ であった。観察者の課題は、テスト刺激または誘導刺激の知覚された傾きを再現することであった。観察者が観察している位置を図示するため、視角で

1.0° × 1.8° の大きさを持つ矢印が、マッチング課題に用いる線の3° 下に提示された。観察者は、マッチングの線が、誘導刺激またはテスト刺激の知覚された水平軸周りの傾きを示すまで、その方位を調整するように求められた。観察者は、たとえその他の関連する刺激の要素がスクリーンの上方から見えたとしても、マッチングの線が、誘導刺激またはテスト刺激の断面図であると見なすように教示された。

手続き 各試行のはじめに、0.5° × 0.5° のノニアス刺激である凝視点が、画面の中央に提示された。観察者に、誘導刺激、テスト刺激のどちらの傾きを報告するかを示すために、”center”あるいは”surround”のテキストが凝視点の下に表示された。観察者は、凝視点を両眼融合したときに、キーパッドの”0”キーを押して試行を開始するように求められた。赤い凝視点のドットが700ms提示されたあと、誘導刺激とテスト刺激が同時に提示された。提示時間は100ms, 200ms, 400ms, 800msの4条件が設定された。40msのブランクの後、マスク刺激が500ms提示された。その後、凝視点が消失し、マッチング画面が提示された。観察者はキー

パッドの”4”または”5”キーを押して調整を行なった。調整の間は、素早い反応は求められなかった。観察者が”0”キーを押すと、次の試行が開始された。

それぞれのブロックは、誘導刺激の傾き4条件×提示時間4条件×繰り返し2回からなる32試行で構成されていた。誘導刺激の傾きと提示時間の各条件の提示順は、ブロック間でランダム化された。ターゲット刺激（テスト刺激または誘導刺激）のブロック順は、観察者間でカウンターバランスを取った。少なくとも64回の練習試行の後、6ブロックの本試行が行われた。

分析 各観察者における各条件の平均の調整値を求めた。その際、誘導刺激の傾きが正の符号を持つ条件において得られた調整値の符号を反転し、それぞれの誘導刺激の角度ごとに（ $-20^{\circ}$  と  $20^{\circ}$  ,  $-30^{\circ}$  と  $30^{\circ}$  ）平均値を求めた。結果の分析には、分散分析と指数関数の当てはめを用いた。ただし、図においては誘導刺激とテスト刺激の調整値を比較するため、誘導刺激の調整値の符号を反転している。

分散分析に加え、提示時間 $t$ の関数として、調整値の指数関数のフィティングを行なった。知覚されたテスト刺激の傾きを $S_t$ 、知覚された誘導刺激の傾きを $S_i$ として、以下の式に当てはめを行なった。

$$S_t = a_t[1 - \exp(-t/b)] \quad \text{および} \quad S_i = a_i[1 - \exp(-t/b)] \quad (3)$$

$a_t$ と $a_i$ はそれぞれテスト刺激と誘導刺激の漸近値であり、 $b$ は時定数である。時定数 $b$ は、安定したパラメーター推定値を得るための誘導刺激とテスト刺激の傾きと同じであると推定される。3つの自由パラメーター ( $a_t$ ,  $a_i$ ,  $b$ ) の値は、最小二乗法を用いて求めた。

### 3.2.3. 実験3の結果と考察

図15は、8名の観察者の誘導刺激とテスト刺激の調整量の平均値を示している。図を明快にするために、正の値と負の値はそれぞれテスト刺激と誘導刺激の調整量を表している。ターゲット(誘導刺激, テスト刺激), 提示時間(100, 200, 400, 800 ms), 誘導刺激の角度(20°, 30°)を要因とする観察者内3要因分散分析を行なった。ターゲット ( $F(1, 7) = 9.8$ ,  $p = .02$ ,  $\eta^2 = .31$ ), 提示時間 ( $F(3, 21) = 11.7$ ,  $p = .0001$ ,  $\eta^2 = .05$ ), 誘導刺激の角度 ( $F(1, 7) = 11.9$ ,  $p = .01$ ,  $\eta^2 = .01$ ),

全ての要因の主効果が有意であった。ターゲットの要因の効果量は大きく、提示時間と誘導刺激の要因の効果量は小さかった。交互作用は有意ではなかった。

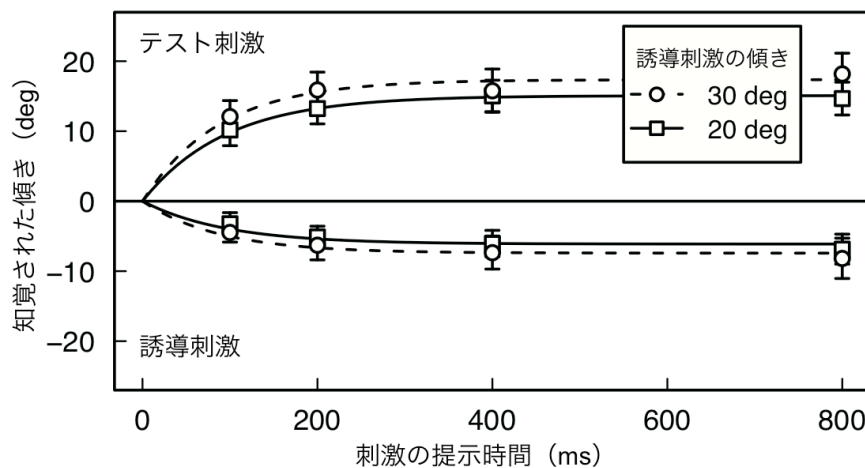


図15 実験3の結果

誤差棒 = SEM

提示時間の関数として、テスト刺激と誘導刺激の知覚された傾きの平均を示す (n=8)。正の値はテスト刺激の知覚された傾きを、負の値は誘導刺激の知覚された傾きをそれぞれ示す。点線は誘導刺激が30°の場合に得られた平均のデータに最も当てはまりが良い指数関数を、実線は誘導刺激が20°の場合に得られた平均のデータに最も当てはまりが良い指数関数を表す。エラーバーは標準誤差を表す。

知覚された傾きを定量的に表すために、それぞれの観察者において得られた傾きの調整量に対して、指数関数のフィッティングを行った。平均のデータに対する最も当てはまりの良いカーブを、図15に示す。このカーブは、個々のデ

一タに対して当てはあまりの良いデータと質的に一貫していた。当てはめによって得られた漸近値に対して、ターゲット（誘導刺激, テスト刺激），誘導刺激の角度（ $20^{\circ}$ ,  $30^{\circ}$ ）を要因とする観察者内2要因分散分析を行なった。2つの要因の主効果が有意であり，誘導刺激の漸近値よりもテスト刺激の漸近値の方が大きく（ $F(1, 7) = 10.2, p = .02, \eta^2 = .32$ ），誘導刺激の角度が $20^{\circ}$ の場合よりも， $30^{\circ}$ の場合の方が大きかった（ $F(1, 7) = 6.6, p = .04, \eta^2 = .01$ ）。ターゲットの要因の効果量は大きく，誘導刺激の角度の要因の効果量は小さかった。交互作用は有意ではなかった。

本実験においては，3つの主な結果が得られた。第一に，提示時間の関数として，両眼傾き対比と誘導刺激の傾きが増加し続けることである。この結果は，Kumar & Glaser（1993）の，提示時間が増加するにつれて，両眼傾き対比が減少し続けるという報告とは一致しない。第二に，誘導刺激とテスト刺激の両方において，誘導刺激が $20^{\circ}$ の場合よりも $30^{\circ}$ の場合の方が知覚される傾きが大きかったという結果である。この結果は，傾きの調整の幾何学的な予測と一致しており，短時間の刺激提示における両眼傾き対比の測定において，本実験において用いたマッチング課題は十分に精度が高かったことを示唆している。第三

に、本実験で用いた時間間隔（100 - 800ms）において、誘導刺激における知覚される傾きよりも、テスト刺激における知覚される傾きがより大きかった。この結果は、誘導刺激とテスト刺激の両方を測定した先行研究と一致している（B. J. Gillam & Pianta, 2005; van Ee et al., 1999）。これらの結果の解釈において、二つの問題が生じる。第一に、前述したように、本実験においてはKumar & Glaser（1993）の結果が再現されなかった。考えられる要因の一つとして、刺激形状の違いが挙げられる。Kumar & Glaser（1993）の刺激は、（ドットのような）単純な要素の組み合わせであったのに対して、実験3においては、ランダムドットのテクスチャを持つ刺激を使用した。第二に、誘導刺激における知覚される傾きよりも、テスト刺激における知覚される傾きの方が大きかった。この結果は、標準化理論と手がかり矛盾仮説、どちらでも説明できる結果である。標準化理論および手がかり矛盾仮説では、誘導刺激の傾きが過小評価され、両眼傾き対比が生じると予測する。手がかり矛盾仮説では、誘導刺激がゼロではない傾きを示す遠近法手がかりを含んでいる場合には、両眼傾き対比は減少すると予測される。これらの問題を確かめるため、実験4を行なった。

### 3.3. 実験4

#### 3.3.1. 実験4の目的

実験4の目的は、テスト刺激を単純な形状にした場合、実験3の結果が再現されるかを確かめることと、短時間のステレオグラムの提示において、手がかり矛盾仮説が両眼傾き対比を説明できるかを確かめることであった。前者の目的を達成するために、実験3のテスト刺激を、水平方向に離れて配置された2つのドットに置き換えた（図16(a), 2ドット・正方形条件）。後者の目的を達成するために、両眼網膜像差による傾きを持つ格子状の誘導刺激に対して、一致する線遠近法な手がかりを付加する条件を設定した（図16(b), ドット面・遠近法条件）。もし手がかり矛盾仮説が正しければ、ドット面・遠近法条件において、両眼傾き対比は減少するはずである。

#### 3.3.2. 方法

以下を除き、実験3と同一であった。

観察者 観察者は22歳から33歳までの男性7名，女性2名の計9名であった。うち男性1名のみが実験の意図を知っており，9名のうち4名が実験3にも参加していた。

刺激 3つの条件が設定された。この実験において，全ての誘導刺激は幾何学的に垂直軸周りの $\pm 20^\circ$ の傾きを生み出す水平大きさ像差を持っていた。2ドット・正方形条件において，誘導刺激の形状は実験3と同一であり，実験3においてドット面であったテスト刺激は，水平方向に離して配置された二つのドットに置き換えられた。二つのドット間の距離は，視角で $1.4^\circ$ であった。2ドット・遠近法条件においては，誘導刺激に水平大きさ像差を付加する前に，透視変換（例えば，Howard, 2012）を行った。線遠近法手がかりから予測される誘導刺激の傾きは $\pm 20^\circ$ であり，両眼網膜像差から予測される傾きと同一であった。2ドット・遠近法条件において，テスト刺激は2個のドットであり，誘導刺激はドット面・遠近法条件と同一であった。

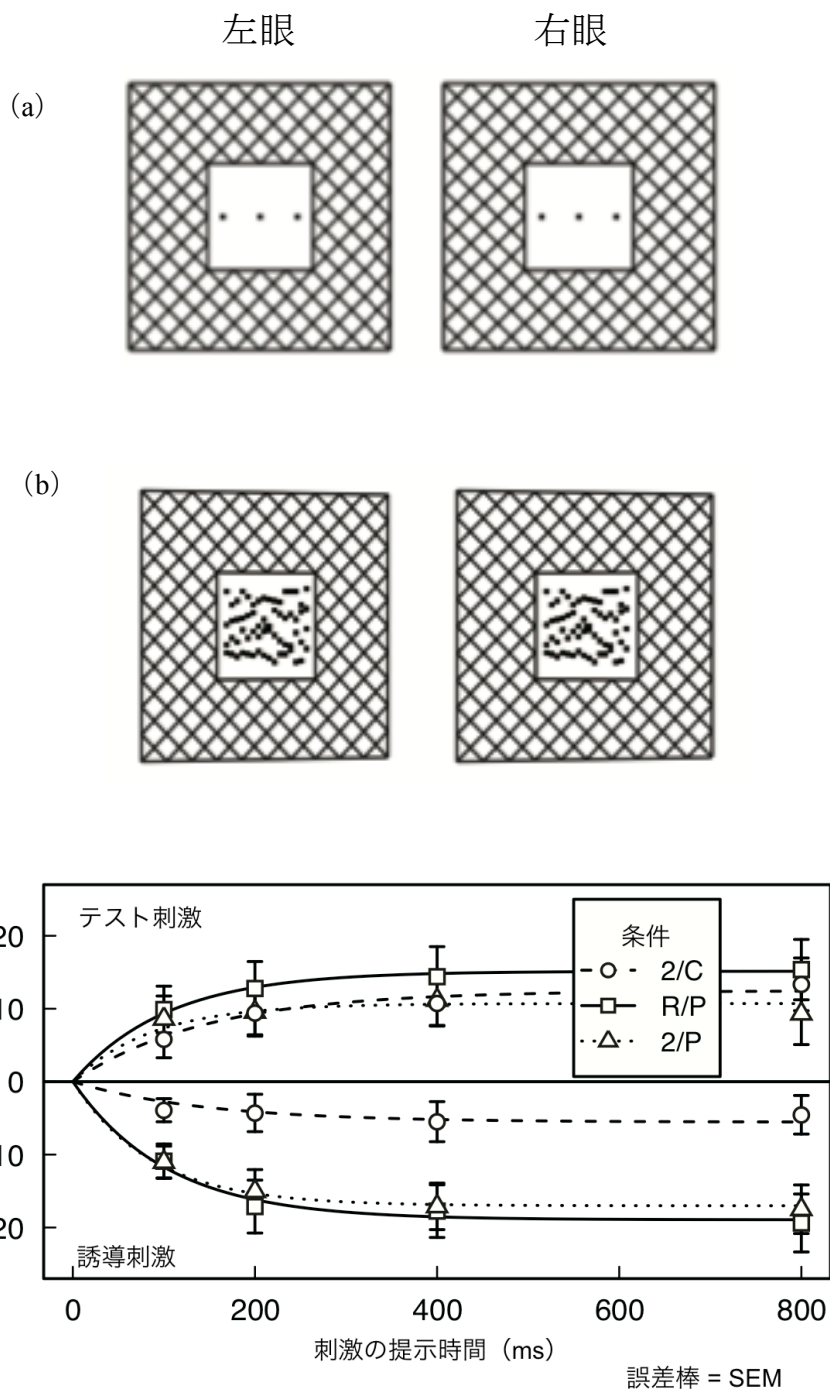


図16 実験4の刺激と結果

(a) 2 ドット・正方形条件のステレオグラム。中央のドットは凝視点である。網膜像差については図 16 の (a) と同様である。(b) ドット面・遠近法条件のステレオグラム。(c) 提示時間の関数としての誘導刺激とテスト刺激の知覚される傾きの平均 (n=9)。正の値はテスト刺激の知覚された傾きを、負の値は誘導刺激の知覚された傾きをそれぞれ示す。2/S は 2 ドット・正

方形条件を，R/Pはドット面・遠近法条件を，2/Pは2ドット・遠近法条件を表す。曲線は，3つの条件で得られた平均のデータに最も当てはまりが良い指数関数を表す。エラーバーは標準誤差を表す。

手続き それぞれのブロックは，誘導刺激の傾き2条件×提示時間4条件×繰り返し2回からなる16試行で構成されていた。3つの刺激条件と，ターゲット刺激（誘導刺激か，テスト刺激か）は，異なるブロックにおいて実施され，2回繰り返された(計12ブロック)。ブロック順は，観察者間でカウンターバランスを取った。少なくとも48回の練習試行の後，12ブロックの本試行が行われた。

### 3.3.3. 実験4の結果と考察

図16(c)は，9名の観察者の誘導刺激とテスト刺激の調整量の平均値と，最も当てはまりの良い指数関数を示している。刺激形状（2ドット・正方形条件，ドット面・遠近法条件，2ドット・遠近法条件），ターゲット（誘導刺激，テスト刺激），提示時間（100, 200, 400, 800 ms）を要因とする観察者内3要因分散分析を行なった。刺激形状の主効果（ $F(2, 16) = 11.1, p = .0009, \eta^2 = .09$ ）と提示時間の主効果（ $F(3, 24) = 12.3, p < .0001, \eta^2 = .04$ ）がそれぞれ有意であった。刺激形

状の要因の効果量は大きく、提示時間の要因の効果量は小さかった。刺激形状とターゲットの間の1次の交互作用が有意 ( $F(2, 16) = 17.8, p = .0001, \eta^2 = .05$ ) であり、効果量は中程度であった。2次の交互作用も有意であった ( $F(6, 48) = 4.5, p = .001, \eta^2 = .01$ ) が、効果量はほぼなかった。

実験3と同様に、観察者ごとの調整値に対して、指数関数の当てはめを行なった。1名の観察者に対するパラメーターの当てはめが不安定であったため、彼のデータはその後の分析には含めなかった。当てはめによって得られた漸近値に対して、刺激形状 (2ドット・正方形条件, ドット面・遠近法条件, 2ドット・遠近法条件), ターゲット (誘導刺激, テスト刺激) を要因とする観察者内2要因分散分析を行なった。刺激形状の主効果と ( $F(2, 14) = 7.6, p = .006, \eta^2 = .09$ ), 交互作用 ( $F(2, 14) = 14.0, p = .0005, \eta^2 = .09$ ) がそれぞれ有意であった。刺激形状の要因の効果量, 交互作用の効果量ともに中程度であった。多重比較の結果, 2ドット・正方形条件において、誘導刺激における漸近値よりもテスト刺激における漸近値が大きく, 2ドット・遠近法条件において、テスト刺激における漸近値よりも誘導刺激における漸近値が大きかった (すべて  $p < .05$ )。2ドット・正

方形条件の誘導刺激における漸近値よりも、2ドット・遠近法条件とドット面・遠近法条件の誘導刺激における漸近値の方が大きかった（すべて $p < .05$ ）。

要約すると、3つの刺激形状の間の両眼傾き対比は同程度の量であり、2ドット・正方形条件においてよりも、2ドット・遠近法条件とドット面・遠近法条件において誘導刺激の知覚される傾きが大きかった。前者の結果は実験3と一致していたが、提示時間が増加すると両眼傾き対比が減少するというKumar & Glaser (1993)の結果とは異なっていた。さらに言えば、誘導刺激に遠近法手がかりが付加されている場合に、知覚される誘導刺激の傾きが増加したにもかかわらず、両眼傾き対比はほぼ変化しなかった。この結果は、本実験において見られた両眼傾き対比は、手がかり矛盾仮説によって説明できないことを示唆している。

一つの考えられる可能性として、両眼傾き対比が誘導刺激のテクスチャの種類に依存することが挙げられる。Sato & Howard (2010)は、エッジによって定義される面と、ランダムドットの面は、知覚される傾きにおいて異なる効果を持つことを報告している。実際に、Sato & Howard (2010)の研究における、ランダムドットの誘導刺激とテスト刺激における知覚される傾きの度合いは類似

している。実験3，実験4においては格子状の誘導刺激を用いたため，これらの研究ではその問題に結論を出すことができない。この問題を検証するため，実験5を行なった。

### 3.4. 実験5

#### 3.4.1. 実験5の目的

実験5においては，実験3と実験4において使用した格子状の誘導刺激を，線遠近法手がかりを持たないランダムドット面に置き換えて使用した（図17（a））。もし，誘導刺激のテクスチャが両眼傾き対比において大きな役割を果たしていないのであれば，実験5における調整値は，実験3，実験4と似た結果になると予測される。

#### 3.4.2 実験5の方法

以下を除き，実験3と同一であった。

観察者 観察者は20歳から37歳までの男性4名，女性5名の計9名であった。すべての観察者が実験の意図を知らなかった。9名のうち4名が実験3または実験4に参加していた。

刺激 2つの刺激条件が設定された。実験4と同様に，全ての誘導刺激は幾何学的に垂直軸周りの $\pm 20^\circ$ の傾きを生み出す水平大きさ像差を持っていた。ドット面・ドットフレーム条件では，実験3において使用した刺激の格子状の誘導刺激を，ランダムドットで構成されたフレームに置き換えた。誘導刺激は672個のドットを含んでいた。実験3と同様に，線遠近法手がかりが示す傾きはゼロであった。2ドット・ドットフレーム条件においては，ドット面・ドットフレーム条件におけるテスト刺激が，実験4で使用された2個のドットに置き換えられた。

手続き それぞれのブロックは，誘導刺激の傾き 2 条件×提示時間 4 条件×繰り返し 2 回からなる 16 試行で構成されていた。2つの刺激条件と，ターゲット刺激（誘導刺激か，テスト刺激か）は，異なるブロックにおいて実施され，2回繰り返された（計 8 ブロック）。少なくとも 32 回の練習試行の後，8 ブロックの本試行が行われた。

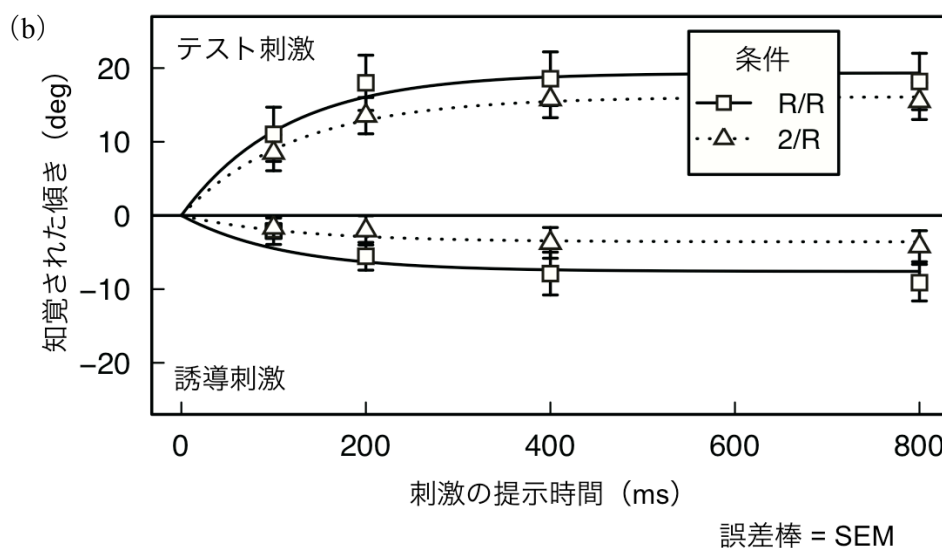


図17 実験5の刺激と結果

(a) ドット面・ドットフレーム条件のステレオグラム。網膜像差については図 14 の (a) と同様である。(b) ドット面・遠近法条件のステレオグラム。(c) 提示時間の関数としての誘導刺激とテスト刺激の知覚される傾きの平均 (n=9)。正の値はテスト刺激の知覚された傾きを、負の値は誘導刺激の知覚された傾きをそれぞれ示す。R/R はドット面・ドットフレーム条件を、2/R は 2 ドット・ドットフレーム条件を表す。曲線は、2 つの条件で得られた平均のデータに最も当てはまりが良い指数関数を表す。エラーバーは標準誤差を表す。

## 結果と考察

図 17 (b) は, 9 名の観察者の誘導刺激とテスト刺激の調整量の平均値と, 最も当てはまりの良い指数関数を示している。刺激形状 (ドット面・ドットフレーム条件, 2 ドット・ドットフレーム条件), ターゲット (誘導刺激, テスト刺激), 提示時間 (100, 200, 400, 800 ms) を要因とする観察者内 3 要因分散分析を行った。ターゲット ( $F(1, 8) = 15.7, p = .004, \eta^2 = .29$ ) と提示時間の主効果 ( $F(3, 24) = 15.7, p < .0001, \eta^2 = .06$ ) がそれぞれ有意であった。ターゲットの要因の効果量は大きく, 提示時間の要因の効果量は中程度であった。

実験 4,5 と同様に, 観察者ごとの調整値に対して, 指数関数の当てはめを行った。当てはめによって得られた漸近値に対して, 刺激形状 (2 ドット・ドットフレーム条件, ドット面・ドットフレーム条件), ターゲット (誘導刺激, テスト刺激) を要因とする観察者内 2 要因分散分析を行った。ターゲットの主効果が有意であり ( $F(1, 8) = 18.4, p = .003, \eta^2 = .40$ ), 誘導刺激よりもテスト刺激における漸近値が大きかった。ターゲットの要因の効果量は大きかった。刺激形状の主効果も有意であり ( $F(1, 8) = 5.5, p = .048, \eta^2 = .04$ ), 2 ドット・ドット

フレーム条件よりも、ドット面・ドットフレーム条件において漸近値が大きかった。刺激形状の要因の効果量は小さかった。

実験3から5つの異なる刺激形状の誘導刺激，テスト刺激を比較するために，提示時間が800msの場合における知覚される傾きに対応する漸近値の平均を計算した。図18に示しているように，ランダムドットの誘導刺激の知覚される傾きは，実験3,4における格子状の誘導刺激よりも過小評価されている。この結果は，網膜像差と遠近法手がかりの間に矛盾が存在する場合に，知覚される誘導刺激の傾きが過小評価されるという考えによって説明できる。もっとも重要なこととして，ランダムドットの誘導刺激における両眼傾き対比は，実験3,4において得られたものと同じ程度だったことである。これらの結果は，誘導刺激のテクスチャの種類が，本実験における両眼傾き対比において重要な役割を果たしていなかったことを示唆している。

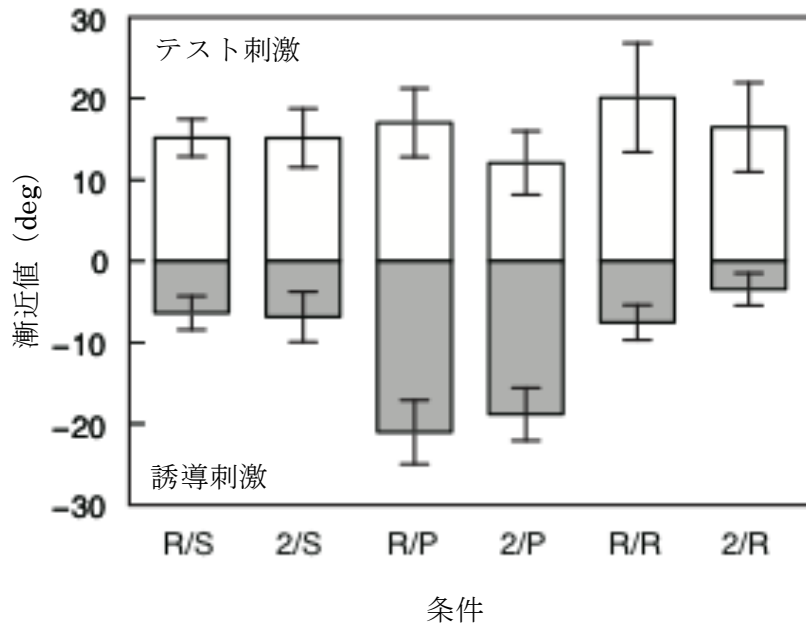


図18 実験3から実験5の概略

異なる条件における漸近値の平均。白いバーはテスト刺激の漸近値を、灰色のバーは誘導刺激の漸近値をそれぞれ示す。R/Sは、誘導刺激が $20^\circ$ の場合のドット面・正方形条件（実験3）を、2/Sは2ドット・正方形条件、R/Pはドット面・遠近法条件、2/Pは2ドット・遠近法条件（実験4）を、R/Rはドット面・ドットフレーム条件、2/Rは2ドット・ドットフレーム条件（実験5）を表す。エラーバーは標準誤差を表す。

### 3.5. 第3章の考察

#### 3.5.1. 第3章の実験のまとめ

三つの実験の結果から、以下の三点が明らかになった。第一に、両眼傾き対比と知覚される誘導刺激の傾きは、単純に増加した。第二に、手がかり矛盾条件において、誘導刺激よりもテスト刺激の知覚される傾きの方が大きく、手がかり間の矛盾が減少した場合において、誘導刺激とテスト刺激の知覚される傾きは同定度であった。第三に、テスト刺激や誘導刺激の形状が異なる場合でも、両眼傾き対比は全般的に一貫していたが、誘導刺激の知覚される傾きは遠近法手がかりの存在によって変化した。これらの結果は、誘導刺激の知覚される傾きが増加する場合に、両眼傾き対比が減少すると予測する手がかり矛盾仮説とは完全には一致しなかった。

#### 3.5.2. 傾き推定理論

手がかり矛盾仮説の中心的な予測は、van Ee et al. (1999) が提案した傾き推定理論に基づいている。実際に、傾き推定理論は、少しの仮定を加えることで、

本章の実験の結果をいくつかの面で説明することができる。この節では、誘導刺激の遠近法と提示時間の影響を別個に考慮していく。

誘導刺激の遠近法 van Ee et al.の式 (5) によれば、テスト刺激の傾き  $S_t$  は、網膜像差によって定義される傾きである  $S_{id}$  と、網膜像差によって定義される誘導刺激の傾きと、遠近法によって定義される誘導刺激の傾きの違い ( $S_{id} - S_{ip}$ ) に誘導刺激の遠近法の重み付けである  $W_{ip}$  を掛けた数式から推定される。

$$S_t = S_{id} - W_{ip} (S_{id} - S_{ip}) \quad (4)$$

van Ee et al.の式 (9) から、遠近法手がかりによって定義される誘導刺激の傾きは、統制可能な要素 ( $S_{ic}$ ) と統制不可能な要素 ( $S_{iu}$ ) に分けられる。統制不可能な要素とは、van Ee et al.が彼らの実験条件において統制不可能であった要素のことを示し、輻輳運動や画像の粒状性などを示す。

$$W_{ip} S_{ip} = W_{ic} S_{ic} + W_{iu} S_{iu} \quad (5)$$

$W_{ic}$  は統制可能な傾き信号に対する重み付けであり、 $W_{iu}$  は統制不可能な傾き信号に対する重み付けである。これらの式 (4) , 式 (5) から

$$S_t = S_{id} - W_{ip} S_{id} + W_{ic} S_{ic} + W_{iu} S_{iu} \quad (6)$$

を得ることができる。

本章の実験において使用した刺激は、テスト刺激は網膜像差がゼロであり ( $S_{id} = 0$ ) , コントロール不可能な非両眼信号は、モニタの一定のピクセル配列や、眼球の位置、眼球の調節などの結果から来ると推定され、すなわち傾きゼロを示す (前額平行面,  $S_{iu} = 0$ ) 。誘導刺激が正方形である条件においては、誘導刺激の遠近法信号は、傾きゼロを示す (すなわち,  $S_{ic} = 0$ ) 。これらの仮定から、正方形の誘導刺激におけるテスト刺激の傾き ( $S_{t, square}$ ) は、以下のように表される。

$$S_{t, square} = - W_{ip} S_{id} \quad (7)$$

遠近法条件においては、誘導刺激に対する遠近法信号が、網膜像差によって定義される傾きと同定度の傾きを示す (すなわち  $S_{ic} = S_{id}$ ) 。これらの前提や、 $W_{ip} = W_{ic} + W_{iu}$ を踏まえ、遠近法条件におけるテスト刺激の傾き ( $S_t$ ) は、以下のように表すことができる。

$$S_{t, perspective} = - W_{iu} S_{id} \quad (8)$$

短時間提示において、網膜像差による定義と同定度の傾きを示す遠近法手がかりによって、両眼傾き対比が比較的影響を受けなかったという結果 (すなわ

ち  $S_{t, \text{square}} \approx S_{t, \text{perspective}}$ ) を説明するために、コントロール不可能な傾き信号の重み付け  $W_{iu}$  は、誘導刺激の遠近法信号である  $W_{ip}$  と等しいと推定する必要がある。

### 3.5.3. 提示時間の影響

van Ee et al. の式 (1a) と (6) によれば、誘導刺激の傾き  $S_i$  は、以下のように推定される。

$$S_i = W_{id} S_{id} + W_{ip} S_{ip} \quad (9)$$

$W_{id}$  は誘導刺激の網膜像差に対する重み付けである。式 (5) , 式 (9) より

$$S_i = W_{id} S_{id} + W_{ic} S_{ic} + W_{iu} S_{iu} \quad (10)$$

を得ることができる。テスト刺激の場合と同様に、前述した前提から、正方形条件と遠近法条件における傾きの推定は、以下のように表すことができる。

$$S_{i, \text{square}} = W_{id} S_{id} + W_{ic} S_{ic} + W_{iu} S_{iu} \quad (11)$$

$$S_{i, \text{perspective}} = (W_{id} + W_{ic}) S_{id}$$

短い提示時間における誘導刺激とテスト刺激の知覚される傾きの現象を説明するためには、式 (7) , (8) , (11) を考慮し、4つの重み付けの値 ( $W_{id}$  ,

$W_{ip}$ ,  $W_{iu}$ ,  $W_{ic}$ ) を減少させる必要がある。言い換えれば、これらの重み付けの値は提示時間の関数として増加する必要がある、 $W_{id} + W_{ip} = 1$ ,  $W_{ip} = W_{iu} + W_{ic}$  という二つの制約が、異なる提示時間においては効果がない可能性がある。誘導刺激の遠近法手がかりと提示時間についてのこれらの考察は、van Ee et al. (1999) や Sato & Howard (2001) においては述べられていない。

#### 3.5.4. 先行研究との関連

本章の実験結果は、提示時間が増加するほど、両眼傾き対比が減少するという Kumar & Glaser (1993) の結果とは一致していない。本章の実験と Kumar & Glaser (1993) の研究には、二つの方法的な違いがある。第一に、本章の実験ではテスト刺激における手がかり間の矛盾を排除するため、全ての実験において網膜像差を持たないテスト刺激を使用するマッチング課題を使用しているが、Kumar & Glaser (1993) では、観察者がテスト刺激の網膜像差を変えることのできる恒常法が用いられている。この違いについては、Sato & Howard (2001) がマッチング課題における両眼傾き対比の測定は、キャンセル課題による測定と定性的に一致していると報告しており、Kumar & Glaser (1993) と本章の実験結

果の違いを説明できるとは考えにくい。第二に、本章の実験では網膜像差を持たないマスクを刺激のあとに提示していたが、Kumar & Glaser (1993) ではマスクを使用していない。Kumar & Glaser (1993) と同様に、光や明るさの対比の研究において、マスクを使用しない短時間提示の場合、対比効果が大きくなることが報告されている（例えば、Blakeslee & McCourt, 2008; Kaneko & Murakami, 2012, Robinson & de Sa, 2008）。これらの研究を考慮すれば、視覚的な属性の種類（明るさや色、傾き）に関わらず、後続マスクは短い時間のみ提示された刺激の知覚を低下させるのかもしれない。本章の実験においては、刺激の提示時間が増加した場合、傾きの評価がより信頼性が高くなっている、すなわち、時間的に局所的な傾きが統合あるいは加算されると考えられる（Allison & Howard, 2000 や Gillam, Chambers, & Russo, 1988 において議論されている）。これは、手がかりの重み付けの増加と関係していると考えられ、傾きがゼロの場合の推測的仮定を伴う、ベイズ的傾き推定モデルとしてモデル化されている（van Ee, Adams, & Mamassian, 2003）。本章の実験における傾きの知覚は、刺激の提示から約200 msの時点で漸近値に到達しているため、網膜像差の統合あるいは加算は相対的に速く行われると推定される。Kumar & Glaser (1993) と本章の実験結果を考慮

すれば、刺激の提示後にマスクが提示された場合には、この手がかりの重み付けの増加は生じないのではないかと考えられる。

本章においては、手がかり間の矛盾が減少した場合でも、両眼傾き対比が減少しなかった。この結果は、本章の刺激においては、誘導刺激とテスト刺激の間の知覚される傾きの違いが一定ではなかったことを示唆している。この結果は、網膜像差と遠近法手がかりが一致した刺激において、両眼傾き対比が減少することを報告した van Ee et al. (1999) や Sato & Howard (2001) の報告と明らかに一致しない。この二つの先行研究と本章の実験との間には、たとえば観察者の課題や、刺激の大きさ、提示時間などいくつかの実験手順の違いがあることに留意しなければならない。第一に、van Ee et al. (1999) はキャンセル課題を用いて両眼傾き対比を測定しており、Sato & Howard (2001) はキャンセル課題、マッチング課題の両方を用いて測定を行なっている。本章では、刺激であるステレオグラムの消失後に観察者に調整を求める、異なるタイプのマッチング課題を用いている。すなわち、今回用いたマッチング課題が、本章の実験結果に大きな影響を与えていると論じることもし得るかもしれない。しかし、実験3において、本章のマッチング課題は、誘導刺激の傾きの違い ( $30^\circ$  ,  $20^\circ$  )

によって期待される知覚される誘導刺激の傾きの違いと同様に、両眼傾き対比の微妙な違いを捉えられるほど、十分に精度が高かった。よって、この課題の違いという方法的な差異が、先行研究との結果の違いに影響を与えているとは考えにくい。第二に、先行研究においては刺激の大きさが比較的大きく（視角で $30^\circ$ 以上）、本章における刺激は比較的小さなもの（視角で $6^\circ$ 以下）であった。刺激の大きさに関しても、先行研究との結果の違いに影響を与えているとは考えにくい。Gillam & Pianta (2005) は、誘導刺激とテスト刺激の間の相対的な傾きは、小さな刺激（視角で $7^\circ$ 以下）という異なる空間的な配置であっても、ほぼ一貫していると報告している。最後に、先行研究における刺激の提示時間は相対的に長く、本章の実験においては短かった。前述したように、残りの二つの要因は先行研究との結果の違いに影響を与えているとは考えにくく、提示時間の長さの差異が、本章の実験結果に影響を与えた可能性が高いと言える。

結論として、本章の実験では、短い提示時間（1s以下）において、誘導刺激の遠近法手がかりに影響を受けない両眼傾き対比が観察された。加えて、提示時間が増加するにつれて、両眼傾き対比も増加することを明らかにした。本章

の実験結果は、手がかり矛盾仮説による予測とは一致しなかった。このことから、提示時間が短い傾き対比の場合には、他の手がかりに比べ、網膜像差と遠近法手がかりの間の矛盾は比較的小さな役割しか果たしていないことが明らかとなった。

## 第4章 総合考察

#### 4.1. はじめに

本稿では、第2章において Howard & Rogers (1995) の標準化仮説についての検証を行い、第3章においては、刺激の提示時間を変化させ、van Ee et al. (1999) の手がかり矛盾仮説についての検証を行なった。第2章で、線分で構成されたステレオグラムにおいて、奥行き標準化は局所的な効果として作用することが明らかとなった。ただし、ステレオグラムを用いた近年の研究 (Van der Kooij & te Pas, 2010) において、両眼傾き対比が全体的な効果として作用することが報告されており、現時点では全体的な奥行き標準化が存在する可能性を排除することはできない。Van der Kooij & te Pas (2010) の研究では奥行き手がかり間の矛盾が存在するステレオグラムが用いられたため、両眼傾き対比は、手がかり間の矛盾が存在する場合に全体的な効果として現れるのかもしれない。今後の展望として、全体的な標準化も生じる可能性について、手がかり間の矛盾に着目した研究を行うことが考えられる。

第3章においては、刺激の提示時間が短い場合、手がかり間の矛盾を減少させた条件であっても、両眼傾き対比が減少しないことが明らかとなった。すなわち、提示時間が短い場合の両眼傾き対比においては、網膜像差と遠近法手がかり

りの間の矛盾は、比較的小さな役割しか果たしていないことを示している。この結果はvan Ee et al. (1999) の手がかり矛盾仮説による予測とは一致せず、傾き推定理論についての修正の必要性を示唆するものである。

#### 4.2. 手がかり統合と標準化の仮説的モデル

図19に、先行研究と本稿における研究から推定した、手がかり統合と標準化の仮説的モデルを示す。この図では、左に位置するものほど初期に処理され、右に位置するものの処理が高次であることを示す。また、破線で示したのは、今後の研究において明らかにすべき部分である。本稿の第2章の研究において、局所的な標準化は手がかり間の矛盾の影響が少ないことが明らかとなっている。加えて、第3章においては、刺激の提示時間が短い場合、手がかり間の矛盾を減少させた条件であっても、両眼傾き対比が減少しないことが明らかとなった。よって、絶対的な網膜像差と相対的な網膜像差の統合、および局所的な標準化は手がかり統合より初期の段階で行われると考えられる。

前述したように、Van der Kooij & te Pas (2010) の研究では全体的な標準化が報告されている。Van der Kooij & te Pas (2010) の研究では手がかり間の矛盾が

大きいステレオグラムを用いており、全体的な標準化は手がかり統合より後の段階で行われているのではないかと考えられる。また、本稿における研究では、網膜像差と線遠近法手がかり以外の奥行き手がかりについての検討を行っていない。そのため、局所的な標準化に対してその他の奥行き手がかりの処理が影響するかどうかは、今後の検討課題である。

この仮説的モデルは定性的なモデルであり、刺激提示からの処理の流れを考慮した定量的なモデルの考案も今後の行うべき課題である。

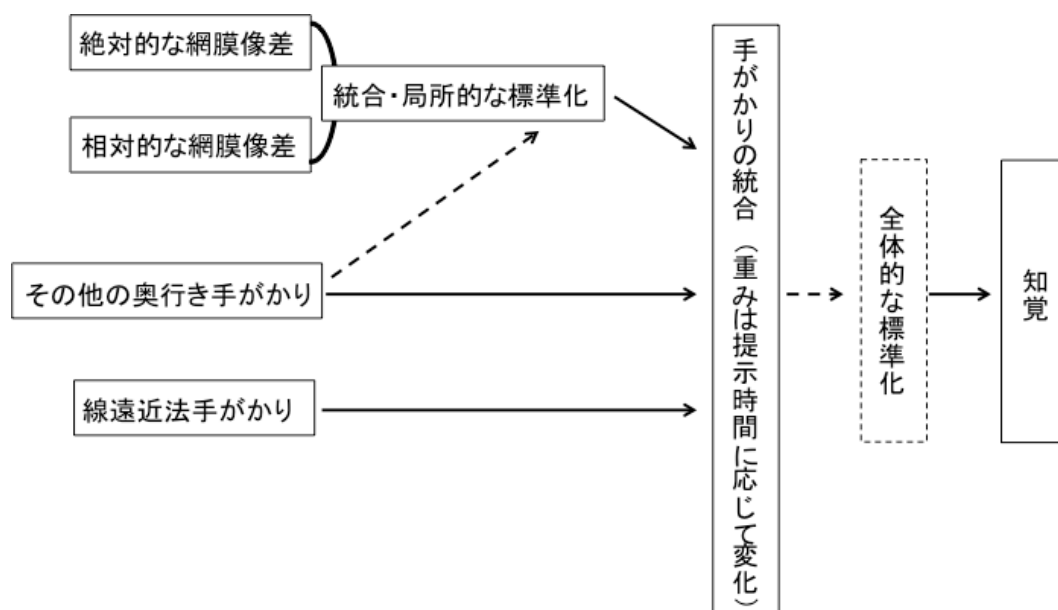


図19 手がかり統合と標準化の仮説的モデル

左に位置するものほど初期に処理され、右に位置するものほど処理が高次であることを示す。

#### 4.3. 奥行き知覚メカニズムの解明に向けて

脳神経科学の分野では、マカクザルを対象とした研究において、第二次視覚野（V2）や第四次視覚野（V4）に相対的な網膜像差に選択的に応答する細胞が存在することが報告されており（Thomas, Cumming, & Parker, 2002; Umeda, Tanabe, & Fujita, 2007），相対的な網膜像差に関する両眼立体視の神経機構についての研究が進みつつある。一方で、相対的な網膜像差の存在が、知覚される奥行きや傾きにどのような影響を与えるのか、あるいは奥行き手がかりの統合が時間的にどう変化するのは完全には解明されておらず、神経科学的な検討は十全であるとは言えない。本稿における研究は、視覚系の3次元空間の推定について新たな知見を加え、神経機構を含めた奥行き知覚メカニズム解明の一助となるものである。

#### 4.4. 応用可能性について

本稿における研究で提案したモデルは、VR空間において、よりリアルな3D体験を提供するための技術へと応用できる可能性がある。ゲームへの応用が先進分野となっている事実から推察できるように、VR空間においては日常生活に

近い体験ではなく、より劇的でスピード感のある体験が求められる。従来までの奥行き知覚のモデルでは、短時間で目まぐるしく変化する映像に即した奥行き感を推定することは難しい。本研究で提案した、相対的な網膜像差と奥行き統合の時間的な変化を考慮したモデルは、視覚系の特性に即したスピード感とリアルな奥行き感の両方を提供する技術への応用が期待できる。

## 引用文献

Alison, R. S., & Howard, I. P. (2000). Temporal dependencies in resolving monocular and binocular cue conflict in slant perception. *Vision Research*, **40**, 1869–1886.

Blakeslee, B., & McCourt, M. E. (2008). Nearly instantaneous brightness induction. *Journal of Vision*, **8**, 15.1–15.8.

Cogan, A. I. (1979). The relationship between the apparent vertical and the vertical horopter. *Vision Research*, **19**, 655–665.

Conover, W. J. (1999). *Practical nonparametric statistics* (3rd ed.). New York, NY: John Wiley & Sons.

Gillam, B., Blackburn, S., & Brooks, K. (2007). Hinge versus twist: the effects of 'reference surfaces' and discontinuities on stereoscopic slant perception. *Perception*, **36**, 596–616.

van Ee, R., & Banks, M. S., Backus, B. T. (1999). An analysis of binocular slant contrast. *Perception*, **28**, 1121-45

van Ee, R., & Erkelens, C. J. (1996a). Temporal aspects of binocular slant perception.

*Vision Research*, **36**, 43–52.

van Ee, R., & Erkelens, C. J. (1996b). Anisotropy in Werner's binocular depth-contrast

effect. *Vision Research*, **36**, 2253–2262.

van Ee, R., & Schor, C. M. (2000). Unconstrained stereoscopic matching of lines.

*Vision Research*, **40**, 151–162.

Gillam, B., Chambers, D., & Russo, T. (1988). Postfusional latency in stereoscopic

slant perception and the primitives of stereopsis. *Journal of Experimental Psychology:*

*Human Perception and Performance*, **14**, 163–175.

Gillam, B., Flagg, T., & Finlay, D. (1984). Evidence for disparity change as the primary

stimulus for stereoscopic processing. *Perception & Psychophysics*, **36**, 559–564. 93

Gillam, B. J., & Pianta, M. J. (2005). The effect of surface placement and surface

overlap on stereo slant contrast and enhancement. *Vision Research*, **45**, 3083–3095.

Howard, I. P. (2012). *Perceiving in depth (Vol. 3). Other mechanisms of depth perception*. New York, NY: Oxford University Press.

Howard, I. P., & Kaneko, H. (1994). Relative shear disparities and the perception of surface inclination. *Vision Research*, **34**, 2505–2517.

Howard, I. P., & Rogers, B. J. (1995). *Binocular Vision and Stereopsis*. New York: Oxford University Press.

Howard, I. P., & Rogers, B. J. (2012). *Perceiving in depth, vol 2. Stereoscopic vision*. New York, NY: Oxford University Press.

Kaneko, S., & Murakami, I. (2012). Flashed stimulation produces strong simultaneous brightness and color contrast. *Journal of Vision*, **12**, 1. doi:10.1167/12.12.1

金子寛彦 (2007). 立体・奥行き知覚の手がかり 内川恵二・塩入諭 (編) 視覚 II 朝倉書店 pp. 67-99

金谷健一 (1990). 画像理解—3次元認識の数理— 森北出版.

van der Kooij, K., Te Pas, S. F. (2009a). Perception of 3D shape in context: contrast and assimilation. *Vision Research*, **49**, 746–751.

van der Kooij, K., & Te Pas, S. F. (2010). Shape contrast: a global mechanism. *Vision Research*, **50**, 2455–2459.

Kumar, T., & Glaser, D. A. (1993). Temporal aspects of depth contrast. *Vision Research*, **33**, 947–957.

Mitsudo, H., Kaneko, H., & Nishida, S. (2009). Perceived depth of curved lines in the presence of cyclovergence. *Vision Research*, **49**, 348–361.

Mitsudo, H., Sakai, A., & Kaneko, H. (2013). Vertical size disparity and the correction of stereo correspondence. *Perception*, **42**, 385–400.

Nijhawan, R. (1995). ‘Reversed’ illusion with three-dimensional Müller-Lyer shapes. *Perception*, **24**, 1281–1296.

Pastore, N. (1964). Induction of a stereoscopic depth effect. *Science*, **144**, 888.

Rensink, R. A., & Enns, J. T. (1995). Preemption effects in visual search: Evidence for low-level grouping. *Psychological Review*, **102**, 101–130.

- Robinson, A. E., & de Sa, V. R. (2008). Brief presentations reveal the temporal dynamics of brightness induction and White's illusion. *Vision Research*, **48**, 2370–2381.
- Sato, M. (2004). A psychophysical study on the anisotropy and individual differences in human depth perception. *International Congress Series*, **1296**, 97–100.
- Sato, M., & Howard, I. P. (2001). Effect of disparity–perspective cue conflict on depth contrast. *Vision Research*, **41**, 415–426.
- Schwartz, O., Hsu, A., & Dayan, P. (2007). Space and time in visual context. *Nature Reviews Neuroscience*, **8**, 522–535.
- 塩入諭 (2000). 網膜像差立体視の時空間特性とサブシステム 日本視覚学会 (編) 視覚情報処理ハンドブック 朝倉書店 pp. 229-307
- 杉原厚吉 (2006). 立体イリュージョンの数理 共立出版.
- Thomas, M. O., Cumming, G. B., & Parker, J. A. (2002). A specialization for relative disparity in V2. *Nature Neuroscience*, **5**, 472–478.

- Umeda, K., Tanabe, S., & Fujita, I. (2007). Representation of Stereoscopic Depth Based on Relative Disparity in Macaque Area V4. *Journal of Neurophysiology*, **98**, 241-251
- Werner, H. (1938). Binocular depth contrast and the conditions of the binocular field. *American Journal of Psychology*, **51**, 489–497.

## 謝辞

本研究を行うにあたって、多くの方にご協力、ご支援を頂きました。快く実験の観察者を引き受けていただいた九州大学大学院の院生の皆様、九州大学文学部の学部生の皆様。

行動システム専攻の先生方や、院生の皆様、光藤研究室のゼミ生の皆様には、研究に関して有意義なコメントを数多くいただきました。

九州大学文学部心理学研究室の技術職員である黒木大一郎様には、実験準備や設備等の面でお世話になりました。

現在の職場であるトリニティカレッジ出雲医療福祉専門学校の皆様には、繁忙期にお休みをいただき、ご迷惑をおかけいたしました。

中村知靖先生、山本健太郎先生先生、趙世晨先生にはお忙しい中、本稿の審査を引き受けていただき、有意義なご意見をいただきました。

最後に、学部時代よりお世話になり、博士後期課程の単位修得退学後も引き続きご指導いただきました光藤宏行先生。経済的に、精神的に支えていただきました家族の皆様。この場を借りて皆様に厚くお礼を申し上げます。本当にありがとうございます。