

## 2. 運動による 3 次元視

### 2.1 オプティックフロー

#### オプティックフローを伴うシーン知覚 オプティックフロー

オプティッ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。オプティッ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ックフローの手がかりのみで特定できるかをしらべた。この時のオプティックフローには、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 1 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



図 1 実験に使用した 10 種類のビデオシーンとそれにブラー (Blur) をかけたビデオシーン (Wu et al. 2019)。

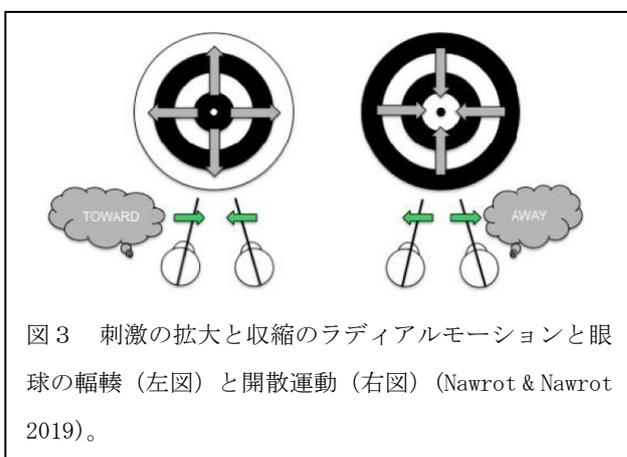
ルムに撮影しビデオに直したものを刺激として作成した。ビデオの映像にはガウス型の Blur を導入した (図 1 の下段)。ガウス型 Blur の半径は 0 と 15 ピクセルの間とし、1 ピクセルあたり 0.02–0.03cycle の空間周波数をカットした。10 人の学生を被験者とし、彼らには 20 フレームからなるビデオを刺激としてディスプレイの上段に提示し、知覚したシーンが何かを下段のテキストボックスに記入するように教示した。実験条件は、静止した Blur 刺激、20 フレーム分の Blur 刺激を静止させ撮影した順番に提示 (各フレーム間に無イメージをマスク刺激として挿入)、20 フレーム分の 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ックフローは並進、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せら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せら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。

### 乳児における放射状オプティックフロー (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ックフローに対して感受性を示し、輻輳あるいは開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ックフロー



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 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ックフローに対する眼球反応を直接的に測定した。オプティッ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。放射状のオプティックフロー (ROF) は空間周波数 ( $0.37c/^\circ$ ) からなる同心円状のグレーティングパターン (図 1) から構成され、一定に速度 ( $2.5^\circ/s$ ) 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ッ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。

## 2.2 運動による奥行視 (motion in depth)

### 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、後者にはオプティックフロー、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ッ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 4 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 (両眼にオプティックフローが提示) が設定された (図 C)。穴状領域の直径は  $2.5^\circ$ 、提示した刺激角度は  $45^\circ$  ステップで  $22.5^\circ$  から  $337.5^\circ$  の

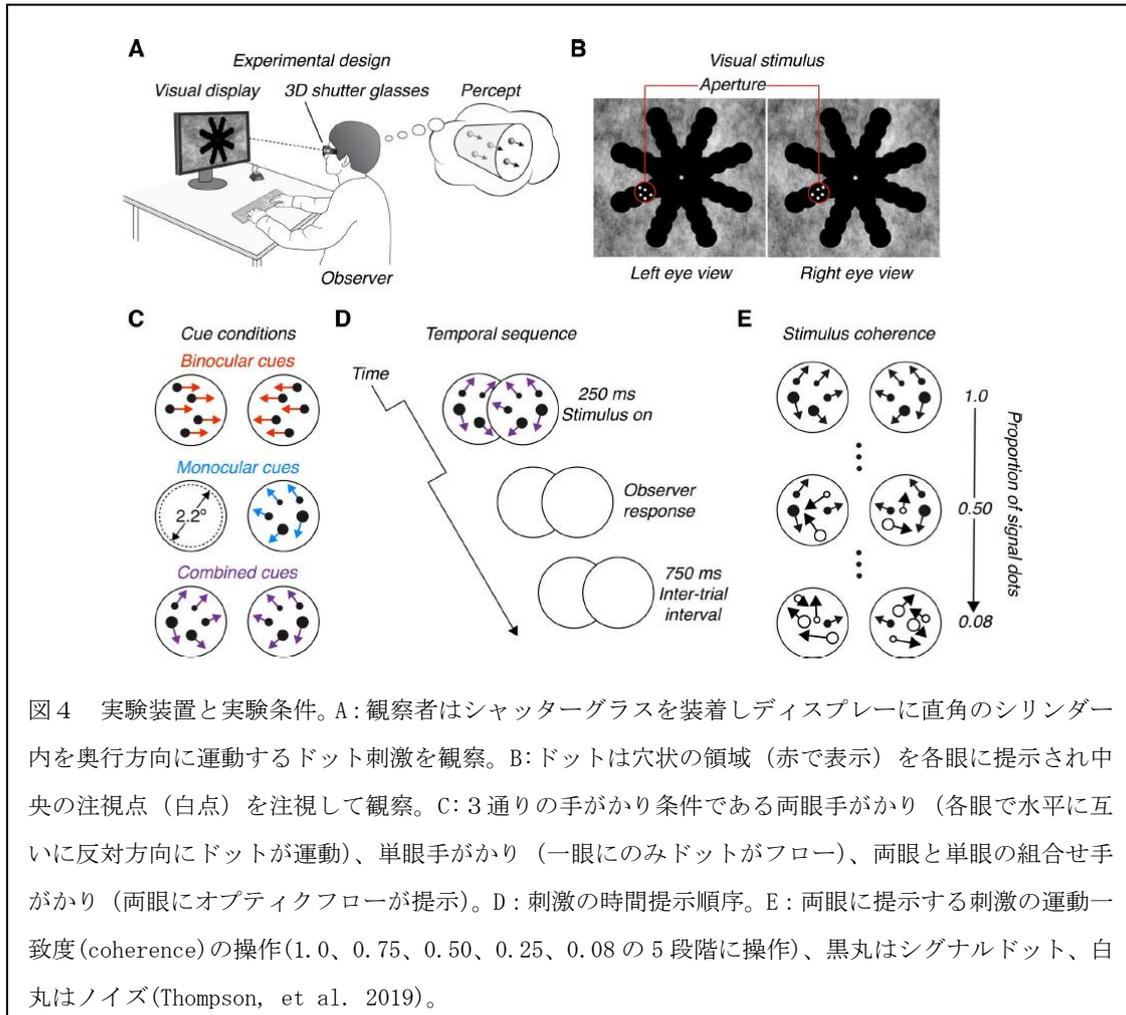


図4 実験装置と実験条件。A: 観察者はシャッターグラスを装着しディスプレイに直角のシリンダー内を奥行方向に運動するドット刺激を観察。B: ドットは穴状の領域（赤で表示）を各眼に提示され中央の注視点（白点）を注視して観察。C: 3通りの手がかり条件である両眼手がかり（各眼で水平に互いに反対方向にドットが運動）、単眼手がかり（一眼にのみドットがフロー）、両眼と単眼の組合せ手がかり（両眼にオプティクフローが提示）。D: 刺激の時間提示順序。E: 両眼に提示する刺激の運動一致度 (coherence) の操作(1.0、0.75、0.50、0.25、0.08)の5段階に操作、黒丸はシグナルドット、白丸はノイズ(Thompson, et al. 2019)。

範囲内で変化（8個の視野）させ、またその離心角度は $1.5^\circ$ ステップで $1.5^\circ$ から $7.5^\circ$ 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。

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

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

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 ( $1/\sigma$ ) 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ブティッ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 運動の処理過程は、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-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 (pseudoplaids) 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-残効パラダイムで確かめることが目的となる。

図5には、実験に使用した左・右眼への刺激パターンと順応-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

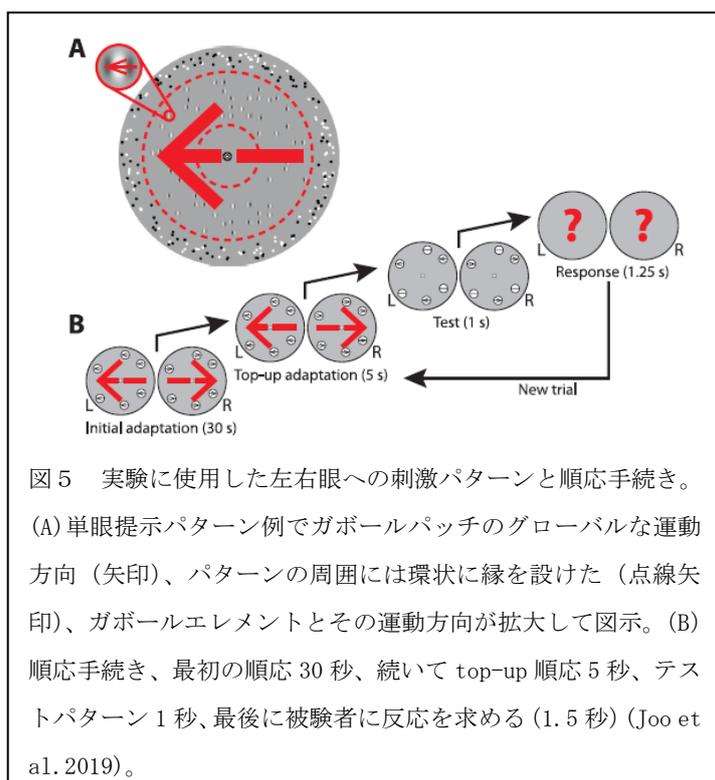


図5 実験に使用した左右眼への刺激パターンと順応手続き。(A)単眼提示パターン例でガボールパッチのグローバルな運動方向(矢印)、パターンの周囲には環状に縁を設けた(点線矢印)、ガボールエレメントとその運動方向が拡大して図示。(B)順応手続き、最初の順応30秒、続いてtop-up順応5秒、テストパターン1秒、最後に被験者に反応を求める(1.5秒)(Joo et al. 2019)。

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 $0.15^\circ$ 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 $0.15^\circ$ で $\pm 3$ SD、35%のコントラスト、空間周波数 $2c/^\circ$ とし、 $0.5^\circ/s$ でドリフトさせた。ガボールパッチ間の最小距離は $1^\circ$ あるいは $2^\circ$ 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 $1.48^\circ$ でパナ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1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ディングをフリッカーさせた。図5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、そのディスプレイ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要素をもつテスト刺激)。

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

表 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ドリフト速度、Adapter : 順応刺激と同一の位置の要素をもつテスト刺激要素) (Joo et al. 2019)。

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、ガボール要素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 (pseudoplaid) 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ことが考えられる。

### 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 (multistable 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; Knappen, 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, Becker, and Hambrick (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)。

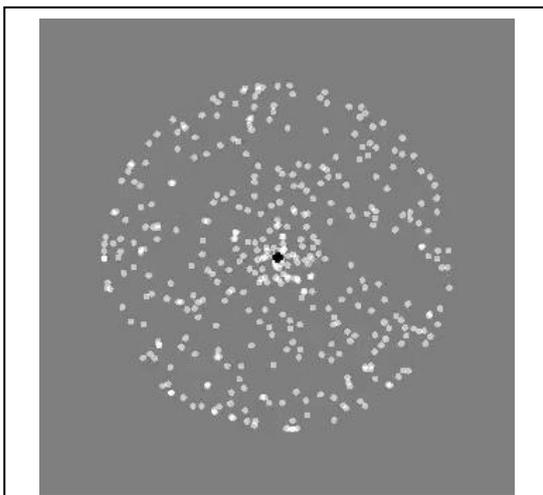
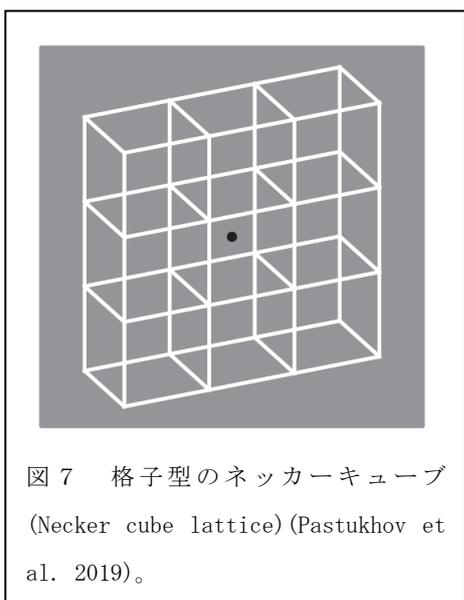


図6 運動の奥行視の球体パターン。ランダム  
ドットで構成された球体で左あるいは右の斜  
め  $45^\circ$  を回転軸にして一方向に回転  
(Pastukhov et al. 2019)。

そこで、Pastukhove et al. (2019)は、図  
6に示したように、球形の運動奥行視パター  
ン(キネティックデプス, kinetic depth)を垂直  
に対して  $45^\circ$  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、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7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種類のキネティッ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。キネティッ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ッ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、キネティッ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ックデプス間ばかりでなくキネティッ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ッ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ッ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スが異なるとそれぞれ考えられる。

### 2.3 運動知覚に対するエイジング影響 (レビュー)

高齢化にともなうエイジングが認知機能に与える影響の研究では、とくに行動へのエイジングの影響の研究が必要となる。年齢に関係した知覚の変化についての研究は限られているが、その中でも運動知覚は比較的良く研究されている分野でエイジングの影響の複雑性を知ることができる。Billino & Pilz(2019)は、エイジングが運動知覚にどのような影響を与えているかの研究をレビューし、認知と運動機能にそれがどのようにリンクするかをまとめた。健全なエイジングに伴う運動知覚の機能的で複雑な変化を理解することは生涯にわたる知覚あるいは知覚学習の能力の衰えや個人差を知る助けとなる。

運動知覚の神経生理的処理ステージ

運動知覚の最初のステージは、眼球を通し網膜で運動刺激を受容し神経節(gangrion)でシグナルに変換されて共に平行する2つの大細胞経路(magno cellular pathway)と小細胞経路(parvocellular pathway)で外側膝状核(lateral geniculate nucleus)に伝達される経路である。図8に示したように、運動知覚のステージは初期感覚ステージ、低/中レベルの知覚ステージそして高次処理ステージに区別され、このいずれのステージにも年齢的変化が伴う(左側図)。視覚領(visual area)からの次のステージは2つの経路で行われ、それは背側処理経路(dorsal processing)と腹側処理経路(ventral processing)である。

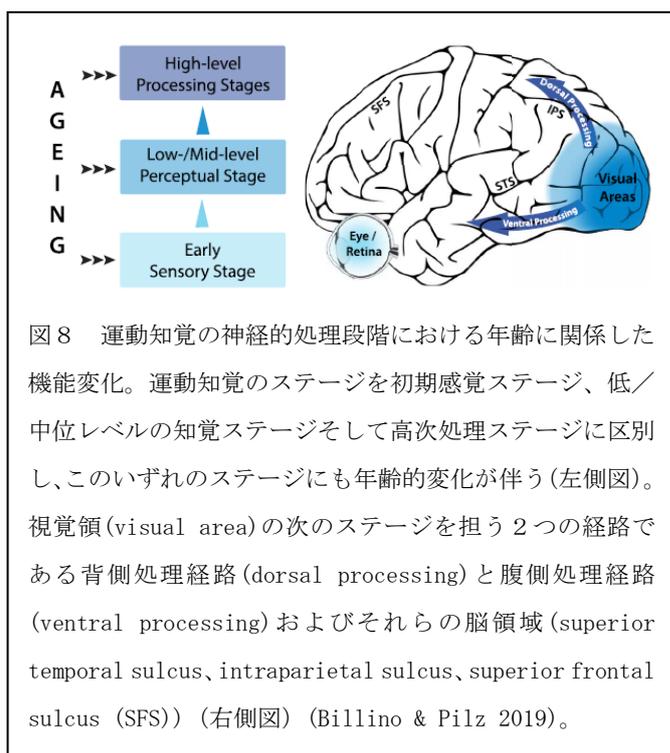


図8 運動知覚の神経的処理段階における年齢に関係した機能変化。運動知覚のステージを初期感覚ステージ、低/中位レベルの知覚ステージそして高次処理ステージに区別し、このいずれのステージにも年齢的変化が伴う(左側図)。視覚領(visual area)の次のステージを担う2つの経路である背側処理経路(dorsal processing)と腹側処理経路(ventral processing)およびそれらの脳領域(superior temporal sulcus, intraparietal sulcus, superior frontal sulcus (SFS)) (右側図) (Billino & Pilz 2019)。

これらの情報は上側頭溝脳領域(superior temporal sulcus)、頭頂間溝(intraparietal sulcus)そして上前頭溝(superior frontal sulcus)に伝えられ処理される(右側図)。低/中位レベルの知覚ステージは初期視覚領におけるシグナルの処理、方向、エッジ、輝度、単純な運動シグナルに関わる。これらの視覚シグナルは環境内のグローバルな変化を推測するために統合される。V1 領野では運動方向の刺激に選択的なニューロンが関わり、V5/MT、V3A、そしてV6 領野を含め神経ネットワークのすべてが運動視の処理に関わる。とくに、V5/MTは側頭後頭頭頂接合部

(temporo-parieto-occipital junction)に位置し、運動の方向に選択的特異性があり、局所的な運動シグナルを統合する。また、背側皮質視覚路(dorsal stream)は、視覚に導かれた行動と空間注意をコントロールし、頭頂間溝と前頭野に沿った領野で担われている。腹側皮質視覚路(ventral stream)は形状の情報に関連するので運動の質的特性を伝える。高次レベルの運動知覚は認知過程たとえば、予測、動機、注意、記憶によって調整され、視覚情報の助けとなる。

これらの処理過程は階層をなし強力なフィードバックのネットワークをもち、外側膝状体と皮質の複数の領域を繋いでいる。したがって、加齢に伴う機能的な変化も相互に密接に関連する。

#### 早期の感覚処理における加齢的变化

近視や遠視など眼球構造に関わる障害は発達初期の視覚処理過程に影響を及ぼす。しかし、運動知覚の働きに成人にまでその影響が続くことなく修復がなされる。年齢に関連し

た障害は正確な運動情報に関わる要因、たとえば速度に現れるが、適切な訓練でその障害を減じられる。視力は運動知覚の発達に関係し、とくに小さい対象の運動たとえば仮現運動の探知を難しくする。同様に、視力のボケは高い空間周波数パターンの知覚を悪くさせて運動知覚も妨げるが、形の知覚ほどには妨げとならない。桿体の密度が低いと限定的な障害が出る。背側処理経路と腹側処理経路は年齢にともなって類似した変化をするので発達過程で強い影響をうけると考えられる。早期の視覚処理過程では年齢による変化は生涯を通しての運動知覚の働きには影響をしないが、しかし視覚システムに入る情報を形づけるので次の視覚処理のステージにこの影響は引き継がれる。

#### 低-中位レベルの処理過程における加齢的变化

低/中位レベルの処理過程は、皮質の有線皮質と線条対外皮質で運動シグナルの分析と計算に関わる。ここでの運動知覚は特定の刺激であるローカルシグナルとグローバルシグナルによって説明される。図9Aにあるように、ローカルな刺激とは輝度要因（第1順位刺激、左側図）によるグレーテング (grating) であり、グローバルなそれとは明るさコントラスト（第2順位刺激、右側図）のグレーテングである。図のAではグレーテングはシグナル対ノイズレベル(100%, 75%, 50%)別に表示してある。運動刺激はグレーテングを左または右に動かして提示する。第1順位の運動刺激は視覚システムのリニアフィルターで処理され、第2順位のそれはノンリニアフィルターで分析される。図Bにはランダムドットキネマトグラム (random dot kinematograms, RDKs) を示し、シグナルドットは灰色、ノイズドットは白色表示してあるが、実際は同色で提示する。運動は水平方向の運動 (translational motion、左側図) および中心に向かって拡大あるいは縮小するオプティックフロー (optic flow、右側図) の2通りを示した。運動刺激がドットの場合、各ドットの動きからグローバルな運動を導き出す。とくに、オプティックフローは観察者の動きに伴う運動で、観察者の前後左右の動きの手がかりになるので重要である。ローカルな運動は初期視覚野で分析されるが、グローバルなそれは線条対外皮質である VS/MT、MST で分析されノイズが除去されて統合される。

#### ローカル運動の処理過程

健常者の運動の検出閾値は明るさコントラストあるいはノイズでは変わらないが、しかし、加齢に伴って閾値は上昇する。Faubert (2002) は、加齢によるローカル運動知覚への影響を処理過程複雑仮説 (processing complex hypothesis) で説明しようと考えた。これによると、加齢による運動知覚能力不足は処理過程が複雑になるにつれて高まるという。この仮説を裏付けるのは、第1順位刺激の処理過程より第2順位のそれの方が、年齢が高いほどその影響が大きいことである。しかし、第2順位刺激の処理過程における加齢に伴う脆弱性は十分実証されていない。機能的変化についての加齢に伴う抑制過程は重大な役割を、とくに方向の識別能力で示される。この能力の閾値は刺激のコントラストと大きさに依存し、高コントラスト刺激の弁別閾値は刺激のサイズで大きくなり、これは刺激が受容野の大きさを超えてしまい抑制作用のトリガーとなるためである。一方、低コントラストでは

刺激サイズが大となっても空間的加算が起きるので閾値は小さくなる。この空間的加算機能は加齢にともなって減衰し、運動の弁別閾値の増大は年齢の高い成人では高コントラスト刺激の大きさが大きくなっても青年に比較して目立たなくなる。加齢に関わる実験は、運動刺激の操作速度範囲、運動方向、あるいは高齢と若齢の限られた被験者群など刺激と被験者年齢が限定されているので、全生涯のわたるローカルな運動知覚への影響はいまだ明らかではない。

#### グローバル運動の処理過程

グローバル運動の処理過程での加齢による影響は RDKs を刺激として用いたときに出現し、とくにシグナル／ノイズ比率および運動コヒーレンス（ドットが同一方向に運動し、ノイズがランダムに位置を変える）の閾値に年齢による相違が出現する。加齢の影響は 18 から 20 歳のグループと 60 歳以上のグループで比較され、加齢によるコヒーレンス閾値の実質的な上昇が 10 歳当たり 1% から 2.7% まで示された。加齢による影響は刺激速度にあらわれ、 $5^\circ / \text{s}$  をピークに速い速度より遅い運動速度に劣化が示され、また運動の検出と運動方向知覚にも同様に示された。運動知覚の時空的特性にも加齢効果があり、時間と空間特性の統合が影響される。処理過程での抑制の弱化は刺激サイズとコントラストに現れ、比較的若い成人では運動の探知閾値が刺激サイズの影響を受け、サイズが小さくなると閾値は増大するのに対して年齢の高い成人では閾値にサイズによる変化はない。コントラストについては高コントラストより低コントラストの刺激に加齢の影響が現れる。空間の異方性についての加齢の影響は視野全体に現れるが、とくに中心視に影響がみられる。グローバル運動の処理過程での加齢的影響についての神経生理学的研究は少ないが、知覚誘発電位を用いた研究では有線皮質と線条対外皮質の加齢による神経生理学的変化が示され、また近赤外脳機能計測法（fNIRS）あるいは fMRI を用いた研究では視覚中枢とくに V5/MT 野における神経反応の補償的補充が年齢の高い被験者で明らかにされている。

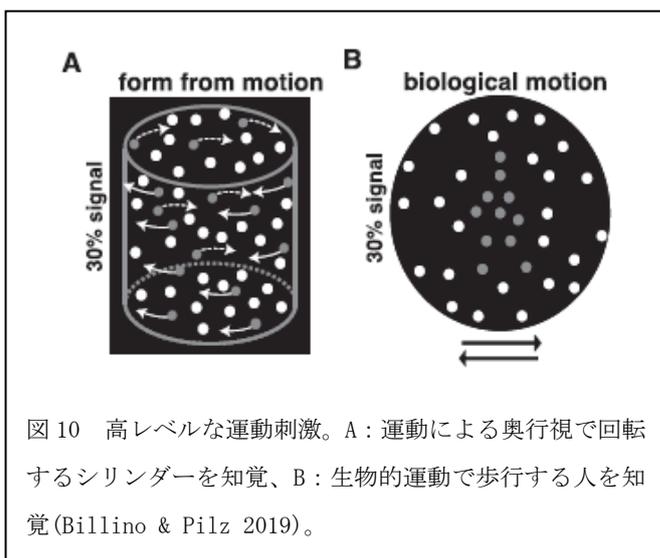
このように、グローバル運動の処理過程における加齢による変化は確実であるが、しかし知覚には足りないものを補いあう能力があることから加齢による弱化をあらかじめ仮定することは適切とはいえないことが示されている。加齢研究には横断的方法によるばかりでなく縦断的方法が必要となる。

#### オプティックフロー

神経生理学的研究によればオプティックフローの反応は V5/MT 野から強い出力を受ける MST 野にのみ出現する。とくに、イメージングと外科手術による除去の研究は広範囲の皮質がオプティックフローの知覚には関係していることを示す。また、オプティックフロー知覚に対し加齢的弱化的影響があり、自己の頭部方向の識別閾値は年齢の若い者で  $1.1^\circ$ 、年齢の高い者で  $1.9^\circ$  になる。このように、オプティックフローのように複雑なシグナル刺激に対する加齢的影響は比較的弱く、関連する神経処理過程も広く、補償的な機能も作用し、可塑性も高いと考えられる。

#### 高レベル処理過程における加齢的効果

運動知覚における高レベル処理過程には認知過程がとれない、それは毎日の環境のなかに埋め込まれている。これらはおもに運動による3D形状知覚と生物的運動知覚で研究されてきた(図10)。



#### 運動による3D形状知覚

運動による2次元の形状知覚と同様に3D形状知覚にも加齢的弱化的出現するが、その弁別能力は両眼視差立体視と同様に保たれている。しかし、加齢的影響はドットの提示時間およびその持続時間が短いと弱化する。これは加齢が運動シグナルを意味ある3Dに統合する能力の弱さを示唆する。

#### 生物的運動の知覚

高レベルの運動知覚には顔や身体の動きに関わる生物的運動知覚があり、

これには他の人の情動や意図の評価に関わる。この人体の動きを模した点光源による刺激パターンは横断的な方法と縦断的な方法の両方の研究で加齢とともにリニアに弱化する。点光源による歩行の知覚では、年齢の高い者は若い者に比較してシグナル/ノイズ比を高めないと知覚できないし、刺激時間を増大しないと歩行方向知覚が達成できない。また、刺激パターンの熟知性が加齢的影響をもち、年齢の高い者は逆さまの刺激パターンの知覚が難しい。生物的運動知覚には、連結箇所を表す単一のドットのローカルな動きの検出、アクションのグローバルな形の知覚、そしてこの二つの過程を統合してのグローバルな運動情報の3つの過程に関わり、アクション初期の背側皮質視覚路がドットのローカルな動きに、また初期の腹側皮質視覚路がグローバルな動きにそれぞれに関わり、これらを統合する領域は上側頭溝と考えられる。年齢の高い者は歩行者のドットのローカルな動きの検出とこれに基づくグローバルな形状の知覚には若い者と同等の能力をもつが、これらを統合する段階、たとえば逆さまの点光源刺激パターンなど熟知に関わる事態では統合能力が損なわれる。しかし、fMRIを用いたこの課題における個人差の研究では、加齢による有意な差は認められない。若い年齢の者は点光源による歩行者を見ることはほとんどなく、顔や身体と共に歩行者を通常は知覚する。同様に年齢が高い者は点光源のみの歩行者知覚が劣っていても顔を随伴して提示あるいは運動させると知覚が向上する。

#### 運動知覚における個人差—性差

グローバルな運動の探知の閾値は年齢の高い女性ではそれに相当する男性より高く、また点光源による歩行者の弁別も低い。ランダムドットキネマトグラムの場合、女性はノイズからシグナルを検出するのにいくぶん劣るが、それよりもドット数が問題だとする研究

もある。いずれにしても運動知覚では年齢を通じて男性と女性の性差は存在しても小さく、運動知覚の処理過程の加齢による変化が性差によって調整されることはほとんどない。

#### 認知的調整

年齢と共に視覚機能が衰え、それとともに認知的能力全般の衰えが顕著にみられる。運動知覚も、同様に、機能の弱化がみられる。とくに、高次レベルの運動知覚では刺激が環境内の一般的なそして熟知な性質が増すほど長期の記憶が損なわれるなど年齢の影響を受け、3D知覚や点光源歩行者の知覚において顕著に現れる。他の加齢的影響は注意作用で、注意能力は年齢が高くなると弱化する。このように加齢に伴う影響がみられるが、これには個人差が、とくに年齢の高い者に大きいことも明らかで、年齢と個人差の入り交じる影響をしらべる必要がさらにある。

#### 運動知覚の学習による適正化

運動知覚は学習によって適正化されるが、それには年齢の影響がある。ノイズをもつサイン波形のグレーティングのコントラストを変えた場合あるいはRDKsの場合、運動方向の弁別精度は試行数とともに成績が向上し、その知覚学習効果は年齢の高・低群で同等である。知覚学習は内的ノイズを減少し、外的なそれに対する耐性を増すこと、すなわちノイズレベルを適正化することで成立する。知覚学習は、年齢に伴う弱化に抗して運動知覚の可塑性を高度に維持するように働くと考えられる。

#### アクションのための運動知覚—眼球追従運動

運動知覚にはスムーズな眼球追従運動が必要であり、その追従状態での正確度と安定度は年齢と共に弱化するが、しかし年齢全般（20–75歳）を通して安定している。年齢が高くなると衰える主な能力はノイズが多い刺激による運動知覚であるが、それを予測的働きによって補うと考えられる。

#### アクションのための運動知覚—ロコモーション

自己の進路方向や動きの速度の手がかりとなるものはオプティックフローであるが、とくに自己の歩行と車の運転での加齢によるこの知覚能力の弱化がしらべられ、オプティックフローによる歩行の姿勢の制御は加齢による影響は少なく姿勢も何とか安定していたが、年齢の高い者はオプティックフローの場が変わる場合には歩行方向や速度を効果的に維持できないことが示された。車のドライブについては、年齢の高い者は車の速度の変化の判断やドライブ中の危険を認知することが難しくなること、そして接近してくる衝突回避をミスすることが示された。これらは運動に対する感受性が悪くなるためと考えられるが、他の視覚機能である視力、コントラスト感受性、注意作用とは関係していないと考えられる。これら車のドライブについての加齢による問題には個人差も大きい。

#### まとめ

加齢に伴う運動知覚の変化は、運動にとどまらず知覚全般の変化をモデル化するための良き研究課題となる。加齢に伴う知覚変化には、感覚、知覚、認知、おして身体運動の諸過程が含まれ、これらの複雑で入り込んだ全過程を明らかにすることは他の知覚機能を解

き明かすことにつながると考えられる。

## 2.4 その他の研究

### 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

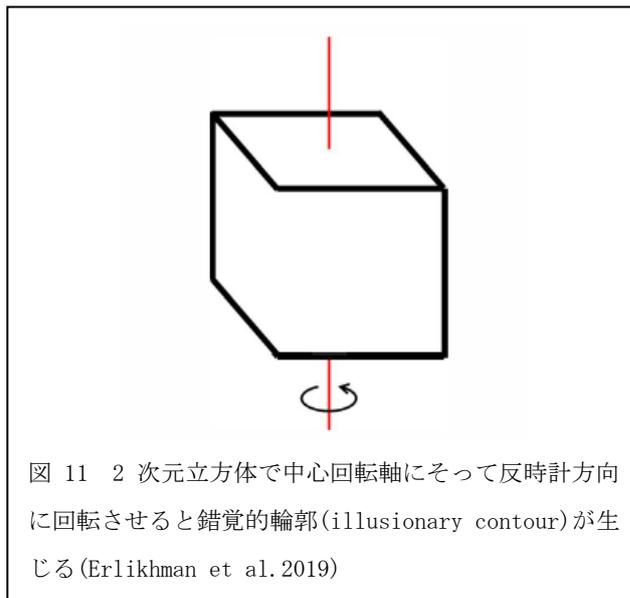


図 11 2次元立方体で中心回転軸にそって反時計方向に回転させると錯覚的輪郭(illusory contour)が生じる(Erlikhman et al. 2019)

はじめて報告された。図 11 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(illusory contour)が生じるとい

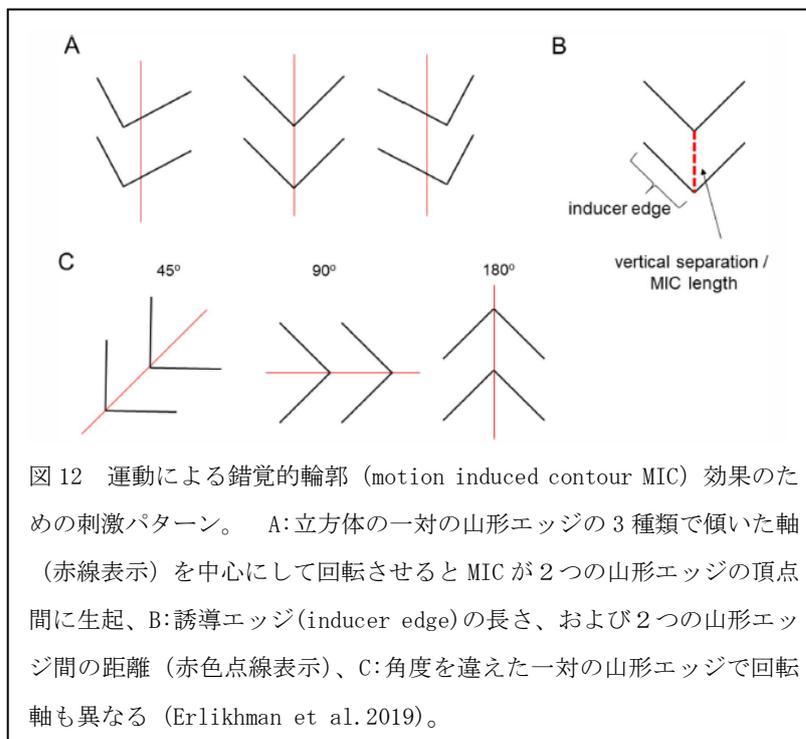


図 12 運動による錯覚的輪郭 (motion induced contour MIC) 効果のための刺激パターン。A: 立方体の一対の山形エッジの3種類で傾いた軸(赤線表示)を中心にして回転させるとMICが2つの山形エッジの頂点間に生起、B: 誘導エッジ(inducer edge)の長さ、および2つの山形エッジ間の距離(赤色点線表示)、C: 角度を離れた一対の山形エッジで回転軸も異なる(Erlikhman et al. 2019)。

う錯覚である。また、MIC 効果は、図 12 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。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 次元にスムーズに単一の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 12 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 には角度を変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 13 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

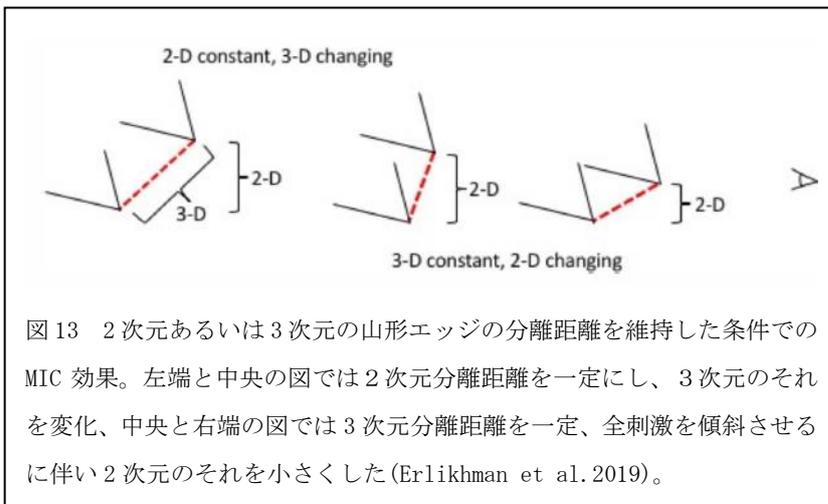


図13 2次元あるいは3次元の山形エッジの分離距離を維持した条件でのMIC効果。左端と中央の図では2次元分離距離を一定にし、3次元のそれを変化、中央と右端の図では3次元分離距離を一定、全刺激を傾斜させるに伴い2次元のそれを小さくした(Erlikhman et al. 2019)。

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、 $\theta$  : 立方体の傾斜角度、 $r$  : 立方体の直径の半分の長さ  
 でその頂点の運動円の半径、 $D_1$ 、 $D_2$  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 ( $D_2$ ) は次式であらわされる。

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

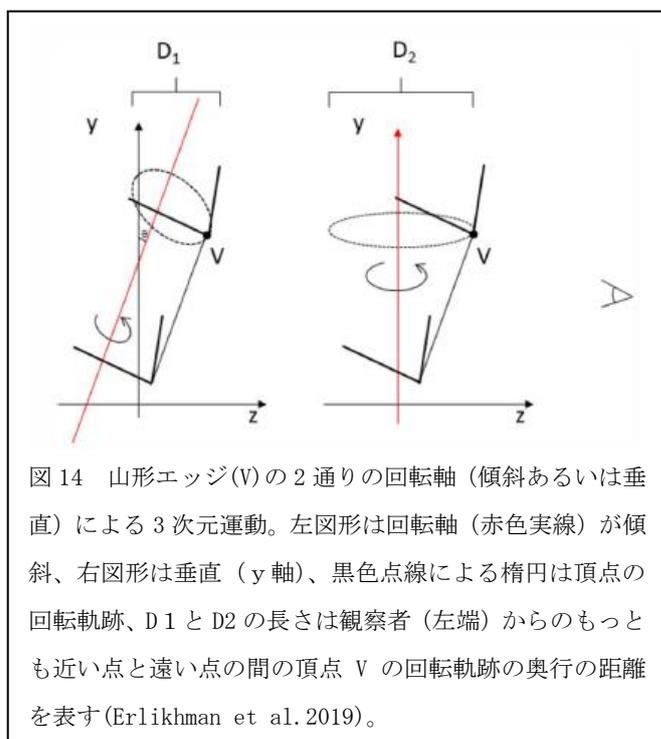


図 14 山形エッジ(V)の2通りの回転軸(傾斜あるいは垂直)による3次元運動。左図形は回転軸(赤色実線)が傾斜、右図形は垂直(y軸)、黒色点線による楕円は頂点の回転軌跡、 $D_1$ と $D_2$ の長さは観察者(左端)からのもっとも近い点と遠い点の間の頂点Vの回転軌跡の奥行の距離を表す(Erlikhman et al. 2019)。

これらの関係が図 14 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、 $D_1$ と $D_2$ 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 $\theta$ が大きくなると $D_1$ が減じ、垂直に近づくと $D_2$ 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 $1.52^\circ$ 、 $2.54^\circ$ 、 $3.55^\circ$ )と対象の

傾斜角度(観察者に向かってx軸に関して $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ )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)に各実験条件での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( $1.57^\circ$ 、 $2.62^\circ$ 、 $3.67^\circ$ 、 $4.71^\circ$ 、 $5.76^\circ$ )と傾斜角度( $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $40^\circ$ 、 $60^\circ$ )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 $60^\circ$ 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。

**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**

視覚システムにとっては自己に衝突するコースの対象を速く知覚することは重要である。運動する対象の角度は過大に知覚されるが、これは対象が通過する横方向の距離を過大に知覚するためである (Harris & Drga, 2005; Lages, 2006; Poljac et al. 2006; Welchman et al. 2004; Regan et al. 1986)。このような知覚バイアスは Slow Motion Prior 仮説で説明された (Welchman et al. 2008, Stocker & Simoncelli 2006)。図 1 に示したように、Slow Motion Prior 仮説による接近対象の角度の過小評価は次のように説明される。いま、

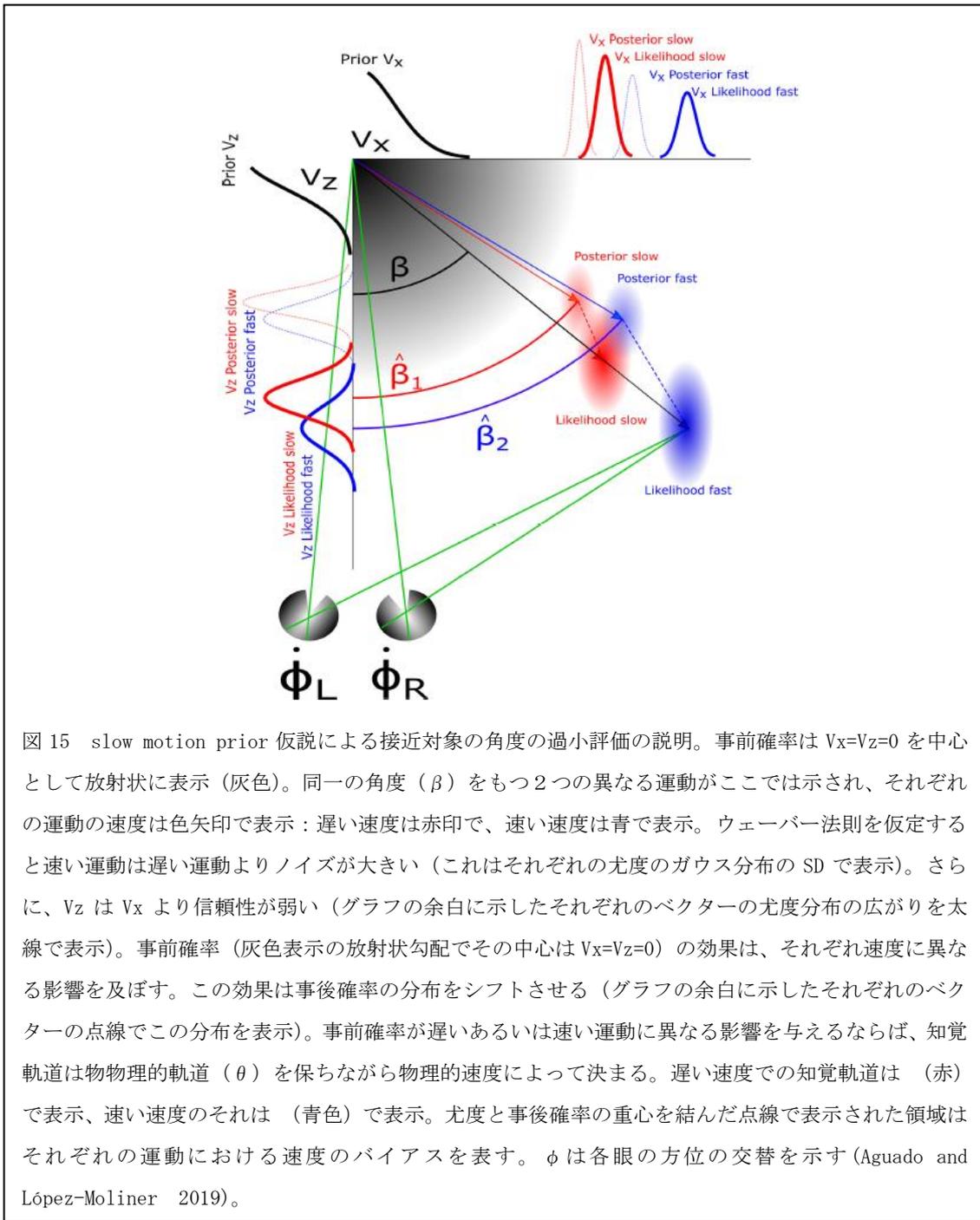


図 15 slow motion prior 仮説による接近対象の角度の過小評価の説明。事前確率は  $V_x=V_z=0$  を中心として放射状に表示 (灰色)。同一の角度 ( $\beta$ ) をもつ 2 つの異なる運動がここでは示され、それぞれの運動の速度は色矢印で表示：遅い速度は赤印で、速い速度は青で表示。ウェーバー法則を仮定すると速い運動は遅い運動よりノイズが大きい (これはそれぞれの尤度のガウス分布の SD で表示)。さらに、 $V_z$  は  $V_x$  より信頼性が弱い (グラフの余白に示したそれぞれのベクターの尤度分布の広がり太線で表示)。事前確率 (灰色表示の放射状勾配でその中心は  $V_x=V_z=0$ ) の効果は、それぞれ速度に異なる影響を及ぼす。この効果は事後確率の分布をシフトさせる (グラフの余白に示したそれぞれのベクターの点線でこの分布を表示)。事前確率が遅いあるいは速い運動に異なる影響を与えるならば、知覚軌道は物物理的軌道 ( $\theta$ ) を保ちながら物理的速度によって決まる。遅い速度での知覚軌道は (赤) で表示、速い速度のそれは (青色) で表示。尤度と事後確率の重心を結んだ点線で表示された領域はそれぞれの運動における速度のバイアスを表す。 $\phi$  は各眼の方位の交替を示す (Aguado and López-Moliner 2019)。

事前確率は  $V_x=V_z=0$  を中心として放射状に拡散 (灰色) し、同一の角度 ( $\beta$ ) をもつ 2 つの異なる運動のうち遅い速度 (赤色) と速い速度 (青色) に関してウェーバー法則を仮定すると速い運動は遅い運動よりノイズが大きくなる (これはそれぞれの尤度のガウス分布の SD で表示)。さらに、 $V_z$  は  $V_x$  より信頼性が弱い (グラフの余白に示したそれぞれのベクターの尤度分布の広がり太線で表示)。したがって事前確率 (灰色表示の放射状勾配でその中心は  $V_x=V_z=0$ ) の効果は、それぞれの速度に異なる影響を及ぼすことになる。この効果

は事後確率の分布をシフトさせる（グラフの余白に示したそれぞれのベクターの点線でこの分布を表示）。事前確率が遅いあるいは速い運動に異なる影響を与えるならば、知覚軌道は物理的軌道（ $\theta$ ）を保ちながら物理的速度によって決まるので、遅い速度での知覚軌道は赤色で表示したようになり、速い速度のそれは青色で表示したものになる。このとき、尤度と事後確率の重心を結んだ点線で表示された領域はそれぞれの運動における速度のバイアスを表す（ $\phi$ は各眼の方位の交替を示す）。この仮説によると、奥行方向の運動速度が速いと運動角度の評価が過大となる。この仮説によれば、奥行方向からの対象の速度が速い場合、その速度の知覚はウェーバーの法則に従うので評価バイアスが大きくなると予測される。

Aguado and López-Moliner (2019)による実験は、図 16 の装置と手続きで実施された。スクリーン上の奥行の遠点（5m に提示してスタート）から 12 通りの角度（ $\beta$ ； $\pm 2, 4, 8, 16, 32, 64^\circ$ 、

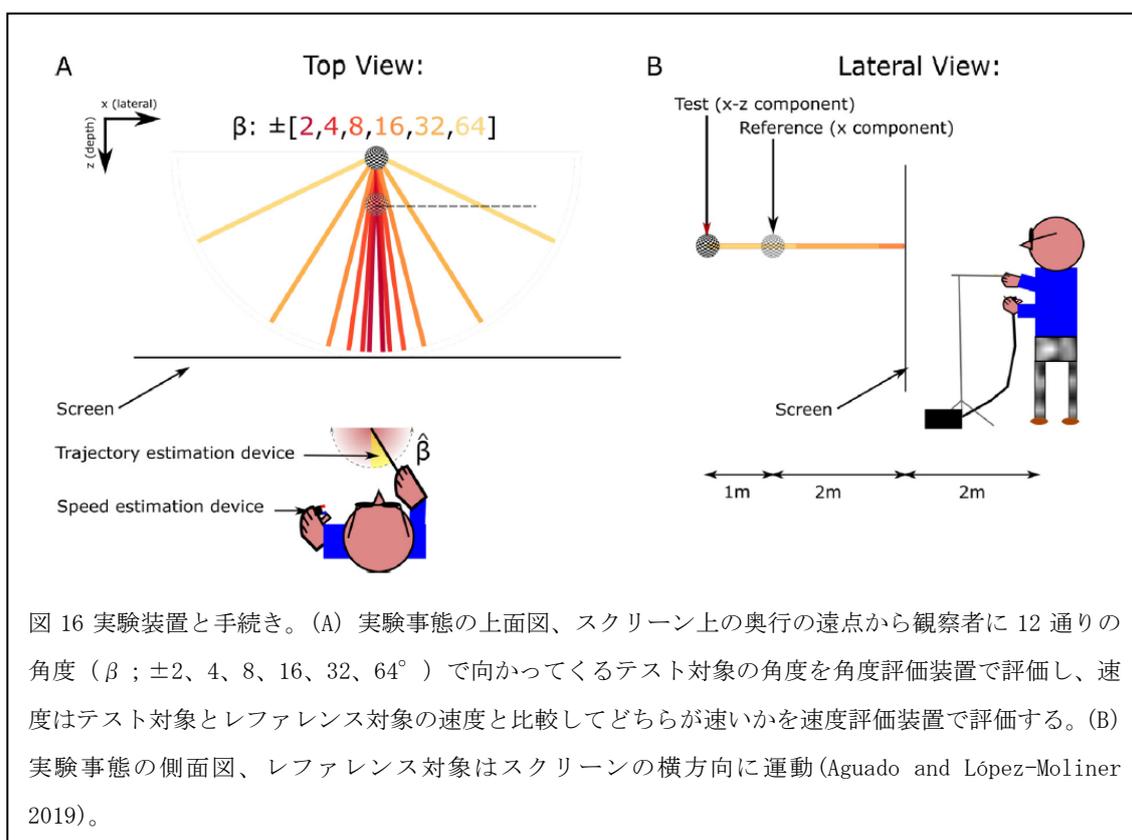


図 16 実験装置と手続き。(A) 実験事態の上面図、スクリーン上の奥行の遠点から観察者に 12 通りの角度（ $\beta$ ； $\pm 2, 4, 8, 16, 32, 64^\circ$ ）で向かってくるテスト対象の角度を角度評価装置で評価し、速度はテスト対象とレファレンス対象の速度と比較してどちらが速いかを速度評価装置で評価する。(B) 実験事態の側面図、レファレンス対象はスクリーンの横方向に運動(Aguado and López-Moliner 2019)。

16、32、 $64^\circ$ ）で運動するテスト対象（半径 3.3ccm の市松模様の球）を被験者に提示し、被験者にはその角度を角度評価装置で評価、また速度評価についてはテスト対象の速度を操作して速度が固定されたレファレンス対象（半径 3.3ccm の球、被験者から 4m に提示してスタート）と比較させどちらが速いかを速度評価装置で評価させた（図の A）。速度評価のためのレファレンス対象はスクリーンの横方向にのみ速度を変えて運動提示した（図の B）。レファレンス対象の速度は 26.5、32、37.5 deg/s の 3 通りとした。被験者は 11 名の成人で正常な裸眼あるいは矯正視力をもつ者であった。

実験の結果、速度評価については、(1)奥行方向からの対象の速度評価はその軌道が被験者に接近する ( $\beta$  が小さい) につれて過小評価され、それが横方向に逸れる ( $\beta$  が増大) につれて過小評価が小さくなりついには消失すること、(2) ウェーバー比は軌道角度 ( $\beta$  が増大) が増大すると大きくなること、(3) 遅い速度と速い速度のそれぞれの評価値の差 (slow-fast) は、それらの閾値の差より有意に大きいことがそれぞれ示された。被験者によって調整された運動軌道の角度については、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た。これは運動対象が実際の角度よりも観察者から遠くの方を速く通過するように知覚することを意味する。

これらの結果から、ウェ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。