

両眼立体視

1. 視野闘争

OKN(optokinetic nystagmus)を用いた視野の抗争における知覚的反転の測定

Aleshin et al. (2019)は、追跡眼球運動（動く対象物を中心窩に捉えるために速度遅く追従する眼球運動）を連続して記録する方法で視野闘争を分析した。実験では眼球運動を水平方向の動きが1 kHzのサンプリング時間で記録した。これに基づいてOKNのファースト(fast)とスロー(slow)のフェーズを特定し、ファーストフェーズを除去した後に連続してスムーズな眼球運動追跡を累積させて(cumulative smooth pursuit, CSP)取り出した。これに基づき眼球の水平運動速度がゼロになる交差(zero-crossing)およびこれを補完する追加指標として注視速度閾値(± 0.1 pix/ms)を用いた。これらの指標から知覚優位のフェーズの始まりと終わりそして移り変わりのフェーズが決められた。上記の指標に基づいてOKNの測定結果を累積スムーズ追跡眼球運動(CPS)を求めて各眼への刺激の抗争事態における知覚反転時を決定し、それを言語による知覚抗争に関わる意識的報告の結果および物理的に運動方向が反転する事態と比較すると、一致していることが示された。これは健常者、児童と青年など発達途上にある者、そして自閉症などの患者に明瞭に当てはまった。

視野闘争における一時的単眼オクルージョンによる両眼視融合の促進

Sheynin et al. (2019)は、視野闘争知覚において一眼のパッチングによって知覚眼球優位性を誘導し左右眼パターンの5通りの知覚がどのように変わるかをしらべた。実験の結果、遮蔽眼側の優先(exclusive)相知覚は出現割合と持続時間とも有意に増大しないこと、また非遮蔽眼側の優先相知覚は出現割合と持続時間とも有意に減少しないことが示された。これは、パッチング後の非遮蔽眼（知覚眼）側への優位性のシフトが遮蔽眼の入力強度が強まるよりは非遮蔽眼の入力強度の減少によって起きていると考えられる。さらに、非遮蔽眼側の混合相知覚、とくに非遮蔽眼からのイメージに偏重した混合相知覚の持続時間はパッチング後に有意に増大し、また混合相知覚の出現割合が全体に増大した。これは、一眼の遮蔽に関わらずに混合相知覚が高められるためと考えられる。パッチング後における知覚交替については、混合相知覚の出現割合と持続時間がともに有意に増大した。優先相知覚でみた利眼側へのシフトも有意に増大したが、混合相知覚が利眼側にシフトする傾向は観察されなかった。これは知覚が利眼側に優勢にシフトすることと混合相知覚の増大とはパッチングにおける別々の影響であることを示唆する。さらに、眼球パッチングの前のベースラインデータとパッチング後の3種類の知覚相（左眼あるいは右眼の知覚相および混合相知覚相）データを設定し、その持続時間データに基づいて主成分分析(principal component analysis; PCA)が実施した結果、パッチングに誘導された3つの成分、混合相知覚の中央値による持続時間、優先相知覚の中央値による持続時間および眼球優位性が抽出された。これらの結果から、パッチングによる視覚経験剥奪効果は、一眼の排他的な優位性によるというよりは両眼間の相互作用と眼球優位性に基づくと考えられる。さらにパ

パッチング後のテスト時間を短縮したときに視野闘争で出現する重複相知覚と部分的混合相のどちらに影響するかを実験した結果、眼球優位性は剥奪眼側へシフトすること、また重複融合相知覚はポストパッチングのテストが間を置かないで実施された条件で生起することが示された。これは部分相知覚より重複融合相知覚が増大することを示した。眼球の知覚優位性、混合相知覚および部分的相知覚についてはポストパッチング後の4通りの時間条件間には有意な差はなく、剥奪後の時間間隔差による視覚剥奪の効果の減衰はないと考えられる。しかし、剥奪直後の眼球優位性へのシフトは有意に生起し、この効果が30分間継続した。これらの結果は、一眼の短時間の視覚経験剥奪が一時的な両眼間の知覚優位性をシフトするが、混合相知覚の反応の割り当てを高めることを明らかにした。このことから、短時間の一眼剥奪が視覚領における興奮と抑制をアンバランスにするが、しかし剥奪側の機能を強めることによって両眼融合を促進する可塑性があることを示唆する。

視野闘争における連続フラッシュによる抑制の個人差

Blake et al. (2019)は、視野闘争における予測できない知覚交替や混合知覚を連続的フラッシュ抑制 (CFS) をもちいることによって回避できると考え視野闘争における CFS 系列の挿入による視野闘争 (BR) の知覚交替頻度と持続時間を個人差のレベルでしらべた。実験の結果、(1)前 CFS 期における知覚反転回数と優先知覚相の持続時間は負の相関 (Pearson 係数は-0.89、Spearman 係数は-0.94) があること、(2)前 CFS 期における優先知覚相の持続時間とその反転回数は約2秒間の持続時間をピークとする山型の頻度分布となるが持続のピーク点には個人差があり、この個人差は試行によって異ならず安定していること、(3)マスク刺激である CFS 効果の個人差を目玉パターンの知覚回数と持続時間6分間を4つにステージに区切ってそれらの相関をみると、いずれも有意な差がみられ、CFS の強度には安定した個人差があること、(4)CFS によるマスク効果の時間経過の個人差をみると、大多数の被験者では CFS 提示の最初の段階では回数と持続時間が少なく、後の段階になるほど、目玉パターンの出現回数と時間が増大し、CFS のマスク効果が弱まること、(5)目玉パターン提示の反対眼に提示したバタフライの知覚は平均12% (全被験者) の出現率で生起し、目玉パターンの検出と相関が高いこと (0.74)、(6)CFS のマスク効果を BR の前・後のステージでみると、優先知覚の持続時間の割合は後ステージの初期に高く以降はゆるやかに低減し、マスクによる剥奪のリバウンド効果が初期みられること、(7) ベイズ推定を用いると、後 CFS 期の知覚交替のインターバルが密なことが前 CFS 期および CFS 期における両眼間抑制とゆるやかに関係すること、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼間の抑制による BR のダイナミクスと CFS のマスク効果には個人差が安定的にみられ、しかもこれらはゆるく関係していると考えられる。

両眼視への一致あるいは不一致刺激の視覚中枢 (V1) ニューロンの時間的処理過程

左右眼から刺激入力された場合、V1 ニューロンは片眼からだけの入力に比較して両眼の

活動を活性化する (interocular facilitation) のか、あるいはその活動を抑制する (interocular suppression) のかについて、Cox et al. (2019) は、この時間的ダイナミクスを明らかにするためにサル (*Macaca radiata*) を被験体とし、V1 の神経生理的反応を測定した。ニューロンの活動は、マルチエレクトロド・アレイを用いて細胞外の電圧変化 (Extracellular voltage fluctuations) として 128 チャンネルのニューラルシグナル処理装置で測定した。また、単一ユニットの活動 (SUA) をスパイクソーティングの教師なしの機械学習アルゴリズムで検出した。実験の結果、(1) 左右眼への一致刺激、あるいは不一致刺激に関わらず誘発された両眼ニューロンの時間的反応は単眼視条件のそれに比較すると強い、(2) 両眼視条件で左右眼に提示したパターンの方向性が同一の場合 (congruent) の両眼ニューロンの反応は、方向性が不一致の場合のそれより強い (binocular facilitation)、(3) この促進反応は一定の時間 (トランジェント、transient) の経過 (~50-100ms) の範囲内で出現し、持続過程 (サステインド、sustained) に入る (~150ms) とこのニューロンのスパイク反応の促進は減じて時に消失する、(4) 方向不一致のパターン条件 (incongruent) の両眼のニューロン反応は単眼視条件より有意に抑制され、パターンの方向一致条件の両眼のニューロン反応と不一致条件の反応は明瞭に区別されること、(5) ニューロン反応のトランジェント期における反応促進はニューロンのオキュラリティ (ocularity、利き目/非利き目) とは関係しないがサステインド期における抑制にはオキュラリティが関係する、(6) パターンの方向性に対するニューロン反応の特性からニューロンのオキュラリティを分類すると、オキュラリティが等しいニューロン (equiocular neurons、パターン方向一致条件でトランジェントとサステインドの両過程で有意に強い促進反応出現)、オキュラー偏向ニューロン (Ocular-biased neurons、パターンの方向性が一致と不一致の両条件で抑制反応がトランジェント過程で出現)、そして刺激に対して無反応でかつオキュラー偏向をもつニューロン (単眼視条件でのニューロンとほぼ同じような反応が両過程で出現) の 3 種類、(7) 両眼からの入力に対応する V1 皮質の 4C 層のニューロン反応はパターンの方向性が一致条件でトランジェント過程で促進、サステインドで抑制、しかしパターンの方向性が不一致の条件ではトランジェント過程の促進は 1.2mm ほど上のニューロン層に限定され、逆に 0.7mm 下層ではトランジェント過程で抑制される、(8) オキュラリティが等しいニューロン (equiocular neurons) の上層と下層はトランジェント過程でのみ促進反応を示すのに対して、パターン方向性が不一致条件の上層と下層のニューロンはトランジェント過程で抑制反応を示すこと、などが明らかにされた。これらの結果から、両眼から入力された刺激は、この両眼の信号をトランジェントとサステインドの時間的過程で処理されてパターン的一致と不一致を検出、統合され、その結果、これらの V1 ニューロンの反応が視野闘争につながると考えられる。

視野闘争における異なる 2 つの過程

Brascamp et al. (2019) は、刺激パターンを変えた事態での視野闘争とバイステーブル

現象の反転持続時間の個人内相関の有無からそれらの神経過程を探った。左・右眼への刺激入力にはハーフミラーを使い2つのディスプレイを別々の眼に提示した。実験1の刺激パターンは、大小2種類の大きさのグレーティングの視野闘争パターンで、それぞれ網膜の投影位置を2通りに設定し、互いに斜め方向に遅い速度(2.0 c/dva)で運動させた。実験2では、互いに直交する複数の線分による視野闘争パターンとドットパターンを刺激とし、それぞれ直交する方向に運動させた。被験者には交互に2つのスライドするブレードパターンを知覚するか、あるいは中間方向に垂直に運動するひとつのブレードを知覚するかを尋ねた。実験1の結果は、4種類の刺激パターンの知覚反転時間の結果の個人差の高い相関は刺激の特性(グレーティングあるいはドット)ではなく刺激の網膜位置(刺激の大・小)によっていて、刺激特性の要因が視野闘争に関わる複数の要因の中では一部の役割しか反映していなかった。実験2では、運動する刺激パターンを含めて4種類の刺激パターンの間の反転持続時間に関する個人差は有意な相関が示され。実験1と2の結果から、視野闘争過程に関して2つの可能性が考えられる。一つは、この過程には3つの要因、すなわち視野闘争に固有な要因、反転図形知覚とは異なる一般的要因、そして視野闘争と運動ブレード・ライバルリーに関わる要因であるが、とくに刺激のパターン特徴に関わる因子の負荷がとくに高いことが示された。これらの結果から、視野闘争は眼球間のコンフリクト処理に関わる刺激特性にチューニングしたメカニズム(feature tuned mechanism)、および視野闘争や図地反転で両眼間で働く刺激パターン処理に関わる一般的メカニズムによって生起すると考えられる。

方向が正反対で速度が異なる両眼への刺激による視野の「中心-周辺」分擬

Ananyev et al. (2019)は、各眼それぞれに運動刺激を別々に提示した事態での視えの空間的特性を刺激位置の網膜偏心度を変えて両眼の優位性と抑制の影響から実験して吟味した結果、刺激の中心あるいは全体が静止して視えることを顕著に示した。とくに、静止知覚が優位なのは競合する速度が低あるいは高速の場合で、中程度の速度では全体あるいは中心-周辺の知覚も生起しなかった。次に刺激サイズが「中心-静止、周辺-運動」の分擬に与える効果を実験した結果、刺激全体と中心領域の「静止優位」の知覚は競合する刺激の大きさが大きいときに生起し、それが小さいときにはまだら模様の知覚が優位となり、「ダイナミック優位」、あるいは「透明優位」はほとんど生起しなかった。「中心-静止」優位知覚には刺激の大きさはリニアに関係せず、一定の大きさを維持する。また、「中心-静止、周辺-運動」の分擬に影響する2つの刺激の時間的順序をしらべた結果、ダイナミック刺激が先行した場合、「中心-静止」優位知覚は遅延刺激の提示によってほとんどの被験者は影響されないこと、他方ダイナミック刺激が600ms遅延して提示された場合には「中心-静止」優位知覚は失われることが示された。しかしこの結果には個人差もあった。さらに、刺激の提示持続時間を30から2000msに変化させ、被験者には提示持続の最終の知覚を4択で報告させた結果、全体の刺激あるいは中心領域の静止の知覚優位は刺激持続時

間が長くなると優位に消失し、「ダイナミック優位」あるいは「まだら優位」の知覚変わることが示された。これらの結果は、刺激の静止あるいは運動速度による視空間内の非等質性によってもたらされた可能性があるので、両眼間の抑制を優位眼にマスク刺激を導入してしらべた結果、(1)速いマスクは効果が小さい、(2)運動するターゲットのコントラスト閾値は小さく、したがって静止したターゲットより検出が容易、(3)周辺位置のターゲットは中心位置のそれよりいくぶん検出しにくい、(4)速い（ダイナミック）ターゲットは速いマスクでは検出が難しい、(5)静止ターゲットは速度の遅いマスクで抑制されやすい、などが示された。これらの結果から、運動速度の速いターゲットは効果的に抑制され、逆に静止ターゲット抑制されないことがわかる。これらの結果から、「中心-静止、周辺-運動」の分擬には、刺激速度、網膜位置の中心度、そしてマスクの速度とタイミングの各要因が相互に関係し、運動処理と両眼間抑制のしくみとも関連していることが明らかにされた。

緑内障患者の視野闘争における優位な波形伝播(dominant wave propagation)

Tarita-Nistor et al. (2019)は、軽度の緑内障患者を対象に半球内の波形伝播の効率をしらべた。もし半球内の波形伝播に障害があるならば刺激の伝達に影響すると予測される。実験の結果、トラベリングウェーブの「半球内と半球間条件の失敗の比率」(Intra/Inter Ratio)を緑内障群と健常者群で求めると、緑内障群でのそれは健常者群より優位に高いことが示された。また、半球内と半球間の失敗率を比較すると、健常者群では優位に半球内失敗率が半球間のそれより高かったが、緑内障群では半球内と半球間の失敗率には差はなかった。さらに健常者群の半球間失敗率は緑内障群のそれよりも優位に大きかったが緑内障群での半球内のそれには差はなく両群とも類似していた。半球内と半球間条件のトラベリングウェーブの伝達時間比率をみる、緑内障群は健常者群より多くの時間がかかること、また半球内より半球間条件の方がより多い時間を要した(Intra/Inter Ratio > 1)。一方、健常者群の場合は逆に半球間より半球内の方がより多くの時間を要した(Intra/Inter Ratio < 1)。刺激の伝達にかかる知覚時間は、健常者群では優位に半球内条件の方が半球間条件で長く、一方緑内障群では逆に半球間条件より半球内条件で長くなった。

これらの結果から、緑内障群は視野闘争事態における左右眼の刺激の半球内の伝達効率に遅れが生起していることを示す。

1.2. 両眼立体視

初期視覚処理過程におけるステレオプシスの混在した明るさコントラストの効果

両眼間の対応にノイズのある視差をもつランダムドット・ステレオグラム(RDS)では、白と黒色の混在する輝度極性をもったステレオグラム(mixed-polarity)の方がどちらか一方の輝度極性のもの(single polarity)よりは奥行判断がすぐれている。Schaeffner & Welchman(2019)は、この種のステレオグラムの視差処理の有利性が視覚領のどこで生じているかを経頭蓋磁気刺激法(TMS)でしらべた。その結果、mixed-polarity ステレオグラムの

奥行弁別閾値は白あるいは黒の single-polarity ステレオグラムの閾値より有意に優れていた。TMS 適用とステレオグラムのドットの輝度条件間には有意差があり、また、脳部位 V1、V3a、L0、Cz のすべてにおいて mixed-polarity 条件が single-polarity 条件より優れていた。とくに、TMS による初期視覚領 (V1) のパルス刺激は RDS の mixed-polarity で奥行弁別精度を増大させた。しかし視覚の高次中枢領域である V3a と L0 への TMS による刺激は奥行弁別精度を変えなかった。これらの結果から、mixed-polarity のステレオグラムによる知覚が優れているのは初期視覚領 (V1) における視差の処理過程にその根拠があると推定される。これは、mixed-polarity のステレオグラムにおける両眼間対応が初期視覚領の両眼視に関わる細胞 (cell) を強く駆動して確かな両眼視差シグナルを導出し、また両眼間のステレオグラムの対応のミスマッチは mixed-polarity のステレオグラムでより多く検出・抑止され、確かな視差を導出できるためと考えられる。

ステレオグラムの奥行判断における注意の選択機能

両眼立体視においては絶対視差より相対視差の方が奥行視において有効である。しかし、相対視差にもとづく視えの奥行は奥行と関係しない刺激の要因によって変わる。このような奥行とは無関係に視差が変わる事態にはステレオグラムのひとつが 1 次元 (グレーティング)、他のひとつが 2 次元 (プレード) の場合がある。Farell & Ng (2019) は、1 次元刺激と 2 次元刺激のステレオペアからの 2 通りの視差量による視えの奥行の違いを比較した。実験の結果、ターゲットがグレーティング (10° と 20°) 刺激の場合、ターゲットと「関連する比較刺激」の間で知覚された奥行比較の PSE は、「関連する比較刺激」のプレードがターゲット刺激に対してパラレル条件の方が直角条件より大きいこと、そして 10° 条件より 20° 条件の方が大きいことが示された、ターゲットが同様にグレーティング (10° と 20°) 刺激の場合、ターゲットと「関連する比較刺激」の間の知覚された奥行比較の PSE は、「無関連の比較刺激」のプレードがターゲット刺激に対してパラレル条件の方が直角条件より大きいこと、そして 10° 条件より 20° 条件の方が大きいことが示された。一方、ターゲットがプレードの場合にはグレーティングの結果と異なり、「関連する比較刺激」条件の視差は対象がグレーティングの場合よりターゲットと「関連する比較刺激」の間の知覚された奥行比較の PSE に大きな影響があることを示した。しかし、ターゲットと比較刺激の視差の方向に関してはターゲットがグレーティングの場合と異なり、それがパラレルあるいは直角方向に関わらず PSE には何らの影響を与えなかった。

これらの結果から、ターゲットの刺激の次元 (一次元あるいは二次元) は奥行の知覚に対して「無関連の比較刺激」がある場合、2 つの明確な効果をもつことが示された。すなわち、「無関連の比較刺激」の視差が奥行判断に影響するかどうかを決めるのは刺激の次元性であり、その PSE に対する「関連する比較刺激」の視差の大きさに影響することを示した。被験者は二次元の「関連する比較刺激」と二次元のターゲット間の奥行判断では無関連の比較刺激」を選択的に無視することができたが、しかしターゲット刺激が 1 次元で 2 次元

の比較刺激の間の奥行判断では「無関連の比較刺激」の視差の方向に影響を受け「関連する比較刺激」をあたかも部分的にしか選択できないことを示したといえる。この研究では1次元と2次元の刺激組合せて、視差に基づくステレオ視が2つのプロセス、すなわちひとつは水平視差から奥行を判断し、注意の働きでそれを選択できるプロセス、そして2つに関連するとしないう関わらず視差の大きさを比較するために効果的な視差方向のすべての刺激から奥行を判断するプロセスがあることを明らかにしている。

ON と OFF チャンネルによらないステレオプシスの精神物理

Read & Cumming(2019)は、ステレオグラムにおけるドットのオーバーラップを避けることは両眼間の対応問題に関することであり、同一あるいは混合極性とは別の問題か否かを検証するシミュレーション実験を実施した。シミュレーション実験の結果、ステレオグラムにおいてドットのオーバーラップがあり、かつドットの明るさが左右で同一極性条件の場合には左右眼の対応が混合極性条件より低いことが示された。視覚システムのステレオ視は基本的には左右眼の対応に依拠するので、ノイズをもつ混合極性のステレオグラムが同程度のノイズをもつ同一極性のステレオグラムよりステレオ視が良くなるのは当然と言える。視差エネルギーモデルがニューロンレベルで視差検出のモデルを考えると、このモデルでも視差検出を基本的には両眼間の対応に依拠するので、これらに関わるニューロンがノイズをもつ同一極性のステレオグラムより同程度のノイズをもつ混合極性のステレオグラムにおいて強い視差検出チューニングを示すと考えられ、実際にシミュレートした V1 における視差検出モデルに一致する結果が得られている。

結局、このシミュレーション実験からはステレオグラムにおいては独立した ON と OFF チャンネルを支持する証拠は得られなかったと言える。

物理的運動刺激による両眼立体視力の測定

Cutone et al. (2019)は、物理的ターゲットを用いてステレオ視力を視差、大きさ、輻輳そして調節の奥行手がかりをコントロールし、運動刺激によるステレオ視力測定した。ターゲット線分（スリット）は背後からの照明によって注視点の上部に提示され7段階の奥行距離（視差）に提示され、奥行弁別は注視点の下部に奥行距離を固定して提示されたレファレンス線分との間で測定された。実験では、ターゲットを横方向に運動させた場合の速度変化に対するターゲットのステレオ視力の測定、奥行手がかり（運動視差、眼球調節、相対的大きさ）を除去するための単眼視でのステレオ視力測定、刺激提示の持続時間のステレオ視力への影響、ターゲットの運動によるボケの大きさの主観的測定、フリッカ一照明のステレオ視力への影響がそれぞれ測定された。

実験の結果、(1) ステレオ視力の閾値 (25 arcsec 前後) はターゲット運動速度(0, 2, 4, 8, 16 deg·s⁻¹)が変化しても有意にリニアで安定していた。(2) 単眼視観察条件にして運動視差、眼球調節や対象の相対的サイズの奥行手がかり縮減すると、ターゲットの遠・近の

知覚確率が 50%前後に落ち、先のステレオ視力の閾値が単眼的奥行手がかりによるものではないことを示した。(3) ターゲットとレファレンスともに静止条件に設定して刺激提示の持続時間(10, 20, 40, 80, 120, and 190 ms)を変えたばあい、ステレオ視力の閾値と持続時間との間にはほぼリニアの関係が有意に示された。(4) ターゲット刺激を動かすことによって生起する刺激のボケの大きさを視差 0 でターゲットの奥行距離を 50cm、その運動速度を 5 段階 (0, 2, 4, 8, and 16 deg·s⁻¹) に設定したときに生じるターゲットの不鮮明の幅をデジスプレー上にルーラーを提示して測定したところ、その主観的大きさは運動速度が増大するとリニアに有意に大きくなることが示された。(5) 背後からの照明を 240Hz でフリッカーさせたときのステレオ視力の閾値は、対象の運動速度(0, 2, 4, 8, and 16 deg·s⁻¹)を変えても一定で有意に同一を示した。

両眼視差(disparity)の上限閾値の離心率に伴う増大

McKee & Verghes (2019) は、離心率を少しずつ大きくした場合の立体視力の上限を測定した。その結果、離心率の増大に伴う奥行距離の増大はすべての経線位置で比較的小さく奥行範囲の上限に関与しないことが示された。テスト刺激がフラットに見える視差は融合し奥行をもつが 2 重に見えるそれよりは大きく、また離心率の変化に対して同じような傾向を示した。この結果から、離心率が 10° でも融合する視差の上限はおよそ 3° であり、これは視差が有効な奥行の情報を与える値のおおよそ半分である。したがって、網膜の中心窩と周辺での立体閾はそれほど変わらないことから周辺視ステレオプシスの利用が示唆される。

垂直視差に誘導された神経反応の増進

垂直視差によるスラントの立体知覚は確実であることが実証されているが、神経生理レベルのしくみは明らかにされていない。Mitsudo et al. (2019) は、立体視のしくみが初期に垂直視差のひとつである両眼間の垂直方向の刺激大きさの差、すなわち垂直大きさ比 (VSR, vertical size ratio) を検出し、エピソード幾何にそって水平視差による立体視量を規定していると仮定し、垂直視差に対する神経生理反応が活性化された脳領域を特定できる ERP を利用してしらべた。その結果、HSR 条件のスラント知覚判断の正誤の平均は 78%、VSR のそれは 60% で、両条件間には有意な相関がみられた。また、25 人の被験者は、HSR 条件のスラント知覚判断の正誤に基づいて正反応が 75% 以上をステレオ視が良好群 (13 名) にそれ以下を貧弱群 (12 名) にわけた。ERP の結果について被験者別に特定位相 (V1、V2、V3 領域) の神経発火の強度が HSR と VSR 条件で求められ、神経発火の強度はステレオ視が良好群の場合、刺激後 230–600ms でみると VSR 条件の方が HSR 条件より有意に高いこく、特定位相に対応して神経発火がみられた。さらに、ERP の時間経過による神経活動を分析すると、立体視良好群の V1 d の平均神経活動の推移は非良好群のそれより初期過程で示された昂進された反応に位相固定されることも示された。この ERP の結果から、垂直大き

さ視差が立体視を良好にする役割を果たすこと示している。

網膜上のシグナルの不完全な変換による奥行運動の知覚誤差

Murdison et al. (2019)は、中心視あるいは周辺視のみの網膜視差による3次元運動軌跡の知覚がどのように再構成させるかを、網膜シグナルを手がかりに対象の運動軌跡を再生させ、眼球のversionとvergenceが奥行方向の運動知覚をどのように変えるかがしらべられた。その結果、運動軌跡の知覚には体系的なエラーが起きていることが示された。これは両眼の網膜上の運動(versionとvergenceをカウントしない)と正しい空間的運動の間を媒介する参照フレームを反映したもので、この知覚のエラーは運動知覚を符号化するターゲット、眼球そして頭部からなる3Dレファレンスモデルに照合し、versionの手がかりでは最大17%過小視、vergenceでは22%過大視、網膜視差では64%過小視それぞれされると計算できた。しかし、日常生活ではこのような大きな運動軌跡の知覚エラーが生じないのは、単眼網膜視差の手がかりと両眼の網膜外の手がかりが働いて正確な対象の運動軌跡を知覚できるためと考えられる。

1.3 両眼視における視覚処理と視覚領

両眼マッチングにおけるコンテキストの影響と第1次視覚領

Rideaux & Welchman (2019)は視覚中枢のステレオグラムの立体視の反応をfMRIでしらべた。もしV1の神経活動がエッジのグローバルコンテキストによって影響されなければ、パターンの中央領域の反応に対するV1の下位領域におけるfMRIの活動パターンは視えの奥行を予知しないと考えられるが、もしこの領域におけるfMRIの活動から視えの奥行を予知できればV1でコンテキストによる影響が起きていることになる。そこで、両眼視のマッチングでグローバルコンテキストが影響するか否かがfMRI活動でしらべられた。

実験の結果、多義的ステレオグラム提示の凹凸知覚を背景の明るさ(明暗2条件)とパターンのフェーズシフト(0°と180°2条件)の4条件で分析すると、パターンのフェーズシフトがない場合には背景がダーク条件では近くにライト条件で遠くに、パターンのフェーズシフトが180°の場合には背景がダーク条件では遠くにライト条件では近くにそれぞれ知覚され、ステレオグラムの背景の明暗で両眼立体視の遠近知覚が明瞭に異なって出現した。V1でのアクティビティレベルで両眼立体視マッチングにグローバルコンテキストが影響を与えているかをfMRIでしらべると、多義的なステレオグラムの背景の輝度が関わる遠近知覚は多義的な刺激情報のみを受容するV1領域の活動で得られ、グローバルコンテキストによって局所的なV1領域が影響を受けていることが確かめられた。視差に規定された典型的なステレオグラムの知覚にはV1の下位中枢(V1, V2, V3v, V4, V3d, V3A, V3B/KO, V7, L)の活動、とくにV3が関与していることは確認された。さらに、ステレオグラムの刺激の多義性にも関わらず多次元ボクセルパターン解析(multi-voxel pattern analysis)

を通してボクセルの活動から眼球からのシグナルでは予測できない奥行（遠近）知覚を解読、多義的なパターンに対応する V1 のボクセルを特定、多義的なステレオグラム知覚ではグローバルコンテキストの働きを神経生理学的レベルでそれぞれ明らかにした。

これらの結果から、ステレオマッチングのモデルを構築する際には、ローカルな過程とグローバルな過程の両方を可能な限り V1 領域の早い段階で組み込むことが必要ことが示唆される。

単眼と両眼の視覚処理における視運動の予測的コーディング(predictive coding)

van Heusden et al. (2019) は、flash-grab 効果におけるターゲットとその背景の運動パターンを各眼に別々に提示することによって、この効果が中枢のものか、あるいはその途中のプロセスで起きるのかを明らかにしようと試みた。20 人の被験者に実験した結果、ターゲットの物理的位置と報告された位置の差をエラーとして算出したところ、(1)5 通りすべての実験条件で位置エラーが有意に起きること、(2)両眼視条件と単眼視条件では位置エラーについて有意差が無いこと、(3)逆にインターオキュラー条件では位置エラーが有意に小さいこと、(4) インターオキュラー条件と後逆転提示条件の位置エラーは有意に異なること、(5)しかし前逆転提示条件は後逆転提示条件に比較して優位に位置エラーが小さいこと、などが示された。

これらの結果は、flash-grab の効果がすべての刺激要素を単眼側あるいは両眼側のみ提示したときに最大になり、環状パターンの運動とターゲットのフラッシュを別々に提示する条件（インターオキュラー条件、前逆転条件、後逆転提示条件）ではその効果は小さくなることを明らかにした。とくにその効果がもっとも小さくなるのは前逆転条件で、一眼への環状パターンの回転の直後にフラッシュされ、他眼への回転提示の直前の条件であった。このことから、flash-grab の効果の予測的外挿は単眼過程と両眼過程の両方で生起していると考えられる。

顔知覚における 2 種類の低次の両眼間処理過程

May & Zhaoping (2019) は、両眼に提示するイメージに happy と sad 顔を合成し、片眼には (Happy+Sad) のイメージを他眼には (Happy-Sad) のイメージをテスト刺激とした。このようにすると、summation channel では Sad 要素がキャンセルされて Happy 要素が残り、differencing channel では Happy 要素がキャンセルされ Sad 要素が残る。テストの前に順応過程（脱感作）を挿入すると、summation channel 条件では Sad 顔が知覚されやすく、differencing channel では Happy 顔が知覚されやすいと予測される。実験の結果、summation channel を脱感作する Correlated な順応条件の場合には differencing channel のイメージが選択され、Anticorrelated な順応条件では summation channel のイメージが有意に被験者によって選択された。

これらの結果から、顔知覚の低次の処理過程が高次の処理過程に引き継がれ、高次の偶

然な偏向を縮小するように働くことを示唆する。

1.4 両眼輻輳と眼球調節

眼球調節作用とホローフェース (hollow face) の奥行知覚

Koessler & Hill (2019)は、実験 1 で被験者がホローフェースを凸型と間違えて知覚した場合および正しく凹型と知覚した場合の眼球調節を測定した。実験 1 の結果、凹型のマスクが正立条件で提示された時にのみ凸型の錯視が生起し、調節と輻輳はマスク中央面より前面に当てられた。この錯視時の調節は、物理的に凸型のマスク時の調節と同等であった。凸型マスクが倒立で提示されそれが凹型に知覚された場合にのみ、調節と輻輳はマスク中央面より後方に当てられた。この錯視は単眼視と同じように両眼観察でも生起し、輻輳による両眼視差によらなくても生起することを示唆した。

実験 2 では、マスクのコントラスト条件が錯視にどのように関係するかが吟味された。その結果、物理的凸型のフェイスマスクに投影したドットコントラストの変化による凸から凹への突然の知覚変化は生起しなかったが、しかし、物理的凹型のフェイスマスクの場合のドットコントラストによるこの種の凹から凸への知覚変化は、単眼視条件でかつ高いコントラスト条件の場合に有意に出現し、調節もそれに対応して変化した。

実験 3 ではブラー(blur)による調節変化が奥行の知覚を明瞭にするかが吟味された。その結果、シャープなドット条件はブラーな条件よりホロー錯視を見抜くのに効果的であること、そして眼球調節作用はホロー錯視を妨げることが示された。

これらの結果から、眼球調節は他の奥行知覚の手がかりが利いている事態でも手がかりとして作用し、また奥行関係を明瞭にするのに資するといえる。

両眼視と注視の眼球運動

Raveendran & Bobier(2019)は、両眼視条件と単眼視条件での BCFA の差および視野闘争事態での注視点の変動の範囲 (BCFA, bivariate contour ellipse area) を健常者および方向に異方性をもつ患者で測定した。

実験の結果、ゼロ比を除くすべての明るさコントラスト比の注視パターンにおいて両眼視条件の BCFA は単眼視条件のそれより有意に小さいことが示された。また、マイクロサッケードには両眼視と単眼視条件間に差はなかった。

そこで、両眼視闘争事態における BCFA を測定した。その結果、BCFA に関して両眼視野闘争、単眼視、両眼視の観察条件間には有意な差は生じなかった。FS に関しては両眼視野闘争条件において抑止された方の眼と優位な方の眼の間には差は生じなかったが、単眼視条件で灰色刺激のみを提示された方の眼は安定した注視ではなかった。さらに、屈折異常の弱視者 5 名を対象に同様な測定を試みた結果、FS に関して弱視者は健常者に比較して不安定なこと、弱視眼は健常眼のコントロールを受けていることが示された。

輻輳作用に対する空間フィルタリングの影響

Diez et al. (2019)は、ターゲットイメージにおける空間周波数スペクトラの輻輳への影響をしらべ、もっとも効果的に輻輳誘発の空間周波数値を探った。

実験の結果、レンズの度数を段階的に変えた条件（フェーズ1）では、レンズの度数を変えても輻輳の変化は起きず、したがってレンズの焦点によるボケが生じていないこと示した。Sinclair フィルターの λ を増大した条件（フェーズ2）では、平均 $\text{Sinc } \lambda 5.57 \pm 4.67 \text{cpd}$ のターゲットイメージで輻輳が誘発した。被験者を正常視と近視に分けた場合、輻輳を起こすためには近視者は λ を大きくする（高い空間周波数）必要があった（近視者 $\text{mean } \lambda = 9.33 \pm 4.99 \text{cpd}$; 正常視者 $\text{mean } \lambda = 2.75 \pm 0.97 \text{cpd}$ ）。

これらの結果から、輻輳は空間周波数が中間値（2-5 cpd）のときにもっとも効果的に刺激されて起きること、そして近視の場合にはこれより高い空間周波数が必要になることも明らかにされた。

1.5 両眼過程と単眼過程

両眼視のグローバル運動におけるシグナルとノイズの分離

Cai, Yuan, & Backus (2019)は、ノイズドットはシグナルドットのコントラストが高くしかも運動速度が速い条件では、それらが同一眼に提示されたときにノイズのマスク効果が大きくなると考え実験した。その結果は、シグナルとノイズが別々の眼に提示され、コントラストが高く、運動が速い条件で、グローバルなドット運動を正しく知覚できることを明らかにした。この結果は、MT 野における刺激の両眼間インバランス事態の統合のモデルで説明できるとする。すなわち、V1 では単眼それぞれのローカルな運動シグナルを検出、次に MT 野における受容野で3種類のリージョナルな運動検出器 (Cell 1、Cell 2、Cell 3) を働かせる。Cell 1 ではおもに左眼からの運動シグナルを検出し右眼からのノイズを防止、Cell 2 では両眼からのシグナルを均等に検出、Cell 3 ではおもに右眼からの運動シグナルを検出し左眼からのノイズを防止する。このモデルによると、見え運動は上方向のリージョナル運動の情報を集めて MST 野のグローバル運動検出器で方向が検出され、これに基づいて上方向の反応を出現する。一方、下方向の運動はリージョナル運動検出器でインバランスとなり、下方向の反応は出現しない。さらに、少数のシグナルあるいはノイズドットが両眼作用で大きな効果をもつことを示し、segregation 条件では少数のドットからの眼の入力が多数のドットからの入力減じる単眼のゲインコントロールの働きを示唆する。

これらの結果から V1 における単眼視と両眼視の機能特性がまとめられ、コントラストと速度が大きいローカルな運動は、両眼からの刺激の結合が起きる前に MT 野に伝達され、一方コントラストと速度が小さいローカルな運動は両眼の刺激結合の後に優先的に単一ユニットレコーディングに矛盾しないように伝達されると考えられる。

両眼差異チャンネルに媒介された両眼間差異閾値

左右眼に異なる色調(hue)やコントラストをもつ刺激パターンを提示し両眼視させると、パターンを完全に識別した上で光彩(luster)の印象が出現する。Kingdom et al. (2019)は、このような事態での両眼間の差異チャンネル(interocular difference channel)と両眼間の統合チャンネル(binocular summing channel)を分析した。

実験の結果、弁別閾値 ΔC_{diff} は有意に $\phi 0^\circ$ で小さく $\phi 180^\circ$ 条件で大きいことが示され、両条件の ΔC_{diff} の幾何学的平均の比は4.37であった。これは ΔC_{diff} に示された閾値は非対称であり、提示される両眼間の2つの刺激が両眼間で不一致条件($\phi=180^\circ$)より一致条件($\phi=0^\circ$)の方が弁別しやすいことを示した。さらに、下部あるいは上部に C_{diff} がある両条件の全範囲で ΔC_{diff} が測定され、その結果、 C_{diff} が下部にある条件(lower range, $C_{diff} - \Delta C_{diff}$)と上部にある条件($C_{diff} + \Delta C_{diff}$ の刺激弁別条件)で、前者の ΔC_{diff} をX軸に、後者をY軸にとって比較すると、ほぼ単調に増大した。もし、両眼間差異チャンネル(B-)がlower rangeで、両眼間統合チャンネル(B+)がupper rangeでそれぞれ働くならば、 C_{diff} の midpoint で ϕ に伴う弁別閾値の曲線は対称になるはずだが、結果はそれを否定し、B-チャンネルの方が閾値の変化を良く説明すると考えられた。

これらの結果から、両眼間の刺激の差異を検出するしくみには、両眼間の差異の少ない情報を圧縮して強力な情報に変換する両眼間差異チャンネル(B-)のしくみの存在を示唆する。

1.6 視覚障害

時間周波数の弱視における両眼間のバランスの障害

Kosovicheva et al. (2019)は、弱視におけるステレオプシスおよび両眼間バランスを空間周波数と時間周波数のセット刺激で測定を試みた。この研究では、これら2つの測度は単眼コントラスト感度に類似しているのか、またステレオプシスおよび両眼間バランスの時間周波数に関わる測度の変動は視覚処理過程の速度の損傷によるのかが問題とされた。そのために広範囲の空間周波数と時間周波数刺激を提示してステレオプシスの閾値および両眼間バランス点を弱視者と正常視者で測定した。その結果、弱視者のステレオプシスの閾値には健常者に比較して空間周波数の大きな影響が示されたが、時間周波数による差は生じなかった。そこで、ステレオプシス閾値、両眼間のバランス点、コントラスト感度に関わるAULCSF(area under log contrast sensitivity function)の3の測度間の相関をみると、両眼間のバランスの不均衡はステレオプシスの閾値の上昇と有意に相関し、またAULCSFの差のスコアの低さは両眼間のバランスの不均衡と有意に相関した。AULCSFの差のスコアとステレオプシスの閾値とは有意な相関は示されなかった。

これらの結果から、弱視者の視覚機能における刺激の時間的変調の影響をステレオプシス閾値と両眼間バランス点を時間周波数と空間周波数を広範囲に操作して測定した結果、両眼間のバランスには時間周波数が関与すること、また両眼間のバランスとステレオプシスのフリッカーによる効果には関係がないことが示唆されている。

斜視弱視者の両眼間抑制に関する定常視覚誘発反応の測定

Zheng et al. (2019)は、斜視・弱視者を対象とし両眼間抑制を測る客観的で定量的手法として運動刺激の定常状態視覚誘発電位 (SSMVEPs, steady state motion visual evoked potentials) の効用を実験した。時間的周波数の違う刺激パターンを左・右眼に提示して SSMVEPs を測定した結果、斜視者の優位眼と劣位眼の間には SSMVEPs と SNR (信号ノイズ比) に関して有意差があるのに対して、健常者にはこの種の差がなかった。また、ダイバージェンス J (2 つの変数間の差異の程度)、抑制のアンバランス、そして視力を指標にして斜視者と健常者の両眼間の関係をしらべると、3 指標ともに強い正の相関がみられた。各眼に異なる刺激の提示を一方の他方に対するマスクと考え、その減衰効果をみると弱視斜視者間では一致して減衰効果と視力とが有意に相関していた。

これらの結果から、SSMVEPs の測定は客観的で定量的であり、斜視者の両眼間抑制を正確に測り、斜視弱視の障害を査定できると考えられる。

ステレオ視異常者にみられる眼球優位の異常

ステレオ視異常者 (Stereosanomalous (SA)) は、視力は健常なのに両眼立体視能力は低い。これは両眼間における優位眼に関するバランスが悪く、両眼間の抑制のアンバランスから生起していると考えられる。Cooper & Mendola (2019) は、15 人のステレオ異常者 (SA) と 10 人の健常者 (SN) の視野闘争 (BR, Binocular Rivalry) と両眼間のマスキング (DM, Dichoptic Masking) を比較検討した。

実験の結果、まず健常者の randot test のスコアは 8.5/9 で立体視力は 33 arcmin、ステレオ異常者のそれは 2.5/9 で立体視力は 3380 arcmin であり、優位眼の差 (SED) は異常者で 0.19、健常者で 0.48 であった。視野闘争 (BR) の持続時間の差は異常者の両眼間で有意に健常者のそれより大きく、弱い立体視力と相関していた。さらに、DM 実験の両眼間の差は異常者で大きく、これは単眼の感受性の差と比例していた。DM の閾値は健常者と異常者ともに高く、水平方向より垂直方で感受性が高かった。異常者は BR と DM ともに優位眼への異常なバイアスが示された。

これらの結果から、単眼の感受性と両眼間の抑制は弱視者の両眼立体視における不均衡の原因になっていると考えられる。

1.7 その他の研究

奥行手がかりのハプティック要因のフィードバックによる手がかりの再重み付け (cue reweighting)

奥行手がかりによる 3 次元形状の知覚には異なる手がかりのフィードバックを受けて再学習されて奥行手がかり事態が再重み付けされる機能がある。Cesanek & Domini (2019) は、ハプティックの手がかりに対応した奥行手がかりの学習がどのように手がかりの再重み付

けをするかを実験した。手がかりの再重み付けは対象の奥行を手が掴む動作 (grip aperture) で測定した。これはシミュレートしたステレオとテクスチャ手がかりによる奥行に対する運動情報の測度でそれぞれの手がかりの影響を知ることができる

実験 1 の結果、マッチング課題における親指と人差し指の幅で示された対象の深さ (奥行) は、ステレオとテクスチャの「手がかり・一致」条件ではリニアに増大し、逆に「手がかり・コンフリクト」条件では減少した。

次に、手がかりの再重み付けがハプティックフィードバックと一致しないときに起きるのかが検証された。感覚運動順応は、奥行のバイアスによるエラーを除くのに効果的で物理的奥行の知覚を過大視または過小視させる。実験の結果、順応フェーズの間は奥行を指で掴んだ大きさの最大 (MGA, maximum grip apertures) は、「Adapt+」群で有意に増大し、「Adapt-」群では有意に減少した。ただ、順応フェーズでは指数関数的学習は生起せず、前半 1/3 程度の試行でハプティックフィードバックによる変容があらわれた。事前テストから事後テストの手がかりの再重み付けは、テストフェーズにおける不一致な刺激セットを反復体験する蓄積によっていた。順応過程に導入された一定のバイアスが MGA を増したり、減じたりしていたと考えられ、再重み付けとは無関係だったと考えられる。

これらの結果から、手がかりの再重み付けはハプティックフィードバックと個々の手がかり間の変容することから生じていることが明らかにされた。

2. 運動による 3 次元視

2.1 オプティクフロー

オプティクフローを伴うシーン知覚

Wu et al. (2019) は、観察者が静止したシーンに動的にアクセスし、その動的イメージが低空間周波数で提示された場合にシーンをオプティクフローの手がかりのみで特定できるかをしらべた。実験の結果、blur イメージが並進フローと結ぶ付けられるとシーンが正確に知覚されること、しかも並進フロー単独でもあるいは回転フローと組み合わせられても効果があることが示された。さらに並進フロー条件はある程度の時間が経っていてもシーンの構造を呼び起こすことも示された。並進フローが効果があるのは、運動視差とオクルージョンの手がかりによってシーンの 3 次元構造を知覚できるからである。また、並進フローが回転フローと組み合わせられてもシーンの知覚に効果があるのは、シーンが回転してもそのなかの位置関係が保たれているために運動視差とオクルージョンの手がかりを妨げないためと考えられた。

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

乳児における放射状オプティクフロー (ROF) の両眼輻輳と開散

これまでの乳児を対象にした研究では、乳児の偏好反応を指標としてきたが、Nawrot & Nawrot (2019)は、拡大あるいは縮小するオプティクフローに対する眼球反応を直接的に測定した。拡大あるいは収縮する刺激に対する眼球運動の測定の結果、2ヶ月齢群、4ヶ月齢群、そして5ヶ月齢群とも、収縮する放射状のオプティクフローに対しては輻輳が、拡大するそれに対しては開散の眼球運動が示され、輻輳と開散の間には有意な差があった。

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

2.2 運動による奥行視(motion in depth)

運動による奥行視における両眼手がかりと単眼手がかりの効果

Thompson et al. (2019)は、両眼視差、単眼視でのオプティクフローおよびその2つの手がかりの組合せを実験条件として設定し、さらに対象の運動に関わる要素の一貫性を操作して観察者への接近・後退の感度がどのように変わるかをしらべた。実験の結果、運動の接近・後退の弁別精度は刺激の運動一致度の関数として変化した。そこで、運動刺激に対する感度($1/\sigma$)を計算して3通りの実験条件が比較された。第1に両眼手がかり条件の運動による奥行視(接近・後退)ではその手がかりの感度(平均0.66)は提示した運動刺激の視野の位置によって大きく異なり、これは刺激の離心率と速度に対応することから、神経処理過程に根拠があると示唆された。第2に単眼手がかりも刺激を提示する視野の位置によって手がかり感度が変化し、それに関わるのは刺激と刺激する一眼とが反対側の視野の位置づけにありもっとも大きなモーションシグナルになるために運動方向弁別が同側の視野の位置づけ(平均感度:1.03)より高く(平均感度:1.46)なったことである。第3に単眼手がかり感度は両眼手がかり感度より優れていて、しかも独立していることである。第4に両眼手がかりと単眼手がかりをミックスさせた条件での感度は1.40となり、それぞれが単独の手がかり条件より運動による奥行視の手がかりとしては効果をもつ。第5に単眼手がかりにおける反対視野のオプティクフローは単眼と両眼のミックスした条件で運動方向を弁別するための強力な手がかりと考えられる。

3 次元運動知覚の処理過程における眼球に特定された運動シグナルの役割

Joo et al. (2019)は、多数のガボール要素の小片からなる刺激を提示し3Dの運動残効(MAEs)を測ることによって眼球に特定(eye-specific)の速度シグナルがどのように眼球間で統合され、3Dの方向の知覚が成立するかを明らかにしようと試みた。とくに、3D運動の処理過程が前額に平行な2D運動に依存するメカニズムによるのか、あるいは3D運動の計算のための眼球に特定された処理過程でローカルな2D運動シグナルの統合メカニズムによるのかが検証された。そのために、第1に、V1に比較して比較的大きな受容野に選択的なMT領野における3D運動の強力な処理過程(Sanada & DeAngelis, 2014; Rokers, Cormack, & Huk, 2009)に基づいて3D運動の処理過程は、空間的にグローバル、すなわち順応刺激と

とテスト刺激間の正確な空間的一致に関係なく方向に関して選択的な順応効果があると考えられる。そこで、順応-テストパラダイムの実験手続きに依拠して方向性をもつガボールパッチの薄片を用いてテストパターンの位置づけが順応パターンのそれと不一致のときに強い運動残効が生起するかを試した。さらに、運動の処理過程の次の段階で、眼球に特定された速度シグナル(eye-specific velocity signal)が3D方向に選択的に結合しているかを、グローバルなパターン運動となるランダムな方向性のありその速度が同一に限定されたガボールパッチから構成された疑似プレード(pseudoplaid)刺激を用いて同様に運動残効を試みた。したがってこの実験では、眼に特定された運動のシグナルが静的ステレオ視の後の処理段階でグローバルに処理されるか否かを運動-残効パラダイムで確かめることが目的となる

実験の結果、順応とテスト刺激が共に2Dの前額平行運動の場合の順応効果は、ガボールエレメントが順応とテスト刺激が共に同一の配置条件で強い順応効果(MAEs)があり、逆に順応とテスト刺激の配置が異なる条件では順応効果は非常に弱いことが示された。この結果は、2Dの運動の順応がローカルな刺激によって本来的に出現することを示した。次に、各眼に位置は同じで運動方向が相反するガボールパッチの提示による3Dの奥行運動における順応効果をみると、テスト刺激のガボールパッチ位置が順応刺激と同位置条件で強い順応効果が示された。これは3Dの方向に選択的な順応が存在することを示した。とくに、テスト刺激のガボールパッチ位置が順応刺激と異なる場合にも、両刺激が一致する条件よりも効果が小さいものの明瞭な順応が示され、3Dの方向に選択的な順応の存在を裏付けた。

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

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

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

Pastukhov et al. (2019)は、球形の運動奥行視パターン(キネティックデプス、kinetic depth)を垂直に対して45°直交するように回転軸を取り時計方向あるいは反時計方向に回転し、その時の知覚反転回数と持続時間を測定した。このように、2つの回転軸の異なるパター

ンの配置と配列を類似したものとすると、対応する視覚野のニューロンと受容野が近似すると考えられる。

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

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

2.3 運動知覚に対するエイジング影響 (レビュー)

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

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

2.4 その他の研究

3次元物体の運動による錯覚的輪郭の生成

Erlikhman et al. (2019)は、輝度輪郭をもつ3次元構造が復元された後で錯覚的輪郭の生起の強さにどのような特徴が影響するかをしらべた。とくに錯覚的輪郭の生起に係する2次元の特徴、たとえば眼に視えないエッジ間の距離比、あるいは平面図形の3次元視に関わるL構造やT構造などである。もし運動による錯覚的輪郭効果(MIC)が3次元構造

の復元に支配されているなら回転角度を大にして3次元構造を妨げるならば山型刺激の頂点間距離はMIC効果に関係しないと予想される。その結果、傾斜角度60°条件を除いて、すべての傾斜角度条件で山型刺激の3次元の頂点距離が大になるとMIC効果は減じた。これは傾斜角度が極端に大になると3次元構造を復元できなくなり、次に出現するMIC効果に影響する分離距離要因は関係しないと考えられる。

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

奥行に運動する対象速度と先行する低速度での接近対象の軌道の誤判断

視覚システムにとっては自己に衝突するコースの対象をいち早く知覚することは重要である。運動する対象の角度は過大に知覚されるが、これは対象が通過する横方向の距離を過大に知覚するためである（(Harris & Drga, 2005; Lages, 2006; Poljac et al. 2006; Welchman et al. 2004; Regan et al. 1986)。このような知覚バイアスはSlow Motion Prior 仮説で説明された(Welchman et al. 2008, Stocker & Simoncelli 2006)。図1に示したように、Slow Motion Prior 仮説による接近対象の角度の過小評価は次のように説明される。いま、事前確率は $V_x=V_z=0$ を中心として放射状に拡散（灰色）し、同一の角度（ β ）をもつ2つの異なる運動のうち遅い速度（赤色）と速い速度（青色）に関してウェーバー法則を仮定すると速い運動は遅い運動よりノイズが大きくなる（これはそれぞれの尤度のガウス分布のSDで表示）。さらに、 V_z は V_x より信頼性が弱い（グラフの余白に示したそれぞれのベクターの尤度分布の広がり度で太線で表示）。したがって事前確率（灰色表示の放射状勾配でその中心は $V_x=V_z=0$ ）の効果は、それぞれの速度に異なる影響を及ぼすことになる。この効果は事後確率の分布をシフトさせる（グラフの余白に示したそれぞれのベクターの点線でこの分布を表示）。事前確率が遅いあるいは速い運動に異なる影響を与えるならば、知覚軌道は物理的軌道（ θ ）を保ちながら物理的速度によって決まるので、遅い速度での知覚軌道は赤色で表示したようになり、速い速度のそれは青色で表示したものになる。このとき、尤度と事後確率の重心を結んだ点線で表示された領域はそれぞれの運動における速度のバイアスを表す（ ϕ は各眼の方位の交替を示す）。この仮説によると、奥行方向の運動速度が速いと運動角度の評価が過大となる。この仮説によれば、奥行方向からの対象の速度が速い場合、その速度の知覚はウェーバーの法則に従うので評価バイアスが大きくなると予測される。

Aguado and López-Moliner(2019)は、Slow Motion Prior 仮説による接近対象の角度の過小評価を検証するためにスクリーン上の奥行の遠点（5mに提示してスタート）から12通りの角度で運動するテスト対象（半径3.3cmの市松模様の球）を被験者に提示し、被験者にはその角度を角度評価装置を用いて評価、また速度評価についてはテスト対象の速度を

操作して速度が固定されたレファレンス対象（半径 3.3cm の球、被験者から 4m に提示してスタート）と比較させどちらが速いかを速度評価装置で評価させた。

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

これらの結果から、ウェーバーの法則に従う奥行方向の速度弁別についてのベイズのモデルは、運動速度と運動方向の評価間の一貫性の指標である 2 つの知覚バイアスをシミュレートできることを示している。

3. 絵画的要因による 3 次元視

3.1 形の知覚におけるトポロジー

トポロジー知覚におけるホール形状の優越性効果 (hole superiority effect, HSE)

Zhang, et al. (2019) は、トポロジー知覚におけるホール優越性効果が両眼視差による 3 次元構造をもつホール形状でも観察されるか否かをしらべた。実験の結果、両眼視差要因のみで規定されたトポロジーのディスク型図形、0 型図形と非トポロジー型 S 型図形間の弁別は 0 型図形は大小 2 つのディスク型図形より有意に正確に弁別され、図-地体制は HSE に効果的であると示唆された。また、ディスク型と大小 2 つのディスク型図形間には有意さがなかった。これらの結果は、図-地体制要因より 3 次元構造が HSE に効果的であることを示した。さらに、0 型図形、ディスク型図形、それらの図-地を反転させた 4 種類のステレオグラム (0 型 figure、ディスク型 figure、0 型 hole、ディスク型 hole、) をランダム・ドットで作成し、同様に弁別の正確度を測定した。実験の結果、0 型 figure の弁別正確度 (92.5%) はディスク型 figure (88.8%) より有意に高いこと、また 0 型 hole (72.1%) とディスク型 hole (74.7%) の間には有意な差がないことが示された。これらの結果は、リアルな 3 次元構造をもつホールが HSE にたいしても強い効果をもつことを示した。

これらの結果から、両眼視差は HSE 効果を生むトポロジカルな知覚体制の要因と考えられる。

トポロジー特徴に基づくハトの形状知覚

Watanabe et al. (2019) は、刺激対象数が多いカテゴリ群と疑似カテゴリ (40 個) を用意し、その学習過程をしらべた。実験では 6 個体の家バトが 2 つのグループに分けられ 2 つ

のカテゴリ群（ホール特徴のある群と無しの群）のいずれかの弁別学習を試行した。実験の結果、学習過程を10ブロック（1ブロック40セッション）に分けるとときカテゴリ群のなかのトポロジー群は最初の3ブロック試行で急速な弁別学習の進展をみせ、9ブロックで76.9%の正解率を示したが、疑似カテゴリ群は45から55%の正解率に留まった。この結果から、トポロジー群の刺激のなかで正解率が高いものと低いものの形状特徴の違いを4通りの分析要素、すなわち「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」、「形状のフーリエ変換の空間周波数特徴」、「DOG フィルターによる on-off 特徴」で分析し、これら4つの形状要素から統計モデルの良さを評価するための指標である赤池情報量規準（Akaike's Information Criterion、AIC）を算出し、試行順序にそって分析したところ、1-2ブロックでは「形状輪郭の面積」と「エッジの長さ」を含むものが最適なモデルとなり、3-4から9-10ブロックでは「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」、「DOG フィルターによる on-off 特徴」、そして形状カテゴリを含むものが最適となることが示された。これは、弁別学習の初期では「形状輪郭の面積」、「エッジの長さ」の基づき、中期から終期ではこれらに加えて「DOG フィルターによる on-off 特徴」と形状カテゴリに基づいて学習していることを示した。

この結果から弁別学習において局所的手がかりが優先させる動物種もトポロジカルな形状特徴にもとづいた学習が可能であることから、視覚システムにおいてはこの種の知覚は原初的に備わったものと考えられる。

3.2 傾斜面 (slant) の知覚

テクスチャによる坂面の知覚

Chen & Saunders(2019)は、octotropic なテクスチャプレードを用いて配列したスペクトラル構成要素が3次元のスラント知覚におよぼす効果をしらべた。提示したスラント面は、octropic なプレードテクスチャでシミュレートされた面で水平軸を中心として前後方向に傾いて設定された。octropic なプレードはOctoplaid、Oct-Align、Octo-Perpの3条件であった。被験者にはシャッターグラスをかけ、シミュレートされたスラント面を両眼視（左図）、あるいは単眼視し、知覚した3次元面の角度を右手を測定装置に置いて調整させた。

実験の結果、両眼視条件ではスラントの知覚された角度はシミュレートした角度とともにリニアに増大し、実験条件間（Octoplaid、Octo-Align、Octo-Perp）には差は無かった。また単眼条件でも知覚された角度はシミュレートした角度が30°以下ではリニアには増大しなかったが、それ以降はリニアに増大し実験条件間にも差は生じなかった。ステレオグラムの左右に抗争条件を持ち込んだ両眼視条件の場合には、スラント知覚は実験条件間で差があり、テクスチャの影響が優位に示された。この結果は3種類のテクスチャは3次元のスラントの知覚に同等の役割を果たし、水平と垂直の構成要素を除去してもスラント知覚には影響を及ぼさなかった。

3.3 陰影による形状知覚

一貫しない照明下の陰影による形状知覚

Wilder et al. ()は、光源が移り変わる場合、視覚システムが3次元面を正しく知覚できるか、すなわち照射光が大まかに一定な位置から急速に位置を変えた場合にも凹凸のある小さな対象面の形状知覚は明瞭であるか否か、また観察者は急に照射方向が変わった場合、このような変化を知覚できるかについて4つの実験を実施した。

実験の結果、(1)照射方向が急速に変化した条件での陰影手がかりによる凹凸の知覚は十分に正しく可能なことが示されたが、その凹凸知覚は照射方向で差があり照射が上方空の場合に最も良く、それが左右方向の場合で悪いこと、(2)一様な照射の窓の大きさを変えた場合、より大きな窓条件で凹凸の知覚判断の正答率が高く、これは照射方向が単一条件の結果と同一であること、(3)シェイプ課題では1/4区画と3/4区画の凹凸の正答率には有意差はないこと、またとライティング課題での照射方向の正答率もチャンスレベル以下でること、さらにライティング課題の方がシェイプ課題より正答率が悪いことなどから被験者は照射方向の急速な変化に気がつかないこと、(4)照射方向を継時的に変化させた条件では、照射方向の違いをチャンスレベルより有意に知覚すること、などが4通りの実験を通して明らかにされた。

これらの結果から、視覚システムは単一の照射方向に依拠するのではなく、急速に照射方向が面上で変わってもそれに対応して適確に凹凸を知覚できる能力をもつといえる。

3.4 オクルージョンとデンシティ

3次元の面を構成する要素が散在する事態におけるオクルージョンとデンシティ

葉と枝、あるいは背の高い草の葉と茎のように3次元の広がりのあるものはたくさんの小物体からできているが、その空間的分布を知覚する視覚システムは十分には明らかではない。Scaccia & Langer (2019)は、ひとつのシーンを半々にして構成された3次元空間におけるデンシティの相違をオクルージョンを手がかりに識別できるかを実験的にしらべた。

実験の結果、3次元回転する球面に散在する矩形小片のデンシティ知覚の偏向をA(面の面積)、 η (density)そしてオクルージョンファクター λ ($\eta \times A$ 、オクルージョンレベル)を変えて実験した結果、オクルージョンレベルが低い場合には前面より後面が、またそれが高い場合には後面より前面がデンシティが多いと知覚判断された。この知覚判断の偏向(bias)にはA(面の面積)、 η (density)は関係しなかった。面を構成する矩形小片の輝度(白と黒)を変えた事態では前面のデンシティが高いという偏向は減じた。

このデンシティ知覚の感度を示すウエーバー比は、前・後面課題および左・右面課題ともデンシティが増すにつれて減少した。しかし前・後面課題のウエーバー比は面のデンシティの多少では有意には変わらなかったが、左・右面課題では増大した。このデンシティ多少の手がかりはオクルージョンの知覚に異なる影響をもつと考えられる。

さらに、このデンシティ知覚で球の半分の面のピクセル数で判断され、偏向が生じない

と仮定した理想モデルを作成し、その期待された結果と人間実験の結果を比較すると、オクルージョンレベルが増大した条件では人間被験者と類似した結果となった。ウエーバー比についても理想モデルの期待と実験結果とは類似した結果を示したが、利用できる手ごかりによる不一致が起きた。

これらの結果から、3次元事態でデンシティの多少を知覚させる場合、観察者は複数の手ごかりの組み合わせであるデンシティとその面積から求められるオクルージョンファクターをもちいて判断している。

4. 視空間の構造

4.1 シーンを理解

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。Shafer-Skelton & Brady (2019)は、プレビュー条件として写真（映像）あるいはその線画シーンのどちらがプライミング効果があるかを試す実験を試行した。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。

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。実験の結果、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。

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

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が分析された。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。

4.2 視覚方向の不安定

ロッド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

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。実験では、視覚によるロッドのみがロッド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。

4.3 大きさの恒常性

大きさの恒常性の初期視覚野

大きさ恒常性は網膜と視覚野が一对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。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。大きさ恒常性の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に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。

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 4 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を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けば 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。フリッカー頻度が大きいほど高次の視覚野を反映し、したがって 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 40cm 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。

5. その他の研究

ドライビングビデオの短時間観察による道路シーンの予測

Wolfe et al. (2019) は、ドライバーが道路シーンを素早く知覚しその認知的な表象に基づいて運転操作の予測をどのようにしているかを実験した。ボストン郊外のドライブシーンをビデオに撮影し、時系列の運転予測課題を設定し、被験者に短時間の道路ビデオから次に何が起きるかの予測を明らかにしようと試みた。この実験ではドライブシーンの特定の対象というよりはシーン全体の理解によって短時間のドライブシーンの知覚がどのように変わるかがしらべられた。

第 1 と第 2 のテストクリップの抽出時間間隔、プレビュービデオの持続時間および市街

地・ハイウェイの道路タイプが、次に起きるドライブの予測正確度との関係をしらべたところ、(1)テストクリップの抽出時間間隔が 100ms 時の予測正確率は 64.1%、4000ms のそれは 78.3%と有意に差があり、テストクリップの抽出時間間隔が長いほど正確な予測ができること、(2)プレビュービデオクリップの提示持続時間が 100ms の予測正確率は 69%、2000ms のそれは 75.7%で、提示持続時間が長いほど予測正確率は有意に増すこと、(3)市街地条件はハイウェイ条件より有意に予測正確度が高いこと、などが示された。

これらの実験は online でのみ実施されているので実験室で再実験する必要があり、どの要因がこのドライブの予測精度の改善に資するのかを確認する実験がさらに試みられた。実験はプレビュー条件を 500ms の静止シーン、500ms のビデオ、2500ms のビデオの 3 通りに設定し、テスト条件には、抽出時間間隔を変えた 2 つのクリップを上昇・下降系列で提示し、予測の閾値の測定が試みられた。

その結果、ドライビングでの順序予測についての時間間隔を変えたテストクリップでの測定による弁別閾値は、プレビューが静止クリップ条件ではハイウェイで 2.247ms、市街地で 2.042ms、プレビューが 500ms クリップ条件ではハイウェイで 2.271ms、市街地で 1.999ms、プレビューが 2500ms 条件ではハイウェイで 1.934ms、市街地で 1.741ms となった。これは、2 通りのドライブシーンと 3 通りのプレビュー条件間にはそれぞれ弁別閾で有意差があり、ハイウェイより市街地で、またプレビュー提示の時間間隔が長いほど次のドライブシーンの予測が速くなることを示した。

これらの結果は、より多くのドライビング情報があるとシーンがより精細に認知されるため、ドライバーは正確なドライビング予測ができることを示唆する。

視覚と手の運動の協応動作と予測方略

Binaee & Diaz (2019) は、奥行方向に運動する対象が妨害された場合、視覚の予測と手・身体の運動の協応関係を確認した。実験は、被験者にアイトラッカーを付けた VR ヘッドセット（を装着して放物線を描いて 20m の距離を飛んでくるボールを観察させた。投げられたボールは途中で妨害され 500ms の間消える (プリブランクピリオド、pre-blank duration) が、被験者は飛んでくるボールの軌道を予測してラケットをボールに当てる動作をするように求められ、予測が正しければボールを打つことができる。ボールが再び見えるようになる時間 (post-blank duration) が変えられた。

ボールが見えなくなるブランクのタイミングをボールが到達する前の post-blank duration を変えることによって操作し、さらにボールの軌道の形を pre-blank duration を変えることによって操作した結果、被験者の注視運動軌道は曲線的で消えて見えないボールの曲線軌道に類似し、注視のベクトル (eye to ball vector) は再び出現したボールの 4 度以内で納まった (実際のボール運動は 10 度から 13 度であったにもかかわらず)。ブランクのタイミングは、ボールが再び出現したときのパドルとボールの距離からみると、パドルの正確な位置の予測には影響しなかった。試行を重ねると、注視ベクトルが再出現のボ

ールの運動軌道を正確に予測され、パドルは通過するボールに近づけることが示された。

これらの結果から、パドルをボールに当てる被験者の予測の方策は正確な注視行動ではなくボールの運動軌道範囲の正確な把握、あるいはボールのブランクのタイミングによって決まると考えられる。

