

3次元視の動向のまとめ

両眼立体視の研究

ステレオプシスの視差の研究の意義

Arguin & Aubin (2023) は、ステレオオプシス研究では人間のゼロ視差、ノーマル視差、あるいは逆点視差で対象の形状認知がしらべられてきたとし、認知のもっとも高度なレベルはゼロ視差、ノーマル視差条件であると報告した。しかし、逆転した視差条件はこれ以外の条件より有意に認知が悪いことが分かっていると、このことは、ステレオプシスが形状知覚のしくみには継続的に刺激が入力する必要性を示した。これを立証するために Arguin らは実験を組み立て、その仮説によると網膜へのさまざまな視点からの2次元イメージが明確に投影されて3次元の形状が成り立つとし、この形状認知のためには奥行情報の潜在的働きを考慮する必要があるとした。

Arguin らは一貫して安定した両眼視差があり課題文脈がなければ、潜在的効果が形状認知に及ばさないと考えた。これを確かめるために、両眼視差を通常より反転させ奥行手がかりを反対方向に変え、反転視差の刺激に対する影響をしらべた。実験の結果、無視差とノーマル視差条件では逆転視差よりエラーが有意に少ないことが、また無視差とノーマル視差条件の間には有意差がないことがそれぞれ示された。この結果は単眼視の奥行手がかりが豊かでも両眼視差が安定した情報を形状認知に提供していることを示した。しかしもっと複雑な3次元対象を取り上げたときは潜在的な単眼奥行手がかりが関わり結果を変えるかも知れないと示唆した。

眼球間垂直フェーズの視差の検出の手がかり

コントラストの強弱に関わる眼球間視差は検出の手がかりとして提示されると両眼ラスタ（光彩）の輝きを生み出す。空間的キャリアのガボールパッチにおける視差はもちろんラスタの印象を生み出すので、これはラスタにともなう局所的コントラストのフェーズ視差かどうかの問題となった。Kingdom et al. (2023) はフェーズとコントラストの視差の両方の検出閾値を測定するために水平方向の各空間周波数とエンベロープのガボールパッチを用いた。ガボール刺激はコサイン型の一次エンベロープで全体のパターンが400ms 持続提示され、先行トライアルの反応に従って観察者にコントロールさせ各トライアルを試行させた。眼球間の空間的位相差の検出をガボールパッチにおける眼間位相差の検出とガボールパッチにおける眼間コントラスト差の検出と比較した結果、両眼ラスタ（光彩）の輝き眼球間の位相ではなく全体的なコントラストが異なる場合であることが示された。帯域幅を一定に保ち、ガボールの空間周波数を変化させた場合は位相差とコントラスト差の検出は同様のパターンをたどった。しかし、空間周波数を固定し、ガボールエンベロープの標準偏差（変調サイクル数）を変化させた場合、位相の視差を検出する閾値はガボールの標準偏差のU字型関数に従うのに対し、コントラスト視差に対する閾値は最初の減少の後、ガボール標準偏差の関数にしたがった。一方、コントラストの閾値は初めに減少し、その後は大体ガボール標準偏差関数にしたがう傾向があった。この傾向を検討した結果、両眼感覚融合が原因である可能性が高いことが示唆された。両眼感覚融合は、位相差を減少させるがコントラストは減少させないので位相差閾値は選択的に上昇させると考えられた。

複合グレーティングパターンの知覚奥行に関する粗と細のバンドパスフィルターの相互作用

両眼視差を符号化 (encode) するために、視覚システムは左と右眼の位置あるいはフェーズオフセットのバンドパスフィルターのペアを使用するが、しかしこのようなペアは幅広い視差をエン

コードするために複数のスケールで存在すると考えられ、局所的な視差のバンドパス機構による測定は曖昧になることがある。特に、実際の視差がフィルタの優先空間周波数の半周期よりも大きい場合、曖昧になる。Chen, et al. (2023) の研究では、視覚系が視差から奥行を推定する際、より細かいバンドパスでこの曖昧性を解消するために粗-細のバンドパス作用を用いるかどうかをしらべられた。すべての刺激は、幅パラメータ $\sigma 1.04^\circ$ で、 $H4.19^\circ$ 、 $V4.21^\circ$ のガウス包絡線であった。したがって、両眼画像の中心とするガウス包絡線は視差ゼロである。これらのデータは 1-cpd 成分が 4-cpd の視差を持つときにも同様の効果があることを予測する。1cpd 成分が 0° または $\pm 90^\circ$ の位相差を含む場合、4cpd の視差の効果は 0° または $\pm 90^\circ$ の位相差を含む場合、4cpd の視差が同様の効果をもたらすと予測された。使用したターゲットパターンと比較パターンは複合格子で直接比較することで、ターゲットパターンを直接比較させた。結果、ステレオ縞模様パッチの正弦波成分の位相差を操作し、視覚系が視差情報を統合して奥行を知覚するために粗-cpd と細-cpd の相互作用を統合、1cpd+4cpd のターゲットパターンを比較パターンと共に提示し、被験者にはどちらが奥行に近いかの判断をした結果、比較パターンに対するターゲットパターンの相対的な奥行判断は、微細な正弦波の位相視差によって変化することがわかった。その効果は比較パターンがマルチスケールの複合（実験 1）であっても、低周波数単純グレーティング（実験 2）であっても生じたが、300ms の短時間の刺激提示（実験 3）には効果が弱かった。これらの結果から、粗視差から細視差へのマルチスケール視差統合のメカニズムが支持された。

両眼視闘争における減法順応の効果のメカニズム

ニューロンの活動は、ランダムなゆらぎの影響を受け、特に感覚系では発火率の適応によって強く順応が調節される。現在、神経細胞のノイズの特性や適応のメカニズムについては現在も議論が続く、特にそれらが知覚にどのような影響を与えるかについてはまだよくわかっていない。ノイズと順応は両眼闘争において重要な影響をもつ。Cravo et al.(2023)は、様々なノイズおよび適応メカニズムが視覚知覚に及ぼす影響について両眼競合の計算モデルをシミュレートして研究した。検討したモデルでは 2 つの直交する方向を考え競合刺激を構成した。モデルには 3 種類のニューロンおよび眼球対抗性ニューロンであった。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から視覚入力を方向選択に応じてそれぞれの眼から視覚入力を受け取り、両眼ニューロンは左右の単眼ニューロンの活動を合計する。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から選択した方向に応じて視覚入力を受け取り、左右の単眼ニューロンの活動を合計する。両眼のニューロンは左右の単眼ニューロンから同一の選択した方向の情報を合計する。2 組の対抗ニューロン（right-minus-left (R-L)）および対抗ニューロン（left-minus-right(L-R)）は、左右の単眼ニューロンから同一方向の選択の活動を差し引き、差し引かれた側のすべての単眼ニューロンを抑制する。検討したモデルでは 2 つの直交する方向を考え競合刺激を構成した。モデルには 3 種類のニューロンおよび眼球対抗性ニューロンである。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から視覚入力を方向選択に応じてそれぞれの眼から視覚入力を受け取り、両眼ニューロンは左右の単眼ニューロンの活動を合計する。左右の単眼ニューロンは、それぞれの眼から選択した方向に応じて視覚入力を受け取り、左右の単眼ニューロンの活動を合計する。両眼のニューロンは左右の単眼ニューロンから同一の選択した方向の情報を合計する。2 組の対抗ニューロン（right-minus-left (R-L)）と対抗ニューロン（left-minus-right(L-R)）は、左右の単眼ニューロンから同一方向の選択の活動を差し引き、差し引かれた側のすべての単眼ニューロンを抑制すると提案した。

視野闘争の測定の信頼性

両眼視野闘争は視覚と認知の側面を他の方向からしらべる認知的神経科学で広く用いる現象である。両眼視野闘争のダイナミクス（優位の知覚出現時間、混合知覚出現比率）は個人差があり、視覚的ドミナンスの指標（両眼間のイメージの知覚的ドミナンスの比較）を測定できる。Sari et al. (2023) は、両眼視野闘争のダイナミクスの測定の信頼性を検討するために両眼分離視の刺激と異なる抗争刺激を用い、単一の実験セッションによる評価の内的一貫性、および実験日を変えたテスト再テストに基づく2側面を別々に正常な視力のある118人の被験者に4通りの実験を実施した。実験の結果、両眼視野闘争ダイナミクスの信頼性を両眼分離の異なる方法と異なる闘争刺激で実験し、視覚優先性、フェーズ持続時間および混合知覚特性をしらべた。その結果、テストと再テストの信頼性を見出し、さらに視覚優先性の再テストは内的一貫性から予測でき、常に安定していることが見いだされた。しかし、フェーズの持続時間と混合知覚の割合は、内的一貫性から予想されるよりも悪くこの実験で用いたパラメータは状態に依存した変化を受けやすかった。これらの結果から、眼球優位性指標と両眼視野闘争を感覚的眼球優位性とその可塑性の測定に利用することを提示し、しかしフェーズの持続時間や混合知覚および心理的特性や障害のような安定した特性との関連性をしらべる場合には注意が必要であるとした。

弱視のステレオ視

弱視者はステレオ視の奥行判断の能力が劣っているといわれるが、Carrilo et al(2023)は弱視者の残されたステレオ視能力を標準的な医学的ステレオテストで障害が限定されると考えた。この目的のためにデザインされたステレオ視を用いて立体視力について検討した。その結果、弱視者の59%の立体視の閾値には2つ要因の差が健常者との間にあり、その一つは弱視者の立体視力103arcなのに健常者56arcだった。そこで、等量のノイズを弱視者と健常者のステレオ視に加えてその影響をしらべ、弱視のステレオ視の過程少しずつノイズを増量する方法（linear amplifier model）を用いて探った結果（238 vs 135 arc）、両群には有意差がなく視差処理は同等であった。多重線形回帰をすると弱視グループ内でステレオ視力の分散が56%、等価な内部ノイズは単独で46%予想され、したがって2つの線形増幅モデルでのパラメータが予測された。その結果、この課題で弱視の遂行を限定する要因があり、これが視差シグナルの入力の質を阻んでいる。

単眼と両眼のコントラストとボカシが機能的立体視の範囲に及ぼす影響

立体視は最小のステレオ閾値（下限）と融合の上限によって決まる一方、下限はコントラストの低下やボカシによって悪化し両眼よりも単眼でより強くなるが、しかし上限値への影響はまだ不明だった。Lew et al.(2023)は、ステレオ文字認識課題にコントラストとボカシが視差感度関数（DSF）の範囲に与える影響を評価した。被験者にはランダムドット・ステレオグラムに埋め込まれたステレオ文字を識別させ、階段法（上下法）を使用して2つの限界を推定した。ベースラインコントラスト（100%）、異なるコントラスト（32%と10%）、ボカシ（+0.75DSと+1.25DS）で、単眼と両眼の両条件で実験を行った結果、両方の限界の曲線は低減する形状であり、DSFが高いほど範囲が狭くなることがわかった。この結果はコントラストが低く、ボカシが大きい場合、下限値の閾値が大きくなる一方、上限値は小さくなった。DSFの縮小は単眼条件下で顕著であるが、ボカシ条件では被験者間にばらつきがあるので単純な相互相関ステレオマッチングアルゴリズムを用いコントラストとボカシの影響を定量化した。その結果、DSFの範囲は画像の劣化とともに減少するという行動学的結果と一致した。

両眼視野闘争における統合と抑止の相互作用

2つの画像を2眼式で提示すると両眼統合が起こり、安定した立体視が生じるが、両眼競合を引き起こすと眼間抑制を誘発する両眼競合を引き起こし両眼統合と眼間抑制の関係となる。統合と眼間抑制の関係は脳がどのように両眼入力を処理し、統一された視覚認識を形成するののかに関わるが、どのように処理されるのかはまだ解明されていない。Jiang et al. (2023)は、周辺立体視と両眼対抗視の相互作用をしらべ、実験1では、中心部の両眼視闘争が周辺部の立体視に及ぼす影響を、また実験2では中心性立体視が周辺性立体視にどのような影響を与えるかをしらべた。実験の結果、隣接した両眼闘争視と立体視の相互作用では、より高いコントラストを持つ両眼闘争は周辺立体視閾値を上昇させ、両眼視差が大きくなると周辺部の闘争ダイナミクスを高めることから両眼視における統合と抑制は相反するプロセスではなく両眼バランスの動的調節がこの2つの過程に共通するメカニズムの根底にあると考えられる。

プロトオブジェクトに基づくモデルの立体視が視覚的顕著性に及ぼす選択的注意の影響

ヒトを含む一部の動物は両眼視した画像間の視差から環境に関する空間情報を再構成する立体視がある。他の感覚情報と同様に、このような立体情報も注意の選択に影響を与える。Uejima et al.(2023)は、両眼視の生物学的に妥当なモデルを開発し、ボトムアップの視覚的注意、すなわち視覚的顕著性(visual Saliency)に及ぼす影響を研究し新しいモデルを作成した。このモデルは、情景は比較的日常的の束縛のない注意が作用する原物体(proto-object)という観点から構成され、立体情報を考慮することで人間の眼球運動の予測におけるモデルの性能が統計的に有意な差で向上する生物学的立体視のモデルを提案し、それをプロトオブジェクトベース顕著性モデルに組み込んだ。本研究では、(1) V1、V2、V4野の視差調整ニューロンとボーダーオーナーシップコーディングニューロンを含む、バイオフィデリックな3D視覚顕著性モデルの構築、(2) このモデルを自然な3Dシーンに適用し、自然なシーンを見る人間から収集した注視データを用いて顕著性に対する3D効果を評価するのが、それぞれの課題である。プロトオブジェクトベースの顕著性モデル(proto-object based model)の枠組みは次に記すように、視差チャンネルがRussell et al. (2014)によって導入された顕著性モデルのバリエーションで、ここではUejima et al. (Uejima et al.2020)によって開発された改良されアルゴリズムを使用した。計算された視差チャンネルは、2次元の強度、色、方向と同じようにプロトオブジェクトに基づく顕著性モデルへの1セットの入力を形成する。(a)は3次元空間で表現された入力画像で、実際の刺激はステレオ画像として提供され、奥行は3つのカテゴリーに分けられる(近距離、ゼロ距離、遠距離)。(b)は抽出された視差マップを示す。2次元特徴チャンネルは、入力から強度、色、方向の特徴マップを抽出して生成され、次に2Dチャンネルと視差チャンネルが、プロトオブジェクトベースのモデルによって処理される。その結果、考慮した5つのモデルすべてにおいて、また5つの測定基準すべてにおいて、NCTU3Dデータセットに顔、身体、または身体の一部が存在すると固視予測性能は低下し大半のテストでは、この低下は有意であった。Gaze-3Dデータについても同様に、大多数のテストで人間不在の画像の方が高い性能を示した。この研究では生物学的にもっともらしい立体視のメカニズムを、プロトオブジェクトベースの顕著性モデルに組み込み立体視画像を入力とし、視差エネルギーモデルからカテゴリカルな奥行情報を計算し、得られた奥行情報を単眼情報(強度、色、方向)と組み合わせ視覚シーンをプロトオブジェクトで表現した。その結果、顕著性マップは、視覚的注意の配分に関する予測を生成し単眼の手がかりのみを用いた対応するマップからの予測よりも、人間の行動と有意によく一致した。

運動の3次元視

オプティクフローの眼球運動

オプティクフローは人間の知覚と歩行、および眼球運動の視覚的手がかりである。Chow et al.(2023)は、オプティクフローの方向知覚が限定されているか、あるいは眼球運動で促進されるかを実験で検討した。実験1では、23人の被験者はオプティクフローパターンの拡大焦点(FOE)を限定し、実験2では、18人の被験者にはFOEの視覚を短時間提示し検出させた。両実験とも自由観察と注視条件で眼球運動を記録した。実験仮説として、第一に眼球運動は感覚的にFOEを追従し、円滑な追従、サッカーやマイクロサッカーのような空間スケールの眼球運動を保持するであろう、第二にFOEやドットの運動など眼球運動の遂行はオプティクフロー方向の知覚に利用し、したがって眼球運動の方向は試行ごとの知覚的精確につながると仮説を立てた。実験の結果、オプティクフローパターンがサッカーのトリガーとなり、そして眼球の動きを教示していなくても動きをトラッキングすることを示した。自由観察と注視条件でもマイクロサッカーに一致する特性が眼球運動にあり、眼球運動の刺激研究のためにはオプティクフローパターンが有効なことが分かった。遅い運動刺激あるいは視えの瞬時変化の探知のような困難な課題でも眼球運動は知覚的行動を分析するのに都合がよく、眼球運動は中心窩が関係する視覚課題の研究では有効な情報を提供する。

運動視差による奥行の視差の一貫性、アイコンタクト、ズームの深刻な問題

Troj (2023) は、ヘッド・マウント・ディスプレイを介したVRの外部でコンピュータ画面上のフレームに視差を実装するシステムを考案した。3D空間におけるユーザーの頭部位置をデバイスに取り付けられたセンサーで追跡してレンダリングに適用し、自己誘発的な運動視差をシミュレートするシステムを開発し、"MPDepth"(depth motion parallax)と名付けた。MPDepthの主な用い方は、アバターベースの遠隔コミュニケーションである。スクリーンに取り付けられたセンサーでユーザーの位置を追跡し、それを使ってコミュニケーション相手のアバターを仮想カメラで操作するとスクリーンの前の頭の動きから直ちに視差と視点の変化をもたらすように、コミュニケーション相手のアバターをレンダリングする。2人の対話者が窓枠の反対側に座っている場合にはこれで予想される視差と視点の変化が生じる。ビデオ会議に参加している間、コンピュータの前に座っている静止したユーザーの小さな動きでさえ、奥行知覚と方向性が伝わる。バーチャルカメラを制御する同じセンサーは頭のポーズと顔の動きのトラッキングにも使用し、ユーザーのアバターをアニメーション化させる。現在のプロトタイプは、動的アイコンタクトの役割を体系的に研究できる。研究の結果、コンピュータを介した視聴覚コミュニケーションは、音声のみの電話に比べて多くの利点をもたらすが、しかし、その反面、話者との理解の一貫性となる、指さし、頭の向き、視線の向きなど自然なアイコンタクトのダイナミクスに影響を与える。これに対して、MPDepthは、スクリーン・ベースで頭を使わず、非常に実用的なソリューションである。現在のシステムはアバターベースであるが、視点合成技術の急速な発展、単眼ビデオストリームをリアルタイムで操作すれば写実的なフォトリアリスティックを実現できる。

人間のヘディング(heading)知覚の時間的安定性

人間のヘディング(heading)知覚は自己運動からのオプティクフローで正確に判断する。オプテ

イクフローは通常一貫性があるにも関わらず視ているものの混乱や他の自然的フローで一定の変化が生じる。このような問題が起きるので知覚的ヘディングを保持しなくてはならない。視覚システムは自己運動によるオプティクフローの変化に対応、あるいはそうでないものを捨てる感受性をもつに違いない。Ali et al.(2023)は、これに対応するには一時の変動を抑止安定するヘディング信号を統合するメカニズムがあるはずだと考え、自己運動で変えた方向をシミュレートしヘディングの安定性を実験し検討した。この新たな Competitive Dynamics CD モデル(CD)では他の側の初期背面野ストリームにおけるヘディングの評価を modelMSTd 野のニューロンが蓄積しオプティクフローのシグナルから選好したヘディングデータに基づいて提供する(Steinmetz et al. 2022)。CD モデルのヘディングの感受性ニューロンはONとOFFの中心野で循環する。最強と最弱のシグナルの間で選好されてヘディングの活動の“winning”を強め、一方そのほかのニューロンを弱める。運動する対象からの局所的な抗争刺激で実質の無いものは一時的に対応する。実験1では、観察者の自己運動によるオプティクフローからのヘディング知覚の安定性をしらべた。実験1の結果、CDモデルは人間の行動に類似したヘディングバイアスをする事、人間の判断とモデルの評価は preswitch ヘディングに近い傾向を示す事、バイアスは postswitch のオプティクフローが switch アングルテスト条件のより長い場合に減ることが示された。結局、少し長い時間のヘディングのデータを集めると人間の行動バイアスを説明できるモデルになった。実験1ではオプティクフローが持続した時、ヘディング switch の postswitch ヘディング後の影響が正確であることが実証された。実験2ではさらにこのヘディング switch が検討された。250ms の刺激停止を挿入し、ここでオプティクフローを一時的に停止する3条件、すなわち「前 “preblackout” 条件」「丁度 “switchmidblackout” 条件および「後” postblackout” 条件」を設定した。実験2の結果、ヘディング switch 事態が効いている時はオプティクフローの役割に効果があった。Blackout が switch の直前では人間の判断影響を与えないものの、switch が判断の直後になるまで Blackout 条件では preswitch ヘディングに向かってヘディングのバイアスを増した。これらの結果は postswitch の時間が長いとヘディングのバイアスを減少させ、ブラックアウトの時間を長くするように保つヘディングの信号が伴うことが立証され、これは CD モデルでシミュレートしていた。しかしながらこの結果は midblackout 条件でのバイアスの上昇を説明できく今後のモデル化時の課題である。結局、神経生理モデル (Competitive Dynamics Model) のシミュレーションは、周期的な競合する相互作用のあるヘディングシグナルを生成するメカニズムを捉えている。これらの結果は、ヘディング知覚が視覚バランスを安定性させ、変化に対する高感度の感受性をもつことを示す。

継続的オクルージョンによる運動と奥行

オクルージョンと重ね合わせは3次元知覚の絵画的手がかりであり、また新しく提示された物体によって前の物体が次々と遮蔽されることで奥行を感じさせる。この錯視に関連する知覚運動は研究されているが、奥行知覚は研究されていない。Lee (2023) は、実験1で円盤を連続して提示し運動錯視が誘発されるかを実験した。静的 (スタティック) 対 積み重ね (スタッキング) (上)とスタティック(下)条件を設定し、そのトライアルの時間経過を設定した。「静的」対「積み重ね」条件では、一方の円盤の山はあらかじめ形成され、試行の間、画面上で静止したままであり、もう一方の円盤の山 (スタッキング) はすべての円盤が揃うまで 200 ミリ秒ごとに新しい円盤が出現し、試行期間中に積み重なった時点で画面は空白になり被験者は応答を行うことができる。静的条件では、被験者は2つの静的な円盤の山を合計 3.4 秒間観察させた。これらの実験か

ら、円盤の数が等しい静的パイルは円盤の数が同じであれば、高さは同じに見え、これに対して積み重ね条件における円盤を連続して静的な山と同じ高さにするためには、より少ない円盤が必要で済んだ。また、被験者はスタッキングと静的な円盤の山を比較したとき円盤を追加するのではなく削除することで積み重ねを逆転させて知覚させ、数の単純な違いによるものではないことを示した。連続的なオクルージョンの方が、オクルージョン単独よりも高さの感覚が大きいことを示し、またダイナミック・オクルージョンは、奥行情報で過小評価される可能性がある。

拡大するオプティックフローと側方の運動視差が正常視力と視力低下による奥行推定に及ぼす影響

観察者が空間内を移動すると静止している物体の網膜投影は、その動きが物体に向かうものであれば拡大し横方向の成分が含まれる場合は水平方向にシフトする。Liu (2023) は、拡大オプティックフローと側方運動視差が、正常視力または人工的に視力を低下させた観察者の奥行知覚の精度に及ぼす影響について検討した。実験ではこの種の効果が連続的な運動によるものなのか、離散的な物体像の変位によるものなのかを静止した被験者に観察させた。オプティック・フローや運動視差を観察する場合、2つの光源によって物体の奥行を明らかにでき、また物体の奥行は離散的な変位と運動視差によって明らかにできる。そこで観察者の動きに伴う対象のイメージの離散的な変位が連続的な物体の奥行に関する情報を提供するかどうかを検討するため連続的な運動視差やオプティック・フローの連続提示と、運動視差の最初と最後の動きの画像を別々に提示する場合とで比較した。車の運転、車椅子での移動、仮想現実でのゲームなどの場面では被験者は運動視差と視差の視覚情報を利用でき身体運動を体験することなく、運動視差やオプティックフローの視覚情報にアクセスすることができた。仮想的な屋内シーンの3Dモデルを構築し、レンダリングして拡大視差と側方視差をシミュレートした。バーチャル・シーンは5つの条件、拡大連続運動、拡大変位、横変位、静止視変位、静止視である。実験の結果、仮想空間内の2つのオブジェクト間の奥行を推定する際には動きに関連した手がかりは奥行知覚の精度を高めるのに役立つ、とりわけ、横方向の運動視差は拡大オプティックフローよりも静止視差の方が奥行知覚の改善に効果的でフローよりもさらに効果的である。連続的な動きを伴わない視野内の物体輪郭の変位は、通常または軽度・中等度の視力低下条件で奥行知覚を向上させることができ、連続的な運動が見えるとさらに奥行知覚が増強される。しかし、視力が著しく低下した場合は増強されることはない。

奥行手がかりの統合

テクスチャと視差による奥行知覚

脳が曖昧な視覚入力から三次元(3D)情報を導き出すかをモデル化するために、ベイズ推論理論が広く用いられてきた。特に最尤推定(MLE)モデル(MJE)は、複数の奥行き手がかりからの推定値の相対的信頼性から最も可能性の高い3D解釈を生成する。しかしここでは、別の考え方 intrinsic constraint 理論、すなわち視覚系は視覚入力の最も安定した解釈を導き出すが、最も確率的な解釈は導き出さないと仮定している。Kemp et al. (2023)提案する規範的モデルは、内在的制約(IC: intrinsic constraint theory)理論と呼ばれ、IC理論とは全く異なる仮定をもつ。第1に、別々の視覚モジュールがそれぞれ独立にイメージの規則性を処理すると仮定し、それら別々のモジュールが行うディスタル(distal)の3Dの特性および内的3Dの評価値は、 $\hat{z}_i = k_{iz}$ となる \hat{z}_i である。勾配は線形をとる k_i で奥行き手がかり内の i の視覚情報の質に依存する。実験の結論として、IC理論の方が3Dの手がかり統合実験を説明するには、IC理論の方が次の点で適している。(1)

ベイズモデルでこれまでデータを予測できる、(2) これまでのモデルでは新たな結果は予測できない、(3) このモデルではベイズ推定が機能するために必要な、知覚の真偽や手がかりの信頼性を推定する必要がない簡潔なモデルである。このベクトル和のモデル (vector sum model) は、個々の手がかりがノルムの合成推定値を決定する多次元の構成要素のベクトルであり、そのノルムが合成推定値を決定するのを評価して目標を達成する規範的アプローチを提供する。個々の手がかりの評価は正確ではないがデジタルな 3D の特性を決定的なマッピングを通して関係している。

奥行距離の 3 次元視

単眼視手がかりによってシミュレートした 3 次元空間の注視されない遠くの周辺にある対象検出のための奥行距離の調整

絵画的とオブテックフローの手がかりでシミュレートした遠くにある対象に較べて近傍にある周辺対象の検索は良好なことが知られている。Song et. al (2023) は、ターゲットの検出をパースペクティブと運動視差を用いて奥行距離を変えときの効果を、観察者単独で周辺に視える既知のターゲット (車) を受動的に検出する仕方と、積極的に車の追従課題を持ち込む条件試した。これらの実験の結果、単眼視のみの手がかりでシミュレートした奥行環境で網膜状同一の大きさの周辺に位置したターゲットの検出はその距離に単調には影響されないこと、また観察者のシミュレートした自己運動の間、中間距離におけるターゲットが近方あるいは遠方にある対象より検出が正確になること、さらにターゲット距離の影響は観察者と対象間のシミュレートした距離がいろいろに変化しても影響しないことも示された。

頭部・身体中心型の自己中心空間視覚の記憶における生理心理 (身体全体の傾きの役割)

観察者における対象位置の記憶 (自己中心的間視覚記憶) は基本的には対象方向の行動でアクションの基本である。これまで眼球の自己中心的な視空間の記憶ばかりでなく他の自己中心の関係枠組 (頭部あるいは身体中心、あるいは両方) の脳における記憶によると考えられてきたが実証に乏しい。ここでは重力の傾きによる頭部・身体中心の座標軸の知覚的歪みによる可能性を Tani et al (2023) は検討した。被験者に自分の頭部・身体に対して記憶した観察対象の位置を再生するように教示した 2 つの実験を実施した。実験の結果、再生された位置は明瞭に介在した全身体の回転方向にバイアスされ、知覚された頭部・身体軸も一貫して全身体方向にシフトした。とりわけ再生された位置のバイアスは有意味に被験者に知覚された頭部・身体に対応し、とくに対象がチルト位置にあるときに対応した。視空間記憶課題のエラーは頭部・身体中心軸のバイアスが小さく、したがって眼球中心関係基準は記憶された視空間情報と関係していると考えられる。2 つの実験の結果、自己中心的視空間では要求された課題と要因に依存する空間情報を符号化し蓄えて関係枠を決める融通性を脳はもって記憶して、頭部・身体中心の関係枠に少なくとも全身体が重力に関係し依存すると考えられる。

絵画的要因の 3 次元視

高空間周波数の自然のテクスチャの感受性への信頼

自然界のイメージは多次元の空間尺度をもつが、しかしかにかにその初期に多次元のスケールを抽出して明確な空間周波数チャンネルにのせてアウトプットし中間レベルの処理をしているかの視覚メカニズムが分かっていない。しかし、最近テクスチャの弁別課題が進展する中で中間レベル

のスケールの自然なテクスチャのメカニズムをとりだせている。自然のイメージは高空間周波数を含む。3つの自然イメージの中心部に空間周波数の帯域フィルタ（4, 8, 16, and 32 /image、2 octaves）にかけたイメージを高空間周波数は低空間周波数より自然シーンの情報が高くなる。Lieber et al. (2023)は、Portilla-Simoncelli 統計学（ヒトの視覚メカニズムに基づいたテクスチャ特徴量とその特性を基にしたテクスチャの生成モデル）の強さに対する知覚感受性をイメージのボケ、イメージのリスケイリング（rescaling、観察距離など）および視野周辺のイメージ提示の3個の実験変数を操作してその感受性を測定した。4種の実験の結果、イメージのボケ、イメージサイズの変更、周辺視の実験変数を操作し、感受性を測定したところ、自然性構造に対する強い知覚感受性が対象の高空間周波数（cycles/image）に対してあった。これは観察者の感受性が自然性の構造を感知できる高度空間周波数に作られた視覚システムの特性から生じたテクスチャ視力によると考えられる。観察者モデルは高度空間周波数の自然性イメージの特徴を低空間周波数の対象よりもこのイメージの検出課題の方が情報に適する。対象の高度空間周波数は視覚システムの特性よりはテクスチャイメージの特性と考えられる。したがって、テクスチャ視力限界の特性をもつイメージから知覚感受性の効果的な情報を引き出すためには中レベルのメカニズムが適する。視覚ニューロンの選択された空間周波数は典型的にはその受容野の大きさに反比例して反応するので高い空間周波数に対してニューロンはより小さい視野に反応する傾向がある。モデル観察者では、それら2つの要因を効果的にキャンセルし選択した空間周波数と自然性のスタテクス間の強い関係を否定し、むしろモデル観察者のニューラルな感受性はその空間の事象に対してニューロンが選択した空間周波数の比率で最も良く予測されると示唆される。このモデル観察者は追加された各高空間周波数の帯域で先の帯域の4倍の情報チャンネルを利用し、人間の観察者ではすべての帯域について同等の効果を引き出すものと予測された。

輝度による凹凸パターンの3Dの定性的知覚

Todd et al. (2023)は3次元対象の知覚のための情報源が視野輝度の陰影からの湾曲による面の凸が知覚されることを示すために滑らかないくつかの陰影パターンといくつかの材料の表面上の凸を同定する能力を測定した。一つには水平断面のイメージにそった視えの面上の凸はもともと輝度プロファイルの凸領域にあったものという仮説を、ふたつには対応する輝度と奥行間のフェーズをシフトして視えを補う人間の能力を、三つには疑似的な輝度による凸面を表面の一部とみる錯覚的知覚があることを、それぞれ研究目的とした。実験の結果、ほとんどの被験者の反応は輝度プロファイルの領域の凹領域であり、その他の被験者の反応もほとんどすべて凹領域の外かあるいは中心軸の凹面に起きていた。これらの結果はランバルトと非ランバルトの面にある質的な形状が同一の視覚情報に基づいて生起しているのが驚きである。結局、本実験で知覚的に質的な形状を被験者に横断面の凹面を見つけるようにしたところ、ほとんどの反応がたとえ面が湾曲の領域にシフトしていても輝度プロファイルの凹面の領域にあると反応した。このような遂行は照明あるいは材質面の特性が変わっても明瞭に生起した。従って、観察者は輝度が凹面に対応しない領域でも誤警報を出すを予測し、実際にそれが妥当だった。さらに、滑らかな遮蔽輪郭と輝度湾曲の相互作用ですべての輝度の勾配がネガティブイメージにおける3D形状の知覚を説明できる。

混合対称性をもつ非混乱のポンゾー錯視

ポンゾー錯視図形は“< >” or “> <”のような収束する要素を図形内にもつために輻輳線分は奥行方向に近くなるように視え、逆に解散する線分は遠ざかるように視える。Landwehr, K.

(2023)は、この図形を鏡像的に対照提示し図形の頂点とターゲット線分間距離の間で線分の長

さと頂点までの距離を変数にし、ターゲット線分の長さの差（JND）を測定する実験を試みた。実験の結果、実験では端点とターゲット線分間のギャプの大きさは錯視量が変わらずに重要ではなく、小さなギャプの条件で錯視が起き局所の特徴が重要と考えられた。そこでポンゾー錯視は図形にT型ジャックションが関わるのではないかと考えられた。これはT型の逆T（ \perp ）で水平と垂直線分が離れていないと垂直線分が水平線分に比較して長く見える錯視が生起する。この逆T型錯視はターゲット線分の長さを比較判断する方向感受性のメカニズムが関わる。実験の結果、輻輳図形では端点とターゲット線分間のギャプの大きさが変わっても錯視量にほとんど影響しないこと、またターゲット線分が平行あるいは非平行な傾きがあれば錯視量が減ることが示された。結局、ポンゾー錯視はターゲットと輻輳線分間の大きさによるもので、これにはニューロンの方向感受性と端点抑制性間の総合作用で生起していると考えられた。