

陰影による空間形状知覚における周辺視覚情報による 光源位置推定

澤田 忠正^{***}・金子 寛彦^{**}

*Department of Psychological Sciences, Purdue-University
703 3rd Street, West Lafayette, Indiana 47907–2081, USA

**東京工業大学 理工学研究科附属 像情報工学研究施設
〒226–8503 神奈川県横浜市緑区長津田町 4259 R2–60

(受付：2006年1月6日；改訂稿受付：2006年8月28日；受理：2006年9月25日)

Extracting Illuminant Direction from Visual Information for Perceiving Shape from Shading

Tadamasa SAWADA^{***} and Hirohiko KANEKO^{**}

*Department of Psychological Sciences, Purdue-University
703 3rd Street, West Lafayette, Indiana 47907–2081, USA

**Imaging Science and Engineering Laboratory, Tokyo Institute of Technology
R2–60, 4259 Nagatsuta, Midori-ku, Yokohama-city 226–8503

(Received 6 January 2006; Received in revised form 28 August 2006; Accepted 25 September 2006)

To reconstruct shape from shading, the illuminant direction is important. Many researchers have reported that human visual systems extract the illuminant direction from visual information for perceiving shape from shading. Pentland (1982) proposed that only the luminance distribution was needed to extract the illuminant direction from visual information. Besides, Berbaum et al. (1984) proposed that shape perception of other objects along with the surface luminance distributions was needed. However, Berbaum et al. (1984) pointed out that these two models haven't been separately investigated in previous researches. In this research, we investigated how the human visual system extracts the illuminant direction from visual information for perceiving shape from shading to test the validities of the models. For the purpose, we manipulated independently binocular disparity to specify shape perception and luminance distribution of the stimulus. The results implied that both Pentland and Berbaum model were valid and that human visual system extracts the illuminant directions from the two systems and chose one of them depending on the stimulus situation for perceiving shape from shading, although there were individual differences.

1. はじめに

陰影は、人間が空間形状を知覚するための絵画的な手掛りの一つである。陰影とは物体が光源から照明されることにより生じる輝度分布であり、陰影から空間形状を知覚するために光源方向の推定が必要である。

陰影を手掛かりとして空間形状を知覚するた

めに、人間の視覚系はいくつかの仮定を用いて光源方向の推定を行う。光源が視野の上方に存在するという仮定（光源上方仮定）や¹⁻³⁾、光源が視野全体に唯一という仮定（光源唯一仮定）などが働くことが知られている^{1,2,4)}。

人間の視覚系は上記の仮定に加えて、陰影を手掛かりとして空間形状を知覚するために視覚刺激から得られる情報からも光源方向を推定し

ている⁵⁻⁸⁾。そしてその方法に関して、二つのモデルが提案されている。Pentland⁹⁾は刺激の二次元的な輝度分布だけから光源方向を推定するというモデルを提案している。また、同様の仮説がMamassian¹⁰⁾によっても提案されている。一方で、Berbaumら⁷⁾は、物体の知覚される空間形状とその物体の表面輝度分布の関係から光源方向を推定するというモデルを提案している。これらの二つのモデルはどちらが正しいのか、またはどのような状況でこれらのモデルが使い分けられているのかは検討されていない。Pentlandのモデルは観察しているシーン中の物体形状は全体的に凸状であり、物体表面の法線の方向は全ての方向に均等に分布しているという仮定を用いることで、空間形状の知覚を介さずに輝度分布だけから光源方向を推定するというものである⁹⁾。例えば、視覚刺激中で輝度が直線的かつ単調に変化する場合、このモデルは輝度変化軸にそって明るい方向に光源方向を推定する。これを本研究では以降Pentlandモデルと呼ぶ。一方で、Berbaumらの提案した光源方向推定モデルは、視野内に複数の物体がある場合、知覚空間形状が明確な物体の表面輝度分布とその知覚空間形状の関係から光源方向を推定するというものである⁷⁾。これを本研究では以降Berbaumモデルと呼ぶ。

Pentland⁹⁾とMamassian¹⁰⁾は、光源方向を直接応答するという手法により、Pentlandモデルの有効性を検証している。一方でBerbaumら⁷⁾は、陰影から知覚される空間形状が曖昧な物体の空間形状知覚に与える推定光源方向の影響を調べることで、Berbaumモデルの有効性を検証している。しかし、Berbaumら自身が指摘するように、彼等の実験ではPentlandモデルとBerbaumモデルのそれぞれを分離して検討できる条件ではなかった。そのため、これらの実験では二つの光源方向推定モデルが陰影による空間形状知覚に与える影響は明らかではなかった。本研究では、PentlandモデルとBerbaumモデルから推定される光源方向が、陰影による空間形状知覚に与える影響を検証し、陰影から空間

形状を知覚するために、人間の視覚系がどのようにして視覚刺激から得られる情報から光源方向を推定しているのかを明らかにすることを目的とする。

2. 実験 1

実験1では、空間形状の凹凸が曖昧なテスト刺激を画面の中央に、光源方向情報を与える小片刺激を周辺に配置し、その周辺刺激がテスト刺激の知覚空間形状に与える影響を調べた。被験者はテスト刺激の知覚空間形状の凹凸を応答した。周辺刺激の条件はPentlandモデルに基づいて光源方向が示される条件(P条件とする)と、Berbaumモデルに基づいて光源方向が示される条件(B条件とする)の2条件であった。周辺刺激を構成する小片刺激の空間構造は両眼視差により与えられ、周辺刺激の輝度分布と空間構造の関係により、PentlandモデルかBerbaumモデルかどちらか一方に基づいて特定の光源方向を示すようにコントロールされた。周辺刺激から示される光源方向はテスト刺激の空間形状を凹凸それぞれに示す2条件(凸条件と凹条件)であった。仮にどちらかのモデルによって示されるメカニズムにより光源方向が推定されているのであれば、対応する条件(PもしくはB条件)において、周辺刺激の示す光源方向から推定されるテスト刺激の形状(凸条件においては凸形状、凹条件においては凹形状)と、その時の知覚空間形状(凸もしくは凹応答)が一貫すると考えられる。

2.1 実験刺激

実験1で用いられた刺激は、画面中央のテスト刺激とそれを囲うように配置された周辺刺激からなっていた。テスト刺激(図1b)は、図1aのような凸形状を前額面に配置し、照明を当てた状況を模擬することで生成された。模擬された空間形状の各点における法線と、前額面の法線の成す角度は45度よりも小さかった。また、これらの空間形状を照明する光源方向は、前額面の法線と45度の角度を成すように模擬された。そのため、模擬された空間形状の表面に投

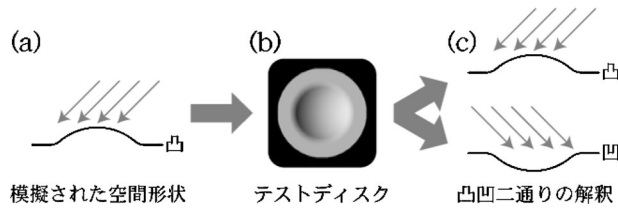


図1 実験1,2で用いられたテスト刺激に関する概念図。(a)テスト刺激を生成するために、模擬された空間形状と照明方向。物体を照明する光源方向は刺激の背景面（呈示される時の前額面）の法線と45度の角度を成すように模擬された。(b)テスト刺激として用いられた画像。テスト刺激の輝度分布のみでは、それが凸形状を模擬したものか、凹形状を模擬したものかを判断することはできない。(c)この場合、右から照明されていたと解釈すれば凸形状、左から照明されていたと解釈すれば凹形状に対応する。

射影 (cast shadow) や自己遮蔽影 (attached shadow)¹¹⁾ を生じなかった。このようにして作られた刺激は過去の陰影に関する研究^{4,5)} に用いられた刺激と同様に、光源方向が曖昧な条件では陰影から知覚される空間形状は曖昧であり、光源方向が明確になると空間形状が定まる。図1bの場合、光源が右方と想定するとテスト刺激の空間形状は凸と定まり、左方と想定すると凹と定まる。実験刺激は両眼で観察するが、テスト刺激の視差情報は平面を示していた。テスト刺激の全体の大きさは視角3.78度であり、中心の輝度グラデーションを持つ部分は2.40度であった。テスト刺激の最高輝度は37.1 cd/m²、最低輝度は6.4 cd/m²であった。

周辺刺激は868枚の正方形の小片により構成された(図2)。周辺刺激を構成する小片には、刺激の中心を見たときの視軸方向と小片の法線の成す角度が0~45度の範囲となるような傾きがあり、両眼視差によりランダムに付加された。また、小片刺激の四辺による線遠近法情報も両眼視差により示される傾き情報と一貫していた。周辺刺激全体の大きさは視角20.41度であり、個々の小片刺激の四辺の長さは前額面上の時で0.46度であった。周辺刺激を構成する小片刺激の最高輝度は41.5 cd/m²、最低輝度は3.3 cd/m²、背景の輝度は0.01 cd/m²であった。個々の小片刺激の輝度は一様であった。周辺刺激の条件はP条件(図2a)とB条件(図2b)の2条件あり、周辺刺激全体の輝度分布が大きく異なった。P条件では個々の小片刺激の輝度は小片刺激の位

置に依存していた(図2a)。周辺刺激全体では単調な輝度変化となっており、個々の小片の輝度は、刺激の中心付近±3.78度の範囲で41.5 cd/m²から3.3 cd/m²へと小片毎に段階的に変化し、それ以上離れた位置では一定の値(41.5 cd/m²か3.3 cd/m²)であった。このような条件下では、Pentlandモデルによる光源方向は輝度変化軸にそって明るい方向に推定される。一方で個々の小片刺激の傾きと輝度に決まった関係はないため、Berbaumモデルにより輝度分布と空間構造の関係に基づいて光源方向を推定することはできない。B条件では、個々の小片刺激の輝度は、周辺刺激を作成する際に模擬された視野全体で単独の光源方向と小片刺激の傾きに依存した(図2b)。光源方向と小片刺激の傾きによる輝度の変化はLambertの法則に基づいたものであった。結果として、B条件では個々の小片刺激は傾きに対応した輝度が割り当てられたが、周辺刺激全体で輝度はランダムな分布となった。B条件の周辺刺激を観察した場合は、小片刺激の傾きが分かればBerbaumモデルにより模擬された光源方向を推定することができる。一方で周辺刺激全体では輝度はランダムに分布していたため、Pentlandモデルにより輝度分布のみに基づいて光源方向を推定することはできない。

テスト刺激の輝度グラデーションの方向は、0度~315度の範囲で45度間隔の角度のいずれかで、試行毎にランダムであった。テスト刺激と周辺刺激の関係は、周辺刺激から推定される

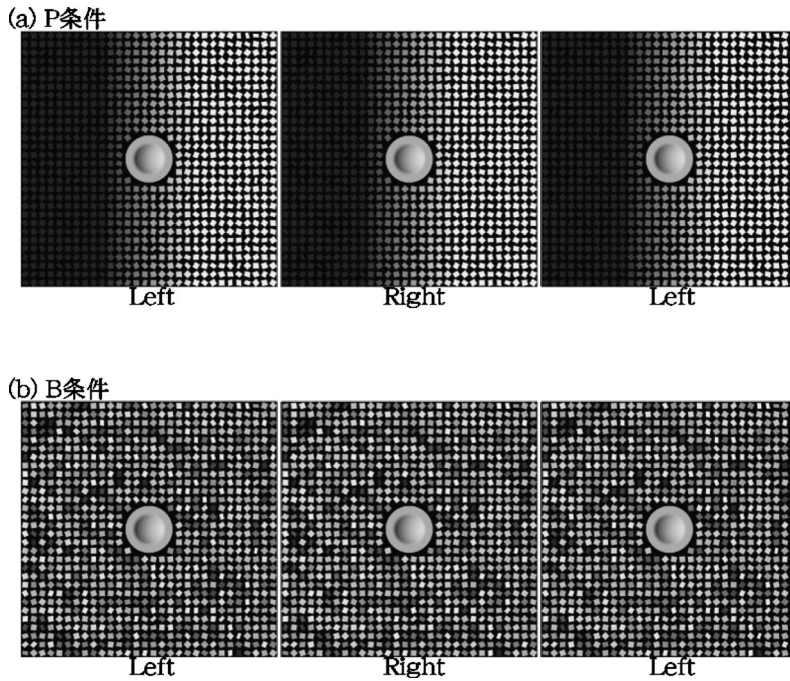


図2 実験1で用いた視覚刺激。(a) P条件で用いられた周辺刺激。周辺刺激を構成する各小片はランダムな傾きが視差によって示され、周辺刺激全体で単調に輝度に変化していた。そのため、各小片の輝度は小片の位置に依存していた。(b) B条件で用いられた周辺刺激。各小片はランダムな傾きで、各小片の輝度は傾きに依存していた。(a) (b) 共に左2つの画像は平行法、右2つの画像は交差法によるステレオ立体視に対応している。

光源方向（P条件ではPentlandモデル、B条件ではBerbaumモデルによる）が、テスト刺激の空間形状を凸と示す条件（凸条件）と凹と示す条件（凹条件）の二条件であった。この関係はテスト刺激と周辺刺激の相対的なものなので、中心のテスト刺激の陰影方向の試行毎の変化に伴い、周辺刺激から推定される光源方向も変化した。

実験は暗室内で行われた。視覚刺激の生成と呈示はパーソナルコンピュータ（Macintosh G4）により制御され、刺激は暗室内のCRTモニターに呈示された。また、両眼視差情報を用いて周辺刺激の空間構造を示すためステレオシャッター眼鏡を用いた。被験者は、モニターを視距離50cmの距離から両眼で観察した。被験者の頭部は顎台で固定された。

2.2 手順

各トライアルにおいて、周辺刺激がテスト刺

激に先行して呈示された。被験者は最初にその周辺刺激を観察し、両眼視差による各小片刺激の傾きが明確に知覚されたら手元の応答用コントローラーで合図をした。その0.5秒後に周辺刺激の中心にテスト刺激が追加呈示された。被験者は周辺刺激だけが呈示されている間は周辺刺激全体を見渡すように、テスト刺激が呈示されたらテスト刺激を観察するように教示された。周辺およびテスト刺激はテスト刺激が呈示されてから2.0秒で消えた。被験者は刺激が消えた後に、手元の応答用コントローラーで知覚されたテスト刺激の空間形状を凹凸の二者択一で応答した。

実験条件は合計32条件（=2（P条件／B条件）×8（陰影方向）×2（凸条件／凹条件））であった。実験は各条件8試行の合計256試行から成り、条件はランダムな順序で呈示された。被験者は著者TSを含む7名であり、著者以外

の6名は実験の目的は知らされていなかった。被験者は全員視力もしくは矯正視力が正常で、両眼立体視も正常であった。被験者全員の両眼立体視能力は、実験の前にP条件とB条件の周辺刺激をそれぞれ観察して、視差により示される小片刺激の傾きを知覚できるかどうかにより確認された。

2.3 結果と考察

それぞれの被験者が各条件8試行のうち凸と応答した回数をプロットしたものを図3に示す。レーダーグラフの軸の方向はテスト刺激の陰影による輝度グラデーション方向と対応しており、輝度グラデーションが水平方向に右から左へ減衰する条件を陰影方向0°の条件とした。図3aのグラフは周辺刺激がP条件、図3bはB条件の結果である。プロット線の違いは周辺刺激とテスト刺激の相対的な関係を示しており、実線は凸条件、点線は凹条件に対応している。また、凸条件と凹条件における全陰影方向の凸応答数の和をプロットしたものを、図3c (P条件)と図3d (B条件)に示す。各グラフの縦軸は凸応答数であり、横軸は被験者である。グラフのシンボルの違いは凸条件(黒)と凹条件(白)に対応する。実験1で着目すべき点は、P条件とB条件のそれぞれにおける凸条件と凹条件の間の差である。そのため、実験1ではP条件とB条件のそれぞれで2要因被験者内の分散分析(8(陰影方向)×2(凸条件/凹条件))を行なった。

P条件において、周辺刺激により推定される光源方向がテスト刺激の空間形状を凸と示す条件では、凹と示す条件よりも凸と応答する回数が多くなる傾向が見られた($F(1, 6)=9.25, p<0.05$)。被験者は周辺の各小片刺激の傾きを視差に基づいて知覚することは実験前に確認されており、P条件においては各小片刺激の傾きと輝度に一貫した関係はない。そのため、P条件においてはBerbaumモデルにより光源方向を推定することはできなかつたと考えられる。これらの結果は、輝度分布だけから光源方向を推定するPentlandモデルの妥当性を示してい

る。一方のB条件では、周辺刺激の条件の変化による被験者間で一貫した影響は特に見られなかった($F(1, 6)=0.28, p>0.10$)。この結果は、Berbaumモデルが今回の実験条件においては無効、もしくはその効果が非常に小さいことを示している。

周辺刺激の条件によらず、全ての被験者でレーダーグラフの上半分で凸と応答する回数が多く、下半分で少ない傾向が見られた(P条件: $F(7, 42)=11.29, p<0.01$; B条件: $F(7, 42)=9.49, p<0.01$)。これは、テスト刺激の陰影が上から下へ暗くなる条件は凸に知覚されやすく、下から上へ暗くなる条件は凹に知覚されやすいということを示している。この傾向は、光源上方仮定から予測される傾向である。P条件とB条件のどちらにおいても、陰影方向と凸条件/凹条件の間に交互作用は見られなかった(P条件: $F(7, 42)=1.76, p>0.10$; B条件: $F(7, 42)=1.44, p>0.10$)。

実験1の結果より、輝度分布のみによって光源方向を推定するPentlandモデルの有効性が示された。一方、知覚される空間構造に基づいて光源方向を推定するBerbaumモデルの有効性を示すような結果は得られなかった。しかし、実験1で用いた光源情報は過去のBerbaumらの研究⁶⁾で用いた光源情報と大きく異なっており、このような違いが実験1の結果でBerbaumモデルの働きを弱めた可能性がある。Berbaumらの研究では、視覚的な光源情報として単独の物体に生じる輝度分布を用いたため、個々の物体の空間形状と連続的な輝度変化の関係から光源方向を推定することが可能であった。一方で、実験1のB条件では複数の小片刺激の傾きと小片刺激間の離散的な輝度変化の関係から光源方向を推定するような実験刺激の構成となっていた。つまり、実験1のB条件のような離散的な輝度分布と空間形状の関係からは、Berbaumモデルは光源方向を推定できない可能性がある。そのため連続的な輝度分布と空間形状の関係から光源方向を推定することが可能な周辺刺激を用いてBerbaumモデルの有効性を再度検討する

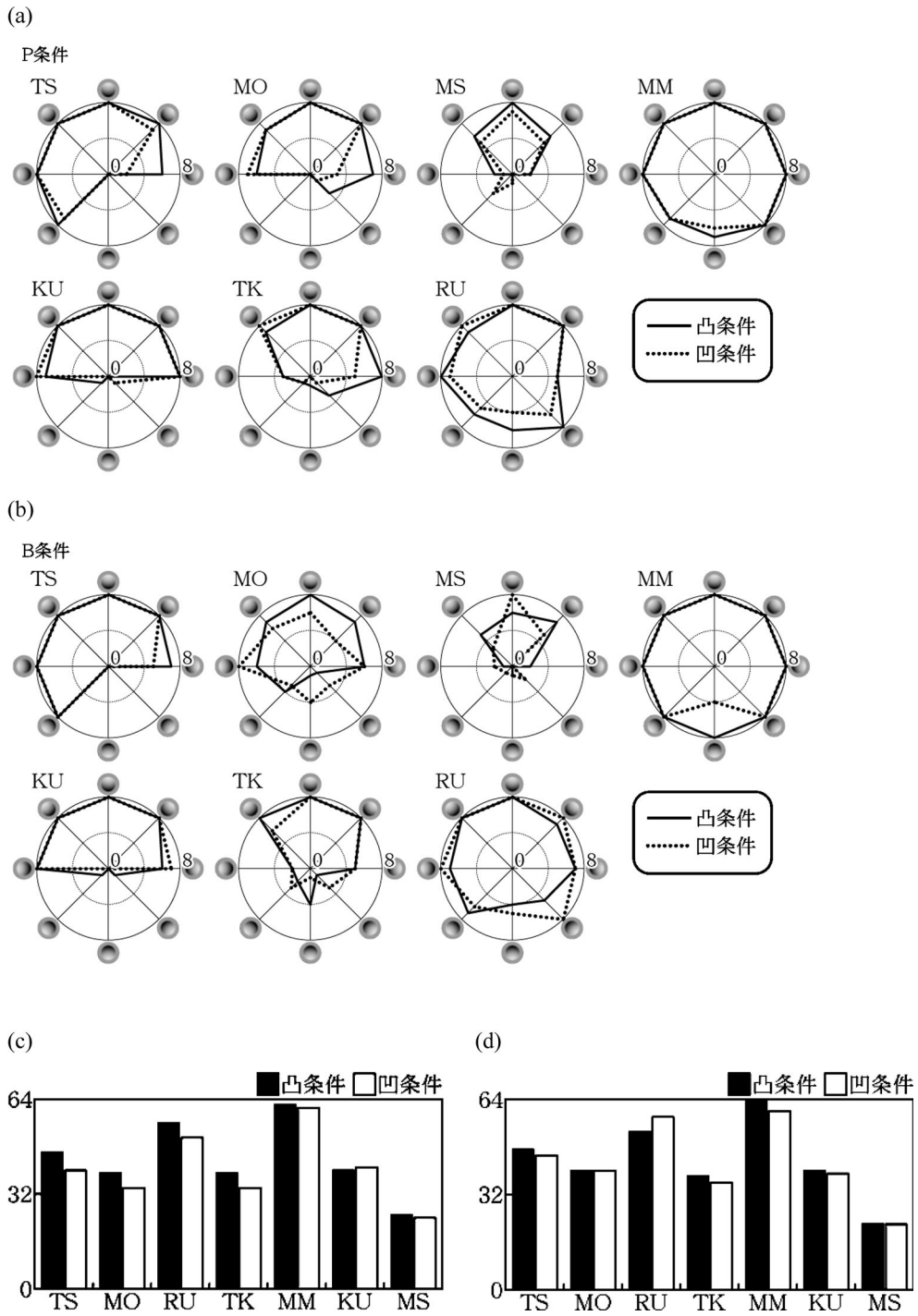


図3 実験1の各被験者の結果。グラフは各条件における凸と凹条件の回答した回数をプロットしたものである。(a)はP条件、(b)はB条件の結果であり、実線は凸条件、点線は凹条件を示す。

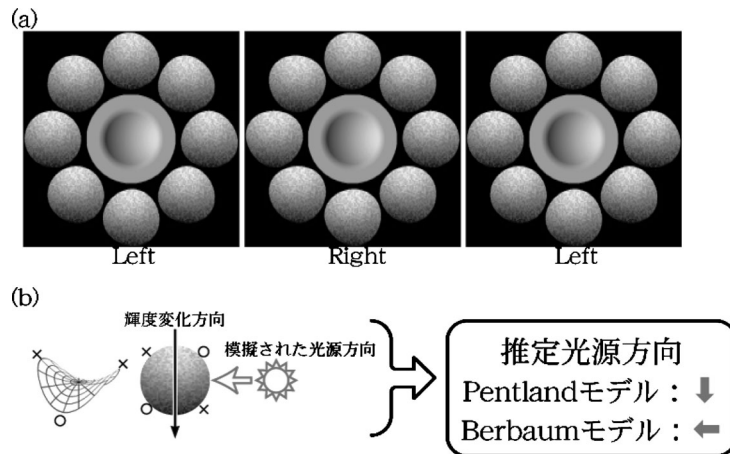


図4 (a) 実験2で用いた刺激。テスト刺激周辺の刺激は、両眼視差により馬の鞍形状として示された。左2つの画像は平行法、右2つの画像は交差法によるステレオ立体視に対応している。(b) 実験で用いられた馬の鞍形状を照明する光源方向の条件。図の条件では模擬された光源方向は上からで陰影による輝度グラデーションは右から生じている。そのため、Pentlandモデルでは推定光源方向が右になるのに対して、Berbaumモデルではそれとは直交して上となり、二つの推定光源方向は直交する。

ため、以下の実験2を行なった。

3. 実験 2

実験2では、周辺に配置する刺激として、馬の鞍形状¹²⁾を用いた(図4a)。馬の鞍形状は、模擬される配置と光源方向の条件によって、図4bに示すように陰影により物体表面に生じる輝度分布と光源方向を直交させることができる。このような刺激を用いた場合、知覚される空間構造に基づいて光源方向を推定するBerbaumモデルの有効性を、輝度分布だけから光源方向を推定するPentlandモデルと分離して検討することができる。例えば図4の条件では、輝度分布だけから光源方向を推定するPentlandモデルは光源方向を上と推定するが、空間形状と輝度分布の関係から光源方向を推定するBerbaumモデルは模擬された光源方向(右)と同じ方向を推定する。そのため、図4aのように陰影による輝度分布が水平方向に変化するテスト刺激を配置した場合、Berbaumモデルから推定される光源方向(右)はテスト刺激の知覚される空間形状の凹凸に影響を与えると考えられるが、直交するPentlandモデルから推定される光源方向(上)は影響を与えないと考えられる¹³⁾。

3.1 実験刺激

実験刺激は、テスト刺激とそれを囲うように配置された周辺刺激からなっていた。周辺刺激は8つの馬の鞍形状から構成された(図4a)。鞍形状は両眼視差により示された。それぞれの鞍形状の持つ陰影による輝度分布は、視差により示される鞍形状をLambertの法則に基づいて特定の光源方向から照明した場合を模擬したものであり、直線的かつ単調な輝度変化を持っていた。光源方向は、前額面に直角に平行投影した場合に、鞍形状の陰影による輝度分布と直交するような条件が選ばれた。陰影と合わせて、両眼視差による鞍形状の知覚を促進するためテクスチャパターンが加えられた。馬の鞍刺激の大きさは視角2.40度であり、鞍刺激の中心がテスト刺激の中心から3.32度離れた位置に、回転方向45度毎に8個呈示された。鞍刺激の最高輝度は41.3 cd/m²、最低輝度は9.1 cd/m²であった。

テスト刺激は実験1と同様であった。テスト刺激の陰影による輝度グラデーションの方向は試行毎にランダムな角度(0度~315度の範囲で45度間隔の角度のいずれか)で呈示された。中心のテスト刺激と周辺刺激の関係は、周辺刺

激から Berbaum モデルにより推定される光源方向が、テスト刺激の空間形状を凸と示す条件（凸条件）と凹と示す条件（凹条件）の二条件であった。このとき、Pentland モデルから推定される光源方向はテスト刺激の陰影方向と直交しており、凹凸の判断には影響を与えないと考えられる¹³⁾。Pentland モデルから推定される光源方向とテスト刺激の陰影方向が直交する方向は、 ± 90 度でカウンターバランスが取られた。この関係はテスト刺激と周辺刺激の相対的なものなので、テスト刺激の陰影方向の変化に伴い、周辺刺激から推定される光源方向も変化した。

実験 2 においても、実験 1 と同様の実験原理により Pentland モデルを検証することが理論的には可能である。テスト刺激の陰影方向を周辺刺激から Pentland モデルにより推定される光源方向と平行となるように配置した場合、Berbaum モデルから推定される光源方向はテスト刺激の陰影方向と理想的には直交する。このような条件では、Pentland モデルから推定される光源方向はテスト刺激の知覚される空間形状の凹凸に影響を与えるが、直交する Berbaum モデルから理論的に推定される光源方向は影響を与えないと考えられる。しかし、Berbaum モデルは Pentland モデルと異なり、知覚される周辺の鞍刺激の空間形状に依存する。予備実験においては、視差により定義した鞍形状は必ずしも理想的な鞍形状には知覚されず、凸形状に近い鞍形状が知覚されていた。実際に Berbaum モデルから推定される光源方向は周辺の鞍刺激の空間形状に依存するため、この場合は、推定される光源方向がテスト刺激の陰影方向と直交するとは限らず、テスト刺激の陰影による空間形状知覚に影響を与える可能性がある。以上の理由から、実験 2 の刺激では Berbaum モデルから推定される光源方向が陰影による空間形状知覚に影響を与えないような条件を作り出し、Pentland モデルを独立に検証することは難しかった。一方で、Pentland モデルは空間形状知覚に依存せず刺激の輝度分布にのみ依存するため、テスト刺激の陰影方向と直交させる、つまり Pent-

land モデルから推定される光源方向がテスト刺激の陰影による空間形状知覚に影響を与えない条件を作り出し、Berbaum モデルを検証することは可能である。そのため、実験 2 では Berbaum モデルに関してのみ検証を行なった。

実験は実験 1 と同一の暗室内で行なわれた。両眼視差情報は、ステレオシャッター眼鏡を用いることで与えられた。実験 1 と同様に、視距離は 50 cm であり、被験者の頭部は顎台で固定された。

3.2 手順

各トライアルでの実験手順は、実験 1 と同様であった。被験者は最初に周辺の馬の鞍刺激を観察し、両眼視差による馬の鞍形状を明確に知覚できたと判断したら手元の応答用コントローラーで合図をした。その後追加呈示されるテスト刺激の凹凸を被験者は二者択一で応答した。

実験条件は合計 16 条件（=8（陰影方向） \times 2（凸条件／凹条件））であり、各条件 8 試行の合計 128 試行から成った。それらはランダムな順序で呈示された。被験者は著者 TS と HK を含む 8 名であり、著者以外の 6 名は実験の目的は知らされていなかった。被験者は全員視力もしくは矯正視力が正常で、両眼立体視も正常であった。被験者全員の両眼立体視能力は、実験の前に視差による鞍形状を知覚できるかどうかにより確認された。

3.3 結果と考察

各条件 8 試行のうち凸と応答した回数を被験者毎にプロットしたものを図 5a に示す。レーダーグラフの軸の方向はテスト刺激の陰影による輝度グラデーション方向と対応している。プロット線の違いは周辺刺激とテスト刺激の相対的な関係を示しており、実線は凸条件、点線は凹条件（Berbaum モデルにより推定される周辺刺激に対する光源方向がテスト刺激の空間形状を凸または凹と示す条件）に対応している。また、凸条件と凹条件における全陰影方向の凸応答数の和をプロットしたものを、図 5b に示す。各グラフの縦軸は凸応答数であり、横軸は被験者である。グラフのシンボルの違いは凸条件

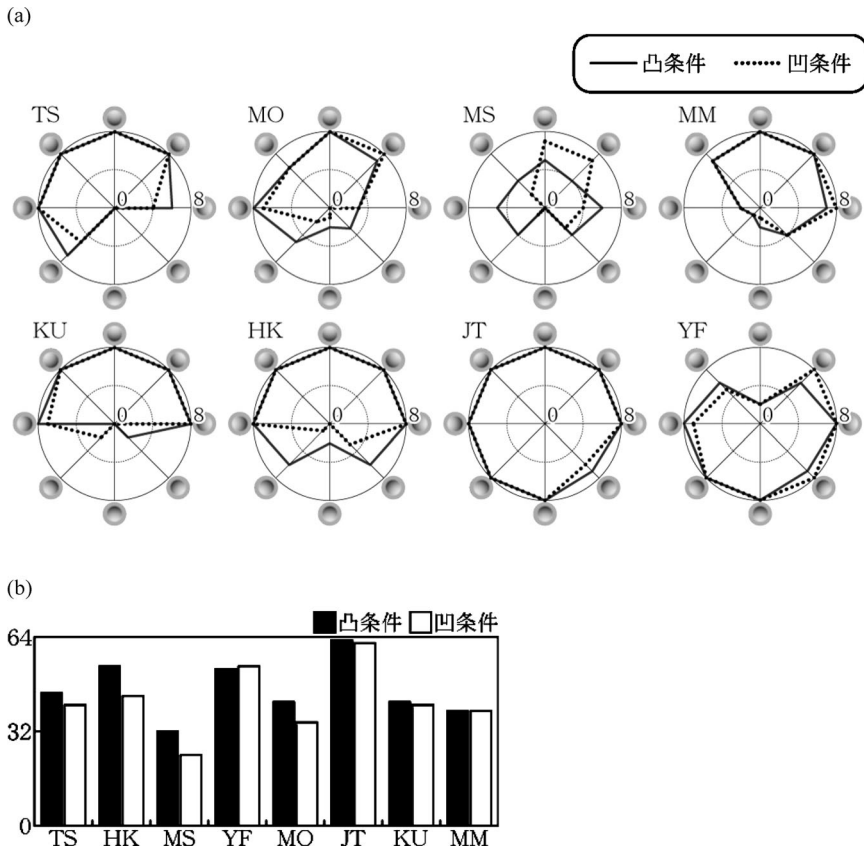


図5 実験2の各被験者の結果. グラフは各条件における凸と応答した回数をプロットしたものである. 実線は凸条件, 点線は凹条件を示す.

(黒)と凹条件(白)に対応する. 実験結果の分析のため, 実験2では被験者内2要因の分散分析(2(凸条件/凹条件) \times 8(陰影方向))を行なった.

周辺刺激の条件によらず, YFとJTを除く全ての被験者でレーダーグラフの上半分で凸と応答する回数が多く, 下半分で少ない傾向が見られた($F(7, 49)=5.99, p<0.01$). この傾向は実験1でも観察されており, 光源上方仮定から予測される傾向である.

結果より, 凸条件では, 凹条件よりも凸と応答する回数が増える傾向が見られた($F(1, 7)=6.59, p<0.05$). この結果は, 表面輝度分布と知覚される空間形状の関係から光源方向を推定するBerbaumモデルが有効であることを示唆している. また陰影方向と凸条件/凹条件の間に交

相互作用が見られた($F(7, 49)=2.35, p<0.05$). 単純主効果検定より, 凸条件/凹条件は陰影方向315度の条件でのみ有意傾向が見られた(315度: $p<0.10$). また, 凹条件における陰影方向225度の条件は, レーダーグラフの上半分の条件(0度~180度)よりもそれぞれ有意に凸応答が少なかったのに比べ($p<0.05$), 凸条件における陰影方向225度の条件は, 90度の条件よりも有意に凸応答が少なかったのみであった($p<0.05$). その他の条件においては, 凸条件と凹条件の間に統計的な結果の違いは見られなかった. これらの結果は, 陰影方向が225度と315度と光源上方仮定が影響し難い条件に限定して, Berbaumモデルに基づいた視覚的な光源方向情報の影響が見られたことを示している.

4. 総合考察

本研究の実験1の結果は、輝度分布から直接光源方向を推定するPentlandモデルが陰影による空間形状知覚において働くことを示唆するものであった。また実験2の結果は、輝度分布と知覚される空間構造の関係から光源方向を推定するBerbaumモデルが陰影による空間形状知覚において弱いながらも働くことを示唆するものであった。これらの結果から、人間の視覚系は観察状況に合わせてより信頼性の高い光源方向の推定ができるように、複数の光源推定メカニズムの使い分けをしている可能性が示唆される。しかし、Pentlandの輝度分布から直接光源方向を推定するモデルは、物体形状が全体的に凸状であるという仮定を置くことで導出されたものであり、一方で多くの単独の物体の空間形状は全体的に凸状である。そのため、多くの場合これら2つのメカニズムは同一の推定光源方向を出力するため、通常では互いの信頼性を高めあうように働くのではないかと考えられる。

本研究の結果から示されたPentlandモデルとBerbaumモデルによる光源情報は、陰影からの空間形状知覚以外の光源情報が関わる知覚に影響を与えるだろうか？ 陰影による空間形状知覚には、実際の光源（例：デスクランプ）の呈示のように高次の情報による光源方向推定が影響を与えることが示されており¹⁴⁾、陰影による空間形状知覚のために光源の位置などに関する情報が処理されていると考えられる。一方で、表面明度知覚には光源情報は影響しないことが示されている¹⁵⁾。これらのことから、陰影からの空間形状知覚に影響を与える特定の光源情報が、他の光源に関わる知覚に影響を与えるかどうかは、個別に検討する必要があると考えられる。

Berbaumモデルの有効性は実験1と2で共に検討されたが、実験1ではBerbaumモデルの有効性を支持する結果ではなかった。一方で、実験2の結果はBerbaumモデルを支持するものであった。実験1と実験2の違いは、光源方向推

定に用いられる周辺刺激であったため、周辺刺激の違いが実験1と実験2の結果の違いを生み出したと考えられる。実験1では、周辺刺激としてランダムな傾きの小片刺激を用いた。個々の小片刺激は正方形であり、小片刺激内部の輝度分布は一様であった。そのため、周辺刺激からBerbaumらの光源方向推定メカニズムに基づいて光源方向を推定するためには、複数の小片刺激の離散的な傾きと輝度との関係から光源方向を割出す必要があった。一方、実験2では、周辺刺激として8つの馬の鞍形状を用いた。周辺の馬の鞍形状は両眼視差により曲面が示され、物体表面にはそれに対応した陰影による輝度分布を持っていた。そのため、実験2では連続的に知覚される空間形状と表面の輝度分布から光源方向を推定できた。このような実験1と実験2の違いから、Berbaumモデルのように空間構造と輝度分布の関係から光源方向を推定するためには、連続的な曲面の知覚とその表面に生じる連続的な輝度分布が必要であると考えられる。

本研究で見られた、周辺の光源方向情報が陰影による空間形状知覚に与える影響は、過去の研究と比べると非常に弱いものであった⁵⁻⁸⁾。これは視覚的な光源方向情報に関する、二つの違いが影響していると考えられる。一つは、PentlandモデルとBerbaumモデルそれぞれの示す光源方向の違いである。過去の研究で用いられた視覚的な光源方向情報は、これら二つのモデルにより推定される光源方向が同一となる条件下で実験が行なわれていた。しかし今回の実験では上の段落で述べたように、一方のモデルからのみ光源方向を推定可能な条件（実験1）、もしくは一方のモデルから推定される光源方向のみが陰影による空間形状知覚に有効な条件（実験2）において実験が行なわれた。もう一つの違いは、今回の実験で用いられた視覚的な光源情報とテスト刺激は分離した異なる物体であったことによる。本研究では、周辺刺激から推定される光源方向がテスト刺激を照明する光源方向として推定される、すなわち光源唯一仮定^{1,2,4)}を前提としていたのに対して、過去のいくつか

の実験ではテスト刺激そのものを照明する光源方向を直接的に与えるものであった^{5,6)}。過去の報告より、“光源唯一仮定”は複数の物体間では単独の物体内の場合と比べて働きが弱くなる可能性がある²⁾。過去の研究と本研究のこれら二つの違いが、実験1と実験2において視覚的な光源方向情報が弱く働いたことの要因と考えられる。

本研究の実験1と実験2において、全体的に凸応答が多いという傾向が見られた。このような傾向は、凸形状仮定として過去に多く報告されており、経験や親近性によると考えられてきた¹³⁾。凸形状仮定は輝度分布だけから直接光源方向を推定する Pentland モデルと対応する。つまり、仮にこのような視覚的な光源方向予測が本研究の実験に用いたようなテスト刺激の持つ局所的な輝度グラデーションにも働くとなると、テスト刺激の輝度グラデーションと Pentland モデルによって輝度分布から示される光源方向は凸形状と対応する。しかし、実験1より Pentland モデルによる光源方向の予測には必ずしも凸形状の知覚を伴う必要がないことが示された。そのため、凸形状仮定は Pentland モデルにより推定される光源方向による影響である可能性がある。

本研究の実験1,2において、陰影から知覚される空間形状の呈示時間内の変化を多くの被験者が報告した。過去の研究においても同様の現象が報告されている¹⁴⁾。仮に、陰影による空間形状知覚に働く仮定（凸形状仮定や光源上方仮定）や視覚的な光源情報など複数の要因が示す空間形状の加算や平均によって単一の空間形状が出力されているのであれば、安定した単一の空間形状が陰影から知覚されると考えられるが、これは空間形状知覚の観察中における変化と矛盾する。一方で、空間形状知覚における複数の要因の統合を、Mamassian と Landy¹⁶⁾ はベイズ決定理論による確率と勝者総獲得法によるモデルで説明している。呈示時間内の知覚空間形状の変化がベイズ決定理論による確率が時間軸上に反映されたものとすれば、Mamassian と

Landy のモデルと矛盾しない。これらのことから、陰影から示される空間形状の候補が複数存在する場合、勝者総獲得法により選択された単一の空間形状が出力されるようなモデルにより説明することができると考えられる。このような陰影による知覚空間形状の選択に影響を与える要因として、上記の視覚的な光源情報、光源上方仮定や凸形状仮定の他に、経験に基づいた光源方向推定^{17,18)} や、形状に関する親近性^{13,19)} が考えられる。陰影による空間形状知覚に Mamassian と Landy のモデルを当てはめられるならば、被験者間の結果の違いは、陰影による空間形状知覚に働く複数の要因の統合時に個々の被験者の経験の違いが重み付けとして反映された可能性がある。

文 献

- 1) V. S. Ramachandran: Perception of shape from shading. *Nature*, **331**, 163–166, 1988.
- 2) V. S. Ramachandran: Perceiving shape from shading. *Scientific American*, **256**, 58–65, 1988.
- 3) I. P. Howard, S. S. Bergstrom and M. Ohmi: Shape from shading in different frames of reference. *Perception*, **11**, 523–530, 1990.
- 4) R. C. Morris: Shadows and depth illusions. *Perception*, **25**, 927–929, 1996.
- 5) A. Yonas, M. Kuskowski and S. Sternfels: The role of frames of reference in the development of responsiveness to shading information. *Child Development*, **50**, 495–500, 1979.
- 6) K. Berbaum, T. Bever and C. S. Chung: Light source position in the perception of object shape. *Perception*, **12**, 411–416, 1983.
- 7) K. Berbaum, T. Bever and C. S. Chung: Extending the perception of shape from known to unknown shading. *Perception*, **13**, 479–488, 1984.
- 8) 澤田忠正, 金子寛彦: 陰影による空間形状知覚に影響を与える複数の要因の空間特性. *映像情報メディア学会誌*, **57**, 597–602, 2003.
- 9) A. P. Pentland: Finding the illuminant direction. *Journal of the Optical Society of*

- America*, **72**, 448–455, 1982.
- 10) P. Mamassian: Impossible shadows and the shadow correspondence problem. *Perception*, **33**, 1279–1290, 2004.
 - 11) D. C. Knill, P. Mamassian and D. Kersten: Geometry of shadows. *Journal of the Optical Society of America A*, **14**, 3216–3232, 1997.
 - 12) R. G. F. Erens, A. M. L. Kappers and J. J. Koenderink: Perception of local shape from shading. *Perception and Psychophysics*, **54**, 145–156, 1993.
 - 13) V. S. Ramachandran: 2-D or not 2-D that is the question. *R. L. Gregory, J. Harris, P. Heard and D. Rose (eds): The Artful Eye*. Oxford Univ. Press, London, 249–266, 1995.
 - 14) B. Mapperson and W. Lovegrove: Instability in triangular-wave gratings: a role for perceptual inference? *Perception*, **12**, 545–548, 1983.
 - 15) A. L. Gilchrist and A. Radonjic: Computing lightness at a slant: Taking light source direction into account versus a relaxed coplanar ratio model. *Journal of Vision*, **6**, 393a, 2006.
 - 16) P. Mamassian and M. S. Landy: Interaction of visual prior constraints. *Vision Research*, **41**, 2653–2668, 2001.
 - 17) J. Sun and P. Perona: Where is the sun? *Nature Neuroscience*, **1**, 183–184, 1998.
 - 18) W. J. Adams, E. W. Graf and M. O. Ernst: Experience can change the ‘light from above’ prior. *Nature Neuroscience*, **7**, 1057–1058, 2004.
 - 19) R. L. Gregory: *The intelligent eye*. Weidenfeld and Nicolson, London, 1970.