3章　運動の3次元視

1　運動視差による3次元視

1.1　運動要因の手がかり効果

運動視差と両眼視差の手がかり相互作用を超えた遠距離における相対的奥行距離知覚

Gillam et al.(2011)は、鉄道の暗いトンネル内でLED光源を1対提示し、その間の視えの相対的奥行距離を評定させた。最も近いLEDは観察者から40mの位置に固定し、もう一つのLEDを248mまで遠ざけて提示した。観察条件は、観察者静止・両眼視条件、観察者静止・単眼視条件、観察者運動・両眼視条件および観察者運動・両眼視条件を設定した。両眼視条件では、両眼視差と運動視差が利用可能であったが、ただ観察距離が長いので両眼視差と運動視差は有効範囲外である。

実験の結果、観察者運動条件では、ほぼ正確な相対的奥行距離の評定がなされた。次に正確な評定は観察者静止・両眼視条件、そして観察者運動・単眼視条件となり、観察者静止・単眼視条件では正確な見積もりはできなかった。相対的な奥行距離知覚が正確になされた条件は、近距離に提示したLEDまでトンネル地面と壁面が視える事態であった。これらの結果から、相当程度長い奥行距離条件下でも、両眼視差と運動視差は奥行手がかりとして有効であることが示されている。

1.2 奥行空間における形状と運動要因間の相互作用

Khuu(2013)は、図3.1に示したように、多くの斜線分の前あるいは背後で円形刺激を垂直方向に動かすと、その運動方向が歪んで知覚されることを示し、これを運動ツェルナー錯視(kinetic Zollner illusion)と呼んだ。この錯視は運動に選択的な検出器からの出力が背後の斜方向の刺激線分によって方向が歪められた方向検出器からの出力と結合されることによって生起すると考えた。つまり、背景刺激の斜線方向が運動対象の方向を歪め、それが運動検出器の出力と結合されて、対象の運動方向知覚の歪みが生起するというわけである。実際、運動対象の速度、運動対象と背景刺激のコントラスト、運動範囲を縮小すると、この錯視は減衰することが示された。

そこで、Khuu は、背景斜線分と運動対象の間に奥行を設定した場合にも、運動ツェルナー錯視効果が減衰するかを確かめた。図 3.1 の A は、運動ツェルナー錯視実験のためのランダムドット・ステレオグラムを示し、B はステレオグラムを立体視したときに出現するパターンで、B.1 には斜線分の手前に運動刺激が、B.2 には斜線分の背後に運動刺激が出現する場合をそれぞれ示す。斜線分と運動刺激の奥行距離は両眼視差を 36、ランダムドット・ステレオグラム 27、36 arcmin の 9 通りに操作し、斜線分は視野の垂直に対して 15° と 90° の 2 条件を設定、運動対象の方向は-8°、-6°、-4°、-2°、0°、2°、4°、6°、8° の 9 通りに、そして運動対象速度は 15° /s 一定とし、0.375° ／frame で操作した。被験者にはこの運動刺激を 200 ms 提示し、その後に中央に提示した垂直線に対して運動対象が右あるいは左だったかを答えさせた。

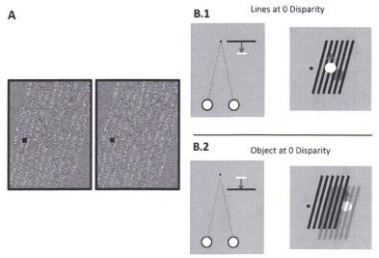

図 3.1 運動ツェルナー錯視実験のためのランダム・ドット・ステレオグラム。B:ステレオグラムを立体視したときに出現するパターンで、B.1 には斜線分の手前に運動刺激が、B.2 には斜線分の背後に運動刺激が出現する（Khuu 2013）

実験の結果、斜線分が 15° 条件では、斜線分の奥行が運動対象の手前あるいは背後の両条件共に 4～6° の方向変位が観察された。また、この視えの方向変位は運動対象と斜線分の奥行がゼロ近辺（-9～9 arcmin）で最大となるが、この奥行が大きくなると減衰し、両眼視差が-36° あるいは 36 arcmin での方向変位はゼロになった。

そこで、奥行と方向の異なる 2 種類の斜線分の間に運動刺激が出現する場合（図 3.2）には、運動ツェルナー錯視の方向変位は奥行が近い斜線に影響されるのかあるいは 2 種類の斜線角度の双方が影響するのかが検討された。後方の斜線分の方向は 15° で奥行を 3、4.5、6、7.5、9、10.5、12 arcmin に変化、また前方のそれは-15° で奥行は-7.5 arcmin に固定して、それぞれ提示された。被験者には、前実験と同様に、この運動刺激を 200 ms 提示し、その後に中央に提示した垂直線に対して運動対象が右あるいは左だったかを答えさせた。後方の斜線分の視差が 7.5 arcmin のとき、運動対象は前方と後方の真ん中に位

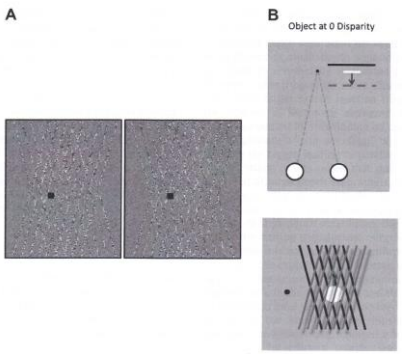

図3.2　A:奥行と方向の異なる2種類の斜線分による運動ツェルナー錯視実験のためのランダム・ドット・ステレオグラム。B:ステレオグラムを立体視したときに出現するパターンで、奥行と方向の異なる2種類の斜線分の間に運動刺激が出現する（Khuu 2013）

置した。この場合、後方斜線分の視差が7.5 arcmin より小さい場合には、後方斜線分は運動対象に近くなり、この値より大きい場合には前方斜線分より遠くなる。

1.3　曖昧でない事態での運動視差による奥行検出閾

観察者が視野内の２つの対象の一方を注視しながら移動するとき、２つの対象は相互に動いて知覚され、網膜上にもこれらは相対的な運動として生じる。観察者が一方の対象を注視しつづけると対象を追従するなめらかな眼球運動も生起する。網膜上の相対的な運動と眼球追従運動の２つの要因によって運動視差による曖昧でない奥行出現が出現する。網膜上の相対的な運動だけでは出現する奥行の方向（手前か後ろか）を規定できない。この奥行の出現方向の曖昧さを消すものは網膜外の眼球追従手がかりである（Nawrot & Joyce 2006, Nawrot & Stroyan 2009）。

Nawrot & Stroyan と Stroyan & Nawrot（2011）は、刺激側のパラメータ（distal）と網膜側のパラメータ（proximal）の間の関係は、網膜運動速度と眼球追従運動速度の比で表されることを示した。視空間では、対象の網膜運動速度（dθ/dt,　dθ）、観察者の眼球追従速度（dα/dt、dα）、注視点への観察距離（f）、注視点から対象までの距離（dMP）の間の関係は、次式のようになる。

この式によると、もしdαとfが与えられていれば、それぞれの対象の網膜運動速度、すなわち運動視差（dθ）からそれらの対象までの注視点からの相対的距離（dMP）を知る

ことができる。運動視差は対象間の相対的距離を表すものなので、網膜像以外の手がかりがない場合には対象までの絶対的距離を知ることができない。

今回、Holmin & Nawrot(2015)は、対象の網膜運動速度（ｄθ）と観察者の眼球追従速度（ｄα）から曖昧でない対象間の奥行を知覚できる最小の奥行検出閾値を測定することで網膜運動速度と眼球運動速度の比(M/PR)を求めた。実験では、運動視差による奥行検出閾測定のために図 3.3 に示すような運動刺激パターンが用いられた。観察者の眼球追従速度（ｄα）はドットを並進させて作成、また奥行出現させる領域内のドットとウィンドー内の刺激ドットは反対方向にシフトさせて操作した。ウィンドーと奥行領域のドットを明瞭に区別するためにウィンドー内のドットの速度は奥行領域のそれの 7 倍に設定した。観察者の眼球追従速度(ｄα）は、1.3、2.3、5.0、6.6、10.0、15.0、18.3、25.0deg/s の 8 段階に、対象の網膜運動速度（ｄθ）は 0.025 から 0.92deg/s の範囲でそれぞれ変化させ、奥行検出閾実験では被験者に出現した奥行領域が注視点の上か下かを判断させた。この奥行検出閾実験とは別に運動速度閾検出実験および眼球追従モニター実験も実施した。運動速度閾検出実験では、ウィンドーは並進させずディスプレーの中央に静止させた状態で上下の領域のドットを反対方向に運動させ、そのときに出現するドットの回転方向（時計回り、反時計回り）を被験者に知覚判断させた。眼球追従の正確度をみる眼球追従モニター実験では 1 個の白点で作成した追従対象を 11 段階の速度で左・右方向に運動させ、そのときの対象と眼球の位置の差（ゲイン）を測定した。

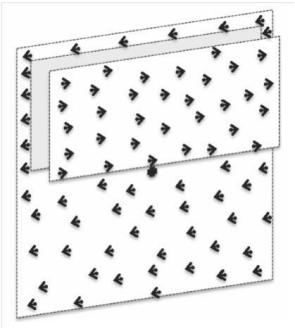

図 3.3　運動視差による奥行検出閾測定のための刺激パターン。矩形が背景面より手前に視えるように提示され、その矩形内のドットと背景面ドットとは相互に反対方向にシフトされる(Holmin & Nawrot 2015)。

実験の結果、奥行検出閾値(dθ）は眼球追従速度が 5 から 18.3deg/s の間は一定となるが、これ以下あるいはこれ以上の追従速度では増大した。また、運動するドットの方向によって眼球が鼻ーこめかみに追従する（NT)か、あるいはこめかみー鼻側に追従する（TN)

か奥行検出閾値は異なり、NT 条件で有意に小さいことが示された。運動方向を識別する運動速度検出閾値は 0.13deg/s となり、奥行検出閾値と同等を示した。また眼球追従の正確度は、追従対象の運動速度が 20deg/s 以上になるとゲイン値が大きくなり、追従の正確度が悪くなることが示された。網膜運動速度（dα）が 25deg/s 以上になると、奥行検出閾値が高くなるのは、この眼球追従の不正確によると考えられる。

得られた測定値から対象の網膜運動速度と眼球追従速度の比（dθ／dα、M／PR）が眼球追従速度によってどのように変わるかをみると、M／PR 比は眼球追従速度が 2.3deg/s で高く、それ以降は 25.0deg/s まで緩やかに小さくなることが示された。これは、最小の M／PR 比は網膜速度と眼球追従速度の両要因によって決められ、眼球追従速度が大きいあるいは小さい場合は不正確な眼球追従シグナルによって奥行検出閾は決められ、そして眼球追従速度が適切な場合には奥行検出閾値は網膜運動シグナルによって決められると考えられる。

2. 運動視差の処理過程

2.1 ステレオブラインド者の運動立体視における単眼・両眼観察

単眼より両眼で観察した方が簡単な視覚課題の成績は良くなることが知られている。これは、片眼より両眼での観察の方が各眼でターゲットを探索する確率を加重できる(probability summation)ためと考えられている(Andrews,1967)。しかし、このような両眼観察による有利は、複雑な視覚課題、より長い観察課題、強い明るさコントラスト課題では失われる(Frisén & Lindblom 1988, Bearse & Freeman 1994, Banton & Levi 1991, Legge 1984)。各眼の視力は正常だが両眼立体視力を欠く者も、両眼観察の方が短時間露出事態での閾値近辺のフラッシュ検出において有利である(Westendorf et al. 1978)。

van Mierlo et al.(2011)は、各眼の視力は正常だが両眼立体視力を欠く者（ステレオブラインド）を対象として、運動による奥行視(motion in depth)の知覚が単眼より両眼観察の方が成績が向上するかについてしらべた。実験では、左右眼で水平方向の位置が異なるランダム・ドットを運動させて水平軸を中心に回転するシリンダーを出現させた。この場合、左右眼に提示したダイナミック・ランダム・ドットが視差対応をもつ条件（コラレート条件)、ダイナミック・ランダム・ドットの左右眼での視差対応を除いた非対応条

件（非コラレート条件）、密度を倍増し片眼にのみ提示した単眼条件、そして左右眼に両眼視差を付けるがドットの運動を除去した静止条件の４条件を設定した。ただし、非コラレート条件では、円筒形の前面と後面の分離をドットの左右方向の運動速度に差をつけることで生成しているために、両眼視差は存在しないものの運動による奥行手がかりは存在した。観察は液晶シャッター眼鏡を通して行われ、各条件下でシミュレートして出現させたシリンダーの前面のドットの運動方向（上あるいは下）を被験者に答えさせた。被験者はステレオフライテストでステレオブラインドと判定された者３名（各眼の通常視力は正常）と健常眼者７名であった。

実験の結果、ステレオブラインド者は両眼観察事態であるコラレート条件と非コラレート条件でシリンダー前面のドットの運動方向をほぼ正しく知覚できたが、しかし両眼視差のみの静止条件では完全に判断が不能なことが示された（健常眼者は逆に完全に可能であった）。これは、ステレオブラインド者は両眼立体視力を欠いていること、しかし両眼観察では運動要因による奥行視が可能であることを意味した。単眼観察条件では、ステレオブラインド者１名および健常者２名がチャンスレベル以上で正答できた。

そこで、ステレオブラインド者が両眼に起因する何らかの手がかりを利用しているかをしらべるために、まず、非コラレート条件で左右眼に提示するドット速度に違いを導入（運動速度差条件）し、同期的あるいは非同期的に変化させて提示（非同期条件）した。ドット速度を左右で非同期に変化させると左右のドットの対応が阻害できる。次にシリンダーの各ドットにサイン波形の左右方向へのシフト（１cm の幅で 0.4Hz でオシレート）を導入することで、シリンダーを左右方向に移動させた（トランスレーション条件）。イメージ内のあるひとつのドットが左方向にシフトすれば、それは前面に属すると推定できるが、シリンダー全体を横方向に動かせば、この推定を阻害できる。さらに、回転するシリンダーを連続的に伸張もしくは圧縮（伸張・圧縮条件）させた。ここでは、ドットの一連のシフトを検出しにくくさせることができる。観察は単眼および両眼で実施した。

実験の結果、運動速度差条件、トランスレーション条件、伸張・圧縮条件ともに、正答率が低下するものの、単眼観察そして両眼観察の両方でチャンスレベル以上の正答が得られた。とくに、両眼観察での同期条件は非同期条件より成績は劣った。

以上のことから、ステレオブラインド者は運動の奥行視によってシミュレートされたシリンダーの回転方向の知覚的判断では単眼観察より両眼観察の方が優れていた。これは、左右眼に提示されたドットの対応、速度など左右差を検出しているのではなく、それらを単眼独自に検出し統合させて知覚判断していると考えられる。

注視下での微細な頭部運動による運動視差

観察者が頭部を固定せずに対象を注視する場合、頭部は不随意に微細な動きを、この微細な頭部運動は運動視差を惹起する。これまで、この微細な頭部運動による運動視差は小さいために、運動視差としては有効ではないと考えられてきた。最近、この微細な運動視差は対象を掴みそして置く動作をする際に面の傾斜知覚に手がかりとして機能する こと(Louw et al.2007)、また観察者の姿勢の動きによる運動視差はその姿勢の制御にも役立つこと(Bronstein & Buckwell 1997, Guerraz et al.2000 2001)が報告された。しかしながら、微細な頭部運動による運動視差は、それ自体が微少なために奥行手がかりとしての効果はないと考えられてきた。

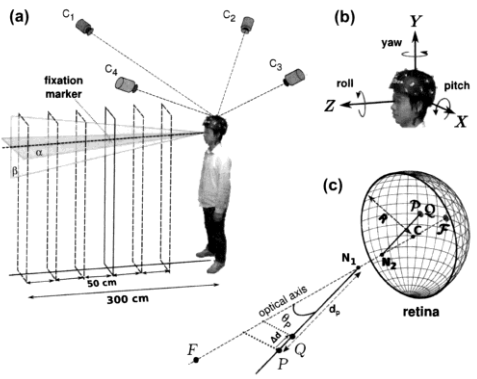

図3.3 (a)観察事態および4台のビデオカメラによる観察者の頭部運動のモーション・キャプチャ、そのために観察者は20個のLEDが付いたヘルメットを着用。(b)モーション・キャプチャのデータに基づいて頭部運動を 3 次元座標軸で表。(c)網膜像の動きはGullstrandの眼球モデルに基づいて計算された。すなわち、網膜半径R:11.75mm、網膜の中心からのノーダルポイントの距離(N1):5.7mm、同じく(N2):5.4mm、2つの対象(点光源):PとQ、これらの網膜上の投影点:PとF。これら2つの点光源は運動視差の閾値の検出に使用(Aytekin & Rucci 2012)

そこで、Aytekin & Rucci(2012)は、微細な頭部運動による運動視差の奥行効果をしらべた。実験では、図3.3(a)に示したように、観察者には20個のLEDが付いたヘルメットを着用させることで観察者の頭部運動を4台のビデオカメラでモーション・キャプチャした。モーション・キャプチャのデータに基づいて、頭部運動を3次元座標軸、すなわちX軸についての動きは前後運動(pitch)として、Y軸のそれは左右運動(yaw)として、Z軸のそれは前額での回転運動(roll)として表示した（図(b)）。注視対象の網膜像の動きはGullstrandの眼球モデルに基づいて表した（図(c)）。すなわち、網膜半径R（11.75mm)、網膜の中心からのノーダルポイントの距離（N1：5.7mm)、同じく(N2：5.4mm)、2つの対象（点光源PとQ)、これらの網膜上の投影点（PとF）とする。これら点光源は運動視差の閾値の検出に使用した。

視対象の網膜上の位置の変位は、視対象を注視時の微細な頭部運動のデータから推定された。その結果、視対象までの観察距離が4m以内の場合、観察者の頭部運動が奥行方向にわずかに動くと、網膜上では、視対象の変異は識別可能な範囲の速度差(1′/s)を越えることが明らかにされた。このことは、観察者が対象を注視する際の不随意な微細頭部運動による運動視差は対象の奥行弁別のための有効な手がかりとなることを示す。

2.2 運動視差からの3次元視のための統合時間

Nawrot & Stroyan(2012)は、運動視差のしくみにおいては観察者が直接に自己の移動速度を知覚するという仮定を排除して、運動視差は、「観察者の移動速度と網膜情報の比」を手がかりとするという新たなモデルを提示した。図3.4に示したように、観察者が対象を片眼で注視したまま横方向に移動すると、観察者の移動速度と網膜情報は次のようになる。まず、相対的奥行距離(d)は、次式で表される（f：絶対的奥行距離、dθ：対象の網膜像速度、dα：眼球追従速度)

$$d = \frac{\mathrm{d}\theta}{\mathrm{d}\alpha}\frac{1}{1-\mathrm{d}\theta/\mathrm{d}\alpha} * f \qquad (1)$$

また、上式はdが小さい条件では次式で近似できる。

$$\frac{d}{f} \approx \frac{d\theta}{d\alpha} \quad \text{or} \quad d \approx \frac{d\theta}{d\alpha} f \qquad (2)$$

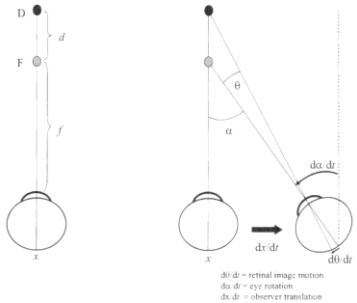

図3.4　運動視差の原理。F：注視対象、D：対象、ｆ：絶対的奥行距離、ｄ：相対的奥行距離、α：観察者の移動前と後の注視対象F間の注視角度、θ：観察者の移動前と後の対象D間の注視角度、dθ/dt：網膜像の運動距離、dα/dt：眼球の回転距離、dx/dt：観察者の横方向移動距離(Nawrot & Stroyan 2012)

この近似式は、dが「網膜像速度と眼球追従速度の比」で表されることを示す。さらに、dθが「＋/－」の値をとれば、網膜運動の方向がそれぞれ逆方向であることを表し、dの出現方向も観察者に対してそれぞれ逆方向（手前／向こう側）となる。運動視差からの3次元距離の復元では各要因の処理に時間がかかる。すなわち、網膜像の運動距離（dθ/dt)、眼球の回転距離（dα/dt)、そして相対的奥行距離（d）の各評価の過程が統合される必要があり、そのためには各過程での処理時間が必要となる。

そこで、Nawrot & Stroyanは、運動視差による奥行距離の復元に要する時間の測定を試みた。その方法はマスキング・パラダイムに従って実施された。すなわち、観察者に運動からの奥行の識別、観察者の移動による刺激の運動方向の識別、２刺激間の相対的な運動方向の識別を課して、マスキング条件と非マスキング条件でそれらのSOAsの比較が試みられた。この場合、もし運動と奥行条件とが類似したSOAsならば、運動視差からの奥行処理過程に要する時間は運動処理過程を含むのに対して、もし運動と奥行条件とが異なるSOAsを示すならば、奥行は追加的な処理過程、すなわち各処理過程での結果を統合する過程を必要とすると推測できる。実験では、横波型のサイン波形奥行が出現するドットを提示し、観察者には左右に運動する注視対象を眼球追従させ、その波形のトップとボトムの奥行出現方向を報告させる。実験条件は4通りである。1)奥行条件： 運動視差刺激

を提示し、観察者には奥行出現方向を報告。2)マスキングを伴う奥行条件：運動視差刺激提示の後にマスク刺激（ISI：0 ms、83ms 持続）を提示。3)前駆刺激を伴う奥行条件：運動視差刺激の前に前駆刺激（左右に移動する注視刺激）を 750-1500 ms 範囲で提示時間を変えて提示。4)前駆刺激とマスク刺激を伴う奥行条件：運動視差刺激提示の前に前駆刺激を、運動視差刺激の後にマスク刺激（ISI：0 ms、83ms 持続）を挿入。5)相対的運動条件：注視対象静止でドットのみを運動させて（dθ/dt）提示し、ドットの運動方向の識別に要する刺激時間を測定。6)マスキングを伴う相対的運動条件：相対的運動刺激提示後にマスク刺激を提示（ISI：0 ms、83ms 持続）し、観察者にはドットの運動方向を報告。7)ウィンドー運動条件：ドットの外枠であるウィンドーを左右に運動（dα/dt）させて提示し、観察者はウィンドーの中心を注視したままでウィンドーの運動方向を観察する。8)マスキングを伴うウィンドー運動条件：ウィンドー運動提示後にマスク刺激を提示（ISI：0 ms、83ms 持続）、観察者はウィンドーの中心を注視したままでウィンドーの運動方向を観察。これらの実験条件で運動視差からの復元のための最少の提示時間（閾値）が測定された。

実験の結果、(1)運動視差からの復元に要する時間はおおよそ平均 30ms であること（実験条件１）、(2)前駆刺激を運動視差刺激の前に導入しても、復元に要する時間 30ms には変化はないこと（実験条件３）、(3)しかしマスキング刺激を導入すると、前駆刺激導入の有無にかかわらず、運動視差からの復元に要する時間は 67ms（実験条件３）あるいは 74ms（実験条件４）まで長くなること、(4)ドットの運動方向（実験条件 5）あるいはウィンドーの運動方向（実験条件 7）の識別に要する時間はおおよそ 15ms、(5)マスキングを導入すると、ドットの運動方向に要する時間は 35ms（実験条件 6）、ウィンドー運動方向の識別に要する時間は 25ms（実験条件 8）に、それぞれ長くなることが明らかにされた。

これらの結果から、まず視覚システムは極めて短い時間で運動視差から奥行を復元できることが示された。注視点の対象が観察者から１mにあり、2 つめの対象がその視線上 1.25m に位置する場合を考えると、近似式(2)から 0.25m を識別するために要する時間は 0.03s となることから、この結果は妥当と考えられる。次にマスキングの導入で運動視差からの復元時間が長くなるのは、マスク刺激による妨害で処理途中にある眼球運動信号の内的処理が遮断されるため、また前駆刺激の導入では運動視差からの復元時間が長くなら

ないのは、次の刺激の処理を優先するために運動と奥行の処理過程が強制中断させるしくみがあるためと、それぞれ考えられる。

2.2. 運動視差における「拡大ー縮小」運動と「増進ー消失」運動の奥行効果

観察者が対象に向かうように前進運動すると、近くにある対象はダイナミックに遠くにある対象を隠したり出現さたりする。このとき、2種の運動が網膜上に流動的生起する。一つは対象面テクスチャのオプティ・フローである「拡大ー縮(expansion-compression)」である。これはシア・モーションとも呼ばれる。もう一つは、より遠くの対象のテクスチャを隠蔽したり再出現させたりする「増進ー消失(accretion-deletion)」運動である。

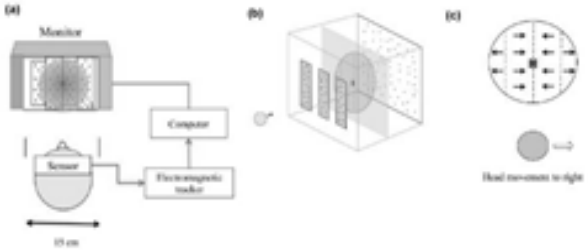

図3.4　運動視差実験装置と刺激配置。(a)モニター、頭部運動検出のセンサー、磁気トラッカー、およびコンピュータから構成された装置。(b)モニターに提示された刺激事態で、前面にはランダムドットから構成された3本の垂直に配した不透明な矩形、その背後にはランダムドットからなる面がある。これらの刺激面は実際には前面と後面の中央に灰色で示した位置に提示され、またその中央には円形面が提示された。(c)被験者から観察できる刺激パターンで、中央のx印は注視点、矩形間のドットは相互に反対方向に運動する(Yoonessi & Baker 2013)。

Yoonessi & Baker(2013)は、運動視差における「拡大ー縮小」運動および「増進ー消失」運動が奥行の出現方向に与える効果をしらべた。実験事態は、図3.4に示されている。図の(a)はモニター、頭部運動検出のセンサー、磁気トラッカー、およびコンピュータから構成された装置を示す。被験者が頭部を左右に動かすと、それに連動した運動視差が生じる。図(b)はモニターに提示された刺激事態で、前面にはランダムドットから構成された3本の垂直に配した不透明な矩形、その背後にはランダムドットからなる面がある。これらの刺激面は実際には前面と後面の中央に灰色で示した位

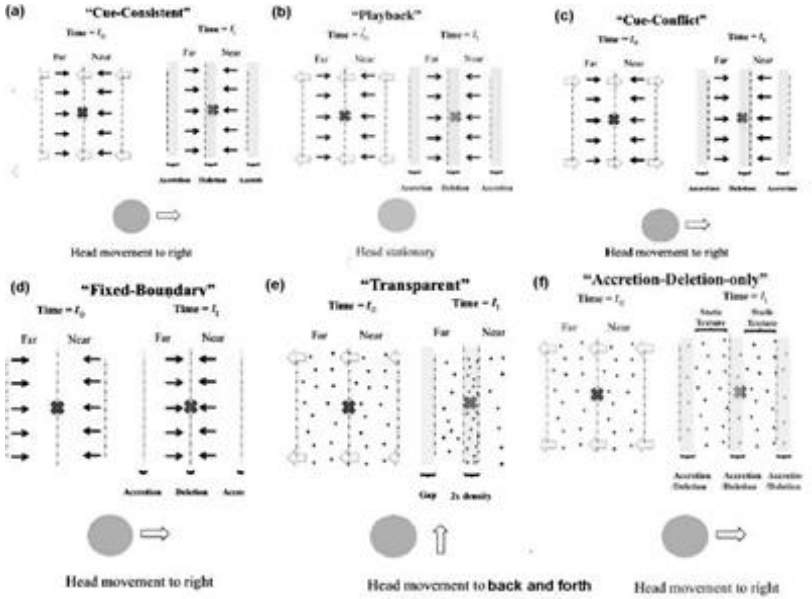

図3.5　運動視差条件。(a)「拡大ー縮小」運動と「増進ー消失」運動の両手がかりが奥行出現方向に矛盾無く頭部運動（ここでは右方向）に連動して提示される事態。(b)(a)事態で得られた運動視差をビデオで記録して再現した事態、被験者の頭部は静止、(c)「拡大ー縮小」運動と「増進ー消失」運動の両手がかりが奥行出現方向に関し抗争(conflict)して頭部運動（ここでは右方向）に連動される事態。(d)垂直矩形の境界が固定され、その内部のテクスチャは頭部運動に連動して「増進ー消失」運動する事態、しかし境界（エッジ）での「増進ー消失」運動は対象の奥行出現が前か後かは指示しない。(e)テクスチャは透明な物として表示され、また頭部運動に連動した「増進ー消失」運動は存在しないが、観察者が頭部を前後に運動すると灰色表示された領域はドットが無くなるかあるいは 2 倍に増えるかが反復される。(f)テクスチャは静止しているが、境界(エッジ）では頭部運動に連動して「増進ー消失」運動をする事態(Yoonessi & Baker 2013)

置に提示され、またその中央には円形面が提示された。図(c)被験者から観察できる刺激パターンで、中央のｘ印は注視点、矩形間のドットは相互に反対方向に運動して視差を生

じる。被験者には、頭部を左右に運動させながら垂直矩形の左右のエッジのどちらが奥行的に前あるいは後に視えるかを判断させた。このとき、注視点は常に視えているので、垂直矩形が注視点を覆う場合には知覚コンフリクトが起きることになる。奥行出現方向の判断は、頭部運動に対しイメージ運動（運動視差）をどのくらいの幅で動かすか、その比率(Syncing gain)を0.01から0.3の範囲で変えて求められた。この比率が高いほど、出現する相対的奥行は大きくなる。運動視差は、「拡大－縮小」運動のみ、「増進－消失」運動のみ、両方の運動がある条件、これらの２つの手がかりが一致している条件と抗争事態(conflict)にある条件とが設定された。図3.5(a)には、「拡大－縮小」運動と「増進－消失」運動の両手がかりが奥行出現方向に矛盾無く頭部運動（ここでは右方向）に連動して提示される事態で、黒色矢印はテクスチャが「拡大－縮小」運動することを、白色矢印は矩形の境界の動きを、青と赤で表示した領域はテクスチャの「増進－消失」運動を、そして赤のｘは注視点をそれぞれ示す。下部の灰色円は被験者の頭部を、右横の矢印は頭部運動を表示。(b)(a)事態で得られた運動視差をビデオで記録して再現した事態、被験者の頭部は静止、(c)「拡大－縮小」運動と「増進－消失」運動の両手がかりが奥行出現方向に関しコンフリクトして頭部運動（ここでは右方向）に連動される事態で、ここでは「拡大－縮小」運動によって手前にあることを示される対象が遠方の対象によって覆われたり、現れたりする。(d)垂直矩形の境界が固定され、その内部のテクスチャは頭部運動に連動して「増進－消失」運動する事態、しかしこの境界（エッジ）での「増進－消失」運動は対象の奥行出現が前か後かは指示しない。(e)テクスチャは透明な物として表示され、また頭部運動に連動した「増進－消失」運動は存在しないが、観察者が頭部を前後に運動すると灰色表示された領域はドットが無くなるかあるいは2倍に増えるかが反復される。(f)テクスチャは静止しているが、境界(エッジ）では頭部運動に連動して「増進－消失」運動をする事態である。

Syncing gain の増大に伴って垂直矩形の左あるいは右エッジの奥行出現方向の正確度がどのように変化するかをしらべた結果、次のようになった。(1)「拡大－縮小」運動と「増進－消失」運動の２つの手がかりが存在ししかも２つの手がかり間に一致性がある事態では、すべてのSyncing gainで正確度はほぼ100％(事態ａ)。(2)この事態の再現提示ビデオを頭部静止事態で観察した場合では、Syncing gainが0.03まではチャンスレベル

近辺であるが、それを越え0.2以上では知覚判断はほぼ100%の正確度（事態b)。(3) 2つの手がかり間がコンフリクトする事態では、Syncing gainが小さいときにはほぼ100%の知覚判断が示されたが、Syncing gainが0.05では50%、0.3では0%の正確度に減少（事態c)。(4) 固定された境界の内部のテクスチャが頭部運動に連動して「増進－消失」運動する事態では、Syncing gainが小さい場合には100%、0.1以降でもチャンスレベル以上の正確度で知覚判断された（事態d)。(5)透明なテクスチャでは、すべての範囲のSyncing gain でほぼ正しい知覚判断がなされ、とくに小さい場合には 100%の正確度が示された（事態e)。(6)「増進－消失」運動のみの事態では、奥行判断はチャンスレベルだった（事態f)。

これらの結果から、運動視差における２つの運動要素である「拡大－縮小」運動と「増進－消失」運動は相互に補完的に作用し、とくに「増進－消失」運動は相対的奥行が大きい場合に作用する。しかし「増進－消失」運動は奥行出現を促進することができるのみで、単独では奥行出現の方向を規定できない。結局、「拡大－縮小」運動は広範囲の相対的奥行に手がかりとして機能するが、「増進－消失」運動は相対的奥行が大きい条件でのみ機能する手がかりであると考えられる。

2.3. 運動視差の時間的特性

運動視差に基づいて対象の奥行を識別する場合、視覚システムは運動視差刺激をある時間の範囲で蓄積する必要がある。運動からの立体復元(structure from motion)の場合、立体知覚が可能になるにはドット刺激の持続時間は 50～100ms 間必要だし(Treue et al.1991)、さらに全体の刺激持続時間が500～1000msの間で持続時間が増大すると知覚される奥行も大きくなることが示されている(Eby 1992)。Caudek et al.(2002)は、運動からの立体復元は2過程から成り、第１段階はローカルな運動を150msという短時間内に検出し、これに基づいて奥行計算する過程であり、第２段階は第１段階での計算値から１s以内にグローバルな立体形状を統合する過程が続くと考えた。運動視差による奥行出現も、これと同様に、局所的な運動と運動視差の検出過程が最初にあり、これを統合してグローバルな奥行を復元する過程が続くと考えられる。

そこで、Hosokawa et al.(2013)は、運動視差による奥行復元過程での時間的特性を実験

的にしらべた。被験者にはランダムドットからなる 2 つの矩形のフィールド(図 3.6a)が提示された。２つのフィールドの片方は観察者の頭部運動に連動してドットをサイン波形状に運動（リファレンス刺激)、もう一方は「限定された時間帯(concomitant interval)」のみ頭部運動に連動してドットを運動（ターゲット刺激）させた(図 b)。限定された時間帯での頭部運動は、端から端までの全体頭部運動との比率（「全体運動に対する限定された運動の比率」）で 1/6、2/6、3/6、4/6、5/6 と変化させた。ドットは水平方向に頭部運動に随伴して垂直方向にサイン波形状に運動させ、このパターンの空間周波数を 0.4 cycles/deg に設定、またこのパターンの振幅のピークを頭部運動 1 cm あたり 0.14、0.20、0.27 cm（6.5 cm の頭部運動につき 40、60、80 arc min)と変化させた。被験者には、顎載台に顎を載せてレールに沿って端から端まで提示音に合わせて動かすように求め、２つのフィールドに生起する波形の奥行のどちらの方が深いかを片眼観察で知覚判断させた。上昇系列と下降系列を設定し、リファランス刺激の運動視差量（パターン振幅のピーク値）を段階的に増減してターゲット刺激との視えの奥行を比較させた。

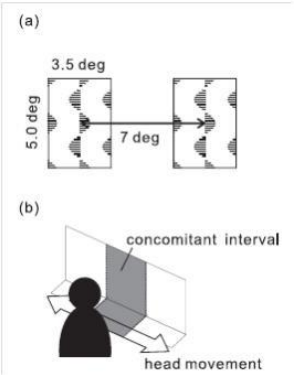

図 3.6　最少運動視差量の測定。(a)ランダムドットからなる 2 つの矩形のフィールドが提示され、片方は観察者の頭部運動に連動してドットがサイン波形状に運動し、もう一方は限定された時間帯(concomitant interval)のみ頭部運動に連動してドットが運動する。(b)頭部運動に連動してドットを運動させる限定された時間帯(concomitant interval)を示す(Hosokawa2013)

実験の結果、ターゲット刺激に対するリファランス刺激の奥行の主観的等価値(視差量)は、すべてのパターン振幅条件で「全体運動に対する限定された運動の比率」が増大するとリニアに上昇することが示された。このことは、運動視差刺激の知覚時間が長くなると

運動視差による奥行量も増大することを示し、したがって運動視差が時間とともに蓄積され統合されることを示唆する。

そこでさらに、運動視差による奥行提示の途中に運動視差を急激に変化する事態を設定し、その変化を検出するかどうか、また検出までの反応時間を測定した。運動視差の変化は、最初に提示した視差量（peak amplitude が 60 arc min）の 20、40、60、80、100%の増減とし、視差変化は観察者の頭部運動範囲の端あるいは中央とした（端より中央の方が頭部運動は速い）。その結果、運動視差変化が小さい場合の検出率は悪いこと、運動視差変化の検出率は 60%以上の変化では高くなること、またその検出までの反応時間は視差変化が大きくなるにつれリニアに短くなること、最少でも１秒を要することなどが示された。このことから、運動視差は比較的長い処理時間が必要とされる低域通過フィルター（low-pass filter）の特性を持つと考えられる。

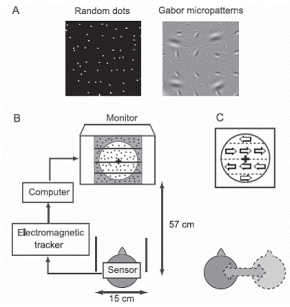

図 3.7 ランダムドット（A の左図）とガボールマイクロパターン（A の右図）による運動視差の奥行効果の違いをしらべる実験装置（図 B）。図 C は、観察者が中央の注視点を注視したまま頭部を左右に動かすと頭部運動の速さに比例した奥行が正射影レンダリングでは出現するが、パースペクティブレンダリングでは刺激の運動による奥行面のシミュレーションは複雑になる（Buckthought et al. 2017）。

3. ダイナミック・パースペクティブ

従来の運動視差実験では正射影レンダリング（Orthographic rendring）によるランダムドットが刺激パターンとして用いられてきた。しかしこれは頭部運動による変化が簡素化された人工的な状態であり、もっと自然な状態を反映した運動視差実験、すなわち頭部運動による刺激パターンが 1/f スペクトラムをもち、かつパースペクティブレンダリング（Perspectibe rendering）によって生じる事態での測定が求められる。Buckthought et al.（2017）は、図 3.7 示したような実験装置（図 B）で運動視差の奥行効果を再検討した。観察者の頭部運動に連動してシフトする刺激パ

ターン(図C)にはランダムドット（Aの左図）とガボールマイクロパターン（Aの右図）を用いた。頭部運動に随伴して変形するパターンのレンダリングには、図3.8に示すように、正射影レンダリング（図のA)とパースペクティブレンダリング（図のB)が設定された。図3.8は前額平行面を小矩形で分割し左,右の頭部運動によってどのような変形が面全体に生じるかを示したもので、正射影レンダリング条件での奥行なしは図のA、遠くの奥行は図のC、近くの奥行は図のEに、またパースペクティブレンダリング条件での奥行なしは図のB、遠くの奥行は図のD、近くの奥行はに図のFにそれぞれ示されている。図34に示すように、頭部運動における正射影レンダリングでは垂直方向のシフトはほとんど起きないが、パースペクティブレンダリングでは生起し、これは両眼立体視の垂直視差に類似する。またパースペクティブレンダリングでは遠い面のドットのシフトは中央で遅く外側エッジで大きいが近い面のそれは逆になり、したがって左右方向のシフトに勾配が生じるが、正射影レンダリングではそれは起きない。実験で観察者の前額平行面に提示する運動視差の刺激パターンは、図3.7のAのように、ランダムドットとガボールマイクロパターンの２条件とした。マイクロパターンは4通りの周波数(1、2、4、8 c/deg)で提示し、そのマイクロパターンの相対的な数をそのフーリエスペクトラムが自然界におけるようにパワースペクトラムが1/fに近似するように操作した。さらに頭部運動とこれに連動してシフトさせるイメージの間には4

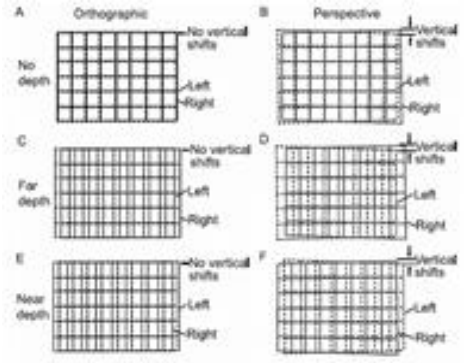

図3.8　観察者の前額平行面における正射影レンダリング(A)とパースペクティブレンダリング（B)の相違。前額平行面を小矩形で分割し左右の頭部運動によってどのような変形が面全体に生じるかを示したもので、正射影レンダリング条件での奥行なしは図のA、遠くの奥行は図のC、近くの奥行は図のEに、またパースペクティブレンダリング条件での奥行なしは図のB、遠くの奥行は図のD、近くの奥行はに図のF（Buckthought et al. 2017)。

通りの比率（syncing gain)、0.01、0.05、0.1、0.3を設定した。この値が大きいと出現する相対的奥行も大きく、syncing gain が0.3の時に相対的大きさは35cmであった。被験者にはランダムドットとガボールマイクロパターンのそれぞれで、注視点の上あるいは下のテクスチャのうちどちらが手前に視えるかを判断させた。

その結果、相対的奥行判断知覚は、正射影レンダリングよりパースペクティブレンダリング条件で正確さが高くなることが示され予測通りであったが、しかしランダムドットパターンよりガボールマイクロパターン条件で劣ったことは想定外であった。

Buckthought et al.(2017)はさらに、図3.9に示したような、パースペクティブレンダリングの奥行効果を高めている３つの要素、垂直要素の変形(vert,vertical)、近面と遠面の間の速度(speed)、左右と垂直方向の速度勾配（lat grad,lateral gradient)をそれぞれひとつずつ除く操作を施した。実験では、ランダムドットを用いパースペクティブレンダリング、およびそれから３つの要素のいずれかを除いたレンダリング、そして正射影レンダリングの 3 条件で被験者に注視点の上・下での視えの奥行順序を求めた。

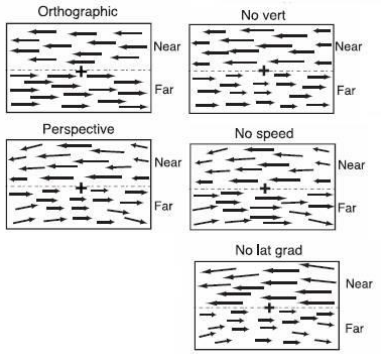

図 3.9　パースペクティブレンダリングから垂直要素(vert,vertical)、速度(speed)、左右方向の勾配（lat grad,lateral gradient)の各要素を除去したパターン（左列）(Buckthought et al. 2017)。

その結果、3要素を除いた条件では奥行順序の知覚の正確さが劣ることが示され。これらの要素はいずれも運動視差における奥行効果を高めていた。

4 運動要因の３次元視対象の知覚特性

速度勾配をもつ円運動刺激の奥行効果

速度勾配をもつ一群のドットは奥行印象を生じさせる。Ito(2010)は、視線を中心に円運動するドットに速度勾配をつけて運動させると奥行印象が生じることを示した。この奥行印象は、ドットを拡大あるいは螺旋状に運動させた条件と同等の奥行効果があるが、

しかし横方向の速度差をもつ運動視差による奥行印象ほどではないことを明らかにした。この結果から、円運動による奥行は「拡大-縮小」、螺旋運動と同じしくみによるものであるが、横方向の運動視差とは異なるものと考えられる。

運動からの立体の復元における図-地要因ならびにドットの「出現-消失」要因

白と黒の垂直の長方形図形が交互に並列したパターン(図3.10のA)の各領域内のドットを隣接間で逆方向に等速度で水平運動させると、白地の上に黒いシリンダーが立体的に奥行回転(図Bの左)あるいは黒地の上に白いシリンダーが立体的に奥行回転(図Bの右)するように知覚される。ドットは出現と消失(accretion/deletion)を反復するものの、各領域内のドットは等速度で運動しているので運動視差は機能していないにもかかわらず、形状は立体視される。このような3次元形状知覚が可能なのは、シリンダーの形状における「図(figure)と地(ground)」要因が関係していると考えられる。

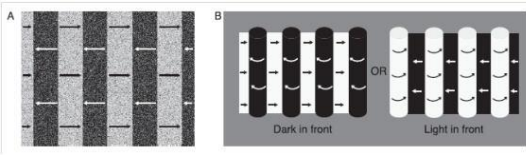

図3.10　運動からの立体復元。A：白と黒の垂直の長方形図形が交互に並列したパターンで各図形内のドットは隣接間で反対方向に等速度で運動、B：このパターンを観察したときに生じる立体印象で、白地に黒い円筒形が奥行回転（左図形）あるいは黒地に白い円筒形が奥行回転(右図形）して視える(Froyen et al.2013)

そこで、Froyen et al.(2013)は、図3.11に示したように、シリンダーの形状における図になりやすさを、次のように4通りに操作した。(A)垂直白色図形の形状を凸に視えるパターン、(B)その形状をシンメトリーにしたパターン、(C)その形状の曲線を平行に変化させたパターン、(D)白図形と黒図形を相互補完的にさせたパターン。さらに、シンメトリー条件では、形状の太さを変化させることで図になりやすさの条件を操作した(この場合、細い方が図になりやすい)。予想としては図になりやすい凸形状をもつパターンが

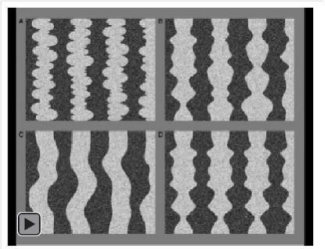

図 3.11　A：垂直白色図形の形状を凸に視えるように描画したパターン、B:同様な図形領域をシンメトリーに描いたパターン、C:　同様な図形領域の曲線を平行に変化させたパターン、D:白領域と黒領域を相互補完的に描いたパターン(Froyen　et al.2013)

もっとも立体的に知覚されると考えられた。被験者には運動するパターンを観察後に、どの垂直図形が回転して視えたかを答えさせた。

実験の結果、形状の立体視と奥行回転が強く出現するのは、凸状形状の条件の場合であり、またシンメトリーの形状の太さを細くするに従い、ほぼリニアーにその形状の立体視と奥行回転出現が大きくなることが示された。

このことから、運動からの形状復元では運動速度差がなくても立体視と奥行回転が生起し、これには図ー地要因が強く関係している。

3 次元対象の形状と表面反射特性が対象の回転軸に与える影響

オプティク・フローによって連続して提示されるイメージから 3 次元対象の特性を視覚システムが再現するためには、変形する形状、対象の運動特性（回転、平行移動、接近）面の反射特性、そして照明特性の組み合わせを解析しなければならない。視覚システムが、どのようにしてこの問題を解決するのかはいまだ不明な部分が多い。とくにオプティク・フローから 3 次元対象を復元(structure of motion,SoM)する場合、対象の回転軸が垂直か、斜方向か、水平方向かを特定することは重要である(図 3.12)。

Doerschner et al.(2011)は、同一対象の面の特性を変え、それをオプティク・フローで提示した場合、観察者は回転軸をどのように特定するかをしらべた。これを観察させると視かけの回転軸はつや消し対象では垂直であるが、光沢対象では斜方向（黄色で表示）となった。これは、対象面の模様、たとえば赤丸と白丸で表示した部分の回転に伴う２つ模様の位置と速度変化は、つや消し対象では回転に伴って平行に移動するが、光沢条件で２つの模様の運動軌跡は明らかに異なるためと考えられた。

そこで今回、Doerschner et al.(2013)は、図3.12のように、対象の形状を簡素から複雑（上段から下段）へと変化、また対象面の反射特性を光沢(a)、テクスチャ(b)、一様(c)、シルエット(d)と操作して、回転軸をランダムに提示した条件で知覚される回転軸がどのように逸脱するかをしらべた。その結果、実際の回転軸に対する知覚された回転軸の逸脱度は、シルエット条件で最大となり、光沢、テクスチャ、一様条件では差が生じなかった。これは前回の実験結果と異なるので、図3.13に示した相称性をもつ3次元対象に形状を変更し、実際の回転軸と知覚した回転軸の逸脱度をしらべた。対象の面の反射特性は光沢、テクスチャ、一様、シルエットの各条件とした。実験の結果、知覚した回転軸の逸脱度は光沢条件とシルエット条件がもっとも大きく、次に一様条件とテクスチャ条件となった。これは、3次元対象の形状が凸部分で形成されたために、回転に伴う輪郭領域が遮られたためと考えられる。光沢条件とシルエット条件の逸脱度が同等

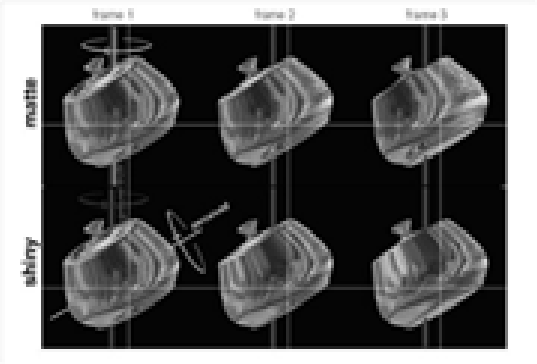

図3.12　3次元対象面の反射特性（つや消し／光沢）の相違が視かけの回転軸に与える影響をしらべるための3次元CG。反射特性はつや消し（上段）と光沢（下段）で、回転軸は垂直である。Doerschner et al 2013)

図3.13 相称性をもつ3次元対象を用い、実際の回転軸と知覚した回転軸の逸脱度をみる実験。対象の面の反射特性は左から光沢、テクスチャ、一様、シルエットの各条件で、右端は3次元対象の断面を示す(Doerschner et al 2013)

に大きいのは、光沢条件はシルエット条件に類似し、輪郭領域が識別できないためであり、逆にテクスチャ条件ではこの輪郭領域を識別させる手がかりがあったためと考えられる。これらの結果から、運動からの3次元形状復元には、対象の面の反射特性が影響すること、またこの影響の程度は対象の形状によって変わること、そして視覚システムは形状、運動軌跡、面の反射特性などの手がかりを統合して3次元形状を復元しているものと考えられる。

テクスチャの「増強ー漸減」運動要素と「図ー地」知覚特性

パターンの両端エッジに刺激の増強(accletion)もしくは漸減(deletion)を導入すると、隣接領域との間に奥行関係が生起し、その領域は背後に退いて知覚される。この「増強ー漸減」手がかりは、刺激面の奥行に関する強力な手がかりと考えられている(Thompson et al., 1985; Howard & Rogers, 2002; Hegd´e, Albright, & Stoner,2004; Layton, O. W., & Yazdanbakhsh, A. 2015)。最近、Froyen et al.(2013)は、ある領域の片側のエッジで刺激増強を他方のエッジで刺激漸減を操作すると、その領域は観察者にとって前面に知覚され次いで自らをオクルードするように、すなわちローテーションするように知覚されることを報告した。

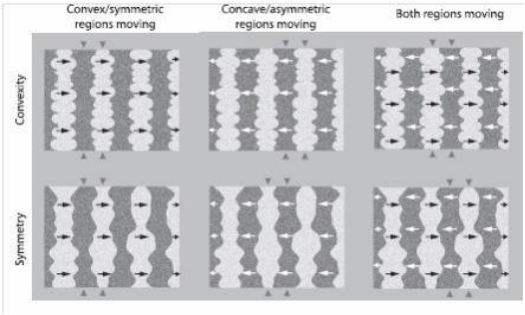

図3.13　運動要因を絡めた凹凸「図ー地」知覚課題。左欄（上）：個々の白色領域は左右相称かつ凸面でその領域のドットが右方向に運動、左欄（下）：個々の白色領域は左右相称でかつ凸面でその領域のドットが右方向に運動、中欄(上)：個々の黒色領域は左右非相称かつ凹面でその領域のドットが左方向に運動、中欄(下)：個々の黒色領域は左右非相称の凹面でその領域のドットが左方向に運動、右欄（上）：白・黒色領域はともに運動するがその方向は反対(Tanrıkulu et al.2016)

Tanrıkulu et al.(2016)は、「図ー地」要因とテクス

チャの運動要因とを競合あるいは協調する場合、どちらの手がかりが優位になるかについて実験した。実験事態は３通りを設定した。その１はすべての領域のテクスチャを運動させるが、その方向は反対方向とする条件（図3.13の右端の列）、その２は相称性もしくは凹凸の要因から構成された領域を静止させ、それ以外の領域のテクスチャを運動させる条件（両手がかり協調条件、図の中央の列）、そしてその３は非凸性と非相称性をもつ領域を静止させ、凸性と相称性領域テクスチャを運動させる条件（両手がかり競合条件、図の左端の列）とした。被験者には隣接する領域のいずれが前に視えるかを答えさせた。

その結果、凸特性と相称性要因をもつ領域のテクスチャを運動させた条件では運動領域が図となる割合はチャンスレベルに留まったが、凹の知覚特性と非相称性要因をもつ領域のテクスチャを運動させた場合は運動領域が図となる割合は有意にチャンスレベル以下であった。また、凸の知覚特性と相称性をもつ領域のテクスチャをともに運動させた条件では、それらが図として知覚される割合はチャンスレベルより有意に高かったが、凹の知覚特性と非相称性の知覚特性をもつ両領域のテクスチャを運動させてもそれらが図として知覚される割合はチャンスレベル以下であった。これらの結果は、パターンの奥行出現

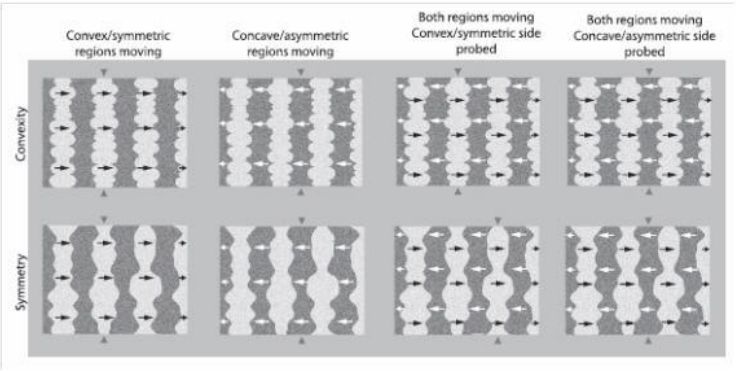

図3.14　「図ー地」要因と運動要因による図領域のローテーション知覚課題。「図ー地」要因には凹・凸知覚と相称性・非相称性を導入、また運動要因では凸もしくは凹領域の１方向運動、あるいは凸と相称性の両領域もしくは凹と非相称性の両領域に運動要因を相互反対方向に導入(Tannkulu et al.2016)

においてテクスチャの運動要素である「増強－漸減」が必ずしも「図－地」特性を越える知覚的要因ではないことを示した。

そこで、図領域の「ローテーション－トランスレーション」を知覚課題とした場合にも同様なことが起きるかについて実験が試みられた。実験条件には、図 3.14 に示したように、「図－地」要因には凹・凸特性と相称性・非相称性を導入、また運動要因では凸もしくは凹領域の 1 方向運動、あるいは凸と相称性の両領域もしくは凹と非相称性の両領域に運動要因を相互反対方向に導入した。被験者には各領域がローテーションして視えるか、あるいはトランスレーションして視えるかを問うた。その結果、凸特性をもつ領域のテクスチャが運動する条件でローテーション視がチャンスレベルより有意に出現、相称性をもつ領域のそれは 50％レベルで出現したが、それ以外の実験条件（非凸あるいは非相称性条件）ではすべてトランスレーション視が生起した。

これらの実験結果は、ある領域が図になりやすいかあるいはその領域が 3 次元視されるかの知覚課題において、テクスチャの「増強－漸減」運動要素は凹凸あるいは相称性のゲシタルト的知覚特性に勝る要因ではないことを示している。

2 次元と 3 次元の運動の検出過程

Cooper et al.(2015)は、単眼視による 2 次元運動からと両眼視による 3 次元運動がどのように検出されるのか、その変換過程の特性を明らかにするために、図 3.15 に示されたようなステレオ視が可能な実験装置を用いて 2 次元と 3 次元の運動方向検出能力をしらべた。提示する運動刺激は 16 個のドットとし、注視点の上方あるいは下方の小円内に提示された。単眼視ではドットは 2 次元面を左右にシフト(図の b の左)、ステレオ視の場合は左右眼のドットの両眼視差を操作し観察者の手前あるいは向こう側に奥行方向にシフト(図の b の右）させた。ドットの速度は、毎秒 0.14°、0.27°、0.55°、1.10°、2.19°、3.29°、4.39°、6.58°、8.78°、13.16°とした。2 次元条件の場合、ドットはランダムな位置に毎回提示してシフト、また 3 次元条件の場合ドットは視野の手前、真ん中（注視点面)、あるいは背後のいずれかにランダムに提示した。被験者には、単眼視条件ではドットが左／右、両眼視条件では手前／向こうのいずれに動いて視えるかをそれぞれ選択させた。

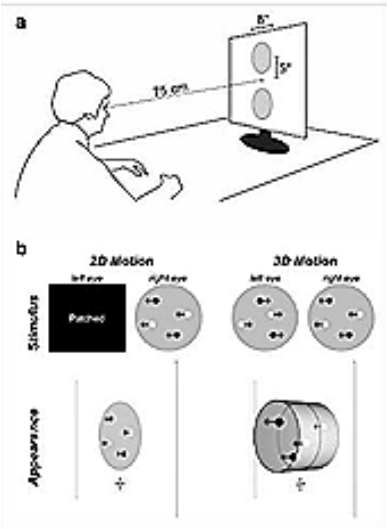

図3.15　2次元と3次元の運動方向の検出能力をしらべる実験装置。a：ステレオグラムで立体視が可能な観察装置。運動するドットが注視点の上方あるいは下方の小円内に提示される。b：単眼観察（左図）あるいはステレオ視（右図）の刺激事態。単眼視ではドットは2次元面を左右にシフト、ステレオ視の場合は観察者の手前あるいは向こう方向にシフト（Cooper et al.2016）

実験の結果、(1)2次元および3次元の運動検出能力はドットの速度で変化し、2次元の運動検出がすべての速度で優れていたが、しかし運動検出感度の最大は2次元と3次元でほぼ同じ速度（2次元では毎秒5.5°、3次元では3.3°）であること、(2)2次元および3次元の運動検出感度を比較すると、2次元の運動検出はドットの最も遅い速度を除いては閾値（75%）以上だったが、3次元のそれは遅い速度（0.14°、0.27°）と最も速い速度（13.16°）では閾値を下回ること、(3)2次元に対する3次元の弁別感度の比（3D /2D）をとると、ドットが中程度の速度ではほぼ一定となること、(4) 2次元および3次元の運動検出でのバイアスをみると、2次元運動では右方向運動の検出がやや高く（網膜レベルでは鼻側への運動）、また3次元運動では観察者の手前方向の検出が高くなること（網膜レベルではこめかみ側への運動）、(5)両眼立体視での運動検出は、観察者に接近する交差視差の方が検出感度が高いこと、などが示された。

この結果から、2次元の運動から3次元の運動への変換処理にはロスを伴い、結果として検出感度を悪くするが、しかし3次元運動を検出できる速度範囲は広いので対象速度を高めることによってこのロスをカバーしている。そして、単眼的運動から3次元運動への

変換は、たんに各眼への単眼的運動から計算されるのではなく、それらの間の重み付けを変えて計算されると考えられる。

5　オプティク・フローの３次元視

前庭感覚とオプティク・フロー知覚

視覚システムは、人間が移動中では、視覚情報と共に聴覚、触運動感覚、そして前庭感覚などと協同して環境の変化を知覚する。そこで、Edwards, et al.(2010)は、オプティク・フローと前庭感覚との関係をしらべた。実験では、視覚情報と前庭感覚とが生態光学的に一致する条件と不一致となる条件とを設定し、オプティク・フローの奥行情報に対する感度を測定した。一致条件では、観察者の前進移動にともなって放射状に拡大するオプティク・フローを提示し、不一致条件では、観察者の後退移動にともなって放射状に拡大するオプティク・フローを提示した。

実験の結果、観察者の移動とオプティク・フローとが生態光学的に一致した条件では、観察者はオプティク・フローからの運動に随伴した奥行感度が、不一致条件より高いことが示された。人間の視覚システムには視覚情報と前庭感覚情報の相乗効果を生み出すしくみが備わっていると考えられる。

ロコモーションとオプティク・フロー (heading と steering)

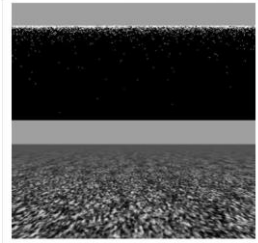

図 3.16　ロコモーションのためのオプティク・フロー。上図はドットによるもの、下図はテクスチャによるもの(Kountouriotis & Wilkie 2013)

Kountouriotis & Wilkie(2013)は、オプティク・フローに導かれる直進方向(heading)と左／右蛇行方向(steering)のパフォーマンスの正確さをしらべた。実験は被験者をドライブシートに座らせ、スクリーンに提示した映像を観察しながらゴールとして提示した目標物に向かうように車のハンドルを回転させることを被験者に求めた。オプティク・フローは、図3.16に示すように、ランダ

ム・ドットによるものと自然シーンにあるテクスチャによるものを用意した。ランダム・ドットによるオプティク・フローのドット密度は0.42、1.25、3.75、11.25 dot/m2の5段階、ドットの輝度も強弱の2段階、またゴールとして用意したターゲットの角度を観察者から見て0度とし直方向パフォーマンス条件では10、14、18度、左／右蛇行方向では14、18、22度の3段階を、それぞれ設定した。オプティク・フローの速度は13.8m/sに固定した。

実験の結果、オプティク・フローに導かれる直進方向(heading)と左／右蛇行方向(steering)のパフォーマンスは、オプティク・フローが輝度の強いドットの場合にはテクスチャによるフローと同等な正確さであること、しかしドットの密度が粗くまた輝度が弱い場合には直進方向のパフォーマンスは正確さを維持するが、左／右蛇行方向のパフォーマンス劣ることなどが明らかにされた。これらのことから、カーブをともなうパフォーマンスは直進方向パフォーマンスとは異なるオプティク・フローが必要となり、それはドットが明瞭で密度の高いものである。

能動的オプティク・フローによるリジディティ（rigidity)の誤知覚(misperception)

知覚の最終目的は外界の事物を正確に把捉することである。もし刺激が乏しく十分な感覚情報が無い場合でも最低限オプティマルに視覚システムは知覚する。この「観察者-最適モデル(observer-optimal model)」では、観察者の運動に伴う網膜以外の感覚情報が利用されること、および知覚した対象が剛体特性(rigid)をもつものであることを前提としている。このような考え方に対して、視覚システムのゴールは事実と一致するように事象を再構成することではなく、観察者の知覚と運動の間をヒューリスティックに調整する（ヒューリスティックモデル）という考え方もある。ここでは知覚が事実と一致しなくてもかまわなくなる。

Fantoni et al.(2014)は、オプティクフローからの3次元物体がどのように知覚的に再構成されるかをしらべることを通して、視覚システムがオプティクフローからダイレクトに3次元の構造物を、それが事実と一致しなくても、構成することを実証した。実験は、図3.17のような2つの平らな面を観察者の頭部を横方向に移動させながら2つの面の間の中心を注視させながら観察させた(図a)。2つの面にはランダムドットがテクスチャと

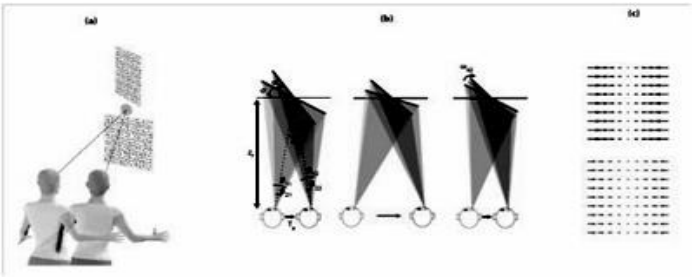

図 3.17　観察者が平面を動きながら観察した時の平面の動き。(a)観察者が２つのランダムドットの傾斜対象面（垂直軸に関して傾く）を注視しながら横方向に移動。(b)観察者移動時の網膜上でのオプティック・フロー。Tx は移動速度、Ｚｆは観察距離、ωは対象面のローテーションによる角速度、βは対象の視角。観察者がある速度で頭部を横方向に移動させると、２つの対象面の角速度はωr1＝ωr2＝－ωe となる。(c)対象面のローテーションによって網膜上のランダムドット（テクスチャ）にはオプティク・フローが生起する。このオプティク・フローはテクスチャの圧縮率で、この圧縮率はオプティク・フローの勾配による変形(degormation,def)で規定できる。（Fantoni et al.2014）

して設定され、また２つの面の回転角度は垂直軸に関して傾斜させた。ここで、Tx は移動速度、Ｚｆは観察距離、ωは対象面のローテーションによる角速度、βは対象の視角である。観察者がある速度で頭部を横方向に移動させると、２つの対象面の角速度はωr1＝ωr2＝－ωe となる。対象面のローテーションによって網膜上のランダムドット（テクスチャ）にはオプティク・フローが生起する(図 c)。このオプティク・フローはテクスチャの圧縮率、すなわちオプティク・フローの勾配による変形(degormation, def)で規定できる。２つの面の変形(def)はβ12－β11 間の率（β12／β11　赤で表示）およびβ22－β21 間の率(β22／β21　青で表示）で与えられる（図 b の左)。同一の変形率(def)は観察者の異なる頭部運動(図 b の中央)による異なる対象面の方向でも生じさせることができるし、また観察者の頭部運動によってひとつの対象面をもうひとつの対象面に関して回転（ωs2)

させる非剛体特性を持つ刺激（b の右図）でも生じさせることができる（回転速度はωr2＝ωs2＝－ωe）。実験では、観察者が頭部を横方向に移動させ、そのときに生起する２つの面のオプティク・フローを観察させるアクティブ条件、および観察者が静止したままアクティブ条件のオプティク・フローのリプレーを観察させる静止条件を設定した。2 つの面の片方はいつも静止、他方を頭部運動に連動して回転させ提示した。被験者にはどちらの面がより速く動いて知覚されたか、また 2 つの面が構成する角度が縮小あるいは拡大して視えるかを刺激提示後に尋ねた。

実験の結果、アクティブ条件では２つの平らな面は非剛体性をもつと知覚されたし、２つの面の間の角度は観察者の動きに伴って変化すると判断された。これらアクティブ条件での知覚バイアスは静止条件のそれらと同一傾向を示した。また剛体性の知覚は刺激特性から直接に生じるのではなく、２つの平らな面の間の速度勾配(defs)間の差で説明できるものと一致していた。これらのことから、観察者は「観察者-最適モデル」によっているのではなく、ヒューリスティックモデルに基づいて外界の対象を知覚していると考えられる。

6 キネティック・オクルージョン

キネティック・オクルージョンによる図地境界検出のためのニューラルモデル

図 3.18 の a には、コケカエル(mossy frog) 擬態で隠れている。カエルが静止したままでは擬態を見破ることは難しい。それでは人間の視覚システムはどのようにしてカエルと背景が同一の輝度パターンをもっていて見分けることが困難の時に、背景からカエルを識別するのであろうか。この場合、もしカエルが横方向に動けばカエルを隠している背景とカエルとの境界領域にテクスチャの増減(accretion/deletion)が生起して背景とカエルの形状の間の輪郭を出現させるであろう。また、境界線に平行なカエルの動き(Shearing motion)はカエルの形状を前面に浮き出させる。このキネティック・オクルージョンのしくみを図示したものが図 3.18 の b である。その上図にはテクスチャが増減(accretion/deletion)した場合の図と地の境界領域でのテクスチャの変化が示され、テクスチャが静止した領域は図(F)となりそれが左方向に動く領域は地(G)となる。下図にはテクスチャが上方向に動いた場合(Shearing motion)が示され、この場合には動く領域が図

となり、静止した領域は地となる。この場合、もしカエルが横方向に動けばカエルを隠している背景とカエルとの境界領域にテクスチャの増減(accretion/deletion)が生起して背景とカエルの形状の間の輪郭を出現させるであろう。また、境界線に平行なカエルの動き(Shearing motion)はカエルの形状を前面に浮き出させる。このキネティック・オクルージョンのしくみを図示したものが図１のｂである。その上図にはテクスチャが増減(accretion/deletion)した場合の図と地の境界領域でのテクスチャの変化が示され、テクスチャが静止した領域は図(F)となりそれが左方向に動く領域は地(G)となる。下図にはテクスチャが上方向に動いた場合(Shearing motion)が示され、この場合には動く領域が図となり、静止した領域は地となる。

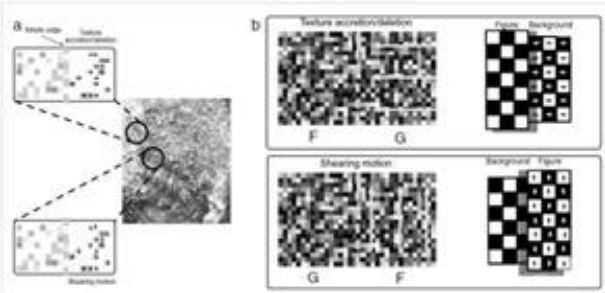

図3.18　擬態で隠れているコケカエル(mossy frog)と運動によるテクスチャの変化。（Layton & Yazdanbakhsh 2015)。

Layton & Yazdanbakhsh (2015) は、キネティック・オクルージョンによる図ー地境界検出のためのニューラルモデル (図3.19) を提案した。このモデルでは、運動信号を処理する大細胞層系統(Magnocellular pathway、赤色で表示)と、輝度コントラストを処理する小細胞層系統(Parvocellular pathway、青色で表示)を仮定する。第一段階では、運動信号は第１視覚領(V1m) の大細胞系統で検出され、また輝度コントラスト信号は第１視覚領の小細胞系統(V1p)で検出される。第二段階では、より大きな領域での一定の運動情報を選択的に得るために運動信号はMT 野でプールされる。受容野に対して垂直方向の輝度コントラストと運動信号(accretion/deletion)はキネティックな「図」を得るためにV4 で統合される。第三段階では、図ー地境界領域を決定する信号がV4 とMT 野からのフィードバックによってV2 で発生する。V2 の大細胞処理系統での図ー地境界に関わるニューロン

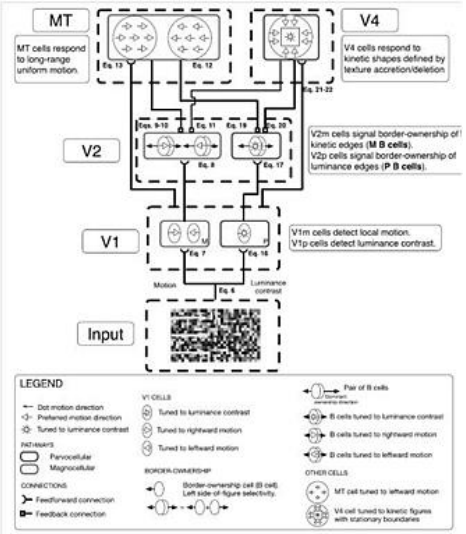

図3.19　キネティック・オクルージョンによる図ー地境界検出のためのニューラルモデル。このモデルでは、運動信号を処理する大細胞層系統(Magnocellular pathway、赤色で表示)と輝度コントラストを処理する小細胞層系統(Parvocellular pathway、青色で表示)を仮定する。第一段階では、運動信号は第1視覚領(V1m)　の大細胞系統で検出され、また輝度コントラスト信号は第1視覚領の小細胞系統(V1p)で検出される。第二段階では、運動信号はより大きな領域での一定の運動情報を選択的に得るためにMT野でプールされる。受容野に対して垂直方向の輝度コントラストと運動信号(accretion/deletion)は、キネティックな「図」を得るためにV4で統合される。第三段階では、図ー地境界領域を決定する信号がV4とMT野からのフィードバックによってV2で発生する。V2の大細胞処理系統での図ー地境界に関わるニューロン(MB cells)は図ー地境界の方向と運動方向に同期し、V2の小細胞処理系統での図ー地境界に関わるニューロン(PB cells)は図ー地境界の方向と輝度コントラストに同期する(Layton & Yazdanbakhsh 2015)。

(MB cells)は図ー地境界の方向と運動方向に同期し、V2の小細胞処理系統での図ー地境界に関わるニューロン(PB cells)は図ー地境界の方向と輝度コントラストに同期する。

このニューラルモデルのシミュレーション実験が実施された。その結果は図 3.20 に示

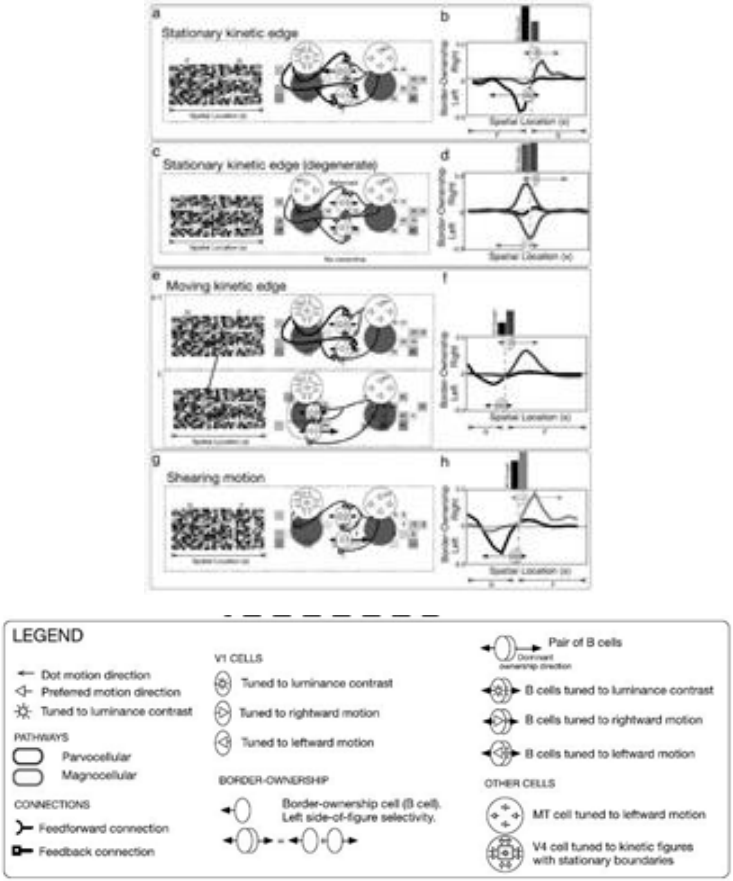

図 3.20　シミュレーション結果。（Layton & Yazdanbakhsh 2015）。

されている。実験は次の４通りの刺激パターンを設定して実施された。Stationary kinetic edge（運動するテクスチャが静止した中央の境界で消失する事態）、Stationary kinetic edge degeneate（中央の境界を挟む左右領域で運動するテクスチャが境界で共に消失する事態）、Moving kinetic edge（中央の境界が運動し、それに随伴して静止したテクスチ

ャが消失する事態)、Shearing motion (左右の領域の一方テクスチャのみが中央の境界にそって運動する事態)。

それぞれの実験事態のシミュレーション実験で得られたキネティックエッジは各事態を示した欄の右端に示されている。ニューラルモデルのシミュレーションの結果で得られたキネティックエッジは、人間が同種の実験事態を観察したときに得られる図ー地分擬と一致していた。

7 運動検出オペレーターとステレオオペレーター

運動検出オペレーターとステレオオペレーターを用いての運動対象の検出

自動車を運転する場合、観察者の移動に伴い観察者の眼にはシーンのオプティク・フローを生じさせる。Royden et al.(2015)は、このような背景面と対象の動きによるオプティク・フロー、および両眼視差要因から観察者が移動している場合のシーン内の対象の静止と運動を検出するコンピュータ・モデルを提唱した。オプティク・フローは、図3.21に示すように、(a)観察者が2つの奥行の異なる平面の中心に向かって移動するときのオプティク・フロー、(b)同様なシーンを観察者が回転しながら移動するときのオプティク・フロー、(c)運動する対象(右下)を含むシーン内を観察者が移動するときのオプティク・フローに分けられる。そこで、観察者が運動するシーン内の静止対象と運動対象を識別できるオペレーターが考案された。受容野を模した各オペレーターは興奮領域と抑制領域に半分割されていて、その分割軸の角度は興奮と抑制領域の各モーションのあり方によって変わる。このオペレーター

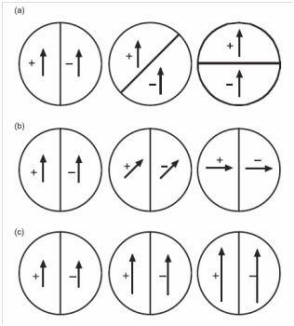

図3.21　受容野を模したオプティク・モーションを減算するオペレーター。(a)各オペレーターは興奮領域と抑制領域に半分割されていて、その分割軸の角度は興奮と抑制領域の各モーションのあり方によって変わる、 (b)検出された運動方向(矢印の方向で示す)、(c) 検出された運動速度(矢印の長さで示す)(Royden et al. 2015)

では運動方向（矢印の方向で示す）および運動速度（矢印の長さで示す）を検出できる。モデルでは、このオプティク・フロー検出オペレーターに加えて両眼視差検出オペレーターが利用された。シミュレーション実験では、10m の奥行距離をもった観察者が 500 ドットの背景面のシーン内を移動する事態が設定された。背景面のドットは 30 度平方の枠の中でランダムに配置され、また 50 ドットからなる対象（縦横 6 度）は中心から 7 度右側、あるいは 7 度上もしくは下側に観察者から 250 から 850cm の奥行距離に配置された。観察者はシーンの中心に向かって 200cm/s の速度で移動し、シーン内の各イメージポイントの位置と速度は観察者と対象の運動のパラメータおよび各ポイントの３D 位置に基づいて計

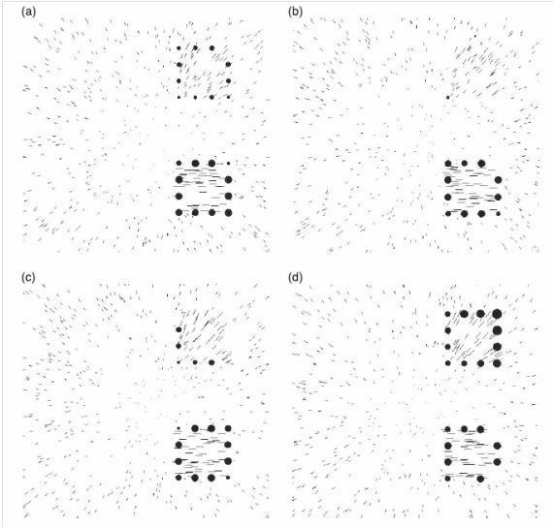

図 3.22　シミュレーション実験の結果。観察者が移動するときに生起する背景面、および静止対象、運動対象から構成されたオプティク・フロー。(a) 視差のチェックをしない時点でのレスポンスのモデル、(b) 視差チェックした時点でのレスポンスのモデル、(c) ある特定の速度（1.2）のオプティク・フローにそって動く対象（左側上部）のレスポンスのモデル、(d) ある特定の速度（1.5）のオプティク・フローにそって動く対象（左側上部）のレスポンスのモデル(Royden et al. 2015)

算された。このように計算されたイメージの運動速度は網膜イメージのシミュレーションに相当する。図 3.22 はそのシミュレーション実験の結果を示す。これらの図は、観察者が移動するので、運動対象は右側下部の小矩形内に、静止対象は右側上側の小矩形内に表示されている。運動対象を検出するオペレーターは受容野の位置に小黒点で示されている。図(a)には視差のチェックをしない時点でのレスポンスのモデル、図(b)には視差チェックした時点でのレスポンスのモデル、図(c) にはある特定の速度 (1.2) のオプティク・フローにそって動く対象(左側上部)のレスポンスのモデル、図(d)にはある特定の速度(1.5)のオプティク・フローにそって動く対象 (左側上部) のレスポンスのモデルをそれぞれ示す。図(a)と(b)からは、視差の検証がされないとモデルは静止と運動の両対象ともに運動する可能性のあるものとして認識するが、視差の検証が実行されると運動対象に接するオペレーターのほとんどはそれが運動しているというシグナルを発し、静止対象に接するオペレーターのほとんどは運動シグナルを発していないことがわかる。図(c)と(d)からは、対象内の速度ベクトルの角度が放射状のフロー領域と一致し、かつその速度とは不一致であれば、モデルは対象を正しく認識できることがわかる。またイメージ速度を変えたシミュレーション実験では、イメージ速度 (1.5)を高めるとモデルはある奥行距離に位置する静止対象(400㎝) を正しく認識できないことが示された。そこで視差検出オペレーターの視差に同期するカーブを改良したモデルを用いて、同様な事態でのシミュレーション実験を試みたところ、静止対象を正しく認識することが可能となった。

これらのシミュレーション実験から、イメージモーションとステレオ視差の検出オペレーターを用いるとシーン内の対象が静止しているかあるいは運動しているかを認識させることが可能なことが示されている。

8 エゴモーション

オプティク・フロー知覚と観察者のエゴモーションは相互に関連しあう要因である。とくに、観察者の置かれた環境が先にゆくほど狭くなったり、逆に広くなったりすると、観察者は自己の歩行速度を遅くしたり、あるいは逆に速めたりする(Festl, et al. 2012)。そこで、Ott et al.(2016)は、両眼視差、対象のオクルージョンや対象の大きさなど奥行

手がかり要因がこの種のエゴモーション速度の環境要因による錯覚を修正できるかを検討した。

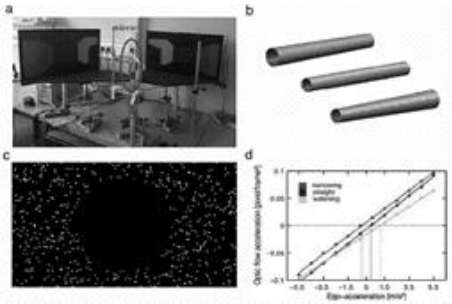

図 3.23　エゴモーションの実験装置と刺激。a：ミラー型ステレオスコープ、b：狭くなるトンネル、ストレートトンネル、および広くなるトンネル（上から下図）、c：トンネルシミュレーション画面で中央の黒領域は観察者の前面に常に位置し移動するオクルーダー、d：エゴ加速に対するオプティクフローの加速の直線的関係のグラフ、およびオプティクフローの加速がゼロの位置で主観的にフロー加速が一定に知覚されるエゴ加速の理論値（点線で表示）（Ott, et al.2016）

実験は、図 3.23 に示したようにミラー型ステレオスコープ（図の a）に、先に行くほど狭くなるトンネル、ストレートトンネル、および先に行くほど広くなるトンネル（図の b）をシミュレートし、被験者のエゴモーション速度を測定した。このステレオスコープを通して観察されるものは、図 c のように、ランダムドットで作成されたトンネルとその中央に提示した観察者の前面に一定の距離をとって移動するオクルーダー（黒領域）である。エゴ加速（ego accelaration）に対するオプティク・フローの加速（optic flow accelaration）は、図 d のような直線的関係で示される。このグラフからエゴ加速フローが一定として感じられる理論値（point of subjective constancyPSC、点線で表示）は、オプティクフローの加速がゼロの位置から引き出せる。先に行くほど狭いトンネルは入り口が4.14m、出口が3.14mで変化率は24%、ストレートトンネルは入り口出口ともに3.14m、先に行くほど広いトンネルは3.14m、出口 4.14m で変化率は32%にそれぞれ設定し、またこれらのトンネルの全長は30.3m、全体の形状は円錐形とした。被験者には、ステレオ観察あるいは単眼観察でこの 3 種類のオプティクトンネルを観察させ、エゴ加速（−5.5 から 5.5 m/s2 の間で 12 段階で変オプティク・フローかを 2 件法で答えさせた。その結果、先に行くほど狭いトンネル条件ではエゴ加速を感じる割合はより大きく、逆に先が広いト

ンネル条件ではエゴ加速を感じる割合はより小さいこと、またこの効果はステレオ条件と単眼視条件で異ならないことが示された。

Ott et al.は、この種のエゴ加速効果が知覚によるのか、あるいは観察者のエゴモーション制御によってもたらされるものかを分析した。実験はオプティカルトンネルの口径をサイン波形状に拡大と縮小させ、それを連結させて提示した。連結オプティカルトンネルの形状は、図 3.24 に示すように、5 個のトンネルが連結され、トンネルの口径の振幅(amplitude)ならびに振動数(frequency)が独立に操作して形状が変えられた。被験者にはステレオ視もしくは単眼視で観察させ、常にエゴモーションの速度を一定に保つようにジョイスティクを操作させた。

図 3.24　連結オプティカルトンネル。トンネルの口径をサイン波形状に拡大と縮小を反復させたもので 5 個のトンネルが連結されている。トンネルの形状はトンネルの口径の振幅(amplitude)ならびに振動数(frequency)を独立に操作して作られた(Ott, et al.2016)。

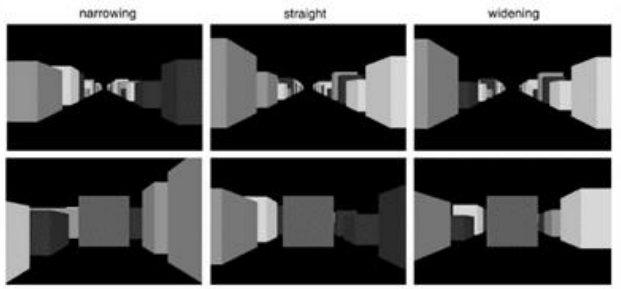

図 3.25　ブロックで構成されたオプティカルトンネル。先に行くほど狭いトンネル（上段左図）、ストレートトンネル（上段中図）、先に行くほど広いトンネル（上段右図）がつくられた。実験では観察者の手前に遮蔽物が設置され、トンネル壁の移動に伴って観察者から一定距離をとって移動した(Ott, et al.2016)。

その結果、被験者はステレオ視と単眼視の両観察条件で連結トンネルの口径拡大部分ではエゴモーション速度を高め、逆に口径縮小部分ではそれを低めることを示し、エゴモーションは知覚的

要因によるのではないことを示した。

さらにOtt et al.は、図3.25のように、オプティカルトンネルの壁をドットで覆うのではなくブロックで構成し、この事態でブロックのステレオ視差、それらの相互のオクルージョンそしてパースペクティブの手がかりがエゴモーションに与える影響をしらべた。トンネルは、先に行くほど狭いトンネル（1.5m狭、上段左図）、ストレートトンネル（上段中図）、先に行くほど広いトンネル（2.5m拡大、上段右図）がつくられ、また観察者の手前に遮蔽物が設置され、トンネル壁の移動に伴って観察者から一定距離をとって移動した。移動距離は30 mとし、またをエゴ加速は12段階に変化させ、被験者にはエゴ加速が感じられたか否かを2件法で答えさせた。

その結果、ブロック壁事態においても、先の結果と同様なエゴ加速が示された。このことから、ステレオ視差、オクルージョン、パースペクティブの奥行手がかりが移動環境を正しく伝えていてもエゴ加速は修正されないことが見いだされている。

9 オプティク・フローの3次元効果

極端な周辺視におけるオプティク・フローの役割

静止した観察者がオプティク・フローを提示されると、自己が回転あるいは直進する錯覚、すなわちベクションが生じる。ベクションでは中心視が主要な役割を果たすのか、あるいはそれが周辺視なのかは論争がある。これまでの研究によれば、自己回転ベクションには周辺視が重要であるとされた(Brandt et al. 1973)。しかし、動く物体と背景、それにおける中心視と周辺視の関係、両眼視差範囲の奥行距離を統制した研究、あるいは周辺視の網膜領域などを統制した研究は、網膜領域全般がベクションに関係することを示した(Howard & Heckmann 1989, Nakamura 2008, Nakamura & Shimojo 1998)。

McManus et al. (2017)は、直進するベクションの周辺視、とくに極端な周辺視の役割についてしらべた。ベクション誘導装置は広視野（水平±112°、垂直＋89°、－83°）の湾曲スクリーンとし、被験者をその中央に座らせて両眼観察させた。灰色のタイルを張った床と赤いレンガ壁の廊下(hallway)をシミュレートした映像を被験者に提示した。視野は、図3.26のように、(a)全視野、(b)中心視野で範囲は±20度、(c) 中心視野で範囲は±40度、(d)周辺視野で中心から±20度を除外、(e) 周辺視野で中心から±40度を除

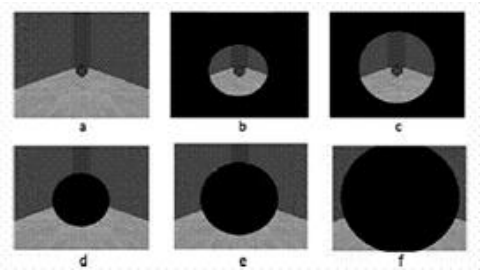

図3.26　灰色のタイルを張った床と赤いレンガ壁の廊下(hallway)をシミュレートした映像を６通りの視野に提示。(a)全視野、(b)中心視野で範囲は±20 度、(c) 中心視野で範囲は±40 度、(d)周辺視野で中心から±20 度を除外、(e) 周辺視野で中心から±40 度を除外、(f) 周辺視野で中心から±90 度を除外。(a)、(b)、(c)における８角形状刺激はターゲット (McManus et al.2017)。

外、(f) 周辺視野で中心から±90 度を除外と操作し、全視野条件を除き視野の周辺あるいは中心を視えないようにしてして提示した。実験では、最初に８角形状の赤色ターゲットを提示し、これを消してから廊下全体が被験者に近づくようにシミュレートされた。このとき、ターゲットまでの距離（３、５、７、10、12m）と接近速度（0.5、１、1.5m/s）が変えられた。被験者にはシミュレートされた廊下の内部に自身が没入しているように見ることと、先に提示してすぐに消失させたターゲットを記憶させ、それに自分が到達したと感じたらコントローラを使って合図するように教示した。こうして、ターゲットまでの被験者の移動距離をオプティクフローの移動量で測定した。もし、移動距離が長ければ、それだけオプティクフローは効果的ではないことを意味する。

実験の結果から、ターゲットまでの知覚された距離（分子）に対する実際の距離（分母）の比（ゲイン）が計算された。もし、ゲインが１より小さければ、被験者はターゲットに到達するまでに実際の距離より長くオプティクフローを動かす必要があることを、１より大きければ実際の距離よりオプティクフローが短くてすむことを意味する。その結果、全視野を含めて中心視野が確保された条件でのオプティクフローによるベクションのゲインは一貫して１以下の数値を示した。しかし、周辺視野のみのオプティクフローのベクシ

ョンはターゲットまでの接近速度が１m/s の条件ではゲインが１を示した。これは被験者のオプティクフローに対するベクションが正確なことを示した。ただ、接近速度が１m/s 以下ではゲインは１以上の値を示し、実際の距離よりオプティクフローが短くてすむことを示した。

このことから、オプティクフローの提示が中心視を除いた周辺視のみでもオプティクフローの動く距離に対するベクションの距離が精確に知覚でき、周辺視の視覚情報のみを処理するしくみがあることを示唆する。

オプティクフローによる自己認識と生物的モーションの手がかり

観察者が前進すると周囲からのオプティクフローは拡大し、自己の進行方向(heading)のナビゲーションの重要な手がかりとなる。もし周囲からのオプティクフローが少ない場合でも向かい側から歩いてくる他者があれば、その者の四肢の動きからの生物的モーション (biological motion)は、観察者のナビゲーションの手がかりとなる。この種の生物的モーションは、オプティクフローパターンを乱すが、自己と他者の生物的モーションを分解すれば有力な手がかりとなる。他者の身体による生物的モーションは、運動する自己、その運動方向、その速度を伝える。生物的モーションは、光点のみを用いて身体の肩、腰、膝、足首などの関節部分に貼り付けて提示しても、その運動を容易に知覚できる。静止画像の場合は光点が何なのかわからないが、動画として観察すると人の運動する姿態として知覚できる (Johansson 1973)。観察者自身の運動はオプティクフローパターンとして、対向する他者の運動は生物的モーションとして生じ、これら自己と他者の全く異なる光学的フローが自己の運動と他者の運動情報を伝える。Grossman & Blake(2002)の研究によれば、生物的モーションを担う脳領域は上側頭溝(superior temporal sulcus)であるという。

Riddel & Lappe(2017)は、自己と他者の生物的モーションが視覚システムによってどのように区別されるかを自己と他者の運動を光点のみで提示し、混在した光点の軌跡から自己と他者を識別できるかを実験した。図 3.27 の A には被験者(self motion)と他者 (walker)の光点の軌跡の方向とその後の行動の軌跡を示し、図の B には被験者と他者の

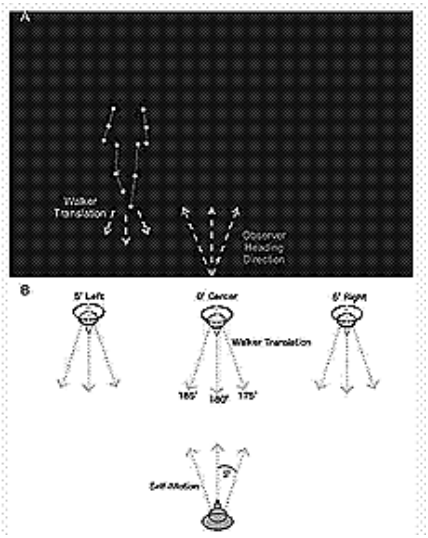

図3.27　光点提示による生物的モーション実験。(A)観察者（青色表示）と他者（walker)の四肢の光点の軌跡とその後の予測される行動方向（オレンジ色表示)、(B)観察者(self motion)と他者の行動の軌跡で点線はそれぞれの頭部方向を示す(Riddell & Lappe 2017)。

行動の軌跡で、点線はそれぞれの頭部方向を示す。他者の歩行の軌跡のデータは 11 人から歩行速度（平均速度 1.01m/s)を変えて取得された。身体や四肢の光点は、いずれも左右のくるぶし、ひざ、肩、しり、肘、手の 12 カ所とした。他者の大きさはパースペクティブに従って拡大あるいは縮小させた。歩行他者は、観察者を中心として正面、左右それぞれ 5°で４mの距離をおいて配置され、観察者と対面するように配置した。観察者の自己の運動は、正面、左右それぞれ 5°で歩行他者に対面するように操作した。被験者は自己と歩行他者の生物的モーションを 2 秒間観察し、自己の運動が識別できたかをキーボードで答えさせた。

実験の結果、被験者は自己の生物的モーションと歩行他者のそれを自己のスタート位置に関係なく識別できることが示され、歩行他者の運動軌跡は自己運動によるオプティクフローとは独立した事象であることを示した。しかし、自己と歩行他者の運動がともに存在するときの網膜運動は歩行他者のみの運動の場合より速くあるいは遅く拡大し、この網膜運動の手がかりが自己と歩行他者を識別する手がかりとなる可能性が残った。

そこで、歩行他者が前進、後退する時の四肢の運動を、前進時に四肢運動一致と不一致条件、後退時に四肢運動一致と不一致条件の 4 条件を設定して、自己運動の識別を被験者に求めた。その結果。歩行他者の前進時と後退時の不一致条件でそれらの一致条件より有意に自己の運動の識別割合が高かった。これは自己と他者の運動が一致するときには、そ

の網膜運動はすべて他者に帰属され、逆に歩行他者の運動が自己と不一致条件の場合には網膜運動はすべて自己である観察者に帰属されたことを示す。

次に生物的モーションのみが自己と他者の運動を識別する手がかりなのかを確かめるために、歩行他者の運動を歩行ではなくスライドするように変化させた条件もしくは歩行他者のみが自然に歩行する条件を設定してしらべた。この場合、自己運動を加える場合と加えない場合をそれぞれの条件に追加し、4条件で自己、他者、および自己と他者の複合の識別をそれぞれ被験者に求めた。その結果、歩行他者の光点運動が生物的モーションを含んでいない条件で自己の運動がある場合には、提示された光点モーションを自己と他者の複合と識別、自己の運動を含まない場合にはそれを自己の運動として認知、また他者の光点運動が自然な歩行をする条件では自己の運動のあるなしに関わらず、提示された光点の運動は自己の運動と認知された。この結果は、自己の運動が存在しない曖昧な事態にも関わらず、提示された光点運動は自己の運動として認知されることを示した。

さらに、自己の運動がどこを向いているか、そのヘッディング(heading)の手がかりを歩行他者との関係でしらべた。もし観察者が自己と他者の生物的モーションを見分けることができれば、観察者のヘッディングを知ることが可能となり、もし自己のヘッディングと歩行他者のそれとが別々の過程で処理されるならば、自己のヘッディングの評価は自己と他者のヘッディングの平均値となると考えられる。そこで、自己と他者のモーションを常に提示し、歩行他者のスタート位置を中心、左5°、右5°に位置させ、被験者には自己のヘッディングをキーボードで操作して評定させた。その結果、歩行他者の位置が左5°条件ではヘッディングは右方向に、右5°条件では左方向に評定された。この結果は、ヘッディングの評定が中心方向にシフトすることを示し、それが自己と他者の運動のベクトルで処理されることを示唆した。

これらの結果から、オプティカルモーションが多義的な事態では生物的モーションが自己と他者の動きの識別の手がかりになるが、しかし自己のヘッディングを知る手がかりには用いられていないと考えられる。

対象の運動のオプティクフローから観察者自己運動によるフローの分離

観察者が自ら動くとき周囲の移動対象も網膜上では流動刺激となる。このためこの両要

因からの流動刺激の合成となるオプティクフローが形成される。視覚システムは、自己の運動と対象のそれとを区別できるので、両者の合成フローを分離していると考えられる。これに関して、Rushton and Warren(2005)は、オプティクフローのなかでどの要素が自己運動に関わるるものかが区別される（flow parsing hypotehsis）と考えた。この仮説のように視覚システムが機能していれば、オプティクフローから自己運動に固有なフローが解析され、その結果、シーンに固有なフローが残ることになる。視覚システムは、自己運動最中のシーンから自己の固有のフローを取り出しているが、しかしどの程度正確にこれら２つのフローを見分けているか、また自己中心的感覚、前庭感覚、そして遠心性の運動情報など非視覚的情報の役割は明らかにされていない。

Niehorster & Li (2017)は、観察者の自己運動によるオプティクフローと対象の運動によるそれとを区別することが可能か、さらにこれら２つのオプティクフローの速度を変えても区別が可能かをステレオディスプレーにオプティクフローを提示してしらべた。図3.28 はステレオディスプレーに提示したオプティクフローで、ここでは観察者が赤色のワイアーフレームで作った多数の奥行の異なる対象の中を正面に向かって動く事態がシミュレートされている。左端列は前額平行面から見たフロー、右端列はその上面図を示す。このワイアーフレームの対象群の奥行の中心に置いた１個のプローブドット（黄色表示）が注視点（緑色表示、ゼロ視差）の右あるいは左に置かれ、垂直方向に動かして用いた。図の(a)はディスプレー全面条件(full display condition)を示し、対象が円錐体状の範囲に奥行的に配置され、プローブの周囲に局所的な運動情報が与えられるように奥行的にも前額平行的にも近接させた。図の(b)は局所的な奥行をもたないディスプレー条件(no local depth display condition)で、上下の対象群の中央間隙には対象を配置しない。この事態では、プローブ対象と同等の奥行によって生じる局所的な運動情報を除去、ただプローブ近辺の対象は損なわれず、ここからの局所的な運動情報は維持された。図の(c)は、局所的な前額平行の視えをもたないディスプレー条件(no local frontal view display condition)で、対象は常に円錐体状の範囲に観察中奥行配置されるが、プローブ対象の4°（平面図上）以内には対象を配置しない事態。ここでは、プローブ対象の網膜近辺からの局所的な運動情報は除去されたが、ただプローブの網膜近辺の対象は損なわれず、ここからの局所的な運動情報は維持された。図の(d)は半球状のディスプレー条件(hemifield

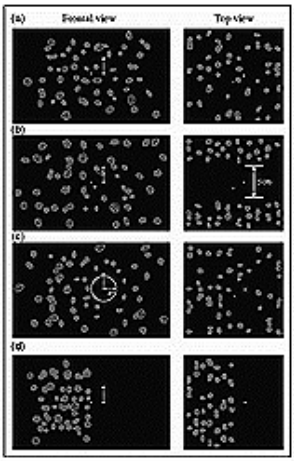

図3.28　ステレオデスプレイに提示したオプティクフロー。観察者が赤色のワイアーフレームで作った多数の奥行の異なる対象の中を正面に向かって動く事態がシミュレートされている。左端列は前額平行面から見たフロー、右端列はその上面図。この対象群の奥行の中心に置いた１個のプローブドット（黄色表示）が注視点（緑色表示、ゼロ視差）の右あるいは左に置かれ、垂直方向に動く。(a)ディスプレー全面条件。(b)局所的な奥行をもたないディスプレー条件。(c)局所的な前額平行の視えをもたない条件。(d)半球状のディスプレー条件(Niehorster & Li 2017)。

display condition)でプローブのある半球内には対象は置かれていない事態。ここでは、グローバルな運動情報のみが利用でき、また観察者の自己運動による運動要素を差し引きできるために対象と自己運動のオプティクフローを区別できる事態である。

このような４通りの実験事態で、図3.29のように、自己運動と対象運動の解析（flow parsing）実験を実施した。図の(a)はディスプレーの全面(full display)に提示する拡散的フロー(FOE)で、その焦点(白点)は観察者の頭部方向を示す。観察者が接近運動をシミュレートするように対象群の中を運動すると、網膜上のプローブドットの運動はシーン内の垂直運動要素と観察者の前進による自己運動（白色点線矢印）に帰因する拡散的フローの焦点からの逸脱した運動要素のベクトルになる。シーンに固有なプローブモーションを復元するには、プローブモーションから観察者の自己運動による運動要素を取り除く必要がある。これは、プローブの網膜運動に対して反対の方向の運動要素を付け加えることに等しい。これは拡散フローの焦点（白色点線矢印）に対して反対方向に操作することで、プローブモーションから自己運度要素をキャンセルすることになる。こうすると、プローブはシーンのなかで垂直

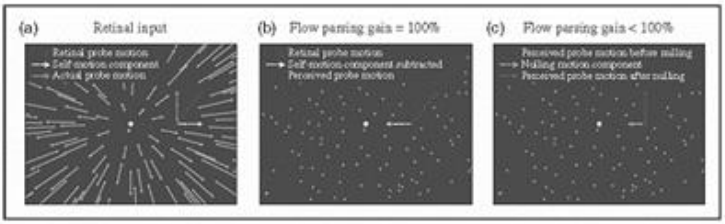

図3.29　自己運動と対象運動の解析 実験のための入力パターン。(a)ディスプレーの全面(full display)に提示する拡散的フローパターンで、拡散的フロー (FOE)の焦点(白点) は観察者の頭部方向を示す。 (b)フローからの解析が完全な場合のプローブの運動軌跡。(c) フローからの分離が不完全な場合のプローブの運動軌跡。図ｃの点線矢印はフローの拡散的焦点に向かっての運動要素を相殺することを示す。これはプローブ運動が垂直的に知覚されるように決められる。赤色実線矢印は網膜上のプローブ運動、白点線矢印は自己運動要素、青点線矢印は実際のプローブ運動、緑色実線矢印は相殺(nulling)後の知覚されたプローブをそれぞれ示す (Niehorster & Li 2017)。

に運動して知覚される。図(b)には、自己運動がプローブ網膜運動から差し引かれた場合を示し、全体のフローからの解析は100%となる。もし、この解析率が100%以下の場合には、自己運動の解析が完全ではないので、拡散フローの焦点（青色矢印）からはずれる幾分かのプローブモーションが知覚されることになる。実験では、自己運動要素がどの程度取り除かれたかをみるために、プローブモーションに対する自己運動要素の割合を測定した。自己運動によるプローブの知覚されたモーションを拡散焦点（黄色点線矢印）に向かうプローブのモーションを追加する方法で相殺した。そこで、プローブがシーン内で垂直方向に動くように知覚される点をPSEとして測定した。したがって、観察者の自己運動に対応する垂直方向のプローブモーション、これはフローから自己運動要素を除けなかった残余になるので、フロー解析得点(FPR、flaw parsing gain)は、次式で得られる。

FPR=1 - (PSE nulling speed)/ (speed of the self-motion component)

=1-(length of yellow arrow in Fig72c)/ (Length of white arrow in Fig72b)

もし、観察者が自己運動最中にシーンに固有な対象運動を視覚情報のみから完全に見分けることができるならば、垂直方向に知覚されるモーションに追加する要素は生まれない。この場合、FPG は１に等しくなる。しかし、FPG が１以下ならばシーンに固有な対象運動が正確に復元されていないことになる。さらに、もし局所的運動情報がシーンに固有な対象運動の知覚に用いられなければ、FPG は４通りのディスプレー提示条件で一定の値をとると考えられる。これとは反対に、プローブ対象あるいはプローブ対象の近辺と同等の奥行から生じる局所的運動情報がシーンに固有な対象運動知覚に用いられるならば、FPG は局所的運動ディスプレー条件によって値が異なるがすべて１以下と予想される。実験ではステレオディスプレーを使用し、ワイアーフレームで作成された 58 個の対象群に向かって 0.30m/s の速度で自己運動するオプティクフローをシミュレートして観察者に提示した。対象の奥行範囲は 0.69m から 1.03m とした。観察者には注視点を実験の間注視し、フローが終了するとブランクスクリーンが出現するので、プローブモーションが斜め左あるいは右方向に知覚したかをマウスボタンで答えることを求めた。実験条件は４通りのディスプレー条件で実施した。

実験の結果、プローブが垂直方向に運動する閾値(PSE nulling speed)と FPG が４通りのディスプレー条件ごとに求められた。FPG はすべてのディスプレー条件で有意に１以下を示した。また、自己運動速度(1.6/s から 4.6/s)と対象速度(1.6/s から 4.6/s)を増しても FPG は変わらなかった。これは、視覚情報にだけ基づいてフローから自己運動の要素が部分的に除くことができるが完全には除くことができず、シーンに固有な対象運動は復元されなかったことを示した。

光沢(reflection)あるいはつや消し(matte)面のオプティクフロー事態での３次元形状の凹凸の推定

対象物の面のオプティクフローは、その３次元形状や材質の知覚および認知に影響する。このことは、オプティクフロー事態で面の推定では、対象の形状、材質そして運動要因が相互に作用し合っていることになる。これまでに対象の運動は面の材質（光沢あるいはつや消し）の推定に影響すること(Doerschner, et al.2011）、つや消し面は光沢面よりは形状の部分的な推定を実物に類似させること（Dovencioglu, et al. 2015)、さらに対象

がX、Y、Zの運動軸のどれで回転しているかでつや消し面は光沢面より形状の推定エラーが少ないこと(Doerschner, et al. 2013)などが明らかにされている。

これらの研究から、対象が光沢面をもつかあるいはつや消し面をもつかが、対象のスラント(slant)やティルト(tilt)あるいは運動軸の推定に関わっていることを示す。そこで、Dovencioglu et al.(2017)は、光沢をもつ対象面あるいはつや消しをもつ対象面が２通りの運動軸（水平、垂直）で奥行方向に回転、また視方向を軸として非奥行方向に回転（前額平行）してオプティクフローを生じるとき、どの条件が対象の凹凸を正確に推定するかをしらべた。実験は、図3.30のように、レンダリングした突起をもつ面の凹凸の程度を変えた3次元パターンを用いた（図の左から順に凹凸が深くK値で表示、また凹凸の視かけの程度は常に中央のパターンを推定の基準であるレファレンスオブジェクトとした)。図(b)はレンダリングされたパターンで対象の境界をもつもの（実験には使用されないもの)、図(c)はガウスの窓を通して対象の境界の手がかりを除去したパターンを示し、実際

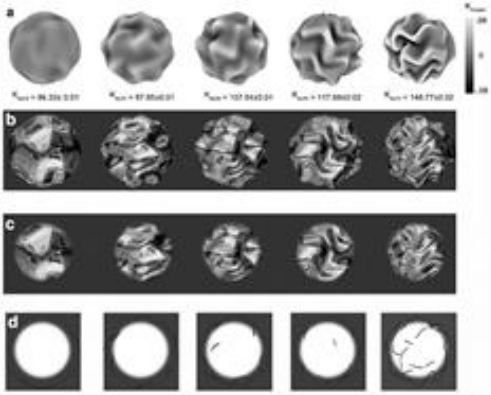

図3.30　実験に使用した刺激系列。(a) シミュレートした突起をもつ凹凸3次元パターン、(b)レンダリングされたパターンで対象の境界をもつ、(c)ガウスの窓を通して対象の境界を除去したパターンで、実際に実験に供された、(d)パターン内の凸部分での輪郭のオクルード（黒線表示）で、各パターンのうちでもっとも視えやすい稜線を示す（白い部分はマスクされない領域）(Dovencioglu et al.2017)。

に実験に使用した。さらに図(d)ではパターン内の凸部分での輪郭のオクルードを示し(黒線表示)、各パターンのうちでもっとも視えやすい稜線を示す（白い部分はマスクされない領域)。対象面の運動は水平、垂直そして奥行の３方向とし、12°/s の速度で 20° の幅をもって反復させた。対象面は光沢(specular)、つや消し（matte、非光沢）および光沢とつや消しのミックスの３条件をレンダリングして作成、光沢面は光が反射されている部分を除いて黒、つや消し面は光を散乱させ、面のテクスチュアによって反射が変化した。光沢とつや消しのミックス面は光沢とつや消しテクスチュアの加重的組合せで作成した。被験者には、図 3.31 に示した手続きに即して、対象の面の凹凸度を推定させた。レファレンスオブジェクトには光沢対象とつや消し対象の中央の凹凸度をもつものが使われた。

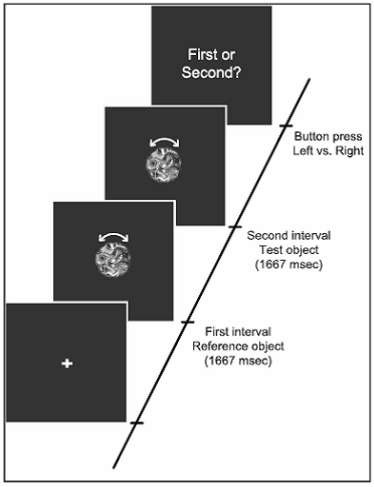

図 3.31　視かけの凹凸程度度の測定手順。最初に注視点（＋印)、次に凹凸の推定基準対象、そしてテスト対象を提示し、凹凸が深く視えるのはどちらの対象かを推定させる(Dovencioglu et al.2017)。

その結果、全体にわたって光沢面条件での凹凸の推定はつや消し面でのそれよりも劣ることが示された。ただ、光沢面条件での凹凸推定は運動軸によって変化しないのに対して、つや消し面条件のそれは運動軸が変わると変化した。また、レファレンスオブジェクトが光沢あるいはつや消しに関係なく、光沢面とつや消し面条件では対象を視方向を軸とした非奥行回転事態で凹凸推定が悪くなった。水平と垂直軸で回転させる奥行方向でのフローは運動視差手がかりが働くのに対して、視方向のオプティクフローでのそれは弱いためと考えられる。光沢とつや消しをミックスした対象面の凹凸推定は、つや消し面あるいは光沢面単独条件と差は生じなかった。これは、

光沢条件でのオプティクフローが凹凸のための十分な手がかりを与えているからと考えられる。

これらの結果から、対象がオプティクフローする事態での光沢あるいはつや消しの凹凸面の推定のための手がかりはテクスチャ、陰影そして運動視差であり、対象面の凹凸の推定が視覚システムにおけるそれらのダイナミックな相互作用によると考えられる。

10 観察者の移動距離知覚と視点の振幅(oscillation)

観察者が移動するとき、その移動距離は２種類の知覚情報、すなわち一つは求心性と遠心性の情報（筋肉感覚や自己受容感覚、前庭感覚)、もうひとつは移動に伴う外界の環境情報(オプティクフロー、聴覚フロー、ハプティクフロー)にもとづいて判断される(Harris et al.,2002; Harris,Jenkin & Zikovitz, 2000; Israel & Berthoz,1989; Mittelstaedt & Mittelstaedt, 2001)。同時に観察者の３次元頭部運動（左右、上下、前方の頭部運動）はオプティクフローに対する観察者のベクションを誘導し、これが観察者の移動距離に影響する。

Bossard & Mestre(2018)は、3 次元頭部運動によって変化する視点の振動(周波数oscillation)が観察者の移動距離知覚に与える効果をオプティクフローを単独に操作できるバーチャルリアリティ（VR)でしらべた。次の４つの仮説が考えられた。仮説(1)視点の振動は歩行ステップと速度に影響し感覚情報による歩行距離の統合過程を変える、仮説(2)視点の振動は大局的な網膜運動を増大し自己運動感覚を増長する、仮説（3）視点の振動は静止観察者の前庭感覚中枢を刺激して自己運動感覚を増長し眼球の追跡運動を生起する、仮説(4) 視点の振動が自然の歩行振動に類似すると観察者の自己運動感覚を増長する。実験では、仮説(1)の検証を視点の振動を種々変え、それが自己運動知覚に影響し歩行距離の統合過程を変え、その結果、観察者の移動距離知覚過程を変えるかどうか、仮説(2)の検証を観察者の視点の振動を変えたときに生起する眼球運動を EOG で、頭部運動を運動追跡装置でそれぞれ測定し、視点の振動が異なると大局的な網膜運動も影響するかどうか、仮説(3)の検証を視点振動変化が眼球と頭部運動の補償的運動を生起するかどうか、そして仮説(4)の検証を同一量の網膜運動を生じるが観察者の視覚歩行の点では生物的に

適応あるいは不適応な２種類の視点振動を設定し、それが観察者の自己運動知覚に同じ効果をもつかどうか、それぞれの実験事態を設定して検討された。

実験はVRの装置であるCAVEを用い、壁面が一様なトンネルをシミュレートしたオプティクフローを３次元視させて行われた。CUBEは前面と左右面にはリアプロジェクターを用い、また床面には上方のプロジェクターで画像を提示するもので、図3.32のような位置に被験者を立たせて４面に３次元視刺激を提示した。３Dグラスを装着した被験者には床面の異なる奥行位置に提示されたターゲット（1個の道路表示用コーンで高さ70cm、観察距離を6、12、18、24、30m）までの奥行距離を評定させた後で、ターゲットを消し、次いでCAVE内のトンネルを模したオプティクフローを観察させ、先に評定したターゲットに到達したら合図させた。オプティクフローは、まず観察者（成人男女各10名）に擬したカメラがまっすぐなレール上を1.47m/sの一定速度で移動するLinear条件（L）を設定し、これを基に頭部の上下、左右、前後を模した３角波形の視点振動（0.044m）を設定した。その周波数(frequency)はHF(4Hz/s、速度0.367m/s）、MF(2Hz/s、速度0.735m/s）、LF(1Hz/s、速度1.47m/s)の３条件に変えた（図3.33)。

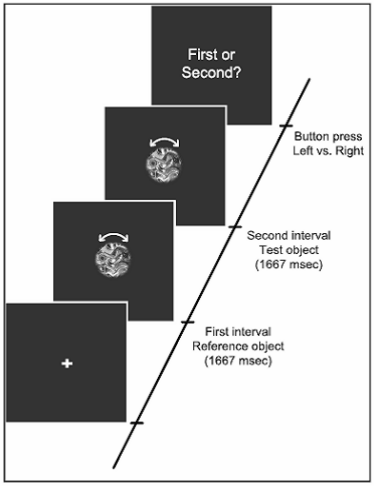

図3.32　視かけの凹凸程度の測定手順。最初に注視点（＋印)、次に凹凸の推定基準対象、そしてテスト対象を提示し、凹凸が深く視えるのはどちらの対象かを推定させる(Dovencioglu et al.2017)。

実験の結果、LFとMF条件では、LFとHF条件に比較して観察者は対象までの移動距離を正確に知覚した（LFとMF間およびLとHF間には有意差なし)。

そこで、仮説２と３を検証するために、同一の実験事態で観察者の眼球運動（EOG)と頭

部運動（CAVE のトラッキングシステム）をしらべた。その結果、眼球運動と頭部運動とも周波数の異なるオプティクフロー条件で差がないことが示された。これは視点の振動（周波数）が網膜運動全体に影響しないこと、および視点の振動変化が眼球と頭部運動の補償的運動を生起させないことを示した。観察者が記憶した位置にもとづいて対象を追従することを示唆する。

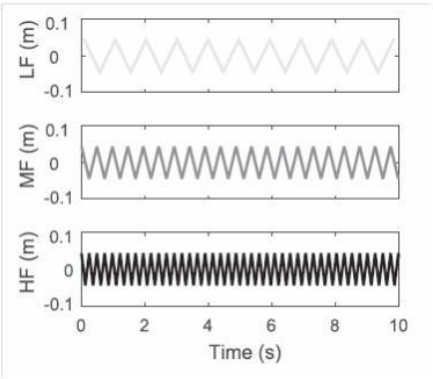

図 3.33　観察者の視点振幅の 3 通りの条件。観察者に擬したカメラがまっすぐなレール上を 1.47m/s の一定速度で移動する Linear 条件（L）を設定し、これを基に頭部の上下、左右、前後を模した 3 角波形の視点振幅（0.044m）を設定、またその頻度（frequency）を HF（4Hz/s）

さらに、仮説４を検証するために、通常の歩行と同一の網膜運動条件（bio-coherent、ステップ頻度に対応した２ Hz の垂直の３角波形周波数、ストライド頻度に対応した１ Hz の水平の３角形周波数）をシミュレートしたオプティクフロー、そして生物的にはあり得ない歩行の網膜運動条件（bio-incoherent、ステップ頻度に対応した１Hz の垂直の３角波形周波数、ストライド頻度に対応した２Hz の水平の３角形周波数）のオプティクフローを設定し、記憶したターゲットまでの歩行距離を見積もらせる実験を実施した。その結果、オプティクフローの bio-coherent 条件と bio-incoherent 条件間には知覚距離に差が生じなかった。これは、仮説２すなわち視点の振動は網膜運動全体を増大して自己運動感覚を増長するのを支持した。

これらの結果から、観察者の視点振動（周波数）とくに１ Hz と２ Hz 条件が４ Hz 条件より記憶させた歩行距離知覚を増進することが明らかにされ、これには眼球の追従による前庭感覚は関係しないことから、歩行距離知覚は大局的な網膜運動によると考えられる。

11 シーンの知覚

オプティクフローを伴うシーン知覚

オプティクフローはシーンのレイアウトを知覚する手がかり、とくにイメージのボケ(Blur)に関わらずに働く効果的な手がかりである。オプティクフローはシーンの空間関係を特定し、ブラーイメージを較正すると考えられる。Pan et al. (2013,2017) は、ブラーイメージのビデオ映像をシングルフレーム分提示する条件、全フレームのモーションをマスクして提示する条件、そして全フレームを連続的に探知できるモーションを提示する条件の3通りで実験し、探知できるモーションを伴わないシーンを正しく知覚できないことを明らかにした。この結果は黄斑変性症患者や弱視者でも確認された。

そこでWu et al.(2019)は、観察者が静止したシーンに動的にアクセスし、その動的イメージが低空間周波数で提示された場合にシーンをオプティクフローの手がかりのみで特定できるかをしらべた。この時のオプティクフローには、すべての点が同一の速度で移動する並進接近フロー(translational flow)と一点を中心に回転運動する回転フロー(rotational flow)があり、前者は奥行や空間関係を知覚するのに効果的であり(Nakayama & Loomis, 1974; Warren, Morris, & Kalish, 1988)、後者は3次元のレイアウトを知覚する効果的な手がかりとはならないと考えられている(Koenderink, 1986; Warren & Hannon,1990; Koenderink & Van Doorn, 1991)。実験では、10種類のシーン（図3.34の上段）について観察者の動きをカメラでシミュレートし（並進、回転およびその両方)、白黒フィルムに撮影しビデオに直したものを刺激として作成した。ビデオの映像にはガウス型のBlurを導入した（図の下段)。ガウス型Blurの半径は0と15ピクセルの間とし、１ピクセルあたり 0.02−0.03cycle の空間周波数をカットした。10 人の学生を被験者とし、彼らには20 フレームからなるビデオを刺激としてディスプレーの上段に提示し、知覚したシーンが何かを下段のテキストボックスに記入するように教示した。実験条件は、回テスト時のシーンの回想後に静止したBlur刺激の再テスト、そして1週間後の静止したBlur刺激の再テストの5通りを実施し、また各条件でのオプティクフローは並進、回転そしてその両方とした。静止したBlur刺激、２０フレーム分のBlur刺激を静止させ撮

図 3.34　実験に使用した 10 種類のビデオシーンとそれにブラー(Brur)をかけたビデオシーン(Wu et al. 2019)。

影した順番に提示（各フレーム間に無イメージをマスク刺激として挿入)、20 フレーム分の Blur 刺激のビデオ、前回テスト時のシーンの回想後に静止した Blur 刺激の再テスト、そして 1 週間後の静止した Blur 刺激の再テストの 5 通りを実施し、また各条件でのオプティクフローは並進、回転そしてその両方とした。

実験の結果、blur イメージが並進フローと結び付けられるとシーンが正確に知覚されること、しかも並進フロー単独でもあるいは回転フローと組み合わされても効果があることが示された。さらに並進フロー条件はある程度の時間が経っていてもシーンの構造を呼び起こすことも示された。並進フローに効果があるのは、運動視差とオクルージョンの手がかりによってシーンの 3 次元構造を知覚できるからである。また、並進フローが回転フローと組み合わされてもシーンの知覚に効果があるのは、シーンが回転してもそのなかの位置関係が保たれているために運動視差とオクルージョンの手がかりを妨げないためと考えられた。

これらの結果から、並進フローがあればシーンがぼやけていてもその３次元構造を知覚できることを意味し、このことは弱視や視力低下のケアとリハビリテーションに役立てることができる。

12　運動視の知覚特性

グローバルな運動視における両眼加重効果

運動する複数の刺激要素からそれらが全体としてどの方向にどのような軌跡で動いているかのグローバル運動視は、有線皮質(striate cortex)と外線条皮質(extriate cortex)でそれぞれ担われている。V1 での運動の方向に特異的なニューロンは個々の刺激要素のローカルな運動方向を検出し、この情報は有線皮質にある MT と MST 野に送られ、これらの情報が統合されてグローバルな運動視が生起する(Anderesen 1997)。また、グローバルな運動視には両眼視が重要である。たとえば、両眼視差のある条件では、パターンに対する運動方向識別能力は高まるが、逆に片眼弱視者はその識別能力が劣ることがある。さらに、Hess, et al.(2007)の研究によれば、輝度要因（第１順位(first-order)）のみによるキネマトグラム(RDKs)を用い、放射、回転、直進並進の３種類のグローバル・パターンの運動方向の識別を、刺激要素の輝度とその背景の輝度との間のコントラスト（dot modulation depths)を変化させ、単眼視と両眼視条件でしらべたところ、両眼視条件での識別閾値は dot modulation depths のコントラストが低い場合には単眼視条件より小さかった。

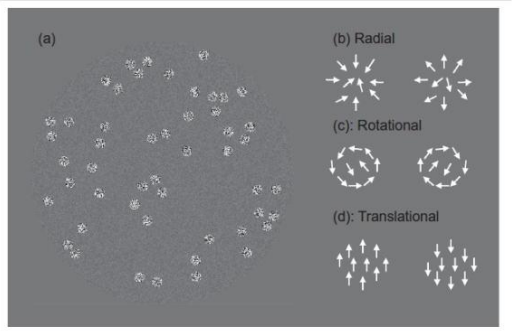

図 3.35　(a)グローバル運動視の閾値をしらべるためのランダム・キネマトグラム。刺激要素であるドットは 50 個で第２順位刺激である明るさコントラスト刺激から構成。(b)放射状グローバル運動、(c)回転状グローバル運動、(d)並進状グローバル運動、(Hutchinson, et al.2013)

この結果は、第１順位刺激条件の場合、刺激の両眼視加重が運動のグローバルな統合過程より早い段階で生起することを示唆している。

そこで、Hutchinson et al.(2013)は、第２順位(second-order)刺激を用いた場合にも、グローバル運動視の閾値の両眼加重があるかどうかについてしらべた。提示刺激は、ランダム・キネマトグラムとし、各刺激要素は明るさコントラストで構成した(図3.35)。キネマトグラムで観察できるグローバル運動視パターンは、放射、回転、並進の３種類とし、各要素の運動方向に関する一貫性（motion coherence threshold）はシグナル刺激とノイズ刺激の比を変えることで操作した。また、キネマトグラムを構成する要素（dot)の奥行の変調は「ドット内のノイズ刺激の平均コントラスト」と「背景のノイズ刺激の平均コントラスト」の比を操作することで変化させた。被験者にはランダム・キネマトグラムを単眼視あるいは両眼視のどちらかで観察させ、グローバルな運動パターンが放射条件では拡大／縮小を、回転条件では時計回り／反時計回りを、並進条件では上方向／下方向を、それぞれ答えさせた。

実験の結果、グローバルな運動を知覚できるためのコヒーレンス閾値(motion coherence threshold)は、dot modulation depths{ (DLmean - BLmean)/(DLmean + BLmean) :Dot Luminance, Back Luminance}が0.5から0.7まではリニアに減少し、それ以降は平準化すること、放射、回転、並進条件間には差がないこと、また両眼視条件の方が単眼視条件より小さいこと、さらにこの閾値の改善はdot modulation depthsに固有なものであることが示された。これらの結果から、第２順位事態でのグローバルな運動方向識別は、単眼視条件に比較して両眼視条件の方が1.2倍ほど正確であり、しかもこれはグローバルな運動処理過程で起きているのではなく、modulation depthに依存して起きていることが示された。両眼視条件におけるコヒーレンス閾値の改善は個々の刺激要素の運動からグローバルな運動を検出する以前の処理過程が関与することが示唆される。また第１順位刺激条件での両眼加重効果に比較して、第２順位のそれは弱いことも示され、これが神経生理的レベルの加重によるものなのかが検討課題である。

運動要因の領域分擬効果

運動する観察者の網膜に投影される運動パターンは、観察者が視ているシーンの構造を反映して、対象間の相対的奥行や境界の情報を担う。確かに、運動視差やモーションパースペクティブがあると、相対的奥行が出現してそこに境界（boundary)が生じるが、ダイナミックオクルージョン事態も境界を出現させる。

そこで、Yoonessi & Baker(2014)はダイナミックオクルージョン事態においてドットの拡大と収縮（expansion-compression)および増大と削減(accretion-deletion)の２つの手がかりが領域の境界の識別にどのように働くかをしらべた。実験事態は、図3.36の(a)に示したように、ディスプレー上に４つの垂直な帯領域を設定し、そのなかのドットを観察者の左右の頭部運動に連動してサイン波形あるいは矩形波形で運動させて提示するものであった。ディスプレー上の円形の枠内に隣接しあう垂直帯領域のドットは相互に反対方向に運動させた（図b)。実験条件は、図(a)と(b)に示したように、境界分擬の２種類の手がかりである「拡大と収縮（黒印で表示)」および「増大と削減（太い矢印で表示)」が奥行に関して一致する条件(Cue-Consistent)、とそれら２種類の手がかりが不一致で知覚コンフリクトする条件(Cue-Conflict)であった。「拡大と収縮」では刺激面のテクスチャが速度差をもって運動、また「増大と削減」では面の境界でドットを増・減させた。手がかり不一致条件では、「拡大ー収縮」手がかりで手前にあると規定された面で同様な手がかりで後ろにあると規定された面をオクルードさせた。分擬する境界は図3.37のC（運動パターンが矩形波の場合）とD(サイン波形の場合）に示すように、斜め方向に提示し、その方向を被験者に判断させた。また、運動パターンは頭部運動に連動させる条件、およびこの頭部運動条件をビデオ録画して提示する頭部静止条件

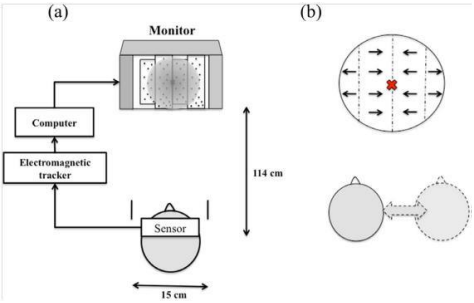

図3.36　運動パターンによる領域の分擬実験。(a)実験事態を示し、観察者は頭部を左右に動かすと画面のドットが連動して運動、(b)４つの垂直帯領域におけるドットの運動方向で領域間で互いに反対方向に運動
(Yoonessi & Baker,2014)

を設定した。さらに、頭部運動速度とドット速度との比率を 0.01、0.03、0.1、1 の 4 段階に操作した。この速度比率を高めると、それに比例して出現させる奥行を観察距離に比例して大きくした。実験では実験条件ごとに頭部運動速度とドット速度との比率を変化させ、そのときに出現する奥行境界の傾き方向（右あるいは左）を恒常法で測定した。

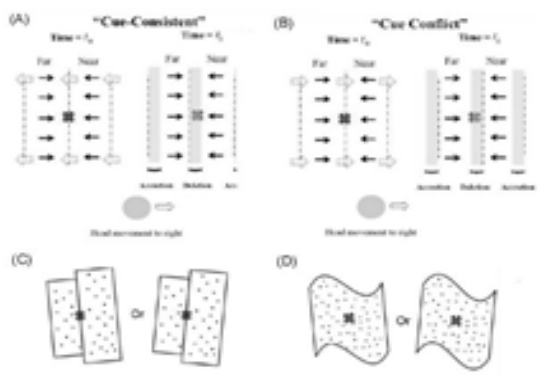

図 3.37 (A)「拡大と収縮」と「増大と削減」の 2 通りの手がかりが奥行に関して一致する条件(Cue-Consistent)、(B)それら 2 種類の手がかりが不一致でコンフリクトする条件(Cue-Conflict)で、黒矢印は「拡大と収縮」を、太い矢印は「増大と削減」をそれぞれ示す、(C)被験者には分擬した境界がどちら側に傾いているか（右あるいは左）を判断させる(運動パターンが矩形波の場合)、(D) 被験者には分擬した境界がどちら側に傾いているかを判断させる(サイン波形の場合)（Yoonessi & Baker, 2014）

その結果、(1)頭部運動条件と頭部静止条件では、境界線の方向の閾値に差が生じないこと、(2) 手がかりが不一致条件でも境界線の方向の閾値は手がかり一致条件と同等であることが示された。これらの結果は、頭部運動と随伴した運動視差による奥行は境界の分擬において効果をもたないこと、さらに「増大と削減」手がかりは「拡大と収縮」手がかりと同等の効果を境界の分擬にもつことを示した。

観察者の頭部運動静止条件での運動視差の手がかり効果

観察者が意図的に頭部を大きく動かすと、それによって生じた運動視差手がかりによって対象の奥行距離をより良く知覚できる。これが可能なのは、観察者自身と対象の間の位置変化、また観察者の視線と対象の間の方向変化、さらにターゲットとその背景にある対象との間の網膜上の相対的な運動差がそれぞれ手がかりとなるからと考えられる。de la

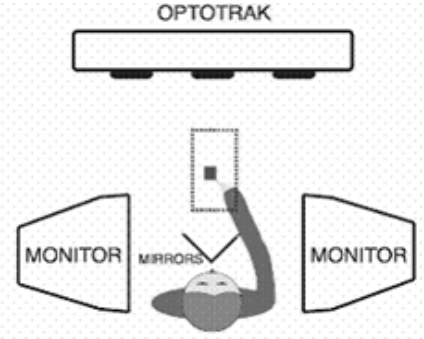

図3.38　運動視差実験装置。ミラー型ステレオスコープで両眼立体視させ、提示したターゲットの位置を人差指で指示。頭部運動と指の位置はOPTOTRAKで測定(de la Malla et al. 2016)

Malla et al.(2016)は、観察者を立ち姿勢の状態(standing still)でこの種の運動視差が効果をもつかを実験して試した。実験装置はミラー型のステレオスコープ（図3.38）で対象を3次元のバーチャルイメージとして知覚できる。観察者の頭部運動と観察者によるターゲットの指さし位置は、OPTOTRAKでモニターされた。手がかり条件は、図3.39に示したように、ターゲットが立方体で2個の背景刺激（立方体）の下に置かれた条件（All cues)、ターゲットが球体で単独で置かれた条件(Egocenric position only)、ターゲットが立方体で単独で置かれた条件(Orientation only)、ターゲットが球体で2個の背景(立方体)がある条件(Relative position only)、ターゲットが立方体で2個の背景（立方体）がある条件(Retinal cues)

の５通りであった。頭部運動によるターゲット（大きさはそのつど変化）の奥行位置（ランダムに設定）は10 cm遠く（図上段）、あるいは近く（図下段）にペアで設定された。被験者にはミラーステレオスコープの前に立ち、単眼あるいは両眼観察で自由に頭部を運動させながらターゲット(赤色)の位置に人差し指を持って行くように教示され、OPTOTRAKで検出記録された。頭部運動の大きさと方向（水平、垂直、斜め方向）も同様にOPTOTRAKで検出され記録された。

実験の結果、(1)両眼視差の手がかりを除去した単眼視条件で運動視差を効果的にする手がかりは、Relative position only条件とRetinal cues条件であること、(2)単眼視条件での頭部運動は両眼視条件と比較して大きくならないこと、(3)頭部運動の大きさが数ミリでも奥行検出が可能なことなどが示された。

運動視差の手がかりは、観察者が移動している条件のみではなく、静止立位条件でも効果的に働くと考えられる。

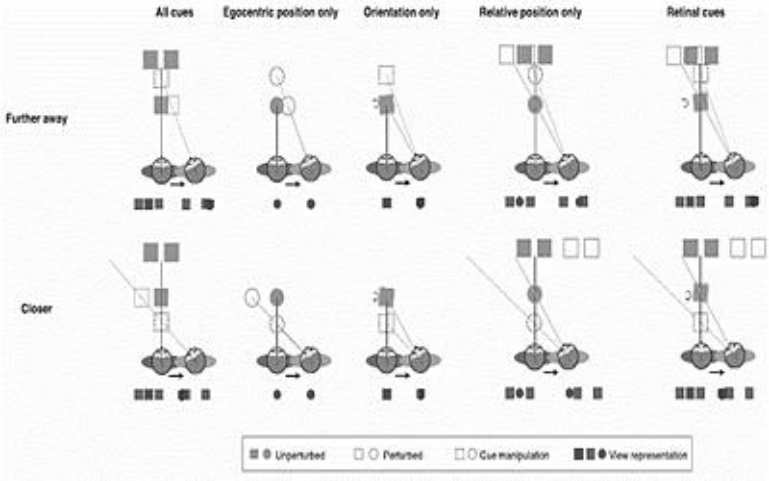

図3.39　各刺激条件での運動視差の手がかりの種類。上段:頭部運動によってターゲットが10cm遠くに知覚される条件、下段：:頭部運動によってターゲットが10cm近くに知覚される条件。（de la Malla et al. 2016)。

13 ステレオキネティック効果

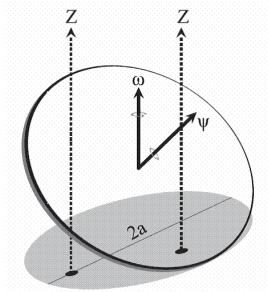

図3.41　ステレオキネティック効果の仮説。灰色部分はイメージ面における楕円の投影で長軸(2a)に偏心ドットおよび短軸上にもう一つのドットがある（この2つのドットは説明のためだけに示した)。(Xing & Liu 2018)。

Liu 2018)。

ステレオキネティック効果における最少の変形という拘束条件

点あるいは形の描かれた 2 次元の円盤を前額に平行に回転させると、立体的な形状が浮き上がって知覚できる（図3.40)。このステレオキネティック効果は、計算論で考えると、形状の変形が一義的に決められない不良問題である。すなわち視覚システムはｔ時における空間時間位置（x,y,z)がｔ+Δt1 時点でどのようになるかを一義的に決められない。これはステレオキネティック効果を含む運動からの 3 次元構造知覚(SFM,structure from motion)に固有な問題であり、これに一義的解を得るためにはステレオキネティック効果の操作環境とオプティクアレイに拘束条件を設ける必要がある。2 次元に回転する楕円を持続観察すると、３つの連続する知覚、すなわち(1)イメージ面で回転するリジッド(rigid)な楕円の知覚、(2)イメージ面で時々変形する楕円、(3)楕円がイメージ面で3次元の傾斜したディスクと視えるステレオキネティック知覚、が生起する。もし楕円がドットをもつならば、図3.41 に示すように、楕円上の短軸にドットを描き、前額平行回転させると、一定の高さをもつ傾いたコーンが視える。もしドットが長軸上にあれば、ドットはイメージ面に傾いた円形の2次元ディスクを横切るように運動して視える。もしドットが短軸上になければ楕円とドットでつくる形状はリジッドなコーンとは視えず、コーンの軸に垂直な面の周りを頂点の中心をはずれて形状を絶えず変えながら回転するように知覚される。視覚システムは形状の変形を最少にして可能な限りリジッドな形状を最大に知覚する偏好傾向がある（principle of minimal deformation and maximal

rigidity)(Hildreth, 1984; Yuille & Grzywacz, 1989;Weiss etal.;2002)。したがって、もしドットが楕円の短軸上にない場合には視えの形状が常に変化するので視覚システムは運動の速度を最少にしまた空間的にもっともスムースに知覚しようとする原理に基づいて2次元の運動パターンから3次元の構造を推測する。ステレオキネティックコーンの知覚は、slow and smoothness 仮説とリジット仮説にもとづいたヒューリスティックな過程で生じると考えられる。

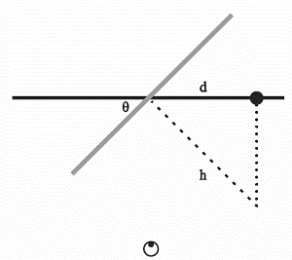

図3.42　回転するディスクと偏心ドットの関係。黒のドットはモニター上の2次元投影を示す。灰色の線は傾斜したステレオキネティックディスクで、hはコーンの視えの高さ、θは回転ディスクの傾斜度、dは長軸からのドットの偏心距離をそれぞれ示す(Xing & Liu 2018)。

Xing & Liu(2018)は、この2つの仮説を検証するために偏心的なドットの位置によってどのようにステレオキネティックのコーンの高さが決まるかを実験で確かめた。図3.41には、ステレオキネティック効果の仮説が示されている。図の灰色部分はイメージ面における楕円の投影で長軸(2a)にある偏心ドットと短軸上のドットがある（この 2 つのドットは説明のためだけに示した)。実際の刺激では楕円と一つのドットがその内部にある。もしこの刺激パターンがZ軸を中心にωの角速度で回転すると3次元の視えが生起する。ディスクは黒色の円輪郭をもつのでコーン状の3次元形状が生じるが、視覚システムはこれを2次元の楕円によるものと仮定する。図のΨはコーンの中心軸（ディスクの法線曲面）を示す。各ドットから伸びる点線矢印は3次元空間における可能な位置でドットの視かけの奥行を表す。ドットが短軸上にあれば紡錘状コーンの頂点はドットのZ線が円形のディスクの法線と交わるところに奥行が知覚される。もしドットが短軸上になければそのZ線は円形のディスクの法線と交わることはない。ドットが長軸にあれば法線に対する 3 次元距離は最少となりドットはディスクの面上にあることになる。したがって、偏心にあるドットが長軸から短軸に近づけばコーンの視えの高さは増大

し、またドットが長軸上にあれば視えのコーンの高さはゼロとなると予測される。図3.43にはこれらの関係が図示されている。

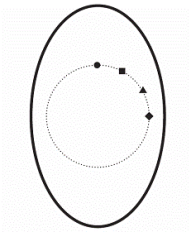

図 3.43　ドットの初期位置。縦横比 0.6 の楕円におけるドット位置で黒丸は長軸0°、ダイヤモンド印は短軸 90°を示し、四角と三角印は30°と 60°軸外にあることを示す。楕円の中心からのドット距離は常に一定に設定(Xing & Liu 2018)。

実験では楕円とドットからなる刺激はディスプレイに提示され、他の手がかりを排除するために観察用のチューブが用いられた。試行毎に楕円の縦横比（0.6、0.8）と初期のドット位置（長軸の 0°、短軸の 30°、60°、90°）および回転速度（60°、90°/s）が変えられた。またドットの位置は回転の中心から常に等距離をとるように設定した（図3.44）。成人の被験者（8 人）には楕円と同時に回転するバーの長さを視えのコーンの高さに調整するように求めた（図3.44）。

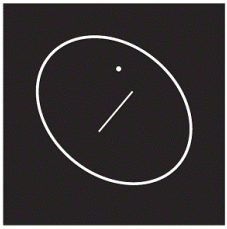

図3.44　ステレオキネティック効果による視えの高さの測定刺激。2次元のバーは回転する楕円の短軸上にあり、そのバーは視えのコーンの円形のベースに対して垂直に知覚される。Xing & Liu 2018)。

実験の結果、ドットの偏心位置が短軸の方へ0°、30°、60°、90°と増大すると視えの奥行（平均）は0.13、2.25、4.89、6.45cmと有意に高くなり、この傾向は縦横比（0.6、0.8）が大きいほど（ドットと楕円の回転の中心の間の距離が大になるほど）顕著なことが示された。

そこで、コーンの視えの高さ(h)の予測値（図3.42より$h=d/\sin\theta$）と実測値の間の関係を最小二乗法でみると、縦横比が0.6の場合の最小二乗値のスロープは、1.00、0.8の場合には0.98となり、したがって視覚システムはコーンの変形を最小にするために視えのコーンの頂点が回転するディスクの中心軸にもっとも近接した場合にその高さを最大としていると考えられる。

これらの結果から、多義的なステレオキネティック刺激を観察する場合、視覚システムはその運動速度を最小に、そしてその形状のリジッドを最大にするような偏好性をもって形状を知覚すると考えられる。

運動の奥行視（kinetic depth）における反転レートと被験者間の相関

ネッカーキューブと同じように、回転運動する物体も奥行、あるいは面を構成するドットの方向が反転して継続的に知覚される。これは多次元安定知覚(mulutistable perception)とよばれ、これが起きる理由として高次中枢における注意によるとする仮説(Brascamp & Blake, 2012; Mitchell,et al. 2004)、および感覚領域における局所的神経回路によるとする仮説(Pastukhov & Braun, 2007 ; De Graaf, et al.2011; de Jong et al.2016; Knapen,et al. 2011)がある。これらの仮説を検証するには、２つの異なる反転図形を提示し、その反転レート(反転の速度と持続時間)を測定して比較する方法がある。もし、両図形パターンの反転レートが被験者で一致すれば局所的な神経回路によって反転が生じていると言える。Brascamp et al.(2018)はおよそ200名の被験者を対象に複数の

実験条件で反転レートをしらべたところ、反転図形が異なるとその反転レートが被験者で一貫していないことを報告した。しかし、最近Cao et al.(2018)は、運動の奥行視ではその形状が異なっても奥行反転レートが被験者内で相関することを報告したが、この結果は残効の順応効果あるいは感覚的記憶によることを排除できないとされた。知覚反転が中枢的なものかあるいはローカルなものかを実験する場合、刺激入力が等しいという暗黙の前提があるが、入力方法を変えると知覚反転レートが劇的に変わるという報告もある(Brascamp et al. 2006)。

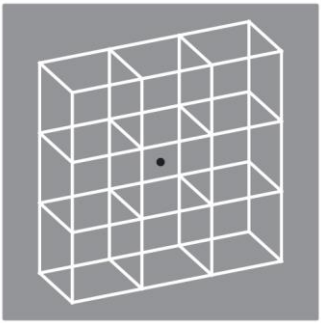

図3.46　格子型のネッカーキューブ(Necker cube lattice)(Pastukhov et al. 2019)。

ランダムド
斜め45°を
回転軸にして一方向に回転(Pastukhov et al. 2019)。

そこで、Pastukhov, et al.(2019)は、図3.45に示したように、球形の運動奥行視パターン(キネティクデプス、kinetic depth)を垂直に対して45°直交するように回転軸を取り時計方向あるいは反時計方向に回転し、その時の知覚反転回数と持続時間を測定した。このように、2つの回転軸の異なるパターンの配置と配列を類似したものとすると、対応する視覚野のニューロンと受容野が近似すると考えられる。しかし、回転軸が異なると、その運動方向を感知するニューロングループが異なり、それぞれ独立に作用する(Movshon & Newsome, 1996)が、これを考慮し可能な限り類似した実験条件が整えられた。また、コントロール条件として、図3.46に示したようなネッカーキューブパターンを提示し、その反転レートを測定し、反転レートが運動の奥行視パターンとは異なるかをしらべた(受動観察条件)。さらに、反転レートを意志的に被験者がコントロールできるかを「スピードアップ」、「スピードダウン」の教示で変えることができるかも実験した(意志的コントロール条件)。実験では、運動方向角度の異なる2種類のキネティクデプスとネッカーキューブを提示し、反転方向が変わる度に、またその持続が続く限りキー

押しで反応させた。キネティクデプス提示条件では残効が影響しないように提示間隔をとった。被験者は33名（8名男性、25名女性、18歳から28歳）であった。

実験の結果、(1)受動的観察条件では２つの異なる運動方向のキネティクデプスの知覚優先とその持続時間の間には高い相関(おおよそ0.6)がみられたが、キネティクデプスとネッカーキューブ間には相関は示されないこと、(2) 意志的コントロール条件では、スピードダウンの教示によるよりスピードアップの教示条件でより速やかに有意に知覚を反転すること、(3)意思による知覚反転は、2つの運動方向の異なるキネティクデプス間ばかりでなくキネティクデプスとネッカーキューブ間にも相関がみられること、(4)スピードダウンの教示条件ではキネティクデプス間のみで相関がみられること、などが示された。

これらの結果は、視野闘争図形においては同種のキネティクデプス間のみで知覚反転レートに関して強い相関があるが、他の知覚反転パターン間では相関関係がないことを示して、同種の知覚反転パターンではそれを担う視覚システムのモジュールは同じで独立し分担機能していると示唆される。一方、知覚反転パターンが異種の場合には、視覚神経システムが異なるのではなくその入力モジュールが異なり、またスピードアップとスピードダウンの教示による意思的コントロールの差は注意作用のリソーズが異なるとそれぞれ考えられる。

14　ベクションと自己運動

ベクションにおける奥行方向への新たなスピン

放射状に拡散するオプティクフローを観察すると、静止した観察者は主観的に奥行方向へ動くように感じられる（図3.47のA)。このベクションは、あたかも観察者が頭部を左右に動かしたようなサイン波形上の変化をオプティクフローに追加すると、それが視覚と前庭感覚との間にコンフリクトを起こしているのも関わらず奥行にまっすぐにではなく

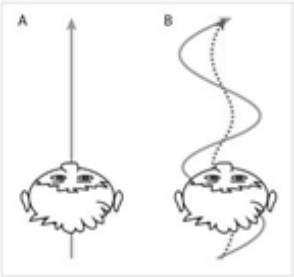

図3.47　放射状のオプティクフロー(A の灰色)を観察したときのベクション、および頭部を横に動かしたときに生起する曲線状に変化するオプティクフローをシミュレート(Bの灰色) したときに感じるベクション(Bの点線)(Kim & Khuu 2014)

曲線状に動くように感じられる (図のB)。一般に観察者が前進しながら頭部を運動させるモーション・パースペクティブが生起するので、オプティクフローにモーション・パースペクティブが追加されるとベクションを強める。

そこで、Kim & Khuu(2014)は、図3.48のようなオプティクフローを設定して自己誘導運動であるベクションをしらべた。実験条件は3通りである。すなわち、条件(1)は純粋な放射状のフローパターンで、ここでは周辺にいくに従い速度が増す(図のB)。条件(2)は観察者があたかも頭部を0から9°の範囲で左右にオシレートした状態をシミュレートしたオシレーションフローパターン。条件(3)は視点があたかも回転するように放射状のフローに時計あるいは反時計回りに回転するスパイラルパターン(図のCとD、ここでは運動視差は働いていない)。ここでのフローの回転角度は0°、10°、20°、30°に設定した。実験では、図3.48のAに示したように、ディスプレー上に青の小矩形をフロー状に動かしてオプティクフローを提示した (緑の小矩形は注視点、赤の矢印は注視点の中心とした小矩形の回転方向)。被験者には、注視点のある条件あるいは無い条件で、主観的な自己誘導であるベクションの強さを0から100の範囲のメートル単位の物差で表すように求めた。その結果、純粋な放射状フローパターン条件 (条件1) に比較し、視点を中心にオシレーションするフローパターン(条件2)、とくに注視点を定めない条件では、ベクションの潜時を短くし、その強さをオシレーション角度の増大とともに大きくすることが示された。

このようにオシレーションするフローパターンがベクションを増強するのは、網膜への刺激が刺激のオシレーションによって網膜順応を低減するからとも考えられる。そこで、

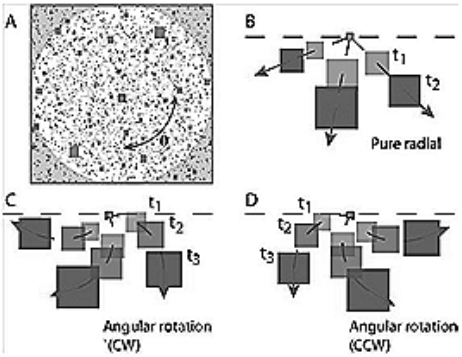

図3.48　観察者があたかも視点を回転させたようなフローをシミュレートし、放射状のオプティクフローに追加した事態。(A)実験で提示したディスプレー上のプティクフローで、緑の小矩形は注視点、青の小矩形がフロー状に動く（赤の矢印は注視点の中心とした小矩形の回転方向）、(B)純粋な放射状のフローパターンで周辺にいくに従い速度が増す、(C)放射状のフローに時計回りに回転するフローを追加したために螺旋状に流動するパターン、(D) 放射状のフローに反時計回りに回転するフローを追加した螺旋状流動パターン(Kim & Khuu 2014)

視点がオシレートするオシレーション条件とフローが時計回りあるいは反時計回りのいずれかのみに渦巻き状に回転するスパイラル条件を設定してベクションの強度をしらべた。スパイラル条件では刺激が１方向のみにフローするので順応はオシレーション条件より多いと考えられる。その結果、オシレーション条件の方が有意にベクション強度が大きかった。

頭部を左右に移動させることで視点が変化する事態をシミューレートしたオシレーション条件でベクションが大きいのは、運動刺激残効（Motion Aftereffect, MAE）が純粋な放射条件あるいはスパイラル条件に比較して小さいためと考えられる。そこで、放射状に拡散する事態での運動残効（放射状刺激の縮小として知覚）の持続時間を測定した。被験者に 40 秒間フロー刺激を提示して順応後、運動残効の持続時間を応答させた。その結果、オシレーション条件が有意に運動残効持続時間が短かった。

これらのことから、視点を左右に振った事態をシミュレートしたオシレーション条件はベクションを強く誘導するが、これは運動視差の働きによるのではなく、網膜への２次元の運動刺激がその位置を常に変えることで運動残効を起こりにくくし、網膜感受性を持続的に高めているためであることが明らかにされた。

放射状拡大と収縮するオプティクフローによるベクションの発達的比較

Shirai, et al.(2018)は、放射状に拡大あるいは収縮するオプティクフローによるベクションについて発達的にしらべた。年齢グループは3群で、6-8歳群18名、9-11歳群19名、成人群20名であった。実験ではシミュレートした立方体中のランダムドット（16000個）が観察者に接近するように拡大することによって後退させるようなベクションを生む条件（拡大運動条件）、あるいはそれらを収縮させ前進させるようなベクションを生む条件（収縮運動条件）を設定し、これらをスクリーンに投影して、ベクションが生じる潜時、持続時間、そしてその強さを測定した。

その結果、すべての年齢群で収縮運動条件での潜時は拡大運動条件より有意に短いこと、また拡大運動と収縮運動の両条件において成人群より児童群で有意に潜時は短く、強さ大きいことがそれぞれ示された。これらの結果から、オプティクフローの運動方向の違い（拡大あるいは縮小）によるベクション経験の非相称性は児童群で顕著で、しかもベクションの知覚経験は成人群より敏感である。

これらの結果がどのような理由で起きるかは今後の課題であろう。

ベクションとオプティクフローの持続時間

ベクションは視覚的運動刺激の大きさ、密度、速度など物理的レベルが小程度の時に影響されて大きくなる(Dichgans & Brandt 1978)。物理的レベルが中程度である運動刺激の面と材質によってもベクションは影響される(Kim et al.2016)。さらにベクションは、物理的には一定の刺激でもそれが全体として統一がとれている場合には、そうでない場合に比較して強くなるという認知的レベルの影響を受ける(Riecke et al. 2006)。運動刺激にアニメ（ドラゴンボール、ジブリのアニメ動画）を用い、その提示時間を変えた研究(Tokunaga et al.2016)によれば、運動刺激の内容に関わらずに提示持続時間を増大するとベクションが大きくなることが示されている。

Seno et al. (2018)は、オプティクフローの提示持続時間がベクション開始までの潜時およびその強度におよぼす影響について実験条件を吟味して再度しらべた。実験では視覚運動刺激として150本のアニメ動画（ビデオクリップ）を４秒ないし106秒の間、図3.49に示したように、拡大運動する円形グレーティングパターンを標準刺激として

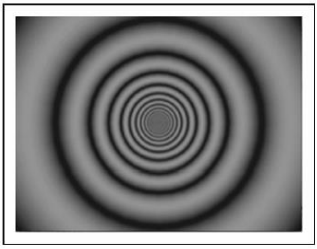

図3.49　ベクション強度測定のための標準刺激で円形グレーティングが拡大運動するために自己運動（前進）を誘発する(Seno et al.2018)。

25 deg/sec の速度で30秒間提示し、このときのベクション（前進）を100としたときビデオクリップによって誘発されたベクションはいくつの数値を当てることができるか（マグニチュード・エステメーション法）を被験者（22名）に答えるように教示した。

実験の結果、150本のビデオクリップによるベクション強度の数値は84.21、またその提示持続時間とベクション強度間の相関係数は0.46となり、ビデオクリップの持続時間が長いとベクション強度が強まることが示された。そこで、人工的なベクション誘発刺激を用いて持続時間（8、16、32、64秒）と誘発ベクション強度の関係が検討された。誘発刺激には、図3.50に示したように、拡大運動するグレーティング動画とし、これを観察した被験者にはサイン波形のグレーティングテクスチャに囲まれた3次元シリンダーの中を前進するような自己運動を誘発する。ベクション強度は標準刺激を提示しないで0から100までの数値によるマグニチュード・エステメーション法で19名の被験者に答えさせた。測定はベクションが起きるまでの潜時およびベクションのすべての持続時間をキー反応によって答えさせた。

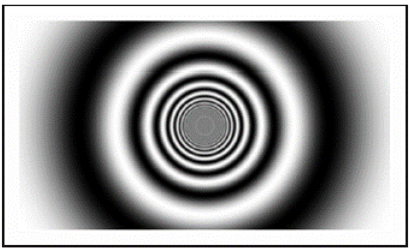

図3.50　ベクション誘発刺激。拡大運動するグレーティング動画でサイン波形のグレーティングテクスチャに囲まれた3次元シリンダーの中を前進するような自己運動を誘発する(Seno et al.2018)。

その結果、提示持続時間が大になるとベクションから離脱するフェーズが長く頻度も多くなること、全提示時間に占めるベクション持続時間の割合(%-duration)も提示持続時間が増大すると大きくな

ること、そして、提示持続時間とベクションの評価強度、および%-duration とベクション評価強度との間には有意な相関があることが示された。

これらの結果から、ベクションが起きるためには運動刺激の提示から数秒後であること、ベクション強度は提示持続時間の長さに応じて強くなること、さらにベクションの離脱がしばしば起きることが確認された。

15 自然シーン内の対象の運動と観察者の自己運動

対象の運動はオプティクフローと観察者の運動の両要因によって決まる。観察者の頭部運動と観察者が自己運動中の対象の運動知覚はともにオプティクフローに依存する。そのため、両要因は共通の神経メカニズムに支配され、対象の運動知覚が生起すると考えられる。とくに、観察者が自己の頭部運動知覚が不確かな場合には対象の運動も確実には知覚できないと仮定できる。

Rushton et al.(2018)は、頭部運動知覚の正確さの限界は対象運動知覚の正確さの限界と関係するか否か、あるいはこの両要因の知覚の正確さは共変関係にあるか否かについて実験した。実験事態は図 3.51 に示されているように、シーン内の対象（立方体）とターゲット（球体）から構成された。観察者の頭部方向(heading)の判断課題では、対象とターゲットは常に同方向に運動（図のｃ、α＋β）、挿入枠内（円形）は観察者に視えている光景で、頭部の方向（印の×）はターゲットの右に位置した。またターゲットの運動方向の判断課題では、対象とターゲットは別々の方向に運動した（図のｄ）。このときシーン内の対象はα方向に運動、またターゲットは（α＋β）方向に運動する。これを観察者から視ると、挿入枠に示したように、ターゲットはシーンに対して左方向に運動して視える。観察者に接近するシーンの運動速度は 10.125 m/s、その背景に置かれた対象は 0.55 m から 1.05 m の範囲に置かれた。対象は 54 個の赤色ワイアーフレームで大きさ、方向、距離をランダムに観察者の前方に提示された（図の a)。ターゲットは球体で黄色で表示さ、そのスタート位置は観察者の正中視線の左右 2.5° に置かれた。これらの刺激は両眼視差で奥行距離を規定し、観察者にはシャッターグラスを装着して観察させた。図(b)には、対象の運動角度と観察者の視線の角度を示し、αは観察者の正中視線に対する対象の最初の

運動角度、βはαに対するターゲットの運動角度で試行毎に変えられた。シーンを両眼視融合させた後でシーンをシミュレートして 1 秒間観察させ、その後シーンを消して、頭部運動とターゲットの運動方向をマウスで答えさせた。頭部運動方向課題では、被験者の頭部がターゲットの左あるいは右方向を通過したかどうかを、またターゲット運動の方向判断課題では、ターゲットがシーンの左あるいは右方向にう動いたかどうかをそれぞれ判断させた。

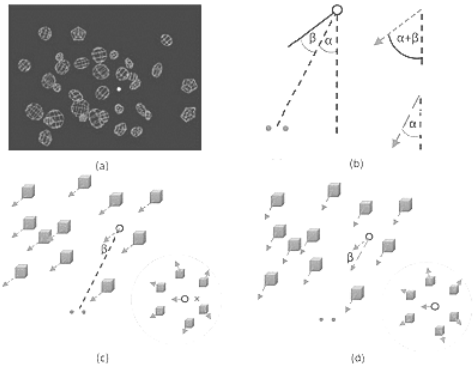

図 3.51　自己と対象の運動方向の知覚のための刺激事態。(a) ディスプレー上の刺激パターンで 54 個の赤色ワイアーフレームからなり、その大きさ、方向、距離をランダムに設定して観察者の前方に提示。ターゲット(球体)は黄色で表示。 (b) 対象の運動角度と観察者の視線の角度、αは観察者の正中視線に対する対象の最初の運動角度、βはαに対するターゲットの運動角度で試行毎に変えられる。(c) 観察者の頭部の向きを判断させる事態で対象と立体形状対象はすべて同一方向に運動（α＋β）、また挿入枠内（円形）は観察者に視えている光景で、頭部の方向（印の×）でターゲットの右に位置する。(d) ターゲットの運動方向の判断課題、シーン内の対象はα方向に運動、またターゲットは（α＋β）方向に運動する。これを観察者から視ると、挿入枠に示したように、ターゲットはシーンに対して左方向に運動して視える(Rushton et al. 2018)。

実験の結果、シーンに伴って変わる対象の運動方向判断は、頭部運動方向(heading)の判断より正確になされることが示された。

次に、放射状に拡大するオプティクフローを観察するときには、拡大の中心となる点が存在し、観察者はそれを注視して自己の運動方向(translation)を知覚するが、このとき観察者の眼球が回転すると自己の運動方向を

知覚できない。そこでシーンの注視点をランダムに-1°から1°/sの範囲で回転するようにシミュレートして提示した。実験の結果、シミュレートした注視点の回転は頭部運動方向の判断の正確さを減少させたが、対象の運動方向の判断の正確さを減じないことが示された。さらに、対象間の奥行距離を増大させ、運動視差が働きやすい事態で自己の頭部運動と対象の運動方向をしらべると、対象間の奥行距離の拡大は頭部運動方向判断の正確さを増大させたが、対象の運動方向判断を高めなかった。

これらの結果から、観察者が頭部を運動させてシーンを観察する場合、そのシーンに随伴して運動する対象の運動方向の判断能力は自己の頭部運動方向の判断能力に限定あるいは束縛されないと考えられる。

16　3次元運動の知覚処理過程

グローバル・モーションとオプテック・フローにおける第１次と第２次の運動信号の相互作用運動視は第１次要因（輝度）と第２次要因（コントラスト、フリッカー、テクスチャなど）の刺激属性を検出することで可能となる。運動視処理過程の最初の段階では、これら２種類の要因の検出はパラレルになされ、次いでグローバル・モーション（複数のローカル・モーションベクトルの統合されたもので、ローカル・モーションの段階ではアパチャ問題にみるように運動方向は多義的である）が知覚できる段階でこれら２種類の過程は統合されると考えられている(Lu & Sperling 1995　2001, Wilson et al. 1992)。グローバル・モーションの処理段階では、それを担う刺激が第１次あるいは第２次要因によっているかは無関係となり両要因に反応する。この特性は「運動手がかり不変性（cue invarience)」と呼ばれる。MT野はグローバル・モーションに関わる領域で、ここを損傷するとグローバル・モーション視が不能となる(Newsome & Pare 1988)。第１次および第２次要因の両方に反応するニューロンは、V1、MT、MSTｄで見いだされていて、運動手がかり不変性がどの領野で発生するかは不明である(Chaudhuri & Albright 1997, Churan & IIg 2001, Ceesaman & Andersen 1996, O'Keefe & Movshon 1998)。

そこで、Aaen-Stockdale et al.(2012)は、運動視における第１次および第２次要因がグローバル・モーションの統合が起きるどの段階までそれぞれ別個に処理されるのかを精神物理的手法でしらべた。運動刺激はランダム・ドット・キネマトグラム(RDKs）を用い、

連続８フレームで各フレーム 53ms、合計で 427ms を提示した。RDKS のすべてのドットは各フレーム0.3°の距離を5.6°/s の速度で動くように設定された。ドットの運動方向は、トランスレーション条件(translation)では上方向／下方向、ラディアル条件(radial)では拡大方向／縮小方向、ローテーション条件(rotation)では時計回転/反時計回転、とした。ドットは、第１次要因である輝度要因で作成され、また第２次要因としては明るさコントラストもしくはフリッカーで作成された。RDKs はターゲット刺激であるシグナルドットとノイズエレメントで構成された。ノイズエレメントは実験ディスプレーの１ピクセルで描画し、静止して提示した。このノイズエレメントで構成されたものが RDKs の背景刺激となる。シグナルドットとノイズエレメントの輝度、コントラスト、フリッカーの頻度は、シグナルドットと背景ノイズの間の刺激属性の比で変化させた。これを数式化したものが以下である。

輝度条件の場合（Ldot：ドット内部のノイズの輝度の平均、Lbg：背景ノイズの輝度の平均）Luminance modulation = (Ldot - Lbg)/(Ldot + Lbg)

コントラスト条件の場合（Cdot：ドット内部の Michelson コントラストノイズの平均、Cbg：背景ノイズのコントラストの平均）

Contrast modulation = (Cdot - Cbg)/(Cdot + Cbg)

フリッカー条件の場合(Pdot：１個のドット内部の１ピクセルの輝度が反転する確率 Pbg：ドットの外側の１ピクセルが輝度を反転する確率)

Flicker modulation = (Pdot - Pbg)/(Pdot + Pbg)

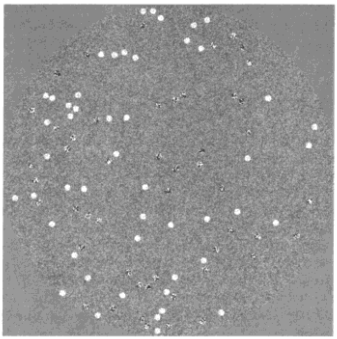

図 3.52　運動視の刺激パターン。50 個の輝度によるドットと 50 個の明るさコントラストによるドットで構成されている(Aaen-Stockdale et al.2012)

被験者には図 3.52 のパターンからなる RDKs を観察させ、ドットの視かけの運動方向が上方向／下方向、拡大方向／縮小方向、時計回転/反時計回転をそれぞれ判断させた。実験１では、上方向もしくは下方向に運動する

50 個の輝度変調ドット(Luminance modulated dot) を 50 個のコントラスト変調ノイズドット(Contrast modulation noise dot)が存在する事態あるいは存在しない事態で提示し、その視えの運動方向を判断することを、さらに 50 個のコントラスト変調ドットを 50 個の輝度変調ノイズドットが存在する事態あるいは存在しない事態で視えの運動方向を判断することを、被験者にそれぞれ求めた。実験２では実験１と同一の事態で運動方向を拡大方向／縮小方向、時計回転/反時計回転に変え、その視えの運動方向の判断を求めた。実験 3 では、実験２と同様とし、輝度変調ドットとフリッカー変調ドットでしらべられた。視えの運動方向の検出閾値は、シグナルドットの変調比を 4 段階に設定し、そのそれぞれの段階でシグナルドット数を段階的に増減させて測定した。

実験の結果、輝度変調ドットをシグナルドットとした場合、輝度変調レベルがあるレベル以上にある場合には、コントラストドットもしくはフリッカードットをノイズドットとして付加しても、運動方向が上方向／下方向、拡大方向／縮小方向、時計回転/反時計回転のいずれでも、そのシグナルドットの視えの運動方向（グローバル・モーション）の検出には影響しないことが示された。しかし、シグナルドットの輝度変調レベルが低減された場合には、第 2 次要因で構成されたノイズドットはシグナルドットの視えの運動方向の検出を妨げた。一方、シグナルドットがコントラストで構成された場合、輝度ノイズを付加しても輝度変調レベルが低ければ、そのシグナルドットの視えの運動方向検出を妨げないことも示された。輝度ドットとコントラストドットの条件間に示された相互作用は、フリッカードットの場合にはフリッカードットによる視えの運動の検出が明瞭に出現しないこともあって、明確には示されなかった。

これらの結果から、ローカル・モーション検出器は第 1 次運動要因にも第 2 次運動要因にも応答し、その検出した要因の重みに応じてどちらかの要因によるグローバル・モーションを次の過程に指示する。どちらの運動要因が優位になるかは両要因間の相対的な変調程度(relative modulation)によって決定されると考えられる。

17 運動要因による奥行に関するニューラルモデル

対象が接近あるいは後退して知覚される現象（奥行方向運動あるいはステレオモーション）には、両眼視差の変化検出のメカニズム(changing disparity,CD)あるいは左右眼の

投影像の網膜速度差(interocular velocity difference,IOVD)検出のメカニズムのどちらかが関わると考えられる。CD メカニズムでは、まず静止した視差を計算し、次に時間に伴う視差変化を計算する。IOVD メカニズムでは、まず単眼での運動を計算し、次に時間変化に伴う左右眼の運動速度差を計算する。左右眼の両眼視差を時間に伴って一体的に変化させた場合にもステレオモーションを生じさせることができるが、この場合には CD と IOVD の両メカニズムが働いている。

この２つのメカニズムを分離するためには左右眼の関係を妨害する必要がある。たとえば、ダイナミック RDS(DRDS)では、左右で対応のあるドットパターンを用いるが、しかしフレームごとに異なるパターンを提示するので左右間には CD メカニズムのみが働く。DRDS でステレオモーションが可能なのは CD メカニズムによるが、VOID も関係していると考えられている。また、アンコラレート RDS(uncorrelate RDS、左右眼のドットパターンは異なり、時間とともに異なるまま左右眼で運動する)やアンチコラレート RDS(左右眼のドットパターンのコントラストが逆転したもの) は、左右眼のパターンに関する対応関係が擬似的であるが、CD メカニズムによって奥行運動視が可能となる。しかしこの場合にも、左右眼の両眼視差は弱いので IOVD メカニズムが働くと考えられている。

Peng & Shi (2014)は、CD メカニズムおよび IOVD メカニズムの神経生理学的モデルをそれぞれ基盤にして CD エナジーモデル(CD Energy model)と IOVD エナジーモデル(IOVD Energy model)を提唱した。これらのモデルは、視差エナジーモデル(Ohzawa et al.1990)およびモーションエナジーモデル(Adelson & Bergen 1985,Watson & Ahumada 1985)を継承したもので、それぞれとも視覚領の視差と運動に選択的な複雑細胞の働きを数学的にモデル化している。

図 3.53 には、CD エネジーモデル(a)と IOVD エネジーモデル(b)が示されている。CD エネジーモデルの第１段階では空間視差ユニット(spatial disparity unit、SDUs)に左右眼のイメージを結合することによって両眼視差の分布をつくり標準化する。第２段階では第１段階で得られた各眼の現在とその直前の視差を視差エネジーモデルに従って符号化して結合し、視差の時間的変化を得る。現在とその直前の視差の結合はサインとコサインの時間フィルター(TCPF/TSPF)によってなされる。一方、IOVD エナジーモデルでは、現在と直前の各眼の入力間の空間的シフト (視差) に選択的な SDU を通して単眼

の運動速度分布をつくり標準化する。第２段階では第１段階で得られた速度を左右眼で結合し符号化することで眼球間の速度差を得る。なお標準化プロセス(normalization)では、

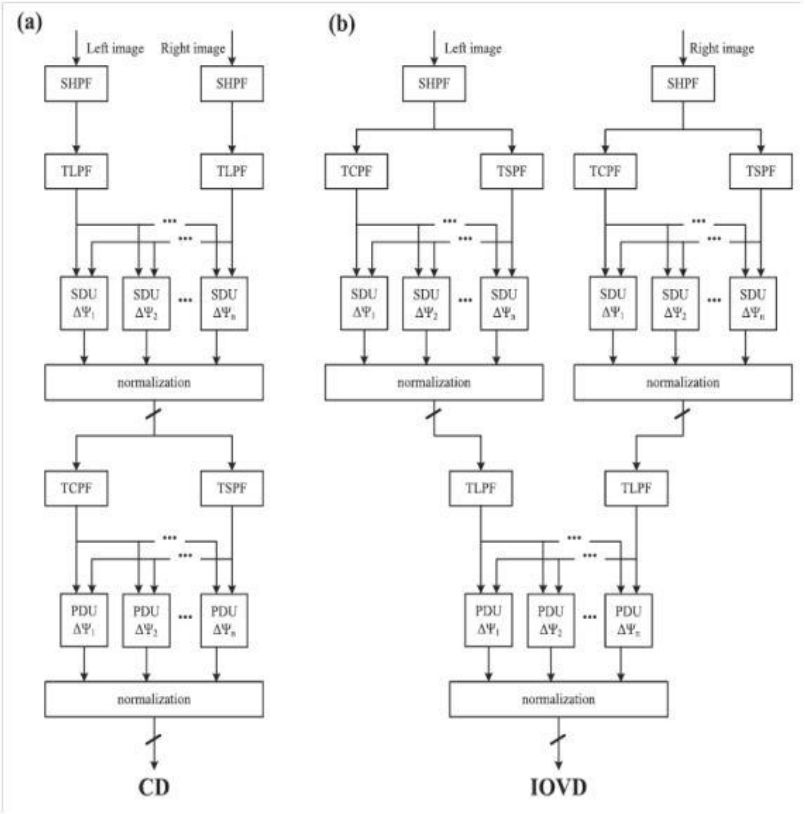

図3.53　CDメカニズム(a)とIOVDメカニズム(b)。図中、 SHPF = Spatial High Pass Filter. TLPF = Temporal Low Pass Filter. TCPF = Temporal Cosine Phase Filter. TSPF = Temporal Sine Phase Filter. SDU = Spatial Disparity Unit. PDU = Phase Disparity Unit を表す(Peng & Shi 2014)。

イメージコントラストに対して標準化した反応をつくる。これら２つのモデルは、前段階の処理過程と後段階の処理過程とを入れ替えたものである。これらの各プロセスの働きは数式で規定され、パラメータも決められた。さらに、受容野を構成するニューロンのシナプス結合は可塑的なので、試行ごとにこれらニューロンの結合を発達させる学習モデルにバージョンアップされた。ここでは、奥行への運動に求められるニューロン結合のパターンが適切か否かが両眼への奥行運動刺激に対する反応のたびに学習できるようにした。

このモデルのシミュレーション実験は、ランダムドット・ステレオグラム（RDS)、ダイナミックランダムドット・ステレオグラム（DRDS)、アンコラレートランダムドット・ステレオグラム（URDS)、アンチランダムドット・ステレオグラム（ARDS）を入力刺激とし、それらの奥行方向の運動速度（MID)を変えて実施した。

DRDS では両眼間での対応関係はあるものの同一時刻では対応していないので、フレームごとに視差はあるが単眼運動刺激は存在しない。したがって、IOVD エナジーモデルでは奥行運動の出現値が低下することが予測され、シミュレーション実験でもその通りになった。しかし、CD エナジーモデルでは予想に反して奥行運動の出現値の低下がシミュレーションでも示され、CD メカニズムが瞬間ごとの視差を正確に評価できていないことを示した。

URDS では両眼間の対応は存在しないが時間的な対応はあるので単眼運動は明瞭だが一貫した視差は存在しない。したがって、擬似的な視差は CD メカニズムを働かせるが、それは弱いので、奥行運動視は IOVD メカニズムによると予測される。シミュレーション実験の結果、IOVD エナジーモデルはこの予測を支持した。しかし CD エナジーモデルのシミュレーション結果も IOVD ナジーモデルの予測と同等の結果を示した。これは一貫した視差対応が存在するあるいはしないにも関わらず、SDU ニューロンがひとつのピーク値を示し、このピーク値の位置が適切に検出されなかったためと考えられる。

ARDS は左右ステレオグラムの明るさコントラストが逆転している点が RDS と異なるが単眼の運動刺激は存在する。したがって、逆転した視差は奥行を生起しないので、ここでの奥行運動視は IOVD メカニズムによると考えられた。シミュレーション実験は、しかしながら、CD エナジーモデルと IOVD エナジーモデルとは奥行運動視の予測値が同等となる

ことを示した。これは、SDU での視差検出において、ピーク値が左右で山と谷を示し、これが視差値として検出されたためである。

これらのシミュレーション結果から、(1)CD と IOVD メカニズムは、両眼間の対応を妨害しあるいは時間的に妨害したステレオグラムを容易には識別できないこと、(2)試行ごとにニューロンの結合を学習させることが可能だが、それは IOVD より CD メカニズムを用いた方が奥行運動に選択的なニューロンをより発展させる可能性があること、などが見いだされている。

18 3 次元運動の系統的知覚の誤りとベイズ定理による説明

Rokers et al.(2018)は、3 次元に運動する対象の運動軌跡はある秩序だった方向に誤って知覚されるが、その誤り知覚(misperception)がベイズの定理（ある事象 B が起こったという条件のもとでの事象 A の確率 P(A|B)）で説明できることを明らかにした。この定理では、知覚は事後確率 P(s|r)と考え、それは物理的刺激(s)と反応(r)の条件付き確率および尤度 P(r|s)で決められる。この場合尤度は物理的刺激に対する感覚反応の条件付き確率で表せ、また刺激の多義性やノイズ、感覚システムのノイズなどによる不確実性は

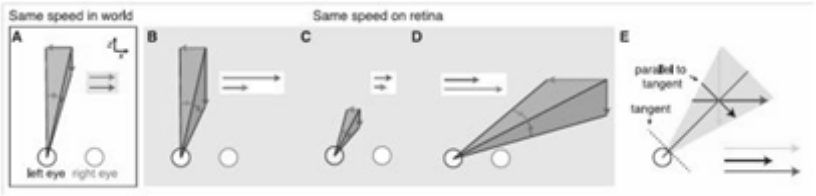

図 3.54　網膜に投影される運動刺激の不確実性。(A) 同速度で直交する運動対象のベクトル（奥行方向の運動は緑色、横方向はオレンジ色）。(B)網膜上の一定速度の運動ベクトルは横方向より奥行方向の運動の方がより長く投影され、不確実性のもととなる、(C)この不確実性は観察距離が小さいと縮小する、(D)この関係は運動が矢状面（身体の正中に対し平行に左右相称に左右を分ける面である）の場合逆転する、(E)観察者の眼球の接線が最小の所与の角度と距離をもつベクトルを決める (Rokers et al.2018)。

尤度の大きさで示せる。事前確率(Ps)は被験者への刺激の仮定的な確率分布で、経験による学習などに基づく。事前確率、尤度、事後確率は次式で表せる。

$$P(s|r) \propto P(r|s)P|s)$$

もし感覚の不確実さが大きいと尤度が大きくなり、事前確率は事後確率に大きく影響する。つまり、知覚は事前確率の方へ偏よることになる。3次元運動視のエラー知覚に対しこの定理を当てはめると、3次元運動の事後確率を引き出すには、網膜に投影された刺激の特性を分析する必要がある。図3.54には、対象の網膜における速度が3次元世界では非対称な運動軌跡を生じ、不確実性をもたらすことを示したものである。図（A）は同速度で直交する運動対象のベクトル（奥行方向の運動は緑色、横方向はオレンジ色）を、図（B)は網膜上の一定速度の運動ベクトルは横方向より奥行方向の運動の方がより長く、不確実性のもととなることを、図（C)にはこの不確実性は観察距離が小さいと縮小することを、図（D)にはこの関係は運動が矢状面（身体の正中に対し平行に左右相称に左右を分ける面である）の場合逆転することを、図(E)には観察者の眼球の接線が最小の所与の角度と距離をもつベクトルを決めることを　それぞれ図示する。3次元に運動する対象の軌跡と網膜速度との関係は次式で規定できる。

$$p(t) = [x(t), y(t), z(t)]$$

ここで、pは対象の位置、tは時間で、3次元軸（x,y,z）で示されている。この3次元運動視の座標系を図示する、図3.55になる。図では左右の眼球内の灰色領域は運動対象の位置と軌跡を、x0とz0はt0の運動対象の位置をそれぞれ示す。　ここでx軸とz軸の運動ノイズによる不確実性がそれぞれ独立ではないと仮定すると、図3.56に示すように、運動対象のx軸（横方向）とz軸(奥行方向)の不確実性は刺激距離と頭部中心とした偏心度で変化する。

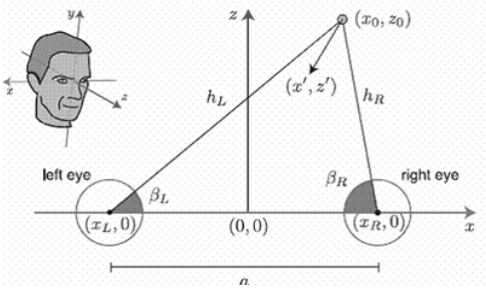

図3.55　3次元運動視の座標系。左右の眼球内の灰色領域は運動対象の位置と軌跡を、x0とz0はt0時の運動対象の位置をそれぞれ示す(Rokers et al.2018)。

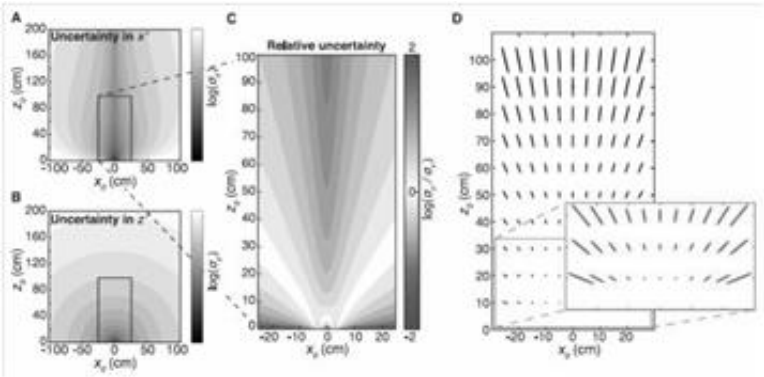

図 3.56　運動対象の x 軸（横方向）と z 軸（奥行方向）の不確実性は刺激距離および頭部中心の偏心度で変化。(A) 運動ベクトル（x'）の不確実性を x 軸と z 軸上に表示（眼球間距離は 6.4cm）。(B) 運動ベクトル（z'）の不確実性。(C) A の枠で囲った部分のカラーマップ表示、(D) 対象の位置の範囲内の運動ベクトル x' と z' のノイズの共分散の表示し、分布線は対象の各位置での相対的な不確実性および最大の不確実性が出現する軸を示す(Rokers et al. 2018)。

図 (A) は運動ベクトル（x'）の不確実性を x 軸と z 軸上に表示（眼球間距離は 6.4cm）、図 (B) は 運動ベクトル（z'）の不確実性を表示、図 (C) は図 A の枠で囲った部分のカラーマップをそれぞれ表示したものである。図 (D) は対象の位置の範囲内の運動ベクトル x' と z' のノイズの共分散の表示し、分布線は対象の各位置での相対的な不確実性と最大の不確実性が出現する軸を示す。

Rokers et al. は、図 3.57 に示したように、運動刺激をバーチャルにステレオ提示（ヘッドマウントディスプレー）するとともに、別にステレオスコープを用意して提示（この場合にはバーチャル空間は提示しない）して比較した。VR 提示したバーチャル空間（四面は異なるテクスチャで覆う）でその視空間の中央に平面図形（観察距離 90cm あるいは 45cm）を前額平行に提示（図 A）し、その中央に提示した円形の窓状領域のノニウス線を注視させてからバーチャルな白い矩形の対象をステレオ視（図 B）させ、360° ランダムな方向に動く刺激対象（奥行距離に対応して拡大縮小）を被験者に観察させてバーチャルなパドルを

操作してその軌跡が横切ると思われた位置に合わせる（図 C)ように教示した。被験者は

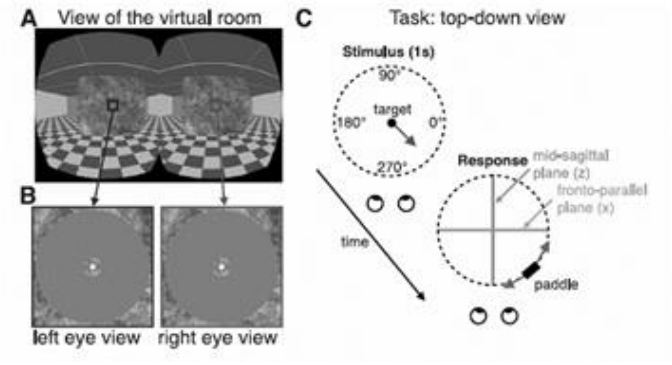

図 3.57　ステレオ提示の運動刺激。(A)VR 提示のバーチャル空間で視空間の中央に平面図形を前額平行に提示、(B)中央に提示する刺激、被験者には円形の窓状領域のノニウス線を注視させバーチャルな白い矩形の対象を観察させる。(C)一定の速度でランダムな方向に動く刺激対象を被験者に観察させバーチャルなパドルを操作してその軌道が横切る位置に合わせるように教示 (Rokers et al.2018)

70 名の学生、また観察距離および明るさコントラスト(100、10、7.5%）を変化させた。対象の奥行手がかりは単眼視手がかり（パースペクティブ）と両眼視差とした。

ベイズの定理にもとづくモデルは、刺激奥行距離が大となるにつれ、また刺激コントラストが小さくなるにつれ、そして刺激の偏心度が大きくなるにつれ運動軌跡の知覚エラーが大となることを予測する。実験結果は、このモデルの予測とよく一致することが示された。この結果から、運動軌跡の知覚は観察者の事前(prior)の仮説およびある時点での感覚信号の理解(posterior)に基づくことが明らかにされた。

19　運動による奥行視の手がかり効果

運動による奥行視における両眼手がかりと単眼手がかりの効果

運動による奥行視の正確さは対象を回避したりあるいは捕まえたりするために必要となる。対象の運動方向（観察者に接近あるいは後退）は両眼手がかりと単眼手がかりでも

たらされ、前者には両眼間の速度差および両眼視差が、後者にはオプティクフロー、網膜上の対象の大きさ変化そして密集度がある。

Thompson et al.(2019)は、両眼視差、単眼視でのオプティクフローおよびその２つの手がかりの組合せを実験条件として設定し、さらに対象の運動に関わる要素の一貫性を操

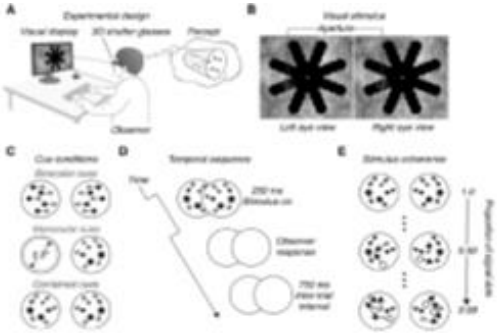

図3.58　実験装置と実験条件。A：観察者はシャッターグラスを装着しディスプレーに直角のシリンダー内を奥行方向に運動するドット刺激を観察。B:ドットは穴状の領域（赤で表示）を各眼に提示され中央の注視点（白点）を注視して観察。C:３通りの手がかり条件である両眼手がかり（各眼で水平に互いに反対方向にドットが運動)、単眼手がかり（一眼にのみドットがフロー)、両眼と単眼の組合せ手がかり（両眼にオプティクフローが提示)。D：刺激の時間提示順序。E：両眼に提示する刺激の運動一致度(coherence)の操作(1.0、0.75、0.50、0.25、0.08の5段階に操作)、黒丸はシグナルドット、白丸はノイズ(Thompson, et al. 2019)。

作して観察者への接近・後退の感度がどのように変わるかをしらべた。図3.58に示したように、実験装置にディスプレイに直角のシリンダー内を奥行方向に運動するドット刺激を提示し被験者はシャッターグラスを装着し観察した(図A)。各眼に提示されるドットは穴状の領域（赤で表示）に提示され、中央の注視点（白点）を注視して被験者に観察させた（図B)。3通りの手がかり条件、すなわち両眼手がかり（各眼で水平方向に互いに反対にドットが運動)、単眼手がかり（刺激する一眼にのみドットを同側視野あるいは反対視野にフロー提示)、両眼と単眼の組合せ手がかり（両眼にオプティクフローが提示）が設定された（図C)。穴状領域の直径は2.5°、提示した刺激角度は45°ステップで22.5°

から 337.5° の範囲内で変化（8 個の視野）させ、またその離心角度は 1.5° ステップで 1.5° から 7.5° の範囲で変化させた。背景にはノイズパターンのテクスチャを設定し、試行毎に変えた。刺激の時間提示順序は 250ms 提示し、被験者の反応を求め、750ms インターバルをとって次に進んだ（図 D)。両眼に提示する刺激の運動一致度(coherence)は 5 段階(1.0、0.75、0.50、0.25、0.08)に設定した（図の E の黒丸はシグナルドット、白丸はノイズを表示)。7 人の被験者にはドットが自分に接近するのか後退するのかをキー操作で応えさせた。

実験の結果から、被験者への接近の反応割合（g (x)）が接近・後退の２つの運動方向と両眼提示の一致度(x)の関数として求めた。次に次式によってガウス関数をもとめた。

ここで、g(x):反応割合、u:被験者のバイアス、λ;反応の精度、ラプス(lapse rate):2%。この計算式から刺激感度（1/σ）が求められ、結果にまとめられた。

$$g(x) = \lambda + (1 - 2\lambda)\frac{1}{2}\left[1 + erf\left(\frac{x - \mu}{\sigma\sqrt{2}}\right)\right],$$

実験の結果、運動の接近・後退の弁別精度は刺激の運動一致度の関数として変化した。そこで、運動刺激に対する感度(1/σ)を計算して 3 通りの実験条件が比較された。第１に両眼手がかり条件の運動による奥行視（接近・後退）ではその手がかりの感度（平均 0.66）は提示した運動刺激の視野の位置によって大きく異なり、これは刺激の離心率と速度に対応することから、神経処理過程に根拠があると示唆された。第２に単眼手がかりも刺激を提示する視野の位置によって手がかり感度が変化し、それに関わるのは刺激と刺激する一眼とが反対側の視野に位置づけられるときにもっとも大きなモーションシグナルになるために運動方向弁別が同側の視野の位置づけ（平均感度:1.03）より高く（平均感度:1.46）なったことである。第３に単眼手がかり感度は両眼手がかり感度より優れていて、しかも独立していることである。第４に両眼手がかりと単眼手がかりをミックスさせた条件での感度は 1.40 となり、それぞれが単独の手がかり条件より運動による奥行視の手がかりとしては効果をもつ。第５に単眼手がかりにおける反対視野のオプティクフローは単眼と両眼のミックスした条件で運動方向を弁別するための強力な手がかりと考えられる。

3次元運動知覚の処理過程における眼球に特定された運動シグナルの役割

3次元空間を動く対象は左右各眼に異なる速度が入力されることで3次元運動に知覚される。対象の一部がオクルードされている場合、この両眼間の異なる速度の手がかりを利用するためには対象のリアルな3次元（3D）モーションを必要とする。単眼あるいは特定の眼への異なる速度差シグナルから対象の動きは計算されるし、さらに受容野の大きさを超えた各眼の2つの2次元の運動方向の差からも対象の動き(global pattern motion)を計算できる。

Joo et al.(2019)は、多数のガボール要素の小片からなる刺激を提示し3Dの運動残効(MAEs)を測ることによって眼球に特定(eye-specific)の速度シグナルがどのように眼球間で統合され、3Dの方向の知覚が成立するかを明らかにしようと試みた。とくに、3D運動の処理過程が前額に平行な2D運動に依存するメカニズムによるのか、あるいは3D運動の計算のための眼球に特定された処理過程でローカルな2D運動シグナルの統合メカニズムによるのかが検証された。そのために、第1に、V1に比較して比較的大きな受容野に選択的なMT領野における3D運動の強力な処理過程(Sanada & DeAngelis, 2014; Rokers,Cormack, & Huk, 2009)に基づく3D運動の処理は、空間的にグローバル、すなわち順応刺激とテスト刺激間の正確な空間的一致に関係なく方向に関して選択的な順応効果があると考えられる。そこで、順応ーテストパラダイムの実験手続きに依拠して方向性をもつガボールパッチの小片を用いてテストパターンの位置づけが順応パターンのそれと不一致のときに強い運動残効が生起するかを試した。さらに、運動の処理過程の次の段階で、眼球に特定された速度シグナル(eye-specific velocity signal)が3D方向に選択的に結合しているかを、グローバルなパターン運動となるランダムな方向性があり、その速度が同一に限定されたガボールパッチから構成された疑似プレード(pseudplaid)刺激を用いて同様に運動残効を試みた。この場合、眼球に特定された速度シグナルが両眼結合の領野に連絡していれば(V1)、3Dの運動は局所的な空間速度の両眼間比較で求められることになり、一致した3Dの方向が得られないためにその方向の情報は失われると予想される。反対に、眼球に特定された速度シグナルがパターンの運動の知覚時あるいは知覚後に存在すれば、3Dの方向知覚は眼球に特定されたパターン運動からグローバルに復元できると予想される。したがってこの実験では、眼に特定された運動のシグナルが静的ステ

レオ視の後の処理段階でグローバルに処理されるか否かを運動ー残効パラダイムで確か

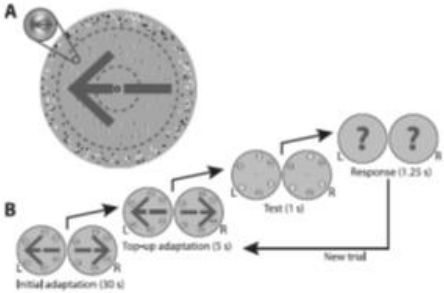

図 3.59 実験に使用した左右眼への刺激パターンと順応手続き。(A) 単眼提示パターン例でガボールパッチのグローバルな運動方向（矢印）、パターンの周囲には環状に縁を設けた（点線矢印）、ガボールエレメントとその運動方向が拡大して図示。(B) 順応手続き、最初の順応 30 秒、続いて top-up 順応 5 秒、テストパターン 1 秒、最後に被験者に反応を求める（1.5 秒）(Joo et al.2019)。

めることが目的となる。

図 3.59 には、実験に使用した左・右眼への刺激パターンと順応ーテストパラダイムを示した。図(A)は単眼提示パターン例でガボールパッチのグローバルな運動方向（矢印）と、パターンの周囲に設けた環状の縁（点線矢印）を、さらにガボールエレメントとその運動方向を拡大図示した。ガボールパッチは 60 個（実験 1 と 2）あるいは 20 個（実験 3）とし、ランダムに空間配置した。各ガボールパッチは 0.15° の標準偏差（SD）のガウス包絡線をもち、各ガボールパッチの直径が 0.15° で± 3SD、35%のコントラスト、空間周波数 2c/° とし、0.5° /s でドリフトさせた。ガボールパッチ間の最小距離は 1° あるいは２° とし、また各ガボールパッチの中心位置はグルーピングを避けるために振動させた。１眼への各ガボールエレメントのスタート位置はランダムとし、それの他眼への対応する要素はその方向を多義的するために位相を逆転とした。有効視差は 1.48° でパヌムの融合域より拡大して提示した。3 次元条件での順応では、左右眼で相反する方向の運動刺激

を提示し、接近あるいは後退のパターンを持続観察させた（図のB)。運動の強度（コヒーレンス）は左右眼へ提示するガボールパッチの運動方向を同一（2D順応条件)、反対（3D順応条件）で決められた。ノイズ刺激は同一の時間周期の逆位相とした。ゼロ・コヒーレンスではすべてのグレーティングをフリッカーさせた。図の B には順応手続きを示した。最初の順応を30秒、続いて再度の（top-up）順応を5秒、テストパターンを1秒、最後に被験者に反応を求めた（1.5秒)。4名の被験者にミラー型のステレオスコープを各眼で観察させ、そのディスプレーの中央のノニウスラインを注視するように教示、テストではターゲットの運動方向（左・右あるいは前・後）をマウスのクリックで示すように求めた。順応刺激とテスト刺激による実験条件のデザインは表3.1にまとめた（表中の記号、X：2次元（前額平行）運動、Z：3次元運動、Correlate：刺激要素が左右眼で相互に関連（同一の位置)、Pseudoplaid：要素の方向がランダムで固有なグローバルモーションの方向を生み出すための拘束条件によって決められた同一のドリフト速度、＝Adapter：順応刺激と同一の位置のエレメントをもつテスト刺激)。

実験の結果、順応とテスト刺激が共に2Dの前額平行運動の場合の順応効果は、ガボールエレメントが順応とテスト刺激が共に同一の配置条件で強い順応効果(MAEs)があり、逆

表 3.1　順応刺激とテスト刺激による実験デザイン。X：2 次元（前額平行）運動、Z：3 次元運動、Correlate：刺激要素が左右眼で相互に関連（同一の位置）、Pseudoplaid：要素の方向がランダムで、固有なグローバルモーションの方向を生み出すための拘束条件によって決められるフェーズードリフト速度、Adapter：順応刺激と同一の位置のエレメントをもつテスト刺激エレメント）(Joo et al.2019)。

		Adapting Stimuli			Test Stimuli		
		Direction	Correlated	Pseudoplaid	Direction	Correlated	= Adapter
Experiment # 1	Condition A	X	Yes	No	X	Yes	Yes
	Condition B		Yes	No		Yes	No
2	Condition A	Z	Yes	No	Z	Yes	Yes
	Condition B			No			No
3	Condition A	Z	No	No	Z	Yes	No
	Condition B	Z		Yes	Z		No

に順応とテスト刺激の配置が異なる条件では順応効果は非常に弱いことが示された。この結果は、2Dの運動の順応がローカルな刺激によって本来的に出現することを示した。次に、各眼に位置は同じで運動方向が相反するガボールパッチの提示による3Dの奥行運動における順応効果をみると、テスト刺激のガボールパッチ位置が順応刺激と同位置条件で強い順応効果が示された。これは3Dの方向に選択的な順応が存在することを示した。とくに、テスト刺激のガボールパッチ位置が順応刺激と異なる場合にも、両刺激が一致する条件よりも効果が小さいものの明瞭な順応が示され、3Dの方向に選択的な順応の存在を裏付けた。

これらの結果は、2Dの運動処理過程がローカルであり、3Dのそれはグローバルであることを示唆する。さらに、3Dの運動メカニズムがグローバルに運動シグナルを統合するかをみるために、左右眼に対応のない順応刺激を用い、順応刺激のパッチのロケーションが一致しないテスト刺激に対する順応をみたところ、両眼間で対応がない順応刺激に対して順応効果が示された。さらに、順応刺激のパッチの運動方向が左右眼でランダムとししかも同一の速度条件(pseudplaid)での順応を、順応刺激とテスト刺激間のパッチのロケーションが一致しないテスト刺激でみたところ、順応刺激が両眼で分離しているにもかかわらず順応効果が示された。これは、眼球に特定な2Dパターンの運動情報が3D運動を計算するための次の処理段階のために保存されていたことが示唆される。

以上の実験結果は、眼球に特定なローカルな運動シグナルをグローバルに共有化することによって3次元運動が計算され、そのために各眼球に起源のある運動情報が保持されると考えられる。

20　運動による3次元視の研究課題

3次元物体の運動による錯覚的輪郭の生成

運動に誘導された輪郭の生成は、観察者側に傾斜した輪郭で構成された立方体を回転してKlymenko & Weisstein(1980)によってはじめて報告された。図3.60に示すように、運動による錯覚的輪郭(motion induced contour、MIC)は、輪郭線の垂直エッジが存在しない傾斜させた立方体を中心の回転軸にそって反時計方向に回転させると錯覚的輪郭

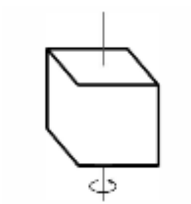

図 3.60　2 次元立方体で中心回転軸にそって反時計方向に回転させると錯覚的輪郭(illusionary contour)が生じる(Erlikhman et al.2019)

(illusionary contour)が生じるという錯覚である。また、MIC 効果は、図 3.61 に示すように、一対の山型パターンのような単純化した刺激パターンでも奥行回転によって生起する。

この種の錯覚は運動による奥行効果（kinetic depth effect）と類似点がある。運動による奥行効果とは平面的に見えるがしかし実際は物理的に 3 次元の対象を奥行方向に回転させるとそこに立体を知覚させる現象である。運動による錯覚的輪郭（MIC）は 3 次元構造をもつが実際は 2 次元の図形を奥行方向に回転させて生起させる。この両現象は横方向、前額平行に動かしあるいは回転させたときには錯覚は生ぜず、奥行方向に回転させたときに生じる点で類似する。MIC では、存在しないエッジが対象の回転にともなって生じる点で運動による奥行（キネティックデプス）とは異なる。

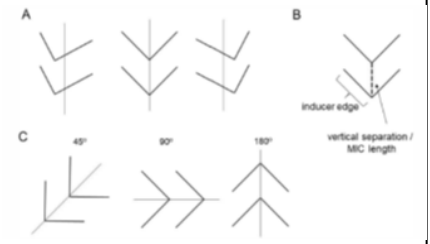

図3.61　運動による錯覚的輪郭（motion induced contour MIC）効果のための刺激パターン。　A:立方体の一対の山形エッジの３種類で傾いた軸（赤線表示）を中心にして回転させるとMICが２つの山形エッジの頂点間に生起、B:誘導エッジ(inducer edge)の長さ、および２つの山形エッジ間の距離（赤色点線表示）、C:角度を違えた一対の山形エッジで回転軸も異なる（Erlikhman et al.2019)。

Kellman,et(2005a,b)によれば、MIC は最初に 3 次元構造を復元し、次いでその構造からエッジの方向と位置からエッジ間の輪郭を視覚システムが外挿すると考えられた。Kellman & Shipley(1991)は、エッジを各眼に別々に入力した場合、エッジが 3 次元にスムースに単一なカーブを描いて回転するならば各眼の網膜に投影されたエッジが不完全な配置でも錯覚的輪郭は生起することを、また網

膜に投影されたエッジが正しい配置でも回転したときそれらが 3 次元構造上で関連していなければ錯覚的輪郭は生起しないことを示した。これは視覚システムが最初に 3 次元構造を復元し、次いで錯覚的輪郭を形成することを示唆する。

Erlikhman et al.(2019)は、輝度輪郭をもつ 3 次元構造が復元された後で錯覚的輪郭の生起の強さにどのような特徴が影響するかをしらべた。とくに錯覚的輪郭の生起に関係する 2 次元の特徴、たとえば眼に視えないエッジ間の距離比、あるいは平面図形の 3 次元視に関わる L 構造や T 構造などである。実験 1 では、図 3.61 に示した刺激系列はエッジの長さ、刺激間の分離距離、刺激の方向が MIC 効果に与える刺激条件がしらべられた。図の A には、3 種類の立方体の一対の山型エッジで、傾斜軸（赤線表示）に関して垂直あるいは左・右に 20°傾けて提示し、傾斜軸を中心にフレームあたり 1°、20°まで 1 秒あたり 60°の速度で左右に反転して回転させ、2 つの山型エッジの頂点間に生起する MIC 効果の強さをしらべる事態を示した。図 B には誘導エッジ(inducer edge)の 3 次元長さ（推定 0.56°、1.19°、1.79°、2.54°）、および 2 つの山型エッジ間の 3 次元距離（赤色点線表示、推定 1.52°、2.54°、3.55°）の MIC 効果をしらべる事態を、そして図 C には角度を違えた一対の山型エッジで Z 軸の回転を変えたとき（0°、45°、90°、180°）の MIC 効果をしらべる事態をそれぞれ示した（刺激全体が 0°と 180°回転では垂直の MIC 効果が、45°回転では斜めの MIC 効果が、90°回転では水平の MIC 効果が生起)。実験では、被験者 32 人の学生に、図 12 に提示した線図形の立方体（前面の垂直エッジを除いた線図形による立方体で垂直の分離距離 2.54°、エッジの長さ 1.19°、傾斜角 20°）による MIC 効果およびこの立方体の各頂点に小円を付加し MIC 効果をゼロにした刺激パターンをそれぞれアニメーションで同時に提示し、当該の実験パターンの MIC 効果がどの程度かを 7 段階スケールで答えさせた。

その結果、エッジの分離距離が大になると MIC 効果は減じ、その長さが大になると増大し、また刺激パターンが 90°方向（水平方向）を除いて MIC 効果には差が生じなかった。また、サポート比率(support ratio、「輝度で規定された線分の長さ(real)」/「real＋錯覚を起こす線分の長さ(real + illusory))を計算すると、MIC の強度はサポート比率が 0.6 になるまでは増大し、以降は平準化した。

次に、もし視覚システムがはじめに山型の刺激パターンの 3 次元構造を復元し、この情

報に基づいてMIC効果を外挿して出現させるならば、奥行距離を推測して用いていると考えられる。そこで山型の刺激間の2次元距離と3次元距離を変えてMIC効果がどのようになるかをしらべた。図3.62に示したように、2次元あるいは3次元の山型エッジ間の分離距離を一定に保持した条件でのMIC効果をしらべるために、左端と中央の図のように2次元分離距離を一定にして3次元のそれを変化させた条件を、また中央と右端の図のように3次元分離距離を一定とし全刺激を傾斜させるに伴い2次元のそれを小さくした条件を設定した。3次元の分離距離を7.60°一定とし、2次元の分離距離を2.54°、3.80°、5.07°、5.70°、6.33°、6.97°の6通りに変化した。この場合の刺激パターンの傾き(tilt)は70.53°、60°、48.19°、41.41°、33.56°、23.56°となる（ここで0°は刺激パターンが垂直となる)。また、エッジの長さは2.54°、3.80°、5.07°に変化させた。また2次元距離を5.07°を一定とし、3次元距離を5.70°、6.33°、6.97°、7.60°8.86°、10.12°の6通りに変化した。刺激パターンの傾きは27.27°、36.87°、43.44°、48.19°、55.15°、60°である。2つの刺激の2次元分離距離は網膜上の距離、3次元のそれは刺激が傾いていない場合の推測した高さをいう。被験者は14名の学生で、実験1と同様な方法でMICの強さを評定した。その結果、実験1の結果と同様に、3次元分離距離が大きくなるとMIC効果は減じた。また、3次元分離距離が一定で2次元分離距離が大きくなってもMIC効果は減じた。そこで、MIC効果の要因を求めるために、2つの山型刺激間の2次元(3次元距離は一定)と3次元の分離距離（2次元距離は一定）が変わるときの傾斜角度(tilt angle)を求め、この傾斜角度に伴うMIC効果を算出すると、傾斜角度が増大すると2次元と3次元距離条件ともMIC効

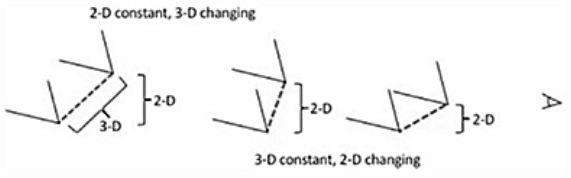

図3.62　2次元あるいは3次元の山形エッジの分離距離を維持した条件でのMIC効果。左端と中央の図では2次元分離距離を一定にし、3次元のそれを変化、中央と右端の図では3次元分離距離を一定、全刺激を傾斜させるに伴い2次元のそれを小さくした(Erlikhman et al.2019)。

果が減じた。これは、MIC 効果に影響する２つの競合する要因、すなわち傾斜角度要因と 2 次元分離距離要因が関係することを示唆する。刺激パターンが回転して提示されると、視覚システムは、まず２つの山型パターン間の３次元関係を復元し、次いでMIC の強度を２次元分離距離と３次元分離距離に基づいて決まると考えられる。

では、傾斜角度が３次元距離（奥行）の知覚にどのように影響するのか。その一つの可能性として、傾斜角度を大きくすると奥行の通過にともなう山型刺激の受ける運動量が減じることにある。もし傾斜のない垂直に提示された立方体が垂直軸を中心として回転すれば、その角の運動軌跡の直径は立方体の直径となり、立方体の頂点の最近点と最遠点の間で距離が最大となる。もし立方体が観察者側に傾斜していると回転軸は観察者側に傾斜するので、その運動軌跡での立方体の頂点の最近点と最遠点の間で距離（D1）はより短くなる。D1 は次式で規定される。

$$D_1 - \frac{L}{\sqrt{2}}\cos\theta,$$

ここで、L：立方体の再度の長さ、θ：立方体の傾斜角度、 ：立方体の直径の半分の長さでその頂点の運動円の半径、をそれぞれ指す。回転軸が垂直の場合の立方体の頂点の最近点と最遠点の間で距離（D2）は次式であらわされる。

$$D_2 - \frac{L}{\sqrt{2}}\sin\theta$$

これらの関係が図 3.63 に示されている。左図形は回転軸（赤色実線）が傾斜、右図形は垂直（ｙ軸）、黒色点線による楕円は頂点の回転軌跡、Ｄ１と D2 の長さは観察者（左端）からのもっとも近い点と遠い点の間の頂点Ｖの回転軌跡の奥行の距離を表す。これらの式と図から両式を比較すると、回転傾斜軸θが大きくなるとＤ１が減じ、垂直に近づくと D2 は大きくなるという関係にあり、MIC 効果は奥行方向の回転運動量で規定され、それが大となると、増大すると予測される。実験ではエッジ間の分離距離（3 次元に関して視角 1.52°、2.54°、3.55°）と対象の傾斜角度（観察者に向かってｘ軸に関して 20°、40°、60°）が操作された。回転軸は常に垂直軸である。38 人の被験者（学生）に各実験条件

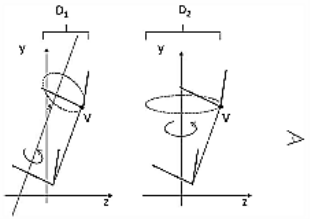

図3.63　山形エッジ(V)の2通りの回転軸（傾斜あるいは垂直）による3次元運動。左図形は回転軸（赤色実線）が傾斜、右図形は垂直（ｙ軸）、黒色点線による楕円は頂点の回転軌跡、D1とD2の長さは観察者（左端）からのもっとも近い点と遠い点の間の頂点Vの回転軌跡の奥行の距離を表す(Erlikhman et al.2019)。

で MIC 効果の評定を求めた。その結果、MIC 効果の強さは刺激の傾斜角度が大になると減じることが示された。これは、MIC 効果が山型刺激の頂点が奥行方向に運動する距離によるのではなく、傾斜角度が大になると知覚された奥行が小さくなることによると考えられる。

そこで、もし MIC 効果が 3 次元構造の復元に支配されているなら回転角度を大にして 3 次元構造を妨げるならば山型刺激の頂点間距離はMIC 効果に関係しないと予想される。実験刺激は山型とし、その3次元分離距離（1.57°、2.62°、3.67°、4.71°、5.76°）と傾斜角度（10°、20°、30°、40°、60°）を独立に変えた。被験者は19人の学生でMIC 効果について同じように評定させた。その結果、傾斜角度 60°条件を除いて、すべての傾斜角度条件で山型刺激の 3 次元の頂点距離が大になるとMIC 効果は減じた。これは傾斜角度が極端に大になると3次元構造を復元できなくなり、次に出現するMIC 効果に影響する分離距離要因は関係しないと考えられる。

これらの結果から、MIC 効果の強さは2次元の刺激分離距離よりむしろ3次元のそれによって予測できる。したがって、3次元視覚過程でエッジ間の輪郭の方向と位置からなる3次元構造を復元し、これらエッジ間を外挿することでMIC 効果を出現させると考えられる。

21　運動による3次元視の生理神経学的処理過程

運動要因による形状知覚におよぼす運動速度、発達年齢そして弱視の影響

ニューロ・イメージングによる研究、知覚は背側径路がそれぞれ関与し、また運動要因

による形状知覚はこれらの両方の径路が関与していることが明らかにされている(Hotson & Anand, 1999; Malach et al. 1995; Orban et al. 1995; Schoenfeld et al. 2003; Regan et al. 1992)。運動視は２から４週齢で可能となり、就学年齢である７歳齢で成人のレベルに達する。運動に規定された形状知覚は、形状を知覚できる最小の速度閾値でしらべると 7 歳齢までに、また形状知覚を可能にする運動要因の共起度の最小閾値(coherent threshold、運動要因によって形状が共起する境目の値)でしらべると 10 あるいは 15 歳齢までに可能となる。

Hayward et al.(2011)は、運動に規定された形状知覚の発達的経過を、形状を出現させる要因の運動速度との関係でしらべ、さらに弱視にみられる運動に規定された形状知覚の障害がどのようにして生じるかを実験的にしらべた。健常被験者は４-６歳齢 22 名、7-10 歳齢 15 名、11-17 歳齢 15 名、18-31 歳齢 16 名、弱視被験者（健常眼に対するオクルージョン治療をうけ、弱視眼もほぼ正常な視力を回復している者）は 12 名で 7-25 歳齢であった。運動要因に規定された形状（長方形）は、図 3.42 に示したように、点線で囲まれた枠内のドットは常に同方向に、その枠の直近の外のドットは枠内のそれとは反対方向に、そしてこれ以外の周囲のドットはランダムな方向に運動させることで提示した。ドットの速度を、「遅い」、「中程度」、「速い」の 3 段階(0.1、0.9、5.0 deg/s)に操作、また長方形の枠内のドットの運動方向を垂直あるいは水平方向とした。これを被験者には単眼視観察させ、長方形の方向が水平あるいは垂直のいずれに視えるかを答えさせた。

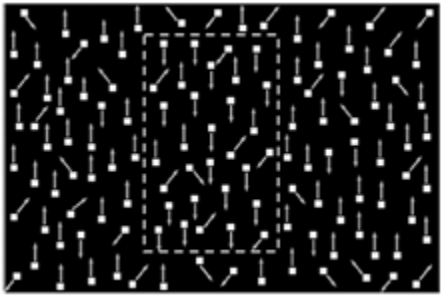

図 3.64　運動するドットによって出現させた長方形。点線で囲まれた枠内のドットはつねに同方向に、その枠の直近の外のドットは枠内のそれとは反対方向に、そしてこれ以外の周囲のドットはランダムな方向に運動する(Hayward et al.2011)

実験の結果、(1)ドット速度と発達年齢間には有意な相互作用があ

り、とくにドット速度が遅い場合には成人のレベルの運動に規定された形状知覚に到達するには7歳齢であるが、しかし中程度および高速度のドット速度では年齢間にほとんど差はないこと、(2)弱視被験者はドット速度が遅い条件で運動要因による形状知覚が弱視眼ならびに健常眼である他眼ともに困難であること（これは両眼視能力にも障害を持つこと示す)、などが示された。これらのことから、運動要因による形状知覚の発達にはドットの運動速度が関与し、ドット速度が速い場合には4歳齢以前に、遅い場合には6歳以降に運動要因による形状知覚が可能となること、また、弱視者の場合ドット速度が遅い条件での運動要因による形状知覚能力は4から6歳齢の健常児と同等であることが、明らかにされている。さらに、片眼弱視の主たる治療は、健常眼を遮蔽し、弱視眼の視力を回復させることであるが、正常視力を回復しても運動による形状知覚の障害は残存していると考えられる。

オプティクフローとモーションコントラストに応答する皮質の反応

運動刺激のなかでオプティク・フローは観察者の運動の手がかりとなり、モーションコントラストは対象探知の手がかりとなる。オプティク・フローは、図3.65の1.1にあるように、観察者が奥行方向に運動するときの放射状の拡大パターン(radial expansion)が主となるもので、これに横方向の前進流動パターン(foward translation)や頭部や眼球の回転させたときの回転パターン(rotation)やリニアーなパターン(linear translation)が加わる。対象の探知の場合には、図の 1.2 のようなモーションコントラスト(motion contrast)、すなわち流動パターンの部分的方向速度（運動視差に相当）の違いが観察者に対象を背景からの分擬させる。運動視差に帰因するものに運動方向のコントラスト(direction contrast)もある。これは、注視点より手前にある対象は観察者とは反対方向に、遠くにある対象は同方向に動くことを手がかりとする。

一方で、運動の方向を検出するニューロンはサル類の V1 で発見され((Hubel & Wiesel,1968)、またより広い範囲の運動パターンは V1 より高次の視覚野で発見された。さらにマカク類の中側頭野の V5、人間ではhMT 野には運動を統合する領域および対象を局所的に分擬する機能があることがつきとめられている(Born & Bradley, 2005; Britten et al.,1992;Newsome & Pare, 1988,Born & Tootell, 1992; Born et al., 2000; Likova

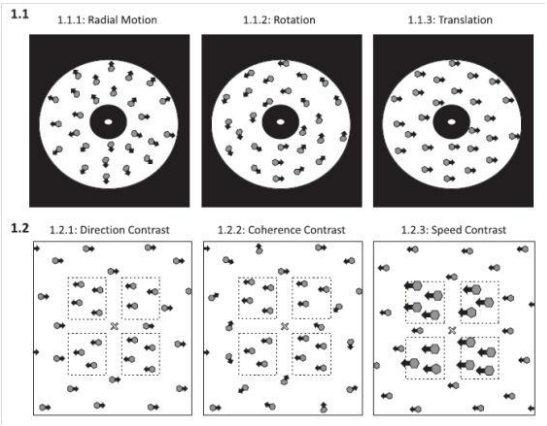

図3.65　オプティクフローとモーションコントラスト。

1.1.1：放射状の流動パターン、1.1.2：回転流動パターン、1.1.3：横方向流動パターン、1.2.1：反対運動方向流動パターン、1.2.2：整合的流動パターン、1.2.3：速度の異なる流動パターン(Fesi, et al. 2014)

& Tyler, 2008; Marcar et al., 1995; Pack, Gartland, & Born, 2004)。また、最近の fMRI を用いた研究では、さまざまなタ　イプのグローバルパターンがV6　MST、後帯状皮質を活性化させることも示された(Cardin & Smith, 2010; Cardin et al. 2012,Fischer et al.2012)。さらに、人間の児童と成人の運動パターンに対する視覚領の反応を定常状態視覚誘発電位(SSVEP、定常的な刺激を与えることで大脳皮質視覚野に生じる視覚誘発電位) で測定したところ、児童は速い速度の運動パターンと方向が互いに反対の運動パターンに強く応答することが示され、一方、成人はゆっくりした速度の運動パターンとラジアルな方向の運動パターンに強く応答した(Hou et al.2009,Kiorpes & Movshon, 2004,Hadad,Maurer, & Lewis, 2010, Gilmore et al.2007)。これらの研究から、運動パターンと運動速度は密接に関係していると考えられる。

そこで、Fesi et al.(2014)は、オプティクフローとモーションコントラストの両条件で運動パターンと運動速度が運動視に与える効果を成人を対象にして定常状態視覚誘発電位で測定した。実験は、図 3.66 に示したパラダイムで実施された。オプティクフロー(図の 1.3) 条件では、はじめに同一方向へのドットモーション(coherent phase)を提示(t1)、次にランダムな方向へのドットモーション(incoherent pahase)を提示(t2)、さらにこれをドットの運動方向を逆にして反復提示(t3)、最後にランダムな方向へのドットモ

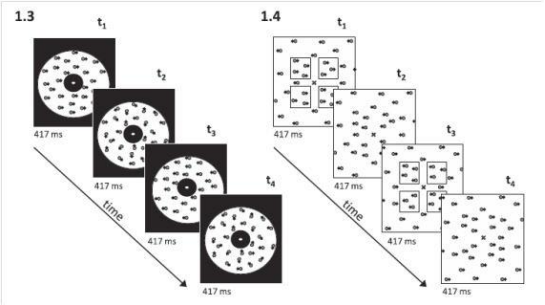

図 3.66　オプティクフローとモーションコントラストの実験パラダイム。オプティクフロー(1.3) 条件では、はじめに同一方向へのドットモーション(coherent phase)を提示(t1)、次にランダムな方向へのドットモーション(incoherent pahase)を提示(t2)し、さらにこれをドットの運動方向を逆にして反復提示(t3)、最後にランダムな方向へのドットモーション(t4)を提示する。モーションコントラスト条件(1.4)では、４つの小矩形を提示しそのドットの運動方向は周囲と反対方向にして提示(t1)、つぎに小矩形を除去し、ドットをすべて同一方向に運動させて提示(t2)、さらに小矩形を提示し、t1 とは周囲と小矩形の運動方向をそれぞれ逆転提示(t3)、最後に小矩形を除去しドットを t2 とは逆方向に運動提示する(Fesi, et al. 2014)

ーション(t4)を提示した。モーションコントラスト条件(図の 1.4)では、４つの小矩形 (横列２、縦列に２) を提示しそのドットの運動方向を周囲領域とは反対方向にして提示(t1)、つぎに小矩形を除去しドットをすべて同一方向に運動させて提示(t2)、さらに小矩形を提示し t1 とは周囲と小矩形の運動方向をそれぞれ逆転して提示(t3)、最後に小矩形を除去しドットを t2 とは逆方向に運動提示する。ドット運動の速度はドットモーション条件では1、2、4、8、10、16 deg/s に、モーションコントラスト条件ではドットモーション(t4)を提示する。モーションコントラスト条件でのドット運動速度は2.1、4.2、16.2 deg/s にそれぞれ設定された。ディスプレー上のドット位置は24Hz で書き換えられた。したがって、オプティクフロー条件では、ドットパターンが３種類、速度が６段階に変化、またモーションコントラスト条件では運動方向 (相互に同方向あるいは異方向)、コヒーレンス

（規則的あるいはランダム）、運動速度（3 段階）に操作された。ディスプレー上にこのキネマトグラムを提示し、その間の定常状態資格誘発電位が被験者の後頭野から測定された。

その結果、(1)コヒーレントなラジアルモーションは、もっとも強い誘発電位を起こすこと、(2)ドット運動パターンとドット速度には強い関係があり、とくにドット運動速度が2deg/s のラジアル運動パターンで側頭野の誘発電位はもっとも顕著なこと、(3)8 deg/s と 16 deg/s では運動パターンの種類に関わらずに背側正中の後頭野からの誘発電位が起きること、(4)モーションコントラスト条件ではドットのコヒーレンスと運動方向による違いは誘発電位の反応プロフィールやその分布にはあらわれないこと、などが示された。

これらのことから、観察者自身の運動および観察者の運動に伴う視野内の対象の運動は皮質内では同一の回路を活性化させ、しかもこの活動は観察者自身の運動と対象運動にまたがるばかりでなく、各運動のパターン（ラジアルかローテーションかトランスレーション）および各運動速度にもまたがっている。

自己運動知覚に関わる MSTDd 領域の拡大・縮小のオプティクフローの細胞間の周期的相互作用

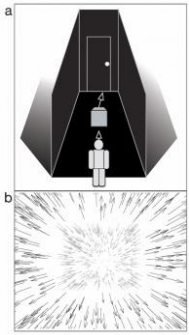

図 3.67 (a)観察者は自分より速く後退する物体を前にして移動する事態、(b)このときのオプティクフローで、静止した周囲からの放射状に拡大フロー（黒矢印）と後退する物体からの縮小フロー（灰色矢印）(Layton & Fajen 2017)。

背側視覚路の後半にあるMST野（medial superior temporal area）の背側部（MSTd 野）の神経細胞は、視野の一点を中心に放射状に拡大あるいは収束していく動きや、視野の一点を中心に回転する動きに反応する(Duffy & Wurtz, 1991a、1991b、1995 ;Saito et al. 1986 ;Tanaka et al. 1986)。また同様な神経細胞の反応は、サル(monkey)でも見いだされている(Gu,Y., DeAngelis,G.C.

& Angelaki, D.E.2012)。放射状に拡大と収縮するパターンに反応する神経細胞の間に相

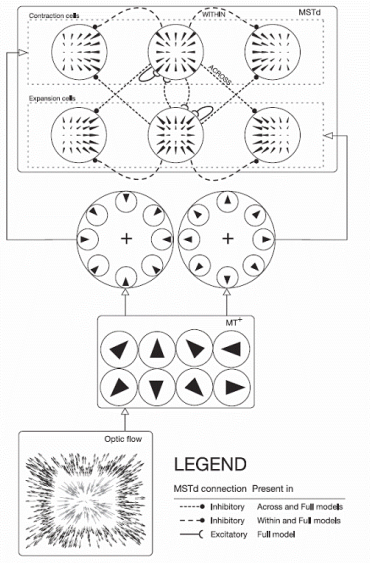

図3.68　MT＋／MSTdのニューラルモデル。MT＋は受容野内のオプティクフローの運動方向に同期するユニットで、その信号をMSTdに送る。ここは、放射状の拡大と縮小に同期および観察者の前進と後退に特異的に同期するユニットでその出力値は中央加重(center-weighted unit)で決められ、MT＋からの信号を受ける。観察者の前進によるフローと眼前の対象の後退によるフローとを識別するためにon-center／off-surroundの直接的結合(recurrent connection)を３通りに変えたMSTdモデルが作成された。no-interactionモデルのユニットは、受容野のボトムアップされるフロー信号を統合するが、MSTdへは連絡していない。一方、interaction-onlyモデルは同一の放射状運動にのみ同期する直接的結合がMSTd内にある（拡大ユニットは他の拡大ユニットのみを側抑制、同様に収縮ユニットは他の収縮ユニットのみを抑制）。across-interaction-only モデルは、異なるタイプの放射運動に同期する直接的結合がMSTd内にある（拡散ユニットは収縮ユニットを側抑制、あるいはその逆も行う）。full-interactionモデルは、両方の直接的結合をもつ(Layton & Fajen 2017)。

互作用があれば、観察者は自分が前進しているか後退しているかを見分けられる。

もし、図3.67のように、観察者が自分より速く後退する物体を前にして前進するとき、静止した周囲からの放射状拡大オプティクフロー(黒矢印) と後退する物体からの縮小オプティクフロー (灰色矢印) とは視覚コンフリクトの関係になる。これは観察者が後退し目の前の対象が前進しても同様となる。このような拡大と縮小のオプティクフローはMSTd野での神経細胞の活性化を考えると、対象の後退は観察者の前進と一致しない曖昧な事態をもたらす。このような事態では、MSTdの個々の神経細胞の反応は、観察者の拡散的動きあるいは対象の収縮的動きのいずれかにのみ選択的なのか(no-interaction 仮説)、あるいはその間に相互的な働き(interaction仮説)があるのかを明らかにする必要がある。

Layton & Fajen(2017)は、MSTdの神経細胞間の拡大と縮小オプティクフローのコンピュータモデル (図3.68) を構築し、それを知覚心理実験で検証することを試みた。構築したニューラルモデルは、MT+ユニットとMSTdユニットからなる。MT+はオプティクフローに同期する受容野ユニットで、その信号をMSTdに送る。MSTdは、放射状の拡大と縮小に同期するとともに観察者の前進と後退にも特異的に同期し、その出力値は中央加重(center-weighted unit)で決められ、MT+からの信号を受ける。観察者の前進によるフローと眼前の対象の後退によるフローとを識別するために「on-center／off-surround」の回帰的結合 (recurrent connection)を4通りに変えたMSTdが次のようにモデル化された。「no-interactionモデル」は、拡散ユニットと収縮ユ

表3.2 MSTdモデルのシミュレーションのためのパラメータと数値 (Layton & Fajen 2017)

Parameter	Value	Description
D	24	Number of MT^+ directions
d	0.05	Tuning width of MSTd receptive field center-weighting (3° SD)
σ_I	3	Extent of MSTd on-center pooling of similar template match signals
Γ_I	0.025	Threshold for weak template match signals (suppression of matches less than 2.5%)
γ	0.003	Value at which MSTd feedback signal sigmoid attains one-half its maximum
Γ	0.001	MSTd unit firing threshold
σ_t	10	Standard deviation of across-template-type competition kernel
σ_s	10	Standard deviation of within-template-type spatial competition kernel

ニットはユニット内であるいはそれらの間でも連絡していない。「within-interaction-only モデル」は、ユニット内では拡散と収縮ユニットは相互作用するがユニット間ではしない（拡大ユニットは他の拡大ユニットのみを側抑制、同様に収縮ユニットは他の収縮ユニットのみを抑制）。「across-interaction-only モデル」は、異なるタイプの放射運動に同期する回帰的結合が MST d 内にある場合は拡散ユニットが収縮ユニットを側抑制、あるいはその逆も行う。「full-interaction モデル」は、両方の直接的結合をもつと仮定された。

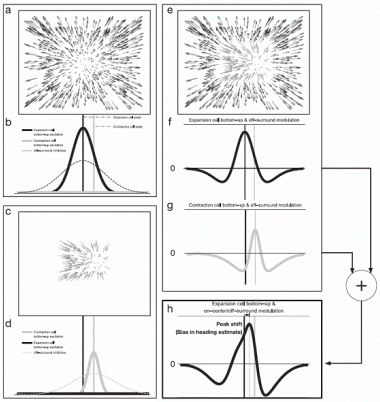

図 3.69　後退する対象を面前にもつオプティクフローからの MSTd モデルによる自己運動ヘッディング方向（自己運動）の予測。視野の中央（0°）に前進する自己運動によって放射状の拡張パターン(a)は拡張セル(expansion cells)を最大に活性化する(b:太い黒色のカーブで表示)。一方、後退する対象による縮小パターン(c)は観察者が静止している場合は最大の縮小セルを活性化する(d:太い灰色のカーブで表示)。前進する観察者が後退する対象を伴う場合、それによる拡張と後退パターン(e)によるそれぞれのセルの活性化は、「no-interaction」モデルでは、ｂとｄに表示した曲線に近似し、したがって後退対象は自己運動のヘッドディングに影響しないと予測される。MSTd モデルで「full-interaction」を仮定すると、拡張と縮小の活性度はそれぞれの側抑制（b と d の点線で表示）の影響（f と g）を加算的に受け(h)、自己運動のヘッドディングを偏向(bias)させ、ヘッドディングの知覚する方向を変えると予測する（Layton & Fajen 2017）。

これら 2 つのユニットは、19 通りの数式を仮定し、表 3.2 に示したパラメータと数値を仮定してシミュレートされた。これに基づきユニットの回帰的結合が異なる 4 通りの MSTd モデル（前述）が作成され、シミュレーションを実行してその妥当性が検討された。図 3.69 に示したように、自己運動のオプティクフローは、視野の中央（0°）で前進する自己運

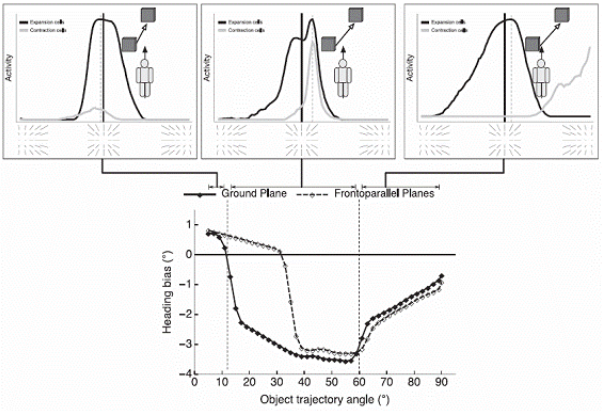

図 3.70「full-interaction」モデルにおける自己運動の知覚されるヘディング方向(bias)の変化。ここでは観察者は床面を直進（黒色線表示）するか、あるいはある運動軌跡で後退する対象によって生じる 2 つの前額平行な面（破線表示）の方へ動く。この場合、後退対象は観察者の頭部方向の左からスタートし、右方向に動いて、観察者の最終位置の近くで終了する。対象の後退運動の軌跡が異なると（上段グラフの左端から右端）、対象の運動軌道角度（object trajectory angle）に対する拡張セル（黒色表示）と縮小セル（灰色表示）の活性パターンは上段のグラフ（垂直線は観察者のヘッディング、x 軸は前進から後退パターンの間のいずれかに同期するセルの偏向の程度、y 軸はそのセルの反応程度）に示されたように変化する。図の下段のグラフには、観察者が床面に対して直進する場合（黒色線表示）と後退対象による 2 つの前額平行面に向かって観察者が動く場合、自己運動のヘディングバイアスは object trajectory angle によってグラフのように変わることを予測する（プラス値は後退対象である右方向へのヘッディングバイアスを、マイナス値は左方向へのバイアスを示す）（Layton & Fajen 2017）。

動による放射状の拡張パターン(a)によって拡張セル(expansion cells)を最大に活性化する(bの太い黒色のカーブで表示)。一方、後退対象による縮小パターン(c)は、観察者が静止しているときに最大の縮小セルを活性化する(dの太い灰色のカーブで表示)。前進する観察者が後退する対象を伴う場合、それによる拡張と後退パターン(e)によるそれぞれのセルの活性化は、「no-interaction」モデルではbとdに表示した曲線に近似し、したがって後退対象は自己運動のヘッドディングに影響しないと予測される。MSTdで「full-interaction」モデルを仮定すると、拡張と縮小の活性度はそれぞれの側抑制(bとdの点線で表示)の影響（fとg）を加算的に受け(h)、自己運動におけるヘッドディングを偏向（bias)させ、ヘッドディングの知覚する方向を変えると予測する。図3.70には、「full-interaction」モデルにおける自己運動の知覚されるヘディング方向(bias)の変化が示されている。ここでは観察者は床面を直進（黒色線表示）するか、あるいは後退する対象によって生じる2つの前額平行な面（破線表示）の方へ動くと仮定する。この場合、後退対象は観察者の頭部方向の左からスタートし、右方向に動いて、観察者の最終位置の近くで終了する。対象の後退運動の軌跡が異なると（上段グラフの左端から右端)、運動軌道角度(object trajectory angle)に対する拡張セル（黒色表示）と縮小セル（灰色表示）の活性パターンは上段のグラフに示されたように変化する(垂直線は観察者のヘッディング、x軸は前進から後退パターンの間のいずれかに同期するセルの偏向の程度、y軸はそのセルの反応程度)。観察者が床面に対して直進する場合（黒色線表示）あるいは後退対象による 2 つの前額平行面に向かって観察者が動く場合、自己運動のヘディングバイアスはobject trajectory angleによって図3.71のグラフのように変わることを予測する（プラス値は後退対象である右方向へのヘッディングバイアスを、マイナス値は左方向へのバイアスを示す)。MSTdにおける拡散ユニットと収縮ユニットの4通りの連結モデル、すなわち「no-interactionモデル」、「across-interaction-only モデル」、「full-interactionモデル」、そして「within-interaction-onlyモデル」では、後退対象の運動軌道角度(object trajectory angle)にともなって自己運動のヘッディングバイアスがどのように変わるかが、図3.71に示すように予測されている。

実験事態は、観察者の前進する方向(heading)に対して対象の異なるオプティクフローを設定した。シミュレートされた事態では、観察者は1.5秒間に200cm/sの速度で、ドッ

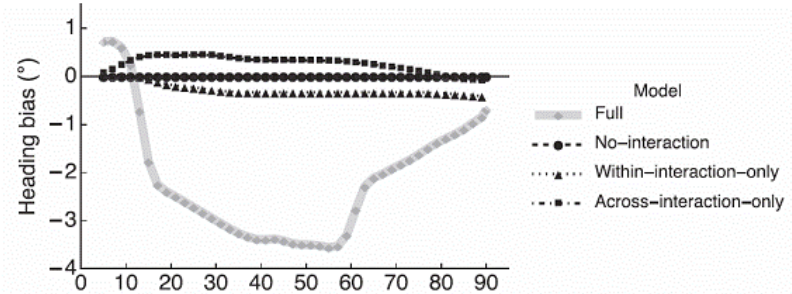

図 3.71　MSTd における拡散ユニットと収縮ユニットの 4 通りの連結モデルによる自己運動のヘッディングバイアス予測(Layton & Fajen 2017) 。

トで規定された床面に沿って直進 (0° heading)、あるいは観察者から 800 あるいは 1000m 隔てた２つの前額平行なドット面に向かって直進した。後退する運動対象は 150×150cm の大きさでシミュレートした実験のスタート時に観察者から 300cm/s の速度で 300cm の奥行距離をもって後退した。この後退対象は、観察者頭位の左側 200cm からスタートさせ、その運動軌道は 2° のステップで 5° から 90° の範囲で変化させた。この場合、対象の運動軌道が 90° に近い場合には対象は観察者に対して一定の距離をとりながら横方向に動き、逆に 5° の場合には対象と観察者の軌道は平行に近くなる。対象の運動軌道角度の影響をみるために、対象の後退速度(観察者の速度に対して 0、0.75、1.5、2.25、3m/s の増)、横方向速度 (0.5、0.7、1.15、1.65、2.25m/s) をそれぞれ独立に操作した。これら２つの速度変数の組合せによって対象の運動軌道が 9.5° から 90° まで 21 通りに決められた。また、対象と観察者の距離は、5 通り (5.5、4.375、3.25、2.125、1m) に変えた。

実験はリアスクリーン(100° W×80° H)に MATLAB で作成したイメージをコンピュータから投影し、12 名の成人被験者に対して、提示された 1.5s 間の自己運動のオプティクフロー観察後に、青色の長方形のプローブを画面に垂直にかつ水平方向のランダムな位置に提示し、そのプローブをダイアルで操作し、知覚した自己の進行方向(heading)に調整するように教示して実施された。

実験の結果、自己運動の被験者によるヘッディングバイアスは、後退対象が観察者の運動軌跡を横切る場合には対象側の方向、また後退対象が観察者の運動軌跡を横切らない場

合には対象の反対方向となることが示された。これはMSTdの「full-interactionモデル」の予測と一致した。このことから、拡張と収縮ユニット間に回帰的結合を仮定したモデルが、後退対象のあるダイナミックなオプティクフロー事態で自己運動のバイアスを的確に予測すると考えられる。

乳児における放射状オプティクフロー（ROF）の両眼輻輳と開散

乳児は、拡大あるいは縮小するオプティクフローに対して感受性を示し、輻輳あるいは拡散の眼球運動を無意図的に示す。これらの反応は視覚システムがオプティクフローを相対的奥行として知覚していると示唆される。乳児は、16週齢以前に、運動視差など運動要因による単眼手がかりで相対的奥行を知覚するように発達する(Nawrot et al.2009)。図3.72のように、刺激パターンが拡大運動する場合には眼球の輻輳が、収縮する場合には開散が生起する。問題はバージェンスシステムが何を手がかりとしてどのように発達するのか不明なことである。眼球調節を含めて眼球運動を活性化させる手がかりは、イメージブラー、両眼視差、そして刺激接近による近接バージェンスである(Semmlow & Hung, 1981))。

これまでの乳児を対象にした研究では、乳児の偏好反応を指標としてきたが、Nawrot & Nawrot(2019)は、拡大あるいは縮小するオプティクフローに対する眼球反応を直接的に測定した。オプティクフローに対する輻輳運動が観察されれば、乳児の段階で絶対的あるいは相対的奥行が知覚される視覚システムを明らかにできる。乳児の日齢から3実験群を構成し、2ヶ月齢群35名、4ヶ月齢群34名、そして5ヶ月齢群30名とした。静止した刺激を提示する統制群は3群の中から17名で構成した。実験群の中から除外した乳児の補充も行なわれた。放射状のオプティクフロー（ROF）は空間周波数（0.37c/°）からなる同心円状のグレーティングパターン（図3.72）から構成され、一定に速度(2.5°/s0）で400msの間拡大あるいは縮小し、21inのCRTに提示された。この拡大（4回）あるいは縮小（4回）は観察者に対して13cm/sの距離を

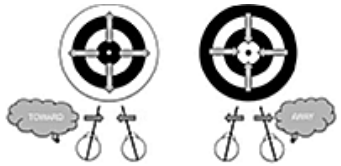

図3.72　刺激の拡大と収縮のラディアルモーションと眼球の輻輳（左図）と開散運動（右図）(Nawrot & Nawrot 2019)。

接近あるいは後退する運動に対応する。乳児は保護者に膝に抱えられ、両眼で拡大あるいは縮小する刺激を各４回観察させ、水平方向の眼球運動がイトラッカーで測定された。

拡大あるいは収縮する刺激に対する眼球運動の測定の結果、2 ヶ月齢群、4 ヶ月齢群、そして 5 ヶ月齢群とも、収縮する放射状のオプティクフローに対しては輻輳が拡大し、それに足して開散の眼球運動が示され、輻輳と開散の間には有意な差があった。

この結果は、少なくとも 2 ヶ月齢乳児には相対的奥行情報に対しての感受性があることを示す。

22 その他の研究

図－地反転図形における時間的ダイナミクス

ルビンの杯に代表される図－地反転パターンを持続観察すると、二人の顔と杯とが交互に反転して知覚される。この知覚的反転は「図」を担うニューロンの順応（一種の生理的疲労）が進むと、抑制過程が自動的に誘導されてニューロンの興奮過程を抑制し、その結果として別の「図」過程が興奮するためと説明されている。つまり、ニューロンにおける相互の興奮と抑制過程回路に基づくというわけである(Huguet, et al.2014, Kogo et al.2011, Noest et al. 2007)。

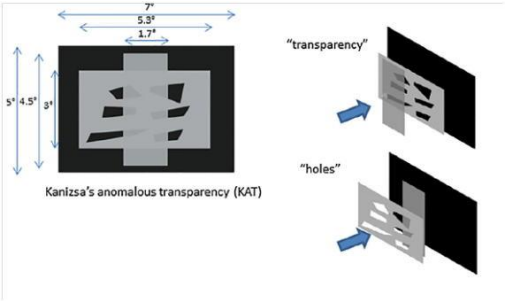

図 3.73　Kaniza の多義的知覚パターン。右側の Kaniza パターンを注視し続けると、左端のように中央の垂直矩形が前面に浮き出て後面のパターンが透明に知覚される場合(transparency)と、垂直矩形が後面に退き 6 個の穴の開いた平面が前面に知覚される場合とが反転する(Kogo et al.2015)。

そこで、Kogo et al.(2015)は、反転パターンにおける「図」の過程の興奮過程を消失させれば、図－地反転の頻度を少なくできると考えた。そこで、反転パターンを連続して提示する代わりに間歇に提示し、図－地反転頻

度を測定した。反転パターン提示は 1 秒と 2 秒を設定、また反転パターンの非提示時間（ブランク時には灰色刺激を提示）は2、3、6、8、10 秒の 5 条件を設定した。反転パターンには、ルビンの杯パターン（図と地が反転）、Kaniza の多義的パターン（図 3.73：右側の Kaniza パターンを注視し続けると、左端のように中央の垂直矩形が前面に浮き出て後面のパターンが透明に知覚される場合と、垂直矩形が後面に退き 6 個の穴の開いた平面が前面に知覚される場合とが反転する）およびネッカーキューブ（立方体が奥行反転し 2 通りに奥行位置が知覚）を用いた。被験者にはパターンの見え方の反転を指定したキー操作で反応させた結果、ルビンの杯パターン提示条件では、提示時間が 1 秒という連続提示条件ではパターンの提示ごとに反転が生起したが、しかし間歇提示条件でも反転が生起し反転の抑制は顕著には現れなかった。一方、Kaniza パターンとネッカーキューブパターンの間歇提示条件では、反転の強い抑制が生起した。パターンの間歇提示によるこれらの反転の抑制には個人差もみられた。

この結果から、図－地反転の抑制は、パターンの間歇提示によるニューロンの抑制によって一般的に生起するとはいえないことが示され、これにはパターンの熟知性、意味関連、期待などトップダウンによる要因が関与していることが示唆されている。

オクルージョンにおける刺激パターンの保持

運動する物体は視界から部分的あるいは全体的に消えたり現れたりするが、視覚システムは網膜入力が妨げられる間にもそれらの物体を同一の物体として保持できる。これは、オクルードされた物体が内的に表象され保持されることを意味する。とくに、物体全体がオクルードされても、その形状、色、速度そして運動方向などの刺激特性がオクルージョンの間は保持される(Flombaum et al. 2009; Hollingworth & Franconeri, 2009; Moore,et al.2010; Saiki, 2003)。神経生理学レベルでの研究は、オクルージョンの間のこの種の刺激特性の内的保持を担う視覚野のネットワークの活性が、オクルードされない事態の対象形状、対象の同一性、相対的関係そして網膜のマッピングにおいて同等であることを示す（Kourtzi & Kanwischer 2001; Kovács,et al.1995; Hulme & Zeki, 2007; Graziano et al. 1997; Ban et al.,2013; Rauschenberger et al. 2006)。これらの研究は、物体が見えている間にその特徴が統合されて内的表象が形成されること示す。

Maarseveen et al. (2017)は、オクルージョンの間に刺激特徴が変化した条件での物体の同一性についてしらべた。刺激特徴の変化は刺激にフリッカー(刺激輝度の時間的頻度)を導入して行った。刺激にフリッカーを導入すると、その刺激の持続時間が増大して知覚される錯覚が知られている(temporal illusion)。もしオクルージョンの間もフリッカーを継続すれば、実際に見えている間に形成された内的表象が維持され、その結果、ノーマルな刺激事態で生起すると同程度の時間的増大錯覚が生じると予測される。

実験では、図 3.74 に示したように、フリッカー提示するターゲット刺激（円形）を、非オクルージョン条件（左列)、オクルージョン条件（中央列)、そして輝度消失条件（オクルージョン刺激に重なる間輝度がしだいに消失しその後ゆっくり出現）で提示し、被験者にはターゲットの提示から終了までの刺激持続時間を右側のボタンを押し続けることで再生するように求めた。左眼刺激は左眼に右眼刺激は右眼に提示し、ターゲット刺激とオクルーダ（矩形）の間に両眼視差による奥行を設定した。オクルーダーの提示時間は、ターゲットの持続時間に応じて 466-533ms、766-833ms、1066-1133ms の 3 段階とした。ターゲット刺激の提示時間は 1000、1300、1600ms の３段階に、輝度の時間頻度（フリッカー）は非フリッカー、５Hz フリッカー、10 Hz フリッカー の3条件に、オクルージョンは非オクルージョン、オクルージョン、輝度消失の 3 条件に設定した。

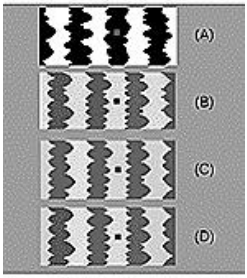

図 3.74　図-地反転領域を彩色した条件。(A)白色と黒色、(B) 凹領域は等質、凸領域は異質に彩色、(C) 凹領域は異質、凸領域は等質に彩色、(D)凹、凸領域ともに異質(Lass et al. 2017)

実験の結果、ターゲット刺激の輝度をフリッカー（5、10 Hz)させると、非オクルージョンおよびオクルージョン条件では非フリッカーに比較して刺激の持続時間錯覚が増大し、また輝度消失条件ではその程度は小さかった。この錯覚は刺激の輝度頻度が高いほど大きいことも示された。とくに、刺激の持続時間錯覚の増大は非オクルージョン条件でもっとも大きかった。これらのことから、この種の錯覚はオクルード

の前と後で内的表象が別々に形成されるのでは無く、フリッカー刺激がオクルードされている間中、持続的に保持されていることを示唆された。

Maarseveen et al.はこの結果を受け、実験２ではオクルージョンの間の輝度変化についての被験者の期待を操作し、刺激の持続時間錯覚の増大の程度をしらべた。被験者の期待は、オクルージョンの間の刺激の輝度変化を変えることによって操作した。オクルージョンの間、刺激は「輝度変化無」、「10 Hz 輝度変化」、「10 Hz 輝度変化の一時的消失」の3条件で変化させた。「10 Hz 輝度変化の一時的消失」条件では、刺激がオクルードされた時、ターゲットの前面でオクルーダーが動く際に半透明にし、刺激がオクルードあるいはオクルードされなくても同一であることを被験者に強調する誘導手法を導入した（誘導条件）。もしオクルージョンの間、刺激輝度の時間的頻度（フリッカー）が被験者の内的表象として保持されるならば、刺激の持続時間増大錯覚は「輝度変化の一時的消失」条件より「10 Hz 輝度変化」条件の方が大きいと予測される。刺激および手続きは実験１と同様としたが、オクルーダーは不透明（非オクルードとオクルード条件）に加えて半透明（誘導中断条件）とした。ターゲット刺激の輝度頻度は、無変化、10 HZ、そして一時的輝度変化の中断（誘導中断条件、ターゲットがオクルーダーに初めと終わりに全面的に重なる）の3条件を設定した。視野の上から下に移動するオクルーダーは、非オクルードとオクルード条件ではターゲットの前面に、誘導中断条件では背面に動かし、ターゲットの提示時間に応じて 466-1133ms の範囲で変えた。被験者には、オクルーダーが下から上に戻ったら、ターゲットの提示から終了までの持続時間の再生をキーボタンの持続押しで求めた。

実験の結果、オクルージョン条件は非オクルージョン条件に比較して持続時間錯覚の増大は有意に小さいこと、輝度無変化条件では輝度変化条件と輝度変化中断条件に比較して有意に小さいこと、さらに輝度変化条件は輝度変化中断条件に比較して有意に大きいことが示された。そこで、非オクルージョン条件とオクルージョン条件における刺激の連続提示（輝度無変化条件と輝度変化条件）と輝度変化中断条件の間で刺激の物理的持続時間に対する持続時間錯覚の増大割合（パーセンテージ）を算出し、非オクルージョン条件とオクルージョン条件間で相関を取ると、強い正の相関が示された。このことは、被験者のオクルージョン条件での内的表象は非オクルージョン条件のそれと類似することを意味した。

これらのことから、刺激の輝度変調特性がある場合、その刺激特徴が見えている間に被験者によって検出され、オクルードされた場合にもその内的表象が持続し、その刺激の時間的再生を求めたとき被験者の刺激特性に関する期待を介して作用すると考えられる。

多義的知覚における行動からの転移

視覚システムは刺激対象の形状や運動方向を明らかにするが、その知覚は観察者の行動によって影響され知覚内容が変わる。例えば、ある運動を練習させると、その運動の知覚的弁別能力を向上させ(Casile & Giese 2006)、さらに刺激の明確な知覚がなく曖昧性を残す場合には、いま実行している行動(action)と一致するように知覚内容が変わる。すなわちアクションはフィードフォワードの効果(foward model)を生み出し多義的な知覚内容をアクションに一致するように知覚解決が図られる(Wolpert & Miall 1996)。これは、アクションから知覚への転移のしくみがあることを示唆する。

Veto et al.(2018)の知覚ーアクションの認知モデルに関するこれまでの研究では、(a)視覚的モーションと実際のアクション間のカップリングの効果、および(b)視覚的モーションとアクションの内的なモデル間のカップリング効果とを混同していると考え、２つの可能なモデルのいずれが妥当かを実証するために、図 3.75 のようなパラダイムで実験した。被験者には、面のテクスチャの遠近要因を操作し回転方向が明確なシリンダーをレバーあるいはギアを 30 秒間実際に手で両方の回転方向が同一あるいは反対方向に任意に動かしながら観察（図 a）させた。このレバーはベルトでシリンダーに接続しているので常にシリンダーとベルトは同方向に運動するか、あるいはシリンダーとギアは歯車でつながっているギア方式では常に反対方向に動くかであった。続いてシリンダーと被験者のアクション（レバーもしくはギア）の回転方向を一致・不一致に変化させながら 20 秒観察させ、その間レッドレバー（ホィールの取り付けられたレバー）の動きをベルトあるいはギアと同じになるように模倣させた。その後、レッドレバーを隠して回転するシリンダーを 20 秒間観察させた。テストブロックでは 3 分間、シリンダーのテクスチャから遠近部分を除去して回転方向を多義的にさせたシリンダーを 3 次元的に視えるように提示

(structure of motion)し、その回転方向と心的にイメージさせたレッドリバーの回転方向が同一か反対かを被験者に答えさせた。この実験では 2 つの仮説、すなわちその１は、シリンダーの回転方向の知覚は被験者のアクション(ベルト or ギア) に関係なく知覚領域で決められるので、アクションがベルトあるいはギアに関わらずに回転方向の知覚とアク

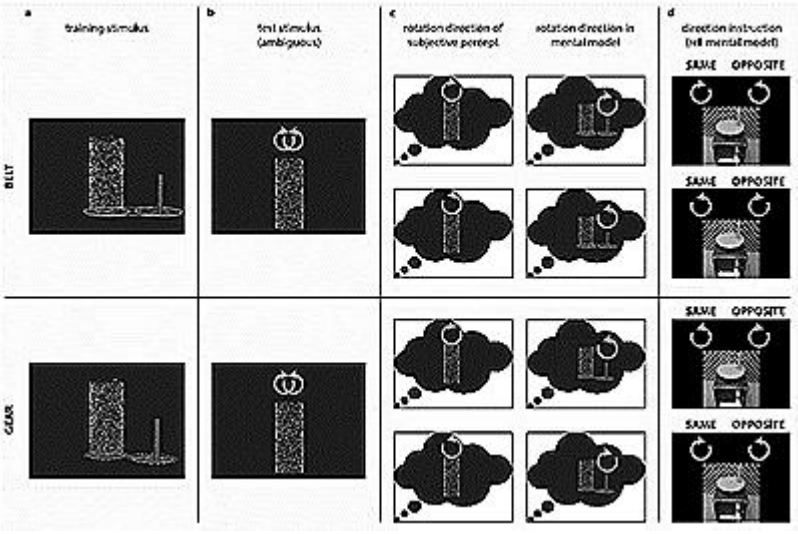

図 3.75　実験に提示する刺激、知覚および課題。a:被験者にレバーあるいはギアを手腕で 30 秒操作、その後明瞭な回転方向が知覚できるシリンダーを 20 秒観察、さらにレッドリバーの回転方向を報告させる、b;テストブロックで 3 分間、シリンダーの回転方向が同一か曖昧かを答えさせる、c:シリンダーの回転方向についての可能な 2 つの知覚モデルとメンタルモデルで、被験者にはシリンダーの回転方向と関連したレッドリバーの回転方向を心的にイメージし報告させる、d:操作子(manipulundom)の装置を用いシリンダーとレッドリバーの回転方向の一致（同方向）不一致（反対方向）を被験者に表示させる(Veto et al. 2018)。

ションが一致すれば安定的知覚が得られ、またそれらが不一致ならば非安定的知覚が内的モデルとは独立に決まると予測される。その２は、シリンダーの回転方向の知覚が視覚的モーションとアクションの内的なモデルで決まるならば、ベルト条件で回転方向の知覚と

アクションが一致すればシリンダーの回転方向の知覚は安定し、逆に回転がシリンダーの反対となる場合に一致するギア条件では不安定となるし、シリンダーとアクションが不一致の場合ベルト条件では不安定な知覚、ギアでは安定した知覚となると予測される（表

表3.3　操作の内的モデル(internal model)、知覚した回転方向とアクションとの一致・不一致(perceoved rotation-manual action)、被験者への教示、知覚優位の効果予測(effect perception dominates)、内的モデル優位の効果予測(effect internalmodel dominates)の関係(Veto et al. 2018)。

Internal model	Match (perceived rotation – manual action)	Instruction	Effect if perception dominates	Effect if internal model dominates
Belt	Congruent	Same direction	Stabilize	Stabilize
Belt	Incongruent	Opposite direction	Destabilize	Destabilize
Gear	Incongruent	Same direction	Destabilize	Stabilize
Gear	Congruent	Opposite direction	Stabilize	Destabilize

3.3)。

実験の結果、テストブロックにおけるシリンダーの回転はすべての実験条件で同一であるにも関わらず、被験者の多義的なシリンダーに対する回転方向知覚はベルト条件ではシリンダーの回転方向とアクションによるそれとが一致する場合に安定したが、ギア条件ではシリンダーの回転方向とアクションによるそれとが不一致の場合に知覚が安定した。これはシリンダーの回転方向の知覚とアクションの認知との間には関係がみられず、したがって観察者が行ったアクションについての内的モデルがアクションから知覚への転移効果に関係すると考えられる。

23 得られた成果

(1)　視覚情報と前庭感覚とが生態光学的に一致する条件と不一致となる条件とを設定し、オプティクフローの奥行情報に対する感度を測定した結果、観察者の移動とオプティクフローとが生態光学的に一致した条件では、観察者はオプティクフローからの運動に随伴した奥行感度が、不一致条件より高いことが示された。人間の視覚システムには視覚情報と前庭感覚情報の相乗効果を生み出すしくみが備わる。

(2)最適なベクションを起こす網膜の領域と運動方向があり、網膜の鼻側領域での収縮運動刺激の処理過程には、こめかみ側領域と異なる処理過程が関係している。
(3)運動要因による形状知覚の発達にはドットの運動速度が関与し、ドット速度が速い場合には 4 歳齢以前に、遅い場合には 6 歳以降に運動要因による形状知覚が可能となること、また、弱視者の場合ドット速度が遅い条件での運動要因による形状知覚能力は4から6歳齢の健常児と同等であることが、さらに、片眼弱視の主たる治療は、健常眼を遮蔽し、弱視眼の視力を回復させることであるが、正常視力を回復しても運動による形状知覚の障害は残存している。
(4)ステレオブラインド者は運動の奥行視によってシミュレートされたシリンダーの回転方向の知覚的判断で単眼観察より両眼観察の方が優れていることが示され、単眼独自に検出し統合させて知覚判断している。
(5)微細な頭部運動による運動視差の奥行効果を視対象注視時の微細な頭部運動のデータから視対象の網膜上の位置の変位を推定することでしらべた結果、視対象までの観察距離が4m以内の場合観察者の頭部運動が奥行方向にわずかに動くと、網膜上では、視対象の変異は識別可能な範囲の速度差(1′/s)を越えることを明らかにし、観察者が対象を注視する際の不随意な微細頭部運動による運動視差は対象の奥行弁別のための有効な手がかりとなる。
(6)運動視差のしくみでは運動視差は「観察者の移動速度と網膜情報の比」を手がかりとするという新たなモデルを提示し、網膜像の運動距離、眼球の回転距離、そして相対的奥行距離の各評価の過程が統合される必要があり、そのためには各過程での処理時間が必要となるので、運動視差による奥行距離の復元に要する時間をマスキング・パラダイムで測定した結果、マスキング刺激を導入すると前駆刺激導入の有無にかかわらず運動視差からの復元に要する時間は長くなることなどから、視覚システムは極めて短い時間で運動視差から奥行を復元できることを明らかにした。
(7)運動に伴う形状の立体視が強く出現するのは凸状形状の条件の場合であり、またシンメトリーの形状の太さを細くするに従い、ほぼリニアーにその形状の立体視と奥行回転出現が大きくなることが示されたことから、運動からの形状復元では運動速度差がなくても立体視と奥行回転が生起し、これには図ー地要因が強く関係している。

(8)オプティクフローから3次元対象を復元する場合、対象の面の反射特性が影響すること、またこの影響の程度は対象の形状によって変わること、そして視覚システムは形状、運動軌跡、面の反射特性などの手がかりを統合して3次元形状を復元していると考えられる。
(9)運動視差における２つの運動要素である「拡大ー縮小」運動と「増進ー消失」運動は相互に補完的に作用し、とくに「増進ー消失」運動は相対的奥行が大きい場合に作用するが、この「増進ー消失」運動は相対的奥行が大きい条件でのみ機能する手がかりであると考えられる。
(10)運動視差による奥行出現も、これと同様に、局所的な運動と運動視差の検出過程が最初にあり、これを統合してグローバルな奥行を復元する過程が続くと考えられるので運動視差の大きさによる検出率をみると、運動視差変化が小さい場合の検出率は悪いこと、運動視差変化の検出率は 60%以上の変化では高くなること、またその検出までの反応時間は視差変化が大きくなるにつれリニアに短くなること、最少でも１秒を要することなどが示された、運動視差は比較的長い処理時間が必要とされる低域通過フィルターの特性を持つ。
(11)運動ツェルナー錯視(kinetic Zollner illusion)では背景斜線分と運動対象の間に奥行を設定した場合にも錯視効果が減衰するかを確かめたところ、運動対象の視かけの運動方向はもっとも近接するパターンの影響を受けて変位することが示された。
(12)輝度要因（第１順位(first-order)）のみによるキネマトグラム(RDKs)を用い、放射、回転、直進並進の３種類のグローバル・パターンの運動方向の識別を、刺激要素の輝度とその背景の輝度との間のコントラスト（dot modulation depths)を変化させ、単眼視と両眼視条件でしらべたところ、第２順位事態でのグローバルな運動方向識別は単眼視条件に比較して両眼視条件の方が1.2倍ほど正確であり、しかもこれはグローバルな運動処理過程で起きているのではなく、modulation depth に依存して起きていることが示された。両眼視条件におけるグローバルな運動を知覚できるためのコヒーレンス閾値の改善は個々の刺激要素の運動からグローバルな運動を検出する以前の処理過程が関与する。
(13)ステレオモーションには、両眼視差の変化検出のメカニズム(changing disparity,CD)あるいは左右眼の投影像の網膜速度差(interocular velocity

difference, IOVD)検出のメカニズムのどちらかが関わる。実験の結果、CD と IOVD メカニズムの両モデルは、両眼間の対応を妨害あるいは時間的に妨害したステレオグラムを容易には識別できないこと、また試行ごとにニューロンの結合を学習させた場合には、IOVD より CD メカニズムモデルを用いた方が奥行運動に選択的なニューロンをより発展させる可能性があること、などが示された。

(14)ダイナミックオクルージョン事態においてドットの拡大と収縮および増大と削減の 2 つの手がかりが領域の境界の識別にどのように働くかをしらべた結果、頭部運動条件と頭部静止条件では、境界線の傾きの閾値に差が生じないこと、手がかりが不一致条件でも境界線の傾きの閾値は手がかり一致条件と同等であることが示され、頭部運動と随伴した運動視差による奥行は境界の分擬において効果をもたないこと、さらに「増大と削減」手がかりは「拡大と収縮」手がかりと同等の効果を境界の分擬にもつことが示された。

(15)視覚システムのゴールは事実と一致するように事象を再構成することではなく、観察者の知覚と運動の間をヒューリスティックに調整する（ヒューリスティックモデル）という考え方もある。ここでは知覚が事実と一致しなくてもかまわなくなる。オプティクフローからの 3 次元物体が知覚的にどのように再構成されるかをしらべた結果、視覚システムがオプティクフローからダイレクトに 3 次元の構造物を、それが事実と一致しなくても、構成することが実証された。

(16)オプティクフローとモーションコントラストの両条件で運動パターンと運動速度が運動視に与える効果を成人を対象に定常状態視覚誘発電位で測定された結果、観察者自身の運動および観察者の運動に伴う視野内の対象の運動は、皮質内では同一の回路を活性化させ、しかもこの活動は観察者自身の運動と対象運動にまたがるばかりでなく、各運動のパターン（ラジアルかローテーションかトランスレーション）および各運動速度にも関与する。

(17)オプティクフローを設定して自己誘導運動であるベクションをしらべたところ、視点を左右に振った事態をシミュレートしたオシレーション条件はベクションを強く誘導することを見いだし、これは運動視差の働きによるのではなく、網膜への 2 次元の運動刺激がその位置を常に変えることで運動残効を起こりにくくし、網膜感受性を持続的に高めているためである。

(18)キネティック・オクルージョンによる図－地境界検出のためのニューラルモデル
モデルでは、運動信号を処理する大細胞層系統と輝度コントラストを処理する小細胞層系統を仮定する。第一段階では、運動信号は第１視覚領(V1m) の大細胞系統で検出され、また輝度コントラスト信号は第 1 視覚領の小細胞系統(V1p)で検出される。第二段階では、より大きな領域での一定の運動情報を選択的に得るために運動信号は MT 野でプールされる。受容野に対して垂直方向の輝度コントラストと運動信号(accretion/deletion)はキネティックな「図」を得るために V4 で統合される。第三段階では、図－地境界領域を決定する信号が V4 と MT 野からのフィードバックによって V2 で発生する。V2 の大細胞処理系統での図－地境界に関わるニューロン(MB cells)は図－地境界の方向と運動方向に同期し、V2 の小細胞処理系統での図－地境界に関わるニューロン(PB cells)は図－地境界の方向と輝度コントラストに同期する。ニューラルモデルのシミュレーションの結果で得られたキネティックエッジは、人間が同種の実験事態を観察したときに得られる図－地分擬と一致していた。

(19)図－地反転の抑制は、パターンの間歇提示によるニューロンの抑制によって一般的に生起するとはいえないことが示され、これにはパターンの熟知性、意味関連、期待などトップダウンによる要因が関与していることが示唆されている。

(20)実験で得られた測定値から対象の網膜運動速度と眼球追従速度の比（dθ／dα、M／PR）が眼球追従速度によってどのように変わるかをみると、M／PR 比は眼球追従速度が 2.3deg/s で高く、それ以降は 25.0deg/s まで緩やかに小さくなることが示された。これは、最小の M／PR 比は網膜速度と眼球追従速度の両要因によって決められ、眼球追従速度が大きいあるいは小さい場合、奥行検出閾は不正確な眼球追従シグナルによって決められが、眼球追従速度が適切な場合には奥行検出閾は網膜運動シグナルによって決められていることを示唆する。

(21)対象の動きによるオプティクフロー、および両眼視差要因から観察者が移動している場合のシーン内の対象の静止と運動を検出する提唱されコンピュータ・モデルでは、受容野を模した各オペレーターは興奮領域と抑制領域に半分割されていて、その分割軸の角度は興奮と抑制領域の各モーションのあり方によって変わる。このオペレーターでは運動方向および運動速度が検出できる。モデルでは、このオプティクフロー検出オペレーターに

加えて両眼視差検出オペレーターが利用された。シミュレーション実験から、イメージモーションとステレオ視差の検出オペレーターを用いるとシーン内の対象が静止しているかあるいは運動しているかを認識させることが可能なことが示された。

(22)両眼視差の手がかりを除去した単眼視条件で運動視差を効果的にする手がかりは、ターゲットが球体で 2 個の立方体が背景にある条件とターゲットが立方体で同形 2 個の立方体が背景にある条件であること、単眼視条件での頭部運動は両眼視条件と比較して大きくならないこと、そして頭部運動の大きさが数ミリでも奥行検出が可能なことなどを明らかにし、運動視差の手がかりは観察者が移動している条件のみではなく、静止して立っている条件でも効果的に働く。

(23)高齢者の運動視差による奥行視能力が、運動検出閾と眼球追従の正確度、および複数の対象間の奥行検出閾でしらべられた結果、高齢者は若年者に比較して運動閾値が高く眼球追従運動の正確さが劣ること、また高齢者は低速度の運動視差による奥行が視えにくく中程度の速度の追従運動の正確度が悪いことが示された。高齢者は若年者より運動検出閾が高いことから、高齢者が運動視差による奥行視が劣る原因を運動情報の処理過程の劣化ではなく、むしろ、眼球運の追従能力の衰えによると考えられる。

(24)「図ー地」要因とテクスチャの運動要因を競合あるいは協調する場合、どちらの手がかりが優位になるかについて実験され、ある領域が図になりやすいかあるいはその領域が 3 次元視されるかの知覚課題においては、テクスチャの「増強ー漸減」運動要素は凹凸あるいは相称性のゲシタルト的知覚特性に勝る要因ではないことを示した。

(25)単眼視による 2 次元運動から両眼視による 3 次元運動の変換過程は、 2 次元の運動から 3 次元の運動への変換処理にはロスを伴い、結果として検出感度を悪くするが、しか 3 次元運動を検出できる速度範囲は広いので対象速度を高めることによってこのロスをカバー、そして単眼的運動から３次元運動への変換は、たんに各眼への単眼的運動から計算されるのではなく、それらの間の重み付けを変えて計算されると考えられる。

(26)直進するベクションの周辺視、とくに極端な周辺視の役割につい、オプティクフローの提示が中心視を除いた周辺視のみでもオプティクフローの動く距離に対するベクションの距離が精確に知覚でき、周辺視の視覚情報のみを処理するしくみがある。

(27) オプティカルモーションが多義的な事態での視覚システムによる自己と他者の生物的モーションの識別は生物的モーションが自己と他者の動きの識別の手がかりになるが、しかし自己のヘッディングを知る手がかりには用いられていない。

(28)観察者の自己運動によるオプティクフローと対象の運動によるそれとの識別は、視覚情報にだけ基づいてオプティクフローから自己運動の要素を部分的に除くことができるが完全ではなく、シーンに固有な対象運動は正確には復元されなかった。

(29) オプティクフローの MST 野の背側部(MSTd)の神経細胞間の拡大と縮小のコンピュータモデルが検証され、被験者による自己運動のヘッディングバイアスは、後退対象が観察者の運動軌跡を横切る場合には対象側の方向、また後退対象が観察者の運動軌跡を横切らない場合には対象の反対方向となることが示され、MSTd の「full-interaction モデル」の予測と一致した。このことから、拡張と収縮ユニット間に回帰的結合を仮定したモデルが、後退対象のあるダイナミックなオプティクフロー事態で自己運動のバイアスを的確に予測すると考えられる。

(30)頭部運動による刺激パターンが 1/f スペクトラムをもち、かつパースペクティブレンダリング(Perspective rendering)によって生じる自然な事態で運動視差の奥行効果を再検討し、奥行効果を高める３つの要素、垂直要素の変形(vertical)、近面と遠面の間の速度(speed)、左右と垂直方向の速度勾配 (lateral gradient)を一つずつ３要素を除いた条件では奥行順序の知覚の正確さが劣ることが示され。これらの要素はいずれも運動視差における奥行効果を高めていた。

(31) ステレオキネティックコーンの知覚が slow and smoothness 仮説とリジット仮説のいずれで生起するかを検証するために偏心的なドットの位置によってどのようにステレオキネティックのコーンの高さが決まるかを実験で確かめた結果、多義的なステレオキネティック刺激を観察する場合、視覚システムはその運動速度を最小に、そしてその形状のリジッドを最大にするような偏好性をもって形状を知覚する。

(32)オプティクフローの提示持続時間がベクション開始までの潜時およびその強度におよぼす影響については、ベクションが起きるのは運動刺激の提示から数秒後であること、ベクション強度は提示持続時間の長さに応じて強くなること、さらにベクションの離脱がしばしば起きることが確認された。

(33) 3 次元に運動する対象の運動軌跡はある秩序だった方向に誤って知覚されるが、その誤り知覚(misperception)がベイズの定理で説明できることが検討された。ベイズの定理にもとづくモデルは、刺激奥行距離が大となるにつれ、また刺激コントラストが小さくなるにつれ、そして刺激の偏心度が大きくなるにつれて運動軌跡の知覚エラーが大となることを予測するが、知覚エラーはこのモデルの予測とよく一致することが示された。この結果から、運動軌跡の知覚は観察者の事前(prior)の仮説およびある時点での感覚信号の理解(posterior)に基づくことが明らかにされた。

(34)自然シーン内の対象の運動と観察者の自己運動の関係については、観察者が頭部を運動させてシーンを観察する場合、そのシーンに随伴して運動する対象の運動方向の判断能力は自己の頭部運動方向の判断能力に限定あるいは束縛されないと考えられる。

(35)観察者が静止したシーンに動的にアクセスし、その動的イメージが低空間周波数で提示された場合にシーンをオプティクフローの手がかりのみで特定できるかがしらべられ、並進フローがあればシーンがぼやけていてもその 3 次元構造を知覚でき、弱視や視力低下のケアとリハビリテーションに役立てることができる。

(36)拡大あるいは縮小するオプティクフローに対する眼球反応を直接的に測定した。拡大あるいは収縮する刺激に対する眼球運動の測定の結果、2 ヶ月齢群、4 ヶ月齢群、そして 5 ヶ月齢群とも、収縮する放射状のオプティクフローに対しては輻輳が、拡大するそれには開散の眼球運動が示され、輻輳と開散の間には有意な差があった。この結果は、少なくとも 2 ヶ月齢乳児には相対的奥行情報に対しての感受性があることを示す。

(37)運動による奥行視における両眼視差、単眼視でのオプティクフローおよびその 2 個の手がかりの組合せを設定し、観察者への接近・後退の感度がしらべられた結果、第 1 に両眼手がかり条件の運動による奥行視(接近・後退)ではその手がかりの感度(平均 0.66)は提示した運動刺激の視野の位置によって大きく異なり、これは刺激の離心率と速度に対応することから、神経処理過程に根拠がある。第２に単眼手がかりも刺激を提示する視野の位置によって手がかり感度が変化し、それに関わるのは刺激と刺激する一眼とが反対側の視野の位置づけにありもっとも大きなモーションシグナルになるために運動方向弁別が同側の視野の位置づけ（平均感度：1.03）より高く（平均感度:1.46）なる。第 3 に単眼手がかり感度は両眼手がかり感度より優れていて、しかも独立している。第 4 に両眼

手がかりと単眼手がかりをミックスさせた条件での感度は 1.40 となり、それぞれが単独の手がかり条件より運動による奥行視の手がかりとしては効果をもつ。第 5に単眼手がかりにおける反対視野のオプティクフローは単眼と両眼のミックスした条件で運動方向を弁別するための強力な手がかりとなる。

(38) 3次元運動知覚の処理過程における眼球に特定された運動シグナルの役割を3D の運動残効(MAEs)を測ることによって眼球に特定(eye-specific)の速度シグナルがどのように眼球間で統合され、3D の方向の知覚が成立するかが検討され、眼球に特定な2D パターンの運動情報が3D 運動を計算するための次の処理段階のために保存された結果、眼球に特定なローカルな運動シグナルをグローバルに共有化することによって3次元運動が計算され、そのために各眼球に起源のある運動情報が保持されると考えられた。

(39)運動の奥行視 (kinetic depth) において2 個の回転軸の異なるパターンの配置と配列を類似したものとすると、対応する視覚野のニューロンと受容野が近似すると考えられる。実験の結果、視野闘争図形においては同種のキネティクデプス間のみで知覚反転レートに関して強い相関があるが、他の知覚反転パターン間では相関関係がないことを示して、同種の知覚反転パターンではそれを担う視覚システムのモジュールは同じで独立していて分担機能していると示唆される。一方、知覚反転パターンが異種の場合には、視覚神経システムが異なるのではなくその入力モジュールが異なり、またスピードアップとスピードダウンの教示による意思的コントロールの差は注意作用のリソーズが異なるとそれぞれ考えられる。

(40) 3 次元物体の運動による錯覚的輪郭 (MIC) の生成は、輝度輪郭をもつ 3 次元構造が復元された後で錯覚的輪郭の生起の強さに影響され、傾斜角度 60° 条件を除いてすべての傾斜角度条件で山型刺激の3次元の頂点距離が大になると MIC 効果は減じた。これは傾斜角度が極端に大になると3次元構造を復元できなくなることから、MIC 効果の強さは 2 次元の刺激分離距離よりむしろ3次元のそれによって予測できる。したがって、3次元視覚過程でエッジ間の輪郭の方向と位置からなる 3 次元構造を復元し、これらエッジ間を外挿することで MIC 効果を出現させると考えられる。

(41)奥行に運動する対象速度と先行する低速度での接近対象の軌道の誤判断(知覚バイアス) は Slow Motion Prior 仮説で説明されるかが検証された。実験の結果、調整された運

動軌道の角度ついては、運動の知覚された速度によって知覚された角度が影響され、速度が速いと知覚されるとその運動軌道角度の知覚のバイアスが大きいことが示され、ウエーバーの法則に従う奥行方向の速度弁別についてのベイズのモデルは、運動速度と運動方向の評価間の一貫性の指標である２つの知覚バイアスをシミュレートできることを示している。