

ブラッドパターンにおける窓問題と奥行き知覚

中村 隆志

新潟大学 人文学部

〒 950-2181 新潟市五十嵐 2 の町 8050

(受付：2005 年 2 月 21 日；改訂稿受付・受理：2005 年 5 月 28 日)

Takashi NAKAMURA

Faculty of Humanities, Niigata University

8050 Nino-cho, Igarashi, Niigata 950-2181, Japan

(Received 21 February 2005; Received in revised form and accepted 28 May 2005)

Beutter et al. (*Vision Research*, **36**, 3061–3075, 1996) pointed out that both the ratio of elongated aperture and the spatial frequency bias the perceived direction of motion of the plaids that are composed of sine-wave gratings. They criticized the IOC and other models for spatial integration of motion signals. In this paper, experiments were designed such that a drifting plaid of grating bars formed the stimulus; it was windowed by a rectangular frame with the same luminance as that of the background. The subjects were asked to continuously observe this plaid pattern. The results revealed that the duration for perceiving coherent motion of the plaids is affected by both the ratio of the rectangular windows and the spatial frequency; this is in agreement with the results in Beutter et al. (1996). Further, our results suggested that the stimulus in this experiment is also under the barber pole effect caused by the elongation of the aperture. It should be noted that for the stimulus used in this experiment, the plaid is perceived as a single net-like structure in coherent motion similar to other plaid patterns. However, in component motion, each grating is perceived to move parallel to the longer frame of the rectangular aperture and not perpendicular to its orientation. Hence, the two grating bars move in directions opposite to each other in a different depth plane. In order to explain this observation, our analysis was focused on the width of the grating bars and relatability (Kellman & Shipley: *Cognitive Psychology*, **23**, 141–221, 1991). It was suggested that the phenomenon is affected by the conditional decision of the terminators (extrinsic or intrinsic) with relatability.

1. はじめに

窓問題³⁻⁵⁾は、「窓」の解釈次第でアプローチが異なる。観察者にとって限られた視野内で観察を続ける際、対象の運動方向を一意に決定できない場合にいかにして方向を知覚しているのかという問題と、限られた受容空間にのみ対応している 1 次視覚野の方向選択細胞が得る情報を、いかに統合して対象の運動方向を決定するのかという問題に分かれる。前者の場合には、窓の形に起因するバーバーポール効果（例えば文献 6）と境界上の奥行き知覚（例えば文献 7）

が問題になる。後者の場合はブラッドパターンとその属性（例えば文献 8）が問題となる。特に後者の場合、Adelson & Movshon⁸⁾ が 2 段階モデルを提唱し、説明原理としての IOC^{*1} への期待が高まった。

ブラッドパターンについての IOC による運動

*1 ブラッドパターンの運動知覚は、個々の格子縞の局所的な運動方向の検出とその統合という 2 段階の処理過程を経て達成されるとされている。特に 1 次的情報として得られた二つの運動方向ベクトルの各々と直交する二つの制約線同士の交点の方向が、その統合過程において得られるべき運動方向であるとする幾何学的解法を IOC (Intersection of Constraints) と呼ぶ。

統合の制約条件についての検討が行われ、空間周波数差⁸⁾、コントラスト差⁹⁾、あるいは交点の輝度差による奥行き手がかり¹⁰⁾がコヒーレント運動^{*2}の知覚に影響することが示された。二つの格子縞間に遮蔽関係を起こすような奥行き知覚の手がかりが明瞭なとき、二つの格子縞は互いに独立した要素運動が知覚され、奥行き手がかりが希薄な場合には両者が統合したコヒーレント運動が知覚される。これらの研究が注目するのは、ブラッドパターンの格子縞間の輝度差（例えば文献9）、格子縞の交点と交点以外の縞部分との輝度差（例えば文献10）、格子縞間の周波数差（例えば文献11, 12）、あるいは、格子縞同士のスライド速度差（例えば文献13）などである。

これらと前後して、IOCが運動統合の説明原理として働くための前提として、縞模様のパターンが剛体である必要があること¹⁴⁾、および空間的に離れた2領域で統合される運動方向の知覚はIOCでの理論予測とずれること^{15,16)}が指摘された。また、ブラッドパターンの運動方向決定において窓枠の形状の曖昧さが運動方向決定に影響を与えること¹⁷⁾が指摘され、縞模様の剛体性や交点の属性以外にも、運動方向決定に影響を与える要因が存在することが明らかになった。つまり、運動情報を統合すること、窓枠の形との相関があること、あるいは、格子縞の境界の属性の決定との相関があることが示された。このことは、運動方向の決定において、局所的な運動統合の説明原理としてのIOC以外に、全体的形の知覚や奥行き知覚の影響が大きく関与していることを示している。また、Bressan et al.¹⁸⁾は、静止した格子縞に対して運動する格子縞を上書きした場合にも、合成されるブラッドパターンについてコヒーレント運動が知覚されうること示した。つまり、運動情報そのものは片方の格子縞にしかなく、統合さ

れるべき2方向の運動情報が揃っていない場合にも、二つの格子縞が一つの模様となってコヒーレント運動が知覚されうることになり、コヒーレント運動自体は運動情報だけによって知覚されるわけではないことを示した。一連の研究は、IOCそのものは運動情報を統合するためのグランドセオリーではなく、限られた条件での運動知覚を説明するものであることを強調する。

Beutter et al.¹⁾は、正弦波を用いたブラッドパターンにおいて、窓の長短比や縞の周期が知覚される運動方向に影響があることを示した。運動方向がだ円形の窓の長径方向にずれることから、このずれはブラッドパターンにバーバーポール効果が働いた結果であると主張する。本稿では、この指摘における運動方向のずれが、窓の長短比と縞の周期に依存することに注目し、窓枠が背景と同色であるような矩形波格子縞のブラッドパターンにおける依存性を調査した。運動知覚への影響は、要素運動が知覚される時間的割合で示され、窓の長短比と格子縞の周期が本稿で用いたブラッドパターンの運動知覚にも影響を及ぼすことを示した。

この刺激の要素運動は、ちょうど反対方向に運動する二つのバーバーポールが一つの窓枠内で交差してすれ違っているかのように見える。二つの矩形波格子縞は互いに別の奥行き平面に定位して反対方向に運動し、両者は互いに「ぶつかる」ことなく運動するよう知覚される。本実験で用いた矩形波格子縞の要素運動は、従来のブラッドパターン研究で述べられていたような格子の方位に直交する方向ではなく、窓の長辺方向、つまり、バーバーポール効果の影響下にあると見せる運動方向に知覚されることを指摘する。適当な条件下では、要素運動の知覚とコヒーレント運動の知覚が数秒間隔で入れ替わる（図1）。

さらに、矩形波格子縞の太さと運動方向の決定との相関を指摘する。両者の関与は、主観的輪郭の誘導のされやすさを表す *reliability*²⁾、遮蔽関係、ならびに境界の属性（*extrinsic* と *intrinsic*）に基づいて示される。これらの関係をもとにして、ブラッドパターンに見られた交差

^{*2} Coherent motion の訳語で「一貫した運動」とも訳される。ブラッドパターンを形成する二つの格子縞が各々運動する際に、二つの格子縞が一つのネット状の模様となって、全体として1方向に動くように観察される運動のこと。

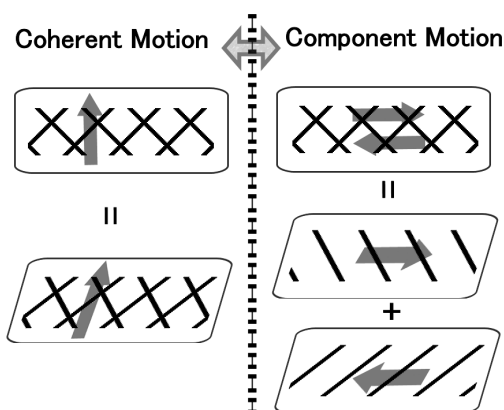


図1 本稿の実験刺激の2通りの知覚状態を模式的に表す。それぞれ、左側がコヒーレント運動、右側が要素運動である。コヒーレント運動知覚時には、ブラッドパターンがネット状の一つの模様となって1方向に運動すること、要素運動知覚時には、二つの格子縞が別々の前額平行面に定位して逆方向に「すれ違う」ように、つまり二つのバーバーポールイリュージョンが別々にすれ違って運動して見えることを表している。

するバーバーポールイリュージョンの特性について、また、窓枠上で誘導される主観的輪郭と奥行き知覚と運動方向との関係について考察する。

2. 実験刺激と方法

刺激はすべてノート型パソコン Sony Vaio PCG-505Z で作成され、15 インチ TFT 標準液晶ディスプレイで表示された。スクリーンの解像度は 1024×768 である。水平、垂直方向から 45° 傾いた斜めの方形波からなる縞模様の grating bar 部の輝度は 9 cd/m² であり、白い背景の輝度は 98 cd/m² である。フレームレートは 30 frame/s であり、45° 傾いた二つの縞模様は各フレーム毎に水平あるいは垂直方向に 1 ピクセル移動するよう作られている。被験者は約 57 cm の距離から刺激を両眼で観察する。顎を乗せる台などは使用せず、また刺激内に注視点を設けることもしなかった。

アニメーション刺激の縦横の長さは約 5.8° (240 ピクセル) である。窓の長辺方向は約 4.8° (200 ピクセル) であり、アニメーションフレームの真ん中に位置している。窓については、文

献 19~23 で採用された方法論に習い、窓枠はブラッドパターンの背景と同色同輝度 (白色、98 cd/m²) とした。つまり、白い無地の背景上を 45° 傾いた 2 組の矩形波格子縞が運動することになる。窓枠と背景の不連続性は矩形波格子縞が運動して初めて露わになる。この条件下では、端点が intrinsic であるか extrinsic であるか^{7,24} を判断する際に、矩形波格子縞の運動状態の影響を受けることになる²⁰⁻²³。各刺激において、一様な輝度、格子縞の周期、スライド速度、格子縞の太さとも、二つの縞模様間で共通であることを強調しておく。

刺激はパソコンディスプレイ上に呈示され、被験者にその刺激の中心部分を持続的に見るように要請した。さらに刺激呈示中には、キーボード上に指を置き、模様の運動方向が水平方向、あるいは垂直方向に感じられたら、キーボード上のキーを入力するように要請した。実験を始める前に、被験者に実験で用いる刺激と条件が近く、窓の長短比と格子縞の周期が大きい刺激をテスト用に観察させて同時にキー入力の練習も行った。この刺激を用いた練習用刺激の観察後に各被験者に質問をして、

1. 二つの縞模様が一つの模様に統合されて、交点の移動方向に運動して見える場合があること (コヒーレント運動)、
2. 各縞模様は別々の模様となって、窓の長辺に平行に正反対の方向に運動して見える場合があること (要素運動)、
3. 持続的に観察するとコヒーレント運動と要素運動が交互に知覚されること^{*3}。

^{*3} 全被験者のうち、実験 1 の参加者 YW は第 3 の知覚状態 (格子縞が縞の方位に並行に伸縮するように運動して見える状態、文献 20 で報告されている) を感じると述べたため、再実験を行って第 3 の知覚状態を持たなかったと本人が報告した場合のデータを採用した。実験終了後に YW 以外の 3 名の被験者に第 3 の知覚状態について説明を行い、再度観察させながら質問をすると、3 名中 2 名の被験者が第 3 の知覚状態を持つことができるようになったと述べた。コヒーレント運動や要素運動ほどは長く持続的に知覚しないと述べた。この知覚状態については、現在調査中である。

の3点を口頭で確認した。1, 2, 3とも参加者全員が知覚した。要素運動の運動方向は、一般のブラッドパターンの要素運動の方向、つまり格子の方位に垂直な方向とは異なり、窓の長辺に平行な方向に運動する点が本稿の実験刺激の特徴である。コヒーレント運動知覚時には縞の交点の移動方向、要素運動知覚時には窓の長辺に平行な方向に運動を知覚することから、被験者のアウトプットは2種類（水平、垂直）の運動方向のみの2件法を採用した。例えば、実験刺激が横長の場合、運動方向が垂直と応えた場合は、運動知覚としてコヒーレント運動を知覚していることを示しており、逆に運動方向が水平と応えた場合には、運動知覚として要素運動を知覚しているとみなすことができる。

また、要素運動における二つの縞模様の反対方向の動きについては、どちらかの縞模様がもう一方の手前にあり、もう一方は奥側に引っ込んで見えることを実験後に口頭で確認した。コヒーレント運動知覚と要素運動知覚との交互の入れ替わりについては、1回の入れ替わりの間に知覚される奥行き関係は変化しないこと、コヒーレント運動知覚と入れ替わった後に再度要素運動知覚を得る場合には、前回に手前だった方の縞模様が奥側に知覚される場合もあれば、そのまま手前に知覚される場合もあることも実験後に口頭で確認した。また、コヒーレント運動時には交点周辺に奥行きを感じない一方で、運動方向と垂直な窓枠の端点付近には動的出現と遮蔽（accretion and deletion）を伴う強い奥行き知覚を感じることも口頭で確認した。各刺激アニメーションの呈示時間は30秒で、30秒後に自動的に呈示フレームのイメージは別の静止画に入れ替わる。静止画によるインターバルも30秒としたため、各トライアルに計1分を要した。実験1, 2, 3とも被験者ごとに20トライアルを行った。

3. 実験1、窓の長短比

実験1では窓の長短比と要素運動を知覚する割合の相関を調査する。

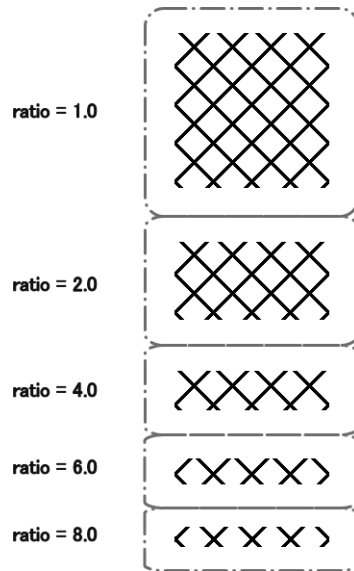


図2 実験1の刺激の静止状態を示している。窓の長短比を変化させて、五つの場合を被験者に呈示した。各場合につき、(IOCによる予測方向で)上下左右の4通りの運動方向を被験者に呈示した。試行は20回で、呈示順序はランダムである。

窓の長短比を独立変数とし、それぞれ、1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0の5段階で変化させた。窓の長辺の長さは一定で約 3.8° （160ピクセル）とし、窓の短辺の長さは長短比に応じて、それぞれ、約 3.8° , 1.9° , 0.96° , 0.64° , 0.48° （それぞれ160, 80, 40, 27, 20ピクセルとなる。矩形波格子縞の周期は、斜め 45° 方向に約 0.68° （水平あるいは垂直方向に40ピクセル）とし、格子縞の太さは、斜め 45° 方向に約 0.085° （水平あるいは垂直方向に5ピクセル）とし、直行するもう一方の格子縞の周期と太さも共通にした*4。図2に例を示す。短辺の方向は、ブラッドパターン

*4 コンピュータディスプレイ上に描いた斜めの直線の境界上には、ピクセルの形状に起因する階段状の小さなギザギザ（jag）が生じる。格子縞の太さの値は、そのjagの稜線の間を結んだ線を格子縞の境界として算出した値である。なお、報告は行わないが、矩形波格子縞の境界線にスムージングなどのアンチエイリアシング効果を施して、見かけ上のギザギザを目立たなくした刺激においても、本論中の実験結果と同様の結果が得られたことを付記しておく。

がIOCによって予測される方向に平行な方向とする。刺激の数は、窓の長短比が5段階に変化するのを、各段階につき4回繰り返す(二つの格子縞のスライド方向が2方向ずつで、スライド方向は計4方向)ため、被験者に呈示される刺激は20個である。各実験刺激は格子縞のスライド方向を除き、20個すべてにおいて、窓の内側における空間周期性と移動の速さは同じである。違いは窓の形と大きさだけである。各刺激はランダムに呈示した。被験者は大学生7名でいずれも正常視力を持ち、実験の意図は知らない。このうち、2名が眼鏡によって視力を矯正している。

4. 実験1, 結果と考察

各被験者がIOCによって予測される方向と別の方向に運動を知覚した時間、つまり要素運動を知覚した時間の割合を分析の基本単位とした。各被験者ごとに、窓の長短比と格子縞のスライド方向を要因とする繰り返し分散分析を行ったところ、いずれの被験者についても、窓の長短比の主効果が、統計的に有意(全被験者につき、 $F(4,15) > 6.07, p < 0.005$)であった。また、窓の長短比と要素運動の知覚時間の割合との相関についても、強い正の相関関係(全被験者につき、 $r > 0.78$)がある。格子縞のスライド方向については、有意な差は得られなかった。これは、実験2, 実験3でも同様である。窓の長短比を変数として、要素運動を知覚した時間の割合の平均値をプロットした結果が図3である。

窓の長短比が大きくなるほどコヒーレント運動を知覚する割合は減少し、代わりに要素運動を知覚する割合が増加した。この要素運動は、口頭で確認したとおり、各格子縞が窓の長辺に沿った方向で互いに逆向きに移動して、かつ両格子縞間に奥行き知覚が発生する。両格子縞はお互いに「すれ違って」スライドするように知覚される(「すれ違う」というのは多くの被験者が自発的に述べた言葉である)。両格子縞間に、コントラスト差, 周波数差, 太さの差, つまり奥行き知覚を生じさせる要因となるような

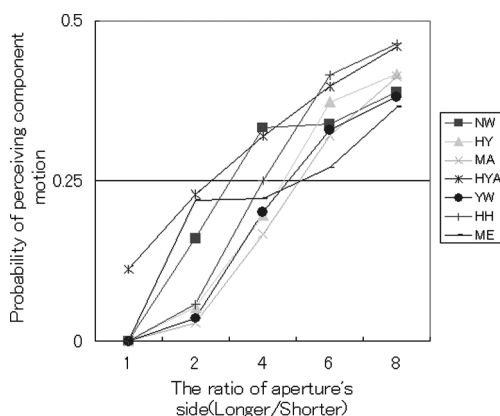


図3 実験1における被験者7名の要素運動を知覚した割合の平均値を示している。横軸は窓の長短比, 縦軸は要素運動を知覚した時間の割合を表す。凡例は被験者のイニシャルを表す(以下同様)。

非対称性はない。IOCモデルでコヒーレント運動を知覚する条件を満たしている。窓は一方方向に狭くなっただけであるが、各矩形波格子縞はその影響を受けて、結果として別々に正反対の方向に運動するように知覚された。

運動知覚と奥行き知覚が連動することを踏まえ、矩形波格子縞の端点の属性について、Shimojo et al.⁷⁾ にならって整理しておく。コヒーレント運動時の両格子縞は、二つの格子縞の運動をIOCによって統合する場合に予想される方向に運動する。被験者に口頭で確認したとおり、長辺側では、格子縞は動的出現と遮蔽を伴って運動する。つまり、長辺側の端点はextrinsicな端点となる。両格子縞は同一平面上にあり、窓枠は両格子縞よりも被験者により近い奥行きに位置づけられる。一方で、要素運動時には各格子縞は、窓の長辺方向に沿って反対の方向に運動する。このとき、長辺に接する端点はintrinsicになり、被験者にとって両格子縞自体が窓枠よりも近い奥行きに位置する。さらに片方の縞ともう片方の縞は別々の奥行き平面に定位される。

要素運動が起こること、またそれが窓の長辺方向に知覚されることは、格子縞がパーバーポール効果を受けたことに起因すると推測されるが、ここで観察された現象はそれだけではな

く、奥行き知覚の発生も含んでいる。窓枠の長短比の変化によって影響を受けた運動知覚が格子縞同士に発生する奥行き知覚の成立をコントロールしている。また、被験者の反応から明らかなどおり、この運動知覚は強い多義性を持っており、安定的な知覚は得られにくい。この多義性は運動方向を知覚することが、運動刺激だけで完結するのではなく、形の知覚や奥行き知覚を含めて成立していること^{20,22)}を示唆する。

運動情報の統合を調査した歴史的先行研究^{8~13)}において、窓の長短比の増大による窓の形の影響は考慮されてこなかった。その点で、本実験1で示した窓の長短比と要素運動が知覚される割合との正の相関は、Beutter et al.¹⁾が示した窓の長短比とIOCによる方向からのずれとの正の相関を裏づけるものである。また、運動統合を語る多くのモデルにおいては、そのメカニズムを求めるために、あえて形の影響を除外するような、十分に広くて一様な刺激が用いられることが多い。実験1において、窓の形の影響があることが示されたが、このことは、「十分に広くて一様である」こと自体も運動方向の決定に何らかの影響を与えている可能性があることを、間接的ながらも示唆するのである。

5. 矩形波格子縞の周期とバーバーポール効果

実験1では、窓の長短比をコントロールして、各被験者が要素運動を知覚する割合に強い相関があることを示した。ただし、実験1では矩形波格子縞の周期と太さを一定にして行ったため、周期と太さの効果については不問のままである。

運動方向の知覚における格子縞の周期依存性⁸⁾は、IOCにおける速度合成のエラー¹¹⁾、あるいは奥行き知覚の手がかりの発生による一貫性の破れ¹⁸⁾という解釈が行われてきた。Smith and Edgar¹¹⁾は周波数の差がもたらす速度合成のずれに注目し、IOCモデルからの予測値とのずれは、各格子縞の速度認知のエラーとその合成のエラー、あるいはその両方に起因することを示唆した。また、Bressan et al.¹⁸⁾は、運動す

る格子縞の周波数差が奥行き知覚を導くとして、コヒーレント運動の起こりにくさを説明した。前者は正弦波格子縞、後者は矩形波格子縞を刺激として用いている。両者の説明に共通するのは格子縞間の非対称性が、IOCモデルでの予測値からのずれ、あるいは一貫性の破れの原因であるとしている点である。

一方で、Beutter et al.¹⁾は正弦波ブラッドパターンの運動知覚におけるマクロな窓枠の長短比の効果を指摘し、周期依存性を述べた。長短比をつけた窓の大きさを固定した刺激において、周期の大きいものほど、IOCによる予測方向からのずれが大きくなり、窓枠の長短比の影響をより大きく受けていることを示した。彼らは、二つの正弦波格子縞の周期を同じにする条件でのIOCモデルとの予測値からのずれを分析しており、格子縞間の非対称性を扱ったSmith & Edgar¹¹⁾とは異なる観点からの指摘を行っている。Beutter et al.¹⁾の実験刺激において、ブラッドパターンの知覚される運動方向が窓枠の長短比の影響下にあり、かつ、両ブラッドパターンの周期が大きいほど、バーバーポール効果が強く作用すると仮定するならば、本稿の実験1で用いた刺激でも同様の反応が出ると予想される。すなわち、実験1と同様の刺激において、窓枠の長短比と格子縞の太さを固定した条件で、矩形波格子縞の周期をコントロールした際に、格子縞の周期の増大につれて、要素運動を知覚する割合が大きくなることが予想される。実験2ではこの仮説を確認する。

6. 実験2、矩形波格子縞の周期

実験2では矩形波格子縞の周期と要素運動を知覚する割合の相関を調査した。

格子縞の周期を5段階に変化させて、窓の長短比を固定した点を除けば、実験1と同じ環境である。格子縞の周期を独立変数とし、それぞれ、 0.34° 、 0.51° 、 0.68° 、 0.85° 、 1.02° （水平あるいは垂直方向にそれぞれ、20、30、40、50、60ピクセル）の5水準を用いて、両縞模様とも共通のものとした。窓の長短比は4.0、つまり長辺方

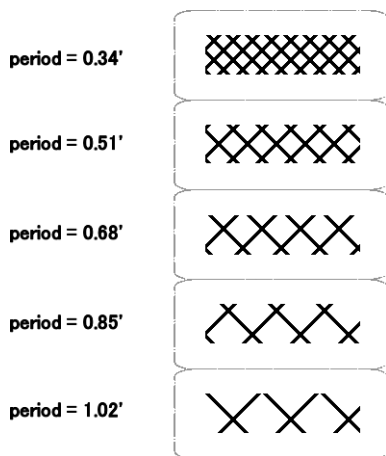


図4 実験2の刺激の静止状態を示している。格子縞の周期を変数として、五つの場合を被験者に呈示した。呈示の仕方は実験1と同様である。

向の長さを 3.8° 、短辺方向の長さを 0.96° とした。実験1と同様、格子縞の運動方向は、IOCで予測される方向が短辺に平行である。格子縞の太さについては、実験1と同様に斜め 45° 方向に約 0.085° （水平あるいは垂直方向に5ピクセル）とし、同じく両縞模様に通共通のものとした。例を図4に示す。刺激アニメーションの数は、縞模様の周期が5水準で、運動方向が4方向として、計20通りを用意した。1トライアルあたり、呈示時間30秒、休憩が30秒であるため、実験時間は20分を要した点も実験1と同様である。被験者は正常視力を持つ5名で、このうち2名が眼鏡で視力を矯正している。実験1と同じ被験者が2名いる。

7. 実験2、結果と考察

実験1と同様、要素運動を知覚した時間の割合を分析の基本単位とした。各被験者ごとに、格子縞の周期を要因とする繰り返し分散分析を行ったところ、いずれの被験者についても、縞の周期の主効果に統計的有意傾向（全被験者につき、 $F(4,15) > 2.85, p < 0.07$ ）が見られた。縞の周期と知覚時間との相関については、正の相関関係（全被験者につき、 $r > 0.57$ ）がある。矩形波格子縞の周期を変数として、各被験者が要

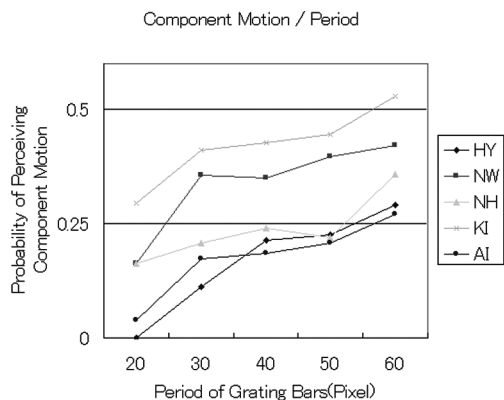


図5 実験2における被験者5名が要素運動を知覚した割合の平均値を示している。横軸は矩形波格子縞の周期（縦 or 横方向のピクセル数）を表す。

素運動を知覚した時間の割合の平均値をプロットした結果が図5である。

要素運動を知覚する割合が矩形波格子縞の周期と正の相関が見られる以上、格子縞の周期とコヒーレント運動を知覚する割合との間に負の相関があると見なせる。Beutter et al.¹⁾は、長短比を付けた窓において、正弦波からなるブラッドパターンの周期と、二つの格子縞の運動の統合をIOCで予測する値とのずれの大きさに正の相関があることを示した。このことは、格子縞の周期が大きくなるにつれ、IOCによる運動統合の予測方向に運動するコヒーレント運動の割合が減少することを示した実験2の結果と符合する。この結果も、実験1と同様、Beutter et al.¹⁾の指摘を支持するものである。すなわち、正弦波格子縞のみならず、矩形波格子縞からなるブラッドパターンにおいても、縞模様の周期が大きいほど、窓枠の長短比の影響をより受けやすいことが示された。このことは、コヒーレント運動を知覚する状態の安定性を攪乱する原因として、窓の長短比、あるいはパーバーポール効果が強く影響していることを示唆している。つまり、実験1、2の結果は共に Beutter et al.¹⁾の結果と符合することから、矩形窓の格子縞においてもブラッドパターンにパーバーポール効果が働きうることを示している。

輝度、周波数、速度、太さが一致して直交す

る二つの格子縞においては、従来のブラッドパターン研究ではコヒーレント運動をするとされてきた。しかし、本稿の実験刺激では、パーバーポール効果を引き出しやすい窓枠を採用しているがゆえに、従来では報告されることのない要素運動が見られる。本稿の実験刺激は、コヒーレント運動に平行な方向を矩形窓の短辺としているため、コヒーレント運動の方向は窓の長辺と直交する、つまり、コヒーレント運動を知覚させる作用の方向とパーバーポール効果の方向がちょうど直交することになる。このことにより、条件次第で二つの効果が拮抗することがありうることを示すことができたと考えられる。

8. 矩形波格子縞の太さと主観的輪郭

実験1では、窓の長短比をコントロールし、実験2では、矩形波格子縞の周期をコントロールして、要素運動を知覚する割合との相関について調査した。この二つの実験で得られた結果は Beutter et al.¹⁾ で指摘された結果と符合する。このことは実験1あるいは実験2の刺激において、窓の長短比、あるいはパーバーポール効果がブラッドパターンの運動知覚に影響したことを示唆している。しかし、Beutter et al.¹⁾ は知覚される運動方向のずれの度合いを計測しており、本稿の実験刺激のような奥行き知覚を伴う運動知覚への言及はない。本実験で得られた運動方向と奥行き知覚の特徴は、他の効果で説明される必要がある。

Beutter et al.¹⁾ での実験刺激と本稿での実験刺激との大きな違いは、パターンが正弦波格子縞であるか、矩形波格子縞であるかの違いと、窓枠の曖昧さの違いである。この違いは、窓枠との端点が鮮明で明示的であるかどうかの違いに典型的に現れる。端点が鮮明で明示的であること自体が、奥行き知覚とともに変化する運動知覚を成立させていると推測することが可能である。この推測を前提とするならば、端点の形の変化をコントロールし、端点の属性の変化を誘導することで、コヒーレント運動、あるいは

要素運動を知覚する割合に変化が起こると期待できよう。実験3では、端点の属性に影響ある操作を導入する。

矩形波格子縞の太さそのものが窓問題に与える影響は、これまであまり議論されていない。方向選択細胞レベルでの窓問題では、特定の方向を横切る輝度変化を問題とするため、矩形波格子縞の太さ自体が問題の外部にある。しかし、窓の全体的な形の影響に注目し、端点の属性が奥行き知覚と運動知覚に関与している⁷⁾ ならば、その端点を形成するエッジの形も考慮する必要があると考えられる。また、Kooi et al.¹⁷⁾ や Badcock et al.²⁵⁾ が示唆するように、窓の形をギザギザ状にすることで窓問題の曖昧さが解消されるとするならば、端点の局所な変化は格子縞全体の運動知覚に影響を与えると予想される。

Kellman & Shipley²⁾ は、主観的輪郭が形成されやすい指標として *reliability* という概念を導入した。この指標は空間的に離れた二つ以上の模様の中に物理的に存在しない輪郭が知覚されるための補完のされやすさを表している。この概念は主観的輪郭を伴う静止画において適用されているが、端点の *intrinsic*、あるいは *extrinsic* な属性が問題になる状況においては、この概念を動画に適用することも可能であろう。矩形波格子縞の端点を形成するエッジを主観的に延長することで隣接する縞の端点のエッジと関連づけることが可能になり、関連づけがなされたときに主観的輪郭を誘導することが可能になる。矩形波格子縞の太さが太くなれば、端点を形成するエッジが充分大きくなり、同時に格子縞同士の空間的距離が近くなるため、隣接する縞の端点上のエッジ同士を結んだ主観的輪郭は、より誘導されやすくなるだろう。これは格子縞の太さがより太いほど、安定的に形成されやすくなると考えられる。一方で、矩形波格子縞の太さが細ければ、縞のエッジを延長することの精確さは減少し、また、縞同士を分かť背景が見える幅も大きくなる (図6)。つまり、矩形波格子縞が太ければ縞同士の *reliability* は増加し、

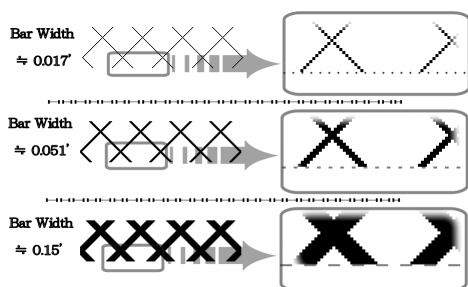


図6 本稿の実験刺激のプラッドパターンにおいて、隣り合う端点同士の *reliability* を模式的に示している。右側の図は端点周辺の拡大図である。格子縞が細いと隣の端点との距離が大きく、また各端点を形成するエッジから誘導される輪郭線も不安定である。一方で格子縞が太いと隣の端点との距離が縮まるだけでなく、各端点を形成するエッジから誘導される輪郭線も安定的に隣接するエッジと関連付きやすくなる。このことは、静止状態のプラッドパターンにおいて、格子縞の太さが端点同士の *reliability* に強く影響していることを示している。

細ければ減少すると考えられる。

また、本稿の刺激においては、静止状態での隣り合う縞の端点を形成するエッジ同士の *reliability* だけでなく、同一の端点を形成するエッジによる異なるタイムスライス間での *reliability* も考慮せねばならないだろう。例えば格子縞の太さが水平 or 垂直方向に1ピクセル分の格子縞を例にとると、アニメーションが1フレーム分、時間にして約0.03秒進んだだけで、格子縞上にあったピクセルの輝度は背景色へと変化することになる。本稿の刺激は1秒間に30フレームからなるアニメーションを用いており、格子縞は1フレームにつき1ピクセル分、垂直あるいは水平に移動するためである。一方で、太さが水平、あるいは垂直方向に9ピクセルの格子縞においては、アニメーションが9フレーム分、つまり0.3秒過ぎなければ、輝度の変化が起きないピクセルが存在する。このようなピクセルは格子縞の端点を形成するエッジ上にも存在する。つまり、異なるタイムスライス間で連続的に端点上でエッジを形成し続けるピクセルがあり、その形成時間は格子縞の太さが

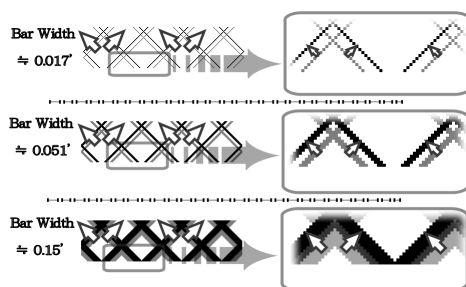


図7 本稿の実験刺激のプラッドパターンにおいて、異なるタイムスライスにある同一の端点同士の *reliability* を模式的に示している。右側の図は端点周辺の拡大図である。三つの図に共通して、同じ時間間隔（例として0.2秒）を空けた二つのタイムスライス上の端点を図示している。0.2秒間に格子縞自体は空間的に6ピクセル分スライドする。三つの図では、スライド幅そのものは共通であるが、端点同士が形成する輪郭線への影響は大きく異なる。格子縞が細ければ、輪郭を誘導するとしても、0.2秒後には別の位置にある二つの端点を結ぶ以外にない。一方で、格子縞が太ければ、0.2秒後にも格子縞の一部が重なっている。つまり、異なるタイムスライス間で輪郭線の形成も共通しているため、ここで形成される輪郭線は、格子縞が細い場合に形成された主観的なものよりも、より安定的である。この安定的に形成される輪郭線の延長上に、また安定的な輪郭線を持つエッジが隣り合っているため、主観的輪郭は格子縞が細い場合に比べてより誘導されやすいと考えられる。つまり、格子縞が太くなれば、主観的輪郭をより誘導しやすくなり、細くなれば、誘導されにくくなる。このことは、格子縞の太さが、異なるタイムスライス間の同一の端点同士の *reliability* に強く影響していることを示している。

太いほど長い。よって、格子縞が太くなると、異なるタイムスライス間の同一エッジ同士の *reliability* が高くなると考えられる（図7）。

主観的輪郭が誘導される際には、その輪郭の内側と外側の間に奥行き知覚が伴いやすい^{2,24)}。もしも、隣接する格子縞の端点のエッジ同士で、あるいは異なるタイムスライス間の同一端点のエッジ同士で輪郭が誘導されるならば、その端点は遮蔽関係を伴う *extrinsic* な属性を持ちやすくなる。つまり、格子縞の太さが太くなることは、*reliability* を増加させ、輪郭を形成させや

すくさせ、端点の属性を extrinsic にさせやすくさせ、逆に、格子縞の太さが細くなることは、reliability を減少させ、端点の属性を intrinsic にさせやすくする、という仮説を立てることができる。

この仮説に立てば、端点の太さの増減による reliability の増減の影響は、二つの格子縞の運動を統合する効果の方向とバーバーポール効果の方向が互いに直交するような本稿の矩形の窓においては、より端点の数が多い側、つまり長辺側の方が受けやすいと考えられる。実験 1, 2 と同様の刺激においては、格子縞が太くなればなるほど、長辺側の端点が extrinsic な属性を持ちやすくなり、長辺側で動的出現と遮蔽を伴うコヒーレント運動が知覚される割合が高くなると推測される。逆に、格子縞が細くなればなるほど、長辺側の端点が intrinsic な属性を持ちやすくなるため、長辺方向に沿ったバーバーポールイリュージョンが起こりやすくなる、すなわち要素運動が知覚される割合が相対的に高くなると考えられる。格子縞の太さの増減は、窓枠の境界上の reliability の増減を導き、端点の属性 (extrinsic または intrinsic) に影響を与え、運動方向を知覚する割合に影響を与えると推論可能である。このことから、格子縞の太さとコヒーレント運動が知覚される割合には正の相関が、逆に格子縞の太さと要素運動が知覚される割合には負の相関があると予想できる。

上記の仮説を踏まえ、実験 3 は格子縞の太さと要素運動を知覚する割合との相関を調査する。

9. 実験 3, 矩形波格子縞の太さ

実験 3 では、矩形波格子縞の太さと要素運動が知覚される割合との相関を調査した。

格子縞の太さを 5 段階に変化させて、窓の長短比と縞の周期を固定した点が実験 1, 2 との違いである。格子縞の太さを独立変数とし、それぞれ、約 0.017°, 0.051°, 0.085°, 0.12°, 0.15° (水平あるいは垂直方向にそれぞれ、1, 3, 5, 7, 9 ピクセル) の 5 水準を用いて、両縞模様とも共通のものとした。窓の長短比は 4.0, つまり長辺

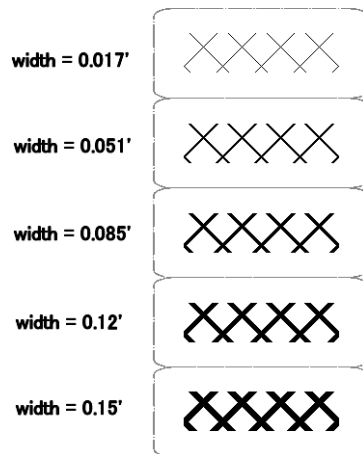


図 8 実験 3 の刺激の静止状態を示している。格子縞の太さを変数として、五つの場合を被験者に呈示した。呈示の仕方は実験 1, 実験 2 と同様である。

方向の長さを 3.8°, 短辺方向の長さを 0.96° とした。格子縞の周期については、実験 1 と同様に約 0.68° (水平あるいは垂直方向に 40 ピクセル) とし、同じく両縞模様にも共通のものとした。例を図 8 に示す。刺激アニメーションの数は、縞模様の周期が 5 水準で、両格子縞のスライド方向が 4 方向であり、計 20 通りを用意した。1 トライアルあたりの呈示時間、休憩、実験時間、定時順序も実験 1, 2 と同様である。被験者は正常視力を持った 5 名で、このうち 3 名が矯正視力である。実験 1, 2 と同じ被験者が 2 名おり、残り 3 名は実験 1, 2 とともに未経験である。

10. 実験 3, 結果と考察

実験 1, 2 と同様、要素運動を知覚した時間の割合を分析の基本単位とした。各被験者ごとに、矩形波格子縞の太さを要因とする繰り返し分散分析を行ったところ、いずれの被験者についても、格子縞の太さの主効果が統計的に有意 (全被験者につき、 $F(4,15) > 3.25, p < 0.05$) であった。格子縞の太さと知覚時間との相関については、負の相関関係 (全被験者につき、 $r < -0.55$) が得られる。矩形波格子縞の太さを変数として、各被験者が要素運動を知覚した時間の割合の平均値をプロットした結果が図 9 である。

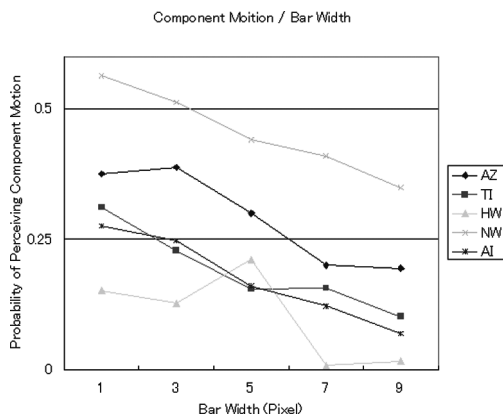


図9 実験3における被験者5名が要素運動を知覚した割合の平均値を示している。横軸は矩形波格子縞の太さ（縦 or 横方向のピクセル数）を表す。

格子縞の端点の属性を操作することが、運動知覚に影響を与える⁷⁾ならば、実験3の要点は、運動する格子縞の太さが端点の属性に影響を与えるかどうかを確かめることにある。図9に示すように、格子縞の太さと運動知覚の割合に相関があることは、この仮説を支持する格子縞の太さが太くなるのが要素運動を知覚する時間の割合を減少させるという実験結果は、格子縞の太さを操作することが端点同士の relatability の増減を導き、relatability に伴う輪郭の奥行き知覚が端点の属性に影響し、その端点の属性が運動知覚に影響を与えているとする8章の仮説を裏づける。長辺側の端点が、より extrinsic になった場合には、動的出現と遮蔽を伴うコヒーレント運動が起こりやすくなり、より intrinsic になった場合には、バーバーポールイリュージョンを伴う要素運動が起こりやすくなった。この相関関係が意味するのは、バーバーポールイリュージョンを起こす効果、すなわちバーバーポール効果が、例え弱い作用であったとしても、ブラッドパターンに働いていることである。

実験1,2の結果は、文献1に即して、ブラッドパターンに働くバーバーポール効果の存在を示した。実験3では、格子縞の太さを操作して、窓枠の境界の属性を操作することにより、運動方向の知覚に影響を与えることを示した。この

ことは、ブラッドパターンにおいても運動方向の決定性に曖昧性があることを表しており、その曖昧性を顕著なものにするバーバーポール効果が存在することを示している。また同時に、これまで注目されることの少なかった矩形波格子縞の太さや relatability が、運動方向の知覚に影響していることを示すことで、ブラッドパターンと窓問題、それに伴う奥行き知覚についての新しい観点をもたらす。

11. 総合考察

ブラッドパターンの運動方向決定においては、格子縞同士の属性の差の程度と運動方向がパターン全体の運動方向を決定づけるとされてきた（例えば文献8）。一方で、1次元の格子縞の運動は、運動方向は本質的に曖昧なものとなり、模様と垂直な方向か、あるいはバーバーポール効果を受ける方向かを決定づけるメカニズムが問題とされてきた（例えば文献6）。ブラッドパターンにおいては、焦点は運動情報の統合の問題となり、コヒーレント運動が起こる属性条件の絞り込み⁹⁻¹³⁾と、運動統合モデルとしてのIOCの可能性が問題とされてきた。つまり、ブラッドパターン研究と1次元格子縞の窓問題研究は、等しく運動情報の曖昧さを扱いながらも、異なる目標を持っていた。特にブラッドパターンを扱う多くの文献では、もう一つの格子縞を上書きされたブラッドパターンにおいて、運動方向決定の曖昧性、あるいは窓問題が解消されていることを前提としている。本稿が扱う矩形の窓枠が背景と同色のブラッドパターンのアニメーション刺激は、コヒーレント運動と要素運動を多義的に知覚させることで、ブラッドパターンにおいても方向決定の曖昧性、あるいは窓問題が、これまでに報告されなかった形でなお存在していることを示す。本稿で呈示した実験刺激は、窓問題が解消されるとされてきた事例と照らし合わせながら、ブラッドパターン、窓問題、バーバーポール効果との関係に新しい視点を提供することが期待できる。

Rubin & Hochstein¹⁵⁾ は IOC に基づく局所視

野から得るはずの運動情報の統合が、被験者の反応と異なっていることを指摘した。Lorenseau¹⁶⁾は、複数の窓を用いた運動統合を行い、IOCによる予測値とのずれを指摘した。ブラッドパターンでの運動統合を説明する理論としてのIOCに対して批判、あるいは修正を求める文献は数多い。それらの多くは、IOCがグラウンドセオリーであることへの疑問から出発し、特異な条件を備えた実験刺激を用いて、理論的予測値と観測値とのずれを測定する方法を用いている。本稿での実験1, 2で、理論的先行研究として引用したBeutter et al.¹⁾もその一つと位置づけられる。一方で、本稿の主旨はIOCなどの運動統合の理論への批判や修正の要求とは異なる。本稿の実験刺激では、ブラッドパターンのコヒーレント運動が、自発的に要素運動に置き換わり、その後また自発的にコヒーレント運動が再度知覚される状態が繰り返されるため、この知覚が交替する時間間隔を測定している。この測定結果から、個別の運動情報を統合するための運動方向算出法の精度を問うことは難しい。本稿の主旨は運動統合のメカニズムそのものの不安定さを指摘することにある。実験結果が示すように、奥行きや輪郭の知覚からの影響があるためである。本実験の刺激において、この不安定さをもたらすのが、コヒーレント運動の方向に直交するバーバーポール効果であると推察する。二つの知覚状態がどんなメカニズムで入れ替わるのかについての考察は今後の課題である。

1次元格子縞の窓問題とブラッドパターンの方向決定の両方に伴う要因として奥行き知覚がある。Shimojo et al.⁷⁾は、1次元格子縞に両眼視差を導入することで窓の境界の属性(intrinsicかextrinsicか)を強制的に決定し、それに基づいて運動方向が決定されるとした。ここで重要な点は奥行き知覚を伴う窓の境界の属性(intrinsic, extrinsic)を両眼視差により固定してやることで、運動方向が安定的に決定される点である。その後、窓の境界の奥行き決定と運動方向の決定については、前者が後者に先行する

ものとは限らず、両者が連動しながら、知覚の多義性を与える状況があることを指摘する研究が後に続いた²⁰⁻²³⁾。一連の研究で指摘されるのは、矩形波格子縞の運動における端点の奥行き知覚は、運動方向、窓の形、付帯する模様、連動するもう一つの矩形波格子縞の存在に応じて、知覚状態を変化させることである。つまり、局所的に見れば、全く同じような輝度の時間変化が存在していたとしても、格子縞の端点近傍に奥行き知覚が発生したり消滅したりすることがありうることを示している。本論では、この奥行きの発生消滅が、格子縞の端点のみならず、対称的な格子縞からなるブラッドパターンの交点にまで及ぶことを指摘している。

Stoner et al.¹⁰⁾は、ブラッドパターンの交点およびその周辺の輝度の分布に起因する格子縞同士の奥行き知覚が、コヒーレント運動と要素運動とを分かち決定要因であるとした。すなわち、交点の輝度とその周辺の輝度の差が、交点に透明視を起こさせるような分布であれば、両格子縞は位置する奥行き平面が異なることになり、互いにぶつかることなく独立に運動することになり、このときの各格子縞の運動方向は模様に垂直な方向に認識される。一方で、交点で透明視が起きないような輝度分布の場合は両格子縞は統合したコヒーレント運動を行い、IOCによる予測と一致する方向に運動が知覚される。刺激内に与えられた輝度の非対称性をいかにして透明視と奥行き知覚に変換するかの議論は、遮蔽の知覚と境界の属性(intrinsic, extrinsic)の決定の問題を呼び込み、興味深い。本稿の刺激では、対称的な矩形波格子縞の運動に、運動方向の変化と格子縞同士の遮蔽関係が誘導される。このことは、格子縞同士が対称であることや交点とそれ以外の部分で輝度が一樣であることが、交点とその近傍付近で、一樣な奥行き関係を安定的に保つわけではないことを示す。本実験刺激で指摘したバーバーポール効果に起因する要素運動と輝度差による遮蔽に起因する要素運動との関係についての議論は、今後の発展が期待される。

Alais et al.²⁷⁾ は、Type-II プラッドパターンの運動方向決定における IOC 予測値とのずれについて、窓の大きさとプラッドパターンの周期をコントロールする方法で調査した。彼らはプラッドパターンの運動方向を決定するのは、プロブ（交点）追跡メカニズムであることを主張し、刺激内のプロブの適度なサイズと数とそのメカニズムを有効に機能させると推察する。メカニズムの詳細は言及されていないが、プラッドパターンにおけるプロブのサイズと数が、知覚される運動方向に影響を与えている現象を詳しく報告している。本稿の実験刺激におけるプロブの影響を考察しておこう。本稿実験2の刺激では、窓の長短比と矩形波格子縞の太さが一定である。この条件下で格子縞の周期が大きくなることは、窓枠上における端点間の空間的距離が広がることを意味するため、reliability は減少する。格子縞の太さが一定であるため、その周期にかかわらず、プロブサイズは一定のままである。ただし、窓枠内のプロブの数は減少する。よって、実験2の結果は、reliability、プロブの数、あるいはその両方の効果で説明することが可能である。一方で実験3の刺激では、窓の長短比と矩形波格子縞の周期が一定である。この条件下で格子縞の太さを太くすることは、先述のとおり、reliability を増大させる。このとき、プロブサイズも大きくなるが、プロブの数は一定のままである。よって、実験3の結果は、reliability、プロブサイズ、あるいはその両方の効果で説明することが可能である。おそらく、reliability、プロブの数、プロブサイズの3者のそれぞれの効果がこれらの現象に影響を与えていると推察されるが、本稿ではreliabilityによる説明の意義を強調する。プロブの数とサイズによる説明では、長辺側の端点に生じる extrinsic, intrinsic な属性の変化、すなわち窓枠上で変化する奥行き知覚に言及できない。本稿の実験刺激では、文献7, 19~23 で用いられた刺激と同様に、運動方向の知覚と奥行き知覚が同時に変化する。実験2、実験3の刺激とも、長辺方向の端点が extrinsic な属性を持

つことなしに、プラッドパターン全体がコヒーレント運動を起していることと知覚されることはない。reliability の増減は、主観的輪郭に伴う奥行き知覚の誘導のされやすさと端点の属性の変化を因果的に説明可能である。この観点から、説明概念としての reliability の有効性を指摘しておく。reliability、プロブの数、プロブサイズによる影響と3者の相互作用の解明は今後の課題である。

Badcock et al.²⁵⁾ は Kooi²⁶⁾ の議論を修正して、1次元の矩形波格子縞の知覚される運動方向は、ギザギザにした窓の境界の形に沿って変化することを示した。両者が指摘したことは、特定の局所的形の変化が全体的な運動方向に影響することである。また、両者とも窓枠のギザギザの周期との関連づけとはいえ、格子縞の太さと運動方向との相関を論じている数少ない例である。本稿の reliability の観点から、両者の呈示する実験刺激を論じておこう。窓枠の境界がギザギザ状であるため、静止状態の格子縞の端点同士の reliability は極めて希薄である。また、格子縞の運動時にも、静止した一つのギザギザの山や谷を越えるたびに、同一の端点による異なるタイムスライス間での線的な繋がりは断絶するため、同一端点同士の reliability はギザギザの周期ごとに途絶えることになる。この reliability の希薄さは端点同士の間に主観的輪郭が形成されにくいことを表し、つまり、動的出現と遮蔽を知覚することが誘導されにくく、窓の境界が extrinsic な属性を持ちにくいことを表している。その結果、端点は intrinsic な属性を持ちやすくなり、ギザギザの稜線に沿って運動すると解釈できる。以上の解釈が可能であることから、本稿が述べる端点の reliability と運動方向との相関は、Badcock et al.²⁵⁾ や Kooi²⁶⁾ の議論ともつながる。

Reliability、すなわち局所的な形状変化を含めた全体的な形の要因の影響と輪郭の知覚は、窓問題やプラッドパターンの運動方向を知覚するメカニズムを検討するには議論の外に置かれがちであった。Sinha²³⁾ は、背景と同輝度の

窓枠内をブラッドパターンが運動する刺激を用いて、窓枠上で得られる輪郭の知覚について論じている。背景と同輝度の窓枠はブラッドパターンが運動して初めて知覚されることになるが、そこで得られる輪郭の知覚は、ブラッドパターンのコヒーレント運動時の運動方向、つまりは各格子縞のスライド方向の組み合わせに依存する。この輪郭の知覚について、Sinha²³⁾は運動統合があって初めて成立する知覚であることを指摘し、運動視と輪郭の知覚との関係を再考察する必要性を主張する。本稿の実験3は、Sinha²³⁾での指摘をもとに、文献2で提唱された概念である *reliability* の効果を引き出しやすくするため、窓枠と窓内部の背景を同じ輝度にする環境を用いて、格子縞の太さを操作している。実験3での結果、つまり格子縞の太さと要素運動を知覚する割合の間に相関があることは、Sinha²³⁾の指摘を支持するものである。

本稿の実験刺激は、文献19~23で用いられたのと同様に、背景と同輝度の窓枠内を運動するブラッドパターンを用いているが、運動情報そのものは、背景と異なる輝度が与えられる窓枠の場合と同じである。本稿で強調されるべきは、運動情報だけでなく、端点を形成するエッジの形の情報も、異なる輝度が与えられる窓枠の場合と同じ点である。運動方向の決定が多義的で境界の形に影響を受けることは、運動方向の決定が運動情報以外の情報との整合性を必要としていることを示している。十分広い視野に一樣な刺激を与えるような実験刺激においても、曖昧な境界で構成された窓枠の内部で一樣な刺激が運動する実験刺激においても、運動方向の決定が局所的な情報の合成だけから成立しているとは限らないと考えられる。Anderson & Sinha²⁰⁾ および Anderson²²⁾ では、矩形波格子縞の運動方向を決定する際には、網膜あるいは1次視覚野から得られる運動情報だけで方向が決定されるのではなく、奥行き知覚も含め、さまざまなプロセスを経ることを指摘している。本稿は、この指摘に強く賛同するとともに、格子縞の太さと境界の形、およびそれらから生じ

る *reliability* の関与がこのプロセスの一つであることを示唆する。

謝辞 多くのコメントを戴いた査読者の方々に感謝いたします。また、多くのご教示をいただいた静岡大学情報学部の林部敬吉先生に感謝いたします。最後に、本学会をご紹介くださった新潟大学人文学部の本田仁視先生のご厚意に厚くお礼申し述べたいと存じます。

文 献

- 1) B. R. Beutter, J. B. Mulligan and L. S. Stone: The barberpole illusion: Plaid motion is biased by elongated apertures. *Vision Research*, **36**, 3061–3075, 1996.
- 2) P. J. Kellman and T. F. Shipley: A theory of visual interpolation on object perception. *Cognitive Psychology*, **23**, 141–221, 1991.
- 3) H. Wallach: Ueber visuell wahrgenommene Bewegungsrichtung. *Psychologische Forschung*, **20**, 325–380, 1935.
- 4) S. Wuerger, R. Shapley and N. Rubin: “On the visually perceived direction of motion” by Hans Wallach: 60 years later. *Perception*, **25**, 1317–1367, 1996.
- 5) D. Marr: *Vision: A computational investigation into the human representation and processing of visual information*. New York: Freeman, 1982.
- 6) E. C. Hildreth: *The measurement of visual motion*. Cambridge, MA: MIT Press, 1984.
- 7) S. Shimojo, G. H. Silverman and K. Nakayama: Occlusion and the solution to the aperture problem for motion. *Vision Research*, **29**, 619–626, 1989.
- 8) E. H. Adelson and J. A. Movshon: Phenomenal coherence of moving visual pattern. *Nature*, **300**, 523–525, 1982.
- 9) L. S. Stone, A. B. Watson and J. B. Mulligan: Effect of contrast on the perceived direction of a moving plaid. *Vision Research*, **30**, 1049–1067, 1990.
- 10) G. R. Stoner, T. D. Albright and V. S.

- Ramachandran: Transparency and coherence in human motion perception. *Nature*, **344**, 153–155, 1990.
- 11) T. Smith and G. K. Edgar: Perceived speed and direction of complex of gratings and plaids. *Journals of the Optical Society of America, A*, **8**, 1161–1171, 1991.
 - 12) J. Kim and H. R. Wilson: Dependence of plaid motion coherence on component grating directions. *Vision Research*, **33**, 2479–2489, 1993.
 - 13) L. Welch and S. F. Bowne: Coherence determines speed discrimination. *Perception*, **19**, 425–435, 1990.
 - 14) K. Nakayama and G. H. Silverman: The aperture problem—II. Spatial integration of velocity information along contours. *Vision Research*, **28**, 747–753, 1988.
 - 15) N. Rubin and S. Hochstein: Isolating the effect of one-dimensional motion signals on the perceived direction of moving two-dimensional objects. *Vision Research*, **33**, 1385–1396, 1993.
 - 16) J. Lorenceau: Veridical perception of global motion from disparate component motions. *Vision Research*, **38**, 1605–1610, 1998.
 - 17) F. L. Kooi, K. K. De Valois, E. Switkes and D. H. Grosf: Higher-order factors influencing the perception of sliding and coherence of a plaid. *Perception*, **21**, 583–598, 1992.
 - 18) P. Bressan, G. Ganis and G. Vallortigara: The role of depth stratification in the solution of the aperture problem. *Perception*, **22**, 215–228, 1993.
 - 19) M. Shiffrar, X. Li and J. Lorenceau: Motion integration across differing image features. *Vision Research*, **35**, 2137–2146, 1995.
 - 20) B. L. Anderson and P. Sinha: Reciprocal interactions between occlusion and motion computations. *Proceedings of the Natural Academy of Science USA*, **94**, 3477–3480, 1997.
 - 21) L. Tommasi and G. Vallortigara: Figure ground segregation modulates perceived direction of ambiguous moving gratings and plaids. *Vision Research*, **39**, 777–787, 1999.
 - 22) B. L. Anderson: Stereoscopic occlusion and the aperture problem for motion: a new solution. *Vision Research*, **39**, 1273–1284, 1999.
 - 23) P. Sinha: Role of motion integration in contour perception. *Vision Research*, **41**, 707–710, 2001.
 - 24) G. Kanizsa: Subjective Contours. *Scientific American*, **234**, 48–52, 1976.
 - 25) D. R. Badcock, A. M. McKendrick and A. Ma-Wyatt: Pattern cues disambiguate perceived direction in simple moving stimuli. *Vision Research*, **43**, 2291–2301, 2003.
 - 26) F. L. Kooi: Local direction of edge motion causes and abolishes the barberpole illusion. *Vision Research*, **33**, 2347–2351, 1993.
 - 27) D. Alais, P. Wenderoth and D. Burke: The size and number of plaid blobs mediate the misperception of type-II plaid direction. *Vision Research*, **37**, 143–150, 1997.