

6. まとめ

1. 両眼立体視

1.1. 視野闘争

プローブ (probe) の随伴提示による視野闘争のメカニズムの探求

視野闘争の研究では、各眼に提示した2つのパターンのいずれかを短くフラッシュして強調するとその閾値が他眼に提示したパターンより小さくなる。これは視えていないパターン（意識にのぼらない）が抑制されていることを意味する。抑制されている側に提示されたプローブは非抑制側パターンへの反転を促進するが、一方、優位眼に提示されたプローブは反転を抑える。プローブ提示のない条件では、各眼のパターンの知覚時間は等しくなるが、問題は、プローブが対象パターンの内部あるいは外部に提示されても視野闘争への効果が等価になるか否かである。すなわち、これまでの研究では、プローブの効果はパターンのある眼にあるのか、あるいはパターン上にあるのかに限定されていた。

Metzger & Beck (2020)は、視野闘争におけるプローブの効果が眼球間のコンフリクトにあるのか、あるいはパターン間のそれにあるのかを検討するために、プローブのパターン上の位置を操作し、各知覚時間を指標として実験した。

実験結果から、プローブを導入した視野闘争事態においては「On-object」条件（対象に重なるようにプローブを提示した条件）の方が「Off-object」条件（対象の外に提示した条件）より強い知覚抑止効果があり、その結果、視野図形の反転を促進すると考えられる。

短時間の単眼遮蔽による遮蔽眼の眼球間抑制の減少

一方の眼を2-3時間遮蔽すると、非遮蔽眼の感覚の優位が増大することが哺乳類で知られている。Wang et al. (2020)は、第1に短い単眼遮蔽によって視野闘争が両眼間で変えられるか、第2に短い時間の遮蔽によって各眼の優位性が連続的なフラッシュ光による検出閾の測定から抑制が確かめられるか、第3にパターンのコントラストを増強したことによる各眼の閾値の変化には眼球優位性が随伴するか、などについて実験で確かめた。

実験の結果から、短時間の眼の視覚経験剥奪は両眼間の相互作用を変容させ、とくに遮蔽眼の方の眼球間の抑制を減じることが示された。柔軟性の低下した成人の脳では視覚経験を剥奪すると発達途上の脳に比較して抑制が高まるためと考えられる。このしくみは成人において弱視者の健常眼をパッチする回復療法に対して重要な意味をもち、成人では弱視眼の方を短期間遮蔽する療法を勧めている。

短時間の眼球優位性の可塑性

視野闘争は、一つには眼球間相互の抑制によって、他には眼球内の抑制によって知覚意識の闘争を引き起こす。抑制は優位刺激の提示を長くすることによって増大し他眼のイメージが優位になる。

Steinwurz et al. (2020)は、脳の恒常的な可塑性と GABA 間の関係を前提として、3種類の知覚課題（両眼視野闘争、運動による奥行視、傾き錯視）の個人間差をしらべ、両眼視野闘争では単眼剥奪事態でしらべた。

実験の結果、50人の被験者の知覚課題の結果を被験者間の相関でみると、視野闘争における優位性フェーズの持続時間は運動による奥行視の課題と密接に関連し、さらに傾斜錯視の中心と周辺間の相互作用とも関連した。このような競合的知覚課題において「視野—中心」と視野闘争が共通の視覚システムに担われていることが示唆された。視野闘争課題での2時間の単眼剥奪の結果については、眼球優位性は剥奪眼の方にシフトし、単眼剥奪後の知覚フェーズの大部分は剥奪以前のものとなった。これらの結果をもっとも予測できる因子の一つは剥奪前の混合知覚の比率（優位性知覚以外のフェーズ）で、剥奪後の眼球優位性に関係していた。他の予測因子は優位性フェーズの持続時間で、これは混合知覚と相互に作用し、剥奪後の眼球優位性のアンバランスが約50%の値で予測できた。同様な予測因子は、傾斜錯視の程度、運動による奥行視のフェーズの持続時間で、視野闘争の優位性のフェーズの代用となった。

結局、眼球優位性の可塑性は、2つの典型的なシグナルすなわち剥奪前の精神物理的パフォーマンスで評価できる眼球間抑制（眼球融合の増進とこれによる混合知覚）および知覚競合による抑制（優位性フェーズの持続の増大と視野の中心-抑制相互作用）によって調

整されていると考えられる。

輝度とコントラストによる視野闘争—Levelt の修正命題

視野闘争の知覚現象は、両眼間の抑止メカニズムを探る有益なツールとなる。この知覚現象を用いた研究方法として Levelt は 1965 年に次のように 4 つの命題を提示した。(1) 片眼の刺激の知覚優位性を強めること、(2) 他眼の平均的優位知覚持続期を弱めること、(3) 視野交替頻度 (AR) を強めること、(4) 両眼の刺激を等価に強めること。これを受け 2015 年に Brascamp et al. は修正した以下の 4 つの修正方法を提示した。(1) より強い刺激の知覚優位性を強化すること、(2) より強い刺激の優位知覚持続期を平均的に強化すること、(3) AR を減少、そしてオリジナル刺激と同等を維持すること、(4) 両眼間の刺激を両方等しく強化し AR を増大すること。これまでの研究から、方向グレーティングと輝度パッチの要因が知覚優位を一眼から他眼に移る遷移に関してそれぞれ異なる働きをすると考えられている。

そこで、Qiu, et al. (2020) は、修正した視野闘争実験の命題に依拠し、方向グレーティングと輝度パッチの刺激強度を変えて視野闘争の知覚がどのように変化するかを実験した。

実験の結果、一眼固定で他眼変化の輝度条件の視野闘争では、プリドミナンス (全持続時間に対する優位知覚の持続時間の割合) と優位知覚の持続時間は強い刺激条件で増大、したがって知覚交替率は減じた (命題 I から III に該当)。また両眼間の知覚優位性が等価な条件では、刺激を弱めるに応じて交替比率は減じた (命題 IV に該当)。唯一の例外はグレーティングと輝度パッチの両方の優位持続時間が命題 II に合致しなかった。片眼が白色、他眼が黒色条件では、視野闘争はほぼ類似し、したがって輝度の増減は知覚的に等価なコントラストをもたらした。特異な結果は、輝度パッチ条件が方向グレーティング条件より知覚反転の速度が遅かったことで、これは輝度パッチでは刺激の知覚強度が小さいためと考えられた。さらに、方向グレーティング条件では混合知覚相が示されたが、輝度パッチ条件では融合知覚相のプリドミナンスが増大した。しかし、融合相のプリドミナンスは両眼間で輝度差が大きい場合には幾分縮小した。

両眼間の刺激強度差を体系的に操作し実験したこれらの結果は、

Levelt の修正命題によく一致することを示している。

1.2. 両眼立体視

コラレートとアンチコラレートノイズに対するステレオ視の順応—ステレオ視のコーディン理論の検証

有効両眼コーディング理論によると、視差ニューロンの感度は両眼からの感度の総和 ($S+=SL+SR$) と差分 ($S-=SL-SR$) によって示される。 $S+$ 信号と $S-$ 信号は、それぞれ別々に両眼情報を符号化する際にその効率を最大限にするように加重される。このような視覚システムの順応は各ニューロンの感度を変えて両眼視差の働きを変更し、結果として知覚された対象のステレオスコピックな奥行が変わることを予測する。この場合、選択的に同一の、あるいは他の刺激によって順応されると、視差ニューロンのチャンネルの感度が低下すると考えられる。すなわち、総和と差分のチャンネルはコラレートあるいはアンチコラレートのランダムノイズの順応を受けて抑制される。もしノイズを N で表すと各眼にコラレートノイズを提示する場合には、総和チャンネルでは $N+N=2N$ 、差分チャンネルでは $N-N=0$ 、もしアンチコラレートノイズの場合には、総和チャンネルでは $N-N=2 \cdot 0$ 、差分チャンネルでは $N+N=2N$ 、となる。

Kingdom et al. (2020) は、これを検証するために、コラレートあるいはアンチコラレートのランダムノイズに順応後のステレオスコピックの奥行を測定し、総和と差分シグナルによる感度低下が起きるかを実験してしらべた。

コラレートとアンチのノイズ刺激による 2 通りの順応条件における奥行閾値 (PSE) をテスト刺激の視差変化を変えて測定した結果、コラレート順応条件の閾値はアンチコラレート順応条件より有意に大きくなった (コラレートに対するアンチコラレート比は 36%)。これは、コラレート順応条件はアンチコラレート順応条件よりターゲットの奥行が大きく知覚される (背景に近づいて知覚される) ことを意味する。

また、アダプター順応条件を変えたコラレート順応条件は、アンチコラレート順応条件より有意に奥行が大きく知覚された。奥行閾値の幾何平均を順応条件間で比較すると (A/C に対する C/A)、1.32

となり約 32%奥行がコラレート順応条件で大きく知覚された。さらに順応刺激を広帯域の刺激パターンにしたときには、奥行閾値の幾何平均を順応条件間で比較すると (A/C に対する C/A)、1.20 となり 20%奥行がコラレート順応条件で大きく知覚された。

これら結果から、ランダムドット・ステレオグラムを知覚された奥行は、順応パターンがコラレートあるいはアンチコラレートで変わることが示された。これは、Li and Atick のステレオ有効コーディング理論、すなわち両眼のシグナルの総和と差分チャンネルが両眼ニューロン内で多重通信され、先行する両眼間のコラレーションによってゲインが変えられることから、それらチャンネルの反応が別々に順応されることが確かめられた。

視差に規定されたマスキング刺激によるキクロピアン面の減損

立体形状はテクスチャなど単眼の手がかりがなくとも視差手がかりで知覚できるが、その際、多次元の視差情報を統合する必要がある。しかし、このキクロピアン課題には視差評価に生じるエラーとこの評価の統合は難しいことに伴う限界が起きる。両眼視差からのみによる対象の 3 次元形状を知るキクロピアン知覚は、視差処理の初期の段階での絶対視差の評価過程（両眼間の刺激位置に基づくクロス相関に類似した過程）による限界があると考えられる一方、この知覚の減損には相対視差の評価の限界あるいはその評価を利用してのキクロピアン形状の形成に直接的な原因があると考えられる。

Goutcher, R. & Hibbard, P. B. (2020) は、異なる種類のランダムドットマスキング刺激がある場合、キクロピアン形状知覚がどのように損なわれるかを実験した。マスキング刺激のひとつはターゲットに対してアンチフェーズ (antiphase) をもつサイン波形とし、他は奥行にランダムに分布するドットとした。このような異なるマスク刺激を用いることでキクロピアン形状知覚の限界が絶対視差の評価過程のみで説明できるかを吟味した。絶対視差の評価過程はクロス相関に類似しているとし、それは神経生理的研究でも確かめられている。クロス相関モデルによる視差の評価は、一眼のイメージパッチを他眼のイメージパッチと比較することで検証する。

視差評価の実験にあたってはクロス相関モデル、およびキクロピ

アン方向知覚は方向 (x と y 軸)、高度 (x 軸の角度についての高度) の統計分布によるとする dipole モデル(dipole model)が仮説として提示された。キクロピアンに提示した刺激の方向の弁別においてランダムな視差のパフォーマンスとアンチフェーズのパフォーマンスを比較し、クロス相関と dipole モデルのどちらが妥当か検討された。

キクロピアンマスキング事態でのランダムドットサイン波形の奥行の閾値を求めた結果、ドットの「マスク対サーフェス比」が増すと方向知覚の弁別のパフォーマンスが減じ、その比率が 1 に近づくまえにチャンスレベルとなった。この被験者の結果からクロス相関モデルの理論式にあてはめると良く一致したが、アンチフェーズマスキング事態ではドットの「マスク対サーフェス比」の増大に伴う弁別の正答率はほぼ 1 に等しくなり、知覚判断が dipole モデルでは阻害されないことを示した。この結果は、視差処理の初期段階で絶対視差の評価が両眼イメージのポイント間の関係評価より優先されていることを示す。

キクロピアンにおける空間周波数および視差の振幅を変えてサイン波形の奥行構造が変化する事態でのパフォーマンスがしらべられた。その結果、方向知覚判断の弁別閾値はキクロピアン空間周波数が大きくなると増大し、振幅が大きくなると小さくなること、空間周波数が 0.84cpd で振幅が 1.1 arcmin では方向知覚を見分けられないことが示された。これに基づいてクロス相関モデルと dipole モデルの理論曲線にあてはめると、クロス相関モデルに実験結果のパフォーマンスが良くマッチするが、dipole モデルには空間周波数と振幅を変えてもパフォーマンスは天井レベルとなり妥当しなかった。

刺激の要素数を変えてパフォーマンスの効果がしらべられた。その結果、サーフェスドットが増大するとマスク刺激のドットも増えているにも関わらず、方向知覚判断のパフォーマンスも増大した。この結果の 2 つのモデルへのマッチはクロス相関モデルとくにウィンドの大きさが多い場合によくフィットした。

ランダムドットで規定された奥行を示すサイン波形の視差をランダムにしたマスキングドットを用いて、方向知覚判断のパフォーマンスをしらべた。その結果、方向知覚判断の閾値はサーフェスドットの個数が増えると大きくなった。ここで示された閾値はアンチフ

フェーズマスク条件で示された閾値より大きくなることを示し、ランダムなノイズマスクはアンチフェーズマスク条件よりキクロピアンサーフェス知覚を妨害する影響が小さいこと示した。これらの結果をクロス相関モデルと dipole モデルに当てはめ、被験者のこのパフォーマンスを前者のモデルでの予測と比較すると大幅に異なるのに対して、後者の予測するところと一致を示した。Dipole モデルの閾値は「マスク対サーフェス比」が 1.4 と 2.5 となり、被験者が示した閾値およびサーフェスドット数が増えると閾値も減少し、モデルの予測するところと良く一致した。このことは、ランダムな視差のマスクングの効果は相対視差情報に関連する複雑性中心の処理過程によると考えられる。

これらの結果から、アンチフェーズマスクの効果はノイズを評価するプロセスに限定されたているが、ランダムな視差は刺激の相対的な視差に基づく複雑性中心の知覚内容に関連すると考えられる。

ノイズマスクングによる両眼視差を限定する要因

人間では、両眼視差の閾値は 5 arcsec よりも小さいが、これには個人差がある。Carrillo et al (2020) は、相対視差の検出における個人差についてノイズマスクングをターゲットに加えることによってしらべた。ここでの研究は、視差検出の個人間差および交差と非交差に関する個人内の差異をしらべることが目的である。

実験の結果、個人別に相対視差の検出閾値が求められ、それは 24 から 275arcsec の間に分布すること、非交差視差の閾値が交差視差より高いけれどもそれらは大まかに一致すること、被験者全体の幾何平均をとると、交差視差では 58arcsec、非交差視差では 73arcsec となることが示された。

また、ノイズマスクングの実験の結果、外的ノイズを導入するとターゲットの視差検出閾値は、交差と非交差視差とも外的ノイズが小さいレベルでは閾値は変わらずに一定を維持するが、ある値を超えると外的ノイズとともにリニアに上昇を多くの被験者で示された。また、外的ノイズにともなう視差検出の閾値のカーブがフラットから上昇に変わる交差と非交差点の違いは、等価な内的ノイズ（視差シグナルに対するシグナルとノイズの比）の個人差の違いを示すと

考えられた。

被験者の結果を、リニアに出力が増大すると仮定する線形増幅モデル(linear amplifier model)で解析すると、等価な内的ノイズと視差処理の効率(ノイズ情報の処理を反映)の間には有意な相関は無かった。これは被験者間の違いを説明する単純な特性が無いことを示唆した。そこで、交差視差の閾値と内的ノイズ、および非交差視差の閾値と内的ノイズの相関、ならびにこれら視差閾値と線形増幅モデルのパラメータである視差処理の効率の間の相関をとると、閾値の高さはそれに対応する内的ノイズの増大と関係し、また同時に処理過程の効率を縮小することが示された。交差あるいは非交差の視差の方向については、回帰分析の結果、各被験者の視差の閾値は対応する内的ノイズと処理効率の両要因によって個人差が生起することが示された。

等価な内的ノイズと視差の処理効率が実験で求められた結果、これらの両要因がステレオ視能力に関係することが示され、さらにそれが個人差の原因となり、ステレオの視力にも関係することが示唆された。

ダイナミック・ランダムドットステレオグラム(DRDSs)とコレログラム(DRDCs)の単眼の手がかりを最少にする数値解析

アナグリフの方法あるいはポラロイドグラス法で両眼立体視させた場合、各眼には照射方向などの違いによって明るさあるいはコントラストが若干異なるので、完全に同一の刺激が投影されず、これがプルフリッチ効果のような単眼手がかりを与える。両眼立体視のアーチファクトな手がかりである単眼の手がかりが両眼立体視のしくみを乱すので適切なアナグリフの調整が必要となる。

Radó et al. (2020)は、両眼間の平均的輝度を調整することによってこの単眼の手がかりを最小化する方法を探った。その方法はステレオグラムの両眼輝度を非線形に補償することで最適化し、平均して等価にするアルゴリズムの開発にある。

実験に使用するモニターとフィルターの特性を測定した後に、16人の被験者を対象にアーチファクトである単眼の手がかりの起きる生起確率をしらべた。この精神物理的実験結果に基づいて単眼で視

えるアーチファクトを最少にするデジタルビデオ値が数値解析法で決められた。

この研究では、赤-緑フィルターとそれに関連するアナグリフの輝度とコントラストを適正に調整することで正しい立体視が可能となることが明らかにされた。

自然シーンのステレオ視の知覚安定をもたらす奥行エッジ領域の構造特性

ステレオ視は左右眼で一對一の対応点で融合するが、しかし自然シーンにおいてはすべての対応点が正しく融合していない。奥行のエッジではシーンの一部の範囲は一方の眼だけに見える (half occlusion)。もし単眼領域が検出されなければ、視覚システムは非対応領域間で対応し、不安定な知覚をもたらす (視野闘争) ので、視覚システムは視覚経験にもとづく処理をして安定をもたらしていると考えられる。このような単眼領域に絡んだ経験則による処理は強力で、両眼イメージの奥行エッジの面の視覚特性に制約されて生じる。3次元シーンで生じる単眼視領域の原因は、背景のオクルードのされ方にある。

Basgöze et al. (2020) は、自然シーンにおいて単眼視領域が視覚的に両眼視領域とより類似していれば、知覚が安定すると考えられるので、自然シーンの 100 個のデータセットからシーンを抽出して使用した。自然シーンの奥行エッジの解析のために、5 つの領域、すなわち単眼視領域、隣接両眼視前面領域、両眼視背景領域から単眼視領域の移行領域、両眼視前面領域から単眼視領域移行領域である。距離マップから単眼視領域、隣接両眼視前面領域、隣接両眼視領域背景領域の平均的距離を計算、また輝度イメージからは平均的輝度とコントラストをそれぞれ計算した。両眼視領域から単眼視領域の移行領域では、前面と背景面間のイメージ特性の変化に焦点をあて、その視覚特性から異なる 2 面間の距離を計算した。

自然シーンにおける奥行エッジにおける知覚不安定 (視えのちらつき) を測定し、相対視差量は知覚不安定に有意に対応視差量が大いくと不安定を増大させた。この自然シーンにおけるステレオ視の知覚安定度の実験データから、知覚安定-不安定のモデルとして相対

視差量がただ一つの知覚安定要因とする「視差単独モデル」および両眼視－単眼視の移行帯における垂直エッジ輝度が有力な要因とする「エッジモデル」を仮説し「視差単独モデル」と「エッジモデル」はともに有意に視差量によって変わることが示された。「エッジモデル」では、垂直エッジの輝度が弱いと知覚が安定し、強いと不安定になることから、輝度強度が知覚安定-不安定に有意な効果があることも示された。尤度比テストから「エッジモデル」の方がデータに有意に適合した。このことから、両眼視－単眼視の移行帯におけるイメージの手がかりは知覚安定に影響すると言える。

そこで、エッジの手がかりに関して両眼視と単眼視領域の輝度差あるいはコントラスト差のどちらが強く関係するか、「輝度モデル」と「コントラストモデル」を仮説し、実験した。その結果、輝度差とコントラスト差がともに知覚安定と不安定に影響していた。とくに単眼視領域と両眼視前面領域間の大きな輝度差が知覚安定に、また単眼視領域と両眼視背景領域間の大きな輝度差が知覚不安定にそれぞれ寄与することが示された。また、単眼視領域と両眼視背景領域間の大きなコントラスト差は知覚不安定に影響していた。単眼視領域－両眼視背景領域間におけるコントラスト差によるこの種の知覚不安定傾向が強いことは被験者の評定でも同様にみられたが、単眼視領域－両眼視前面領域間には示されなかった。この結果は、自然シーンの奥行エッジにおける単眼視領域と両眼視領域が類似している場合には知覚が安定すると考えられる。また、小さな空間や対象の大きさを変えても奥行エッジが自然シーン事態で生起する事態に類似するほど知覚安定がもたらされることが明らかにされた。

このことから、両眼視と単眼視の両領域がある場合、利用できるものが確率的に良く生起する知覚構造がある場合に、両眼視融合と知覚安定が促進される。

自然シーンの両眼視差処理過程のモデリング

Chauhan et al. (2020)は、両眼視差の処理過程の3つの理論、エナジーモデル、情報理論によるモデル、知覚・行動モデルをレビューした。そのために、(1)両眼視覚系の自然シーンにおける神経系と奥行知覚系の関連、(2)これらの関連の計算機的研究、(3)これら3

通りのモデルの比較、を以下のようにまとめた。

(1) 自然シーンにおける両眼視差の統計モデルと神経的選択度と奥行知覚の関連

1.1 自然シーンの両眼視差の範囲 (range)

1.2 視野にける位置と両眼視差の間の統計的関連

1.3 両眼視差と他の視覚特性との関係

(2) 視差対応反応のモデルの比較

初期視覚システムでの視差の計算機モデルが必要な仮定とともに提示された。

2.1 モデル形成の背景

2.2 Unsupervised models

2.3 Supervised モデル

1.3 両眼立体視におけるその他の研究

空間周波数に依存する弱視における両眼間抑制の相互作用

弱視は、発達の臨界期に十分な情報が視覚中枢に伝わらないために生じる神経発達の障害である。弱視は片眼に生じ、両眼からの情報に対して弱視眼に抑制が起き、視力が回復しても両眼視の働きの障害は続く。

Beylerian et al. (2020)は、弱視における両眼間抑制の相互作用が、類似した空間周波数に同期した細胞間に起きているのか、あるいは同期していない空間周波数にグローバルに起きているのかをしらべた。そこで、抑制が空間周波数に対して広く生じているかを高、中、低の空間周波数で健常者と弱視者を対象にしらべた。

実験の結果、健常者群では両眼分離事態でのマスクングのコントラスト感度を与える強さは両眼間で同等であり、低空間周波数による片眼のマスクングは他眼の低空間周波数によるマスクングに影響し、高空間周波数によるマスクングも同様であった。一方、弱視者群では両眼間の空間周波数によるマスクングは起きたが、両眼間で同等ではなく、弱視眼からもうひとつの注視眼への効果は弱いものだった。弱視者におけるこのような非対称的な両眼間のマスクングの強さは空間周波数に特定されたもので、弱視眼のコントラスト感度の障害あるいは注視の異常に強いマスクングによるものではない

ことも明らかにされた。

この実験から、弱視眼はマスキングが異常に弱いと考えられる。

奥行関係の知覚によるステレオ視の感度の減退

対象の奥行関係の知覚は他の対象からの要素を適切に分離し、それらを統合することでなされる。この対象の要素の分離が奥行関係の情報処理では重要で、それらは両眼と単眼の奥行手がかりとなる。これまでステレオ視の研究ではランダムドットでの対応問題が主なる課題で、対象の要素が単眼視で分離されなくても立体視が可能のために分析されなかった経緯がある。

Matassiana, P. & Zannolib, M(2020)は、2本の垂直線で図形の構成にしたがって水平視差を設定した。基本となる図形構成は2本の垂直線で構成、前額平行面事態では2本の垂直線と短い水平線を加えて面を構成するように連結し異なる奥行が出現するように構成、さらに奥行傾斜面事態では前額平行面事態に2本のペアとなる垂線を加え、その各ペアの視差がそれぞれ反対になるように設定し、短い水平線で奥行傾斜面となる事態を考えた。

その結果は、(1)ステレオ視が視差対応モデルだけでは解決できなく、対象の局所的特徴を考慮する必要がある。(2)矩形が平行に提示された階段状の奥行事態では奥行感度の減少が示されなかったが、矩形が傾斜面奥行事態では奥行感度の減少は顕著に示されたもののしかし刺激間の距離による影響は小さく、提示刺激が図形として一体化できる群化の手がかりが奥行感度に大きく影響する。(3)異なる感覚の組合せによる群化の奥行感度は、同期条件は非同期条件より有意に奥行知覚判断が正しくなされ、刺激と音程の組合せがすべて同一のベース条件と同等であった。(4)群化の程度が奥行感度にあたる影響については、2本垂直線と2個の矩形では拡張あるいは収縮についての知覚弁別が優れていたが、しかし1本あるいは3個の場合には弁別が悪いことが示さ、前者ではペアの刺激対がひとつのまとまりとして運動し、後者では非剛体に視え複雑な奥行回転が生じた。(5)最後に全体の刺激構成のなかで異なる奥行をもつ刺激ペアの局所特性が全体の知覚的群化に与える影響については、奥行判断は屋根勾配型事態より階段事態の方が有意に正確であり、このよ

うな事態で重要なことは全体の平均的特徴（たとえば視差の平均）より対象の局所的特徴の評価にあると考えられ、不確実な視差における対象形成の影響モデルが提案された。

このモデルの妥当性について、パラメータを当てはめ実験で得られたデータで検証した結果、設定した視差によって形成される対象の奥行が最終的に予測できることが確認された。このモデルの利点は、対象の視差の不確実を対象の個々の特徴に伝搬させることによって奥行弁別の感度を高めること、および対象の全体の奥行の導入によって個々の特徴からくる知覚バイアスを考慮することにある。

運動による 3 次元視

2.1 オプティクフロー

斜方向のオプティクフローによるベクシヨンの強度

Fujii と Seno(2020)は、円形に提示したランダムドットパターンを 9 通りの水平から垂直までの角度 (0° (up), $\pm 30^\circ$, $\pm 45^\circ$, $\pm 60^\circ$, $\pm 90^\circ$, $\pm 120^\circ$, $\pm 135^\circ$, $\pm 150^\circ$, and 180° (down)) でオプティクフローさせ、そのときの自己運動であるベクシヨンの強度を測定した。

その結果、ベクシヨンの強さを始点時間、持続時間および主観推定値でみると、斜方向のオプティクフローは垂直あるいは水平方向に較べてベクシヨンが有意に弱いことが示され、また斜め上方向 45° と垂直方向 0° の 2 条件でフローの滑らかさと主観的速度は両方向条件で有意な差が生じなかった。

これらの結果から、ベクシヨンはパターンの運動方向に依存し、したがって異なるタイプの運動処理システムが関係していないと示唆された。

両眼間の速度による奥行方向の評価のための運動奥行視モデル

Wu et al. (2020)は、運動奥行視モデル(MID)を両眼の網膜像間の速度差(IOVD)と運動で変わる両眼視差の程度と輻輳・開散、さらに網膜像の大きさの 3 要因から構築した。

このモデルでは Beverley and Regan (1973)および Regan and Cynader (1982)の研究に基づき運動視のためのチャンネルが仮定さ

れた。運動奥行視の処理過程の第1段階では、V1領域の左・右方向の単眼運動検出器（チャンネル）が働き、それぞれ2種類の速度（0.5deg/sと1deg/s）を検出する。したがって、検出器はこれらを組合せて4チャンネルが仮定される。運動視の情報処理の2段階目では、これらの4通りのチャンネルの組合せで接近あるいは後退する運動がMT野で検出される。最終段階ではチャンネルが検出した情報を組み合わせて運動方向を決定する。低次の横方向の運動検出のために運動エネルギーモデルに基づいてガボール関数による空間時間フィルターが4つのチャンネルとして数式で規定された。

IOVDの手がかりに基づいた4通りのチャンネルからなるMIDモデルは、奥行方向の弁別感度を既存の心理実験データと良く一致するが、しかし他の手がかりと関連させ、それらと統合の問題は今後の課題になる。

オプティクフロー、対象（歩行者）のフロー、生態学的フローの相互影響

観察者の頭部のオプティクフローは安全に移動するために重要で、もし別の対象（歩行者）が別個に動いていればフローは不正確になる。Koerfer & Lappe (2020)は観察者の頭部上のオプティクフローを新たな歩行者の動きと絡ませて以下のように実験した。観察者の運動変化を示す領域のオプティクフローが歩行者の動きを示すオプティクフローと一致する場合(1)、不一致の場合(2)、そして背景のフローと一致する場合(3)の3通りの事態で、観察者自身の動きを示すヘディング知覚の正確さ（ヘディングバイアス）をしらべた。

その結果、歩行者はシーン・フローから検出されるが、観察者のヘディング知覚はローカルフローの乱れによって不正確なることを示し、ヘディング知覚、歩行者の検出そして生態的モーションは別々の視覚経路で処理されていることが明らかにされた。

オプティクフローによる群衆の中の自己の動きと生態的モーション知覚

オプティクフローから自己の向きのヘディング(heading)知覚は視覚世界がリジッドであることを仮定する。しかしこの仮定は四肢

の動きからなる生態的モーションの手がかりがある群衆の中を移動すると成り立ちにくい。しかし、視覚システムはオプティクフローの構造の中からヘディングに関係する情報を検出して自己が平行かあるいは回転かを知覚する。しかし、もし群衆が駅構内のように勝手に動いたら観察者のヘディングには知覚バイアスが起きる。

Hütlemeier & Lappe (2020) は、観察者のヘディング知覚が点光源で示した歩行者群すべてが観察者に対して同一の方向で動く事態でもバイアスが生起するかを実験した

実験の結果、ヘディングの知覚エラーは「歩行移動のみ」の条件に比較し、「自然な四肢+歩行」条件で有意に小さいこと、さらに「自然な四肢+歩行」条件でのヘディング知覚エラーは非生態的モーション条件より「歩行のみ」の条件で小さいこと、また「四肢の動きのみ」の条件における特有な個人差は「歩行のみ」の条件であらわれ非生態的モーション条件では表れないことが示された。

これらのヘディング知覚エラーの分析から、群衆事態におけるヘディング知覚はそれぞれ別々の知覚システムによってコントロールされ、また、移動方向の一致した群衆モーションはオプティクモーションのヘディング知覚の準拠枠としての影響をもつと考えられた。

オプティクフロー事態でのヘディング (heading) 知覚における Serial dependence バイアスと中心点バイアス (center bias)

オプティクフロー事態での自己の運動方向の知覚 (heading) は視野の中心に誤差 (center bias) が生じ、これは現に生じている知覚が直前の連続した刺激に影響されたもの (serial dependence) と考えられる。

Sun et al. (2020) は center bias とは別に serial dependence の影響がオプティクフロー事態でのヘディング知覚に別個に影響するか、さらにノイズを追加したオプティクフロー事態で center bias と serial dependence に影響するかを実験でしらべた。

実験の結果、知覚された頭部の方向は、ディスプレイの中心 (頭上の延長) に歪められ、明らかに center bias と serial dependence の影響も見いだされた。さらにこの serial dependence の影響は 1 回目条件より 2 回目条件の方が減じる刺激ヒストリー効果

(repulsive serial dependence effect)があった。ヘディング知覚におけるこの効果は center bias のネガティブな影響を相殺すると考えられる。

また、オプティクフローの動きに関わるシグナル一貫性（シグナル対ノイズ、motion coherence)) を変えることによってヘディング知覚における center bias と serial dependence におよぼす効果しらべた。その結果、モーションフローのシグナル一貫性（シグナル対ノイズ）に関しては実際のヘディングの方向変化に対するエラーは一貫性が大きくなると有意にリニアに増大した。また、center bias の影響については、モーションフローの一貫性が 100%レベルより低くなると有意に増大したがレベル間には有意差はなかった。

これらの結果から、オプティクフローのシグナル一貫性のレベルをモーションドットのノイズ数を増やすことによって center bias 効果がヘディング判断で大きくなること、および serial dependence 効果があることが顕著に示された。これは事後のヘディング判断が直前の知覚した判断の方へのバイアスがあることを示し、刺激間の時間差を効果的に縮小する知覚システムがあること、さらにヘディング知覚システムには事前の知識によって事後の知覚を修正するバイズの確率の枠組があると考えられた。

シーン内の対象の運動とオプティクフローとの間の解析と年齢効果

安全に動き回るためには対象の動きを知る能力が必要になる。しかし、網膜の運動が対象と自身の動きの両方から生じるので難しい。

Evans et al. (2020) は、視覚のオプティクフローに限定し、フロー仮説（観察者の動きから生じる網膜の運動の補完はオプティクフローの感覚を基礎）が年齢でどのように変わるかを、被験者 30 名（男 19、女 11）でしらべた。刺激は LCD モニターに提示されシャッターグラスを通してステレオ視された放射状に動くシーンとともにプローブが左あるいは右のどちらに動くかを知覚し反応するように教示した。

速度の弁別閾値の年齢に対する影響を、FPI（静止条件閾値に対する運動条件閾値の比率）をとって年齢の増大に伴う変化をみるとほとんど変化は示されなかった。年齢の影響を静止と運動条件で比較

しても差は小さく有意ではなかった。

local および global 運動の処理メカニズムのためにフローフィールドは全フィールド（視野全体）、視野の左半分、視野の右半分 3 条件を設定した。この刺激条件はプローブとフローが同一あるいは反対の半視野となり、local および global 運動の処理メカニズムでこれらの運動要素が決定因かを同定できる。

実際のプローブと知覚したプローブとの角度差 (tilt) を求めた結果、相対角度は全視野条件とプローブフローが同一の半視野条件で大きく、プローブフローが反対の半視野条件で小さいこと、また知覚された角度は全視野とプローブフローが同一の半視野条件の半分程度だった。さらに、オプティクフローを取り除いたグローバルな運動およびローカルな運動の効果の関連をしらべると、グローバルな運動での相対角度はローカルなそれよりも大きく、したがってグローバルなオプティクフローの解析メカニズムはローカルのそれよりも影響が大きいと考えられた。

オプティクフローの解析能力と年齢の関係では、相対角度と年齢の間には 3 通りのすべての条件で相関があり、年齢が高くなるほど相対角度がリニア-に大きくなった。これは年齢が高くなるとプローブの知覚の歪みが大きくなることを示す。グローバル運動の相対角度に対する年齢の影響は年齢が高くなるとリニア-に大きくなったが、ローカルなそれにはその関係が示されなかった。これは年齢に伴う相対角度の変化はオプティクフローを取り除いたグローバル運動に依存するためと考えられる。

これらの実験結果から、自己運動を伴うシーン対象運動の知覚能力は年齢とは関係なく同等の力があるが、しかしオプティクフローの解析能力は年齢に伴って変化することが示された。

3. 絵画的要因による 3 次元視

3.1 形状からのソフトネス (softness) とウェイト (weight)-部分の形状特性から推測した材質

ものの形状は材質とその特性を評価する重要な手がかりである。例えば、樹木は木で構成されているとか、ビルは石から作られているとかというように物の形状は材質の知覚に影響するし、形状の大き

さがマイクロ (micro) のレベルでは形状面の粗さを、中程度 (meso) のレベル (macro) ではテクスチャと部分的形状を、グローバルなレベルでは形状全体が形状知覚の手がかりとなる。

Schmidt et al. (2020) は、波紋の中のさざなみ、粘液の固まり、ねじれた布目などの材質特徴が未知の形状の材質の知覚へ影響するかを、材質の基本となるソフトネス (softness) とウェイト (weight) を指標にしてしらべた。

実験の結果、(1) softness についての知覚評価 (10 段階) では、その評価が 2.2 と 7.8 の間で、また weight のそれは 3.13 と 7.4 の間でそれぞれなされ、評価に選んだシミュレーション刺激が妥当だったこと、(2) 評価の個人間の相関値は softness 評価で 0.26、weight のそれで 0.21 を示し、個人間で差があるものの softness と weight の評価で相互に一致していること、(3) softness と weight の評価では、softness の個人間評価の一致度が高く、形状はまずソフトか硬いかで評価されること、(4) softness と weight の間の評価の一致度をみると、より軟らかな評価はより軽く、より硬いとより重たい評価がなされること、(5) softness と weight の評価のための 8 通りの選択刺激の特徴によって評価が異なり、とくに選択刺激のスパイクの数と尖りを増大すると weight は硬くそして重たく評価されること、(6) 選択刺激を熟知した事物から言語連想させても、その材質評価に影響しないこと、(7) softness と weight の評価は選択刺激の面の特徴と相関があること、などが示された。

このことから、softness と weight の知覚評価は材質の表面 (surface) の部分的凹凸に依存することが明らかにされた。

3.2 テクスチャにおける面の 3D の傾きの効果

Chen & Saunders (2020) は、絵画的手がかりのうちテクスチャの面の 3D 傾きにおける効果を、とくにテクスチャ圧縮要因による傾斜面を面の拡張と圧縮を別々に操作し視えの傾斜を測定した。

単眼視条件での手がかりの効果の程度を手がかりウェイト (cue weight、他の手がかり効果の総計に対する一つの手がかりの効果) として計算すると、テクスチャの圧縮要因が傾斜面の知覚に他の要因より影響していた。

両眼視条件での実験では、手がかり一致条件の場合、視えの角度は、単眼視事態と同様に、シミュレート角度に対して非線形に増大した。手がかり不一致条件の場合、視えの角度はシミュレート角度に対して非線形に増大し、また手がかりウエイトを指標とすると圧縮要因と視野の大きさ要因 (10°) が視えの傾斜に対する影響が大きいことが示された。

単眼視と両眼視条件の実験結果から、テクスチャの圧縮要因が視えの傾斜に影響する主たる手がかりであり、テクスチャのスケーリング要因が追加的な手がかりとして働くと考えられ、テクスチャと両眼視差の手がかりが統合されて奥行傾斜知覚が矛盾なく成立すると考えられる。

3.3 陰影による3D形状

推定された上方光源による陰影からの3D形状知覚と年齢変化

絵画における陰影は面のローカルな形状および対象の光源方向に依存して変わる。上方から照らされた凸面のトップは明るく低は暗くなり、凹面は弱の陰影パターンとなる。観察者は陰影手がかりから形状を知覚するためには照射方向を知らなければならない。

Pickard-Jones, et al. (2020)は、5歳齢から7歳齢の児童を対象に年齢、パターン全体がわかるグローバル処理過程、凸知覚バイアス、および読書能力の要因が陰影知覚の発達に及ぼす関係をしらべた。

実験の結果、(1)陰影による凹凸知覚が可能になった被験児童の推定された光源方向は上方(0°)から左側(-24.7°)の範囲で、左方向バイアスがあること、(2)これが可能な年齢グループは7歳児からであるが、7歳児と9歳児グループ間には有意差が無いこと、(3)凸状知覚可能な年齢は進むにつれて増しグループ間に有意差はあるが、知覚できないグループ間には有意な差は無い、(4)刺激をグローバルに把握する能力は、5歳児と9歳児グループで有意に差があり年齢とともに進展すること、(5)バルーンテストでは、5歳児グループはパターンの中央から、7歳児グループは左側から、9、11歳児では左端からスタートすることが示された。そこで、被験児童の推定された光源方向、読み書き能力、バルーン課題のスタート地点、そして

推定された方向の感受性の相関を年齢ごとにみると、相関はないことが示された。しかし感受性とグローバル判断の間に相関が示された。

これらの結果から、成人と同じような3D 陰影知覚で光源を上方にあると仮定しているのは7歳齢からと考えられる。

4. 視空間の構造

4.1 3次元視空間における Object-based warping (知覚的歪み)

2次元で生起する知覚的イリュージョンはリアルな3次元空間では起きにくい。Zosky et al. (2020)は3次元の空間で生起する実際の対象に基づいた知覚的歪み(ワープ、warping)を実験的に検討した。とくに、空間の知覚的歪みは対象に関係する注意の分散の結果によると考えられるので、自然観察と反応がどのように対象の知覚的歪みに影響するかの実験を試みた。実験1ではワープのイリュージョン(warp illusion)が3次元対象に及ぶかどうか、実験2ではVR空間のディスプレイの操作や反応にも同様に影響するかがしらべられた。

実際の距離と測定された視えの距離の差をワープとして計算した結果、VR環境下でもワープ効果が次のように示された。(1)コントロールの無対象条件とオクルーダ条件のワープが類似したこと、(2)対象事態では分離矩形を除いてどの対象でも観察距離(近距離、遠距離)の間で差がないこと、(3)対象が同じ事態ではドット間の距離が小さいと大きい距離に較べてワープが大きいこと、(4)頭部の静止と運動条件ではワープに違いがないこと、などが見いだされた。これらの結果から、ワープについては実空間とVR空間条件では類似するが、しかし若干の相違も見つかった。

実空間とVR空間事態でのワープの若干の差が測定反応の方法から起きているかの実験の結果、知覚のワープは、(1)矩形条件ではオクルーダとコントロール条件より大きい、分離矩形条件との間には差がないこと、(2)分離矩形条件はオクルーダとコントロール条件より大きいこと、(3)オクルーダとコントロール条件には差がないこと、(4)ドット距離が小さい条件は距離が大きい条件より大きいこと、(5)頭部の静止・運動条件間あるいは観察距離間には差がないこと、などが示された。

とくにオクルーダ条件でワーブが起きにくいかどうかの検討では、(1)ワーブは、矩形条件でもっとも大でそれと同じ程度に統合オクルーダ(merged occlude)で示され、しかも分離矩形、オクルーダそしてコントロール条件より大きいことが示された。(2)またドット間の距離が小さい条件でしかも観察距離が遠い条件、および頭部運動条件でワーブが大きかった。(3)測定方法の違いではワーブに有意な差は生じなかったが、頭部運動条件では静止条件より大きかった。(4)ドット間距離、頭部の静止と運動、測定方法の間には有意な交互があった。この実験4では、統合オクルーダでワーブが大きいために確認され、この条件では矩形とオクルーダが視えの奥行が小さいため一体化して知覚される図形布置のためと考えられる。

これらの VR 利用の研究の結果、2 次元空間と同様に 3 次元 VR 空間でも知覚の歪みであるワーブが起きているといえる。

4.2. ムービーの提示サイズとコンテンツの偏好効果

ムービーで提示した対象の大きさ変化に対する観察距離とコンテンツの偏好効果

画面に提示した対象を好むか否かは色、空間周波数、方向そして大きさなど対象の審美的特徴によって影響される。

Harasawa et al. (2020)は、対象がムービーとして提示されても同様な大きさ偏好があるかを実験した。

実験の結果、対象の実際のサイズと被験者の偏好サイズの間には強い相関が有意に示された($r=0.684$)。

これらの結果ら、提示したムービーのサイズの偏好には、ムービーの内容、観察距離、そして実際のサイズの要因が影響することが示された。

5. VR 利用の研究

VR アームを利用した奥行絶対距離知覚

Yang, Z et al. (2020)は、VR 環境で対象までの奥行絶対距離知覚に影響する視覚手がかりおよび VR アームの長さの種類を変えて実験した。対象までの奥行絶対距離知覚の手がかりは両眼視差、両眼輻輳、眼球調節、運動視差、対象の重なり、線遠近法、テクスチャ、

陰影、熟知的大きさ要因などであるが、そのほかにアクションの経験程度、たとえばサッカー選手が走行距離を短く知覚するとか野球選手がボールを大きく知覚するなどが影響する。これは、ギブソンのアフォーダンス理論にもとづいて個々の知覚はアクションのために与えられた環境をベースに知覚する (affordance) ためと解釈された。

Yang, Z et al. (2020)は、観察者から近傍の空間あるいは遠方のVR環境下でVRアームを実物と等しい条件、長い条件、短い条件を設定し、対象から観察者までの奥行絶対距離を評価させる実験を試みた。その結果、対象までの奥行絶対距離評価はVRアームが長い条件(実物より30%長い)では等しい条件より有意に遠くに、また等しい条件でも短い条件(実物より30%短い)より有意に遠くなること示された。さらに、VR経験が有るグループと無かったグループでは、VRアームが実際の腕と等しいか長い条件で経験のあるグループの方が有意に対象までの奥行絶対距離評価は経験のないグループより正確であるが、しかしVRアームが実際より短い条件では経験の有る、無しで有意差は生じなかった。

3種類のVRアーム(手と腕、手のみ、球体)を作成し、VR経験のある場合とない場合で対象までの奥行絶対距離を推定する実験では、VRが等しいあるいは長い条件ではVR経験のあるの方がいない場合より有意に推定が正しいこと、およびVRアームが手と腕あるいは手のみで構成され実物と等しいか長い場合には球体で構成されたVRアームより有意に正確に推定された。VRアームがどれも短い場合には推定が正しくなくどれも有意差がなかった。

これらの結果は、VR環境におけるバーチャルな自己身体の表現が重要となることを示す。

絵画と実シーンにおける対象の距離と位置の認知的枠組の相違

絵画に描かれた表現を対象とした脳波研究や磁気共鳴映像法(MRI)による研究では、絵画と実シーンでは異なる情報処理が中枢で行われている。絵画的表現では実シーンの視点からの網膜イメージが暗黙に仮定され、その網膜イメージが実シーンと類似していたら視覚システムは両方とも同じとみなすと仮定された。空間的な位置や方

向をコーディング(coding)するためのカテゴリとして自分を基準とする自己中心的枠組と、他の事物を基準とする他己中心的枠組がある。前者では空間関係を自己が動くにつれて不断に書き換える必要があり、後者では中心となるものがランドマークならば、一度のコーディングで済む。

Karimpur et al. (2020)は、絵画と実空間を比較する従来の研究方法の欠点（継時的比較からくる他己中心的枠組の相違、および刺激サイズや視点などの非統制など）を改めて記憶にガイドされたリーチング(memory-guided reaching)の実験を試みた。実験では、絵画（2次元）によるシーン（朝食光景、りんご、バター、カップに入れられた卵、コーヒー沸かし、マグカップ、ピーナツバタージビンのターゲット6個）とそれと同等な視空間シーンをどちらもVRを用いて構成した。

実験の結果、他己中心的枠組のウエイト値を求め、それをシフト量から他己中心的枠組の基準値を差し引いた値とした。もしウエイト値が1となれば、対象を他の事物との関係で完全に記憶していることを示すので、0から1の範囲が他己中心的枠組による基準として示される。ウエイト値は、VR空間条件が平均0.509、絵画大の条件が平均0.431、絵画小サイズの条件が平均0.279を示し、他己中心的枠組で3次元と2次元条件で共に対象間距離が評価されていた。3次元のVR条件でも自己中心的枠組よりは他己中心的枠組で対象間距離評価方法が示されたことは予測外といえる。この結果は、テーブルやモニターの幅、あるいは対象までの奥行量を変えて自己中心的枠組の手がかりが用いられやすく操作した場合にも絵画的条件よりもVR条件でよりはっきりとした他己中心的枠組利用の結果が得られた。

この結果から、視空間と絵画に描かれた空間での対象の位置と距離は自己中心的枠組より他己中心的枠組によって認知され、どちらかといえば視空間でその傾向が強いと考えられる。

6. 3次元視におけるその他の研究

ハトのダイナミック廊下錯視

Hataji, et al. (2020)は、ハトの廊下錯視および大きさ恒常性に対

する絵画的手がかりの有無について実験した。6 個体のオスのハトを予備訓練し、2 個の矩形の刺激を提示し、大きい方をペックしたら報酬を与える訓練をした。背景の大きさを試行ごとに変えた廊下錯視パターンを提示し、その中の 1 個の白円の大きさを変え (25, 29, 35, 41, 47, or 55 pixels in diameter)、さらに垂直方向の位置を変えて提示した。静止条件では錯視パターンを静止して提示、ダイナミック条件では水平方向にサイン波形を描いて 0.5Hz で動かして提示した。

実験の結果、静止条件ではハトは遠くに視える方のターゲットの大きさを近くに視える条件のそれより有意に過大視することが示された。PSE を指標でみると、遠くに視える対象の PSE は近くに視える対象より小さく、これは人間と類似していた。ダイナミック条件でも遠くに視える方のターゲットの大きさは近くに視えるそれより有意に過大視された。しかし、静止とダイナミック条件間の PSE 値の変動は静止条件で有意となり、したがって絵画的要因が手がかりとして有効だった。これらの結果は、ハトの大きさ恒常性が主に絵画的要因によっていて、運動視差は手がかりとしての効果がないと考えられる。

同様な実験が、ヒトを対象に同じ静止とダイナミック条件で試行され、その結果、廊下パターンでの錯視では絵画的要因が主に効果的の手がかりであり、運動視差も効果があることが示された。ハトとヒトの実験結果を分散分析した結果、ハトとヒト間には手がかり効果について有意な差がないことが示された。