5 章　奥行手がかりの統合

1．奥行手がかりの統合についてのモデル

顔認知における 3 次元の構造的記述問題

対象中心記述理論によれば、対象を構成する成分要素、たとえばジオンの組み合わせですべての 3 次元対象は構造的記述される(Biederman 1987, 2000, Marr & Nishihara 1978)。対象を中心にして構造記述するこの考え方は、観察者の視点が変化しても対象の形状を不変に保つことができる。対象を成分要素から構造化して組み立てるには、(1)対象が成分要素に分解可能なこと、(2)成分要素から組み立てた構造が識別可能なものであること、(3)異なった視点からも同一の構造が記述されることが、前提として必要となる。

観察者中心記述理論では、対象を視点ごとの 2 次元で記述されたものが集積貯蔵され、その 2 次元記述されたものと現に知覚している対象が照合されて識別認知される(Biederman & Kalocsai 1997, Bülthoff & Edelman 1992, Bülthoff et al.1995, Tarr & Bülthoff 1995; Tarr　& Pinker 1989)。

顔の認知の場合、これまでの研究からは、対象中心による 3 次元構造記述では照合されず、集積所蔵された 2 次元記述で照合されると仮定した方がよいと提案されている（Biederman & Kalocsai,1997, Bülthoff et al. 1995)。それは、顔認知の場合、顔を構成する成分（眼、鼻、口、あご）がすべての顔に共通し、またその構造化（口の上に鼻、その上に 2 つの左右に並んだ眼）も共通しているので、顔の造作の違いを識別認知することが難しいためと考えられた。

これに対して、自分の顔の横顔の認知は正面のそれと同等に可能なことが示された(Troje & Kersten 1999, Tong & Nakayama 1999)。これは正面から見た自分の顔経験の頻度が格段に高いことを考えると奇妙である。また、静止した顔を観察後に立体形成された顔を触知覚(haptic perception)で識別認知させたところ、チャンスレベルより高い確率で可能であった(Kilgour and Lederman 2002)。この結果は、視覚による観察経験からマルチモーダルな 3 次元記述が形成されたと解釈できる。さらに、神経心理的研究によれば後頭野の fusiform 領域(PF-LOa)では、顔対象を自然な位置に提示して順

応あるいは奥行回転して提示して順応した場合、両条件間の応答に差はないこと、また、後頭野の caudal-dorsal 領域（LO)は対象の位置変化に対して PF-LOa 領域より高く応答することが示された(Grill-Spector et al. 1999)。

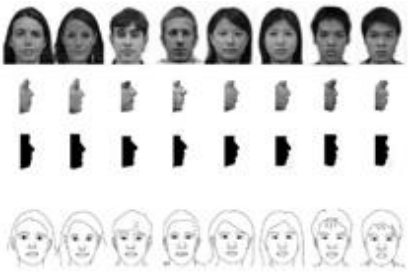

図 5.1　顔識別のための顔正面像とそのテスト図形である横顔シルエット。顔正面像は写真（上段）と線画（下段）が、テスト図形（中段）にはグレイスケール画像と黒画像が用いられた（Schwaninger & Yang 2011）

これらの結果は、顔認知においても 3 次元記述が照合の基礎になっていることを示唆する。そこで、Schwaninger & Yang(2011)は、顔の正面像からその横顔を識別できるかを検討した。この識別を可能にするためには、観察者は顔の正面像からその 3 次元モデルを心的に作成し、さらにそれに心的回転を施すこす必要がある。図 5.1 には、ターゲット刺激である顔の正面像とテスト刺激である横顔シルエット像が示されている。横顔シルエット像は、皮膚の色などの手がかりを除くためにグレイスケールおよび黒一色で表現されている。実験では、2 次元正面画像を 30 秒提示し、その後でグレイスケールの横顔シルエットをテスト刺激として提示し選択させた。その結果、有意に正しい横顔シルエット像が選択された。テスト刺激に黒色の横顔シルエット像を用いても同様な結果であった。さらに、ターゲット刺激として線画像を 30 秒提示し、黒色の横顔シルエット像でテストした場合にも有意に正しい選択がなされた。これらの結果から、顔の認知は 3 次元記述に基づいていることが支持された。顔の認知で用いられる 3 次元記述は純粋な対象中心記述とは異なり、正立に特化して記述されたものと考えられる。

2. 複数の手がかりのの統合

両眼視差変化による輻輳の奥行手がかりと刺激対象の拡大による奥行

手がかりがコンフリクト事態にある場合の絶対奥行距離知覚

両眼視差変化による輻輳の奥行手がかりによる絶対奥行距離知覚の有効性については、いまだ確定していない。刺激の明るさ要因と大きさ要因を厳密に統制した事態で、両眼視差変化による輻輳要因のみにもとづく絶対奥行距離は、個人差があるものの有効とする研究結果(Bingham & Pagano, 1998; Foley, 1977; Mon-Williams & Tresilian, 1999; Pagano & Bingham, 1998; Tresilian, Mon-Williams, & Kelly, 1999; Viguier, Clément, & Trotter, 2001) があるのに対して、この有効性を否定する結果((Erkelens & Collewijn, 1985; Regan, Erkelens, & Collewijn, 1986)も報告されている。

Gonzalez, et al.(2010)は、このような矛盾する結果が生じるのは奥行手がかり間のコンフリクトによって生じると考えた。もし、単一の刺激対象の両眼視差操作による絶対奥行距離変化が単独で提示されれば、それは奥行手がかりとして有効となるが、もし他の手がかり、とくに刺激対象の大きさを操作することによる絶対奥行距離変化とコンフリクト事態になれば、両眼視差要因は有効な奥行手がかりとならない、と考えた。そこで、両眼視差操作による輻輳の変化と刺激対象のパースペクティブ変化(ルーミング、looming)をそれぞれ、(1)単独で変化、(2)両要因が奥行に関して一致するように操作、あるいは(3)両要因が奥行に関してコンフリクトになるように操作して、奥行手がかりとしての有効性をしらべた。この事態では、絶対両眼視差単独、ルーミング変化単独、あるいはこれらの組み合わせによって刺激対象の奥行運動(motion in depth)が誘導されることになる。実験で使用した刺激パターンは図5.2に示した(A:ステレオスコープの視野全体に提示したランダム・テクスチャ・パターン、B:視野中央にドットを重ねたランダム・テクスチャ・パターン、C:円

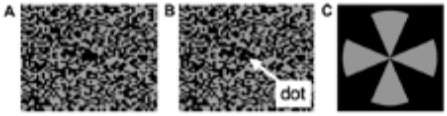

図 5.2　両眼視差操作による輻輳変化にもとづく絶対奥行距離知覚の奥行手がかり有効性をしらべる刺激事態。A:ステレオスコープの視野全体に提示したランダム・テクスチャ・パターン、B:視野中央にドットを重ねたランダム・テクスチャ・パターン、C:円形の穴の背後に放射状に広がるパターン(Gonzalez,et al.2010)

形の穴の背後に放射状に広がるパターン)。実験では、刺激対象の奥行運動印象（接近あるいは後退）を被験者に報告させるとともに輻輳運動を測定した。

観察者の報告と輻輳運動の結果から、(1)絶対両眼視差にもとづく輻輳は、それがルーミング変化と奥行に関して一致している場合には奥行運動の識別（接近あるいは後退）における奥行手がかりとして有効であること、(2)しかし、絶対両眼視差と大きさ変化とが奥行に関してコンフリクトにある場合にも絶対両眼視差による輻輳運動も手がかりとして有効であるが、ルーミング変化の方が奥行手がかりの有効性は強くなる。このことから、輻輳要因は、奥行運動の奥行手がかりとして有効であることが確認されている。

空間周波数チャンネルの統合による実風景（ナチュラル・シーン）の認知

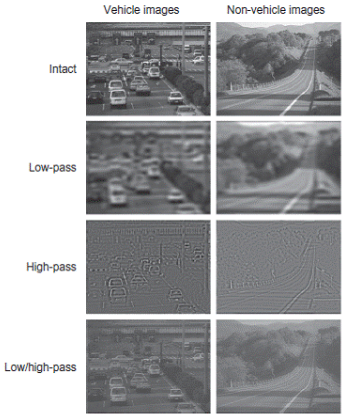

図 5. 3　実風景(intact)を低空間周波数で処理したパターン(Low-pass)、高空間周波数で処理したパターン(High-pass)および低空間周波数と高空間周波数で濾過したものの混合パターン(Low/high Pass)。左欄はターゲット（車）が存在する系列、右欄はターゲットが無い系列(Kihara & Takeda 2010)

実風景のなかのターゲット刺激の知覚は、およそ50 msec から100 msec という短時間で可能となる(Rousselet, et al. 2002、2004、Grill-Spector & Kanwisher 2005)。このような高速のターゲット知覚を可能にさせているのは、複数の空間周波数チャンネルのパラレル処理にあると考えられる(Bar et al. 2006、Oliva & Schyns 1997、Schyns & Oliva 1994、Wilson & Bergen 1979)。低空間周波数チャンネルはシーンイメージの粗いレベルの情報処理を、高空間周波数チャンネルは細密なレベルのそれを担う。そして複数の空間周波数チャンネルの統合は低空間周波数チャンネルから高空間周波数チャンネルへと行われる。つまり、低空間周波数チャンネルでの高速処理が行われ、次いでこれが

高空間周波数チャンネルの処理を促進すると考えられる(Bar 2004、Henderson & Hollingworth 1999)。

しかし、各空間周波数チャンネルの統合過程は明らかにされていない。そこで、Kihara & Takeda(2010)は、図5.3に示したように、実風景を低・高空間周波数チャンネルでそれぞれ濾過(filtering)し、刺激提示持続時間($0 < T_n$ msec)を最初の実験では3段階(33、100、250 msec)、次の実験では5段階（50、67、83、100 msec）に操作してシーン内のターゲットの検出の正確度をしらべた。空間周波数チャンネルによる濾過は、フーリエ変換によって低空間周波数の場合は3.3 cycle/deg（低空間周波数濾過条件)、高空間周波数チャンネルの場合は5 cycle/deg（高空間周波数濾過条件）で実施した。また、低空間周波数濾過と高空間周波数チャンネル濾過によるイメージを混合した条件（低＋高空間周波数濾過条件）を加えた。このような実験事態では、もし低空間周波数チャンネルと高空間周波数チャンネル過程が別々に処理され統合されることで対象が知覚されるならば、これらをあらかじめ混合した「低＋高空間周波数濾過条件」の検出確率が高くなると予測される。しかし、低空間周波数チャンネルと高空間周波数チャンネル過程の統合がなければ、「低＋高空間周波数濾過条件」の検出確率は他の条件と同等と予測される。実験の結果、「低＋高空間周波数濾過条件」の検出確率は100 msecの刺激提示持続時間の場合、確率的加重モデルによる検出確率（低空間周波数条件の正確度と高空間周波数の正確度を加算した値の平方根）より高くなること、しかし刺激提示持続時間が83 msec以下ではその検出確率は高くはならなかった。つまり、空間周波数チャンネル情報の統合による対象の知覚は、シーンイメージが提示されてから83から100 msecの間でなされると考えられる。また、低空間周波数チャンネル情報の方が高空間周波数チャンネル情報より刺激提示時間に伴う検出確率が高いことが示された。これは、粗いレベルの情報処理過程が細密なそれよりも速く処理されることを意味する。

これらの結果から、シーンでのターゲットの検出は、低空間周波数チャンネル情報処理から高空間周波数チャンネル情報処理へと進みながら、少なくとも100 msec以内で統合されて成されると考えられる。

3 次元空間関係を偏向させる「位置」と「面のテクスチャ」要因の手がかり普遍化（キュー・リクルート、cue recruitment）

Backus(2011)は、ある視覚手がかりが新たな手がかりとしてシーンの知覚に用いられる学習が起こることを「手がかりの新たな補充(キュー・リクルート、cue recruitment)」と名づけた。たとえば、2 通りの回転方向が知覚できる事態で、どちらか一方向の知覚のみが生起するようにトランスレーション方向、奥行位置関係、あるいは形状を操作して知覚体験させると、操作した方向への知覚バイアスが生起し、キュー・リクルートが生じるという (Haijiang et al.2006, Backus & Haijiang 2007, Harrison & Backus 2012)。これらのキュー・リクルートにはすべて運動要因が関係しているので、運動野、とくにMT 野、MST 野に特異的な現象と推定された。

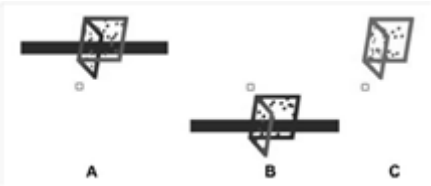

図5.4　キュー・リクルート実験に使用した刺激パターン。AとBには学習訓練に使用した図形で両眼視差を付け両眼立体視させるので奥行方向が一義的に知覚できる。Cは単眼視観察では多義的に知覚されるテスト図形 (Jain & Backus 2013)。

そこで、キュー・リクルートは運動要因が関わらない場合にも生起するかについて Jain & Backus(2013)によって検討された。実験１では、キュー・リクルートの学習訓練のために図5.4のAとBの刺激図形に両眼視差を付け両眼立体視で提示し、刺激の奥行方向を一義的に知覚させる訓練学習を実施する。この刺激図形の２つの面に長い棒状刺激が通すことで本が観察者手前に開いている (B)か、あるいは観

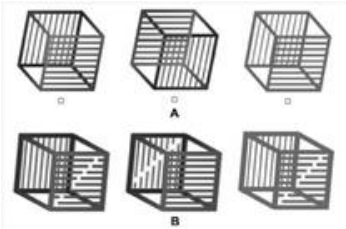

図5.5　キュー・リクルート実験に使用したネッカーキューブ・パターン。。左端と中央のパターンは学習訓練用刺激、右端はテスト用刺激(Jain & Backus 2013)

察者からの向こう側に開いているか（A)を操作し、その２つの面の奥行位置を一義的に設定してキュー・リクルート効果をしらべた。訓練学習後のテストでは、図のＣに示した多義的に知覚される図形を提示し単眼視観察させ、２つの面のいずれが手前に視えるかを報告させた。さらに実験２では、ネッカーキューブ・パターンを利用し、その面に付したテクスチャの手がかりを操作してキュー・リクルート効果がしらべられた（図5.5)。学習訓練では、このネッカーキューブ・パターンに付したテクスチャ手がかりが両眼視差の示す奥行方向と一致するように操作して両眼立体視で提示した。この場合、両眼視差を学習訓練の間中提示する条件と新規な手がかり効果を増進させるため訓練途中で片眼を非提示にする条件を設定した。学習訓練用後、どの面が観察者から手前に視えるかがテストされた。

その結果、実験１では、学習訓練で示した奥行手がかりの知覚的偏向が生起し、このキュー・リクルート効果は翌日まで持続することが示された。実験２では、テクスチャに斜方向にギザギザ線分をいれ観察者の注目度を高めたパターンを用い訓練途中で片眼を非提示にする条件でのみネッカーキューブの面の奥行出現方向に関して、キュー・リクルート効果が示された。これらのことから、多義的な刺激の奥行位置関係についてのキュー・リクルート効果は、刺激に運動要因が絡まなくても生起すると考えられる。

奥行方向での運動対象の奥行手がかり間の相互作用

Howard et al.（2014）は、奥行方向へ運動する対象の奥行手がかり間の相互作用について実験的に検討した。実験では、ルーミング（対象の拡大縮小)、絶対視差の変化（両眼が静止点を注視する際の奥行方向に運動する一つの対象の運動に伴う視差であり、両眼が運動対象を注視し続ければ、両眼輻輳もこれに連動して変化するので視差を規定するのと同一の方法で輻輳も規定でき

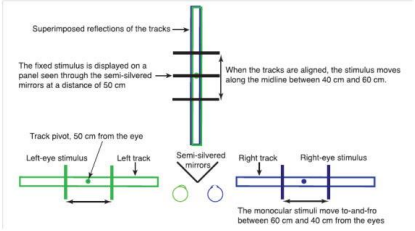

図5.6　dichoptiscope のしくみ。（Howard et al. 2014)。

る)、相対視差の変化（2 つの奥行位置を異にした 2 つの対象間の視差で、対象のある奥行位置での輻輳と別の位置での輻輳との間の差）の 3 種類の奥行手がかりが設定された。実験刺激は筆者らが開発した dichoptiscope を用いて提示された。これは図 5.6 に示されている。

図 5.7 dichoptiscope のディスプレイ。両眼視差あるいはルーミング単独、もしくは両手がかりで運動して提示。（Howard et al. 2014）。

赤と青の表示パターンは奥行 40 から 60cm の間で、両眼視差あるいはルーミング単独、もしくは両手がかりで運動して提示。背景の白文字行列は静止刺激（レファレンス）として提示される。図 5.7 は dichoptiscope のしくみで図の左右に左眼用と右眼用の運動刺激提示装置であるトラックがあり、これらはハーフミラーを通して両眼視され、図 4.8 のように、視線上の奥行方向に提示される。提示刺激はテクスチャ刺激もしくはドット刺激とした。図 5.8 には操作した 4 通りの輻輳条件（Normal, Constant, Increased, Reversed Vergence)が示されている。ルーミング、両眼輻輳、相対視差の各手がかりを別々に操作した。すなわち、ルーミング要因が有る条件と無い条件、輻輳要因が 4 通り、そして相対視差が有る条件と無い条件で、表 4.1 のように 10 通りの実験条件が設定された。被験者には別に用意した測定装置のロッドを手で掴み、それをトラックに沿って動かすことで運動対象の視えの奥行と速度に合うように調整させた。実験では、ドット単独条件、ドットの相対視差条件、テクスチャ単独条件、テクスチャの相対視差条件ごとに、輻輳単独要因、ルーミング単独要因、輻輳＋ルーミング要因の手がかりの奥行効果がしらべられた。その結果、(1) ドット単独条件ではルーミング単独は奥行効果をほとんど生起させない

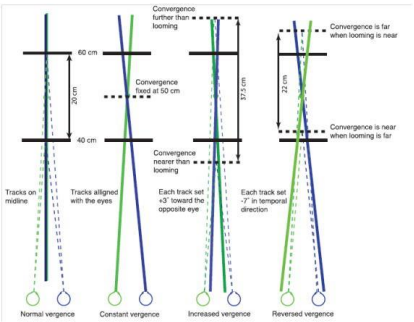

図 4.8　実験で操作された 4 種類の輻輳条件 (Normal, Constant, Increased, Reversed vergence) (Howard et al. 2014)。

が輻輳要因および「輻輳＋ルーミング」は奥行効果を生起させる、(2) ドットに相対視差を加えた条件では、ルーミング要因単独では奥行効果は小さいが輻輳要因とくに「輻輳＋ルーミング要因」は奥行効果を強める、(3) テクスチャ単独条件では輻輳要因による奥行効果は生起しないが、ルーミング要因および「輻輳＋ルーミング要因」は奥行効果を生じさせる、(4) テクスチャに相対視差を加えた条件では輻輳単独要因、ローミング単独要因、「輻輳＋ルーミング要因」ともに奥行効果が高いが、とくに「輻輳＋ルーミング要因」ではその効果が大きい、ことなどが示された。ルーミングと輻輳要因がコンフリクトさせた事態（正常なルーミングに対して輻輳が反対方向を指示する事態）では、刺激条件（ドットあるいはテクスチャ）で奥行効果が異なり、ドット条件（ドット単独、ドットの相対視差）ではルーミング要因は弱く主に輻輳要因によって奥行効果は決められ、また逆にテクスチャ（単独あるいは相対視差）条件ではルーミング要因が奥行効果を支配した。

表 4.1　ルーミング、輻輳、相対視差の手がかりを組み合わせた 10 通りの実験条件 (Howard et al. 2014)

Looming	Vergence demand	Relative disparity	Condition, reference
No	Normal	No	Vergence only, alone
		Yes	Vergence only, relative
Yes	Normal	No	Normal, alone
		Yes	Normal, relative
	None	No	Looming only, alone
		Yes	Looming only, relative
	Reversed	No	Vergence reversed, alone
		Yes	Vergence reversed, relative
	Increased	No	Vergence increased, alone
		Yes	Vergence increased, relative

これらの結果は、輻輳を単独で変化させてもテクスチャ条件では運動奥行効果は生起しないがドット条件では奥行効果を生じること、ルーミング要因は単独でもテクスチャ

条件では強い運動奥行効果を示すがドット条件では示さないこと、さらにルーミングと相対視差が反対方向の奥行運動を指示する事態では観察者によってどちらの手がかりが優先するかは異なることを示した。これらのことから、複数の奥行手がかりが働く事態では、それらの手がかりが結合するよりは分離して働くと考えられる。

スラント(slant)知覚におけるテクスチャと両眼視差の重み付け

ボロノイ形状のテクスチャ勾配によるパターンが、図5.9示されている。このパターンの右は30°のスラント面を、左は50°のスラント面をシミュレートしたものであるが、実際には30°スラント面は前額平行面に、50°スラント面は傾斜角度が過小視されて知覚される(Todd et al. 2005; Todd et al. 2007;Todd et al. 2010)。このようなスラント面の過小視は、テクスチャの大きさと密度の要因の全体的変化、すなわちテクスチャの大きさの最大(Smax)と最小(Smin)の比率{(Smax-Smin)/ (Smax-Smin)}によって規定される(Todd, et al(2007))。

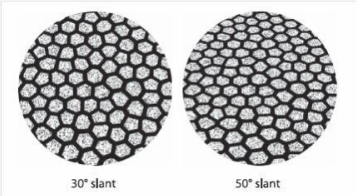

図5.9 ボロノイ形状のテクスチャによるスラントで左像は30°、右像は50°をシミュレートしてある(Saunders & Chen 2015)

さらに、この種のスラント面の過小視に関わる別の要因として、テクスチャ勾配に伴うボケ(blur)の勾配要因(Watt et al. 2005、Norman et al.2009)、および一様な前額に平行な面を知覚しようとする傾向(知覚的バイアス、(Gogel, 1965; Hillis et al., 2004)が存在している。これは、テクスチャ勾配そのものがバイアスのかかった手がかりであるためにスラント面の知覚が正しく成されないのか、あるいはテクスチャ勾配は正しく知覚されているが、それ自体は弱い手がかりのために他の手がかりの影響を受けてスラント面が正しく知覚されないのか、を意味する

このような異なる２つの奥行手がかり（情報）のスラント知覚に対する効果は、ベイズの定理を適用して、手がかり効果に対する知覚前の仮定と知覚後の評価からもっとも可能性に高い結果を予測（尤度）することで明らかにできる。相対的な２つの手がかり

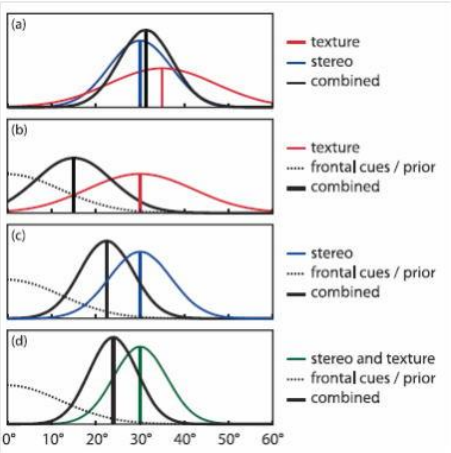

図5.10　2つの奥行手がかりによるスラント知覚のベイズ確率からの予測。(a)テクスチャ（赤色）と両眼視差（青色）別々のスラント角度に伴う尤度曲線の変化、およびこれらの２つの手がかりの結合した尤度曲線（点線）。(b)観察している面が前額平行であるとする事前の知覚傾向（点線で表示、スラント角度０°が最大の手がかり効果）はテクスチャの手がかり信頼度を小さくする。(c) 前額平行であるとする事前の知覚傾向の両眼視差に対する偏向度は小さいので、これら２つの手がかりの結合した尤度曲線の最大値は両眼視差が指示するスラントに近くなる。(d)テクスチャと両眼視差が同一のスラント角度を指示し、かつ前額平行であるとする事前の知覚傾向をもつ場合の結合させた尤度曲線は、両手がかりの結合尤度曲線にもっとも近似したものとなる(Saunders & Chen 2015)

の知覚後の効果の程度は、手がかり間の相互の尤度関数から求められる。図5.10は、テクスチャと両眼視差２つの奥行手がかりによるスラント知覚のベイズ確率からの予測が示されている。(a)には、テクスチャ（赤色）と両眼視差（青色）別々のスラント角度に伴う尤度曲線の変化、およびこれらの２つの手がかりの結合した尤度曲線（点線）を示す。ここではテクスチャはスラント角度全体に広く手がかり効果をもつが、両眼視差に比較するとその手がかり効果は劣ると仮定されている。(b)には、観察している面が前額平行であるとする事前の知覚バイアス（点線で表示、スラント角度０°が最大の手がかり効果）はテクスチャの手がかり信頼度を小さくすることを仮定し、この知覚バイアスをテクスチャと結合させた場合の尤度曲線の最大値は前額平行方向にシフトすることを示す。(c)には、前額平行であるとする事前の知覚傾向の両眼視差に対する偏向度は小さいと仮定し、これら２つの手がかりの結合した尤度曲線

の最大値は両眼視差が指示するスラントに近くなることを示す。(d)には、テクスチャと両眼視差が同一のスラント角度を指示し、かつ前額平行であるとする事前の知覚傾向をもつ場合の結合させた尤度曲線は両手がかりの結合尤度曲線にもっとも近似したものとなることを示す。

Saunders & Chen(2015)は、図5.9に示したボロノイ形状のテクスチャパターンを単眼視と両眼視条件で提示し、そのスラント角度を被験者の手に装着したボードの角度で再現させた。ボードにはセンサーが3個ついていて、その角度を自動計算して記録できた。実験は、テクスチャのみの条件、両眼視差のみの条件、テクスチャと両眼視差の条件で実施された。テクスチャと両眼視差条件の場合、両要因の指示する角度が一致する場合と5°不一致の場合とを設けた。また、スラント角度自体は5°から60度の間で設定された

実験の結果、テクスチャのみの条件でのスラント角度の知覚は前額平行への知覚バイアスが大きくあらわれること、この場合スラント角度が大きいより小さい場合の方が前額平行へのバイアスが高いことが示された。また、両眼視差条件でのスラント角度の知覚はもっとも正確で、これにテクスチャ要因が加わっても正確度は変わらないことも示された。これらの結果は、前額平行面への知覚バイアスはスラント面についての手がかり情報の信頼度が高いと小さくなることを示した。さらに、テクスチャと両眼視差の指示するスラント角度に5°の不一致をつけ、2つの手がかりのスラント知覚に与える重みをしらべた条件では、テクスチャ要因は両眼視差要因が働いている場合にも重要な手がかりであり、スラント角度が大きくなるにつれてその効果も増大した。

これらの結果から、スラント知覚における前額平行への知覚的バイアスと奥行手がかり（テクスチャと両眼視差）の効果の程度は、前額平行への知覚バイアス要因とその知覚前の前額平行への知覚バイアス要因を最適に統合するベイズ確率モデルの予測と一致することが明らかにされている。

眼球運動と手動作の個々の運動あるいは協応運動における対象の大きさ錯覚の影響

日常生活では視覚に導かれた行動、とくに眼の運動と手の運動は個々別々になされるが、しかし協応して働く。Gamble & Song(2017)は、眼のサッケード運動と指さし運動

(pointing)、言い換えると、行動の準備と遂行が同一の視覚的表象によっているか、さらにはこれら眼と手の運動が別個に働く場合、あるいは協応して働く場合とで違いが生じるかを実験してしらべた。実験は、図5.11に示したように、まずディスプレイに被験者に求める動作の教示を提示後、注視点を提示し、その後に注視点を挟んで2個の円刺激を提示した。それらの円刺激は直径を10㎜(1.09°)、20㎜(2.17°)、30㎜(3.26°)、40㎜(4.34°)㎜とし、壁のように置かれたポンゾー錯視形を背景として大きさ錯視を生じさせた。錯視を用いたのは知覚された対象の大きさと物理的大きさの影響を別々に分離してしらべるためである。これらの円刺激は、ポンゾー錯視の影響を受けて、遠くに視える円刺激は物理的刺激より拡大して、近くに視える円刺激は縮小して知覚されることが予備実験で確認されたので、本実験でこの円刺激の測定値が結果の分析に用いられた。実験1では、指さしと眼球サッケードを分離するために、被験者には指さし課題では注視点から眼をそらさないように指示されたターゲットの円刺激を指さすように教示し、初動までの潜時(initiation latency)、指さしの動作時間(movement time)、動作の最高速度(peak velocity)、そしてコンスタントエラー(constant error、2つのターゲットの中央位置と指さした位置の間の距離)が測定され、また眼球サッケード課題では指を所定に位置に置いたまま、指示されたターゲットに眼を移すように指示され、刺激提示からサッケード開始までの時間、サッケードの最大速度、コンスタントエラーが測定された。なお、統制条件として物理的大きさのターゲットも加えた。

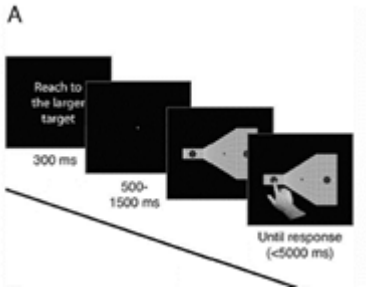

図5.11　眼球運動と手の動作の協応実験の手続き。ディスプレイに被験者に求める動作の教示が提示され、注視点の後にそれを挟んで2個の円刺激が提示される(Gamble & Song 2017)。

その結果、両課題での初動までの潜時はターゲットが物理的と知覚的の両方の拡大条件で短くなった。初動潜時が短いことは眼球と筋肉の効果器の準備反応が促進されたこ

とを意味した。またサッケード課題とターゲット課題の初動潜時間の相関をとると、正(0.66)となり、サッケードが指さしよりターゲットの大きさ錯視条件で影響を受けやすいと考えられた。

そこで、ターゲットの大きさ錯視条件で指さし遂行とサッケード眼球運動との協応をしらべるために、自由な眼球運動のもとで実験１と同様に、動作潜時、動作時間、サッケードの動作潜時、サッケードの動作時間を測定した。その結果、対象の大きさ錯覚がサッケードの初動潜時に影響した被験者は、同時に指さしの初動潜時にも影響した。このことから眼球と指さしの２つの効果器にまたがる準備反応のための共通のしくみの存在が示唆された。またサッケードと指さしの遂行に影響するのは物理的大きさで、知覚された大きさではないことが示された。さらに指さしとサッケードが協応した場合、指さしは錯覚された対象の大きさに影響されなかったが、サッケードは錯覚された大きさによってその準備と遂行に影響が示された。とくに指さしとサッケードの準備反応をみると、錯覚された対象の大きさは指さし準備よりサッケード準備により影響し、これは課題単独条件より協応条件で顕著であった。

結局、視覚系と運動系の協応は、視覚系によって支配された効果器の行動の準備によっている考えられる

3. その他の研究

経験による知覚的バイアスの長期持続効果とあいまいな回転方向をもつネッカーの立方体の知覚

ある知覚バイアスをあらかじめ経験させると、それが一種の学習されたバイアスとなって長期的に知覚的影響を与える(Haijiang et al. 2006, Harrison & Backus 2010)。Harrison, et al.(2011)は、ネッカーの立方体をある方向に奥行手がかりを付けて方向が一義的に視えるように回転提示し、その知覚的バイアス効果を１日後に方向が一義的に視えないネッカーの立方体をテスト刺激として回転提示し、その回転方向を報告させることでしらべた。図5.12 は実験で提示した回転するネッカーの立方体を示す。図中(a)は両眼視差（赤緑フィルターを観察者に装着して視差を導入）とオクルージョンを手がかりに垂直軸を中心に回転させる事態で、オクルージョンは回転軸と立方体との間で

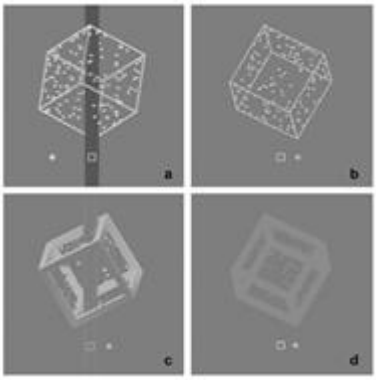

図5.12　回転提示するネッカーの立方体。a：両眼視差とオクルージョンを手がかりに垂直軸を中心に回転、オクルージョンは回転軸と立方体との間で生起。b: 両眼視差とオクルージョン手がかりを除いた条件で視えの回転方向が多義的となる。c: 立方体の内と外で生起するオクルージョン、陰影、大気（もや）の3要因を手がかりとした条件で視えの回転方向は一義的となる。d:テスト刺激。それぞれの図形の下部に示した小四角形は注視点を、ドットは左右に運動して提示して立方体の視えの回転方向をこれと同方向あるいは反対方向かで判断させる(Harrison et al.2011)

生起させる（両眼視手がかり条件)。(b)は両眼視差とオクルージョン手がかりを除いた条件で単眼観察させると視えの回転方向が多義的となる（a の手がかり除去条件)。(c)立方体の内と外で生起するオクルージョン、陰影、大気（もや）の3要因を手がかりとした条件で視えの回転方向は一義的となる（単眼視手がかり条件)。(d)単眼視手がかりを除いた条件で視えの回転方向は多義的となる（ｃの手がかり除去条件)。それぞれの図形の下部に示した小四角形は注視点を示し、またドットは左右に運動して提示し、立方体の視えの回転方向をこれと同方向あるいは反対方向かで判断させる。実験手続きは、1 日目に両眼視手がかりをもつ立方体およびで奥行手がかりが存在しないために多義的となる立方体を組み合わせて多数回（各 240 回）一定方向で回転提示して経験させ、2 日目には両立方体の回転方向を反対にとって提示し、そのときの視えの回転方向を判定させた。このとき、前日に形成された回転方向についての知覚バイアスによって後日の視えの回転方向が影響受ければ、手がかり除去条件での視えの回転方向に前日と同方向のバイアスがかかると予想される。実験グループは、1 日目に提示する条件と 2 日目に提示する条件（1 日目：2 日目）が、(1)両眼手がかり：両眼手がかり、(2)両眼手がかり：単眼手がかり、(3)単眼手がかり：両眼手がかり、(4)単眼手がかり：単眼手がかり、の４通り

を設定した。

実験の結果、2日目に実施された手がかり除去した立方体の視えの回転方向は、1日目の手がかりが両眼視あるいは単眼視に関わらず、前日の回転方向への偏向を示した。また、両眼視もしくは単眼視手がかりの一義的回転条件だけで知覚バイアスを形成し、2日目に1日目と同一もしくは異なる手がかりと回転方向に設定した事態では、多義的な立方体の視えの回転は、両眼視手がかり条件より単眼視手がかり条件の方が強いバイアス効果を示した。

これらの結果は、立方体の手がかりが両眼視的あるいは単眼視的のいかんにかかわらずに、それが知覚的バイアスを生じさせることを意味する。さらに、単眼視的手がかり条件での知覚的バイアスの形成が強いのは、単眼視的手がかりが神経生理的レベルで知覚的回転をより強く活性化させるのか、あるいは多義的回転を処理する領域と単眼視的手がかりのそれとが同一であるためか、そのいずれかと考えられる。

顔認知における3次元の構造的記述問題

対象中心記述理論によれば、対象を構成する成分要素、たとえばジオンの組み合わせですべての3次元対象は構造的記述される(Biederman 1987, 2000, Marr & Nishihara 1978)。対象を中心にして構造記述するこの考え方は、観察者の視点が変化しても対象の形状を不変に保つことができる。対象を成分要素から構造化して組み立てるには、(1)対象が成分要素に分解可能なこと、(2)成分要素から組み立てた構造が識別可能なものであること、(3)異なった視点からも同一の構造が記述されることが、前提として必要となる。

観察者中心記述理論では、対象を視点ごとの2次元で記述されたものが集積貯蔵され、その2次元記述されたものと現に知覚している対象が照合されて識別認知される(Biederman & Kalocsai 1997, Bülthoff & Edelman 1992, Bülthoff et al.1995, Tarr & Bülthoff 1995; Tarr & Pinker 1989)。

顔の認知の場合、これまでの研究からは、対象中心による3次元構造記述では照合されず、集積所蔵された2次元記述で照合されると仮定した方がよいと提案されている(Biederman & Kalocsai,1997, Bülthoff et al. 1995)。それは、顔認知の場合、顔を

構成する成分（眼、鼻、口、あご）がすべての顔に共通し、またその構造化（口の上に鼻、その上に2つの左右に並んだ眼）も共通しているので、顔の造作の違いを識別認知することが難しいためと考えられた。

これに対して、自分の顔の横顔の認知は正面のそれと同等に可能なことが示された(Troje & Kersten 1999, Tong & Nakayama 1999)。これは正面から見た自分の顔経験の頻度が格段に高いことを考えると奇妙である。また、静止した顔を観察後に立体形成された顔を触知覚(haptic perception)で識別認知させたところ、チャンスレベルより高い確率で可能であった(Kilgour and Lederman 2002)。この結果は、視覚による観察経験からマルチモーダルな 3 次元記述が形成されたと解釈できる。さらに、神経心理的研究によれば後頭野の fusiform 領域(PF-LOa)では、顔対象を自然な位置に提示して順応あるいは奥行回転して提示して順応した場合、両条件間の応答に差はないこと、また、後頭野の caudal-dorsal 領域 (LO)は対象の位置変化に対して PF-LOa 領域より高く応答することが示された(Grill-Spector et al. 1999)。

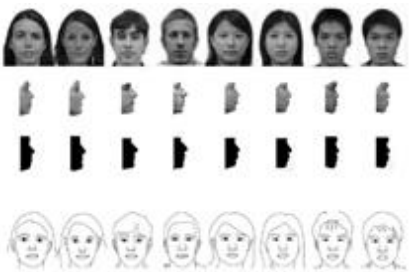

図 5.13　顔識別のための顔正面像とそのテスト図形である横顔シルエット。顔正面像は写真（上段）と線画（下段）が、テスト図形(中段)にはグレイスケール画像と黒画像が用いられた(Schwaninger & Yang 2011)

これらの結果は、顔認知においても 3 次元記述が照合の基礎になっていることを示唆する。そこで、Schwaninger & Yang(2011)は、顔の正面像からその横顔を識別できるかを検討した。この識別を可能にするためには、観察者は顔の正面像からその 3 次元モデルを心的に作成し、さらにそれを心的回転を施すこす必要がある。図 5.13 には、ターゲット刺激である顔の正面像とテスト刺激である横顔シルエット像が示されている。横顔シルエット像は、皮膚の色などの手がかりを除くためにグレイスケールおよび黒一色で表現されている。実験では、2 次元正面画像を 30 秒提示し、その後でグレイスケー

ルの横顔シルエットをテスト刺激として提示し選択させた。その結果、有意に正しい横顔シルエット像が選択された。テスト刺激に黒色の横顔シルエット像を用いても同様な結果であった。さらに、ターゲット刺激として線画像を30秒提示し、黒色の横顔シルエット像でテストした場合にも有意に正しい選択がなされた。これらの結果から、顔の認知は3次元記述に基づいていることが支持された。顔の認知で用いられる3次元記述は純粋な対象中心記述とは異なり、正立に特化して記述されたものと考えられる。

4. 得られた知見

(1)両眼視差変化による輻輳の奥行手がかりと刺激対象の拡大による奥行手がかりがコンフリクト事態の絶対奥行距離知覚がしらべられ、絶対両眼視差にもとづく輻輳は、それがルーミング変化と奥行に関して一致している場合には奥行運動の識別（接近あるいは後退）における奥行手がかりとして有効であるが、しかし、絶対両眼視差と大きさ変化とが奥行に関してコンフリクトにある場合にはルーミング変化の方が奥行手がかりの有効性は強くなった。このことから、輻輳要因は、奥行運動の奥行手がかりとして有効である。

(2)空間周波数チャンネル情報の統合による対象の知覚は、シーンイメージが提示されてから83から100 msecの間でなされ、また、低空間周波数チャンネル情報の方が高空間周波数チャンネル情報より刺激提示時間に伴う検出確率が高いことが示された。シーンでのターゲットの検出は、低空間周波数チャンネル情報処理から高空間周波数チャンネル情報処理へと進みながら、少なくとも100 msec以内で統合されて成されると考えられる。

(3)多義的な刺激の奥行位置関係についてのキュー・リクルート効果（「手がかりの新たな補充）は、刺激に運動要因が絡まなくても生起する。

(4)奥行方向へ運動する対象の奥行手がかり間の相互作用については、輻輳を単独で変化させてもテクスチャ条件では運動奥行効果は生起しないがドット条件では奥行効果を生じること、ルーミング要因は単独でもテクスチャ条件では強い運動奥行効果を示すがドット条件では示さないこと、さらにルーミングと相対視差が反対方向の奥行運動を指

示する事態ではどちらの手がかりが優先するかは観察者によって異なることを示し、複数の奥行手がかりが働く事態では、それらの手がかりが結合するよりは分離して働く。
(5) スラント知覚における前額平行への知覚的バイアスと奥行手がかり（テクスチャと両眼視差）の効果の程度は、前額平行への知覚バイアス要因とその知覚前の前額平行への知覚バイアス要因を最適に統合するベイズ確率モデルの予測と一致する。

6 章. 視空間の構造

1. 視空間の距離知覚

1.1 絶対奥行距離知覚の新しい両眼性手がかり

日常の視空間内にある対象までの奥行距離（絶対奥行距離）の知覚では、両眼視差、運動視差、眼筋性要因、絵画的要因、認知的要因などの奥行手がかりが利用される。しかし、ひとつの対象のみが存在する暗空間では、奥行手がかりが眼筋性要因にのみ限定されるので、絶対奥行距離知覚は、遠い対象は過小視され、近くの対象は過大視されるようになり、観察者から一定の奥行距離位置に収斂される傾向をもつ(Foley, 1980; Gogel, 1961;Gogel & Tietz, 1973)。一方、暗空間内にあるひとつの対象に参照枠（もうひとつの対象あるいは視覚的枠組み）を導入すると、絶対奥行距離知覚は正確になる(Brenner & van Damme, 1999; Coello & Magne, 2000; Foley, 1977)。参照枠あるいは参照刺激が導入されると、絶対奥行距離が正確になることを説明する仮説として、”stable reference”仮説、“better precision”仮説、“peak disparity”仮説、”limiting factor” 仮説がある。”stable reference” 仮説は、絶対奥行距離知覚は安定した知覚判断の枠組を提供する参照対象（常に固定した位置に提示）に基づくので奥行距離判断の正確度が増す、と説明する(Glennerster, et al. 2006)。

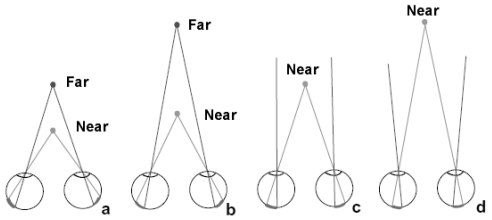

図 5.1　近対象と遠対象に対する両眼視差の関係。(a) 両眼視差範囲を一定とするためには第１の対象の奥行距離が近ければ第２の対象の奥行距離も近づけなければならない、(b) 第１の対象をより遠くに設定すれば第２の対象も比例して遠くに置かなければならない、(c) 第２の対象の奥行位置が無限大に設定されると、両眼視差範囲を一定にとるためには第１の対象の奥行位置は、無限大に位置した対象との間の相対的視差に依存して、ある奥行距離に限定される、(d) 第１の対象の奥行位置が（ｃ）条件より遠くに設定されると、第２の対象の輻輳は成立しなくなる(Sousa, et al. 2010)

“better precision” 仮説は、対象までの絶対奥行距離判断は参照対象までの距離判断の後で両者間の相対的視差を利用して行われるので、その正確度が増す、と説明する。“peak disparity” 仮説は、2 個の対象間の相対的な両眼視差の範囲は、それらの対象がともに近い場合には視差は大きく、逆にともに遠い場合には視差が小さくなることを考慮して絶対奥行距離判断がなされる、と説明する(Glennerster, et al. 1998)。

一方で、Sousa et al.(2010)が提唱する”limiting factor” 仮説は、絶対奥行距離知覚の手がかりとして 2 個の対象間の相対的視差を利用するには、一定の限界があると考える。図 5.1 に示したように、両眼視差範囲を一定とするためには第１の対象の奥行距離が近ければ第２の対象の奥行距離も近づけなければならない(図１－a)し、第１の対象をより遠くに設定すれば第２の対象も比例して遠くに置かなければならない(図－b)。また、第２の対象の奥行位置が無限大に設定されると、両眼視差範囲を一定にとるためには第１の対象の奥行位置は、無限大に位置した対象との間の相対的視差に依存して、ある奥行距離に限定されるので、第１の対象はその位置で絶対奥行距離が判断される(図－c)。さらに、第１の対象の奥行位置が（ｃ）条件より遠くに設定されると、第２の対象の輻輳は成立しなくなる。

そこで、Sousa et al.()は、図 5.2 に示したような８種類の実験条件で両眼視差を用いたバーチャル・リアリティ空間を構成し、４つの仮説のいずれが正しいかを検討した。実験では、参照枠の有無、参照枠の提示奥行距離の固定と可変、および指先による指示対象（球体もしくは立方体）の３条件を操作した８種類の実験事態で実施された。球体は奥行位置が変わるとともにその視角を不規則に変化させたが、一方、立方体は奥行位置が変わるとともにその視角を比例して変化させた。被験

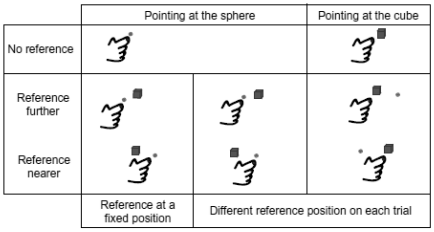

図 5.2　参照枠の有／無、参照枠の提示奥行距離の固定／可変、および球体／立方体の指示対象の３条件を操作した８種類の実験事態(Sousa, et al. 2010)

者は、対象が知覚されたらダイオードを装着した人差し指（被験者には視えない）で対象にタッチするように求められ、また人差し指の位置は３次元で計測された。対象は球体と立方体で、単独もしくは両方が、空間（８×８×20 cm）内に提示され、いずれかが指さしの対象とされた。”stable reference”仮説によれば、参照枠の奥行位置が変わる事態より固定した事態の方が、対象に対する絶対奥行距離判断は正確となると予測される。“better precision” 仮説は、立方体を参照枠として球体を指示する場合と球体を参照枠とし立方体を指示する場合で絶対奥行判断の正確度が異なると予測する。なぜならば、立方体は奥行距離に比例して視角が変化するとともに輻輳角も比例して変化するが、球体は奥行距離に伴う視角変化が不規則なために、立方体を指示する場合には、単独提示あるいは球体が参照枠として提示されていても絶対奥行距離の判断の正確度に差はない。しかし球体を指示する場合には参照枠として提示される立方体がある場合と無い場合とでその正確度は異なる。“peak disparity” 仮説によると、対象と参照枠との間の奥行距離が変わる事態では、２つの対象間の奥行距離が小さい場合にはそれが大きい場合に比較して、被験者は２つの対象が遠くにあると判断すると予測する。最後に、”limiting factor” 仮説は、対象と参照枠との間の奥行距離が変わる事態では参照枠がひとつの対象より遠くにある場合にのみ被験者は２つの対象が遠くにあると判断し、その他の事態では参照枠が存在しない場合と同等の奥行距離判断を示すと予測する。

実験の結果、次のことが明らかにされた。(1)対象までの指さし距離は参照枠の奥行提示位置が固定された場合と可変の場合とで差がないことから、”stable reference”仮説は支持されない。(2)参照枠の奥行定位効果は球体指差し事態より立方体指差し事態で小さくなることから“better precision” 仮説は支持されない（立方体は正確に奥行定位されてしまうので、参照枠が提示されても奥行定位は改善の余地がない）。(3) 参照枠が指差し対象より近方にある場合と遠方にある場合で奥行定位距離は変わらないことから“peak disparity” 仮説も支持されない。(4)指さし対象までの奥行距離定位が正確になるのは、第２の対象である参照枠が指差し対象より遠方に定位された場合のみであることから、”limiting factor” 仮説は支持される。結局、２つの対象のみが暗室空間に存在する場合の近方の絶対奥行距離知覚は、両眼に形成される遠方の対象につ

いての輻輳角が一定の奥行距離以上にはならないので、２つの対象間の相対視差によって決められると考えられる。

長大奥行距離空間での相対的奥行距離知覚

運動視差と両眼視差の奥行手がかりによる相対的奥行距離知覚が長大奥行空間でも有効かについて、Gillam,et al.(2010)によってしらべられた。長大奥行空間には暗黒のトンネルが利用され、実験では観察距離 40 m から 288 m の範囲で 2 個の発光ダイオードが提示された。観察条件は、頭部運動条件での両眼視、頭部運動条件での単眼視、頭部静止条件での両眼視、頭部静止条件での単眼視とし、相対的奥行は量推定法で測定した。

その結果、もっとも正確に相対的奥行距離を推定できた条件は、頭部運動条件での両眼視、次は頭部静止条件での両眼視、そして頭部運動条件での単眼視の順となり、頭部静止条件での単眼視では有意な相対的奥行知覚は得られなかった。この結果から、運動視差と両眼視差はともに長大奥行空間でも有効な手がかりとして作用し、とくに運動視差は両眼視差の奥行精度を促進すると考えられる。

絶対奥行距離の過小視

絶対奥行距離の知覚はこれまで量推定法などで測定され、物理的奥行距離にリニアに比例して過小視されること、またそのベキ指数は 1.0 に近似すると報告されている(Da Silva 1985, Teghtsoonian & Teghtsoonian 1970)。この過小視を説明するために、絶対奥行距離過小視のための俯角拡大仮説が Li et al.(2011)によって提唱された。それによると、図 5.3 に示したように、観察者のと

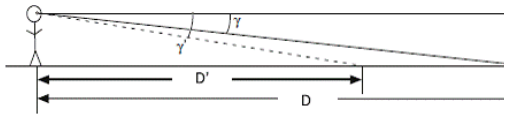

図 5.3　絶対奥行距離過小視のための俯角拡大仮説。観察者のとる俯角（γ‘）は、対象までの実際の俯角（γ）より拡大されるために、視え絶対奥行距離（D'）は物理的奥行距離（D）より過小視される(Li, et al.2011)。

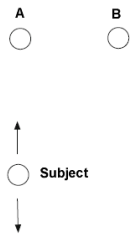

図5.4　絶対奥行距離測定のためのL型課題。被験者は対象AとB間の水平距離が自分と対象間の絶対奥行距離と同等になるように、対象Aまで前あるいは後に歩行するように求められる(Li, et al.2011)

る俯角（γ’）は、対象までの実際の俯角（γ）より拡大される傾向があり、そのために視え絶対奥行距離（D’）は物理的奥行距離（D）より過小視されるというわけである。

この仮説を検証するために、図5.4に示したように、被験者には対象AとB間の水平距離が自分と対象間の絶対奥行距離と同等になるように、対象Aまで前後に歩行して再現するように求めた。対象Aまでの奥行距離は5-30mの範囲で変えられた。

その結果、前額平行の間隔距離と同等となるように歩行で再現された被験者の位置は対象Aから遠くに定位された。これは、絶対奥行距離が過小視されていることを示した。前額に垂直に配置した間隔距離事態でも同様な結果が得られた。物理的奥行距離に対する視えの絶対奥行距離は、俯角拡大仮説に一致し、その拡大される程度は物理的俯角の1.5倍となった。ここで得られたデータからの物理的奥行距離に対する視えの絶対奥行距離のベキ指数は0.67であり、量推定法による絶対奥行距離のそれが0.97であるのでこの差の生じる原因が何によるかは今後の課題である。また、Durgin & Li(7)は、ゴルフ場を利用しゴルフボールをフィールド面上に置いた事態で視えの傾斜角度を言語で報告させることで、視えの俯角拡大が生起しているかどうかがしらべられた。フィールド面の物理的角度と被験者の身長を考慮した実際の俯角は、4°から45°の範囲で変えられた。その結果、物理的俯角に対する視えの俯角は約1.5倍拡大していることが示された。次ぎに、この結果が非言語的測定方法でも検討された。方法は、物理的俯角を90°に設定し、その半分である45°に視える位置を、被験者を前後に移動させることで求めた。この際、出発点の高さ（0、0.93、2.75m）を3通りに変化させた。実験の結果、45°に対する視えの角度は31°となり、先の結果と同様に視えの角度は1.5倍程度拡大視されていた。さらに、前額平行にボードを提示し、その角度を8条件(4.2、6、8.5、12、

17、24、34、48°)に変化、また観察距離も2条件（1m、2.5m）に設定し、視えの角度を言語報告させた。実験の結果、物理的角度に対する視えの角度は、1.52倍拡大して知覚されることが示された。そこでさらに、バーチャル・リアリティ空間を構築し、前額に置かれた面の角度に対する視えの角度が言語報告で求められた。実験事態は、図5.5にあるように、被験者の眼前に対象面を前額の角度を7通り（18°、25°、32°、39°、46°、53°、60°）に変化させて提示し、また被験者の椅子の高さを調整することで被験者の視線角度を5通り（仰角45°、22.5°、俯角で22.5°、45°、そして水平）に変化させて、被験者には面の視えの角度を数字で報告させた。

図5.5 バーチャル・リアリティ空間での前額の角度を変えて置かれた面に対する視えの角度の測定事態。被験者の椅子の高さを調整する（Durgin & Li 2011）

その結果、シミュレートされたオプティカルに提示した傾斜角度（「シミュレートされた物理的角度」－「視線角度」）に対するオプティカルに提示した面の視えの角度（「評定された物理的角度」－「知覚された視えの視線角度」）勾配はオプティカルな傾斜角度が4°から50°の範囲では1.52となった。

これらの結果は、絶対奥行距離知覚においては視えの俯角拡大が働き、距離の過小視をもたらすこと、同時に視線方向にある対象面の前額に対する視え角度をも拡大させていることも示している

奥行距離知覚における先行経験した対象の大きさの効果

対象の物理的大きさ、仮定された大きさ(assumed size)、物理的奥行距離、知覚奥行距離の関係は図5.6に示されている。物理的大きさは網膜に投影されるが、その網膜像の大きさは物理的奥行距離で一義的に決まる。一方で、知覚された大きさは網膜像の大きさで決まるのではなく、仮定された大きさ（知覚された大きさ）で決まると考えられる。

Sousa et al.(2013)は、直前に知覚された対象の大きさがその直後の大きさ知覚に影響を与えるかどうかをしらべることで、この仮定された大きさ仮説を検証した。提示した対象はバーチャル立方体で、テスト刺激は１辺 1.5cm の立方体とし、その直前に提示する刺激として１辺１および 2cm の立方体を用意した。実験では、まず直前刺激としての立方体を１個単独あるいは２個継時的（同一の大きさ）に両眼立体視で提示し、直後に 1cm の立方体（テスト刺激）を提示した。被験者には、人差し指（被験者には視えないように配慮）に赤外線ダイオードを装着させ、テスト刺激の立方体に接触するように手を伸ばすことを求めた。この赤外線ダイオードの位置はオプトメトリック装置で検出し、テスト刺激までの知覚距離とした。テスト刺激は横幅 8cm、高さ 8cm、奥行 20cm の仮想空間内のいずれかに提示された。

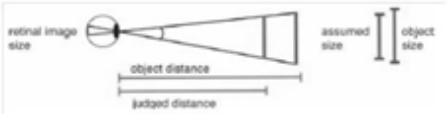

図 5.6　対象の物理的大きさ、仮定的大きさ (assumed size)、物理的奥行距離、知覚奥行距離との関係(Sousa et al.2013)

実験の結果、先行提示刺激として 2cm 立方体を提示すると、1cm 立方体提示条件に比較して、その知覚距離は遠くになることが明瞭に示された。先行刺激を単独提示した条件、および２つの刺激を連続して提示した条件ではこのような差はなかった。このことから、対象の大きさ知覚に影響する仮定された大きさは、直前の対象の知覚された大きさにのみ影響を受けると考えられる。

1.2 両眼視差の誤ったスケーリング

両眼視差の誤ったスケーリングによる奥行圧縮と視えの傾斜角度

対象までの視えの絶対奥行距離は約 0.7 倍過小視されること、視方向にある視えの傾斜面は最大 20 度過大視されること、そして注視点に設定した対象と対象間の視えの相対奥行距離(exocentric distance)は観察距離が大になるにつれて過小視されることなどが、これまでの研究で見いだされている。これらの実験的データをまとめる理論として、観察角度拡大理論(angular scale expansion theory)が提起された。この理論は視えの奥行絶対距離の直線的な過小視、相対奥行距離の非直線的過小視、視線方向の視えの傾斜面

（上昇と下降）の過大視、そして exocentric distance における奥行距離の過小視を説明可能であるとされた(Durgin & Li 2011, Li & Durgin 2009, Li,Philips, & Dirgin 2011, Li & Durgin 2012, Li et al.2013,)。図 5.7 の A はこの観察角度拡大理論を示し、傾斜面（β）の観察角度は知覚的に拡大されてβ’となるので、傾斜面の視えの角度も過大となることを示す。

一方、別の理論としてアフィン理論(Affine model)と固有バイアス理論(Intrinsic bias model)がある。前者では、前額平行距離は非過小視なのに奥行距離は誤った両眼視差の見積もりによって過小視（物理的距離 A が知覚的距離 A'、物理的距離 B が知覚的距 B'）されるために起こる(図 B）とする。後者では、地平面角度の知覚における固有のバイアスによる傾斜面の過大視（図 C）によると考える。観察角度拡大理論を式で示すと、次のようになる。

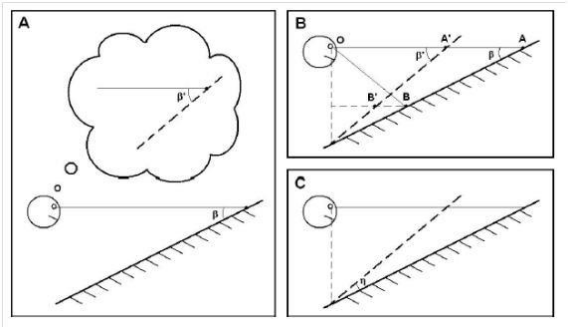

図 5.7　観察角度の知覚的拡大のしくみ。A：傾斜面（β）の観察角度は知覚的に拡大されてβ’となるので、傾斜面の視えの角度も過大となる、(B) 傾斜面の角度の過大視は、ひとつには誤った両眼視差の見積もりによる奥行距離の過小視（物理的距離 A が知覚的距離 A’、物理的距離 B が知覚的距 B’）による、(C) もう一つには地平面角度の知覚における固有のバイアスによる傾斜面の過大視による (Li & Durgin 2013)

$$\beta' = 1.5\beta + k\ \ln(D) \qquad (1)$$

ここで、β’：知覚傾斜角度、β：物理的傾斜角度、D：観察距離、k：定数、In ：自然対数（底が e）をそれぞれ表す。

Li & Durgin(2013)は、このモデルをブラッシュアップし、近・遠両方の観察距離での広範囲の傾斜角度の知覚に当てはまる新しい観察角度拡大理論を提示した。いま、傾斜面が手が届くような手近にある場合には、垂直あるいは 90 度に近似して知覚される。これを数式で表すと、次のようになる。

$$\beta' = 90^\circ \sin(\beta) \quad (2)$$

一般的に当てはまる式に統合するために、(1)と(2)式を合わせると、次式が得られる。

$$\beta' = 90^\circ \sin(\beta) + k \ln(D) \cos(\beta) \quad (3)$$

この新しい観察角度拡大理論を検証するために、以下の実験が試みられた。実験は、図 5.8 に示したように、CG で作成した昇り斜面事態(左図）と昇り斜面を右回転した刺激事態(右図）で両方ともに L 字に白色ボールを配置したで。これを両眼視差を付してヘッドマウントディスプレーに提示し、被験者には白色ボールで構成された L 字のどちらの脚が長いかを判断させた。バーチャルに提示した傾斜面角度は視線に対して 9 度から 90 度まで 9 度間隔で変化させ、観察距離は 2 段階（2m と 8m）に設定した。L 字形のコーナー位置に配置した対象（球）の視角は両観察距離とも 1.14 度に固定、また L 字形の前額平行にある対象距離も 7.15 度一定とした。L 字形の奥行方向にある対象間の距離は、前額平行にある対象間距離とのアスペクト比（奥行距離／前額平行距離）で、0.33 と 8.14 の間で決められた。奥行間距離と前額平行間距離の間が等価に知覚される PSE（閾値）を完全上下法で測定した。

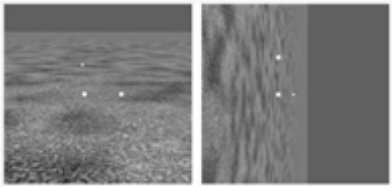

図 5.8　傾斜角度の知覚のための刺激。昇り斜面（左図）、昇り斜面を右回転した刺激（右図）で両眼視差をつけてヘッドマウントディスプレーに提示(Li & Durgin 2013)

実験の結果から PSE をアスペクト比で算定し、次いでこの PSE であるアスペクト比（奥行距離／前額平行距離）の傾斜面角度に伴う変化を見ると、傾斜面角度が増大す

ると急激に減衰することが示された。観察角度拡大新理論、アフィン理論、固有バイアス理論のそれぞれから導かれる理論式でシミュレートしたデータとこの実験結果とを比較すると、観察角度拡大新理論とアフィン理論が固有バイアス理論よりも妥当性が高いことがわかった。観察角度拡大新理論は上昇傾斜面、下降傾斜面、片側上昇／下降傾斜面など広範囲に妥当する。一方、奥行の過小視が生起するのは両眼視差量を誤ったことにもとづくとするアフィン理論は、観察者の近傍の空間で知覚する傾斜角が視線上にある条件では妥当すると考えられる。

1.3 観察者条件と絶対奥行距離の知覚

注視行動(gaze behaivor)と絶対奥行距離の知覚

遠方に置かれた対象の絶対奥行距離を見積もる場合、判断のフレームとなる地面を正確に知覚することが必要となるが、これは奥行手がかりにもとづいて連続的に構成する面を知覚すること(sequential surface integrating process)で可能となる(He et al.2004, Ooi & He 2007, J.Wu et al.2008, B.Wu et al.2004)。この考え方によれば、観察者の近傍の奥行手がかりが効果的であれば、奥行手がかりが乏しい遠距離までの対象のある面の知覚表象を観察者が近傍から遠方にスキャニングすることで正確に構成し知覚できることになる。もし観察者の近傍の奥行手がかりが乏しい場合には、観察者は対象の置かれた面を傾斜して知覚しその奥行距離を過小視する固有の傾向(intrinsic ground plane)をもつ。図 5.9 は、観察者が地面におかれた対象を観察するとき、観察者の近傍の地面の奥行手がかりが乏しいと地面の表象構成に際して固有の傾斜（誤差)が生起し、対象までの絶対奥行距離が過小視されることを示す。

Gajewski et al.(2014 は奥行手がかりの多寡にかかわらず奥行距離の知覚表象の構成に重要な役割を果たす眼球運動をしらべた。観察者は近傍の地面の情報を遠方にある対象の距離の見積もりに拡張し、対象注視が中断されても距離知覚に影響をもたらすと考えられる。これを検証するために、観察者の対象観察時の眼球運動がモニターされた。実験は書棚以外何もない実験室内で実施され、ターゲットは 2.75、3.50、4.25、5.00 m の床面上に置かれた。観察者にはターゲットを 5 秒間観察させ、その後で閉眼させ、対象までの距離を歩行あるいは口答による報告で再現あるいは答えさせた。

その結果、観察者は対象と観察者との間の領域を注視する方略をとること、眼球運動は絶対距離の見積もりに関係しないこと、さらに観察者の近傍、とくに壁や床を不明瞭にすると奥行距離見積もりに影響することが示された。これらの結果から、観察者の近

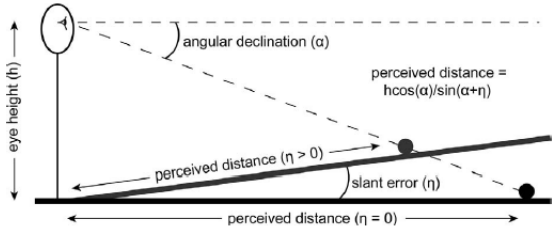

図 5.9　地面に置かれた対象の絶対奥行距離の知覚。観察者は地面におかれた対象を観察するとき、観察者の近傍の地面の奥行手がかりが乏しいと地面の傾斜について観察者は誤差(error)をもって知覚し、その結果、対象までの絶対奥行距離を過小視する(Gajewski et al.2014)

傍の床面の手がかりが絶対距離の知覚に一定に役割を果たすと考えられる。

観察者の身体方位と視環境によって変わる奥行距離知覚

観察者の頭部そして眼球の方位が変わると、それは対象までの奥行絶対距離知覚に影響する。とくに観察者の頭部方位による対象までの奥行絶対距離の過小視は月の大きさ錯視をもたらす(Ross & Plug 2002)。Harris & Mander(2014)は、York 大学の部屋回転実験室を利用し、部屋と観察者をともに回転させた条件で実験室の壁に投影提示した線分の視えの長さを測定し、大きさ-距離恒常性のルールを適用して絶対距離知覚が観察者の頭部方位によってどのように変化するかを算定した。部屋と観察者の方位の関係は、観察者を壁際に立たせた直立条件あるいは床面に横に寝かせた条件で、部屋と観察者の関係を「直立：直立」、あるいは「90°回転：90°回転」の実験事態を設定、また観察者を椅子に落ちないように固定して部屋と観察者の関係を「直立：直立」、「90°回転：90°回転」、「直立：90°回転」、あるいは「90°回転：直立」の実験事態を設定した。被験者には 337 cm あるいは 114 cm 先にある壁に投影した線分の長さを被験

者の手元にあり眼には視えないように工夫した測定用ロッドを調整して単眼視あるいは両眼視でマッチングするように求めた。

その結果、単眼視で観察距離が 366 cm では、観察者が床に仰向けの条件（「90°回転：90°回転」）での大きさ判断は、観察者が直立した条件（「直立：直立」）より約 10%の過大視、観察距離が 122cm では観察者が仰向けの条件および部屋が 90°回転条件（「直立：90°回転」、「90°回転：直立」）でのそれはおよそ 11%の過大視だった。両眼視差が働く両眼視ではこのような過大視は生起しなかった。これらの結果を、図 55 に示した大きさ-距離関係に適用して絶対奥行距離を算定したところ、単眼視の場合、物理的奥行距離が 366 cm 条件の場合の知覚された奥行絶対距離値は 9.8 %（36 cm）過小視、122 cm 条件では 10.8 %（13 cm）過小視された。この結果は、大きさとそれに連動した奥行絶対距離の知覚が観察者の頭部方位、すなわち前庭感覚が影響を与えていることを示唆する。つまり、自己の頭部方位が普段と異なっていると感じた場合、絶対奥行距離の知覚システムは、環境内の対象の大きさを普段の大きさ知覚に対応するように再計算し知覚的エラーを修正していると考えられる。

距離の大きい自然シーンの距離弁別

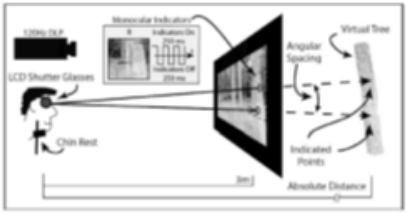

図 5.10　実験場面。被験者にはシャッターグラスを装着させて両眼立体視させ、バーチャルに提示した奥行の異なる樹木の上下 2 カ所に提示した標識（単眼視手がかりのみで提示）のいずれが近いか遠いかを左右のキー操作によって判断させた(McCann et al. 2018)。

距離の大きい自然シーンの距離弁別はこれまでほとんど研究されてこなかった。その理由は、第１に奥行距離の単一の手がかり効果を検討するために実験条件統制の点から実験室が選択されたこと、第２に自然シーンで地上の２つの位置を的確に測定する技術的困難があったことである。そこで McCann et al.(2018)は、奥行位置を高精度の距離レンジで特定できるカメ

ラで撮影した自然シーン（81 シーン、図 5.10）をステレオディスプレーに提示しシャッターグラスを被験者（4 名）に装着させ両眼立体視させて実験した（図 5.11）。シーン内の３mから 60mの範囲 20 カ所わたって奥行距離の異なるバーチャルな樹木の上下に２つの標識（単眼視手がかりのみで表示）を 3 段階の幅を設定（angular spacing、2°、5°、10°）して提示し、近くあるいは遠くに知覚されるのはどちらかを左右のキー操作によって反応させた。測定では両眼視条件と単眼視条件を設定し、奥行距離知覚の閾値を奥行距離ごとに求めた。

図 5.11　奥行距離弁別実験に用いた自然シーン（サムネールで表示）（McCann et al.2018）。

実験の結果、奥行距離弁別の閾値は両眼視条件では小さく、奥行距離が 10-12m までは上昇したが、以降は平準化した。この関係は、パラメータである angular spacing が広くなると大きくなった。Weber 比はすべての奥行距離で angular spacin が 2°の場合は１%、10°の場合で４%であった。単眼視条件では Weber 比は両眼視条件に較べて大きくしかも奥行距離 5-10m の範囲で急激に大きくなりその後は 10-12m までゆるやかに増大し、以降平準化した。これらの結果を信号検出理論を応用し、奥行距離弁別である信号（奥行距離変化）を測定した 2 つの奥行位置間の奥行距離と angular spacing に伴うノイズで除した式で分析した結果、両眼視条件の奥行距離弁別は 15-20m の範囲ではシーンの中の絵画的要因によらずに両眼視差のみによることが示された。

これらの結果は、これまでの実験室で得られた両眼視差の奥行距離弁別閾値の結果と一致することを示している。

2 球面天体的オプティクアレー(planispheric optic array)の空間知覚

Magic circle

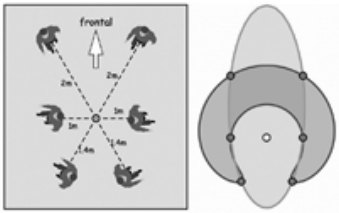

図 5.12　全周囲写真の事態で取り巻く 6 人の中心にカメラ（観察者）を置く（左図）。。右図には観察者がもつ 2 つのトポロジカルな知覚モデルを示し、観察者の視点が内部にある場合は 6 人を結ぶ楕円はオレンジ色で、それが外部にある場合は青色で表示。（Koenderink et al. 2018）。

メルカトル図法とは、地球儀を円筒に投影したもので、地軸と円筒の芯を一致させ投影するため経線は平行直線に、緯線は経線に直交する平行直線になる。地図上の 2 線のなす角が地球上の角度と等しく正角性を維持するには、横方向・縦方向の拡大率を一致させる必要があるために緯線はすべて赤道と同じ長さにするので高緯度地方は実際の長さ（地球儀上の長さ）より横方向に拡大、それに応じて縦方向（経線方向）にも拡大する。

最近で全周囲カメラが安価に発売され、全周囲をメルカトル法で平板に表した写真の利用が高まっている。Koenderink et al.(2018)は、そのような全周囲メルカトル写真のなかの人の頭部方向はどのように知覚されているか、また観察者の視点は写真の外部か内部かをしらべた。実験では、図 5.12 に示すように、円環に取り巻く 6 人の中心にカメラ（観察者）を置いて全周囲写真を作成した（左図）。6 人のカメラからの距離は 1、1.4、2m と異ならせ、また各 60°間隔で配置し前方向を示す標識も追加された。右図には観察者がもつ 2 つのトポロジカルな知覚モデルが示され、観察者の視点が内部にある場合は 6 人を結ぶ楕円はオレンジ色で、それが外部にある場合は青色で表示した。これらの輪郭円の領域は 6 人についての観察者の視方向をリマッピング(remapping)したものである。図 5.13 には、この条件で撮影した全周

図 5.13　メルカトルに依拠した全周囲写真で水平線は写真の中央を通る。（Koenderink et al. 2018）

囲写真をメルカトルに依拠した平板写真に直したもので、その水平線は写真の中央を通る。対面する3組の人は同じ頭の向きをとり、その奥行位置と距離は地面のテクスチャから推定できる。被験者にはカメラの位置および6人の位置関係と各人の鼻の向き（視線方向）を配布シートに記入させた。

その結果、被験者の大部分は全周をメルカトル法によって平板に表した写真のシーンはすべて自分の前にあるものとして、また写真内の6人は円環に位置し互いに向き合っていると知覚した。一方、数人の被験者は自分の視点を写真の中に位置させ、サークルの中に自分が入り込んだ知覚をもった。

これらの結果から、このようなサークル(magic circle)に入り込むのは大変困難なことと考えられる。

視ている球体の外からの光景

われわれが視ているユークリッド的世界はわれわれの眼の周りに包まれ広がる世界である（図5.14の左側図）。それではその視覚球の外に出てそれを観察することはできるだろうか（図の右側図）。現在の写真技術は、魚眼レンズによる全周写真のように視覚球の内部および外部の世界から視た画像世界を提示できる（図5.15）。この場合、観察者はこのような世界の中に入り込んでその知覚構造を直感的に理解可能なのか。Koenderink et al.(2018)は、85人の被験者を用いて、図5.16に示した刺激球体（上図）を提示した。刺激提示モードでは、中央に知覚判断のための刺激球体（シーンタイプ）を、その周囲に6個の補充的球体をともに垂直軸を中心としてゆっくり回転させ、これらの球体を凸状に知覚させた。球体の提示時間は3秒とし、この間に1/3回転させた。シーンタイプは被写体が相互に対面した条件（inward)と背中をつき合わせた条件（outward)の2条件とした。被験者

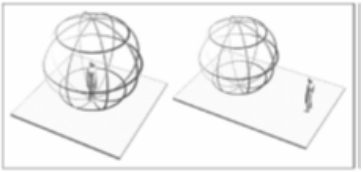

図 5.14　視覚球の内部からの観察（左側図）と外部からの観察（右側図）(Koenderink et al. 2018)。

図5.15　視点を内部に置いた平面球形図（上図）と視点を外部に置いた平面球形図（下図）。(Koenderink et al. 2018)。

（85名）の知覚判断は中央の刺激球体を被験者が外部から視ているかあるいは内部から視ているか（下図）を、続いて同じ質問への回答も求めた。

実験の結果、シーンタイプが相互に対面した条件では外部から視ているという反応が多く、逆にシーンが背中をつき合わせた条件では内部から視ているという反応が多くなったが、しかし観察後の内省では、これらの視えは現実的とするものが少なかった。このことから、観察者はこのような世界の中に入り込んでその知覚構造を直感的に理解できないと示唆される。

図5.16　刺激提示モード（上図）と反応モード（下図）。中央に判断のための刺激球体を提示し、その周囲に６個の補充的球体を凸状に知覚させるために提示した。中央の刺激球体を被験者が外部から視ているかあるいは内部から視ているかを被験者に判断させた（Koenderink et al. 2018)。

3 視空間特性

２個の対象の大きさ知覚におよぼすテクスチャ勾配の効果

２個の対象の相対的大きさ知覚におよぼすテクスチャ勾配の効果については２つの仮説、すなわちリレーショナル仮説(relational)と距離計算仮説(distance calibration)がある。前者の仮説では、相対的大きさは２つの対象間に存在するテクスチャ要素の密度によって規定されるとし、後者の仮説では、テクスチャ勾配によって距離が規定できれば、相対的大きさは、視角と距離によって規定されるとする。そこで、Tozawa,J.(2010)は、テクスチャの有・無、および標準刺激と比較刺激間の高さの差などを操作して実験した。実験では、標準刺激に対する比較刺激の相対的大きさと相対的距離を被験者に求めた。

その結果、相対的大きさ判断はテクスチャ勾配によって強く規定されていること、しかし相対的距離は標準刺激と比較刺激の相対的高さ要因によって規定されていることが示された。相対的大きさと相対的距離を規定する手がかりが異なることは、距離計算仮説よりリレーショナル仮説を支持する。水平垂直錯視のモデル水平－垂直錯視は垂直成分の過大視を起こす異方性成分、および水平線分を半等分した際に過小視を起こすバイアス成分から生起している。

Mamassian & Montalembert(2010)は、３種類のモデル、すなわち、錯視に関わる精神物理変数がそれぞれ独立しているとするモデル(精神物理変数独立モデル、Independent psychometric functions model)、測定の初期にノイズが影響するモデル(初期段階ノイズモデル、Early-noise model)、長さ判断がなされる測定の後期でノイズが影響するモデル(後期段階ノイズモデル、Late-noise model)を検討した。精神物理変数独立モデルは、水平成分、垂直成分の錯視は相互に独立して生起すると仮定する。初期段階ノイズ　モデルでは、水平線分と垂直線分の測定時にノイズによって正しい値が乱されること、そしてこのノイズはゼロ平均を中心にσの２乗の分散で表されることを仮定する。後期ノイズモデルは、水平線分や垂直線分のイメージに基づく段階でノイズが働くのではなく、長さ判断の直前の段階で判断の不確実性がノイズとして働くとし、水平線分と垂直線分の長さ比較の確実性に差があると考える。この３通りの仮説から演繹される水平線分と垂直線分の長さの主観的等価値（PSE）を表 5.2 に示す。表の左端列は水平－垂直錯視パターンとそれに類似したパターンを示す。表中の「a」値は異方性によ

表２　３種類のモデル（独立精神物理変数モデル、測定の初期段階でのノイズモデル、測定の後期段階でのノイズモデル）による水平ー垂直錯視量の予測。左端列は水平ー垂直錯視パターンとそれに類似したパターンを示す。a：異方性による垂直成分の過大視、b：水平成分を等分にしたときの異方性による過小視、c：定数で垂直成分の長さ評価の際に生起する不確実度（Mamassian & Montalembert 2010）

Stimulus class	Independent psychometric functions		Early-noise model		Late-noise model	
	PSE	SD	PSE	SD	PSE	SD
'L'	μ_1	σ_1	$\frac{1}{a}$	$c\sqrt{1+\frac{1}{a^2}}$	$\frac{1}{a}$	$\frac{c}{a}$
Vertical-'T'	μ_2	σ_2	$\frac{1}{ab}$	$c\sqrt{1+\frac{1}{a^2b^2}}$	$\frac{1}{ab}$	$\frac{c}{a}$
Horizontal-'T'	μ_3	σ_3	$\frac{b}{a}$	$c\sqrt{1+\frac{b^2}{a^2}}$	$\frac{b}{a}$	$\frac{bc}{a}$
'+'-sign	μ_4	σ_4	$\frac{1}{a}$	$c\sqrt{1+\frac{1}{a^2}}$	$\frac{1}{a}$	$\frac{bc}{a}$

る垂直成分の過大視、「b」値は水平成分を等分にしたときの異方性による過小視、「c」値定数で垂直成分の長さ評価の際に生起する不確実度を示す。図 36 のグラフは、後期視覚処理過程でのノイズモデルによる水平ー垂直錯視の予測値で、水平ー垂直錯視とその類似パターンを４つのパラメータ（赤、緑、青、紫枠内に表示）として設定している。グラフの横軸はアスペクト比（垂直/水平比）、縦軸は予測値（垂直＞水平）を示す

この３通りのモデルの検証実験が実施され、被験者には水平線分と垂直線分のどちらが長いかを判断させた。　その結果、(1)「L」パターンと「＋」パターンでの PSE は等しいこと、(2)　(「＋」パターンの sd）/（「L」パターンの sd）は大きく、「＋」パターンの長さ判断は「L」パターンより難しいこと、(3)（横位置の「T」の sd）/（縦位置の「T」の sd）は大きく、横位置の「T」パターンの長さ判断は縦位置の「T」より難しいこと、が示された。これらは後期段階ノイズモデルの予測を支持した。しかし、後期段階ノイズモデルの予測によれば、{(「L」パターンの PSE）/（縦位置「T」の PSE)}および{(横位置「T」の PSE）/（「L」パターンの PSE)}はともに「b」（水平方向の長さ判断のバイアス値）となるが、実験結果はこれを支持しなかった。ここで提示された後期段階ノイズモデルは、水平ー垂直方向の異方性による長さ判断の歪みと水平方向線分の長さ判断の歪みを、それぞれ独立に操作できる利点がある。

奥行位置の異なる対象への注意の配分

３次元視空間に置かれた対象を注視させ、次にそれより遠くにある対象へと注視を移動させると、反応時間が大きく、その逆の場合には小さくなる。これは、対象への注意が観察者中心座標で表象されていることを示す(Andersen, 1990; Andersen & Kramer,1993; Arnott & Shedden, 2000; Gawryszewski et al., 1987)。一方、同一の対象内での注視点の移動にかかるコストは、異なる対象間でのそれより小さいことも示され、これは注意が対象中心座標で表象されていることを示唆する(Duncan, 1984; Egly et al., 1994)。

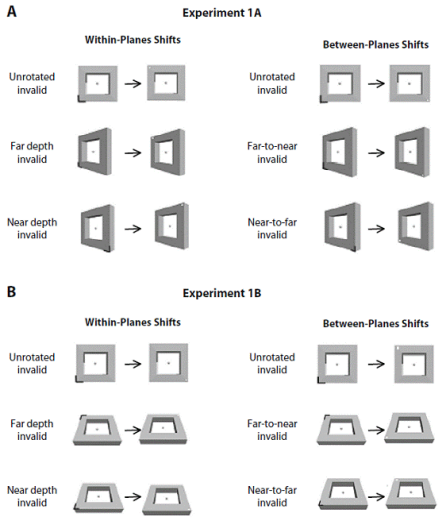

図 5.17　奥行方向への注意の広がりをしらべるための実験パラダイム。窓枠状のパターンをｙ軸（Experiment 1A）あるいはｘ軸（Experiment 1A）を中心として 45°傾けて継時的に提示する。（Reppa, et al. 2010）

そこで、対象への注意が観察者中心表象か、対象中心表象かを確かめるための実験を Reppa et al(2010)が行った。実験パラダイムは、図 5.17 に示した。注意の配分を調整するために、窓枠状の２次元パターンをｙ軸（Experiment 1A）あるいはｘ軸（Experiment 1B）を中心として 45°傾けて継時的に提示する。初めに、窓枠の４隅のいずれかに注視点（L 状記号で表示）を付けて提示し、次に窓枠の４隅のいずれかに注視点（ターゲットとして白色の小四角形）を変えて提示する。最初の注視点と次の注視点の奥行関係が遠―近(Far-Near)あるいは近―遠で変えられる。その際、注視点の移動が同一の奥行距離の条件(Within-Olates Shifts)と異なる奥行距離の条件(BetweePlates Shifts)を設定し、さらに注視点

の移動が同一の位置の場合(valid)と異なる位置の場合(invalid)を設定した。このような実験事態では、注意が２次元の対象の間で広がるのか、あるいは対象の近い位置から遠い位置へと３次元の広がりをもつのかを検証できる。もし、奥行が注意の符号化に組み込まれていれば、２次元の手がかり（1A 条件）ではなく３次元的手がかり(1B 条件)として設定された距離情報がターゲット認知に対する反応潜時を規定すると予測される。

実験の結果、次のことが明らかにされた。(1)注意が２次元に設定された手がかり内にある場合（条件 1A）、ターゲット認知のための反応潜時は窓枠状パターンが回転しても回転しなくても変化しなかった。これは注意の移動が同一の奥行距離内の場合、２次元的距離が変わっても注意の広がりに対するコストは等価なことを示す。(2)遠い位置から近い位置への注意のシフトは、その逆方向に比較して速いことから、注意が対象中心ではなく観察者中心座標で表象されていることを示唆する。

対象の観察者中心方向定位に影響する両眼要因

観察者中心・視方向定位(egocentric visual direction)とは、対象が観察者からどの方向に定位されて知覚されるかを指す。この視方向定位は、網膜での対象の投影位置情報（oculocentric visual direction,OVD)と眼球位置情報で決まる。網膜外の眼球位置情報は、眼筋の自己受容感覚と遠心性コピーによってモニターされる。眼球位置情報は網膜位置情報によって検出され、それは中心窩を基準として対象の投影位置を検出するか、あるいは複数の対象の網膜投影位置関係を検出して決められる。これには、Hering のローカルサインメカニズムが働く。このしくみによれば、中枢の各点は網膜の特定の点と１対１の対応をもつので、網膜上の投影点が決まれば対象の視方向が決まる。ここでは、眼球の位置情報は、左右眼の位置情報が平均化されて決められ、また中心窩に投影された対象は視線上にあると決められる。同様に、両眼からの網膜情報は平均化され、それに相当する網膜位置にイメージされて対象の視方向が決められる。これまでの研究によれば、対象の視方向には両眼からの位置情報が影響することが確かめられている(Barbeito & Simpson, 1991; Erkelens, 2000; Ono & Weber,1981; Park & Shebilske, 1991; Simpson, 1992)。しかし、その影響には左右眼間に差があることも示された(Barbeito & Simpson 1991)。これは、たとえば、両眼間に非対称の輻輳を設定し、各

眼の前にある対象の視方向を左右眼別々に報告させると、各眼からの眼球位置情報は視方向に等分には影響しなかった。また、左右眼への刺激に輝度、明るさ対比あるいはボケに差があると、視方向は強い刺激方向にシフトした(Ding & Sperling,2006, 2007;Mansfield & Legge,1996)。これは左右眼の網膜からの情報に差を付けられ加重されていることを意味する。　Sridhar & Bedell(2011)は、左右眼の眼球位置情報が視えの視方向定位におよぼす効果、および左右眼の網膜刺激情報が視えの眼球位置定位におよぼす効果を、それぞれ別個にしらべた。眼球位置情報が視えの方向に及ぼす効果は、輻輳角を５段階に変えて視対象を提示して両眼観察させ、その後、両眼を遮蔽した事態で視対象が視えた方向を観察者自身が腕で指示する方法でしらべられた。網膜刺激情報が視えの眼球位置定位におよぼす効果は、左右眼に提示する輝度、明るさコントラストに差を設定したテスト刺激を注視点の直下に提示して両眼融合させた後、注視点の直上に提示した比較刺激（ボケを導入した垂直線刺激）の右あるいは左のいずれにテスト刺激が視えるかを判断させる方法で視えの眼球位置を測定した。　その結果、(1) 左右眼のいずれかを遮蔽することで眼球位置情報に非対称を導入すると、視えの視方向は、右眼の測定では左方向に、左眼の測定では右方向に変位して定位され、輻輳角が大きいほど変位も大きくなること、(2)左右眼に輝度差あるいは明るさコントラスト比の差を設定した場合にも、刺激が強い方への視えの眼球の位置変位が生起することなど、が示された。このことから、左右眼からの眼球位置と網膜位置の情報は観察者の対象の視えの方向定位において等価に影響するのではなく、左右眼で一方が強ければ他方が弱くなるような共変化を示すと考えられる。

正立視におよぼす視野の各領域の効果

視野の正立に関わる要因には、重力にもとづく前庭感覚、身体についての内部感覚、そして視野構造がある。この中で、視野構造は左・右視野、中心視野および周辺視野に分けられ、それぞれ別々に処理される。中央視野は小細胞視路と腹側径路で視覚領に、また周辺視野は大きな受容野をもち運動検出に敏感であり背側径路で視覚領に、それぞれ投射される(Danckert & Goodale, 2003)。周辺視野には視野の方向知覚（正立／倒立）に大きく関与する壁、床、天井部分が投影される。上方視野は下側頭に、下方視野

は腹側径路通って後頭頂に伝達される(Previc, 1990, Danckert & Goodale, 2003)。下方視野には姿勢や身体バランスに必要な地面（グラウンド）が投影される。中心／周辺視野、あるいは上/下視野とは異なり、左右視野のどちらかが視野の正立知覚に強く関わるとは考えられない。

Dearing & Harris(2011)は、上/下視野、左／右視野、中心/周辺視野のそれぞれで視野の正立刺激を相互に抗争状態にしたとき、ターゲット刺激として提示した文字識別がどのように影響されるかを検討することを通して、それぞれの視野が対象の正立視におよぼす効果をしらべた。実験では、図5.18に示したように、視野全体が正立0度から247.5度まで変化させる条件(a)、および、視野の半分（左／右、あるいは上／下）、あるいは中心／周辺視野を抗争的に変える条件(b)が設定された。視野の中央にターゲット刺激としてｐ文字を正立から倒立まで20度ステップで時計あるいは反時計回転で40度から140度まで角度を変えて提示した。左／右、上／下、中心／周辺視野の抗争的回転は、0、112.5、247.5度とし、この回転角度のすべての組み合わせで9通りの抗争条件を設定した。ターゲット刺激は正立位置ではＰに倒立位置ではｄに認知できる。被験者にはターゲット文字がｐあるいはｄのいずれに視えるかを求めた。　実験の結果、上/下視野、左／右視野、中心/周辺視野の各々で一方の背景視野の方向を固定し、他方の背景視野の方向を変化させた場合には、ターゲット刺激の視えの方向は変化させた背景視野の方向へとシフトした。さらに、上/下視野、左／右視野、中心/周辺視野のそれぞれで、どちらがターゲットの方向知覚に強い影響を与えたかをそれぞれの知覚値の差分

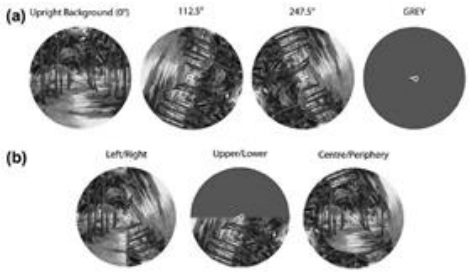

図5.18　背景の方向（正立から倒立）がターゲットの形状識別（文字P）に与える効果。(a)視野全体が正立0度から 247.5 度まで変化させる条件。(b)視野の半分（左／右、あるいは上／下）、あるいは中心／周辺視野を変える条件(Dearing & Harris 2011)

（上視野で得られた値－下視野で得られた値、左視野で得られた値－右視野で得られた値、中心視野で得られた値－周辺視野で得られた値）をとって比較すると、左右視野間では正立知覚に与える影響は等しいこと、下方視野は上方視野よりその影響が強いこと、そして中心視野と周辺視野は相互に影響を与えていることが示された。

対象の視方向における両眼間網膜イメージ差と眼球位置との関係

観察者からみて対象がどの方向に視えるか(egocentric visual direction、EVD）は、Wells-Hering の法則で規定される。この法則によれば、対象が投影された網膜位置情報と眼球の位置情報の組み合せの結果で視方向が決まる。つまり、

EVD ＝ 知覚された対象像の網膜位置(perceived retinal image location)＋眼球位置(sensed eye position)

となる。また、眼球位置は次式で規定される。

眼球位置 ＝ (W1×左眼球位置＋W2×右眼球位置）/ (W1＋W2)

ここで、W1、W2 は左右眼球位置に与えられる重みである。

さらに、対象像の網膜位置情報は、網膜像の強度によって重みづけられる。たとえば、片眼の網膜像のみがボケていれば、視方向に与える情報は小さくなる。この Wells-Hering の法則では、対象像の網膜位置情報と眼球位置情報は、それぞれ独立変数であることが前提とされる。これに対して、斜視者は対象像の左右眼の網膜位置が対応しないことによる二重像視を避けるために片眼情報を抑制する。また、屈折不同視のために左右眼の対象網膜像が同一とならない場合にも、片眼の抑制が起きている。しかし、これらの患者には対象の視方向の逸脱は起こらないことも知られている(Cooper et al.2000, Liu & Schor 1994, Pianta & Kalloniatis 1998, Serrano-Pedraza et al.2011, Schor et al.1992, Simpson 1991)。これらの研究は、知覚された対象像の網膜位置情報と眼球位置情報とは独立変数ではないことを示唆する。

そこで、Sridhar & Bedell (2012)は、Wells-Hering の法則の妥当性の検証実験を試みた。実験１では、中心窩に投影された片眼からの対象像が抑制される条件で対象の視方向の及ぼす各眼からの眼球位置信号の相対的重み付けを、実験２では各眼へ提示する

ターゲットに輝度差を設定した条件での各眼の位置信号の重み付けを、実験３では片眼が遮蔽された条件での各眼の位置信号の重み付けを、それぞれしらべた。実験は図 5.19 に示した実験事態で実施した。ターゲット刺激はディスプレー上に提示され、液晶シャッター眼鏡を通して各眼に別々に投影される。左図には対象像の網膜位置と眼球位置から予測される対象の視方向が示されている。ここでは右眼は常に同一の眼球位置を維持し、左眼は矢印で示されたような３方向の眼球位置をとる。このように、左眼が 3 方向の眼球位置をとる場合の視方向の変化は右側のグラフで表される。このとき、各眼の重み付けが等分な場合には、眼球位置の変化に伴う視方向の関係は 0.5 の勾配とる。もしこの勾配が 0.5 より小さければ位置変化しない右眼より左眼の位置の重み付けも小さくなる。図 23 には片眼のターゲット刺激にボケを導入した場合を示す。この場合、導入された眼の側は抑止を受けて視えなくなる。また、各眼への刺激に導入する輝度差は「１：１」、「１：４」、「１：８」の 3 条件でとした。被験者には、ターゲット刺激を観察させ、両眼への刺激を断つために液晶シャッターを閉じ、その後で記憶にもとづいてターゲット刺激の視方向を聞き手の人差し指でポインティングさせた。

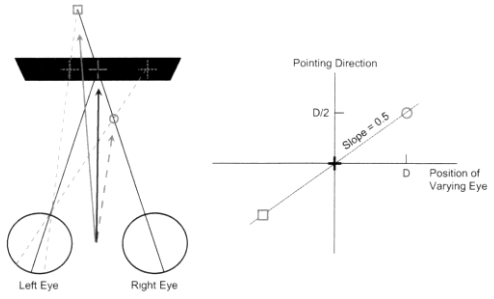

図 5.19　対象像の網膜位置と眼球位置から予測される対象の視方向。右眼は常に同一の眼球位置を維持し、左眼は矢印で示されたような３方向の眼球位置をとる（左図）。左図のように、左眼が 3 方向の眼球位置をとる場合の視方向の変化は右側のグラフで表される。このとき、各眼の重み付けが等分な場合には、眼球位置の変化に伴う視方向の関係は 0.5 の勾配とる。もしこの勾配が 0.5 より小さければ、位置変化しない右眼より左眼の位置の重み付けも小さくなる（Sridhar et al. 2012）

その結果、ボケ導入による片眼抑制がある条件での視方向の変位は、片眼抑制の無い条

件に比較してボケ導入側の眼球輻輳角の操作による両眼輻輳角の非相称の拡大程度に伴い、リニアに拡大することが示された。また、両眼間の刺激に輝度差を導入した条件では、低輝度刺激側の眼球輻輳角の操作による両眼輻輳角の非相称の拡大程度に伴い、リニアに視方向の変位も拡大し、その変位も輝度差が高いほど大きいことが示された。この場合、輝度差が無い条件での両眼輻輳角の非相称の拡大に伴う視方向変位の一次関数勾配は 0.54、輝度差が 1:4 では 0.49、輝度差が 1:8 では 0.32 と、図 5.20 の右図に示したように、ほぼ予測通りとなった。

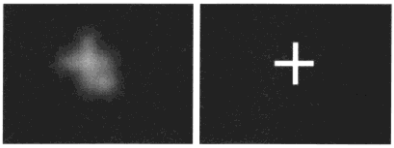

図 5.20　左右眼に提示する刺激（白十字形）のうち左眼の刺激をボカした場合(Sridhar et al. 2012)

これらの結果は、片眼への刺激入力を弱くし相対的に両眼間の視認度を変化させると、それに対応して刺激入力が弱められた側の眼球位置情報力も減じることを意味し、網膜情報と眼球情報は独立変数ではなく相互に影響し合っていると考えられる。

方向の傾き残効(tilt adaptaion)

Dekel & Sagi(2015)は、方向の傾きを偏向させた自然風景に順応させ、その傾きへの残効が起きるかをしらべた。実験パラダイムは、図 5.21 に示したように、順応刺激を 500, 630, 750, 1000, 1850 ms のいずれかで提示し、引き続いてテストターゲットを 30ms 提示した。順応刺激は方向の異なるノイズパターン、自然風景の提示方向を偏向させたパターン（129 種類、図 5.22 の左）、それに提示方向が非偏向の自然風景（130 種類、図の右）の 3 通りを用意した。テストパターンはガポールパッチパターンで 9 通りのほぼ垂直方向（0°、±1°、±２°、±３°、±５°）の空間周波数パターンを用いた。実験では、提示方向非偏向の自然風景と傾き偏向ノイズの両パターンを交互に連続提示する条件群と、提示方向非偏向の自然風景と提示方向偏向の自然風景の両パターンを交互に連続提示する条件群とを設定し、順応後にはテストターゲットを提示して傾き残効を測定した。また、傾きをもつイメージを提示した後では 1 分間の休止を入れて残効を消した。実験は、46 個の順応刺激と 135 個のテストターゲットを交互に

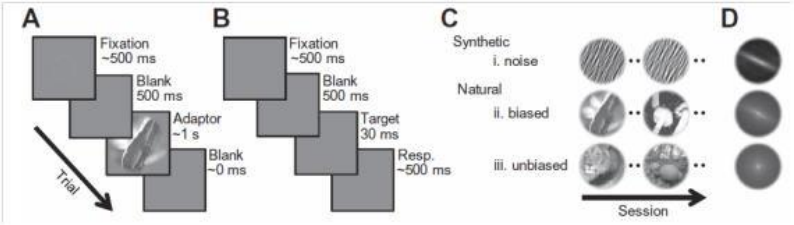

図 5.21　tilt adaptation の実験手続き。A ： 順応刺激(adaptor)への順応手続き、B：テスト刺激提示手続き、C ： 順応刺激のサンプルで順にノイズパターン、方向偏向パターン、非偏向パターン、D：これらの順応刺激の 2 次元フーリエ解析パターンで非偏向パターン以外は方向の偏向が強く表れている(Dekel & Sagi 2015)。

連続して組み込んだものを 1 系列として実施された。被験者にはテストターゲットの方向が時計回りあるいは半時計回りに傾いているかを答えさせた。

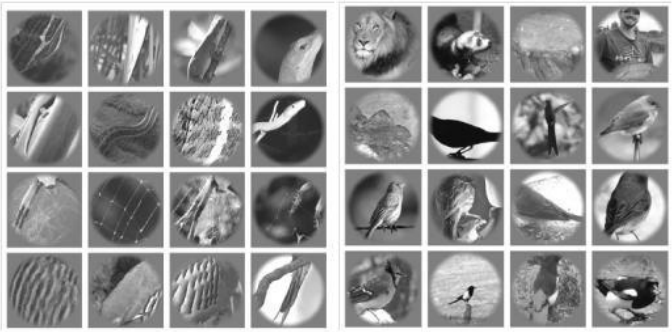

図 5.22　提示方向を傾けた自然風景（左側）および提示方向を傾けない自然風景（右側）(Dekel & Sagi 2015)。

実験の結果、傾き残効は、傾きのあるノイズパターンで 1.08°、自然風景の提示方向を偏向させたパターンで 0.65°、それに提示非偏向の自然風景ではほぼ 0°だった。また、傾き残効を生起できる順応時間は 500ms 前後で、これより長い順応時間で

は傾き残効は減じた。このことから、自然風景でも提示方向を傾消させた条件では傾き残効が生起することが示された。

視空間におけるパースペクティブ構造

Erkelens(10)は、物理的空間と視空間の対応関係をパースペクティブ構造から分析した。図 5.23 に示したように、物理的空間（青で表示）における距離、奥行、方向の関係は視空間に変換でき、しかもパースペクティブ構造（桃色で表示）に投影できる。図の (a)は、物理的空間における直線上の７つの等距離間隔（青）をその視空間のパースペクティブ上に位置（赤）位置づけたもの、図の(b)は、同様に物理的空間における 2 本の平行直線上にある７つの等間隔距離をその視空間におけるパースペクティブ上の位置づけたもの、(c) 物理的空間における方向が直角に交差する線分上の７つの等間隔距離をその視空間におけるパースペクティブ上に位置づけたものをそれぞれ示す(下部の２つの灰色点は観察者の眼球位置)。また、図 5.24 は、物理的距離をパースペクティブ空間に位置づけたもので、(a)は物理的空間内の２つの奥行の異なる前額に平行直線上にある６つの等間隔距離を（青）をパースペクティブ空間に変換したもの、および下部のグラフは直線の分割にともなう奥行距離比を示す。図(b)は、物理的空間内に斜方向直線と視線方向直線上にある６個の等距離間隔距離をパースペクティブ空間に変換したもの、およびその距離分割に伴う奥行距離比のグラフ（下図）を示す。図(c)は物理的空間内におけるパップス形状

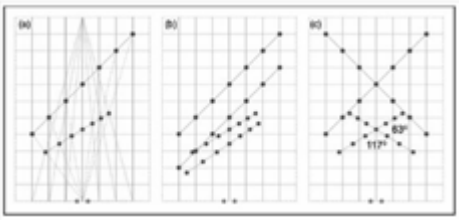

図 5.23　物理的空間（青で表示）と視空間（赤で表示）における距離、奥行、方向の関係をパースペクティブ構造（桃色で表示）に基づいて分析した概念図。下部の２つの灰色点は観察者の眼球位置。(a) 物理的空間における７つの等距離間隔の直線（青）とその視空間におけるパースペクティブ上の位置（赤）、(b) 物理

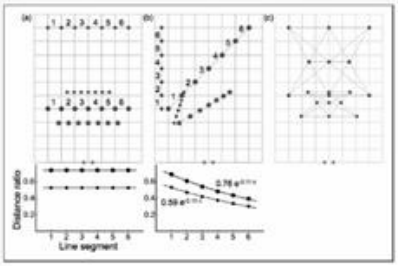

図 5.24　物理的空間からパースペクティブ空間への変換。(a) 物理的空間内の 6 つの等間隔距離をもつ前額に平行な奥行の異なる 2 直線。(b) 物理的空間内に等距離に配された 6 個の斜方向直線と視線方向直線、、(c) 物理的空間内におけるパップス形状をパースペクティブ空間に変換したもの(Erkelens 2015)

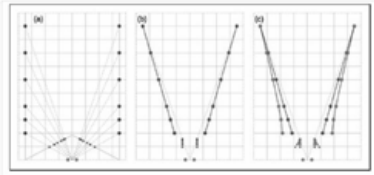

図 5.25　計算で算定した平行並木法と等距離並木法によるパースペクティブ空間。(a) 等距離並木と平行並木での刺激。(b) 物理的空間における刺激（青線上の赤点）がパースペクティブ空間、(c) 物理的空間における平行（赤の丸印）と等距離平行（緑の丸印）の各アレーをパースペクティブ空間における平行（小さな赤丸）と等距離平行（小さな緑丸）の各アレー（図の下部）に変換したもの(Erkelens 2015)

の等間隔距離をパースペクティブ空間に変換したものを示す。Erkelens は、Blumenfeld(1913) の平行並木法と等距離並木法の実験結果から、図 5.25 に示すように、物理的空間の刺激布置であるアレーをパースペクティブ空間に変換させることを試みた。図(a)は、Blumenfeld(1913)が用いた等距離並木と平行並木での刺激（青の丸印）およびそれらのパースペクティブ空間への変換で、これは消失点に輻輳する（下部の灰色の 2 点は左右の眼球）。図(b)は物理的空間における刺激（青線上の赤点）をパースペクティブ空間における平行線分上へ位置づけ（小さな赤点）たもの（図の下部）、図(c) 物理的空間における平行（赤の丸印）と等距離平行（緑の丸印）の各アレーをパースペクティブ空間における平行（小さな赤丸）と等距離平行（小さな緑丸）の各アレー（図の下部）に変換したものを示している。

その結果、平行並木のアレーは正確にパースペクティブ空間内に記述できること、また等距離並木のアレーは「大きさ-距離不変仮説」によってアレー間の距離を調整することで引き出せることが示された。平行と等距離並木法における実験値と計算値の一致からパースペクティブ空間モデルは妥当なものと考えられている。

重力に基づくリファレンス（枠組）での視方向の更新

対象の視方向を規定する要因には、対象自体の方向リファレンス（対象中心要因、object-centered reference)、観察者の頭部方向リファレンス (egocentric reference)、そして観察者の重力リファレンス (gravity direction reference)の 3 通りがある。もし、これらのリファレンスの一つが変われば、その正しい方向関係を維持するために前の記憶された対象の空間関係を再計算(updating)する必要がある。

Niehof et al.(2017)は、視覚の空間枠組に囲まれた１本の線分の方向が、観察者の頭部方向が変わることによって垂直な空間枠組の時に記憶した線分の方向に影響するかについて検討した。もし線分の方向が重力リファレンスに基づいて記憶されれば、その記憶も変化した空間枠組によって影響されるし、また頭部運動の回転方向によってこの記憶が書き換えられれば、方向の知覚は新しい頭部位置での重力方向の変化に影響されると考えられる。この重力モデル(gravity-based model)によれば、線分方向システムの更新エラーは頭部運動それ自体によるよりは記憶から方向を読み出す時、並びに記憶に方

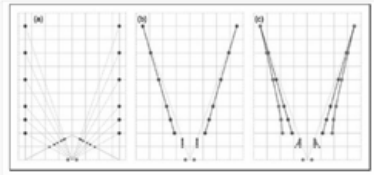

図 5.26　計算で算定した平行並木法と等距離並木法によるパースペクティブ空間。(a)Blumenfeld(1913)が用いた等距離並木と平行並木での刺激。(b)物理的空間における刺激（青線上の赤点）がパースペクティブ空間における平行線分上へ位置づけ（小さな赤点）たもの（図の下部）(c)物理的空間における平行(赤の丸印）と等距離平行（緑の丸印）の各アレーをパースペクティブ空間における平行（小さな赤丸）と等距離平行（小さな緑丸）の各アレー（図の下部）に変換したもの(Erkelens 2015)

向が記銘される時の重力フレームの主観的な歪みによると予測する。しかし、線分の方向が対象中心の座標のなかで視覚的空間枠組に関連づけられて貯蔵されれば、空間枠組が新しい方向に変わる時には、世界中心の本当の方向を正しく登録し維持するために、これらの座標の更新が必要となる。この場合、頭部の傾斜後にこの種の記憶の読み出しが起きると考えられる。

実験では、被験者の記憶された視方向が頭部の傾斜に伴ってどのように変化するかがしらべられた。図 5.26 に示したように、ディスプレーに 1 本の垂直あるいは傾斜線分とそれを囲む線分の四角形枠組を提示し、観察者の頭部を垂直あるいは右に傾けさせて観察させた。実験では被験者に合図を送って頭部を右に 30°傾けさせ、線分枠組を左右 45°の範囲のいずれかにランダムに傾斜させて提示した。種々の傾きのある線分刺激を枠組提示の後で 50ms 提示し、その後に枠組に類似した線分をマスク刺激としてランダムに提示した。この後、被験者には頭部を垂直にもどすように教示し、線分枠組を垂直に提示し、さらにプローブとしての線分を提示し、これが時計回りにあるいは反時計回りに傾斜して視えるかを判断させた。プローブ線分は試行の 80%を垂直に、あとの 20%は角度をランダムに提示した。統制実験には、頭部を右 30°傾けさせ、空間枠組を左右 45°の範囲内でランダムに傾斜させた事態で垂直線分の傾きを測定し、被験者の線分知覚判断能力をしらべた。

このように、被験者には頭部を傾けたままで種々に傾斜した空間枠組内の線分の方向を記憶させ、その後で頭部を垂直に戻して垂直な空間枠組内の線分の方向を記憶したそれと比較して判断させた結果、記憶試行とプローブ試行の線分方向の判断のエラーは記憶試行時の頭部傾斜とプローブ試行時の垂直な頭部の両方の事態での知覚的重力要因によって生起したことが示された。この種の判断エラーが観察者の頭部運動から直接媒介されたものではないこともあわせて明らかにされた。

これらのことから、視覚システムは線分の方向知覚を重力に基づくリファレンスに依拠し、このリファレンスは頭部運動が起きても線分の方向を記憶していると考えられる。

4 視空間記述（モデル）

絶対的奥行距離の過小視についての２つのモデル

絶対的奥行距離は過小視されるが、これを説明するモデルに内在的偏向モデル(intrinsic bias model)と俯角拡大モデル(angular expansion model)がある。図 19 の左図には内在的偏向モデルが、右図には俯角拡大モデルが示されている。ここで、D：奥行絶対距離、D’：視えの奥行絶対距離、H：眼の高さ、γ：俯角、γ’：視えの俯角、β：視線と地面とがなす角、β’視えのβ、η：地面傾斜角である。内在的偏向モデルでは、視覚システムは内在的に地面が上方に傾斜していることをデフォルトとしていることを仮定する。俯角拡大モデルでは、視覚システムは対象までの俯角を拡大する傾向があることを仮定する。

次式は内在的偏向モデルによる視えの絶対奥行距離（D')の予測式である。

$$D' = \frac{H\cos(\gamma)}{\sin(\gamma+\eta)}$$

また、俯角拡大モデルによる視えの絶対的奥行距離（D')は、視えの俯角(γ’）による場合(gaze model)と視かけの視線と地面とがなす角（β’）による場合(optical slant model)の２通りの予測式が可能となる。

$$D' = H/\tan(\gamma')$$

$$D' = H/\tan(\beta')$$

このとき、視えの俯角(γ’）を次のように仮定すると

$$\gamma' = 1.5\gamma$$

また、視かけの視線と地面とがなす角（β’）は次のように表される。

$$\beta' = k_1\beta + k_2\ln(D) + C$$

ｋ１は1.5、Cは0となるので、次のようになる。

$$\beta' = 1.5\beta + k\ln(D)$$

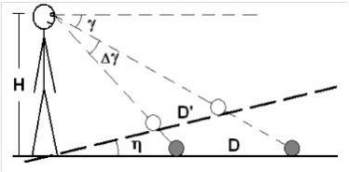

図 5.27　内在的偏向モデルによるの視えの相対的奥行距離(Li & Durgin 2012)

相対的奥行距離については、内在的偏向モデルの場合、次式で表される。

$$D' = \frac{H\cos(\gamma)}{\sin(\gamma+\eta)} - \frac{H\cos(\gamma+\Delta\gamma)}{\sin(\gamma+\Delta\gamma+\eta)}$$

この式による視えの相対的奥行距離は図 5.27 のように表される。

俯角拡大モデルで視えの俯角(γ’）による場合(gaze model)には、

$$D' = H \cdot \frac{\sin[1.5(\gamma_2-\gamma_1)]}{\sin(1.5\gamma_1)\cdot\cos(1.5\gamma_2)}$$

俯角拡大モデルで視かけの視線と地面とがなす角（β’）による場合(optical slant model)には、D’を次のように仮定すると

$$D' = D \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin(\beta')}$$

下記の式が得られる。

$$D' = D \cdot \frac{\sin(\beta)}{\sin[1.5\beta + k\ln(D)]}$$

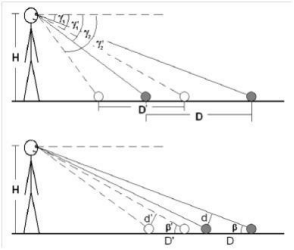

図 21　俯角拡大モデルによる視えの相対的奥行距離。上段は gaze model の場合、下段は optical slant model の場合(Li & Durgin 2012)

この俯角拡大モデルによって視えの相対的奥行距離は次の図 5.28 のように表される。

Li & Durgin(2012)は、視えの絶対的および相対的奥行距離についての内在的偏向モデルと俯角拡大モデルについての研究をレビューし、これら２つのモデルの幾何学的仮定は異なっているが、視えの相対的奥行距離についての予測は類似すると考えた。両モデルともに視えの相対的奥行距離の過小視を地面の傾斜の過大

視に帰因させ、同様に俯角拡大モデルは視えの絶対的奥行距離を視線による俯角の知覚的過大傾斜に帰因させる。したがって、俯角拡大モデルは、２つのタイプの絶対的および相対的な視えの奥行距離の過小視、すなわちリニア-な圧縮（主に視線による俯角の知覚的過大傾斜による）、およびノンリニア-な圧縮（地面の視えの過度な傾斜による）を予測する。両モデルは、等しく相対的な視えの奥行距離の圧縮程度を予測するが、俯角拡大モデルではさらに絶対的な視えの奥行距離のリニア-な圧縮、高低差のある傾斜角の過大視、絶対的な視えの奥行距離と前額に平行な面との間の異方性など視空間のバイアスに関連した経験的な事実をも説明できるといった特徴がある。

対象の一般知覚恒常性仮説(general object constancy)

Qian & Petrov(2012)は、対象の明るさコントラストが対象までの観察距離を変えても恒常を維持することを示し、視覚システムは対象までの絶対奥行知覚距離が変わっても対象の属性を恒常に維持する働きがあると考え、対象の一般知覚恒常性仮説と呼んだ。すなわち、視覚システムは対象の大きさ、明るさコントラスト、色、両眼視差など網膜上での種々な変化を調整し、対象の恒常性を維持するというわけである。

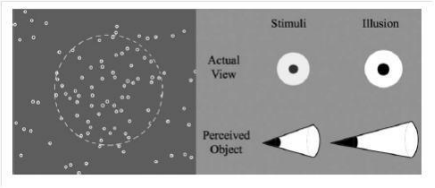

図 5.29　対象の奥行に関する恒常性をしらべる実験事態。左欄：白色ディスク内に黒色ディスクが提示され、それらが放射状に収縮（観察者から遠ざかる）と拡張（観察者に近づく）運動する。点線で示された円形（実際には提示されない）を通して運動するディスクが観察される。右欄：収縮運動時に観察されるパターンで、上段には対象の大きさと明るさコントラストの物理的刺激とその視え、下段には対象の奥行に関する知覚（横方向から描画）である(Qian & Petrov 2013)

今回、Qian & Petrov(2013)は、対象の一般知覚恒常性仮説の妥当性を検討するために、物理的奥行距離は変わらないが、視かけの奥行を変えることができるオプティック・フローを操作する方法で対象の大きさを変えて対象の奥行に関する恒常性が生起するかをしらべた。実験は、図 5.29 に示したように、白色ディスク内に黒色ディスクを提示し、それらをディスプレーの横方向に収縮（観察者から遠ざかる）と拡張（観察者に近づく）運動(radial optic flow)させ、それらを点線に示された円形（実際には提示されない）内に提示した。これをハプロスコープを通してペアとしたディスク間に視差を付けて提示すると、鉛筆形状のパターンが奥行を変化させて観察される（100 ペアを提示)。図の右欄上段(Actual View)には対象の大きさと明るさコントラストの物理的刺激とその視え、下段(Perceived Object)には対象の奥行に関する知覚（横方向から描画）が示されている。

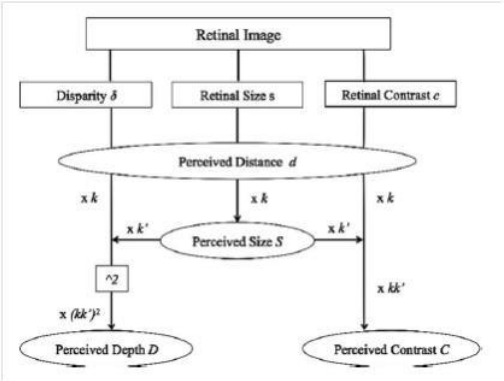

図 5.30　対象の一般性恒常性のしくみ。視覚システムは両眼視差、網膜像大きさそして網膜像明るさコントラストを対象までの絶対奥行距離の関数であるを乗じてそれぞれの出力値を決める。もし知覚された大きさが変われば、知覚された明るさコントラストと両眼視差もk’を乗じてそれぞれの出力値を変える。両眼視差による最終出力値は、大きさとコントラスト要因から２乗倍の影響を受け、奥行恒常性が生起する(Qian & Petrov 2013)

被験者には、鉛筆形状のパターンが収縮時にその芯が鋭くなるように知覚されるかをまず応えさせ、その次に視差を変えながら、奥行に関して知覚変化しなくなる点を求めた(nulling paradigm)。その結果、オプティク・フローを収縮させ観察者から遠ざかるように変化させた場合、視かけの「鉛筆の芯」(depth gradient)の明るさコントラストと大きさが増大し、より尖って知覚されること、またオプティク・フローを拡張させ近づくように変化させた場合には視かけの「鉛筆の芯」には逆の知覚印

象が生起することがわかった。この視かけの「鉛筆の芯」の尖りを消失させるのには、両眼視差を平均43%減じる必要があった。これは奥行に関する恒常性が起きていることを示し、しかも奥行と明るさコントラストの恒常が相互に関連していることも示した。これらの結果は、対象の一般知覚恒常性仮説を支持する。そのしくみは、図5.30に示されている。視覚システムは両眼視差、網膜像大きさそして網膜像明るさコントラストを対象までの絶対奥行距離(d)の関数であるkを乗じてそれぞれの出力値を決める。もし知覚された大きさが変われば、知覚された明るさコントラストと両眼視差もk’を乗じてそれぞれの出力値を変える。両眼視差による最終出力値は、大きさとコントラスト要因から2乗倍の影響を受け、奥行恒常性が生起するというわけである。もし、今回の実験のように、奥行の恒常を維持するためには要因kは2乗倍されて出力される。この仮説の特徴は知覚された大きさ、奥行そしてコントラストがすべて対象までの観察距離の知覚値に依存して変わることを前提としている点である。

5 大きさと距離不変仮説の検証

対象の視えの大きさ（S’）と奥行距離（D’）との間には次式（大きさ－距離不変仮説）が成り立つとされてきた（θは視角）。

$$S'/D' = \theta$$

一方、この不変仮説には大きさ－距離のパラドックス、すなわち、大きさの過小視が距離の過大視と同時に生起するとか、あるいは大きさの過大視に対して距離の過小視が生起するなどが報告されている(Sedgwick, H. A. 1986)。そこで最近の研究成果に合うように次のようなベキ関数式に修正された(Gogel 1971)。

$$S'/D' = K\theta n$$

大きさ－距離不変仮説は、距離知覚が大きさ知覚を媒介するモデル（媒介モデル、mediation model)と考えられる一方、大きさ知覚と距離知覚はそれぞれ独立に決められるとするダイレクトモデル(direct model）が提唱されている。このモデルで大きさ－距離仮説が成り立たないのは、視覚手がかりを処理する2種類の異なる過程が関与するからと考える。

Gibson ,J.(1979)によれば、観察者の視点の周囲には包囲光配列があり、観察者の視点の移動に伴ってその包囲光配列は変化するが、しかしその配列構造は不変に保たれる。このような包囲光配列をコントロールする実験事態に、オプティカル・トンネル(optical tunnel)がある。これは大きさと距離の関係を組織的にコントロールする道具として使用できる。図5.31は、オプティカル・トンネルの構造(上図)とその見え方(下図)を示す。オプティカル・トンネルは地が白あるいは黒からなる円が同心円状に配置され、それを観察すると下図の左(cross-sectional view)と右(longtudinal view)に図示したように視える。もし、ある物理的大きさ(S)のターゲットをオプティカルトンネルのある一つのリングを選択して置いた場合、この選択リングが観察者からのターゲットの物理的距離(D)となる。このとき、このDがオプティカル・トンネルの長さより短い場合にはターゲットの先にあるいくつかのリングが観察者のオプティカル構造に影響すると考えられる。この場合、(a)ターゲットによる大きさ刺激および観察者から対象までのトンネルによって与えられる条件(視角、奥行手がかり)、(b)対象の先にまで拡がるトンネル刺激の条件(対象が置かれた刺激自体の構造に関わる変数)が区別される。そして、知覚的大きさと距離は、媒介モデルでは(a)の条件で決まると考え、一方ダイレクトモデルでは(b)の条件で決まる。したがって、オプティカル・トンネルはターゲットまでのトンネルの長さを操作して用いられる。すなわち、トンネルはターゲットまでしか視えないか、あるいはターゲットの先まで視えるかである。もしダイレクトモデ

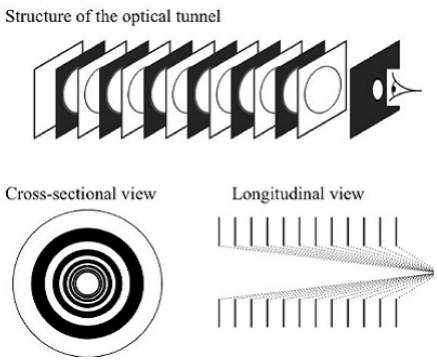

図 5.31　オプティカルトンネルの構造(上図)とその見え方(下図)。オプティカル・トンネルは地が白あるいは黒からなる円が交互に同心円状に配置される。それを観察すると下図の左に図示したように視える。それの側面図が下図の右に図示(Kim et al.2016)

ルが正しければ、トンネルのこのような連続性の操作はS'とD'に異なる影響を与え、また2種類のオプティカルトンネルはS'/D'＝Kθnの関係を異ならせると予測される。もし、トンネル操作が S'と D'に異なる影響を与えなければ、そして知覚された大きさと距離のベキ関数関係が違わなければ、媒介モデルが正しいことになる。

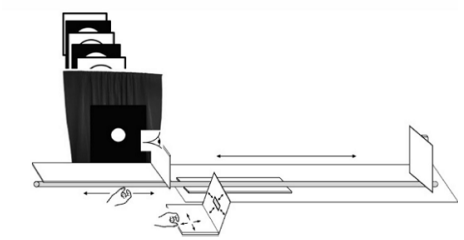

図5.32　知覚的大きさと奥行距離を測定する装置。知覚的大きさはパソコンの矩形の縦横の大きさを調整

Kim,et al.（2016）は、ターゲットの物理的大きさおよびオプティカル・トンネルの長さを操作し、S'とD'にどのような関係が生じたかを偏相関をもちいて解析した。もし相関があれば媒介モデルが正しいこととなる。一方、S'と物理的Sの間およびD'と物理的Dの間に相関があればダイレクトモデルが正しいといえる。

実験では図5.32に示した装置を用い、知覚的大きさはパソコンの矩形の縦横の大きさを調整することで、知覚的距離は左右の長さを調整することで測定された。実験条件は図5.33に示すように、トンネル連続条件とトンネル打ち切り条件を設定し、前者ではオプティカル・トンネルがターゲットを越えてその先まで連続して40個まで提示（左図）、また打ち切り条件でオプティカル・トンネルはターゲットの真後ろで白色面で断絶される（右図）。ターゲットは水平に置いたロッド（直径1.2 cm、長さ5，6，7 cmの3種類）、またトンネルの長さは162 cmであるが、ターゲット提示でトン

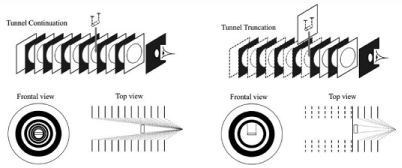

図5.33　オプティカルトンネルの実験条件。左図：連続条件でオプティカル・トンネルがターゲットを越えて連続して40個まで提示、右図：打ち切り条件でオプティカル・トンネルがターゲットの真後ろで白色面で断絶される(Kim, et al. 2016)。

ネルが打ち切られ条件での距離は 42、82、122、162 cm（トンネルの全長を L とすると、1/4L、2/4L、4/3L、4/4L)とした。被験者にはターゲット（rod）の視えの長さとそこまでの視えの奥行距離を図に示した測定装置で再現するように求めた。観察条件は単眼視で、装置での再現は両眼視で行った。

測定されたデータにもとづいて S'と D'の間のベキ指数を算定すると、

オプティカル・トンネルが連続する条件では

S'/D'=0.04θ0.85

オプティカル・トンネルが打ち切られる条件では

S'/D'=0.04θ0.93

となり、ベキ指数が異なった。これはダイレクトモデルを支持する。

また測定されたデータにもとづいて、S'、D'、θ、S、D の各変数間の偏相関をしらべると、S'と D'：-0.06、S'とθ：0.05、D'とθ：-0.02 となり、S'と D'、S'とθ、D とθの変数の間には偏相関が示されず、したがって S'が D'とθの両変数で因果的に決まるとする媒介モデルを否定した。一方、S’と S、S'と D、D'と D'の各変数偏相関をしらべると、S'と S：0.54、S'と D：-0.12、D’と D：0.46 となり、各変数間には有意な偏相関が示された。これはダイレクトモデルを支持した。ここでは、オプティカルトンネルをターゲット提示箇所で打ち切るという物理的操作が大きさ特有の、および距離特有の高次変数を生み出したと考えられる。

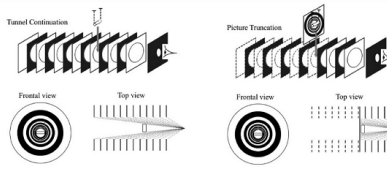

図 5.34　オプティカル・トンネル連続条件（左）とオプティカル・トンネルの画像挿入条件(右)（Kim,et al.2016)。

そこで Kim,et al.は、この結果をさらに確認するために、図 5.34 の右図に示したオプティカル・トンネル画像挿入条件を設定して、視えの大きさと距離を測定した。画像は、オプティカル・トンネルがあたかも先まで続いているかのように視せるもので、これはターゲットの知覚的大きさがターゲットのある位置の前と後のオプティカルな構造からの異なる大きさ手がかりによって決められるとする媒介モデルを検証するために加えられ

た。視えの大きさと距離の測定は、前実験と同様に実施され、その結果、前実験と同様な結果が得られた。

偏相関分析の結果から S'と D'の相関は有意ではなく、S'と D'はオプティカル・トンネルの連続性(長さ）の操作によって、それぞれ異なる影響を受けることが示された。D'は S'の媒介変数ではなく、それらは相互に関係するがしかし別々の処理過程でそれぞれ独立に処理されている（ダイレクトモデル）と考えられる。

6 General Object Constancy(GOC)モデルによる奥行恒常性の検証

General Object Constancy(GOC)モデルでは、観察対象を現実にあるように知覚(veridical perception)できるのは対象のもつ明るさコントラスト、大きさ、奥行(depth)など対象の奥行距離に対応して起きる網膜像の変化を同一の基準で尺度化しているためと仮説する (Qian & Petrov (28))。これまでの研究では、対象の知覚された大きさ、コントラスト、奥行は共通の距離に対応した尺度値が関係すると報告されている(Collett et al.,1991, Rogers & Bradshaw 1993, van Damme & Brenner 1997)。

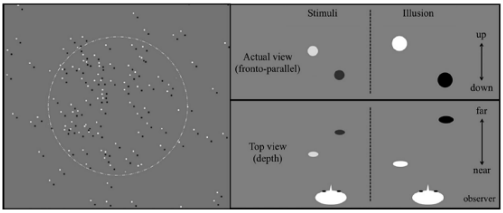

図 5.34 General Object Constancy(GOR)モデルを検証するための実験刺激。右図：白と黒色の同一の大きさのディスク刺激から構成され、白色ディスクは常に黒色ディスクの下方（陰の位置）に置かれる。左図は白と黒のディスク刺激の実際の刺激条件 (stimuli)とそれらの視え方(illusion)で、上図には観察者が正面から見たとき(actual view)の両刺激間の角度の分離を、下図には上方から見たとき(top view)の両刺激の奥行方向の分離を示す(Qian & Petrov 2016)。

そこで、Qian & Petrov(2016)は、対象の視えの角度間隔（前額平行面での大きさ）と奥行間隔の間の関係をしらべることで GOC モデルの妥当性を検討した。実験刺激は、図 5.34 の左図に示したような 100 組の白と黒のディスクパターンをランダムに配置し、

視野の中心に向かって遠ざかるように(stimulus contraction)あるいは観察者に接近するように(stimulus expansion)放射線状にオプティクフローさせる。白と黒の同一大のディスクはペアで黒色ディスクは白色ディスクの陰影として視えるよう外縁をぼかし、さらにこの２つのディスク間に両眼視差(0.02°　観察距離 110cm で 65cm に相当）を設けた。白色と黒色ディスク間の相対視差は固定したままでステレオスコープを通してオプティクフローを被験者に観察させた。すべての被験者には stimulus contraction 事態では刺激群が遠ざかるにつれて白色と黒色ディスク間の奥行分離は増大するように、また stimulus expansion 事態では減少するように知覚された(depth separation illusion)。このときすべての被験者には両ディスク間の方向距離とそれらの大きさが stimulus contraction 事態では増大するように知覚された(angular separation illusion)。そこで、被験者は stimulus contraction 事態で両ディスク間の奥行分離が増大するように知覚されたら所定のキーを、また stimulus expansion 事態でこれらが減少するように知覚されたら別のキーを押すように教示された。depth separation illusion の測定のためにナリングパラダイム(nulling paradigm)を用い、両刺激間の相対視差を小さくあるいは大きくしてこの illusion がゼロになる視差量が求められた。ま depth separation illusion の測定ためには、両刺激間の方向距離（angular separation）を調整させて illusion がゼロになるところが求められた。

その結果、(1)すべての被験者で白色と黒色間の depth separation illusion は視かけの距離が増大(減少)すると大きくなる（小さくなる）こと、(2)この depth separation illusion は相対視差あるいは angular separation を操作することで生起しないようにでき、その効果は angular separation 操作の方が効果的であること、(3)２つのディスク間の相対視差を除去しても視えの奥行は出現し、angular separation illusion を強めることはないこと、(4)オプティクフローに両眼視差を付けても depth separation illusion は促進されなく、ここでの運動の奥行は両眼視差より単眼的手がかりに基づいていることが明らかにされた。

これらの結果は、depth separation illusion が相対視差要因より angular separation 要因（大きさ）で効果的に減衰できること、しかし相対視差がなくてもは angular separation　illusion は生起することが示された。

Qian & Petrov(28)はこの実験結果およびこれまでの研究成果をまとめて、GOC メカニズムを図 65 のようなフローチャートで示した。このモデルでは、知覚的奥行(Perceived Depth)と知覚コントラスト(Perceived Contrast)が知覚距離(Perceived Distance)と知覚的大きさ(Perceived Size)によって尺度化される過程を通ることによって、それぞれの知覚的恒常が生じることを図式化している。GOC モデルでは、大きさ恒常、明るさコントラスト恒常そして奥行恒常は共通のメカニズムで生起するとしている。

大きさと距離の知覚モデルとしてのパースペクティブ空間

視空間のモデルとしてのパースペクティブ空間はそのパースペクティブ特性に基づいて構築された。このモデルは視空間の対象のアングル、大きさ、奥行距離を予測する。Erkelens(2017)によれば、物理空間からパースペクティブ空間への変換関係は図 5.40 のように表される。図の(a)は観察者（右端）からある奥行距離に 2 次元の物理グリッド（青色表示）を提示すると、パースペクティブ空間ではそれはある奥行位置に定位され、それと観察者の結ぶ線分はすべて消失点（VP)に収束する（橙色表示）ことを示す。図の(b)には物理グリッドを時計回りに 30° 中心軸に回転した場合、図の(c)には消失点が観察者の背後にある場合のパースペクティブ空間をそれぞれ示す。図 5.41 には、パースペクティブ空間における奥行距離と大きさについて示し、(a)には、物理対象（青色表示）が観察者（右端の

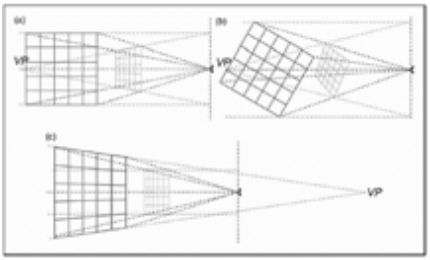

図 5.40　物理空間(physical space)とパースペクティブ空間(perspective space)の間の変換。(a)2 次元の物理グリッド（青色表示）を観察者（右端）のある奥行距離に提示すると、パースペクティブ空間では物理グリッドはある奥行位置に定位され、それらと観察者の結ぶ線分はすべて消失点（VP)に収束する（橙色表示）。(b) 物理グリッドを時計回りに 30° 中心軸に回転した場合。(c)消失点が観察者の背後にある場合のパースペクティブ空間(Erkelens 2017)。

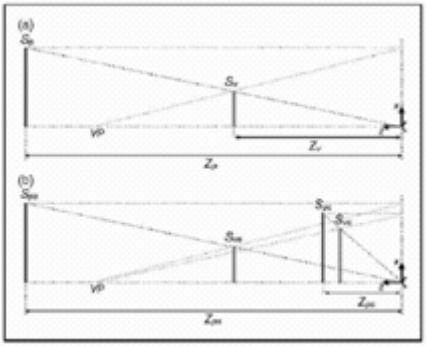

図 5.41　パースペクティブ空間における対象の奥行距離と大きさ。(a) 物理対象（青色表示）は観察者（右端のドット）から物理距離 Zp に位置し、消失点が距離 VP にあれば、その大きさ Sv（赤色表示）は奥行距離 Zv に視える。(b) ある物理対象 Sps が物理奥行距離 Zps に、比較対象 Spc が奥行距離 Zpc にあるとき、パースペクティブ空間では消失点が VP にあれば後方の対象のの大きさは Svs、前方のそれは Svc となる(Erkelens 2017)。

ドット）から物理距離 Zp に位置し、消失点が距離 VP にあれば、その大きさ Sv（赤色表示）は奥行距離 Zv に視えることを示す。図の(b)は標準と比較の２刺激がある場合で、ある標準対象 Sps が物理奥行距離 Zps に、比較対象 Spc が奥行距離 Zpc にあるとき、パースペクティブ空間では消失点が VP にあれば後方の対象のの大きさは Svs、前方のそれは Svc となることを示す。

この時、物理空間と視空間における奥行距離の関係は次式で表される。

$$\frac{Z_v}{Z_p} = \frac{VP}{Z_p + VP} \quad \text{--------} \quad (1)$$

大きさは距離と同じように次式で規定できる。

$$\frac{S_v}{S_p} = \frac{VP}{Z_p + VP} \quad \text{-------} \quad (2)$$

標準と比較の２刺激を提示した場合の物理的大きさと視覚的大きさの関係は次式のようになる。

$$\frac{S_{pc}}{S_{ps}} = \frac{S_{vc}}{S_{vs}} \frac{Z_{pc} + VP}{Z_{ps} + VP} \quad \text{--------} \quad (3)$$

標準刺激に対する比較刺激の大きさは次式のようになる。

$$\frac{S_{pc}}{S_{ps}} = \frac{Z_{pc} + VP}{Z_{ps} + VP} \quad \text{--------} \quad (4)$$

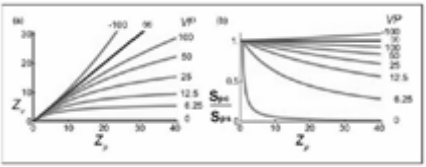

図5.42　VPを変数としたときの視えの奥行距離と視えの大きさの変化。(a)物理距離（Zp）を変えたときの知覚距離（Zv）、パラメータはVP。(b) 物理距離の関数としての標準刺激（Sps）に対する比較刺激（Spc）の大きさの比、パラメータはVP(Erkelens 2017)。

図5.42はVPを変数としたときの視えの奥行距離と視えの大きさの変化をグラフに表したものである。図の(a)には、式(1)にもとづき、パラメータはVPにとり物理距離（Zp）を変えたときの知覚距離（Zv）の変化を示す。もしVPが無限（青色表示）であれば、物理距離と知覚距離は一致し、もしマイナスになれば、物理的距離を過大視し、逆遠近法となる。図の(b)には 式(4)にもとづき物理距離の関数としての標準刺激（Sps）に対する比較刺激（Spc）の大きさの比の変化で、パラメータはVPである。VPが無限大（青色表示）となれば、知覚された大きさは物理距離とは無関係になり、大きさ恒常性を示す。VPがマイナスでは知覚された大きさは過大視される。VPがゼロ(0)ならば知覚された大きさは網膜に投影された大きさによって決まるので、物理距離に比例して縮小する。

このパースペクティブ理論は２つの前提のもとで成立する。一つは、視空間はユークリッド空間であるという前提である。つまり物理空間の直線は鉄路のように視空間でもその直線性を維持し、また物理空間の複数の整列した線分は視空間でも整列性を維持する。前提の二つは、対象の方向は物理空間と視空間で一致することである。

Erkelensはパースペクティブ理論をGilinsky(1951)の数学モデル、Ooi & He(2007)のモデル、ベキ関数モデル(Baird & Wagner, 1991)、Wagnerのvector contractionモデル(1985)、およびFoley　(2004)の視空間モデルと比較し考察した。Gilinskyの数学モデルは、パースペクティブ理論とは異なる原理にもとづくが、対象までの知覚された奥行距離と大きさを導く数式は両理論とも等しい。Ooi & Heのモデルでは、地面に置かれた対象の奥行距離知覚には観察者の眼の高さおよび地面の知覚した傾きが考慮されたが、パースペクティブ理論との相違はほとんどなかった。ベキ関数モデルではパースペクティブ理論の距離判断のすべて範囲でその相違は小さいもので、ベキ関数モデルと

パースペクティブ理論のどちらのモデルでも奥行距離と大きさの判断は適切に説明される。Wagner の vector contraction モデルはランダムに提示された対象（棒刺激）間の距離判断のために提案されたもので、この種の知覚問題の範囲では妥当といえる。最後に Foley のモデルは、観察者から奥行方向の異なる２点の杭の間の距離知覚を課題としたもので、それは２点間の距離イメージの大きさと奥行距離に比例して規定されるとした。Foley のモデルとパースペクティブ理論は、奥行距離と２点間の距離知覚が同じパラメータでは規定されない点で共通するという。

このように Erkelens は、パースペクティブ理論が他の５つのモデルを統合するモデルであると主張する。

7 シーン・レイアウトのプライミングと視覚記憶（アイコーニック・メモリ）

空間シーンを知覚し記憶し日常生活の課題に役立てるためには、シーンの構造を理解する必要がある。シーンの視覚探索やナビゲーションのためには正確で一貫したシーンの視覚記憶が必要である。視覚的り対象および広が空間のレイアウトRI の研究によれば面の情報は別々にる((Epstein, 2005; nwisher, 1998; Kravitz et al.2011, Park et al. 2011)。このためにはシーンのレイアウト情報が記憶の中に留められる必要がある。これに関する研究は少ないが、この問題に対するひとつの研究方法にシーンプライミングパラダイム(scene priming paradigm)がある。これ

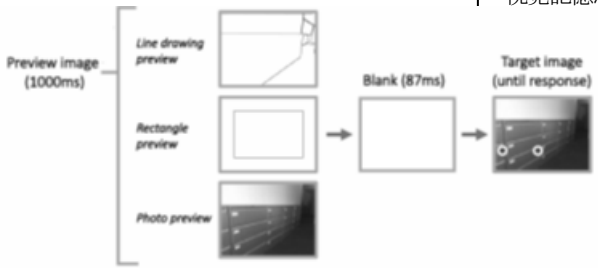

図 5.43　シーンプライミングパラダイム(scene priming paradigm)。まず、3 つのプレビュー条件（線画のシーン、長方形、写真のシーン）の中から一つを提示（1000ms)、次にブランク刺激を挟んでターゲット刺激を提示し、被験者には与えた課題（提示した２つの赤色の２点のうちどちらが観察者に近いか）に対する反応時間を測定する(Shafer-Skelton & Brady

は最初に異なるシーンを短時間提示し、次いでターゲットを提示し、それに対する反応時間を測定してシーンのプライミング効果をしらべる方法である。

Shafer-Skelton & Brady(2019)は、プレビュー条件として写真（映像）あるいはそれの線画シーンのどちらをプライミング効果があるかを試す実験を試行した。図 5.43 に示したように、まず、3 つのプレビュー条件（写真のシーン、その線画、長方形、）の中から一つを提示（1000ms）し、次にブランク刺激を挟んでターゲット刺激を提示し、被験者には与えた課題（シーン内のいろいろな箇所に提示した赤色の 2 点のうちどちらが観察者に近いか）に対する反応時間を測定した。被験者は 102 名の働く成人とし、課題にできる限り速く反応するように教示した。その結果、写真シーンによるプレビュー条件の反応速度は、線画シーンや長方形条件より有意に速いことが示された。また、奥行弁別の正確度は写真と線画シーン間で差はみられなく、速度と正確度との間のトレードオフはないと考えられた。このことから、写真による全シーンは、意味ある奥行情報をもつ線画よりプライミング効果が高く、ターゲットである奥行弁別にメリットがあるといえる。

この実験ではシーンなど 1000ms の提示後 87ms のブランクを置いてターゲット刺激が提示されるので、プレビューイメージの低レベル視覚情報は映像記憶であるアイコ-ニックメモリ(iconic memory)に蓄えられる。したがって、被験者はプローブ刺激（2つのドット）を欠いただけの映像プレビューイメージに引き続き提示された映像ターゲット刺激（2つのドット）を効果的に探索・弁別できたと考えられる。図 5.44 に示されたように、2 種類のプレビューイメージ（写

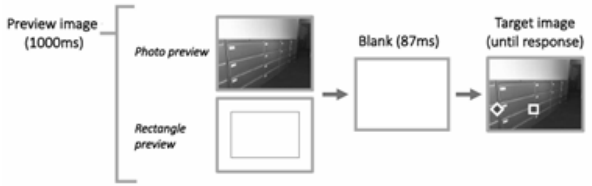

図 5.44　2 種類のプレビューイメージ（写真、長方形）を 1000ms 提示、87ms のブランクの挿入、そしてターゲットイメージとして写真イメージにダイヤモンド形と四角形を加えて提示し、観察者に近い方はどれかをなるべく早く選択して反応させる(Shafer-Skelton & Brady 2019)。

真、長方形）を 1000ms 提示し、アイコーニックメモリが消えない時間である 87ms のブランクの挿入、そしてターゲットイメージとして写真イメージに小さなダイヤモンド形と四角形を加えて提示し、被験者（100 名の働く成人）に近い方はどれかをなるべく早く選択して反応させた。その結果、写真イメージのプレビュー条件は長方形イメージ条件（814ms の反応時間）より有意にターゲット間の奥行を速く弁別（777ms の反応時間）できることが示された。

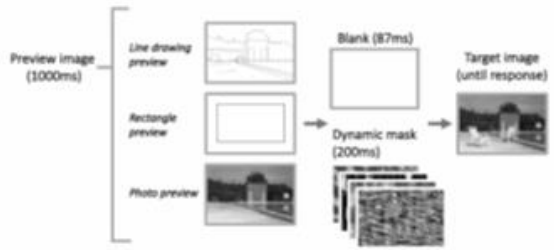

図 5.45　3 種類のプレビューイメージ（写真、その線画、長方形）、挿入刺激であるブランク（87ms）または視覚マスキング刺激、そしてターゲットイメージ（200ms の動画）。奥行課題としてのターゲットは２つの椅子で観察者に近い方をできるだけ速く弁別して反応させる（プレビューイメージにはターゲットである椅子は写っていない）（Shafer-Skelton & Brady 2019）。

この種のプライミング効果がアイコーニックメモリにおけるプレビューシーンとターゲットシーンの統合によって生起するならば、この記憶はプレビューシーンとターゲット刺激の間に視覚マスクを挿入あるいはシーン間の時間を延ばすことで妨害されると考えられる。そこで、図 5.45 に示したように、3 種類のプレビューイメージ（写真、その線画、長方形）、挿入刺激であるブランク（87ms）または視覚マスキング刺激（200ms の動的刺激）、そして課題であるターゲットイメージをそれぞれ提示した。課題は２つの椅子で観察者に近い方をできるだけ速く弁別して反応させることであった（プレビューイメージにはターゲットである椅子は写っていない）。被験者は 306 名の成人の働きをもつ者とした。その結果、非マスク事態では写真と線画条件は長方形条件と較べると反応時間に有意な差が生じたが、マスク条件ではこのような差は起きなかった。また、マスクと非マスク事態を比較すると、プレビュー事態での線画と長方形

条件および写真と長方形条件の反応時間は、マスク事態で有意に短かった。さらに、マスクと非マスク事態の反応の正確さを比較すると有意な差は出なかった。
このことから、長いブランク刺激時間およびマスク刺激の挿入がプライミング効果を妨害することが示されたが、これには視覚記憶、とりわけアイコーニックメモリが関係していることを示す。そしてこのプライミング効果はメモリ内のシーンレイアウトの情報を遅延時間中にバラバラにするのではなく、プレビューで記憶した情報と現在のイメージ情報を統合して視覚探索を促進すると考えられる。

8 その他の研究

3次元の回転事態でのアイテム探知課題におけるプレビューの効果

視覚シーンは多くの対象が存在し空間を構成するための視覚情報に満ちているが、視覚システムの能力には限りがあるのですべての空間情報が処理されない。視覚システムはある瞬間に必要な情報に限定して処理（注意の作用）することで、この能力の限界を克服する。視覚探索では２つのタイプが示唆されている。ひとつはイメージによるボトムアップ方式で、単一に絞られた対象および急激な刺激の出現によって探索する。もう一つは知識に基づくトップダウン方式でターゲットの位置や特徴に対する期待で探索する（Treisman & Gelade, 1980;

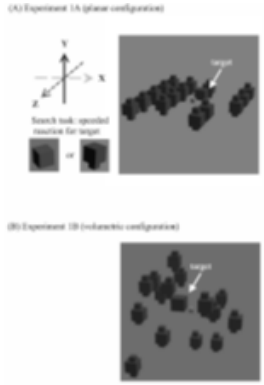

図5.46　視覚探索事態。(A) アイテムは５×５のマトリックスのX-Z面（水平面）に疑似的にランダムに選ばれた位置に置かれ、ターゲットを探索しそれがドットをもつかを判断が求められる。(B) ターゲットは５×５のマトリックスのX-Y-Z面に疑似的にランダムに選ばれた位置に3次元配置され同様な判断が求められる（Osugi & Murakami

Yantis & Jonides, 1984; Egeth et al. 1984a, 1948b)。この 2 つの方式は視覚探索において広範囲に使われる。

Osugi & Murakami(2019)は、現実世界を反映するようにシミュレートした 3 次元世界で視覚探索をしらべた。とくにプレビューベネフィット(preview benefit)、すなわち、誤認要素(distractor)を下見させるとそのアイテムが除外されて視覚探索が容易になるプレビュー効果(Watson & Humphreys 1997)が分析された。実験では図 5.46 に示したように、探索場面として 2 次元面と 3 次元面が設定された。図の（A）はターゲットとアイテムが置かれる 2 次元面を示し、アイテムは５×５のマトリックスの X-Z 面(水平面)に疑似的にランダムに選ばれた位置に置かれ、ターゲットを探索しそれがドットをもつか否かの判断が求められる。図の（B）ではターゲットは５×５のマトリックスの X-Y-Z 面に疑似的にランダムに選ばれた位置に 3 次元配置され、静止した条件と Y 軸中心にリジットで回転する条件とで同様な判断が求められた。アイテムのセットサイズは 4、8、16 個とした。図５には、3 通りの刺激の提示順序条件、すなわちプレビュー条件で元のアイテムが提示され 1 秒後に新しいアイテムを加えて提示される条件（A）、完全提示条件ですべてのアイテムが同時に提示される条件（B）、半数のアイテム提示条件で新規なアイテムのみを提示される条件（C）である。被験者にはターゲットを探しそれがドットをもてば「６」キーを、ドットをもたなければ「４」キーをなるべく速く押すように求め、反応時間を測定した。反応時間が 10 秒より長い場合、あるいは間違っている場合にフィードバックがなされた。

実験の結果、アイテム数に伴う反応時間はリニアに増大し、しかも半数提示条件が有意に最速、つぎにプレビュー条件、そして完全提示条件となった。これらの関係は X-Z 面、X-Y-Z 面、および Y 軸回転事態で同様な傾向を示した。

これらの結果から、ターゲットの探索事態においてプレビューベネフィットが確認され、3 次元の座標においてプレビュー時のアイテムが記憶のテンプレートに保存され用いられ、さらにこれらのプレビューベネフィットは 2 次元面のみでなく垂直軸に回転する 3 次元面でも効果があるので記憶テンプレートは 3 次元空間座標でコード化され保持されると示唆される。

ロッドーフレーム錯視における焦点となる刺激(ロッド)の視方向の不確実性

頭部方向知覚は前庭感覚と視覚が統合されて決まると考えられている。ここでの視覚の役割は、ロッドーフレームテストでしらべられる。このテストではロッドとそれを囲むフレームの関係でロッドの方向が決まり、フレームが垂直ならば垂直方向を求めたロッドも正しく定位されるが、フレームが傾いていればロッドもその方向に傾いて定位され（ロッド―フレーム錯視）、頭部方向を指し示すと考えられている。

Pomante et al.(2019)は、このロッド錯視におけるロッドが前庭感覚と視覚の統合過程に何らの役割を果たすことなく単なるノイズになって頭部方向の指示の代理として機能するために生起するのかを再検討した。図 5.47 には、垂直の知覚評価に関わる感覚の統合モデルを示した。図（A）には、一般に視覚と前庭感覚の統合によって観察者の最適な頭部方向の知覚評価~ Hs が求められることを示した。一方、ロッドーフレームテストでは、頭部方向の手がかりはグローバルな視覚枠組で与えられ、各眼における焦点となる視線分の方向~ LE が唯一の情報であり、これに眼からのシグナル~ EH と頭部のシグナル~ Hs が付加されて視空間~ Ls 内の線分の方向が知覚評価される。頭部が傾くと、前庭感覚に駆動される計数的回転機能が眼球の方向を規定する。相互作用仮説(interaction hypothesis)によれば焦点となる線分は視覚枠組と相互作用して空間内の頭部方向の知覚評価~HSvis に直接に関わる。したがって、このテストにおいて出現する

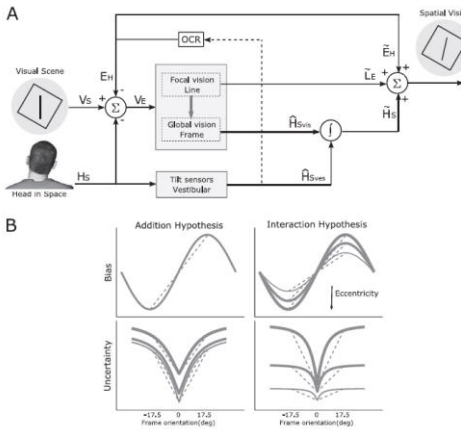

図 5.47　垂直知覚評価における感覚の統合モデル。(A) 視覚と前庭感覚の統合によって観察者の最適な頭部方向の知覚評価が求められる。(B) 付加仮説（左図）と相互作用仮説（右図）の量的推定モデル。（Pomante et al. 2019）。

不確実性は統合の最適化の結果となる。付加仮説(addition hypothesis)によれば、焦点となる視線分は網膜上の線分の方向~LE を提示するだけで頭部シグナルの方向計算とは無関係と仮定される。図（B）には、付加仮説(左図)と相互作用仮説(右図)の知覚評価における不確実性とバイアスの量的推定モデルを示す。付加仮説によれば線分方向が主にロッドの方向によって決められるので、焦点となる線分の不確実性を操作（線分から楕円に代え離心率を変化）すると評価の不確実性がフレームが傾いていないときには増すが、一方バイアスには変化が起きないと予測される。相互作用仮説によれば、ロッドがフレームと相互作用するのでこれが視覚に誘導された空間内の頭部方向評価~HSvis に影響するために、視覚の主観的な垂直評価の不確実性は楕円の離心率とともに減じるが、一方フレームの傾きによる強い効果が出ると予測される。このときのバイアスは楕円が円に近づくと多元的感覚統合の影響を受けて増大する。この２つの仮説の妥当性が、フレームの傾斜角度を３通りに変えた場合（−17.5°、0°、17.5°）の３通りに離心率（0.74、0.82、0.99）の楕円条件で、フレーム傾斜角度に対する不確実性とバイアスの変化（点線で表示）をみることで検討された（図 5.48）。実験では、視覚によるロッドのみがロッドーフレーム課題において付加的なノイズとは無関係に主観的視えの垂直（SSV）に影響する（付加仮説）のか、あるいはフレームとの相互作用を通じて複合的な感覚統合にバイアスを生じさせ、その結果、頭部方向の知覚評価がなされる（相互作用仮説）のかが検討された。そのためにロッドの線分を楕円に取り換え、楕円の離心率を変化することで

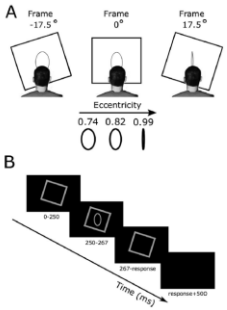

図 5.48　実験装置と条件。(A) 3 通りの傾斜角度の異なるフレーム（−17.5°、0°、17.5°）に対して 17ms で提示した 3 通りの離心率の異なる楕円 (0.74、0.82、0.99) の視えの傾きが時計回りか反時計回りかをこたえさせる。(B) 提示順序は、空のフレームー楕円＋フレーム＋空のフレームで数値は提示時間 (ms) (Pomante et al. 2019)。

垂直知覚評価における不確実性を操作した（楕円の離心率を０にして円にすると垂直の知覚評価がもっとも逸脱）。被験者は 36 名の男女の成人（20－50 歳）とし、楕円刺激が視かけ上垂直に対して時計回転方向にあるいは反時計回転方向のいずれかをキー操作でこたえるように求めた。

実験の結果からフレームの傾き条件ごとに焦点となる楕円刺激の傾きが時計方向に半々（50%）に判断される点を求めると、視えの垂直はフレームが 0°に比較してその角度が大きいと変位され、このことからバイアスが大きいことが示された。視えの垂直はフレームの傾きが 0°に比較してフレームが左・右に傾くと、その方向に変位されたが、しかし、このバイアスは楕円の離心率には影響されず、したがってフレームに囲まれた楕円の不確実性が主観的垂直(SSV)のバイアスには影響しないことを示唆した。SSV の不確実性は楕円の離心率が増大すると減少し、とくにフレームが垂直の場合に著しかった。フレームが左(－17.5°)あるいは右(17.5°)に傾くと約 2 度フレームの傾き方向に視えの傾きがシフトしたが、楕円の離心率の変化にはこのようなバイアスは皆無だった。

実験結果から、焦点となる楕円の離心率が主観的垂直（SVV）の不確実性に与える影響はフレームが垂直の場合に大きく、SSV のバイアスも離心率に影響されないことが示された。これは楕円が頭部を含む方向知覚評価を変位させるグローバルな視覚処理過程の一部であるフレームとの相互作用がないことを示す。このことから、相互作用仮説が否定され、そのかわりに網膜における楕円の方向についての不確実性が処理過程において主たる役割を果たすという付加仮説、すなわち視えの方向は眼と頭部からのシグナルからなる空間の座標軸で決められると考えられる。

大きさの恒常性の初期視覚野

大きさの恒常現象はその観察距離に伴う網膜上の対象の大きさ変化に対応しないで知覚されることをいう。すなわち、視覚刺激に応答する神経細胞が持つ空間的な構造を表すレチノトピー（retinotopy）から逸脱する現象である。大きさ恒常性のニューラルな基礎はいまだ明らかではないが、主に 1 次視覚領で生じているとする研究がいくつかある(Murray etal.2006; Fang et al.2008; Sperandio et al. 2012; Ni et al. 2014; He et al.

2015)。これは対象の網膜の位置と１次視覚野が対応関係をもつ（網膜位相）ことを示唆する。しかし、大きさ恒常性は網膜と視覚野が一対一の固定的なマッピング関係を妥当ではないと否定する。Sperandio et al. (2012)は、物理的距離に伴う大きさ恒常性を残像を利用してしらべ、１次視覚野（V１）において大きさ恒常性がエンメルトの法則(Emmert、1881)に比例して変化することを示した。しかしこの研究では物理的刺激と残像を量的に比較することが難しいという難点がある。

そこで、Chen et al.(2019)は、大きさの直接比較が可能な事態で知覚的測定と神経生理的測定を試みた。たとえば、等しいサイズのオーバーラップしない対象が異なる奥行距離に同時に観察される場合、より遠くの対象の視覚野の表象の大きさは視覚野で２つの対象がオーバーラップしている場合にもそのサイズは大きくなるように誘導されると考えられる。大きさ恒常性の大脳皮質における修正は、網膜位相からの何らかの逸脱がシーンの神経的表象のトポロジーの変化をもたらすと考えられるので重要である。この問題は、リアルな世界とバーチャルな世界（VR）における大きさ恒常性の知覚程度をしらべること、すなわち完全な恒常から恒常ゼロの事態を設定し皮質のおける神経活動と知覚的恒常との相関を定常状態視覚誘発電位（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、SSVEP）をもちいることによってアプローチできる。

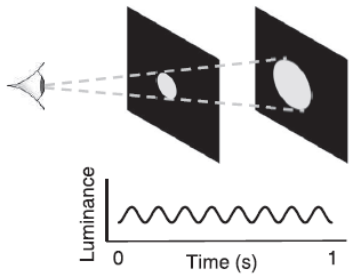

図 5.49　大きさ恒常性実験の刺激配置。ディスプレイに視角を等しくして２つの塗りつぶし円を提示（円までの観察距離は 40 あるいは 80cm）。円の輝度は定常状態視覚誘発電位（steady-state visual evoked potentials, SSVEP）反応が出やすい 8Hz のサイン波形(Chen et al. 2019)。

実験１では、２つの奥行距離（40cm と 80cm）に視角の等しい対象を提示し、SSVEP を測定、実験２では高次視覚野での反応を減衰するために刺激フリッカーを変化させて提示し、大きさ恒常性が起きる否か、実験３では、VR 事態での大きさ恒常性を測定、実験４ではリアルな世界と VR 世界での恒常性測定、

などこれらの4通りの実験を実施した。図5.49には、実験1と2の大きさ恒常性実験の刺激配置を示し、ディスプレイに視角を等しくして2つの塗りつぶし円を提示（円までの観察距離は40あるいは80cm）し、円の輝度は定常状態視覚誘発電位（SSVEP)反応が出やすい8 Hz（あるいは比較としての30 Hz）のサイン波形の周期で提示した。被験者には中央の注視点を注視させ、実験円は視角1°から10°まで1°ステップで、あるいは2°から8°まで1°あるいは2度のステップで増大あるいは減少方向を決めて大きさを変えて提示し、フリッカーする刺激を受動的に観察させた。観察距離を40cmと80cmと変えるが、視角は観察距離40cmに等しくなるように操作した。VR環境(実験3)条件は、図5.50に示した。その図（A）の上段の左図には3Dの廊下場面を、また一行目の左端には刺激サイズの最大を、右端には刺激サイズの最小を奥行距離80cmに、2行目には最大と最小サイズの刺激を奥行距離40cmに設定して示した。また図（B）はコントロール条件で背景と周囲は無地に設定(featureless)し、1行目には奥行距離80cm、2行目には奥行距離40cm条件を示した。EEGは32箇所の電極を頭皮に置き、実験1では1000Hzのサンプリングレートで、実験2では500Hzのサンプリングレートで、実験3のVR実験では被験者にヘッドセットを装着させるため反応が出やすい1箇所(Oｚ)で、それぞれ測定した。実験4における知覚とSSVEPの恒常性インデクスの計算式は、図5.51に示されている。4つの大きさ

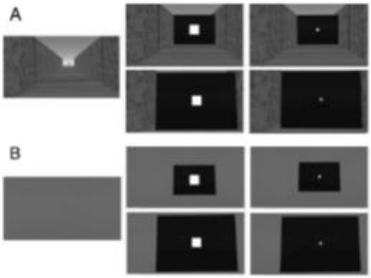

図5.50　図（A）にはVR3Dの廊下場面を上端の左図に、上段の一行目の左端には刺激サイズの最大、右端には刺激サイズの最小を示し奥行距離は80cmとし、2行目には最大と最小サイズの刺激を示し奥行距離は40cmとし、また図（B）コントロール条件で背景と周囲は無地に設定し、1行目には奥行距離80cm、2行目には奥行距離40cm条件をそれぞれ示した(Chen et al. 2019)。

（a、b、c、d）は物理的サイズを表す（dは物理的な大きさの比較のために記したが、実際は計算されていない）。

$$\text{Perceptual size constancy index} = \frac{P(b)-P(a)}{P(c)-P(a)} \times 100\%,$$

ここで、Pは対象の知覚された大きさである。

$$\text{SSVEP size constancy index} = \frac{S(b)-S(a)}{S(c)-S(a)} \times 100\%,$$

ここで、Sは対象のSSVEPの増幅値である。

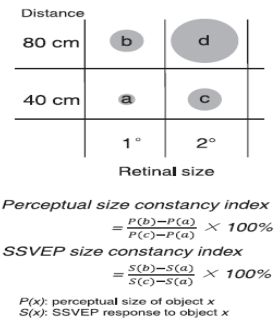

図10　知覚恒常性とSSVEPの恒常性における対象の大きさの計算方式。4つの大きさ（a、b、c、d）は網膜サイズではなく物理的サイズを表す（dは物理的な大きさの比較のために記したが、実際は計算されていない）(Chen et al. 2019)。

実験の結果、(1)刺激に対する側頭葉のSSVEP反応を振幅の大きさを左視野、中央視差、右視野（上段の左端、中央、右端の図）のトポグラフで示したものが図5.52である。また、図の下段は網膜サイズに対する正規化した振幅の大きさでパラメータは遠距離（赤）・近距離（黒）条件、および遠距離条件での対象の大きさ(object size)のみによる予測値(青)である。中央視野の測定値が周辺視野のそれより強いことがわかる。もしこれらの反応が網膜サイズのみによっていれば2つの奥唯距離の反応は同一になるはずであるが、より遠い位置の対象の反応（赤曲線）が近い位置のそれ（黒曲線）より強く、したがってより大きく知覚され、恒常性が生起した。(2) フリッカー頻度数（8あるいは30Hz）によるSSVEP反応は頻度数による相違は見いだせなかった。フッリカー頻度が大きいほど高次の視覚野を反映し、したが

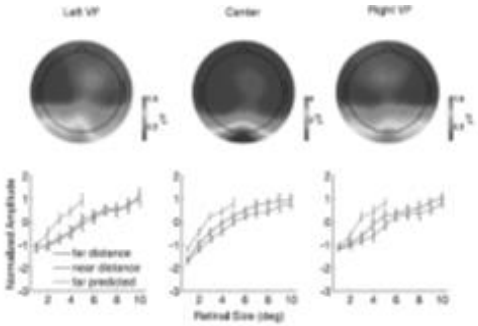

図 11　側頭葉で測定した（01、0z、02）SSVEP の振幅の大きさで左視野、中央視差、右視野（上段の左端、中央、右端の図）のトポグラフ。中央視野の測定値が周辺視野のそれより強い。下段は網膜サイズに対する正規化した振幅の大きさでパラメータは遠（赤）・近距離（黒）条件と遠距離条件での対象の大きさ(object size)のみによる予測値(青)（Chen et al. 2019)。

って 30Hz のフリッカー条件で反応が減衰すると予測したが、両フリッカー条件で SSVEP の反応結果は同じであった。(3)VR 事態の SSVEP 反応は奥行手がかりがある廊下事態で近くの対象（40cm）より遠くの位置条件（80cm）で大きく、また手がかりを欠いた事態 featureless)では遠・近ともに SSVEP 反応の差は大きく減じ、したがって奥行手がかりの有る条件では知覚恒常性が起きていることを示した。(4)精神物理的測定では、奥行距離 40ccm と 80cm のリアル事態での大きさ恒常性は 95.9%(測定値／実際の大きさ)、VR 廊下事態のそれは 50.7%（size index）、そして手がかりの無い事態のそれは 26.2%であり、リアル事態ではこれまでの研究と同等の恒常性が生起した。(5) SSVEP の反応強度から得られた恒常度を精神物理的測定値と比較すると、その恒常度はリアル事態および VR 事態の知覚的恒常度の約半分であることが示された。(6) SSVEP のフェーズは対象の奥行距離および網膜サイズに影響されないことも示された。

これらの結果から、V1 のレチノトピー (retinotopy)は知覚した対象のサイズによって明瞭に調整されていること、しかし知覚判断の程度には及んでいないことが示されている。

9　得られた成果

(1)２つの対象のみが暗室空間に存在する場合の近方の絶対奥行距離知覚は、両眼に形成される遠方の対象についての輻輳角が一定の奥行距離以上にはならないので、２つの対象間の相対視差によって決められる。

(2)左右眼の眼球位置情報および網膜位置が視えの視方向定位におよぼす効果についてしらべられ、左右眼からの眼球位置と網膜位置の情報は観察者の対象の視えの方向定位において等価に影響するのではなく、左右眼で一方が強ければ他方が弱くなるような共変化を示す。

(3)上/下視野、左／右視野、中心/周辺視野のそれぞれで視野の正立刺激を相互に抗争状態にしたとき、それぞれの視野がターゲット（文字）の正立視におよぼす効果は、上/下視野、左／右視野、中心/周辺視野の各々で一方の背景視野の方向を固定し他方の背景視野の方向を変化させた場合にはターゲット刺激の視えの方向は変化させた背景視野の方向へとシフトすること、またターゲットの正立知覚に強い影響を与えるのは左右視野間では等しいが、下方視野は上方視野より影響が強いこと、そして中心視野と周辺視野は相互に影響を与えていることが示された。

(4)絶対奥行距離知覚では距離の過小視が起きるが、これは視えの俯角の拡大と視線方向にある対象面の前額に対する視え角度の拡大によって生じる。

(5)視えの絶対的および相対的奥行距離についての内在的偏向モデルと俯角拡大モデルについての研究がレビューされ、これら２つのモデルの幾何学的仮定は異なっているが、視えの相対的奥行距離についての予測は類似すると考えた。両モデルは、等しく相対的な視えの奥行距離の圧縮程度を予測するが、俯角拡大モデルではさらに絶対的な視えの奥行距離のリニア-な圧縮、高低差のある傾斜角の過大視、絶対的な視えの奥行距離と前額に平行な面との間の異方性など視空間のバイアスに関連した経験的な事実をも説明できる。

(6)Wells-Hering の法則の妥当性の検証を試みられた結果、片眼への刺激入力を弱くし相対的に両眼間の視認度を変化させると、それに対応して刺激入力が弱められた側の眼

球位置情報力も減じたことから、網膜情報と眼球情報は独立変数ではなく相互に影響し合っていることが見いだされた。
(6)オプティク・フローを収縮させ観察者から遠ざかるように変化させた場合、対象の視かけの明るさコントラストと大きさが増大すること、またオプティク・フローを拡張させ近づくように変化させた場合には逆の知覚印象が生起することが示され、一般知覚恒常性の知覚モデルでは、視覚システムは両眼視差、網膜像大きさそして網膜像明るさコントラストを対象までの絶対奥行距離(d)の関数であるｋを乗じてそれぞれの出力値を決めるが、もし知覚された大きさが変われば、知覚された明るさコントラストと両眼視差もｋ’を乗じてそれぞれの出力値を変えて、最終的な両眼視差の出力値は大きさとコントラスト要因から２乗倍の影響を受けるというモデルが提案された。
(7)近・遠両方の観察距離での広範囲の傾斜角度の知覚に当てはまる新しい観察角度拡大理論が提示され、バーチャルな視空間で種々な斜面角度における前額平行と奥行の知覚された距離の比（アスペクト比）を測定して妥当性を検討した結果、観察角度拡大新理論は上昇傾斜面、下降傾斜面、片側上昇／下降傾斜面など広範囲に妥当したが、一方、奥行の過小視が生起するのは両眼視差量を誤ったことにもとづくとするアフィン理論は、観察者の近傍の空間で知覚する傾斜角が視線上にある条件では妥当することが示された。
(8)眼球調節と両眼輻輳の相互作用について両眼視が健常な者ではAC/A とCA/C の比率がどのようになるか、その定量化が試みられ、眼球調節刺激（1 D～6 D)とその反応（D)間の関係はリニアであること、両眼輻輳（1 MA～6 MA)とその反応（MA）間の関係もリニアであること、AC/A 比率と CA/C 比率における刺激と反応間の関係もリニアであり、とくにAC/A 比率における刺激と反応間の一致は高いこと、CA/C 比率の刺激と反応間の一致はガウス型のボケ刺激を注視したときの輻輳反応にばらつきが多いため低いことが明らかにされた。
(9)奥行手がかりの多寡にかかわらず奥行距離の知覚表象の構成に重要な役割を果たす眼球運動がしらべられ、観察者は対象と観察者との間の領域を注視する方略をとること、眼球運動は絶対距離の見積もりに関係しないこと、さらに観察者の近傍、とくに壁や床を不明瞭にすると奥行距離見積もりに影響することが示された。

(10)方向の傾きを偏向させた自然風景に順応させた場合の傾きの残効がしらべられ、起きるかをしらべられ、残効は傾きのあるノイズパターンで 1.08°、自然風景の提示方向を偏向させたパターンで 0.65°、それに提示非偏向の自然風景ではほぼ 0°、また傾き残効を生起できる順応時間は 500ms 前後で、これより長い順応時間では傾き残効は減じたことから、自然風景でも提示方向を傾消させた条件では傾き残効が生起することが示された。

(11)物理的空間と視空間の対応関係を平行並木法と等距離並木法を利用したパースペクティブ構造から分析され、平行並木のアレーは正確にパースペクティブ空間内に記述できること、また等距離並木のアレーは「大きさ-距離不変仮説」によってアレー間の距離を調整することで引き出せることが示された。平行と等距離並木法における実験値と計算値の一致からパースペクティブ空間モデルは妥当なものと考えられる。

(11)ターゲットの物理的大きさおよびオプティカル・トンネルの長さを操作し、対象の視えの大きさ（S'）と奥行距離（D'）との間の関係を偏相関をもちいて解析し、S'と D'の相関は有意ではなく、S'と D'はオプティカル・トンネルの連続性(長さ）の操作によって、それぞれ異なる影響を受けることが示された。D'は S'の媒介変数（大きさ-距離不変仮説）ではなく、それらは相互に関係するがしかし別々の処理過程でそれぞれ独立に処理されている（ダイレクトモデル)。

(12)対象の視えの角度間隔（前額平行面での大きさ）と奥行間隔の間の関係をしらべることで General Object Constancy (GOC)モデルの妥当性が検討され、GOC メカニズムがモデル化された。このモデルでは、知覚的奥行と知覚コントラストが知覚距離と知覚的大きさによって尺度化される過程を通ることによってそれぞれの知覚的恒常が生じるという。GOC モデルでは、大きさ恒常、明るさコントラスト恒常そして奥行恒常は共通のメカニズムで生起する。

(13)パースペクティブ理論を Gilinsky(1951)の数学モデル、Ooi & He(2007)のモデル、ベキ関数モデル(Baird & Wagner, 1991)、Wagner の vector contraction モデル(1985)、および Foley　(2004)の視空間モデルと比較し考察され、Gilinsky の数学モデルは、パースペクティブ理論とは異なる原理にもとづくが、対象までの知覚された奥行距離と大きさを導く数式は両理論とも等しいこと、Ooi & He のモデルでは、地面に置

かれた対象の奥行距離知覚には観察者の眼の高さおよび地面の知覚した傾きが考慮されたが、パースペクティブ理論との相違はほとんどないこと、ベキ関数モデルではパースペクティブ理論の距離判断のすべて範囲で相違は小さいもので、ベキ関数モデルとパースペクティブ理論のどちらのモデルでも奥行距離と大きさの判断は適切に説明されること、Wagner の vector contraction モデルはランダムに提示された対象（棒刺激）間の距離判断のために提案されたもので、この種の知覚問題の範囲では妥当、Foley のモデルは観察者から奥行方向の異なる２点の杭の間の距離知覚を課題としたもので、それは２点間の距離イメージの大きさと奥行距離に比例して規定されることなどが明らかにされた。Foley のモデルとパースペクティブ理論は、奥行距離と２点間の距離知覚が同じパラメータでは規定されない点で共通し、パースペクティブ理論が他の５つのモデルを統合するモデルであると考えられる。

(14)知覚と運動の異なる処理過程を"Double-drift targets"現象を利用してしらべられ、サッケードによるターゲットの位置はターゲットの物理的位置と同等になることを示したが、指さしによるターゲットの pointing は大きくサッケードの位置とは異なることが示された。サッケードの眼球運動は時間的に最近接のごく短時間のシグナルに対応しているのに対して、指さしなど意識的な知覚と運動は時間的により長期の情報を統合して遂行されると考えられる。

(15)奥行位置を高精度の距離レンジで特定できるカメラで撮影した自然シーンをステレオディスプレーに提示しシャッターグラスを被験者（4 名）に装着させ両眼立体視させて実験した結果、奥行距離弁別の閾値は両眼視条件では小さく、奥行距離が 10-12m までは上昇したが、以降は平準化した。この関係は、パラメータである angular spacing が広くなると大きくなった。Weber 比はすべての奥行距離で angular spacin が 2°の場合は１％、10°の場合で４％であった。単眼視条件では Weber 比は両眼視条件に較べて大きくしかも奥行距離 5-10m の範囲で急激に大きくなりその後は 10-12m までゆるやかに増大し、以降平準化した。これらの結果を信号検出理論を応用し、奥行距離弁別である信号（奥行距離変化）を測定した 2 つの奥行位置間の奥行距離と angular spacing に伴うノイズで除した式で分析した結果、両眼視条件の奥行距離弁別は 15-20m の範囲ではシーンの中の絵画的要因によらずに両眼視差のみによることが示され

た。これらの結果は、これまでの実験室で得られた両眼視差の奥行距離弁別閾値の結果と一致することを示している。

(16)全周囲メルカトル写真のなかの人の頭部方向はどのように知覚されているか、また観察者の視点は写真の外部か内部かがしらべられた結果、被験者の大部分は全周をメルカトル法によって平板に表した写真のシーンはすべて自分の前にあるものとして、また写真内の６人は円環に位置し互いに向き合っていると知覚した。一方、数人の被験者は自分の視点を写真の中に位置させ、サークルの中に自分が入り込んだ知覚をもった。このようなサークル(magic circle)に入り込むのは大変困難なことと考えられる。

(17)視ている球体の外からの光景を刺激球体を用いて提示し、被験者が対面・背面条件でシーンの内部あるいは外部からの観察かをしらべた結果、シーンタイプが相互に対面した条件では外部から視ているという反応が多く、逆にシーンが背中をつき合わせた条件では内部から視ているという反応が多くなったが、しかし観察後の内省では、これらの視えは現実的とするものが少なかった。観察者はこのような世界の中に入り込んでその知覚構造を直感的に理解できないと示唆される。

(18)シーン・レイアウトのプライミングと視覚記憶（アイコーニック・メモリ） の関係がしらべられ、長いブランク刺激時間およびマスク刺激の挿入がプライミング効果を妨害することが示された視覚記憶、とりわけアイコーニックメモリが関係していることが示され、このプライミング効果はメモリ内のシーン・レイアウトの情報を遅延時間中にバラバラにするのではなく、プレビューで記憶した情報と現在のイメージ情報を統合して視覚探索を促進すると考えられる。

(19)ロッドーフレーム錯視において視覚によるロッドのみがロッドーフレーム課題において付加的なノイズとは無関係に主観的視えの垂直（SSV）に影響する（付加仮説）のか、あるいはフレームとの相互作用を通じて複合的な感覚統合にバイアスを生じさせ頭部方向の知覚評価がなされる（相互作用仮説）のかが検討され焦点となる楕円の離心率が主観的垂直（SVV）の不確実性に与える影響はフレームが垂直の場合に大きく、SSV のバイアスも離心率に影響されないことが示され、相互作用仮説が否定され、そのかわりに網膜における楕円の方向についての不確実性が処理過程において主たる役割

を果たすという付加仮説（視えの方向は眼と頭部からのシグナルからなる空間の座標軸）で決められる。

（20）大きさの恒常性の初期視覚野の役割が、大きさを直接比較可能な事態で知覚的測定と神経生理的測定が試みられた結果、V1 のレチノトピー(retinotopy)は知覚した対象のサイズによって明瞭に調整されていること、しかし錯視にいたる知覚判断の程度には及んでいないことが示された。