

1. 両眼立体視

1.1. 視野闘争

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

OKNは、刺激の運動と同方向に生じる遅い眼球運動（緩徐相 slow phase）とそれとは逆方向の刺激の運動で生じる速い眼球運動（急速相 fast phase）が規則的に繰り返されることによって生じる。これまでの視野闘争の研究ではパターンの反転は観察者の内観で報告された。一方、被験者の報告によるのではなく、客観的な生理的あるいは行動的指標を使用する研究が報告されている。OKNには主観的な知覚経験が反映されやすく、相反する眼振（nystagmus）を生じさせる抗争的な刺激条件の場合にはとくに顕著である。たとえば、各眼に相反する方向に運動する刺激が与えられると知覚優位にある運動にスムーズなOKN眼球運動が生起するが、知覚優位の運動が変わるとスムーズな眼球運動の方向もそれにつれて変わる。

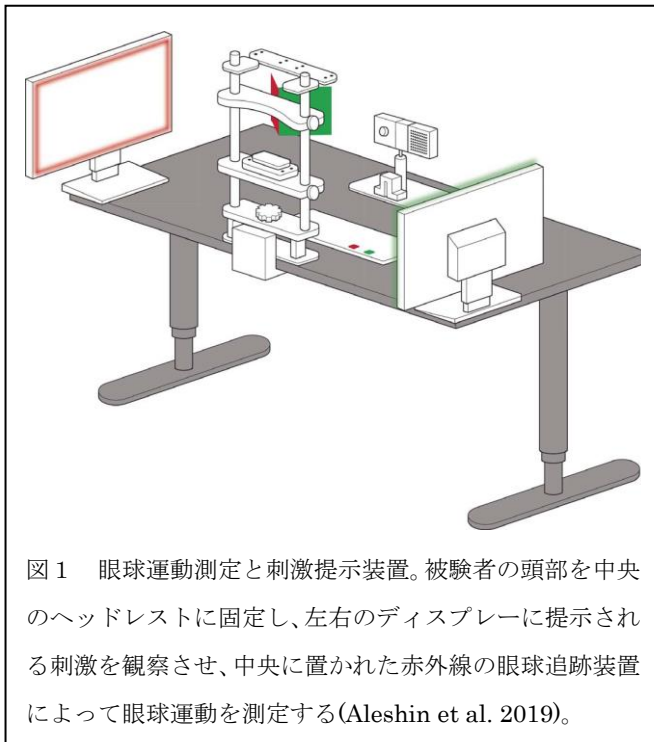


図1 眼球運動測定と刺激提示装置。被験者の頭部を中央のヘッドレストに固定し、左右のディスプレイに提示される刺激を観察させ、中央に置かれた赤外線眼球追跡装置によって眼球運動を測定する(Aleshin et al. 2019)。

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。図1に示したように、被験者の頭部を中央のヘッドレストに固定し、左右のディスプレイに提示される刺激を観察させ、中央に置かれた赤外線の眼球追跡装置によって眼球運動を測定した。刺激パターンは、片眼に緑と黒のグレーティング（空間周波数0.26cycle）、他眼に赤と黒のグレーティング（空間周波数0.26cycle）とし、水平に左あるいは右方向に運動させた。パターンの運動方向は被験者の注視点から2つのグレーティングが同方向（レプ

レー条件）あるいは互いに反対方向（対抗条件）とし、その速度は $33.5^{\circ}/s$ とした。実験条件にはパッシブ条件とアクティブ条件が設定された。パッシブ条件では被験者はリプレー試行と対抗的試行を行った。パッシブ条件では判断する両眼への刺激の運動はいつも方向一致でスタートし、次いでランダムにその運動方向を反対に変えた。アクティブ試行では最初の2秒間だけ両眼とも方向一致の刺激運動が提示され、そのあと88秒間は方向不一致の運動が提示された。また、アクティブ条件では被験者はパッシブ条件に加えて最初に視えた運動方向およびその方向が変わった時にキー押しで報告することが求められた。被

験者は健常な児童 28 名 (平均年齢 12 歳)、青年 19 名 (平均年齢 16 歳)、若い成人 30 名 (平均年齢 31 歳)、高齢の成人 12 名 (平均年齢 60 歳)、および境界領域の障害者 12 名 (平均年齢 27 歳)、自閉症者 12 名 (平均年齢 28 歳) とし、これらすべての被験者の視力およびステレオ視は正常であった。

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。

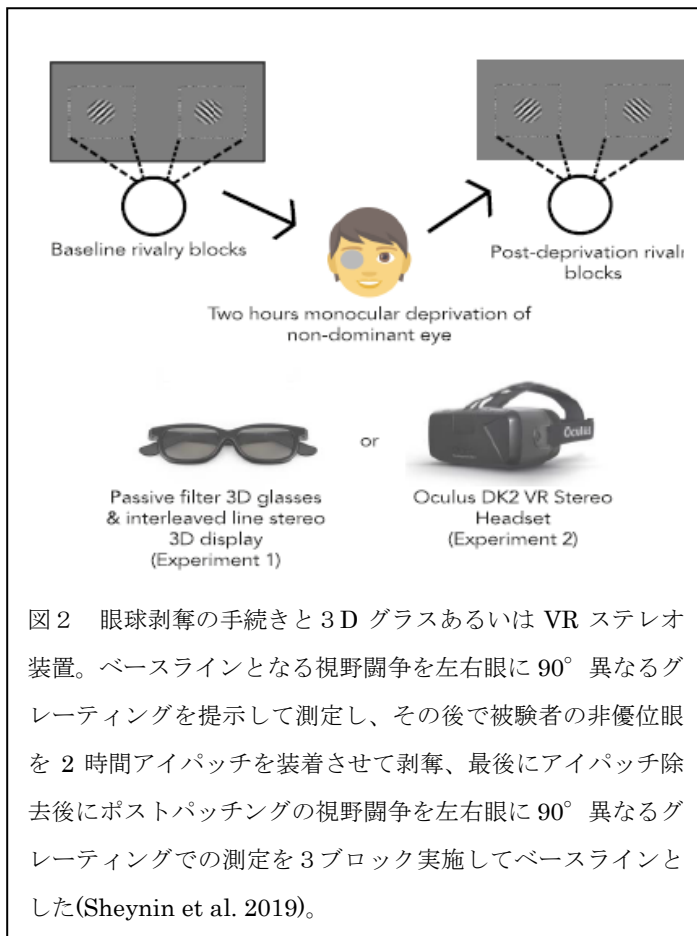
上記の指標に基づいて OKN の測定結果から累積スムーズ追跡眼球運動 (CPS) を求めて各眼への刺激の抗争事態における知覚反転時を決定し、それを言語による知覚抗争に関わる意識的報告の結果および物理的に運動方向が反転する事態と比較すると、それらは一致していることが示された。これは健常者、児童と青年など発達途上にある者、そして自閉症などの患者に明瞭に当てはまった。

OKN を用いた累積スムーズ追跡眼球運動 (CSP) を用いると、知覚的抗争の知覚過程の追跡を自動化できることが示された。

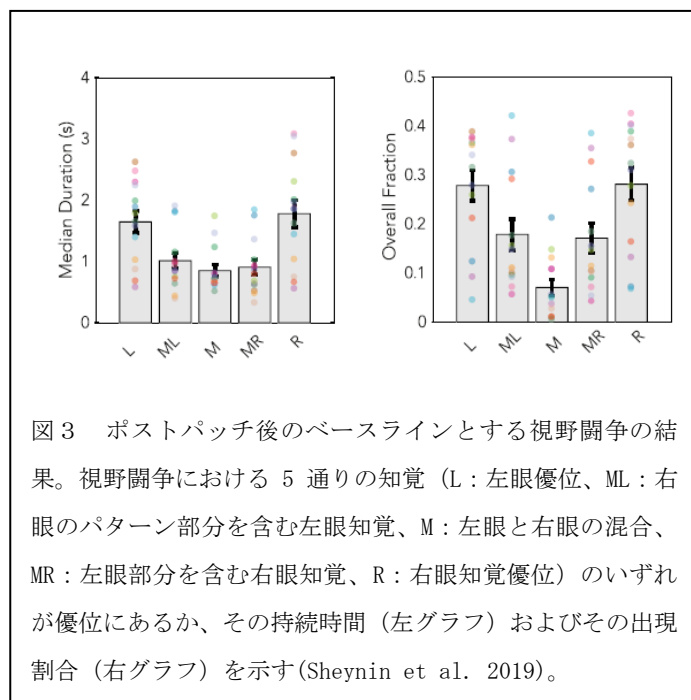
視野闘争における一時的単眼オクルージョンによる両眼視融合の促進

一時的な単眼視の剥奪 (Monocular Deprivation, MD) は成人の視覚にさまざまな影響を及ぼす (Baldwin & Hess 2018)。MD あるいは一眼パッチングは神経レベルで眼球優位性 (eye dominance) を変える (Tso et al. 2017)。幼児期における長期の一眼の剥奪は、非剥奪眼への優位へとシフトするが、成人への数時間の一眼パッチングは剥奪眼への優位性が一時間後までしか続かない (Lunghi et al. 2011)。これは成人の視覚システムに潜在する柔軟性を示唆する。視野闘争においては、一つの眼が他眼を抑制する程度を測定して眼の知覚的優位性が推測される。そのために、視野闘争で出現する 5 通りの左・右眼の知覚相 (L: 左眼知覚優位、ML: 右眼のパターン部分を含む左眼知覚、M: 左眼と右眼パターンの混合、MR: 左眼の部分パターンを含む右眼知覚、R: 右眼知覚優位) から抑制の程度が推測される。とくに、左右眼パターンの混合相知覚の出現は眼球間の完全な抑制が行われていないことを、そして両眼間の脱抑制は両眼のパターンの重複相知覚相が出現することで示唆される。Klink et al. (2010) は、この種の混合相知覚が直近の視覚経験で優位性が変わることを報告した。これは、混合相知覚の出現割合が視野闘争パターンを継続知覚させると増大すること、そして非視野闘争パターンを提示すると視野闘争での交替頻度と知覚相をベースラインの状態まで戻すことを意味する。

Sheynin et al. (2019) は、そこで、視野闘争知覚において一眼のパッチングによって知

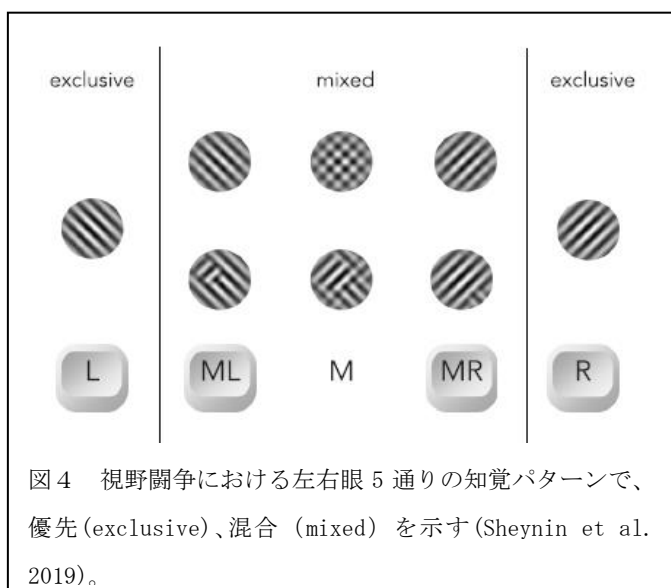


覚眼球優位性を誘導し左右眼パターンの5通りの知覚がどのように変わるかをしらべた。実験は、図2に示したように、一眼パッチングによる視覚経験剥奪の手続きおよびパッチング後の3DグラスあるいはVRステレオによる左右眼の視野闘争の測定の手続きを示す。はじめにベースラインとなる視野闘争パターンを左・右眼に90°異なるグレーティングを提示して測定し、その後で被験者の非優位眼を2時間アイパッチを装着させて知覚経験剥奪、最後にアイパッチ除去後にポストパッチングの視野闘争を左・右眼に90°異なるグレーティングパターンでの測定を3ブロック実施してベースラインとなる結果を得た。図3

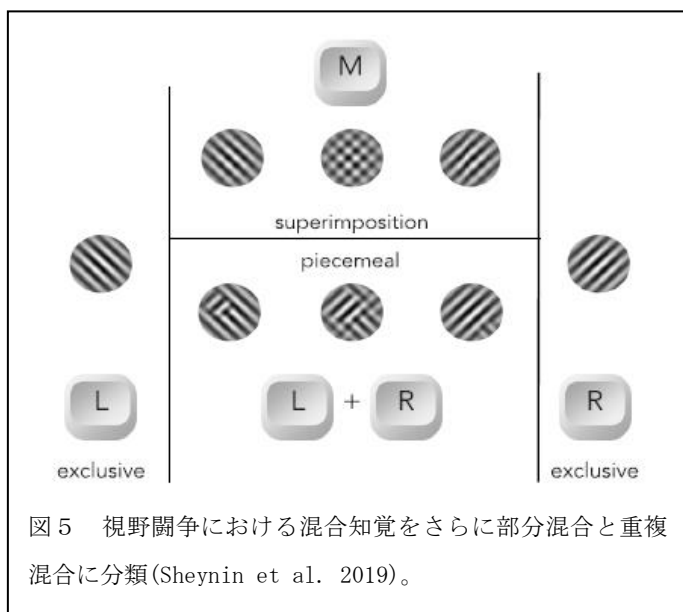


には、ポストパッチ後のベースラインとする視野闘争の結果を示した。視野闘争における5通りの知覚は次の通りである。L:左眼の知覚優先、ML:右眼のパターン部分を含む左眼の知覚優位、M:左眼と右眼の融合した混合知覚、MR:左眼部分を含む右眼の知覚優位、R:右眼の知覚優先、に分類して測定し、それらのいずれが優位にあるか、その持続時間(左グラフ)およびその出現割合(右グラフ)にまとめられた。図4は、視野闘争における左・右眼5通りの知覚相パターンで、優先相(exclusive phase)、混合相

(mixed phase) を示し、**図 5** には視野闘争における混合相知覚をさらに部分混合相と重複



相混合に分類したことを示す。この実験では、単眼パッチングが左右眼パターンの混合相知覚の割合と持続時間を増やし、一方では視覚経験剥奪眼へ眼球優位性がシフトされると予測される。さらに、パッチングは眼球間の抑制を弱めるので両眼からの部分混合相知覚より両眼パターンの重複相知覚の割合と持続時間を増大させると予測する。実験では測定の前に、4通りの知覚パターンの類型を提示し被験者の判断の参考に提示した (左眼パターンの



の方向が90%以上の優先、左パターンの方向が優位だが50%程度の混合相知覚、右パターンの方向が優位だが50%程度の混合相知覚、右パターンの方向が90%以上の優先)。非利眼の2時間のアイパッチによる視覚経験剥奪後、左右眼へは方向が90°異なるサイン波形のグレーティングパターンを9分間提示し、被験者に4通りの知覚パターンのいずれが視えているかを4通りのキー操作でこたえるように、そしてその知覚が続いている間はキー押しを継続す

るように教示した。

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）が実施された。その結果、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。

そこでさらに Sheynin et al. (2019) は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（実験2）した。パッチング後のテスト時間は0、15、30、60分とし、左・右眼に90°角度の異なるグレーティングを提示し、4通りの知覚相（左・右眼どちらかのパターンが優先、パターンの重複でひとつに融合、左右眼からの部分的混合）のいずれかおよびその持続時間を測定した。その結果、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連続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

視野闘争（Binocular Rivalry, BR）には、知覚が交替するたびに意識上も神経生理的にも変化が同時に随伴生起していると考えられ、関心が高まっている。また、視野闘争は視覚処理過程を探る手段として有効なことも周知である。というのも、視野闘争では、知覚された刺激が完全に数秒間消失し視覚意識から消されているにも関わらず、刺激はその効果を保持していることも関心もたれる理由である。視野闘争は視覚処理過程を探る上で広い範囲にわたって有効である（Kim & Blake, 2005）が、しかし視野闘争を精神物理学的に分析するには問題がある。そのひとつには、視野闘争中に優先する知覚状態に切り替わった場合その持続時間が正確に測定できないために、その直前の知覚状態が意識されない

ままだれくらいの時間が抑制されたままで保持されていたかが特定できないことである。ふたつには、知覚交替時にしばしば左右眼パターンからの混合知覚状態が生起するが、これは部分的に抑制された刺激が知覚されている可能性を示唆する。このような視野闘争における予測できない知覚交替や混合知覚は、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られる。まず、CFSでは、片眼に複雑な構造をもつ刺激パターンをマスク刺激として提示し、他眼には普通の刺激パターンを提示するためにCFSによるマスクは他眼の知覚パターンが出現する前に即座に数秒間の知覚優位性を獲得し、CFSが意識から消失するにも関わらず視覚処理過程でCFSが残存すると考えられる。これは視野闘争とCFSは同一の刺激条件をもつことであり、両眼間の抑制の時間は混合知覚条件より長いことを示唆する。

そこで、Blake et al. (2019)は、図1に示した実験デザインにしたがって、視野闘争におけるCFS系列の挿入による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。図1は、連続フラッシュによる抑止刺激を挿入した場合の視野闘争実験手順が示されている。

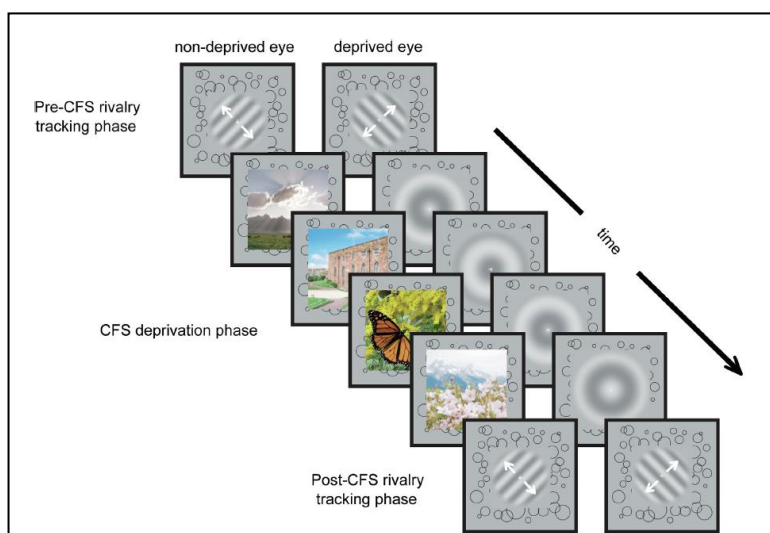


図6 連続フラッシュによる抑止刺激を挿入した視野闘争実験の手順。はじめに、左・右眼に互いに直交する方向のガボールパターンを3分間提示し、どちらのパターンが優勢か、そしてその持続時間を知覚交替の度に被験者にキー押しさせる。続いて片眼には自然シーンのパターンを、他眼にはゆっくりと振幅する目玉パターンを6分間提示し、同様に目玉あるいは蝶（バタフライ）パターンの知覚交替の度に回数と持続をキー押しさせる。最後に再度提示された左・右眼で直交するガボールパターンの知覚交替と持続を被験者にキー押しさせる(Blake et al. 2019)。

る。はじめに、左・右眼に互いに直交する方向のガボールパターンを3分間提示し、どちらのパターンが優勢か、そしてその持続時間を知覚交替の度に被験者にキー押しさせ、続いて片眼には自然シーンのパターンを、他眼にはゆっくりと振幅する目玉パターンを6分間提示し、同様に目玉あるいは蝶（バタフライ）パターンの知覚交替の度に回数と持続をキー押しさせ、最後に再度提示された左・右眼で直交するガボールパターンの知覚交替と持続を被験者にキー押しさせる。このような実験を通して、マスク刺激であるCFSによって誘導された両眼間の抑制がコントロールされた事態

でBRの有効な特性を予測できるかが検討された。とくにBRとCFSに出現する抑制力の個

人差をBRのメカニズムを探る指標として用いた。被験者は47人の男女（男21人、女26人で19歳から30歳）とした。

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）の出現率で生じ、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。

両眼視の一致あるいは不一致刺激の視覚中枢（V1）ニューロンにおける時間的処理過程

左右眼で互いに一致しない刺激であっても、片眼を抑止する前に素早く融合されて両眼視の統合が起きる。視覚システムは急速に作動し両眼の一致する要素を検出して両眼間の差を解消する（Tanabe & Cumming, 2014）。互いに直交するグレーティングパターンを左と右眼に別々に提示した実験によれば、視野闘争が起きる前の150ms以内ならば融合してブレード（格子）が知覚できる（Carter & Cavanagh, 2007; Katyal et al, 2015; Wolfe, 1983）。各眼から来た視神経は外側膝状体を経て視覚領V1に伝えられ4Cの層に別々に伝えられて終わる（ocular dominance columns）。これは各眼から視覚情報はもっぱら交じることなくそのまま伝わることを意味するが、しかし空間周波数や方向刺激の特性は接線方向の領域と相互に関わり、眼球間の刺激差を検出し解決している（Blake & Wilson, 2011; Cumming & DeAngelis, 2001; Tong, et al., 2006）。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、その時間的なダイナミクスは不明であり、また視野闘争への関わりも明らかにされていない。

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。はじめに注視トレーニングが行

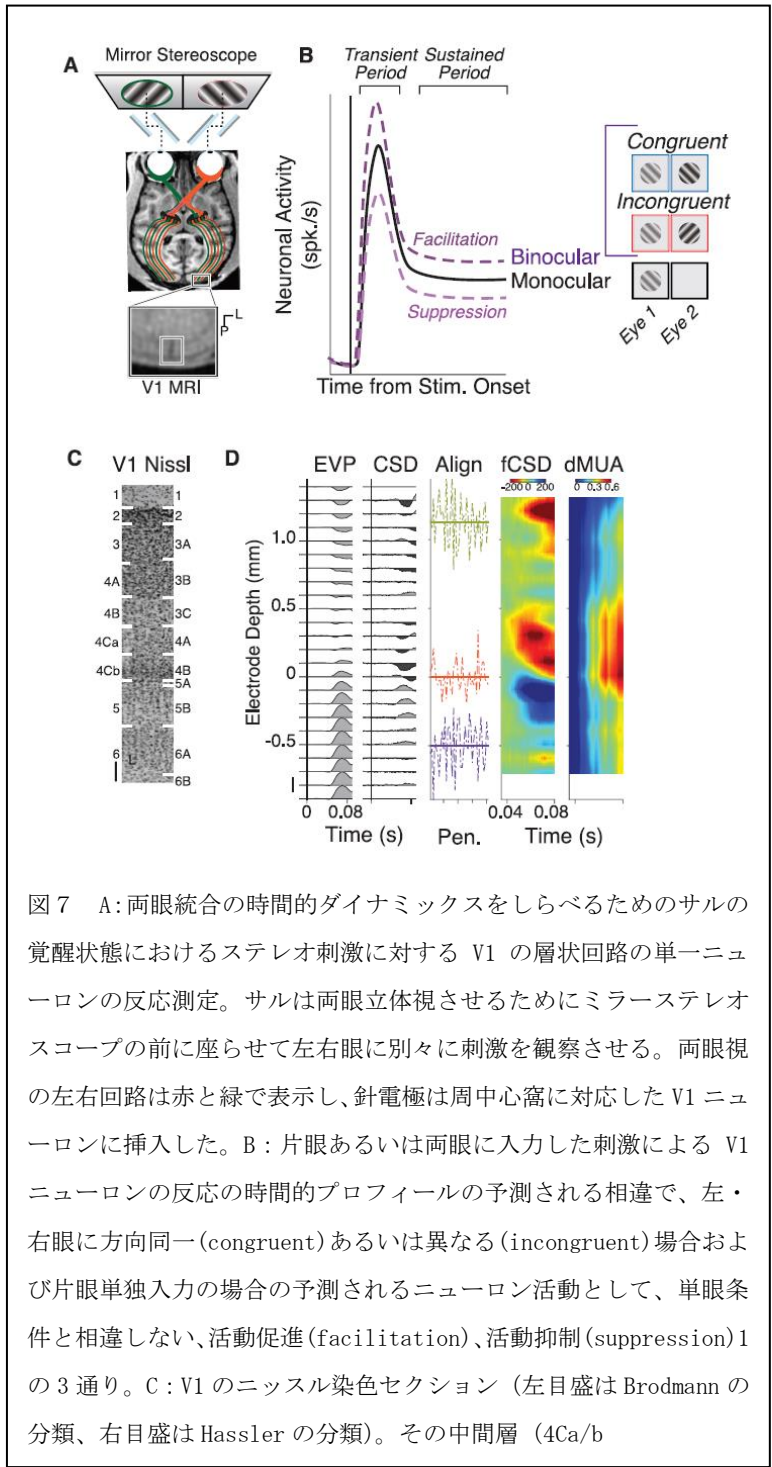


図7 A: 両眼統合の時間的ダイナミクスをしらべるためのサルの覚醒状態におけるステレオ刺激に対する V1 の層状回路の単一ニューロンの反応測定。サルは両眼立体視させるためにミラーステレオスコープの前に座らせて左右眼に別々に刺激を観察させる。両眼視の左右回路は赤と緑で表示し、針電極は周中心窩に対応した V1 ニューロンに挿入した。B: 片眼あるいは両眼に入力した刺激による V1 ニューロンの反応の時間的プロファイルの予測される相違で、左・右眼に方向同一 (congruent) あるいは異なる (incongruent) 場合および片眼単独入力の場合の予測されるニューロン活動として、単眼条件と相違しない、活動促進 (facilitation)、活動抑制 (suppression) の 3 通り。C: V1 のニッスル染色セクション (左目盛は Brodmann の分類、右目盛は Hassler の分類)。その中間層 (4Ca/b

われ、注視点に設定した手がかりの 1 度以内に注視点がおさまるまで継続され、達成したら報酬が与えられた。両眼統合の時間的ダイナミクスをしらべるためのサルの覚醒状態における両眼立体視刺激に対する V1 の層状回路の単一ニューロンの反応は、サルをミラーステレオスコープの前に座らせて左右眼に別々に刺激を観察させて測定された (図 7A)。両眼視の左右回路 (解剖図) は赤と緑で表示し、電極は周中心窩に対応した V1 ニューロンをターゲットに設定された。片眼あるいは両眼に入力した刺激による V1 ニューロンの反応の時間的プロファイルの予測 (図 7B) である。左・右眼にグレーティングの方向が同一 (congruent) あるいは異なる (incongruent) 場合および片眼単独入力の場合の予測されるニューロン活動は、単眼条件と相違しないか、活動促進 (facilitation) か、あるいは活動抑制 (suppression) かの 3 通りが予測される。

優位眼 (利き目) と非優位眼に提示する刺激のコントラストは各眼のニューロン領域の強度を確定するために、0.45 対 0.9 とした。図 7C には、V1 のニッスル染色セクション図 (左目盛は Brodmann の分類、右目盛は Hassler の分類) を表示し、その中間層 (4Ca/b あるいは 4A/B) には外側膝状体から大部分が入力されていることを示す。図 7D には、V1 の層状

位置を特定するための神経生理学的基準で、EVP（視覚誘発電位）、CSD（電流ソースで EVP から算出）、電流の落ち込み（黒色表示）と電流の発生（灰色表示）、Align（V1 の機能的に決定した深さで、トップ（緑色表示）、ミドル（橙色表示）、底部（紫色表示））、fCSD（Flash-evoked CSD、垂直方向の電流の浸透と内挿）、dMUA（Flash-evoked multiunit response、最大反応を標準化して浸透を平均化）を示した。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。これを用いると 1 つのマイクロ電極以上で生み出されたシグナルをオミットできる利点がある。被験体のニューロン活動の装置は MRI 対応のヘッドホルダーとそれを記録する部屋である。これに必要な頭部外科手術は無菌室で実施され、血圧、呼吸数などバイタルサインもモニターされた。注視の位置は赤外線カメラでモニターされた。左右眼へのステレオ刺激（図 7A）はミラー型のステレオスコープを用い、左眼刺激は左眼に、右眼刺激は右眼に提示された。

実験の結果、(1) 左右眼の一致刺激、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

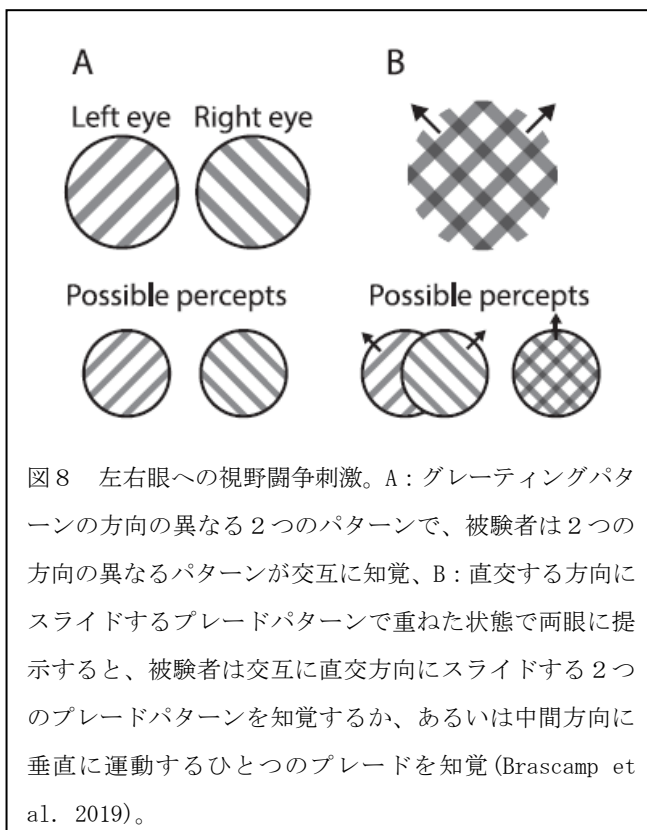
と下層のニューロンはトランジェント過程で抑制反応を示すこと、などが明らかにされた。

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

視野闘争現象は図一地反転のような 2つの知覚が交互に出現する知覚現象（バイステーブル現象、bistable phenomenon）との類似性が、その知覚反転回数あるいは反転持続時間などで指摘されている (Leopold & Logothetis, 1996; Andrews & Purves, 1997; Rubin & Hupe, 2005; O' Shea et al. 2009; Moreno-Bote et al. 2010; Bonneh et al. 2014; Brascamp et al. 2015)。これは、視野闘争とバイステーブル現象の神経ベースが重畳しているためと考えられる。

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。二つの実験 1 と 2 を行い、実験 1 の刺激パターンは、図 9 のような大小 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。各パターンを左右眼に提示する場合、片眼は赤色に、



他眼は緑色でプロジェクター投影した。ドットパターンでは一方の背景輝度を他方の倍とした。疑似条件 (mimic condition) として、視野闘争パターンをあたかも視野闘争するように交替させて提示した。第 1 実験の被験者は 137 名の成人 (学生) とし、刺激提示中に赤色刺激と緑色刺激のどちらが視えるか、その時間があるいは両方が視えている時間を 3つのキーで応えるように教示した。実験 2 では、図 8 のように、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。図 8A はグレーティングパターンの方向の異なる 2つのパターンで、被験者は 2つの方向の異なるパ

ターンを交互に知覚できる。図9Bは直交する方向にスライドする2つのプレードパターンを重ねた状態ではじめに提示し、次に互いに反対方向に同時に動かし、被験者には交互に2つのスライドするプ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プレードを知覚するかを尋ねた。75名の被験者には、プレードが垂直方向に運動するか、あるいは2つの透明な重複したグレーティングが知覚されるか、あるいはミックスして知覚されるかを3つのキーで応えるように求めた。

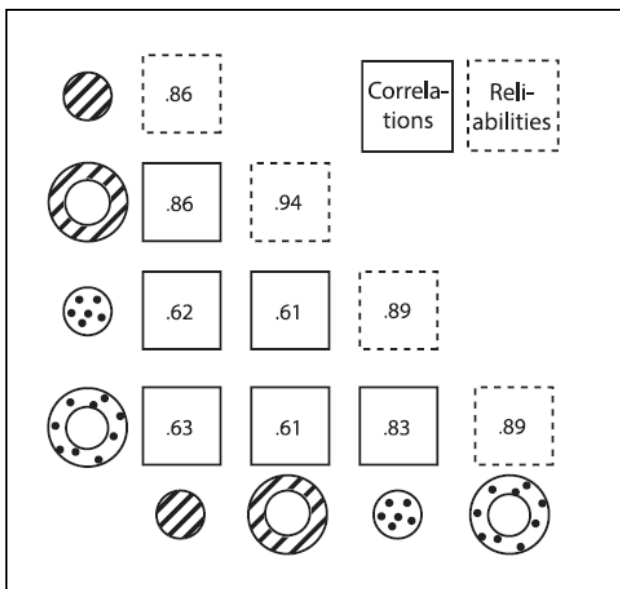


図9 提示した刺激パターンに対する知覚されたパターンの相関係数。点線枠内は係数の信頼度(Brascamp et al. 2019)。

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相関係数をマトリックスで示した(図9)。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)によっている。これは、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いと考えられる。

実験2の4種類の刺激パターンの反転知覚時間の相関係数のマトリックスは図10に示されている(ピアソン相関係数(実線枠)と信頼係数(点線枠))。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たが、実験1に比較して高くはなかった。また、視野闘争する刺激パターンと運動するプレードライバルリー間の個人差の反転持続時間の相関は同程度だった。

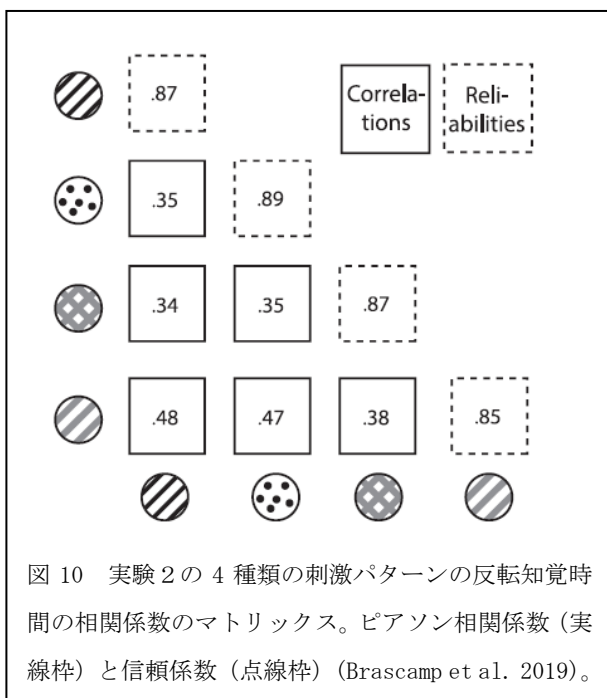


図10 実験2の4種類の刺激パターンの反転知覚時間の相関係数のマトリックス。ピアソン相関係数(実線枠)と信頼係数(点線枠)(Brascamp et al. 2019)。

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プレード・ライバルリーに関わる要因である。視野闘争過程に関してもう

ひとつの可能性は、視野闘争に固有な要因そして視野闘争と運動プレードライバルリーに

関わる要因のみが関わり、反転図形知覚とは異なる一般的要因は関わらないと考えるものである。そこで、実験2の結果を因子分析したところ、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に関わる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

視野闘争現象は2つのうちひとつの刺激を意識することであり、かつ他の刺激の抑制でもある。これは刺激を意識にのぼらせる知覚システムの階層的な連鎖過程での究極の現象とも考えられる。視野闘争において知覚優位となる刺激特徴は、空間周波数、色相、大きさ、そして運動刺激がある。運動刺激においては速度要因が静止刺激に対して有意な知覚を生じさせる(Blake et al., 1998; Blake et al., 1985; Wade et al., 1984; Wiesenfelder & Blake, 1990)。この種の闘争は片眼にフラッシュ刺激を用いて他眼を抑制しても生起するので、神経組織での類似のメカニズムを示唆する。視野闘争および運動の処理メカニズムでは刺激の大きさと網膜投影の偏心率によって見えが変わる。視野闘争の場合、刺激の

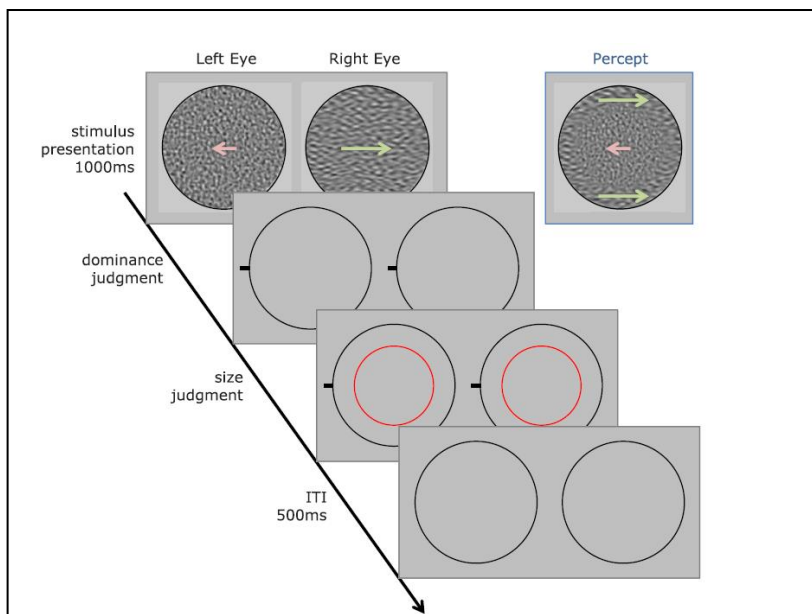


図 11 左・右眼への運動する刺激パターンの提示。左右の互いに反対方向の運動速度 ($0^\circ/s$ から $16^\circ/s$) の異なる雲状パターンが左・右眼に提示されると、中心には速度の遅い運動が、周辺には速度の速い運動が互いに反対方向になるように知覚される。被験者にはパターンの中心となる領域を指示すること、またその大きさを提示した赤い円で調整することを教示する(Ananyev et al. 2019)。

大きさが大きく中心視の場合には視野の周辺に広がって見える。これは刺激の大きさに密接に関係する。刺激が大きい場合には混合型の視えが優位となり、小さい場合には全視野の視えが優位となる。これは受容野の大きさと関連する。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率を変えて両眼の優位性と抑制の影響を実験的に吟味した(実験1)。刺激は22inのモニタ

一に提示し、5名の被験者にミラーステレオスコープで観察させた。刺激は、図11のように、左・右眼それぞれへの運動する刺激パターンを提示した。左右の互いに反対方向の運動速度 ($0^\circ/\text{s}$ から $16^\circ/\text{s}$) をもつ異なる雲状パターンを左・右眼に提示すると、中心には速度の遅い運動が、周辺には速度の速い運動が互いに反対方向になるように知覚される。被験者には 6.4 度 (視角) の丸窓を通して同じ大きさのパターンを1秒の間で観察するように教示した。パターンの空間周波数帯域幅の平均を $1.75\text{c}/^\circ$ 、最高帯域幅を $3.5\text{c}/^\circ$ とし、刺激の全体が相互に反対方向に7種類の速度 ($0^\circ/\text{s}$, $0.5^\circ/\text{s}$, $1^\circ/\text{s}$, $2^\circ/\text{s}$, $4^\circ/\text{s}$, $8^\circ/\text{s}$, and $16^\circ/\text{s}$) で水平方向 (x軸) に運動させ、左右眼提示の速度条件の組合せはを48通りの設定した。被験者には、優位に視える運動、すなわち全体が運動しているのか、あるいは中心と周辺に分擬して運動しているのか、またこの2つの運動のうち速い/遅い方向が優位なのか、静止しているか、まだら/透明か、を判断してキーボード操作で報告するように、さらに見え方が中心と周辺分擬の場合、別に提示した大きさが可変な赤い円の大きさを調整して刺激の中心に合わせるように求めた。

実験1の結果、(1)静止が優位な知覚は、運動速度がゼロかあるいは非常に遅いときに生起、(2)刺激全体が優位に静止する知覚は、競合する刺激速度が遅いときに全試行中34.1%で生起、(3)全試行中27.1%で遅い刺激が中心で静止優位、速い刺激が周辺優位となる知覚が生起 (中心-周辺に分擬)、(4)各眼への運動刺激が競合する場合に中心-周辺に分擬の知覚が生起、(5)速い刺激が優位に知覚されるのは全試行中9.5%で生起、(6)刺激の全体の静止知覚あるいは中心と周辺に分擬のもとでの中心領域の静止知覚は60%以上で生起、(7)遅い運動の方向が知覚されるとき、速い刺激のときより刺激全体の静止知覚が優位に生起、等が示された。

実験1の結果は、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。

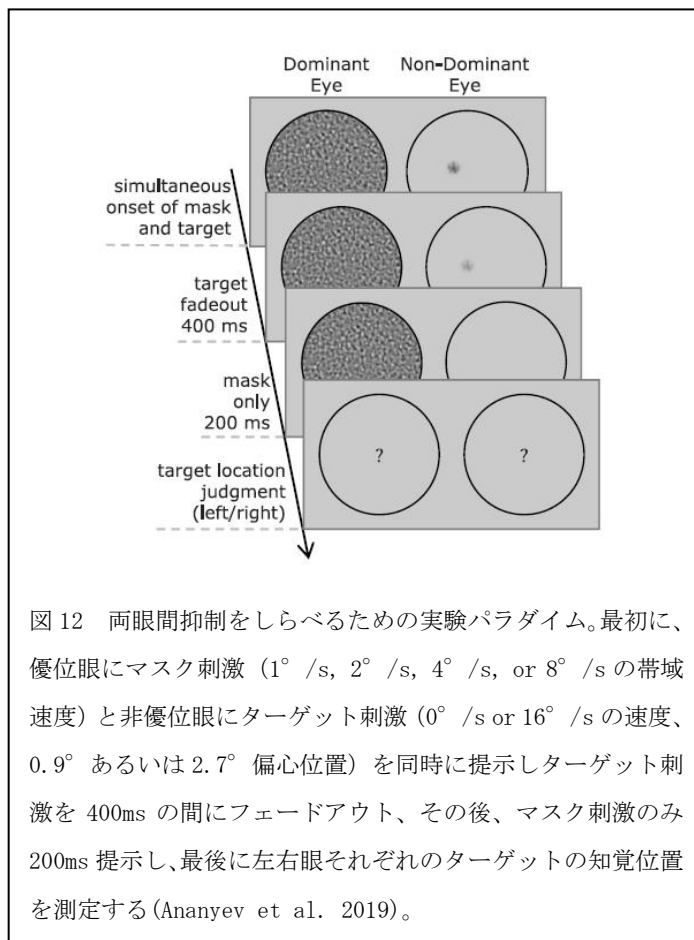
そこで、実験2では刺激サイズが「中心-静止、周辺-運動」に分擬に与える効果を実験した。もし「中心-静止」優位が中心窩あるいはその近傍に密接に関係しているならば、より小さい刺激は刺激の全体を静止するような知覚が優位になるだろうし、もし「中心-遅い、周辺-速い」に分擬が生起すれば周辺視の速度が大きい刺激に感受性が増大したためと仮定される。しかしもし「中心-静止」の知覚が刺激の大きさによって変わるならば、「中心-静止、周辺-運動」に分擬は大きさに不変な要素をもつと結論できる。実験では、刺激の速度を $0^\circ/\text{s}$ あるいは $16^\circ/\text{s}$ のどちらかに設定、刺激の大きさを 3° 、 3.7° 、 4.3° 、 5.0° 、 5.7° 、 6.4° の6通りに変化し、被験者には「静止優位」、「ダイナミック優位」、「まだら優位」、「透明優位」の4択のキー操作で回答させた。その結果、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。

実験3では、「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。ここでは、別々に提示する静止刺激、あるいはダイナミック刺激の提示順序とインターバルを操作した。遅延刺激は先行刺激の1秒から2秒の間(200ms 間隔で5段階)で提示、遅延刺激と先行刺激には静止刺激あるいはダイナミック刺激を用いた。ここでは、「中心-静止、周辺-運動」の分擬知覚には静止刺激とダイナミック刺激が同時に提示される必要があるか、あるいは静止刺激とダイナミック刺激のいずれかが先行提示されトリガーとなる必要があるかが吟味された。その結果、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。

実験4では、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。その結果、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り、両眼間の抑制が実験5でしらべられた。図12は、両眼間抑制をしらべるための実験パラダイムである。最初に、優位眼に運動マスク刺激(1°/s, 2°/s, 4°/s, or 8°/sの帯域速度)と非優位眼にターゲット刺激(0°/s or 16°/sの速度、および0.9°あるいは2.7°偏心位置)を同時に提示しターゲット刺激を400msの間にフェードアウト、その後、マスク刺激のみ200ms提示し、最後に左右眼それぞれのターゲットの知覚位置を測定した。被験者にはターゲットが視野中心の左あるいは右に見えるかを問うた。また、ターゲットのコントラストを変化させ、その検出閾値を上下法で測定した。マスク刺激

は、コントラスト閾値が低い眼を優位眼と設定して、優位眼に提示した。

実験5の結果は、(1)速度の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。

このように、「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。

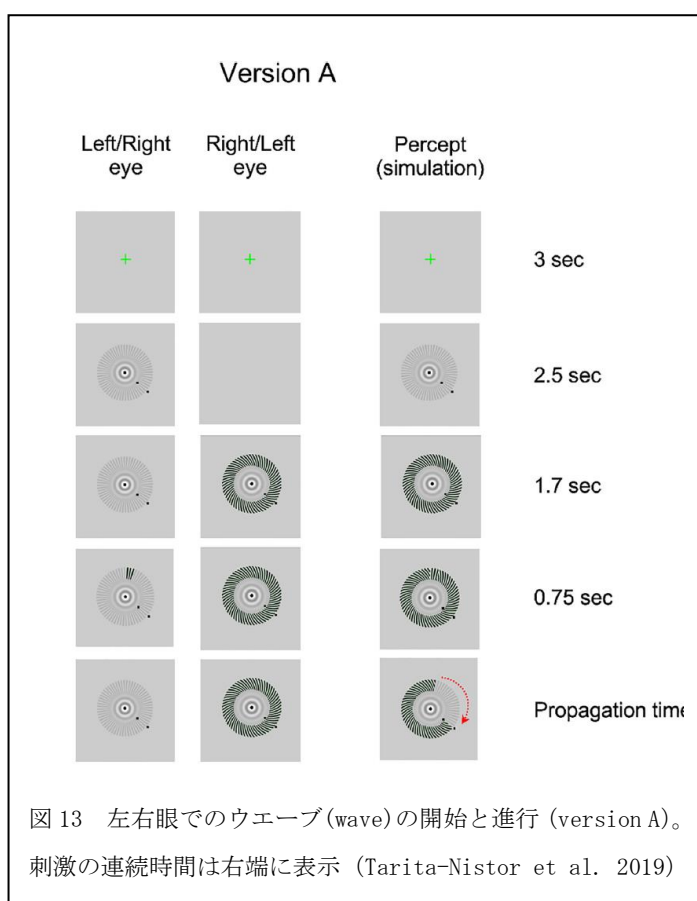
緑内障患者の視野闘争における優位な波形伝播(dominant wave propagation)

緑内障は網膜の神経節細胞の神経病理的変性の病気で初期の視覚路に進行性の影響を与

える。脳梁にも影響するので半球間の伝達も支障が起き、運動探索、ベクシオン反応、コントラスト感受性、そしてステレオプシスを悪くする。脳梁は半球間の伝達で重要な器官でその機能は視野闘争でも明らかにされている。健常者の場合、半球間の波形伝播は平均173msで半球内のそれよりも長く、これは脳梁での交差距離の長さによる(Wilson et al. 2001)。半球間の神経波形は左右のV1に連結する膨大部の脳梁を通して伝播する(Gene et al. 2011)ので、波形伝播の異常は脳梁での損傷を示唆する。

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

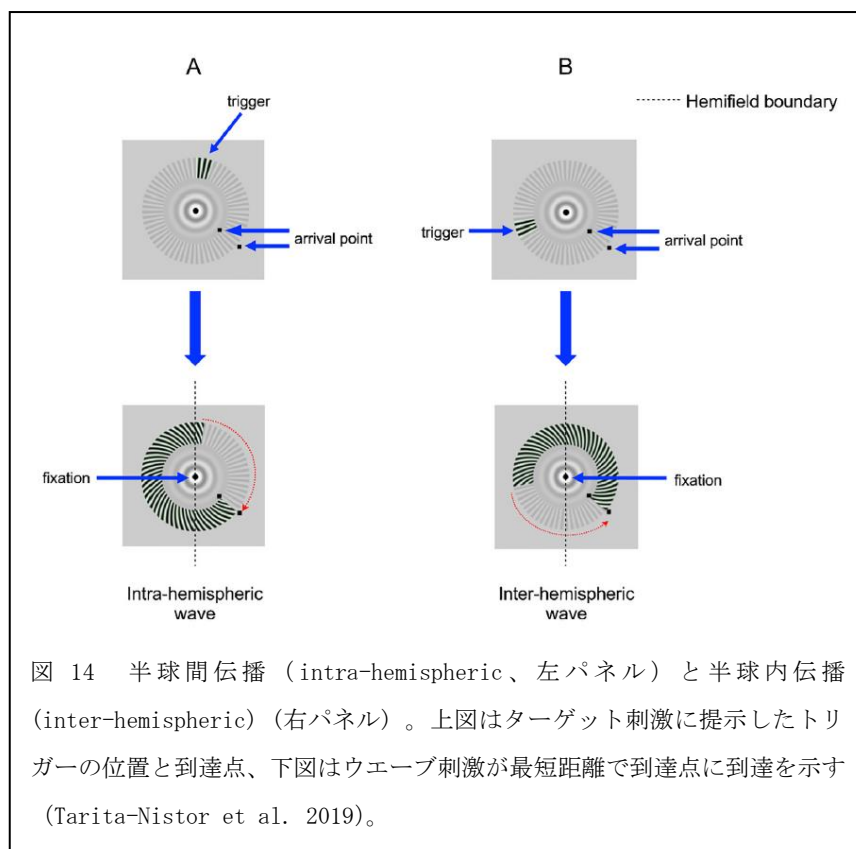
すると予測される。被験者は20人の両側に軽い障害をもつ緑内障の患者(平均年齢65歳、単眼あるいは両眼の目立った障害のないもの、両眼にめつた機能的あるいは構造的非対



称の無い者) および統制群として 25 人の健常者 (平均年齢 63 歳) を対象とした。また、神経病理的疾患あるいは認知的障害の病歴のある者も除かれた。実験する前に、被験者の単眼視力、両眼視力、単眼の視野感受性、認知能力、そして断層写真による眼球構造が測定された。

実験では、図 13 に示したように、ミラーステレオスコープを用いて一眼に低コントラストパターンをターゲットとして最初に提示し、すぐ続いて他眼に高コントラストパターンを提示した。この場合、ターゲットが完全に抑制される。続いて、トリガーとしてターゲットのコントラストを部分的に増大した刺激が、この刺激の優位性を伝搬し促進するために提示された。提示するトリガーの位置は 2 つの黒点で示した到達点に関して 40 度の位置角 (ただしトリガーと到達点は常に 120 度) とした。トリガーと到達点は同側あるいは異なる半球に提示した。被験者には注視点を維持し移動するウェーブが最短距離で到達点に着いたらスペースキーを押すように教示した。PC プログラムは到達するまでの時間とエラーを記録した。テストは 2 つのバージョンで実施された。バージョン A では到達点は 130 度 (下位視野)、バージョン B では 310 度 (上方視野) に設定した。また、トリガーの位置は到達点と同側半球内で処理 (intra-hemispheric processing) されるように、あるいは反対側の半球内で処理 (inter-hemispheric processing) されるように刺激を提示した。

図 14 にあるように、左パネルの半球間伝播 (intra-hemispheric) と右パネルの半球内伝播 (inter-hemispheric) は半球の境界を垂直点線のよう想定して決められた。上図はターゲット刺激に提示したトリガーの位置と到達点、下図はウェーブ刺激が最短距離で到達点に到達を示す。



バージョン A ではトリガーの位置は 10 度あるいは 250 度に、バージョン B では 190 度あるいは 70 度に示し、半球内処理条件では片側半球から他の半球に十分伝達するように垂直の正午の位置から遠い位置において。刺激伝播の半球

間独立が保証されるのは正午の位置から 40 度離れたところである。視野闘争の刺激となる低コントラストのターゲットでは螺旋形状はなく、高コントラストでは放射螺旋形に空間周波数 60cpd で描かれていた。実験手続きは、3 秒間の注視の後で低コントラストパターンが片眼のみ 2.5 秒提示、次いで高コントラストパターン提示後 1.7 秒遅れて低コントラスト刺激上にトリガーが 0.75 秒提示される。トリガーが消失後、被験者にはトラベリングウェーブが到達点に到達した時のみスペースバーを押して反応するように教示した。

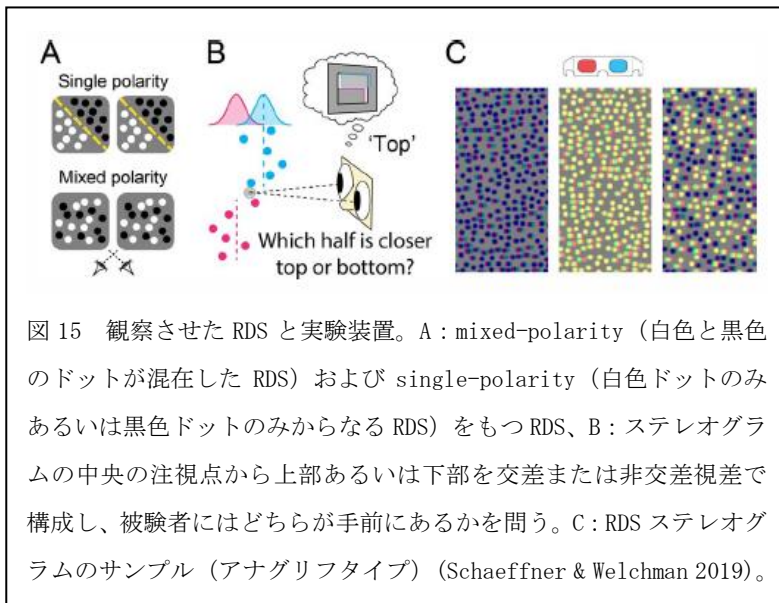
実験の結果、トラベリングウェーブの「半球内と半球間条件の失敗の比率」(Intra/Inter Ratio) を緑内障群と健常者群で求めると、緑内障群でのそれは健常者群より優位に高いことが示された。また、半球内と半球間の失敗率を比較すると、健常者群では優位に半球内失敗率が半球間のそれより高かったが、緑内障群では半球内と半球間の失敗率には差はなかった。さらに健常者群の半球間失敗率は緑内障群のそれよりも優位に大きかったが緑内障群での半球内のそれには差はなく両群とも類似していた。半球内と半球間条件のトラベリングウェーブの伝達時間比率をみると、緑内障群は健常者群より多くの時間がかかること、また半球内より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 (Harris & Parker 1995)。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、transcranial magnetic stimulation) でしらべた。これは急激な磁場の変化を与えて生起させる弱い電流によって脳内のニューロンを興奮させ、脳の接続回路をしらべる方法である。すなわち、TMS をかけることによって mixed-polarity をもつ視差シグナルを視覚領のいずれかの部位に増幅させることができるか、あるいは mixed-polarity 刺激の両眼間対応のミスマッチを TMS で抑制し視差シグナルの信頼性を改善するために働くかのどちらかと推測される。視差の処理に関わる脳の部位は初期視覚領の V1、高次視覚領の V3a、そして高次物体処理領野 (LOC、lateral occipital complex) が知られている (Goncalves et al. 2015; Patten & Welchman, 2015; Preston et al. 2008) ので TMS を用いてしらべる対象領域として設定した。



被験者は 22 名でスクリーニングの結果に基づいて抽出された。図 15 は、観察させた RDS と観察装置である。図中 A には mixed-polarity (白色と黒色のドットが半々に混在した RDS) および single-polarity (灰色背景下の白色ドットのみあるいは黒色ドットのみからなる RDS) をも

つ RDS (背景にはピンク色の両眼間で対応をもつノイズドットをステレオ視の安定のために置いた) を、B にはステレオグラムの構成で、その中央の注視点から上部あるいは下部を交差または非交差視差で構成し被験者にはどちらが手前にあるかを問うことを、C には RDS ステレオグラムのサンプル (アナグリフタイプ) をそれぞれ示した。ステレオグラムの遠・近の弁別課題では交差と非交差を同時に変えて難易度が操作された。左・右半球への刺激提示の操作は注視点の右 (試行数の 2/3) あるいは左水平 (試行数の 1/3) に 2° 位置をずらすことで行い、どちらの半球が機能するかをしらべた。被験者は実験手続きに習熟するために 1 時間のトレーニングを経た後、2 種類のステレオグラム (mixed-polarity、single-polarity) のいずれかを 7 段階のステップで視差を変化 ($0.2 \sim 20 \text{ arcmin}$) させて提示し奥行の弁別を求めた。TMS の条件は TMS の無い条件、および TMS を V1、V3a、L0、Cz の領野に当てる条件の 5 通り設定した。TMS のパルスは被験者が課題遂行中に脳の所定の領域に当てて、弁別課題の成績が特異的に変化するかどうかをしらべられた。実験では、課題遂行中の血中酸素分布の測定のために fMRI、脳部位の正確な特定のために neuro-navigation、TMS パルスの所定の 3 次元部位への正確な投射のための Electric field simulation そして眼球追跡 (eye tracking) の各装置が併用された。

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、図 16 に示したように、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。図の A には、サンプルグレーティングの視差ベクトル (青矢印)、および 3 通りのプレード (plaid) の格子縞に対する視差量を表示 (赤矢印) し、サンプルグレーティングとのそれらの視差方向は $\pm 45^\circ$ から 0° に設定した場合、図の B のようにグレーティングの視差軸に投影して示したプレードの視差 (点線で表示) はグレーティングの初期位置から移動し、グレーティングの視差軸と垂直に交わりプレードの視差量 (斜め黒色実線) となる。3 つのプレードの視差は D および $D \cdot \cos(\theta_g - \theta_p)$ で表される (θ はグレーティングとプレードと視差の交わる角度) で、グレーティングの視差軸に沿う視差の相対的

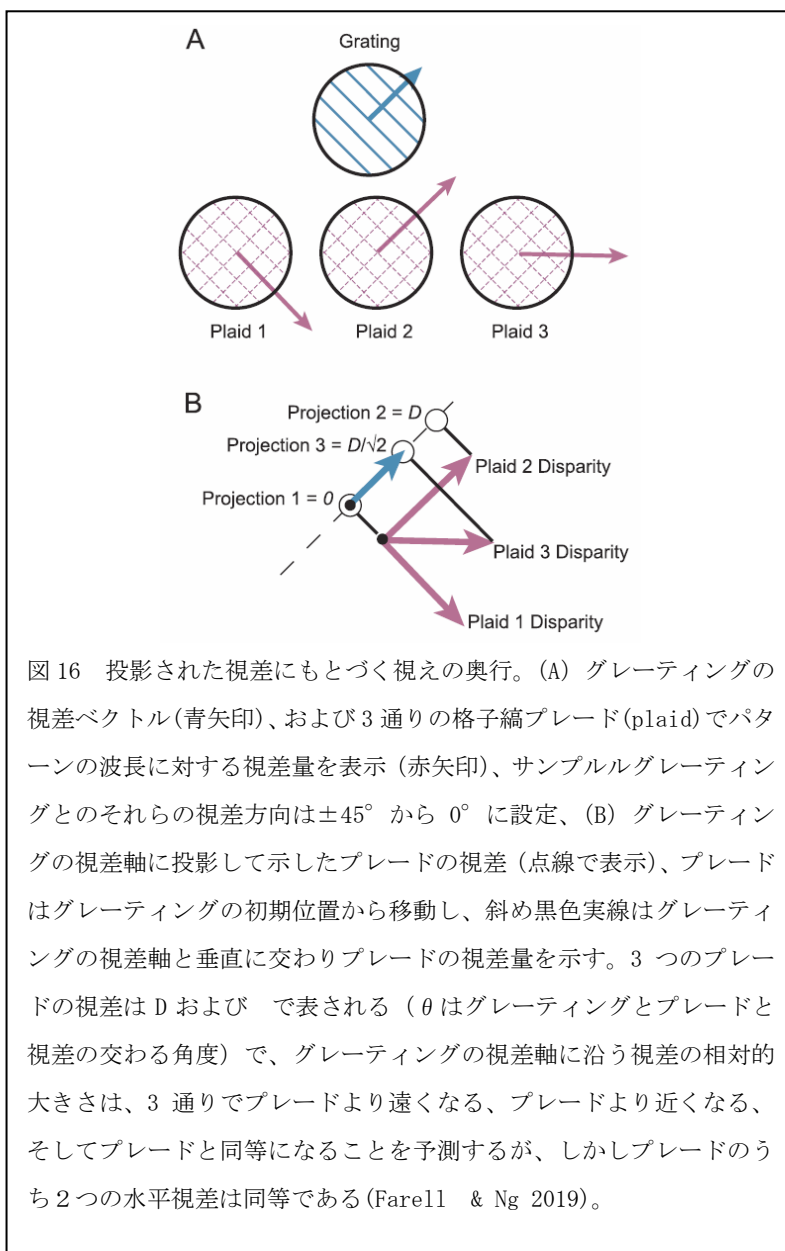
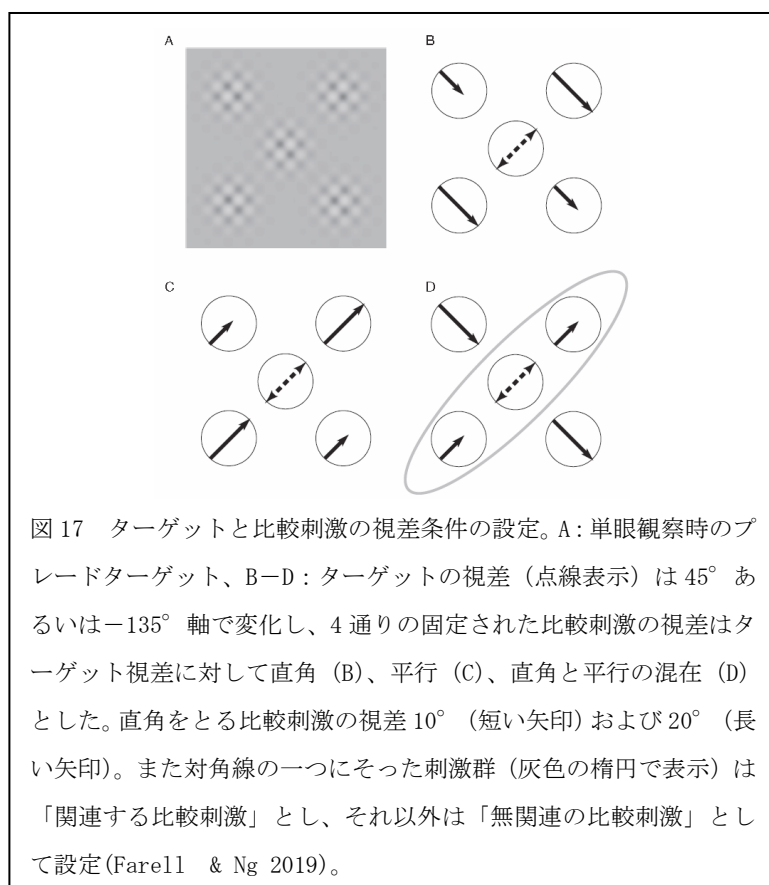


図 16 投影された視差にもとづく視えの奥行。(A) グレーティングの視差ベクトル (青矢印)、および 3 通りの格子縞プレード (plaid) でパターン波長に対する視差量を表示 (赤矢印)、サンプルグレーティングとのそれらの視差方向は $\pm 45^\circ$ から 0° に設定、(B) グレーティングの視差軸に投影して示したプレードの視差 (点線で表示)、プレードはグレーティングの初期位置から移動し、斜め黒色実線はグレーティングの視差軸と垂直に交わりプレードの視差量を示す。3 つのプレードの視差は D および $D \cdot \cos(\theta_g - \theta_p)$ で表される (θ はグレーティングとプレードと視差の交わる角度) で、グレーティングの視差軸に沿う視差の相対的大きさは、3 通りでプレードより遠くなる、プレードより近くなる、そしてプレードと同等になることを予測するが、しかしプレードのうち 2 つの水平視差は同等である (Farell & Ng 2019)。

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。図の A には、サンプルグレーティングの視差ベクトル (青矢印)、および 3 通りのプレード (plaid) の格子縞に対する視差量を表示 (赤矢印) し、サンプルグレーティングとのそれらの視差方向は $\pm 45^\circ$ から 0° に設定した場合、図の B のようにグレーティングの視差軸に投影して示したプレードの視差 (点線で表示) はグレーティングの初期位置から移動し、グレーティングの視差軸と垂直に交わりプレードの視差量 (斜め黒色実線) となる。3 つのプレードの視差は D および $D \cdot \cos(\theta_g - \theta_p)$ で表される (θ はグレーティングとプレードと視差の交わる角度) で、グレーティングの視

差軸に沿う視差の相対的大きさは、3通りすなわち「プレードより遠くなる」、「プレードより近くなる」、そして「プレードと同等になる」ことを予測するが、しかしこのプレードのうち2つの水平視差は同等である。一つの刺激が1次元、他の刺激が2次元の場合、奥行知覚ばかりでなく視差量によって奥行量にも影響する。2次元刺激同士の場合、水平方向の相対視差がステレオ視による視えの奥行を決めるが、しかし、1次元と2次元刺激の場合には水平視差量はステレオ視による奥行には何らの役割を果たさない。この場合の視えの奥行は2つの視差ベクトル間の差によって決められる。1次元刺激の視差は方向に条件付けられ、2次元刺激の視差は水平が主となるものの、垂直、斜めのいずれの方向にも可能であり方向に条件付けられてはいない。

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。ステレオグラムのターゲット刺激と比較刺激の視差設定は、図17に示したように、5点刺激の中央に置かれたターゲット刺激はプレード (A)、ターゲットの視差 (点線表示) は 45° あるいは -135° 軸で変化させた。また、4通りの固定された比較刺激の視差はターゲット視差に対して直角 (B)、平行 (C)、直角と平行の混在 (D) とし、



に、5点刺激の中央に置かれたターゲット刺激はプレード (A)、ターゲットの視差 (点線表示) は 45° あるいは -135° 軸で変化させた。また、4通りの固定された比較刺激の視差はターゲット視差に対して直角 (B)、平行 (C)、直角と平行の混在 (D) とし、直角をとる比較刺激の視差 10° (短い矢印) および 20° (長い矢印) とした。また対角線のひとつにそった刺激群 (灰色の楕円で表示) は「関連する比較刺激」とし、それ以外は「無関連の比較刺激」として設定した。ターゲットはグレイ

ティング (1次元刺激) の他にプレード (2次元刺激) とし、その視差は試行ごとに変えられ、また比較刺激の視差は試行ブロックで固定された。被験者 (5人) には中央のターゲット刺激と周辺の「関連する比較刺激」 (比較刺激は2つとも同一の視差をもつひとまとまりとして知覚できる) を比較させ、「無関連の比較刺激」を無視するように教示して、どちらが手前に知覚されるかを求めた。2組の対角線の比較刺激のなかで「関連する比較刺激」

がどれかは実験をスタートする前に指示し試行ブロック中は固定された。ターゲットの視差は奥行検出閾の範囲内で5通りを選び試行ごとに変えられた。注視点と水平・垂直のノウスラインの提示後にターゲットと比較刺激のステレオグラムが左右眼別々のCRTスクリーンに176ms提示された。

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のPSEは、「関連する比較刺激」のブレードがターゲット刺激に対して平行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のPSEは、「無関連の比較刺激」のブレードがターゲット刺激に対して平行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、ターゲットがブ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、それが平行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 (1次元あるいは2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2次元の「関連する比較刺激」と2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つには関連するとしないと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

ON と OFF チャンネルとは輝度の増あるいは減に個別に応じるステレオチャンネルで初期視覚の神経生理的基板となるものとして提唱された (Harris & Parker 1995)。図1にみられるように、立体視できるランダムドット・ステレオグラムが左右に高低をもつ2つの領域に分けられしかもガウス関数分布の一定の標準偏差のノイズ視差がドットに与えられているとき、刺激パターンが等しい個数の白・黒のドットで構成されている方が白のみあるいは黒のみのドットで構成されたステレオグラムより両領域の高低差を観察者はより容易

に識別できる (図 1 の A、B、C)。このことが生起するのは、Harris & Parker(1995)によれば、ランダムドット・ステレオグラムの視差対応の検出に際しドットの白が他眼の白のみ、黒が他眼の黒のみに対応しているので、そのノイズ刺激が白と黒のドットの場合には、白

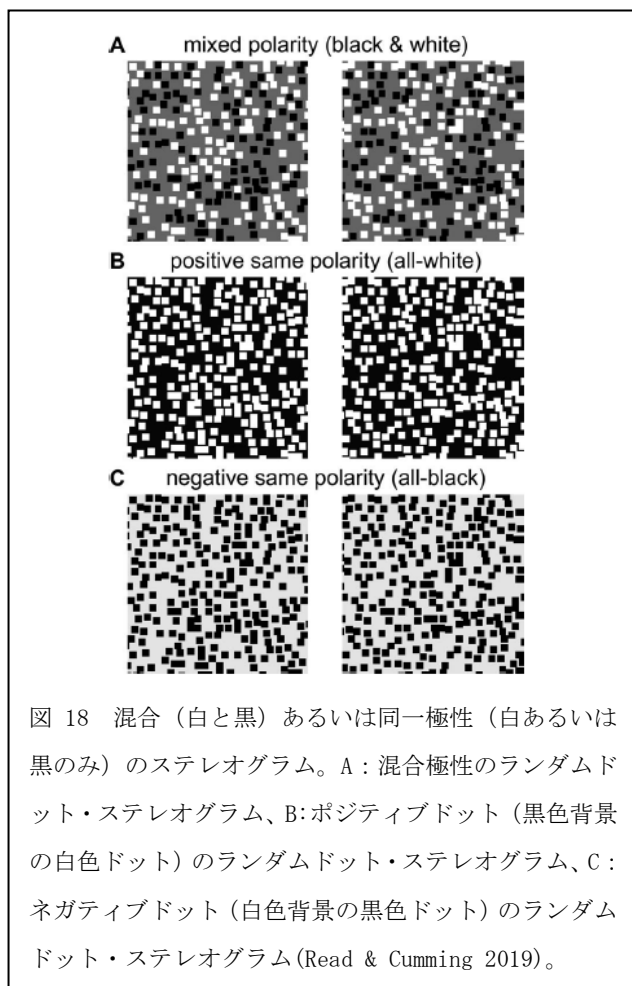


図 18 混合 (白と黒) あるいは同一極性 (白あるいは黒のみ) のステレオグラム。A: 混合極性のランダムドット・ステレオグラム、B: ポジティブドット (黒色背景の白色ドット) のランダムドット・ステレオグラム、C: ネガティブドット (白色背景の黒色ドット) のランダムドット・ステレオグラム(Read & Cumming 2019)。

と白、あるいは黒と黒よりも対応点の検出エラーの確率は半分となり、ノイズが白・黒のドットで構成されているステレオグラムの方が立体視成立の可能性が高くなると考えた。この場合、白・黒のドットは視覚システムの初期過程で別々のチャンネルで検出されるはずとした。V1野での視差検出は複雑型細胞に関する視差エネルギーモデル(Ohzawa et al. 1990)によって説明されてきた。Doi et al. (2011, 2013, 2014) は黒いドットは白いドットと対応しないことを精神物理的データで示している。視差エネルギーモデルによれば、ステレオグラムの背景が灰色でドットが黒の場合あるいは背景が灰色でドットが白の場合の視差検出は同等となる。これらの結果は、いずれも Harris & Parker (1995)の結果を裏付けているが、その神経生理的実態は不明であるが、しかし Read et al. (2011)が示したように、両眼結合以前では単眼入力

が半波整流と仮定すれば、視差ニューロンは ON あるいは OFF ニューロンのチャンネルからのみ入力される。もし、ON と OFF チャンネルがステレオ対応のアルゴリズムにおけるように別々のものとしても、これらのチャンネルは視差検出のための個別な評価値を与えないと考えられる。Goncalves & Welchman(2017)は、ステレオグラムの明るさにおける混合極性条件が立体視を促進する結果のシミュレーションモデルを提示した。それによると、これは畳み込みニューラルネットワーク(convolutional neural network)を仮定し Binocular neural network とよばれる。ステレオグラムの混合極性の有利点をネットワークが単一ユニットが読み出した検出値によるからと説明する。「混合」対「同一極性」の刺激を与えられた場合、それらは単一ユニットの活動性を高め、次に複雑ユニットに興奮と抑制として渡す。この場合、混合刺激は当該のユニットに対してより強い興奮を、また非当該のユニットに対して抑制を増大する。しかし、これはもともとのエネルギーモデルを一般化したも

のに過ぎなく、ドットとドットの対応を両眼間対応による反応よりコントラストに対する反応に置き換えたものである。この批判にもかかわらず、Harris & Parker (1995)によって報告された結果は明確なものであるが、ステレオグラムのドットを相互にオーバーラップした刺激ではもはや混合極性のメリットが失われることが報告された(Read et al. 2011, Goncalves & Welchman 2017)。

そこで、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と考えて、これを検証するシミュレーション実験を実施した。図 19 は、オーバーラップをもつドットの視差ノイズが両眼間対応を崩壊させることを示すグラフで、その程度を混合極性と同一極性(白

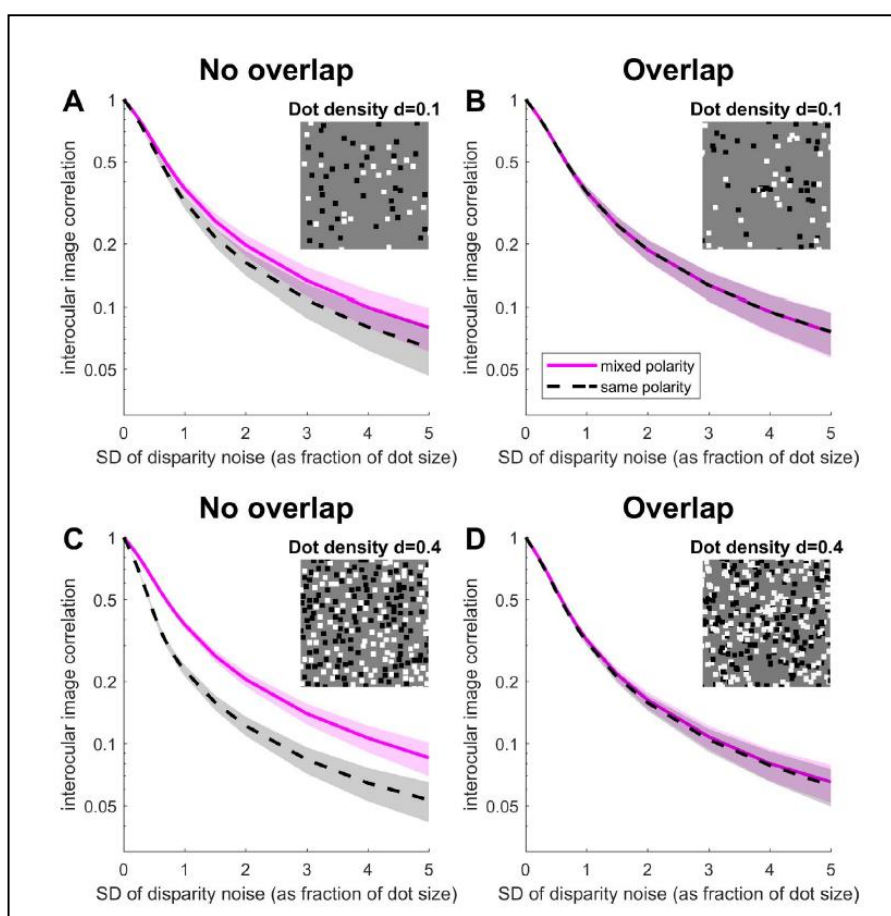


図 19 オーバーラップをもつドットの視差ノイズは両眼間対応(縦軸)を崩壊させることを示すグラフで、その程度を混合極性と同一極性(白あるいは黒ドット)で比較。グラフは視差ノイズ(ドットの大きさを変えた条件でのガウス関数型のノイズ分布の標準偏差(SD)、横軸)によって両眼間対応の変化がどのようになるかを表す。グラフの曲線は両眼間の対応を示す相関係数で100個以上のドットに基づく平均値である。挿入パターンは混合極性の例示で、ドット密度は低(A、B)、高(C、D)である(Read & Cumming 2019)。

性と同じ極性(白あるいは黒ドット)で比較した。このシミュレーショングラフは視差ノイズ(ドットの大きさを変えて条件でのガウス関数型のノイズ分布の標準偏差(SD))によって両眼間対応の変化がどのようになるかを表す。グラフの曲線は両眼間の対応を示す相関係数で100個以上のドットに基づく平均値である。挿入パターンは混合極性の例示で、ドット密度は低(A、B)、高(C、D)である。図 20 は、混合と同一極性におけるステレ

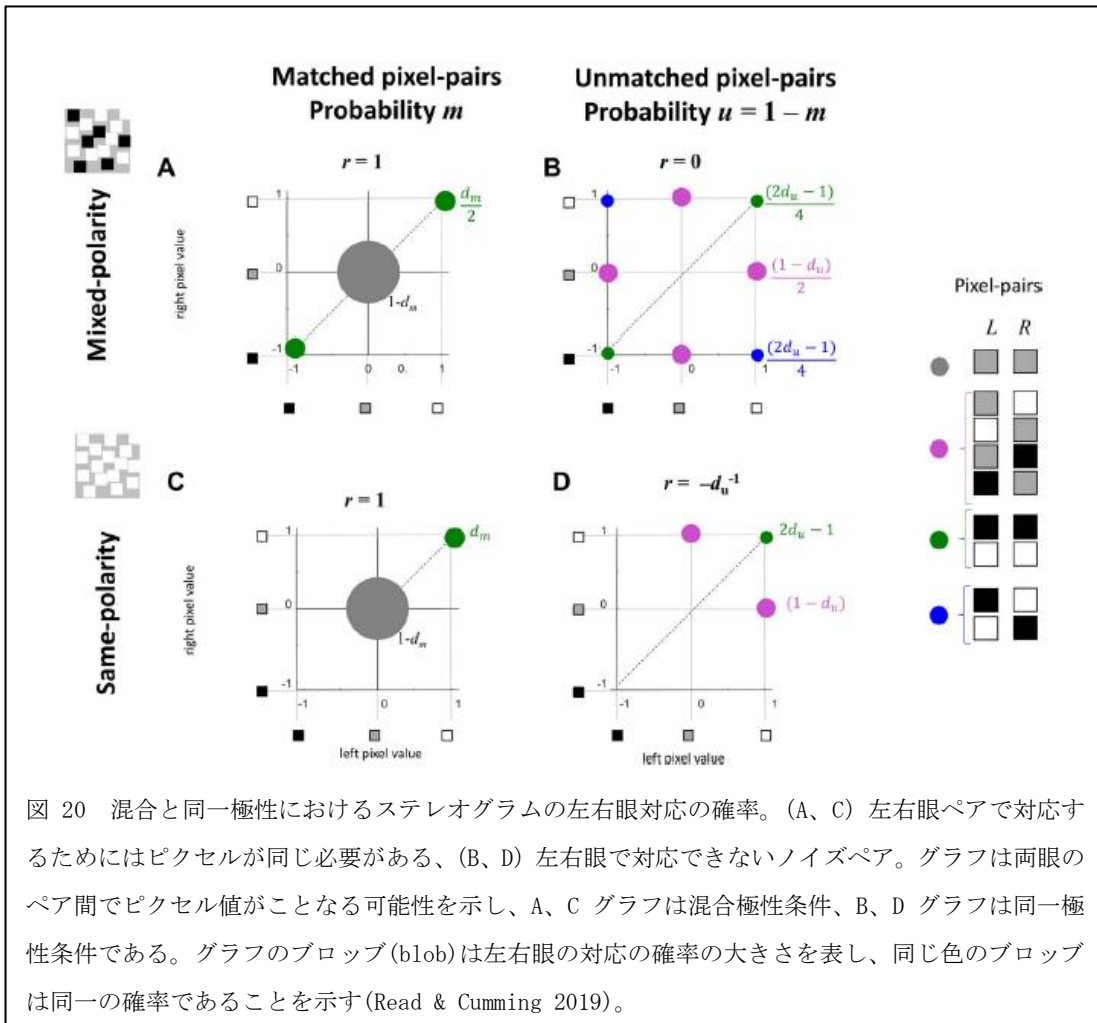
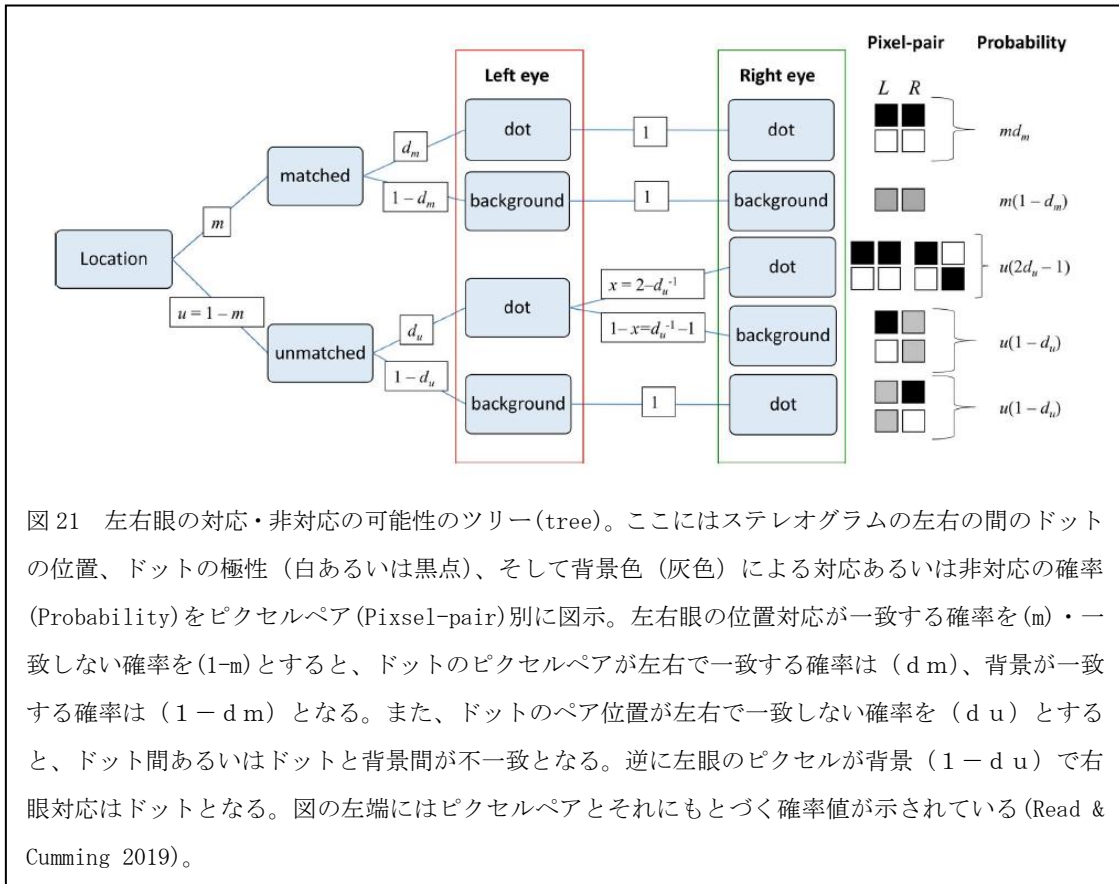


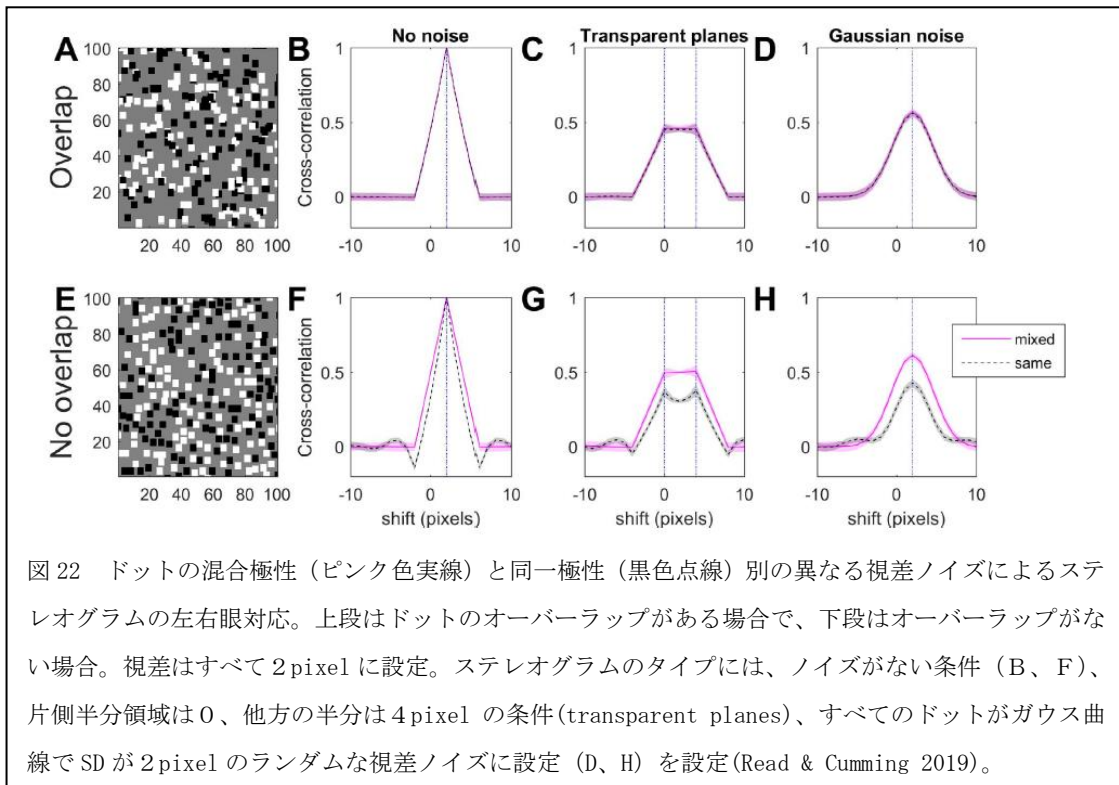
図 20 混合と同一極性におけるステレオグラムの左右眼対応の確率。(A、C) 左右眼ペアで対応するためにはピクセルが同じ必要がある、(B、D) 左右眼で対応できないノイズペア。グラフは両眼のペア間でピクセル値がことなる可能性を示し、A、C グラフは混合極性条件、B、D グラフは同一極性条件である。グラフのブロッブ(blob)は左右眼の対応の確率の大きさを表し、同じ色のブロッブは同一の確率であることを示す(Read & Cumming 2019)。

オグラムの左右眼対応の確率を示す。グラフ (A、C) は左右眼ペアで対応するためにはピクセルが同じ必要があることを、グラフ (B、D) は左右眼で対応できないノイズペアの場合である。グラフは両眼のペア間でピクセル値が異なる可能性を示し、グラフ (A、C) は混合極性条件、グラフ (B、D) は同一極性条件である。グラフのブロッブ(blob)は左右眼の対応の確率の大きさを表し、同じ色のブロッブは同一の確率であることを示す。図 21 は、左右眼の対応・非対応の可能性をツリー(tree)で示している。ここにはステレオグラムの左右の間のドットの位置、ドットの極性 (白あるいは黒点)、そして背景色 (灰色) による対応あるいは非対応の確率(Probability)をピクセルペア(Pixel-pair)別に図示した。左右眼の位置対応が一致する確率を(m)・一致しない確率を($1-m$)とすると、ドットのピクセルペアが左右で一致する確率は (d_m)、背景が一致する確率は ($1 - d_m$) となる。また、ドットのペア位置が左右で一致しない確率を (d_u) とすると、ドット間あるいはドットと背景間が不一致となる。逆に左眼のピクセルが背景 ($1 - d_u$) で右眼対応はドットとなる。図の左端にはピクセルペアとそれにもとづく確率値が示されている。シミュレーション実験でステレオグラムにおけるドットの混合極性と同一極性の左右眼対応をみたグラフが図



22 である。これは、視差ノイズのタイプを変えたときのドットの混合極性 (ピンク色実線) と同一極性 (黒色点線) の左右眼対応の結果で、図の上段はドットのオーバーラップがある場合、下段はオーバーラップがない場合である。視差はすべて 2 pixel に設定、ステレオグラムのタイプには、ノイズがない条件 (B、F)、片側半分領域は 0、他方の半分は 4 pixel の条件 (transparent planes)、そしてすべてのドットがガウス曲線で SD が 2 pixel のランダムな視差ノイズ条件 (D、H) である。図 22B から明らかなように、ドットのオーバーラップがある場合には、ドットの混合極性と同一極性条件ともに左右対応は視差上に正確になされるが、オーバーラップがない場合には同一極性条件でネガティブな対応部分が生起する (図 22F)。ここで注目すべきは混合極性条件ではネガティブな対応部分が生起しないことである。これは、当該のドットの隣接は背景の灰色になる可能性が高いので白あるいは黒点と対応する可能性が少なくなるためである。このように、複数の視差をもつステレオグラムの場合 (図 22C、G) あるいはガウス型のノイズをもつステレオグラムの場合も同様で、ドットのオーバーラップ条件はネガティブな対応領域を減ずるように作用する。

これらの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よう。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き、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。

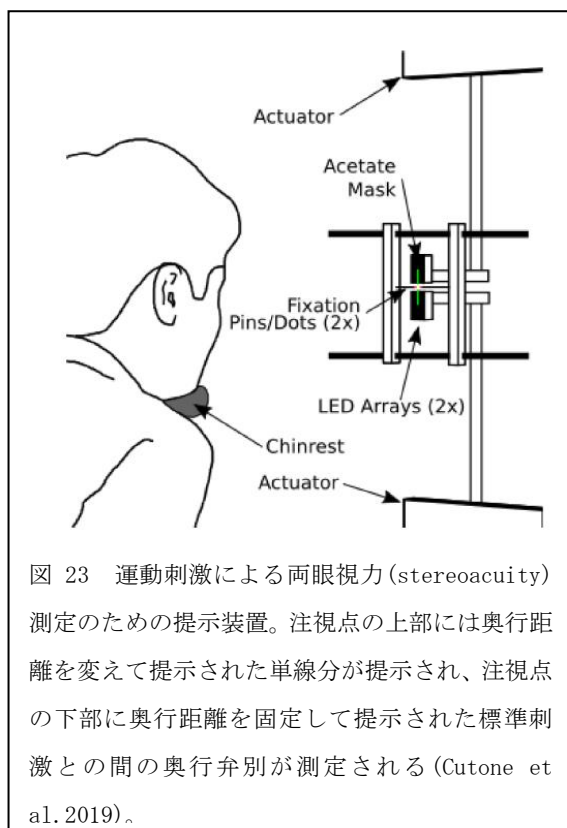
結局、このシミュレーション実験からはステレオグラムにおいては独立した ON と OFF チャンネルを支持する証拠は得られなかったと言える。

物理的運動刺激による両眼立体視力の測定

頭部や眼球、あるいは対象が動くと網膜イメージはある種のボケを生じさせ、高周波成分を減衰してその明るさコントラストと視認性を減じ、視覚システムには解像度の悪い低周波成分である速い低帯域に依存するようにさせる。しかし、このような運動に伴うイメージモーションは副尺視力やステレオ視力にみられるような超高度の視力 (hyper acuity) を生起させる。Westheimer and McKee (1978) は、高周波帯域の線刺激を動かしてステレオ視力を測定したところ、0 から 2.5 ($\text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$) の速度範囲でステレオ視力は一定の値を示した。Ramamurthy, Bedell, and Patel (2005) は、同様に、高帯域のターゲットでステレオ視力を網膜速度が $12 \text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$ までの範囲で測定し、 $3 \text{deg} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度を超すとステレオ視力は急速に増大することを示した。これは網膜のボケ (blur) が増大して視差チャンネルでの検

出が粗くなるためと考えられた。これまでの研究をとおして網膜上を動く刺激のステレオ視力は $2.5 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$ までは影響されないが、その速度を超えた場合については不確しかで明らかにされていない。ディスプレイにターゲットをシミュレートして提示する場合、物理的ターゲットを動かす場合には生じないアーチファクト、すなわち、刺激がストロボ提示になること、眼球間の遅延が時間視差を生じること、刺激のリフレッシュレートが影響することなどが自然シーンのターゲットとは異なる。

そこで、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、図 23 のような運動刺激による



ステレオ視力 (stereoacuity) 実験装置を用いて測定した。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る。この 2 つの線分は一致して前額平行に $0, 2, 4, 8, 16 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$ の速度で動かし、その方向は試行毎にランダムに決められた。被験者 (5 人) には上方のターゲット線分と下方のレファレンス線分の遠・近関係を比較させ報告させた。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、フリッカー照明のステレオ視力への影響がそれぞれ検討された。

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 ($0, 2, 4, 8, 16 \text{ deg} \cdot \text{s}^{-1}$) が変化しても有意にリニアで安定、(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が縮減すると、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、(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 ($10, 20, 40, 80, 120, \text{ and } 190 \text{ ms}$) を変えた場合、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ること、(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 50 cm 、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ィスプレイ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、(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になること、をそれぞれ示した。

これらの結果は、シミュレートされたターゲット刺激を用いた従来の研究では、ステレオ視力は対象の運動速度が 3 deg·s⁻¹ を越えると急激に悪くなったが、今回の実験のように自然界における同じように運動する物理的なターゲット刺激を用いると、そのステレオ視力は、運動速度が 16 deg·s⁻¹ までは一定であることが示された。この場合、運動刺激が提示された当初に急速に奥行弁別のシグナルである視差が検出されるために運動速度の変化に関わらずにターゲットの奥行弁別が可能と考えられる。

離心率に伴う両眼視差(disparity)の上限閾値の増大

両眼視力(stereoacuity)は視差の差を識別できる最小の閾値をいい、青年の立体視力の

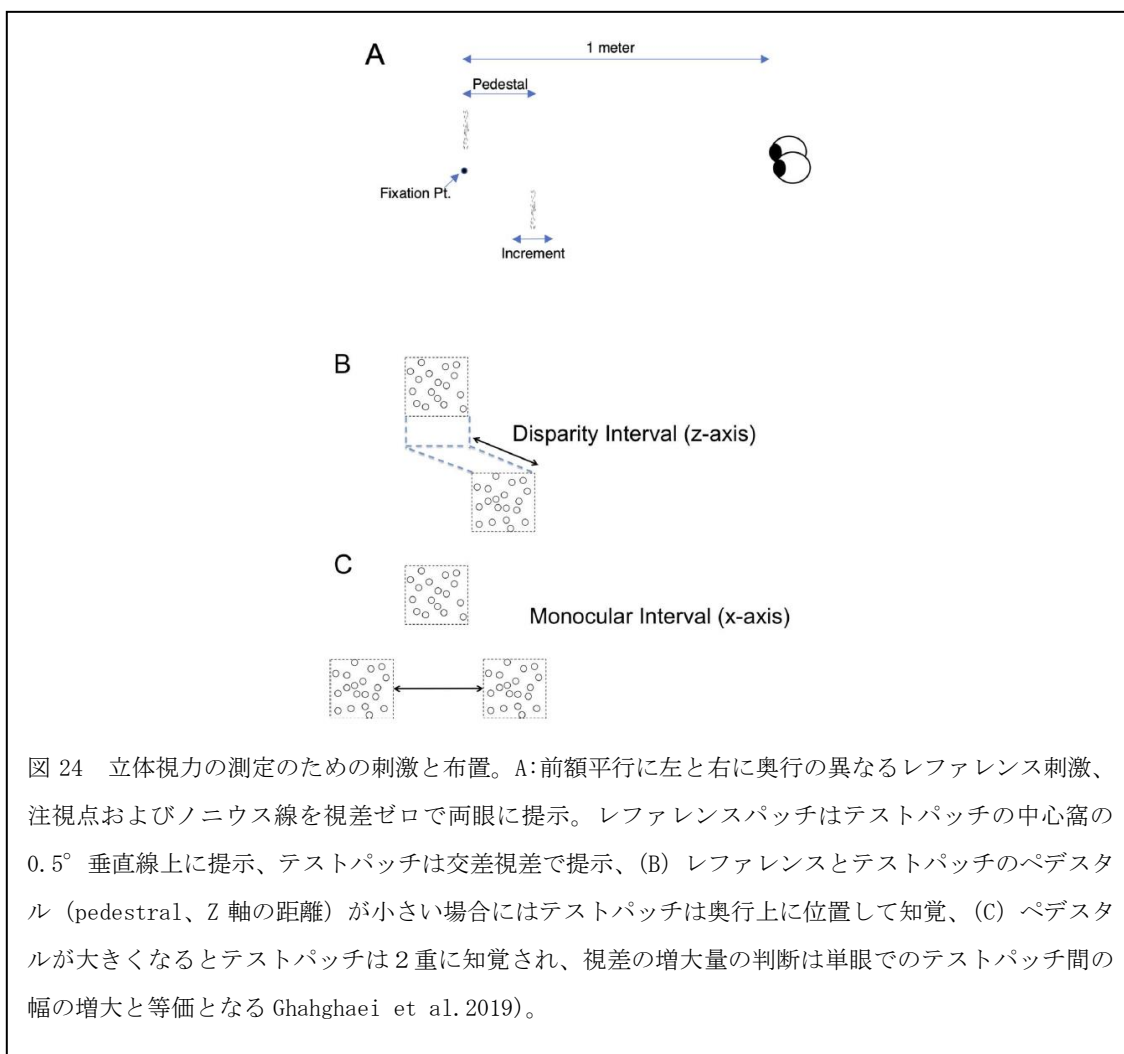


図 24 立体視力の測定のための刺激と布置。A:前額平行に左と右に奥行の異なるレファレンス刺激、注視点およびノニウス線を視差ゼロで両眼に提示。レファレンスパッチはテストパッチの中心窩の 0.5° 垂直線上に提示、テストパッチは交差視差で提示、(B) レファレンスとテストパッチのペDESTAL (pedestral、Z 軸の距離) が小さい場合にはテストパッチは奥行上に位置して知覚、(C) ペDESTAL が大きくなるとテストパッチは 2 重に知覚され、視差の増大量の判断は単眼でのテストパッチ間の幅の増大と等価となる Ghahghaei et al. 2019)。

中央値(median)は約 12arcsec (Coutant & Westheimer, 1993)であり、訓練した被験者では半分の値になる(Howard, 1919)。立体視力は中心窩で高く、離心率の増大とともに悪くなり、離心率 10 度で中心窩の 8 から 10 倍に悪くなる (Blakemore, 1970; Fendick & Westheimer, 1983; Ghahghaei, et al. 2016; McKee, et al. 1990)。

Ghahghaei et al. (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。立体視力の測定のための刺激と布置は図 24 のように、前額平行に左と右に奥行の異なるレファレンスとテストパッチを提示し、注視点およびノニウス線を視差ゼロで両眼に提示。レファレンスパッチはテストパッチの中心窩の 0.5° 垂直線の上に提示し、両パッチとも離心率は 0° 、 5° 、 10° の位置にそれらの垂直上の中点が注視点から設定した離心率の距離に位置するように配された。また、テストパッチは交差視差で提示した (図 A)。レファレンスとテストパッチのペDESTAL (pedestal、Z 軸の距離) が小さい場合にはテストパッチは奥行上に位置して知覚され (図 B)、ペDESTALが大きくなるとテストパッチは2重に知覚され、視差の増大量の判断は単眼でのテストパッチ間の幅の増大と等価となる (図 C)。実験では立体視力(stereoacuity)を測定するのではなく、レファレンスパッチを固定した距離に提示し、テストパッチの視差をペDESTALにとったときの奥行の前後の知覚判断を求めた。実験 1 では、はじめに被験者毎にテストパッチの視差を $PD \pm 2D$ 、 $PD \pm D$ 、 PD に決めた (PD : pedestal disparity, D : disparity、実験者が決めた視差でチャンスレベルと 100%正しいパフォーマンスの間で設定)。レファレンスは注視点に視差ゼロで提示しテストパッチはペDESTAL分の視差を付けてステレオ視で提示し、被験者(2人)にはテストパッチの大きさを当該ブロック試行の平均視差より大きいか小さいかをキー押しで求めた。実験 2 では、同一の刺激事態を単眼視させ、2つのパッチ間の分離距離が当該ブロックの平均分離距離より大きいか小さいかをキー押しで求めた。

図 25 には離心率の変化に伴う閾値(立体視条件と単眼視条件)の増大をグラフで示した。縦軸はテストパッチが2重に知覚される境の閾値(青印)および単眼視条件による2つのパッチの分離知覚の閾値(赤印)(上段は被験者1、下段は被験者2)。左端のコラムから離心率 0° 、 5° 、 10° の結果を示す。グラフから、離心率 10° の立体視閾値は中心窩のその2から4倍となること、また離心率の増大に伴う閾値の増大はパヌムの領域と同じように狭いことが示された。

離心率が増しても、立体視のための視差量の上限は比較的小さいことから、周辺視によるステレオプシスの潜在可能性が示唆された。黄斑変性症(macular degeneration)は視野の上部の盲点にしばしば位置するので立体視を視野の下部で行うように変わる。そこで、広い立体視を可能にする視野の経線に沿った特殊な領域があるか否かを実験した。測定された部位は、離心率の 0° 、 5° 、 10° 、経度の左、右、下部垂直、下部左、下部右8箇所であった。実験は実験1、2と同一の刺激布置、すなわちレファレンスパッチをテストパッチの垂直上部に提示し、刺激の離心を注視点とレファレンスパッチ/テストパッチの垂直の中点との間の距離に設定した。6人の被験者にはキー操作でテストパッチの視差

を二重だが、しかし立体視可能まで増大し、さらに立体視できないまで増大することを、次にテストパッチの視差が二重だがしかし立体視可能まで視差を減じることを求めた。

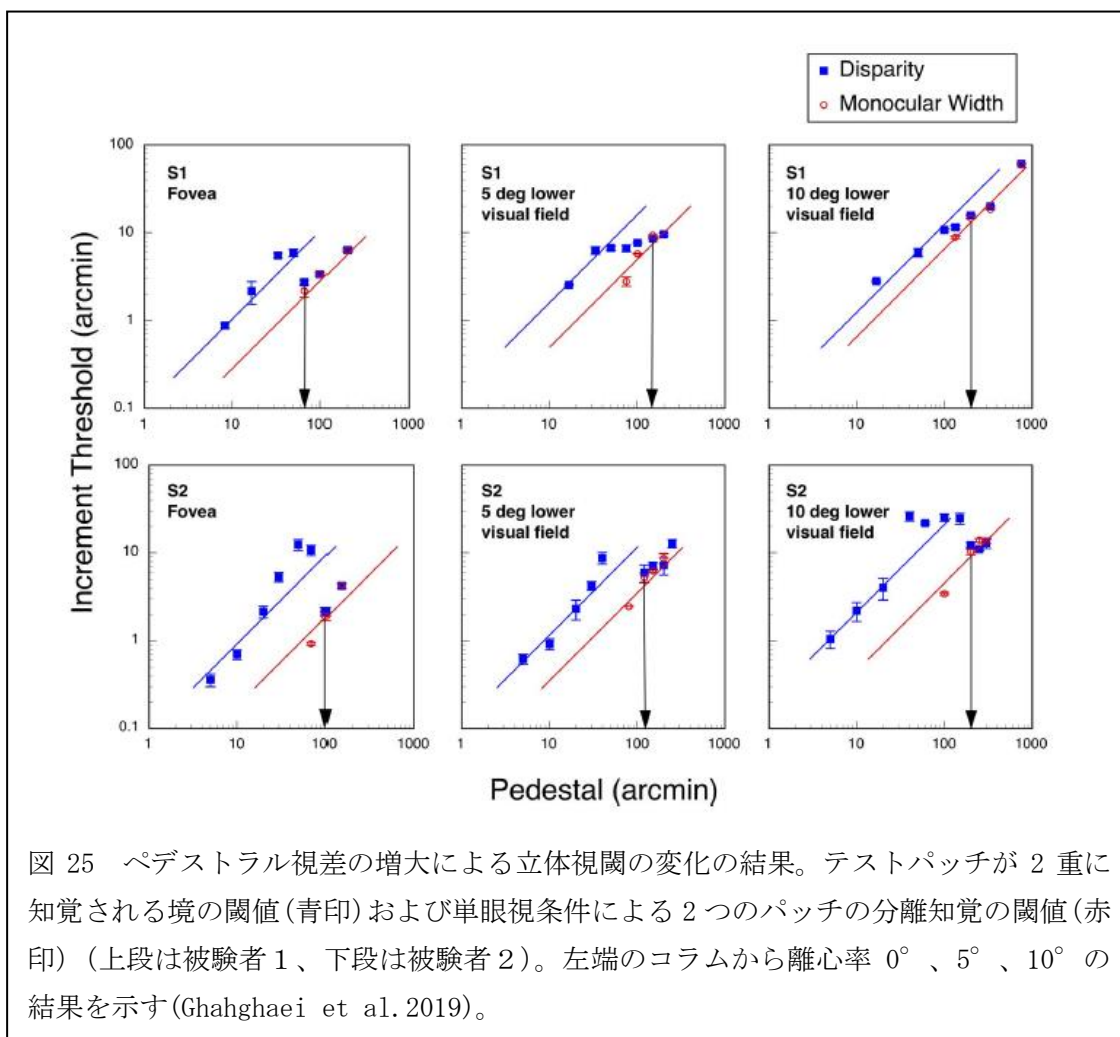


図 25 ペDESTRAL視差の増大による立体視閾の変化の結果。テストパッチが 2 重に知覚される境の閾値(青印)および単眼視条件による 2 つのパッチの分離知覚の閾値(赤印) (上段は被験者 1、下段は被験者 2)。左端のコラムから離心率 0° 、 5° 、 10° の結果を示す(Ghahghaei et al. 2019)。

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視える視差は融合し奥行をもつが二重に視えるものよりは大きく、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ほぼ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

立体視が良好な被験者は水平視差に対する 250ms までの事象関連電位 (ERPs) に特異的に反応する (Fahle et al. 2003; Julesz et al. 1980; Spang et al. 2012)。この種の神経生理的反応は、すべての視覚野、すなわち V1 (Prince et al. 2002)、V2 (Hubel et al. 2015)、

V3、V3a(Backus et al. 2001; Tsao et al. 2003)、V4(Brouwer et al.2005; Durand et al, 2009)4、MT(Uka & DeAngelis, 2004; Joly et al. 2009)から発生する。垂直視差は3次元スラント（前額平行軸での奥行傾き）の手がかりであることは確かめられている(Rogers & Bradshaw, 1993; Kaneko & Howard, 1996)が、この神経生理的反応についてのこれまでの研究では一貫せず、3次元奥行を生じさせない垂直視差によるERP（脳磁図）の反応が弱いとする(Norcia et al., 2017; Avarvand et al.2017)報告から、3次元スラントを生じさせる垂直視差に明瞭に反応する報告(Mayhew & Longuet-Higgins, 1982; Serrano-Pedraza & Read, 2009)までである。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、立体視のしくみが視覚過程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、エピポーラ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た。そこで、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を利用してしらべられた。実験パラダイムは、図26に示されているように、出現するスラントの傾きを同じくした水平視差(HSR)と垂直視差(VSR)のランダムドットステレオグラム(A)とし、そのステレオグラムの提示順序を注視点1秒、注視点とステレオグラム2秒に設定し被験

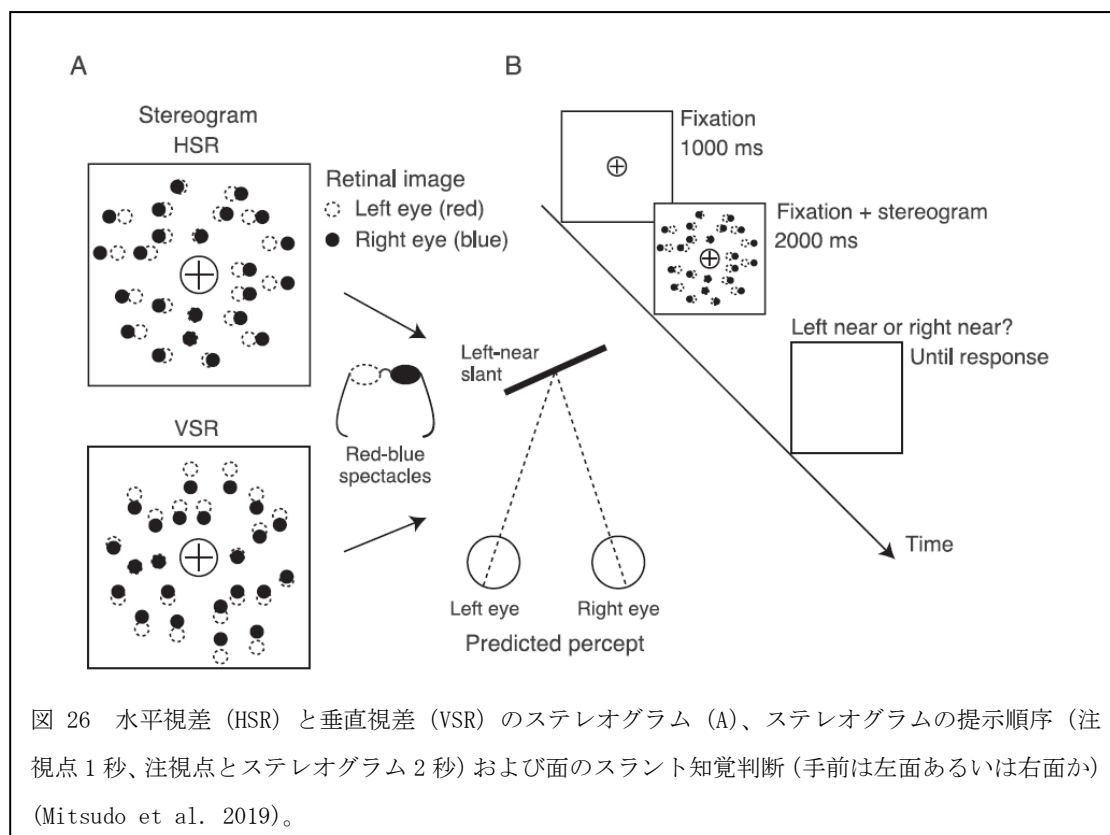


図 26 水平視差 (HSR) と垂直視差 (VSR) のステレオグラム (A)、ステレオグラムの提示順序 (注視点 1 秒、注視点とステレオグラム 2 秒) および面のスラント知覚判断 (手前は左面あるいは右面か) (Mitsudo et al. 2019)。

者には面のスラント知覚判断 (左面あるいは右面のどちらが手前か) を求めた。VSR の左右ステレオグラムの大きさ比は 1 対 1.05、HSR のそれは 1 対 1.025 に設定し、出現するスラ

ントの傾き度を VSR では 37° 、HSR では 21° を設定した。ステレオグラムはアナグリフ式で青と赤のフィルター眼鏡を通して提示した。ERP は後頭野にデュア (dewar) を装着して頭部と身体を動かさないように教示して測定した。被験者は 2 名の男性と 23 名の女性で年齢は 20 から 26 歳であった。

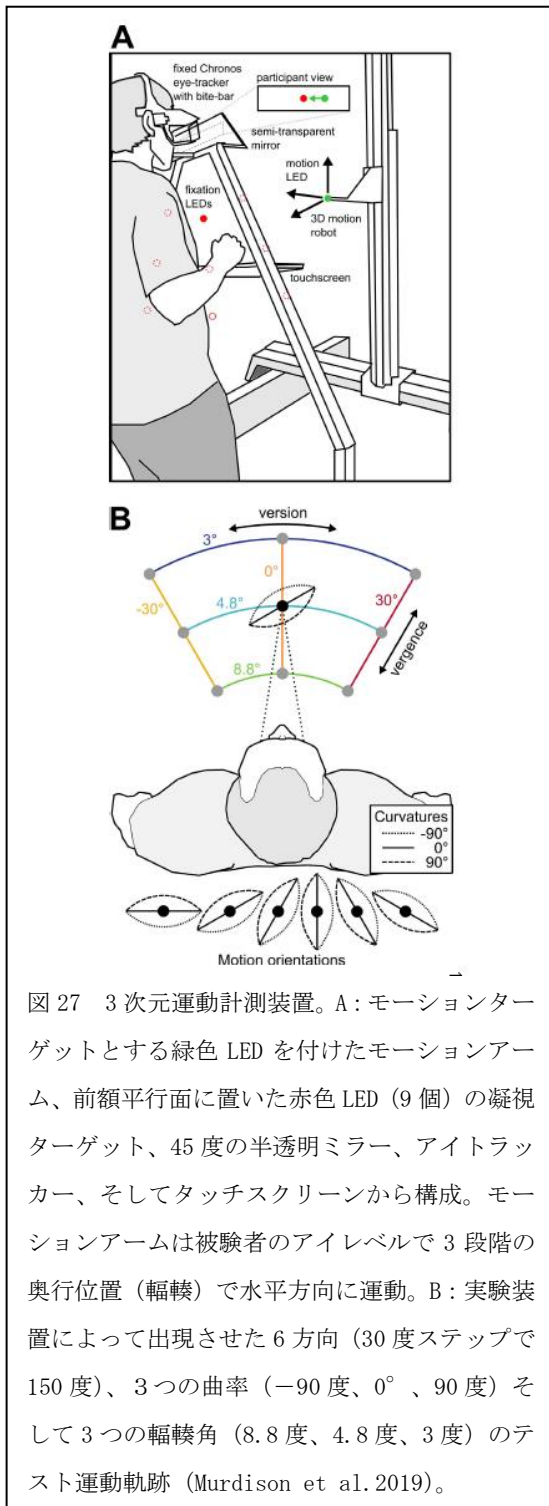
HSR 条件のスラント知覚判断の正誤の平均は 78%、VSR のそれは 60% で、両条件間には有意な相関がみられた。また、25 人の被験者は、HSR 条件のスラント知覚判断の正誤に基づいて正反応が 75% 以上をステレオ視が良好群 (13 名) に、それ以下を貧弱群 (12 名) にわけた。ERP の結果について被験者別に特定位相 (V1、V2、V3 領域) の神経発火の強度が HSR と VSR 条件で求められた。その結果、神経発火の強度は、ステレオ視が良好群の場合、刺激後 230-600ms でみると VSR 条件の方が HSR 条件より有意に高く、特定位相に対応した神経発火がみられた。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 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の昂進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

投手が投げたボールをバッターが打つ場合、刻々と変わるボールの運動位置を 3 次元空間の座標に正確に視覚システムは位置づけねばならない。奥行方向と絶対距離の知覚には頭部と眼球の内的な幾何学モデルが必要で両眼視差と網膜外の 3 次元手がかり、とくに眼球輻輳の手がかりからその知覚距離が推測される。同様に、奥行方向の運動知覚でも網膜イメージからその空間方向を正しく推測するために注視角度が必要となる。奥行の運動手がかり (motion-in-depth) には単眼的と両眼的がある。単眼の手がかりには、網膜イメージ特徴 (陰影、テクスチャ、ボケ、パースペクティブ、オプティカルの拡大縮小、キネティックデプス、運動視差など)、眼球調節がある。両眼の手がかりには、網膜視差、両眼間速度差、視差の時間的変化、輻輳、アングルの変化などがある。視覚システムは、これらの手がかりから頭部と眼球の 3 次元の位置関係を推測していると考えられるが、これらの網膜外と網膜内の手がかりを網膜の運動刺激と関係させて 3 次元の座標にどのように変換されるのかは不明である。

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眼球の異なる輻輳 (vergence) 条件あるいは向き (version) 条件下でしらべた。実験は、図 27 に示した 3 次元運動計測装置を用いた。この装置はモーションターゲット (MY) とする緑色 LED を付けたモーションアーム、前額平行面に置いた赤色 LED (9 個) の凝視ターゲット (FT)、45 度の半透明ミラー、アイトラッカー、そしてタッチスクリーンから構成された (図 A)。モーションアームは被験者のアイレベルで 3 段階の奥行位置 (輻輳) で水平方向に運動できる。テスト運動軌跡は実験装置によ



って 6 方向 (30 度ステップで 150 度)、3 つの曲率 (-90 度、0°、90 度) そして 3 つの輻輳角 (8.8 度、4.8 度、3 度) を設定した。FT は 45 度のハーフミラーを通してアイレベルと同じ位置に提示し、被験者が MT と同一の奥行面に知覚できるように位置される。被験者の眼球間距離を 6.5cm とすると、被験者からの奥行距離は 42cm (vergence angle 8.8 度)、78cm (vergence angle 4.8 度)、124cm (vergence angle 3 度) となる 3 通りの奥行面に 18 通りの異なる軌跡 (0 度から 180 度の間で 6 通り × 3 通りの曲率) で FT の周囲に MT を動かした。被験者には、まず、ランダム位置に提示される 9 通りの中からの FT を 500ms 凝視させ、モーションアームによって動かされた MT を凝視 (FT) を続けながら 1500 から 3200ms 観察させる。MT の奥行方向の角度は 6 通り (0°、30°、60°、90°、120°、150°) に設定、またその方向は手前あるいは遠ざかるように動かした。MT は視野の中心あるいは周辺のどちらかで移動させ、被験者には周辺視条件でも中心の凝視を維持するように求めた。この後、被験者に記憶した MT 対象の運動軌跡をタッチスクリーンに再現するように求めた。

このように再生された運動軌跡は眼球の version (gvs) と vergence (gvg) の逆投影モデルと奥行方向の純粋な運動から生成されたモデル (図 28) で説明できる。

そこで、網膜シグナルを手がかりに対象の運動軌跡を再生させた時、眼球の version と vergence は奥行方向の運動知覚をどのよう

に変わ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の存在を反映したもので、この知覚のエラーは、符号化したターゲット、眼球そして頭部からなる 3D レファレンスモデルに運動知覚

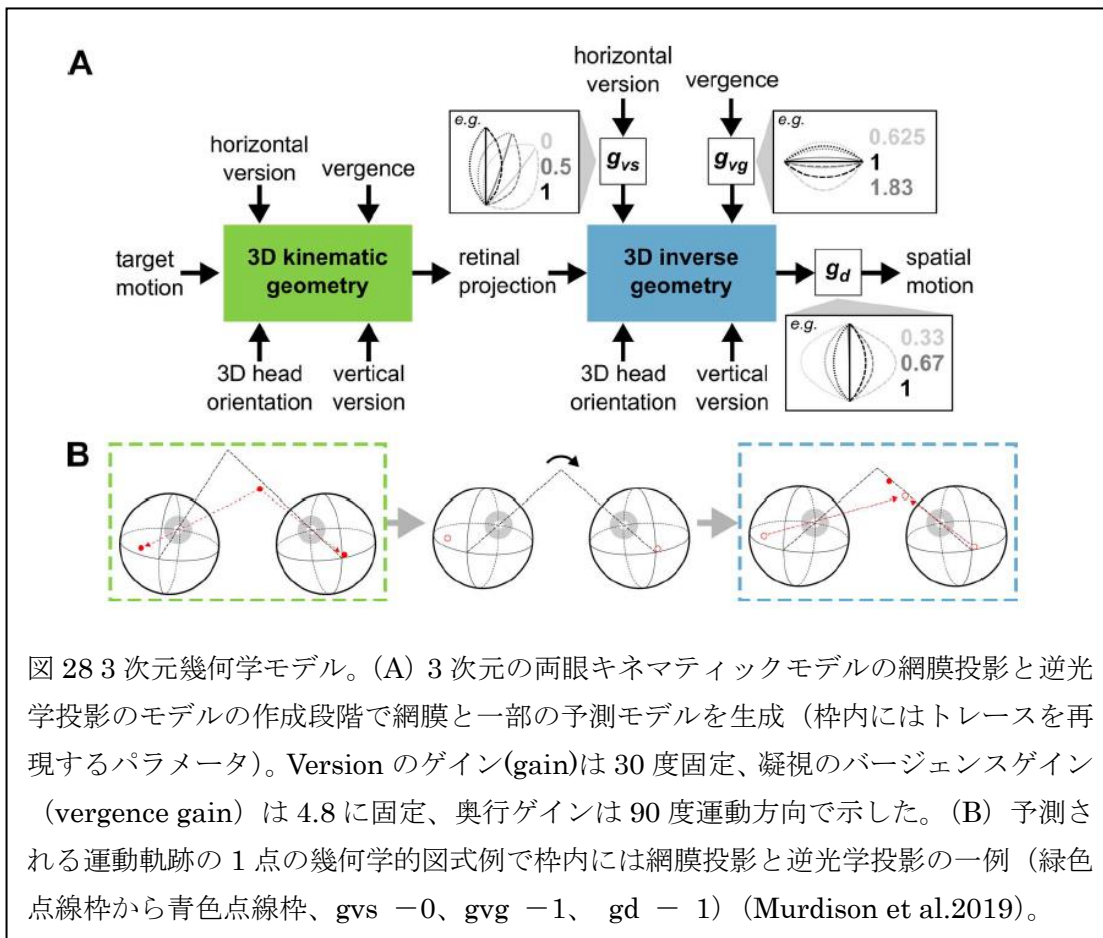


図 28 3次元幾何学モデル。(A) 3次元の両眼キネマティックモデルの網膜投影と逆光学投影のモデルの作成段階で網膜と一部の予測モデルを生成（枠内にはトレースを再現するパラメータ）。Version のゲイン(gain)は 30 度固定、凝視のバージェンスゲイン (vergence gain) は 4.8 に固定、奥行ゲインは 90 度運動方向で示した。(B) 予測される運動軌跡の 1 点の幾何学的図式例で枠内には網膜投影と逆光学投影の一例（緑色点線枠から青色点線枠、 $g_{vs} = 0$ 、 $g_{vg} = 1$ 、 $g_d = 1$) (Murdison et al.2019)。

を照合し、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%過小視がそれぞれ起きると計算できた。

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、両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。

デジタルテストによる両眼視力の測定

Tittesa et al. (2019)は、弱視の両眼立体視能力を測定するテストを開発した。これはデジタルな手法のテストで片眼が弱視の被験者（斜視をもつ者および持たない者、4歳から59歳の27名）を対象にして、健常者（34名）との両眼立体視測定の精度が比較された。両眼立体視の測定はスクリーンに投影されたシャッターグラスを用い、被験者に4つの強制選択肢に答えさせた。デジタルテストの図形は、図 29(A)に示され、また単眼視で出現する図形 (B) はコントロール条件で立体視を理解させるために実験の冒頭で使用された。デジタルテストの有効性は現在市販されているアナグリフ式 TNO (Laméris Ootech)テストと比較することで検証できることである。デジタルテストと TNO テストで出現する立体はパイ形状である。パイ形状の内側は交差視差、外側は非交差視差とし、視差は左右眼の水

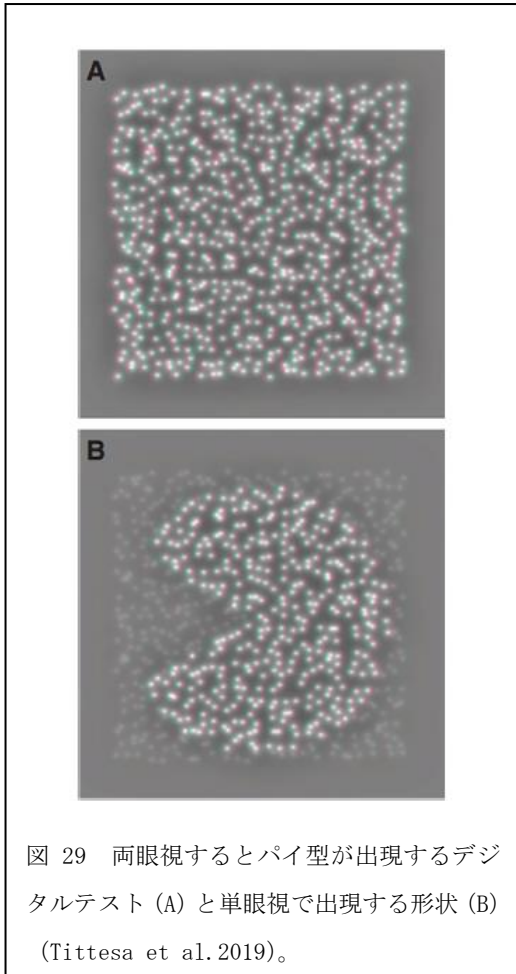


図 29 両眼視するとパイ型が出現するデジタルテスト (A) と単眼視で出現する形状 (B) (Tittesa et al. 2019)。

平方向で導入された。年長の被験者は音声でどの方向にギャップがあるかを答えるように、年少の被験者にはロボット、サル、少女、星を提示し、どれが 45 度傾斜したスライスを嚙っているかを答えさせた。TNO テストも同様な方法で実施した。視差は、上下法で 1 アップ 1 ダウン、あるいは 2 アップ 1 ダウンの方法で 1 ステップ 4096 arc/sec の幅で変えて提示した。

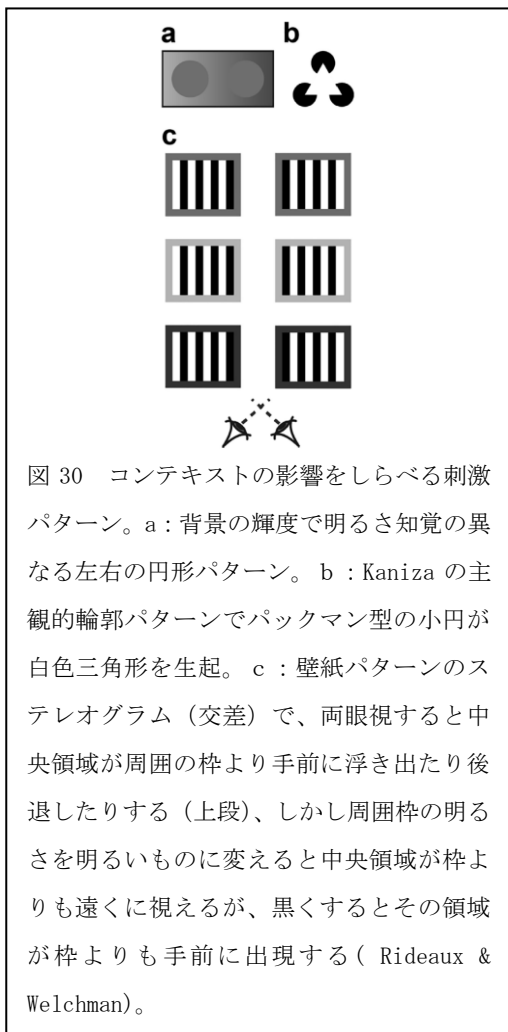
測定の結果、健常者におけるデジタルテストの立体視閾値は 11-160 arc/min、弱視者たちのそれは 43-911 arc/min であった。これらの閾値を従来の TNO 測定の数値と比較すると、ステレオ視力のレベルによって一致したりしなかったりした。しかし TNO 測定で立体視閾値測定の失敗した数名でもデジタルテストでは測定可能であった。反復信頼性は両グループでデジタルテストが高く、また低いステレオ視力の者にも少ない学習回数で可能であった。

このように、デジタルテストは、従来のテストに比較して試行回数や学習試行数が少なく済み、発達の長期にわたる立体視力の正確な測定に資すると考えられる。

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

大局的なコンテキストは局所的な視覚に影響する。例えば、図 30 に示したように、左右の円形パターンが背景の異なる輝度で明るさ知覚が違う場合 (図の a)、Kaniza の主観的輪郭パターンで周辺のパックマン型の小円が白色三角形を生起する場合 (b) である。さらに図の c の上段図のように、壁紙パターンのステレオグラム (交差) で、両眼視すると中央領域の白または黒ストライプのいずれが左右ペアでマッチングするかで背景となる周囲の枠より手前に浮き出たり後退したりする。これはストライプを囲む背景の明るさが中間色であるためである。しかし背景の明るさを明るいもの (中段図形) に変えると中央領域が背景よりも遠くに見え、黒くする (下段図形) とその領域が背景よりも手前に出現する。これは単眼手がかりである背景の明るさが白い場合には背景を手前に、黒い場合には背景をストライプの背後に定位するからである。同様なしくみによる多義的ステレオグラムと非多義的ステレオグラムが図 31 に示されている。多義的ステレオグラムは左図形に非多義



的ステレオグラムは右図形に示した。左右眼には矩形波のグレーティングが提示され、鼻側 (nasal) とこめかみ側 (temporal) の2通りのステレオマッチングがなされる。この場合、ステレオグラムの中心のパターン (青色点線の囲み) が遠あるいは近の知覚はどちらも可能となる。左図形の多義的ステレオグラムでは、背景の輝度が白と黒のストライプの中間に設定されているのでこれがエッジにも当てはまり背景が黒あるいは白となりえるので多義的となる。しかし、右図形の非多義的ステレオグラムのように背景が暗あるいは明のどちらかであれば、左右端でのステレオマッチングでは白コントラストは遠に出現することを保持 (暗-明は暗-明とマッチ、黒点表示) するが、近の出現は暗-暗が暗-明とマッチすることになり矛盾するので多義性が排される。非多義的性のシグナルはV1領域、すなわちパターンのエッジからの入力を受けてニューロンの側方向あるいはフィードバックの連結網で中央領域の遠近知覚に影響すると考えられる。

そこで、Rideaux & Welchman(2019)は視覚中枢のステレオグラムでの立体視の反応を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。実験に使用したステレオグラムは、図32に示したように、ダークグレイあるいはライトグレイの背景をもつ縦型の白黒グレーティングで、左右眼に提示したパターンの位置をシフトできるように設定し、多義的あるいは非多義的に立体視させる。白黒グレーティングは4.8°の横幅、4°の高さ、0.6°幅のライトグレイあるいはダークグレイの背景枠で囲んだ。矩形グレーティング1.2°の空間周期で8個の縞から構成した。多義的ステレオグラムは左右眼に一方は白からはじまるストライプを。また他眼には黒からのストライプを提示し、両眼視差±36 arcminで融合させた。非多義性ステレオグラム (標準ステレオグラム) は、多義的ステレオグラムと同様なグレーティングを左右眼に提示するがその背景の枠の色をダークグレイとした。多義的と非多義

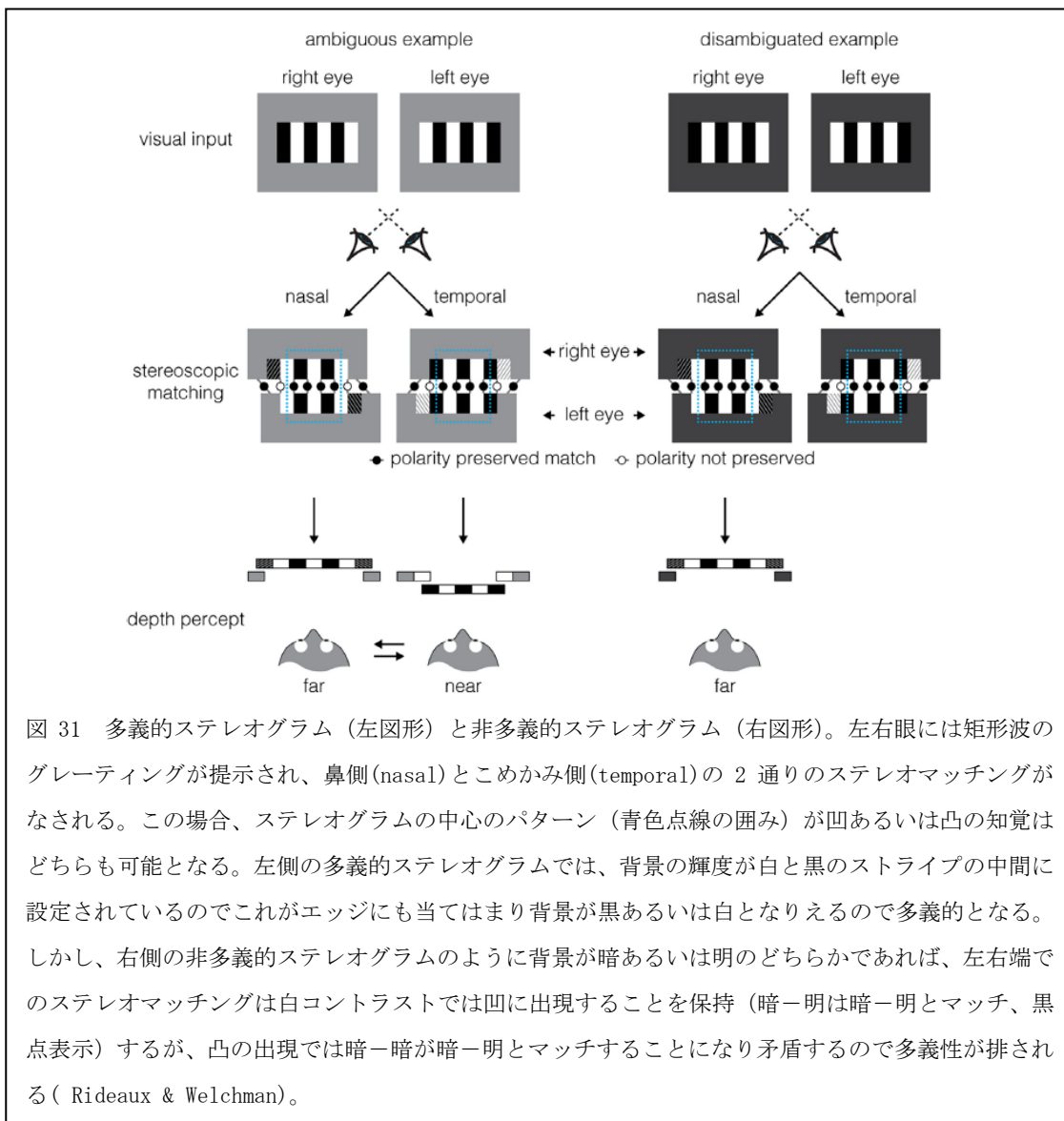


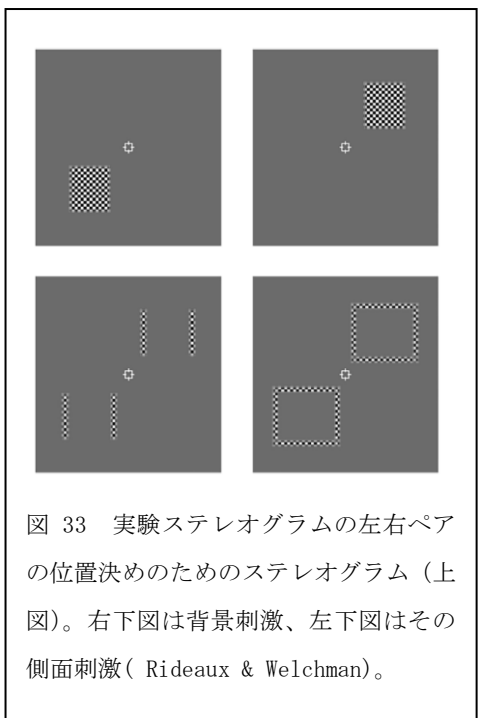
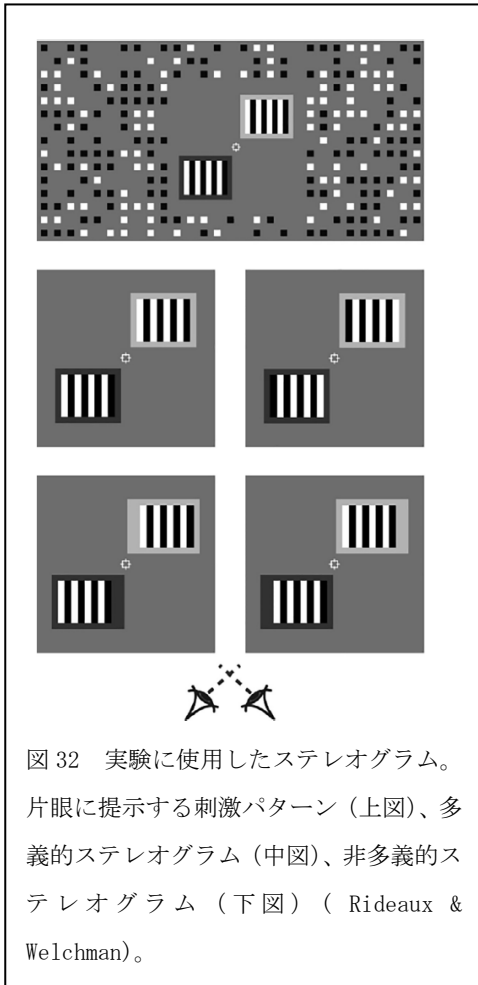
図 31 多義的ステレオグラム (左図形) と非多義的ステレオグラム (右図形)。左右眼には矩形波のグレーティングが提示され、鼻側(nasal)とこめかみ側(temporal)の 2 通りのステレオマッチングがなされる。この場合、ステレオグラムの中心のパターン (青色点線の囲み) が凹あるいは凸の知覚はどちらも可能となる。左側の多義的ステレオグラムでは、背景の輝度が白と黒のストライプの中間に設定されているのでこれがエッジにも当てはまり背景が黒あるいは白となりえるので多義的となる。しかし、右側の非多義的ステレオグラムのように背景が暗あるいは明のどちらかであれば、左右端でのステレオマッチングは白コントラストでは凹に出現することを保持 (暗-明は暗-明とマッチ、黒点表示) するが、凸の出現では暗-暗が暗-明とマッチすることになり矛盾するので多義性が排される (Rideaux & Welchman)。

表 1 8 通りの実験条件。実験操作要因は多義的-非多義的、背景の枠の明るさ (Light-Dark)、パターンフェーズ (0° - 180°)、パターンの位置のシフト (交差-非交差)、視えの奥行 (遠-近) (Rideaux & Welchman)。

Summary of experimental manipulations.

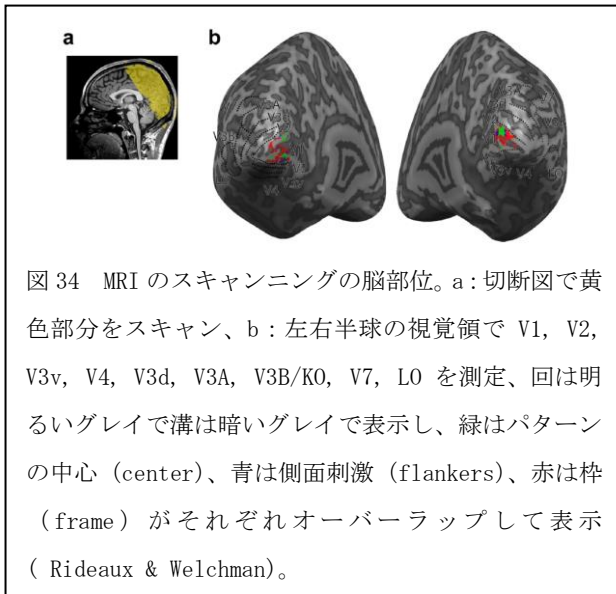
| Condition number | Ambiguous | Background luminance in the top/bottom | Pattern phase shift in the top/bottom | Pattern position shift in the top/bottom | Perceived depth in the top/bottom |
|------------------|-----------|--|---------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1 | No | Light, dark | 0, 180 | Crossed, uncrossed | Near, far |
| 2 | No | Dark, light | 180, 0 | Crossed, uncrossed | Near, far |
| 3 | No | Light, dark | 180, 0 | Uncrossed, crossed | Far, near |
| 4 | No | Dark, light | 0, 180 | Uncrossed, crossed | Far, near |
| 5 | Yes | Light, dark | 0, 180 | None | Near, far |
| 6 | Yes | Dark, light | 180, 0 | None | Near, far |
| 7 | Yes | Light, dark | 180, 0 | None | Far, near |
| 8 | Yes | Dark, light | 0, 180 | None | Far, near |

的ステレオグラムはそれぞれが斜めの位置を取るように配置しひとつのステレオグラムと



して各眼に提示した。操作した実験要因は、表 1 に示した多義的-非多義的、背景の枠の明るさ（Light-Dark）、パターンフェーズ（ 0° - 180° ）、パターンの位置のシフト（交差-非交差）、視えの奥行（遠-近）の 5 要因となり、8 通りの実験条件が設定された。脳の画像の測定は、磁気共鳴画像処理装置（MRI）と fMRI 装置をもちいた。図 34 には MRI のスキャンニングの脳部位を示し、スキャンした部位を切断面では黄色(a)で、また、左右半球の視覚領のうち測定した部位は V1, V2, V3v, V4, V3d, V3A, V3B/KO, V7, L0 であった（回は明るいグレイで溝は暗いグレイで表示、緑はパターンの中心（center）、青は側面刺激（flankers）、赤は枠（frame）をそれぞれオーバーラップして表示）。視覚刺激に対する受容野（V1, V2, V3v, V4, V3d, V3A, V3B/KO, V7, L）の視野位置を決めるために、図 33 のステレオグラム（右図）が使用され、左右の中心位置のためには上図の左右眼パターンを、側面刺激（flankers）には下図の左パターンを、パターンの背景のためには下図の右パターンがそれぞれ用いられた。被験者（15 名の成人）には 4 通りの多義的ステレオグラムのいずれかを両眼立体視させ、背景より凹あるいは凸かをできるだけ早くに上下キーボタンによって答えさせた。

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) 知覚を解釈、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の知覚ではグローバルコンテキストの働きを神経生理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と示唆される。

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)

感覚入力の神経生理処理には時間がかかり、そのために入力したデータとそれの知覚が意識される間には時間的遅延 (time lag) が生じる。もし視覚システムがこの時間的遅延を修正できなければ、運動対象の正確な位置を特定できないことになる。ひとつの説明仮説として、視覚システムは過去の経験値に基づき与えられたデータ範囲の外側の数値を推定する外挿 (extrapolation) によって運動対象の見ている位置の予測がある。静止対象の視えの位置が運動するシグナルによって影響される知覚現象 (flash-lag effect) がこの仮説で説明される (Nijhawan 1994)。この仮説によれば脳が運動対象の視えの位置を期待される運動軌跡に沿って情報処理のために生まれた時間的遅延を補うように予測するという。例えば、flash grab 錯視 (flash grab illusion, Cavanagh & Anstis 2013) では、背後の運動対象の動きにあわせてその対象のみをフラッシュすると、静止対象は運動対象の外挿された位置と比較された結果、時間的に遅延して運動対象の動きの方向に後から変位して視える。この種の知覚的外挿による運動対象の位置予測は、ベイズの定理をもちいた知覚モデルで証明され、位置の予測を生み出す神経生理的遅延が具体的に説明される (Khoei et al. 2017)。一方、Eagleman & Sejnowski (2000) は、時間的に遡及して知覚現象が意識されるといい、これを post-diction (直前の知覚の意味を後付けで戻して意味を変える機能)

と名づけた。すなわちここでは知覚の流れを戻して直前に知覚したものが意識されることになる。しかし、外挿による予測的モデルと post-diction モデルは運動対象シグナルの統合が時間的に前と後になるだけで同一のしくみが機能すると考えられる。Eagleman(2008)は、神経過程の遅延を補償するための運動対象の正しい位置の予測(prediction)あるいは遡及(post-diction)は共働して働くという。

最近研究されている flash grab 錯視は、運動ベクトルが突然変化し予測した軌道をはずれた時に、この種の予測的外挿のしくみがどのように働くかを示す。この錯視では、ターゲットが予測に反する方向に動く背景の下で瞬時にフラッシュされると、フラッシュを受けた運動対象の視えの位置は背景の動きの方向にシフトされる錯視で、次のように説明できる。図 35 は flash-grab 効果における外挿のしくみを図示したもので、下段には時間関

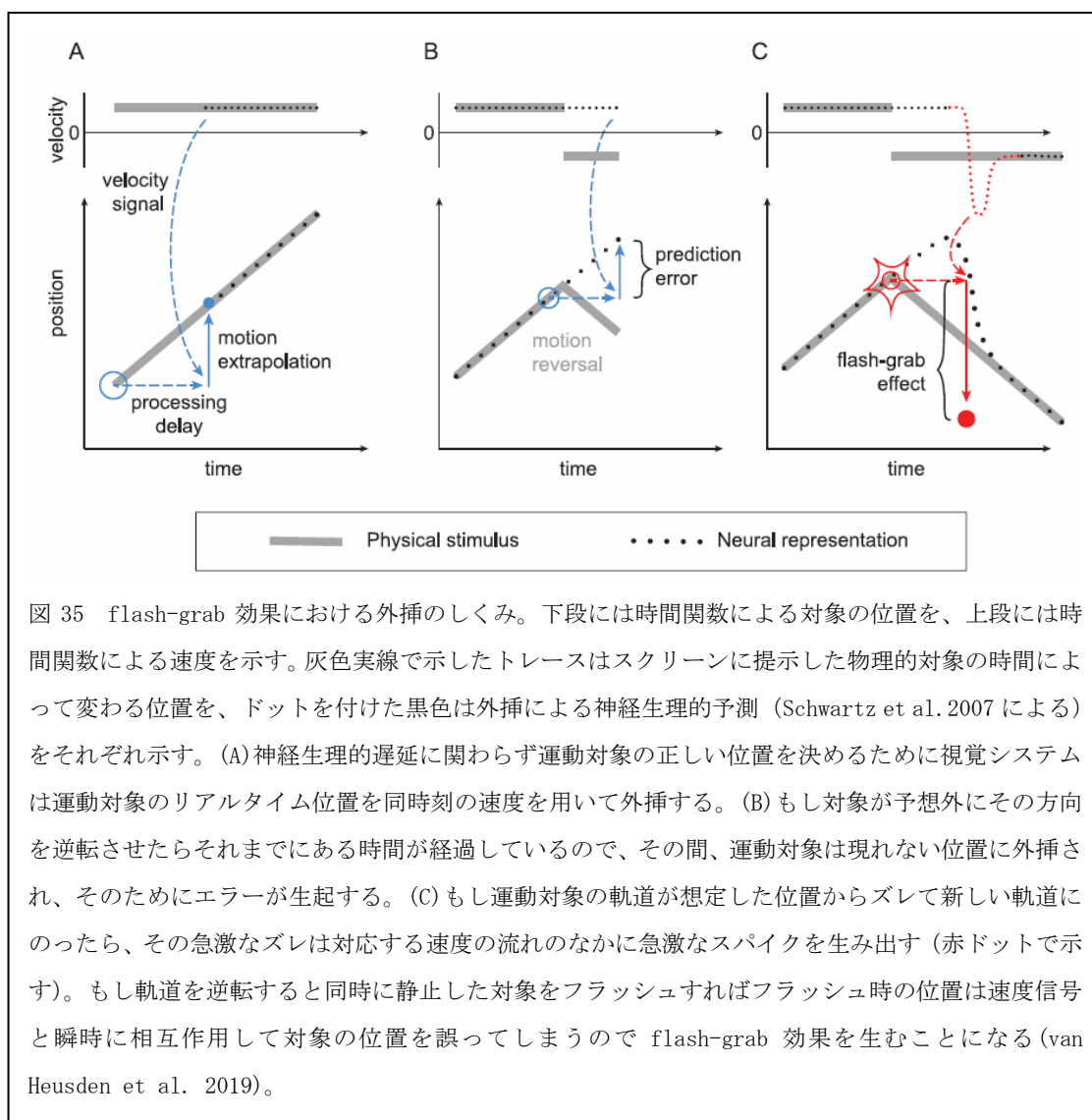


図 35 flash-grab 効果における外挿のしくみ。下段には時間関数による対象の位置を、上段には時間関数による速度を示す。灰色実線で示したトレースはスクリーンに提示した物理的対象の時間によって変わる位置を、ドットを付けた黒色は外挿による神経生理的予測 (Schwartz et al. 2007 による) をそれぞれ示す。(A) 神経生理的遅延に関わらず運動対象の正しい位置を決めるために視覚システムは運動対象のリアルタイム位置を同時刻の速度を用いて外挿する。(B) もし対象が予想外にその方向を逆転させたらそれまでにある時間が経過しているため、その間、運動対象は現れない位置に外挿され、そのためにエラーが生起する。(C) もし運動対象の軌道が想定した位置からズレて新しい軌道にのったら、その急激なズレは対応する速度の流れのなかに急激なスパイクを生み出す (赤ドットで示す)。もし軌道を逆転すると同時に静止した対象をフラッシュすればフラッシュ時の位置は速度信号と瞬時に相互作用して対象の位置を誤ってしまうので flash-grab 効果を生むことになる (van Heusden et al. 2019)。

数による対象の位置を、上段には時間関数による速度を示す。灰色実線で示したトレースはスクリーンに提示した物理的対象の時間によって変わる位置を、ドットを付けた黒色は

外挿による神経生理的予測 (Schwartz et al. 2007 による) を示す。図の(A)には神経生理的遅延に関わらず運動対象の正しい位置を決めるために、視覚システムは運動対象のリアルタイム位置を同時刻の速度を用いて外挿することを、図の(B)にはもし対象が予想外にその運動方向を逆転させたらそれまでにはある時間が経過しているので、その間、運動対象は現れない位置に外挿され、そのためにエラーが生起することをそれぞれ示す。また図の(C)には、もし運動対象の軌道が想定した位置からズレて新しい軌道にのったら、その急激なズレは対応する速度の流れのなかに急激なスパイクを生み出す (赤ドットで示す)。もし軌道を逆転すると同時に静止した対象をフラッシュすればフラッシュ時の位置は速度信号と瞬時に相互作用して対象の位置を見誤ってしまうので flash-grab 効果を生むことになる (van Heusden et al. 2019)。

生理神経過程の視覚情報処理のどの段階でこの運動対象の位置についての予測的外挿が生起するかは不明である。Hogendoorn & Burkitt (2018) は、EEG による分類手法 (classification paradigm) を用いて運動対象の位置予測が視覚領のどこで行われているかの特定を試みた。その結果、仮現運動では提示された対象が予測軌道に沿って動くときその対象の位置は神経生理上あらかじめ予測を前提に活性化されることを明らかにした。しかしこの神経生理事象が生起するのは刺激提示後 130ms 後であり、もっと早い神経生理上の位置予測には対応できない。一方、flash-grab 効果についての EEG による研究は、ターゲットの位置の錯覚が EEG シグナルから刺激提示後 81ms 以内で起きることを示した (Hogendoorn et al. 2015)。この 2 つの研究は運動対象の位置外挿において異なる段階の視覚神経生理過程があることを示すと考えられる。この位置外挿は刺激後およそ 80ms で生起する。このように外挿が時間的に限定されたフレームで起きることを考慮すると、視覚領よりは外側膝状体 (lateral geniculate) で起きていると考えられる。

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。網膜から外側膝状体、外側膝状体から視覚領 V1 へのルートは各眼で別々で交わることはないので、各眼からの入力を異ならせると flash-grab 効果がどこの段階で起きているかを特定できる。flash-grab にはフラッシュ前のパターンの運動、対象のフラッシュ、そしてフラッシュの後のパターンの運動があり、単眼に入力した対象の視えの位置が異なる眼に提示した運動パターンによって影響を受ける程度をしらべることで外挿のメカニズムがどこで行われているかをつきとめることができる。図 36 には、flash-grab 実験の刺激パターンと手続きを示した。図の(A)には、交互に白と黒の要素からなる環状パターンを回転させて提示し突然に回転方向を逆転させ、そのときにターゲットとした赤色の小ディスクを所定の 3 つの位置のどれかに提示し、被験者にはターゲットの知覚された位置をマウスを用いて報告させる手続きを示す。図の(B)には、ミラー方式のステレオスコープを用い環状の運動パターンを一眼中、ターゲットを他眼に提示することを示す。図の(C)には、5 つの異なる刺激提示条件、すなわち両

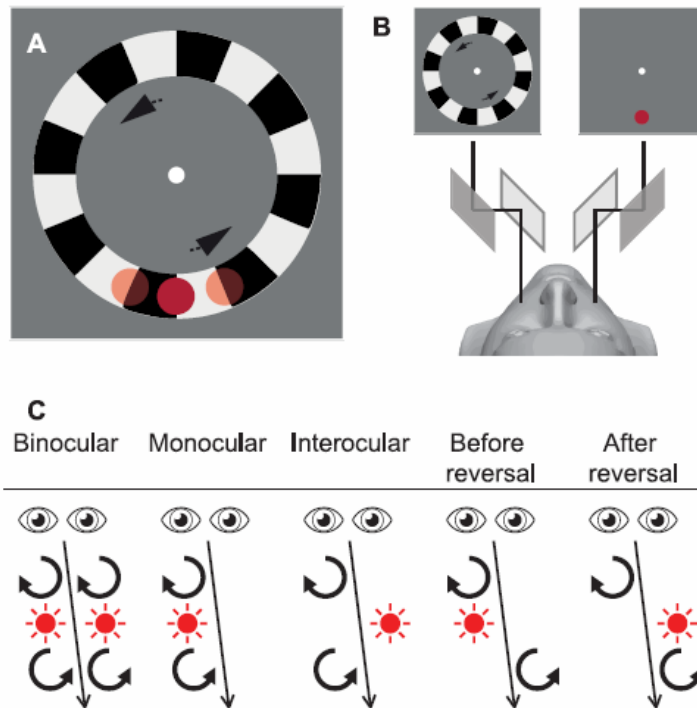


図 36 flash-grab 実験の刺激パターンと手続き。(A)被験者には交互に白と黒の要素からなる環状パターンを回転させて提示し、突然に回転方向を逆転させ、そのときにターゲットとして赤色の小ディスクを所定の3つの位置のどれかに提示する。被験者にはターゲットの知覚された位置を PC マウスで報告させる。(B)ミラー方式のステレオスコープを用い円環の運動パターンを一眼に、ターゲットを他眼に提示。(C)5つの異なる刺激提示条件。両眼視条件（動的環状パターンとターゲットを両眼に提示）、単眼視条件（動的環状パターンとターゲットを一眼に提示）、インターオキュラー（interocular、動的環状パターンを一眼にターゲットを他眼に提示）、前逆転提示条件（一眼に動的環状パターンとターゲットを提示後に他眼に回転方向を逆転させた環状パターンを提示）、後逆転提示条件（一眼に動的環状パターンを提示後に他眼にターゲットと回転方向を逆転させた環状パターンを提示）(van Heusden et al. 2019)。

両眼視条件（動的環状パターンとターゲットをともに両眼に提示）、単眼視条件（動的環状パターンとターゲットを一眼に提示）、インターオキュラー（interocular、動的環状パターンを一眼にターゲットを他眼に提示）、前逆転提示条件（一眼に動的環状パターンとターゲットを提示後に他眼に回転方向を逆転させた環状パターンを提示）、後逆転提示条件（一眼に動的環状パターンを提示後に他眼にターゲットと回転方向を逆転させた環状パターンを提示）が示されている。

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

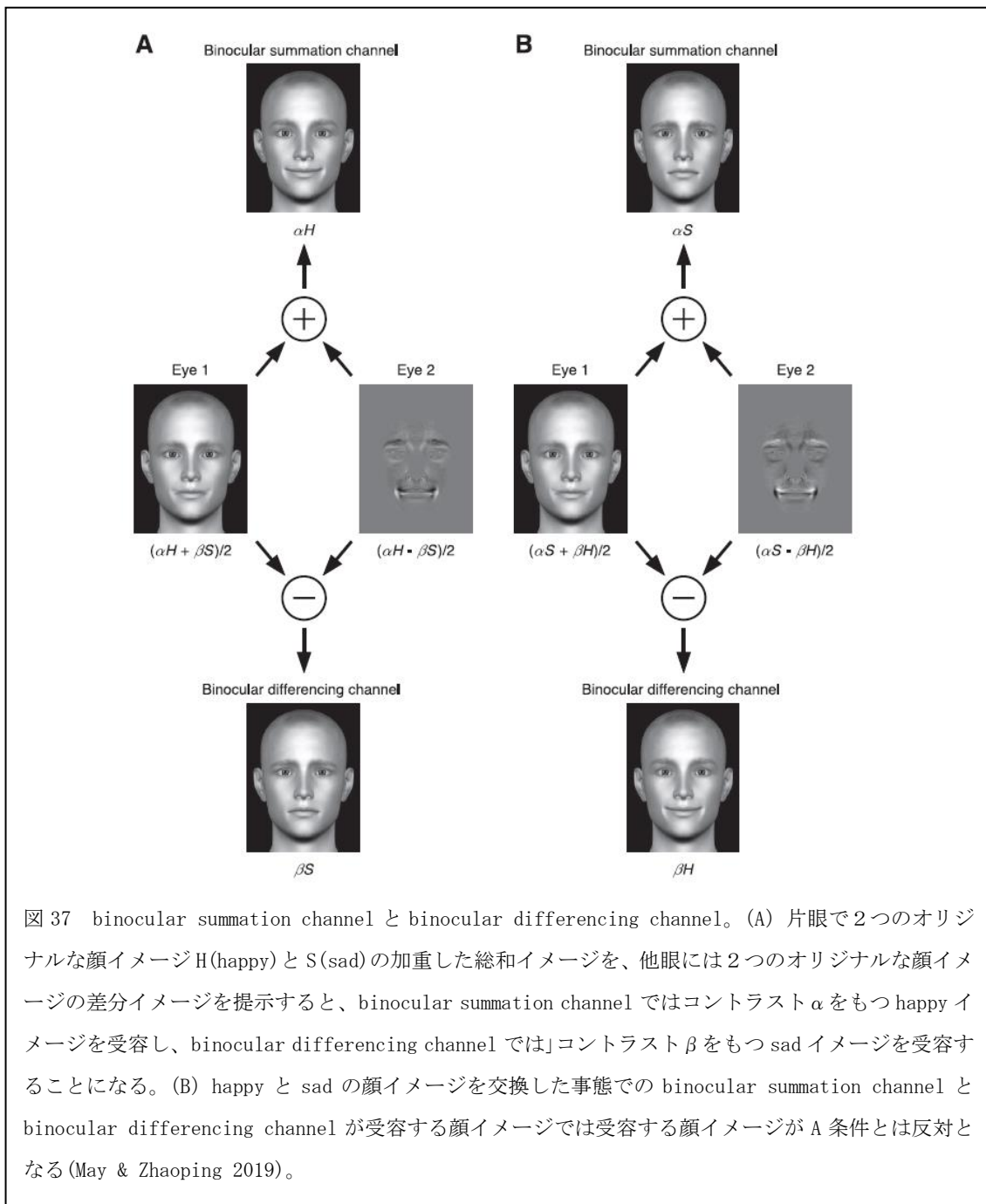
エラー条件では位置エラーが有意に小さいこと、(4) インターオキュラー条件と後逆転提示条件の位置エラーは有意に異なること、(5) しかし前逆転提示条件は後逆転提示条件に比較して優位に位置エラーが小さいこと、などが示された。

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。とくにその効果が最つ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。

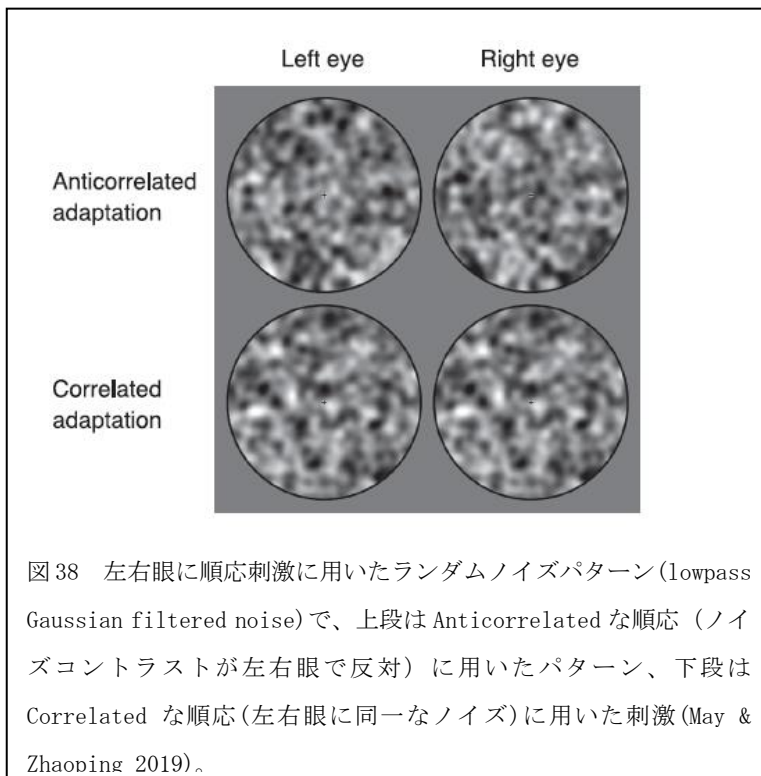
顔知覚における 2 種類の低次の両眼間処理過程

Li and Atick (1994) は、2 つの低次の情報処理過程、すなわち左右眼の情報が総和されるチャンネル (binocular summation channel) とそれらが区別されるチャンネル (binocular differencing channel) が存在すると提唱した。図 37 に図示したように、片眼にハッピー顔 (A) とサッド顔 (B) の総和イメージ ($A+B$) を提示し、他眼にはこの 2 つの顔の差分イメージ ($A-B$) を提示すると、summation channel では ($A+B$) と ($A-B$) のうち B 要素が異なるのでキャンセルされ A 要素が残り、また differencing channel では A 要素が同一なのでキャンセルされ B 要素が残ると考えられる。観察者は、したがって、2 つの両眼チャンネルの相対的感覚強度の差よって A 要素あるいは B 要素を知覚することになる。もし 2 つのチャンネルのいずれかを順応させてからテストすれば A あるいは B に対する知覚を偏向させることができる。May & Zhaoping (2016) および May, Zhaoping & Hibbard (2012) は、A あるいは B にグレーティングパターンを用い、2 つの運動方向あるいはパターン方向を互いに変えて実験すると、順応パターンは非順応パターンより知覚しやすいことを見いだした。この実験パラダイムを顔知覚に応用すると、summation channel、differencing channel における低次の順応が高次 (V1) 中枢にも引き継がれるかをしらべることができる。

May & Zhaoping (2019) は、図 37 に示すように、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。順応刺激には、図 38 にあるように、ランダムノイズパターン (lowpass Gaussian filtered noise) で、上段は Anticorrelated な順応 (ノイズコントラストが左右眼で反対) に用いたパターン、下段は Correlated な順応 (左右眼に同一なノイズ) に用いたパターンで左右眼に別々に提示する。テスト刺激には各男女 2 人 (男のペア Brad と Matt、女のペア Ant と Des)



の Happy、Sad 顔、その他に左右に2度の左回転顔と右回転顔を用いた。順応刺激提示後のテストでは、5人の男女の被験者にいずれのペア(名前)か、その性別、Happy/Sadのどちらか、左方向/右方向の顔の向きを、左右のキー操作で応えるように教示した。実験手続きとして、はじめに左右眼別々に順応刺激を0.5秒間提示し、続いて黒のフレーム提示後に0.4秒のテスト刺激を左右眼別々に提示、被験者に4つの課題の知覚をキー反応で応えるように教示した。この場合、左右キーを2つずつ用意し、知覚が明瞭な場合には左右キーの外側のキーを、それ以外の場合には内側のキーで反応するように求めた。



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。

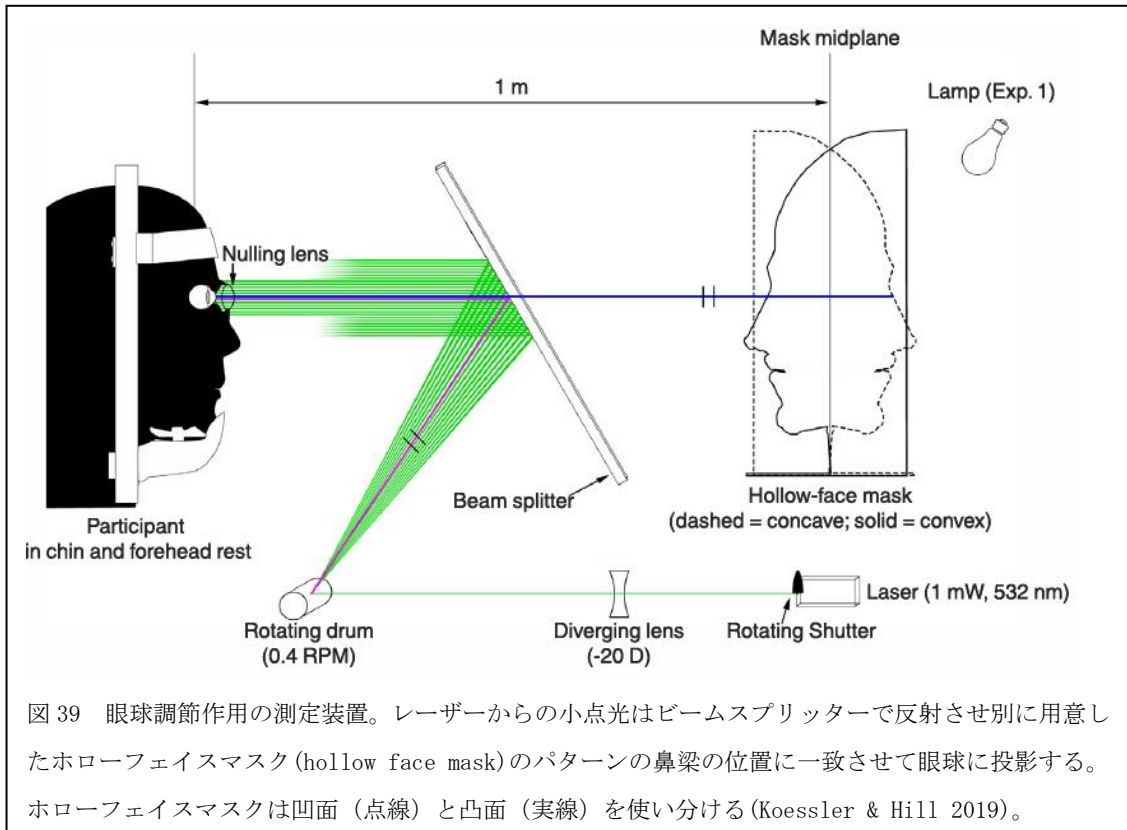
これらの結果から、顔知覚の低次の処理過程が高次の処理過程に引き継がれ、高次の偶然な偏向を縮小するように働くことを示唆する。

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

ホローフェース錯視とは凹面マスクを凸面マスクと知覚することであり、物理的關係からははずれる。Koessler & Hill (2019) は、ホローフェース錯視を知覚するとき、物理的凹面に眼球調節するのか、あるいは錯視が生じている凸面に眼球調節するのかを測定した。もし眼球調節が対象のボケを最小にし明るさコントラストを最大にする作用だけであれば、眼球調節は対象表面に固定されると考えられるが、もし対象の奥行知覚と関連するならばそれが錯視で生じた奥行でも眼球調節が変化すると予想される。ホローフェース錯視は奥行知覚の調節や輻輳など眼筋の手がかりを考察する上で利用できる。ひとつには、この錯視は両眼視の観察でも生起する強力なものであること、ふたつには 3 次元構造を規定する視覚的そして眼筋の手がかりがすべて利用できる条件でも生起し、しかも人為的な手がかりのコンフリクトのない事態でも起きることである。これは視覚的奥行情報が近距離にある凹型の 3 次元マスクを凸型に知覚させていることを示唆する。

そこで、Koessler & Hill (2019) は、実験 1 で被験者がホローフェイスを凸型と間違っ 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。測定は、図 1 に示したように、レーザオプトメータを用いた。レーザーからの小点光をビームスプリッターで反射させると粒子状の斑点を持つレーザスペckルパターンをみることができる。このレーザー光パターンを別に用意した凹凸 2 つのホローフェースマスク (hollow face mask、図中、凹面は点線で凸面は実線で表示) の鼻梁の位置に一致させて眼球に投影した。この



パターンを被験者に観察させると、パターンの中の斑点(スペックル)が上あるいは下方向に流れるような動きを見せる。眼がフェイスマスクの手前に調節された時と後方に調節された時には逆方向にスペックルは動いて見え、また、眼がフェイスマスクに正しく焦点を合わせている時スペックルは静止して見える。被験者(22名)には、単眼視でスペックルが上方あるいは下方に動いて見えるか、または静止して見えるかを報告させた。フェイスマスクは、35.0cmの幅、44.5cmの高さ、10.5cmの深さのマスク(hollow mask)で、被験者から1mの観察距離に上横方向から照明して提示した。フェイスマスクの提示方向は、正立と倒立提示、また被験者に対して凸型と凹型を提示した。さらに調節作用と同時に輻輳作用も眼球追跡装置で測定、観察は単眼および両眼でも実施した。

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ずと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。マスクは物理的マスクにランダムドットを投影したものとし、ドット間のコントラストを操作して0%から100%まで5%のステップで変えられた(図40)。マスクは凹型と凸型の2条件、マスクの提示方向は正立と倒立の2条件、コントラスト変化は上昇(凹型知覚から

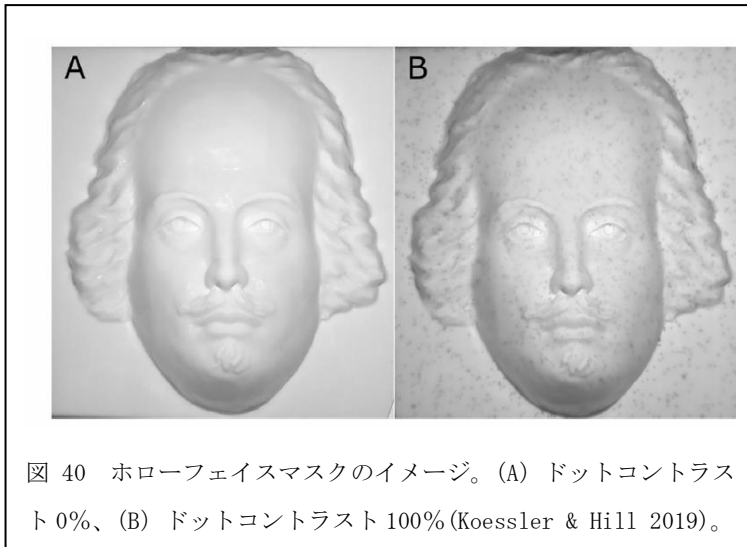


図 40 ホローフェイスマスクのイメージ。(A) ドットコントラスト 0%、(B) ドットコントラスト 100%(Koessler & Hill 2019)。

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。もし、奥行手がかりである眼球調節が作用してホローフェイス錯視を起こさないように働くならば、ブラードットの導入は眼球調節を弱めてフェイスの奥行の急な変化を起こさせると考えられる。図 41 に示したように、ランダムドットを投影したホローフェイスマスクのイメージは、(A) ドットコントラスト 0%、(B) ドットコントラスト 100%でシャープな場合、

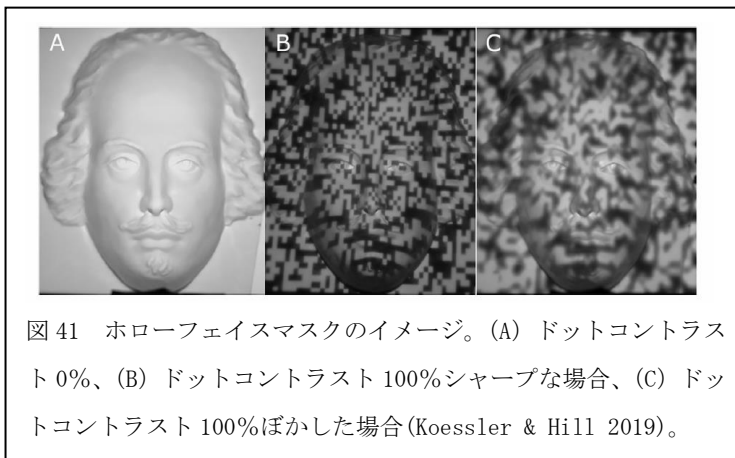


図 41 ホローフェイスマスクのイメージ。(A) ドットコントラスト 0%、(B) ドットコントラスト 100%シャープな場合、(C) ドットコントラスト 100%ぼかした場合(Koessler & Hill 2019)。

スタート)と下降の系列(凸型知覚かスタート)をそれぞれ提示し 17 名の成人被験者に単眼視と両眼視の両方で観察させ、マスクの奥行知覚に急な変化(flipping contrast)があれば報告させ、その時の眼球調節をレーザーオプトメータで測定した。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

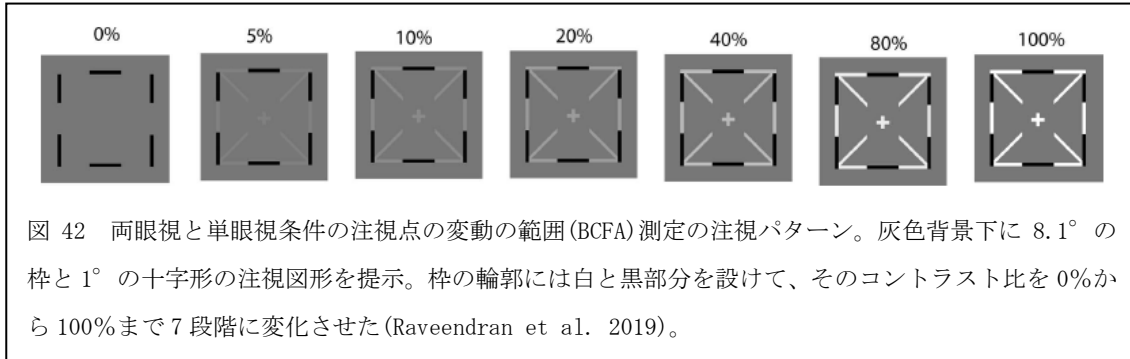
(C) ドットコントラスト 100%でボケを導入した場合の 3 通りとした。ドットはガウス関数を用いてブラーが導入され、またドット数の増減で明るさとコントラストを変えた。凹型のマスク条件でコントラストを変えることによって急な知覚変化が 16 名の被験者で測定された。その結果、シャープなドット条件は

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。

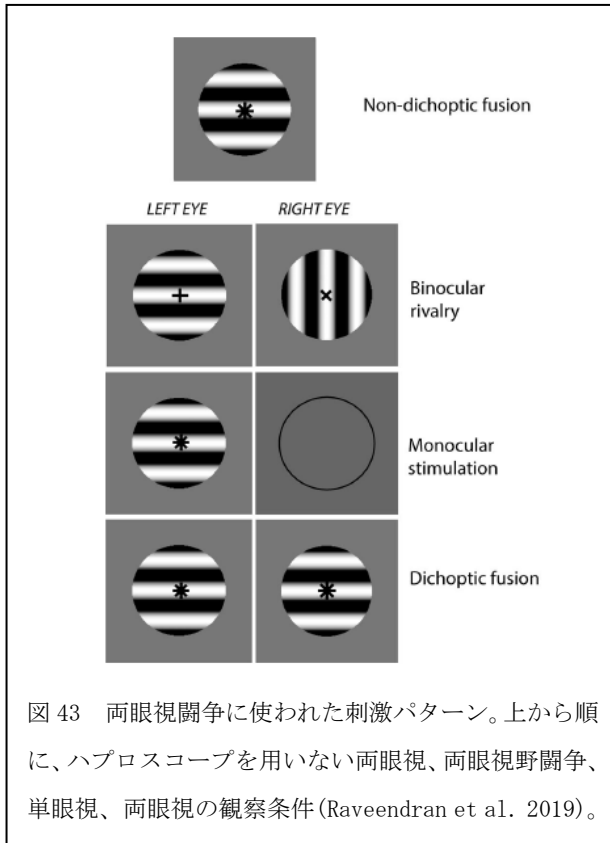
これらの結果から、眼球調節は他の奥行知覚の手がかりが利いている事態でも手がかりとして作用し、また奥行関係を明瞭にするのに資するといえる。

両眼視と注視の眼球運動

小さな非付随的眼球運動が、ひとつの静止対象を注視する間に生起する。このときの眼球運動の増幅の程度は注視の安定性 (fixation stability, FS) に関わる。FS は、注視点の変動の範囲 (BCFA, bivariate contour ellipse area) を測定して決められる。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 BCFA を健常者および方向に異方性をもつ患者で測定した。実験で使用した刺激は、図 42 にある



ように、灰色背景下に 8.1° の枠と 1° の十字形の注視図形で、枠の輪郭には白と黒部分を設けて、そのコントラスト比を 0% から 100% まで 7 段階に変化させた。観察条件は利眼の単眼視、非利眼の単眼視、両眼視である。注視時の眼球運動は、赤外線眼球追跡装置で測定された。



被験者は、11 名の成人の健常者とした。

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はさはなかった。

そこで、両眼視闘争事態における BCFA を測定した。観察条件は、図 43 のように 4 条件、すなわち、上から順にハプロスコープを用いない両眼視、両眼視野闘争、単眼視、両眼視の観察条件を設定し、そのパターンは明るさコントラスト 100%、サイン波形のグレーティング (3.6° 、 $1.1c/^\circ$) からなる円とし、被験者は 15 名の成人とした。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

輻輳作用はさまざまな奥行距離にある外界対象を網膜に焦点化(focusing)する。網膜上の刺激のボケ要因(イメージブラー、image blur)のみでは輻輳を働かせるのに十分ではなく対象の奥行距離や方向を知る第 2 の手がかりも必要となる(Cholewiak et al. 2018; Del Águila-Carrasco et al. 2017; Kruger & Pola, 1986; Kruger et al. 1993; 1995)。イメージブラーは、自然界では輻輳変化と瞳孔大きさ変化が振幅と位相スペクトラムの変化を誘導するので起きる。正弦関数をその変数で割って得られる sinc 関数を用いると高空間周波数部分を減衰しオプティカルブラーをシミュレートできる。

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。まず、図 44 に示したように、輻輳測定のためのイメージターゲットを作成した。図中、(1)は原図形、(2)は原図

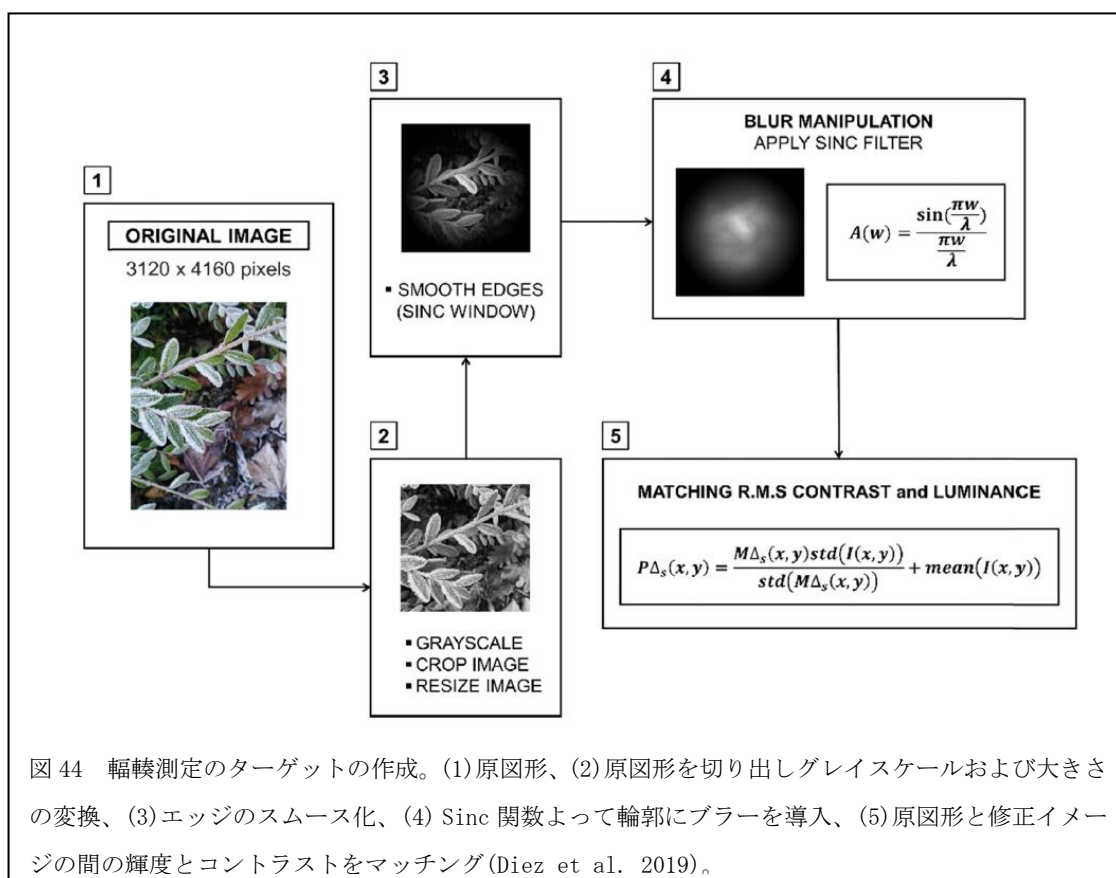
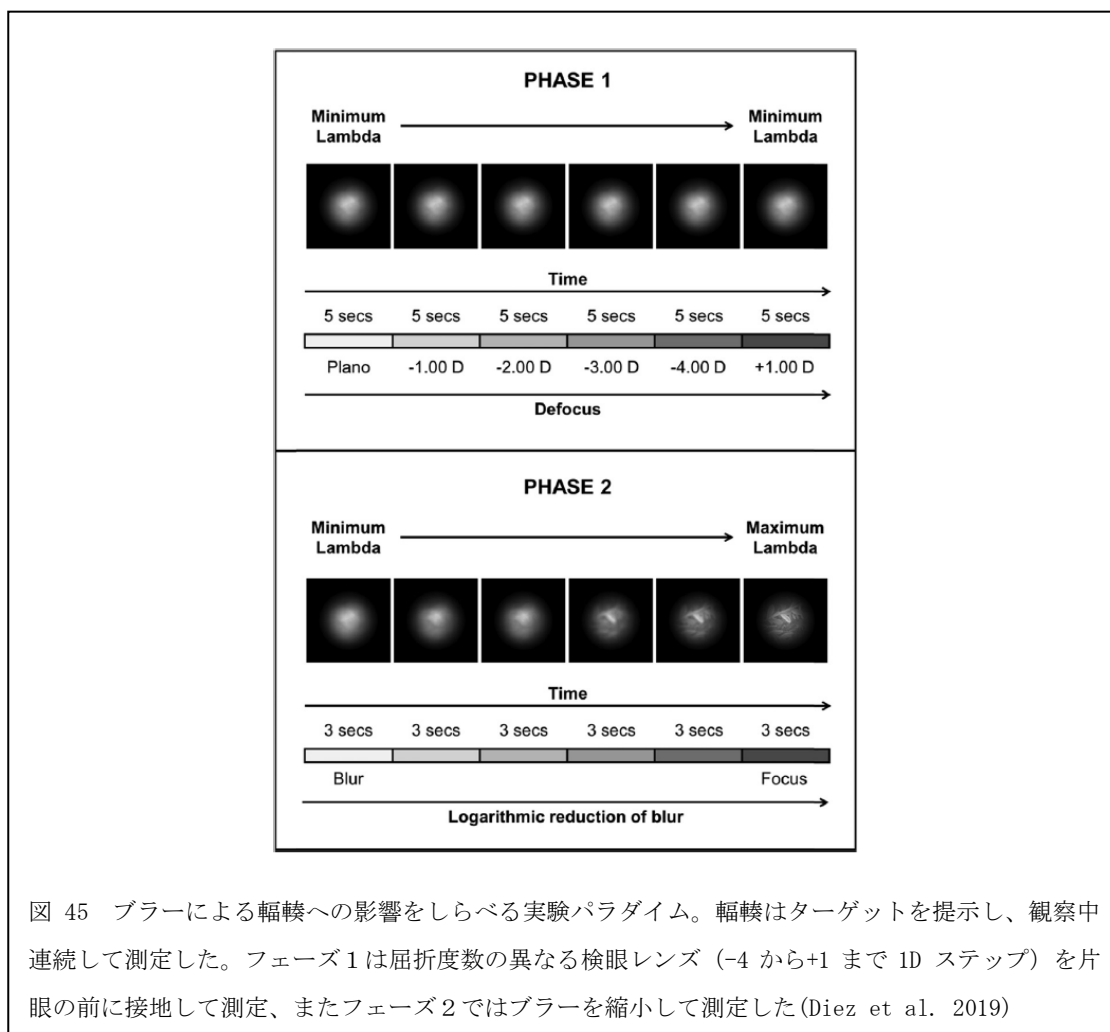


図 44 輻輳測定のためのターゲットの作成。(1)原図形、(2)原図形を切り出しグレイスケールおよび大きさの変換、(3)エッジのスムース化、(4) Sinc 関数によって輪郭にブラーを導入、(5)原図形と修正イメージの間の輝度とコントラストをマッチング(Diez et al. 2019)。

形を切り出してグレイスケールおよびリサイズ、(3)はエッジのスムーズ化、(4)は輪郭に Sinc 関数よってブラーを導入、(5)は原図形と修正イメージの間の輝度とコントラストをマッチングの操作を、それぞれ示す。イメージターゲットは液晶ディスプレイに 50cm の観察距離から 2D の輻輳をとるように提示された (縦、横とも視角 4 度)。輻輳の測定は、図 45 のように、2 ステップで、すなわち最初にターゲット刺激を固定 ($\lambda=1$ cpd) してレンズの度数を段階的に変えた条件 (フェーズ 1) で、次に Sincblur フィルターの λ を増大した条件 (フェーズ 2) で実施した。前者では刺激事態が輻輳の手がかりになるので輻輳は変わらないが、後者では輻輳が変わるまで λ (0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024 cpd) を変えてブラーを最大から最小まで段階的に操作し、その輻輳の閾値を探った。輻輳はサンプリング 60Hz で赤外線光屈折器 (eccentric infrared photorefraction) を使用して連続的に測定した。被験者は 14 名で年齢は 20 から 29 歳であった。



実験の結果、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。フェーズ(2)では、平均 Sinc λ 5.57 \pm 4.67cpd 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 mean $\lambda=9.33 \pm 4.99$ cpd; 正常視者 mean $\lambda=2.75 \pm 0.97$ 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擬

Hess et al. (2007)は、両眼あるいは各眼に提示されたシグナルとノイズの運動刺激がどのように一つに統合されるのかを、単眼条件（単眼にのみ提示）、両眼分離条件（segregate dichoptic、各眼に別々のシグナルとノイズ刺激提示）、2重条件（duplicate、両眼に同一の刺激を提示）で実験し、これらの条件間には運動の組合せそれ自体には有意な差がない

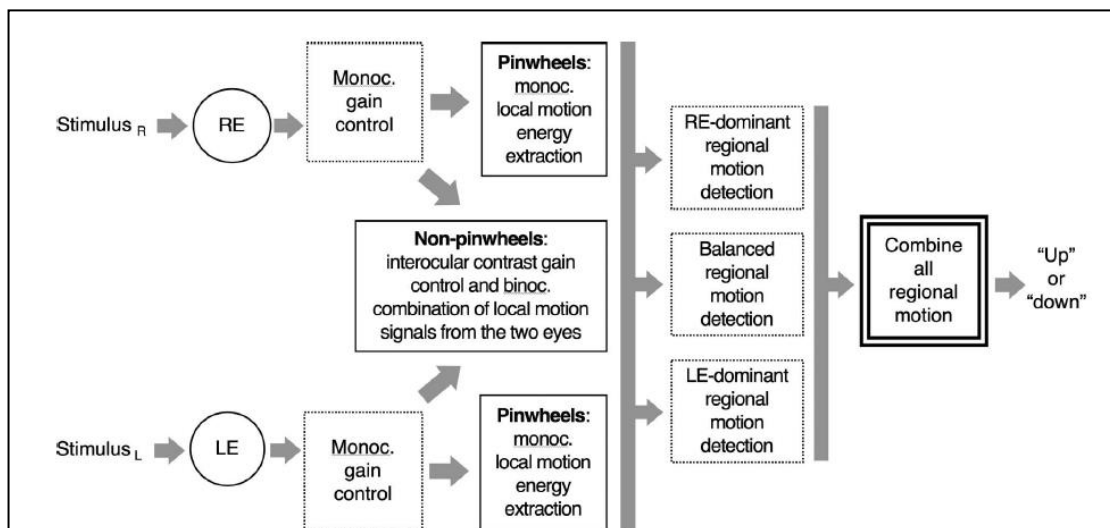


図 46 ランダムドットによるキネマトグラムのグローバルな運動知覚のモデル（Cai-Backus binocular combination (CBBC) model）。視覚システムのなかで6段階の処理を経て最終の反応（upあるいはdown）が得られる。(a)刺激を左右眼に入力、(b)輝度とコントラストに基づく単眼の感度調整(gain control)で、網膜、LGN、V1のシグナル強度を調整、(c)左右眼の処理過程でそれぞれ平行にローカルな運動がV1で抽出され、これには各眼ピンホイールと両眼ピンホイールとがある。(d)リージョナル（局所的）な運動はMT野で両眼間の優位性に基づいて検出される。(e)MST野でリージョナル運動はグローバルな運動へと結合される。(f)グローバル運動に基づいて最終反応（upまたはdown）が決定される(Cai, Yuan, & Backus 2019)。

とした。言い換えれば、ランダムに運動するドットはノイズとシグナルが同一眼あるいは異なる眼に提示されたか否かに関わらずシグナルドットをマスクするのに等しく効果があると、グローバルな運動知覚は両眼融合の後に生起すると結論した。

これに対して 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いと考えた。そこで Cai らは、両眼における 6 段階の処理を経てグローバル運動知覚が処理されると考えた。図 46 にあるように、ランダムドットによるキネマトグラムのグローバルな運動知覚のモデル (Cai-Backus binocular combination (CBBC) model) は次のように、視覚システムのなかで処理されて最終の反応 (up あるいは down) が得られると考えられた。刺激を左右眼に入力 (図 a)、輝度とコントラストに基づく単眼の感度調整 (gain control) で、網膜、LGN、V1 のシグナル強度を調整 (図 b)、左右眼の処理過程でそれぞれ平行にローカルな運動が V1 で抽出され、これには各眼ピンホールと両眼ピンホールとがある (図 c)。リージョナル (局所的) な運動は MT 野で両眼間の優位性に基づいて検出される (図 d)。MST 野でリージョナル運動はグローバルな運動へと結合される (図 e)。グローバル運動に基づいて最終反応 (up または down) が決定される (図 f)。ランダムドットによるキネマトグラム (RDK) のグローバル運動の閾値はその一致度 (percent

表 2 実験 1、2、3 のパラメータ (Cai, Yuan, & Backus 2019)。S.V.: staircase variable, M: monocular, S: segregated, B: balanced, D: duplicate, SSB: segregated-signal balanced, and SSI: segregated-signal imbalanced.

| Experiment | S-to-N contrast ratio | Percent coherence | Weber contrast | Viewing conditions | Dot motion | Frame rate (Hz) | Stimulus duration (ms) | Dot speed (°/s) | Number of observers |
|------------|-----------------------|-------------------|----------------|--------------------|------------|-----------------|------------------------|----------------------------|---------------------|
| 1 | 1 | S.V. | 1.0, 0.1 | M, S, B | Two-frame | 30 | 300 | 1.2 3.3 8.1 | 7 |
| 2 | S.V. | 8 | n/a | M, S, B, D | Continuous | 60 | 300 | 4.2 8.4 12.6 16.8 | 7 |
| 3 | 1 | S.V. | 1.0 | M, S, B, SSB, SSI | Two-frame | 30 | 300 | 8.1 | 10 |

Table 1. Design parameters of Experiments 1 through 3. Notes: S.V. – staircase variable, M – monocular, S – segregated, B – balanced, D – duplicate, SSB – segregated-signal balanced, and SSI – segregated-signal imbalanced.

coherence) とシグナル-ノイズのコントラスト比 (SNR) で測定できるので、実験 1 と 3 ではシグナルとノイズのコントラストを同一とし、グローバル運動の一致度の閾値をコントラスト、運動速度、および両眼観察条件を変えて実験した。また、実験 2 ではグローバル運動の一致度を固定してシグナル-ノイズのコントラスト比の閾値を観察条件を変えて実験した。この実験では、一眼からのノイズを除くグローバル運動のメカニズムがあることを、シグナルとノイズを別々の眼に提示する segregate 観察条件で閾値が低くなることで実証されると考え、単眼視あるいは両眼視の観察条件での閾値の比較を試みた (表 2、実験 1、2、3 のパラメータ。S.V.: staircase variable, M: monocular, S: segregated, B: balanced, D: duplicate, SSB: segregated-signal balanced, and SSI: segregated-signal imbalanced)。図 47 にあるように、両眼へのシグナルとノイズの提示は 6 通りの刺激条件を設定した (黄色表示はシグナル、白色表示はノイズ (実験では大きさとの区別はない))。

被験者は 14 名で 20 から 53 歳であった。刺激の提示はミラーステレオスコープで各眼別々

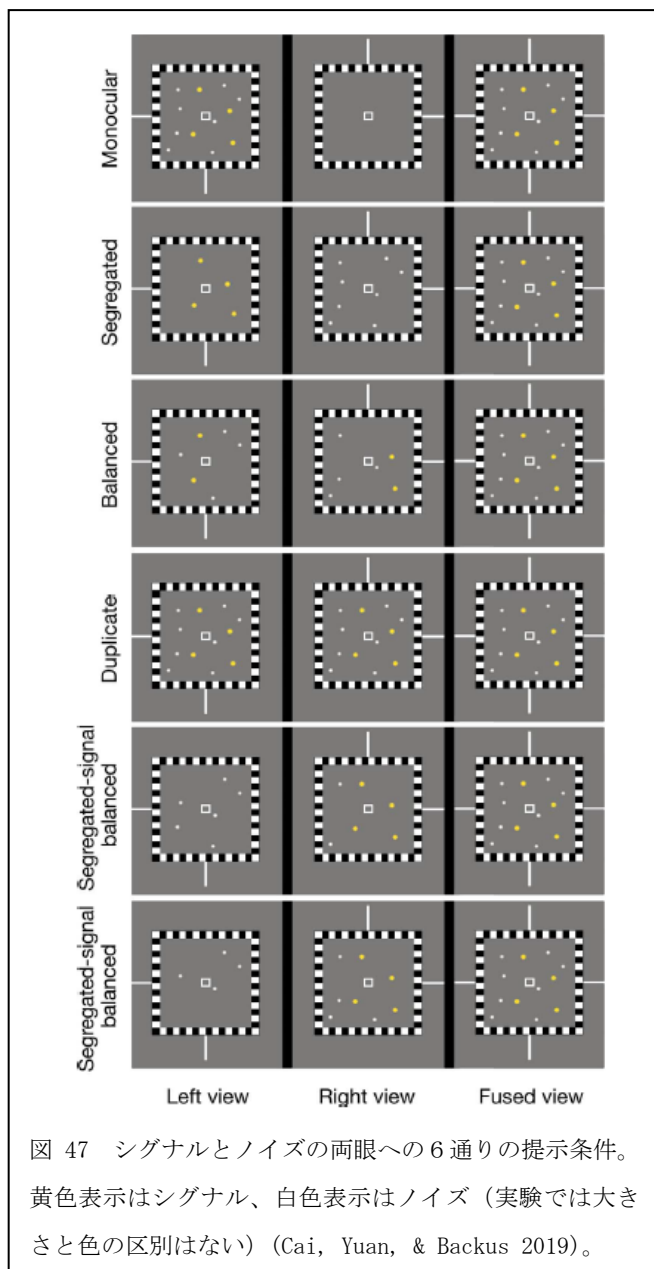


図 47 シグナルとノイズの両眼への 6 通りの提示条件。黄色表示はシグナル、白色表示はノイズ（実験では大きさと色の区別はない）(Cai, Yuan, & Backus 2019)。

に提示した。シグナルドットはすべて上方向か下方向に運動、またノイズドットはシグナルドットと同一の速度でランダムな方向に運動するか、あるいはノイズドットはフレーム間で動かないシングルドットとした（2つのフレームモーションの場合）。この2つのフレームモーションの場合、各ドットの提示時間は67msとした（4つのディスプレイフレームからなる2つの刺激シーン）。観察条件は6通りが次のように設定された。単眼観察条件

(M)：すべての100個のドットが単眼に提示。Segregated観察条件

(S)：すべてのシグナルドットは片眼に、すべてのノイズドットは他眼に提示。Balanced (B)：シグナルとノイズドットは両眼に等しく提示（各眼50ドット数）、Duplicate (D)：すべて100ドットは各眼に提示（両眼には2重のシーン）。

Segregated-signal balanced

(SSB)：シグナルとノイズドットを片眼に提示するが、ノイズドットのみ他眼に提示（各眼ドット数は50個）。Segregated-signal imbalanced

(SSI)：シグナルとノイズドットを片眼に、ノイズドットは他眼に提示するが、ノイズドットは片眼には76ドット、他眼にはノイズ24ドット)。シグナルモーションはランダムに上あるいは下方向に運動するので、被験者には提示された刺激のグローバルモーションが上方向あるいは下方向に動いているかをキーボードで答えさせた。coherence のパーセント（実験1と3）および signal-to-noise contrast ratio（実験2）の閾値は3-down-1-upの上下法（80試行）で測定された。実験1では2条件のドットコントラスト（1.0と0.1）、3条件のドット速度（ $1.2^\circ/s$ 、 $3.3^\circ/s$ 、 $8.1^\circ/s$ ）、signal-to-noise コントラスト比（signal/noise=1）に設定した。ドットのトラッキングによる運動方向の判定を避けるために、2フレームの提示のみに限定した。ドットの運動方向のパーセンテージ一致度

(percent coherence)は、2つのフレーム間のペアドットで規定されるので、その最大値は50%となる。

実験1の結果、ドットの運動方向知覚のパフォーマンスは、単眼条件、両眼 Balance 条件に比較して片眼にすべてのシグナル、他眼にすべてのノイズを提示する Segregated 観察条件が高コントラストと2つの高速度事態で良好だったが、低コントラスト事態では良くなかった。低速度(1.2° /s)の閾値は高コントラストで高く、中間と低速度(3.3° /s と 8.1° /s)では低コントラストで閾値が高くなった。この結果は、コントラストを高くし速度を速く設定するとドットの運動方向の知覚を良好にするが、低速では悪くすることを示した。

実験2の結果、単眼条件、両眼 Balance 条件、Segregated 条件における signal-to-noise contrast ratio における 82%の正しい判断の閾値をシグナルとノイズのコントラスト比 (82% correct threshold signal-to-noise luminance contrast ratio、ここで、値が0はシグナルとノイズのコントラスト比が同一を示す) で求めると、Segregated 条件が明確に良好なことが示された。この結果はすべての被験者で高速運動のドット条件で示された。実験1と2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、

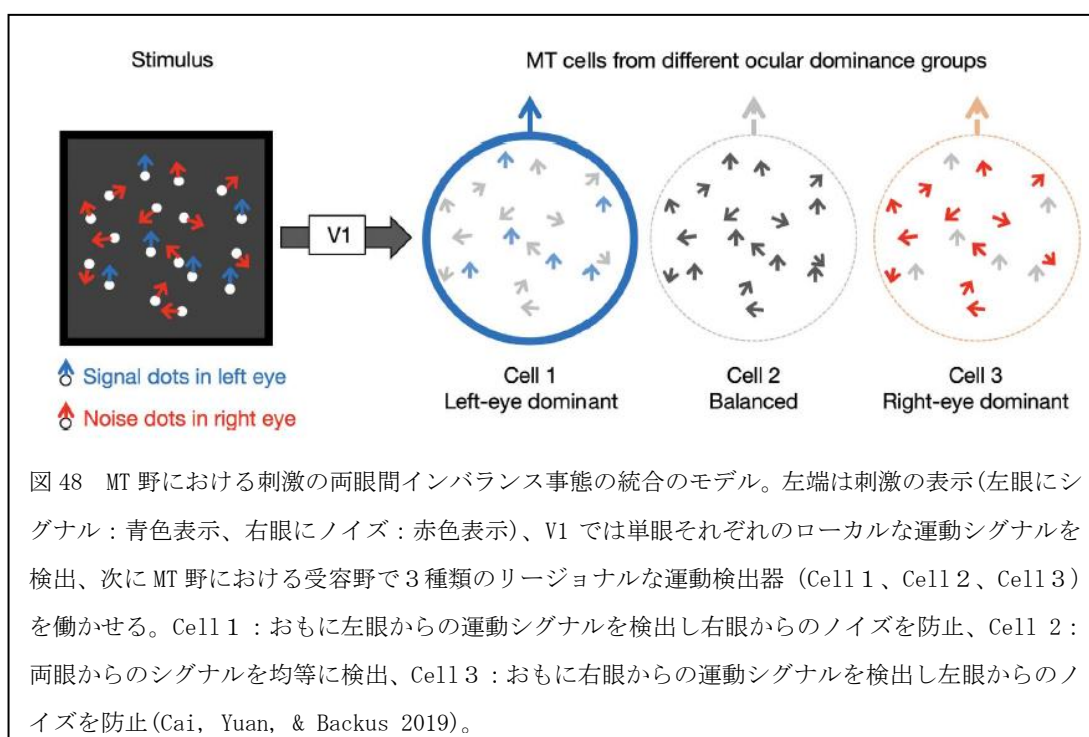


図 48 MT 野における刺激の両眼間インバランス事態の統合のモデル。左端は刺激の表示(左眼にシグナル：青色表示、右眼にノイズ：赤色表示)、V1 では単眼それぞれのローカルな運動シグナルを検出、次に MT 野における受容野で3種類のリージョナルな運動検出器 (Cell 1、Cell 2、Cell 3) を働かせる。Cell 1：おもに左眼からの運動シグナルを検出し右眼からのノイズを防止、Cell 2：両眼からのシグナルを均等に検出、Cell 3：おもに右眼からの運動シグナルを検出し左眼からのノイズを防止(Cai, Yuan, & Backus 2019)。

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、図 48 に示した 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。図の左端は入力された刺激(左眼にシグナル：青色表示、右眼にノイズ：赤色表示)を示し、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、視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。

実験 3 ではノイズ眼には常に 24 個のノイズを、他眼のシグナル眼には常にすべてのシグナル(50 個)と残りのノイズドット (24 個) の 76 ドットが提示する segregated-signal imbalanced (SSI) 条件を設定し、この他に、segregated-signal balanced (SSB、各眼にシグナルとノイズを同数提示) 条件、単眼条件、両眼 Balance 条件、Segregated 条件が比較のために加えられた。実験の結果、両眼と segregated の Balance 条件でのパフォーマンスは単眼条件のそれと有意に類似し、また balanced と imbalanced の segregated 条件のパフォーマンスはその他の条件より有意に良好の成績を示した。SSB と SSI の条件間にはパフォーマンスに関して差はなく、単眼やバランス条件より劣った。SSI 条件のパフォーマンスはバランス条件あるいは単眼条件より悪かった。これらの結果は、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を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表 3 のようにまとめられる。

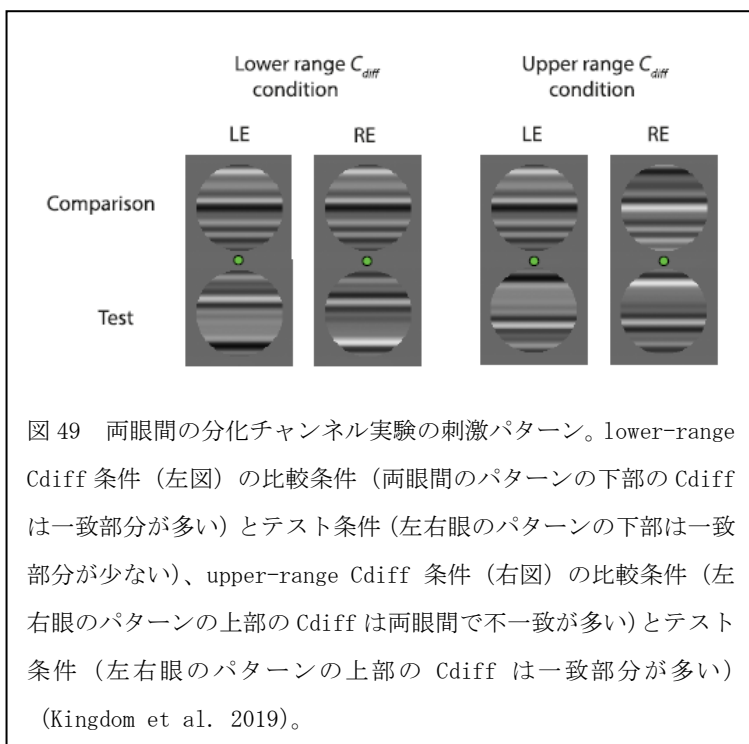
| | Within ocular dominance columns (more monocular) | Between ocular dominance columns (more binocular) |
|--|---|---|
| Cortical organization of iso-orientation domains | Pinwheels with neurons tuned to many orientations | Progressive orientation tuning in a linear direction |
| Spatial frequency tuning | Prefer lower spatial frequency, more of low-pass response profile | Prefer higher spatial frequency, band-pass response profile |
| Cross-orientation suppression | Less cross-orientation suppression | More cross-orientation suppression |
| Contrast response linearity | Relatively linear response to contrast | Nonlinear response to contrast |
| Selectivity of neuronal orientation tuning | Broader orientation tuning | Narrower orientation tuning |
| Implication for speed and contrast encoding | Better for representing high speed high contrast stimuli | Better for representing low speed low contrast stimuli |

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。とくに両眼間の差異チャンネルによる両眼間刺激の差異を検出する働き (interocular difference detection) は視覚の順応と結びついている (Kingdom et al 2018)。ここでは、両眼間の刺激差異の関わりを程度を区分し、両眼間刺激の差異を検出するメカニズム、とくに B-チャンネルの潜在的な役割がしらべられた。図 49 は両眼間の差異チャンネル実験に使用したサイン波形のグレーティングパターンである。



左図は比較条件 lower-range の Cdiff 条件 (左右眼のパターンの下部の Cdiff は両眼間で一致部分が多い) とテスト条件 (左右眼のパターンの下部の Cdiff は一致部分が少ない)、右図は比較条件の upper-range の Cdiff 条件 (左右眼のパターンの上部の Cdiff は両眼間で一致部分が少ない) とテスト条件 (左右眼のパターンの上部の Cdiff は一致部分が多い) をそれぞれ示す。

局所的な Cdiff は以下の式で表される。

$$C_{diff} = C\sqrt{2(1 - \cos\phi)}$$

ここで、C: 各眼のイメージコントラストの定数、 ϕ : 両眼間の刺激距離 (角度)。

両眼間でパターンは完全に一致すれば、 ϕ と Cdiff の値は 0 となり、一方、パターンが不一致ならば、両眼間の輝度は反対となり ϕ は 180 にセットされるので Cdiff の値は最大となる。その他のペア刺激の場合 ϕ の値は小さくなるので Cdiff の値も小さくなる。

被験者には刺激ペアの間の違いを弁別するように教示し、その弁別閾値を測定した。このような弁別事態では Cdiff の値が低い場合 (0 あるいはプラス) には B-チャンネルが働き、それが高い場合 B+チャンネルが働くと予測される。図 50 には、両眼間のフェーズ差 (ϕ) の関数としての RMS (root mean square) の変化 (両眼間のコントラスト差 (Cdiff) は赤色表示、とコントラスト総計 (Csum) は緑色表示) で、Cdiff はフェーズが減少してから飽和、逆に Csum は増大してから飽和する。このグラフは、両眼間の刺激ペアが 0° から 90° の間では Cdiff の反応である B-が作動し、90° から 180° のあいだでは Csum に対する B+チャンネルが作動することを示す。被験者は 7 人の成人でミラースコープを通して左右眼に提示された刺激を別々に観察した。左右眼に提示する刺激パターンは 8 通りのコン

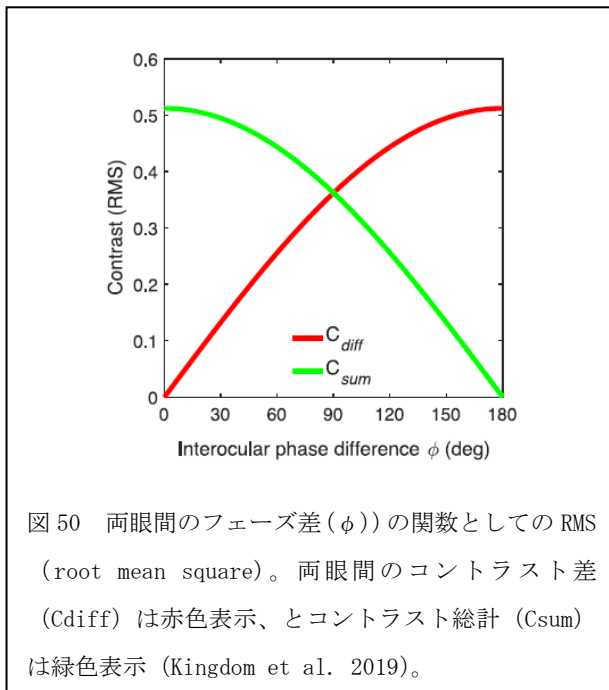


図 50 両眼間のフェーズ差 (ϕ) の関数としての RMS (root mean square)。両眼間のコントラスト差 (C_{diff}) は赤色表示、とコントラスト総計 (C_{sum}) は緑色表示 (Kingdom et al. 2019)。

トラストの等しいサイン波形のグレーティングで、その空間周波数は 1、2、3、4、5、6、7、8 c/patch とした。左眼への刺激フェーズ ϕ_0 は ($\phi_0 + a \cdot \phi / 2$)、右眼のそれは ($\phi_0 - a \cdot \phi / 2$) (ここでは空間周波数を 1 あるいは -1 にランダムに割り当てる) に設定した (ϕ_0 と a をランダムにすると、刺激波形がランダムになる)。左、あるいは右眼用の刺激パターンは融合するように注視点を挟んで上下に提示(図 49)し、 C_{diff} が下部にある条件(lower range)ではもっとも光沢 (luster) の刺激パターンを、 C_{diff} が上部にある条件(upper range)では光沢が最小の位置をそれぞれ選択するように教示した。次に光沢知

覚の閾値の測定方法を違えた実験 2 では、被験者に両眼間の不一致刺激の間の C_{diff} がより大きい方を比較刺激として提示し、テスト刺激にはより小さい方を順次提示してその違いを弁別させた。

実験 1 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。

実験 2 では、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。

実験 1 と 2 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

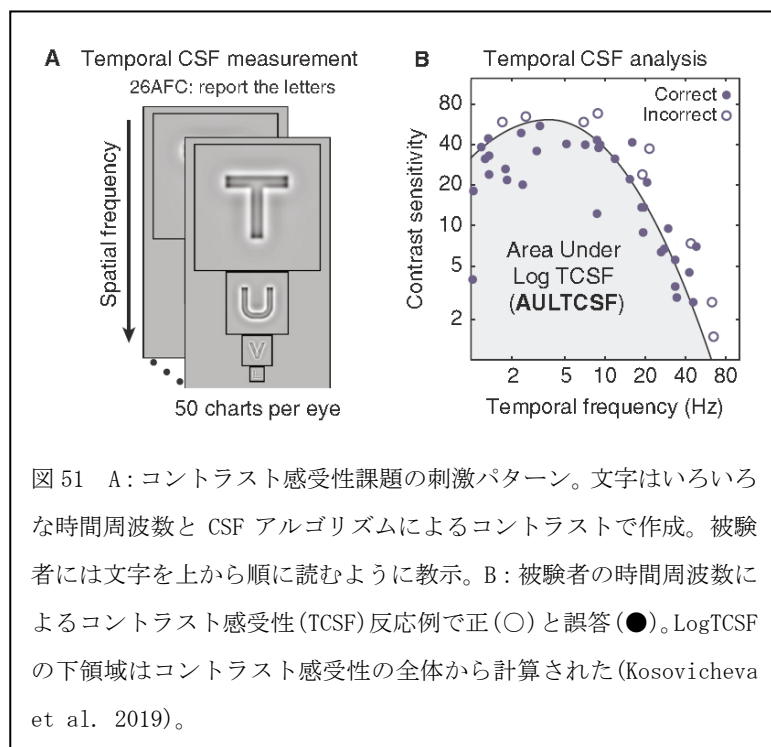
時間周波数の弱視における両眼間のバランスの障害

弱視はコントラスト感度、空間の歪み、両眼間抑止、そして立体視に障害をもたらす。これら弱視に伴う障害は空間周波数刺激によって変わり、コントラスト感度は高空間周波数で最大となり、両眼間の不均衡、立体視、空間の歪みの諸知覚でも高空間周波数で障害が起きる (Hess & Howell, 1977; Levi & Harwerth, 1977; Birch et al. 2016; Kwon et al. 2015; Holopigian et al. 1986; Barrett et al. 2003)。弱視による障害は神経生理的には初期視覚中枢における空間解像度の減損、とくにニューロンが低空間周波数にチューニングされてしまうことによる (Kiorpes et al. 1998; Movshon et al. 1987)。弱視は空間特性過程の処理についての減損とされてきたが、しかし未だ時間的特性あるいは両眼間の相互作用の過程処理の減損についてはわからないことが多い。弱視における時間的な減損については、弱視眼に対する刺激の処理速度とくに反応潜時、サッケード潜時そして視覚誘発電位が大きいので機能減損が生じる (Hamasaki & Flynn, 1981; Von Noorden, 1961; Ciuffreda, et al. 1978; McKee, et al. 2016; Levi & Harwerth, 1977; Levi & Manny, 1980; Sokol, 1983)。しかし、この種の時間的減損で空間のコントラスト感度 (contrast sensitivity) が損なわれるわけではなく、弱視眼に対する輝度やコントラストの減少が直接に反応時間を遅延させていると考えられる。さらに弱視における時間的な視覚情報処理の減損は両眼機能であるステレオプシスおよび両眼間バランスを損なうと考えられるが、時間的周波数によるそれらの変化は明らかではない。

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を明らかにすることが目的である。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。被験者は正常視者14名、弱視者 (屈折異常、斜視、複合弱視) 8名とした。刺激パターンはLCDディスプレイに提示し、両眼間バランス測定とステレオプシス測定ではディスプレイと同期させたシャッターグラスを用いて両眼視させ、時間的コントラスト感受性の測定ではテストしない片眼を遮蔽して単眼視とした。刺激は視力テストのスローン文字を指数平滑フィルター (最大空間周波数 5 cycles と 2 オクターブの帯域幅) でスムージングして作成した (図 51A)。両眼間バランス (図 52A) およびステレオプシス (図 53A) の測定では、4通りの周波数 (0、4、7.5、12 Hz) のサイン関数のカウンターフェーズフリッカーをもちいて試行ブロックごとに、また時間コントラスト感度の測定では、時間周波数は試行ごとに変えられた。

単眼の時間コントラスト感度実験の刺激パターン、手続きそして結果は図 51A, B に示されている。図 51A のように、刺激パターンとした文字は種々の時間周波数と CSF アルゴリズムによるコントラストで作成され、被験者にはスクリーンの中央の文字 (ピーク空間周波数を上から順に 1 から 8 cpd まで増大) を上から順に読むように教示した。実験の結果、時間周波数によるコントラスト感度 (TCSF) の正答を (○)、誤答を (●) で示すと図 51B

のようになり（一人の被験者反応例）、ここで示したように LogTCSF の下領域はコントラ



スト感度の全体から計算された。その結果、時間周波数に対するコントラスト感度は時間周波数 5 Hz をピークにした山型の曲線となった。健常者は両眼とも同一の時間コントラスト感度を示したが、弱視者は高空間周波数の場合にのみ両眼間で大きな差が見られた。弱視者は低空間周波数の時間的刺激情報を処理する能力を保持している。

両眼間バランス点の測定は図 52A に示した刺激パターンと手続きで実施した。

左眼に提示した刺激パター

ンのコントラストを変化させ、右眼のそれは 100% に固定 (時間周波数は左右眼で同等) し、被験者には左右眼に別々に提示された文字を左から右に読むように教示した。その結果、両眼間バランス点は弱視眼のコントラストの変化に対する他眼の反応比率で示された (図 52B 矢印)。時間と空間周波数における健常者と弱視者を比較すると、弱視者は健常者に比較して両眼間バランス点の不均衡を示した (弱視者: 0.796、健常者: 0.505、0.5: パーフェクトバランス点)。弱視者の場合、両眼間バランスの不均衡は中あるいは高空間周波数で最大 (1cpd で 0.75、4cpd で 0.84)、また両眼間のバランス点は低から中の時間周波数で最大 (4Hz : 0.81、12Hz : 0.77) となった。両眼間のバランス点は健常者と弱視者ですべての空間周波数にわたって有意な差が示されたが、これは弱視の眼コントラスト感度によっては説明しきれないと考えられる。

空間周波数条件のステレオプシスの閾値測定は、まず図 53A に示したように、最初に視差レベルを見当づける手続きが行われた。すべて交差視差で示された各行のサークルは右方向に行くにつれ小さく設定し、被験者には各行で奥行が知覚されるサークルを選択するように教示した。次に、ステレオプシスの閾値の測定のための刺激と手続きは、図 53B のように、3 組のリングからなるステレオ刺激 (全部で 12 セット) でそのうちひとつは奥行が手前になる視差がランダムにつけられているので、被験者には 3 つの中から手前になるリングを選択するように教示する。ひとつのチャートには 4 列にリング列があり、同列リングの空間周波数は同等であるが、下方の列にいくほど空間周波数が増大される。フリッ

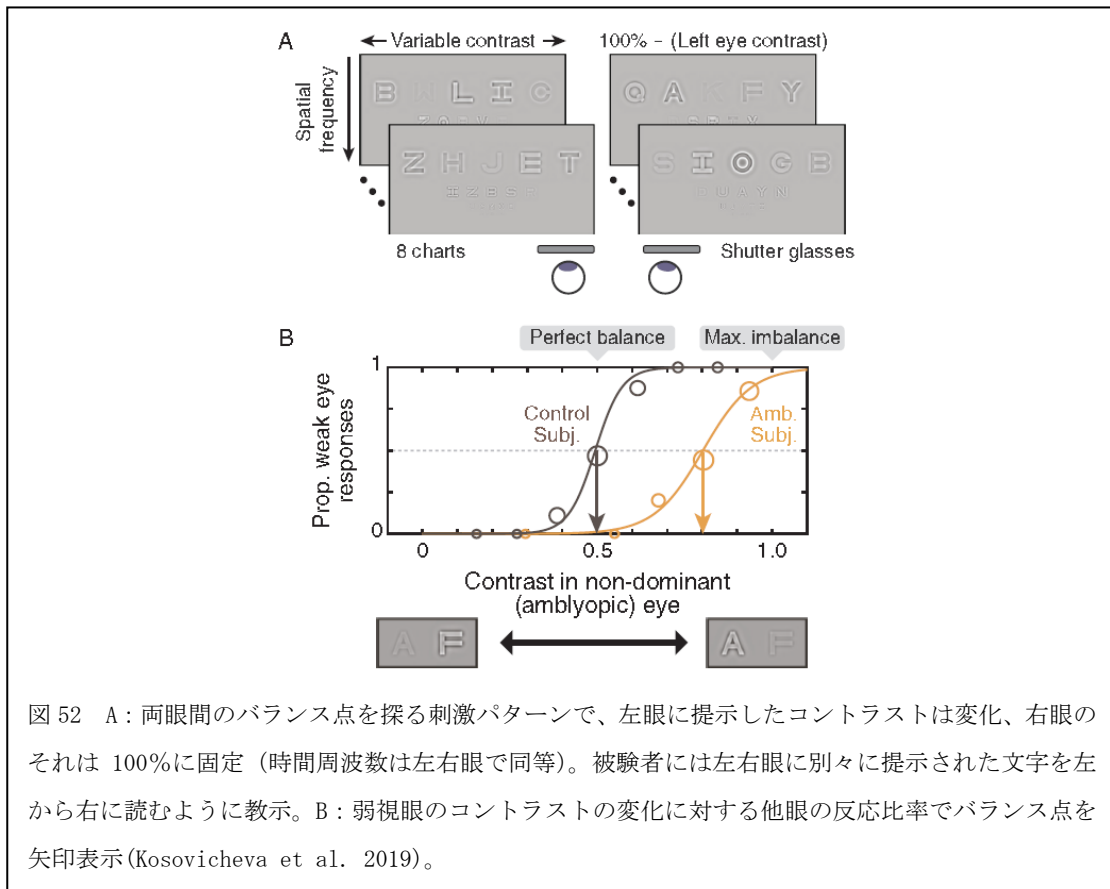


図 52 A: 両眼間のバランス点を探る刺激パターンで、左眼に提示したコントラストは変化、右眼のそれは 100%に固定 (時間周波数は左右眼で同等)。被験者には左右眼に別々に提示された文字を左から右に読むように教示。B: 弱視眼のコントラストの変化に対する他眼の反応比率でバランス点を矢印表示 (Kosovicheva et al. 2019)。

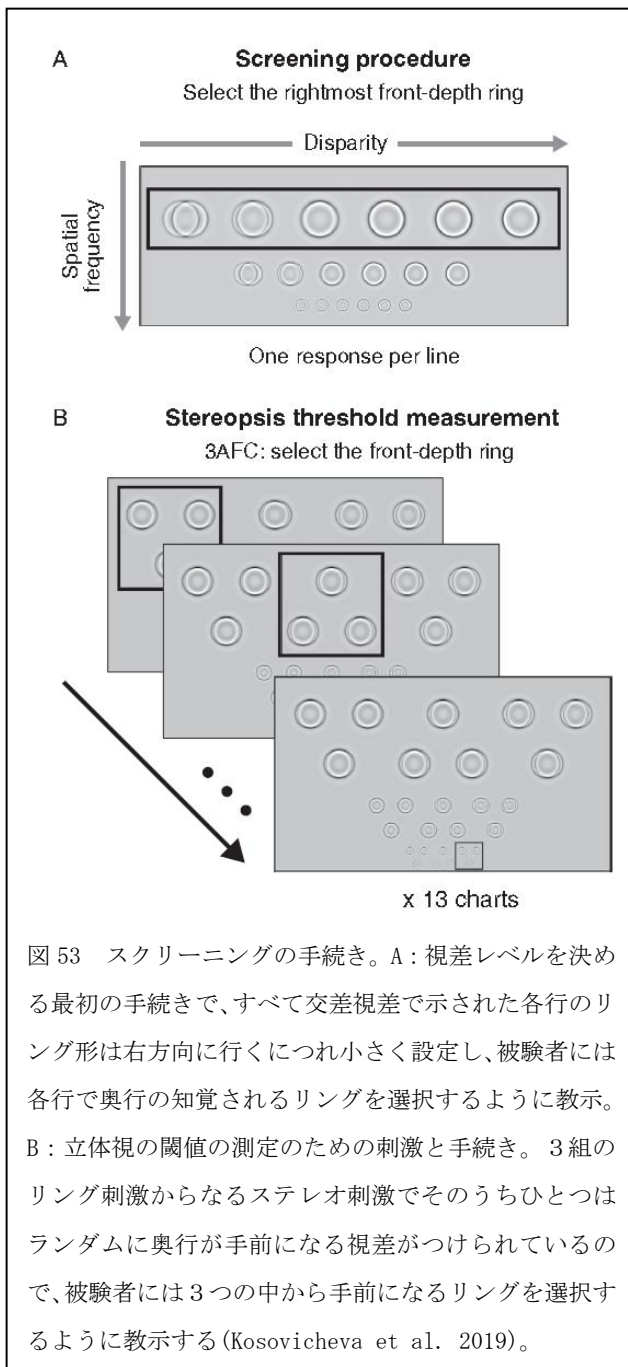
カー条件のステレオプシスの閾値測定ではすべてのサークルは同一の時間周波数とするが、各 3 組のサークルは時間的フェーズを同じとした (したがって両眼間の刺激の時間的遅延はない)。その結果、弱視者のステレオプシスの閾値には健常者に比較して空間周波数の大きな影響が示されたが、時間周波数による差は生じなかった。

さらに、ステレオオプシス閾値、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。

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。

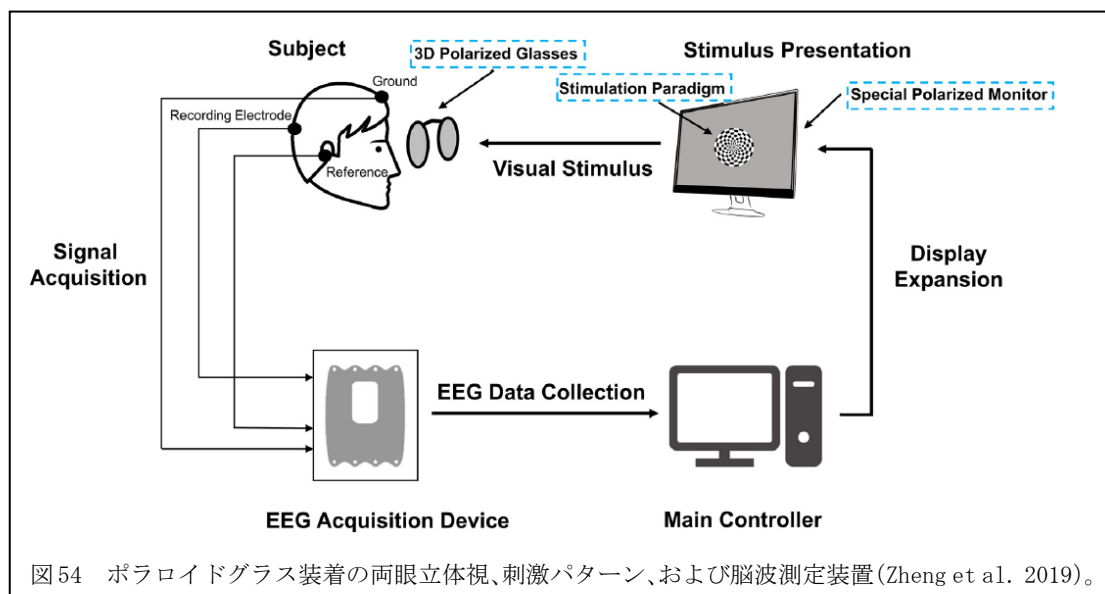
斜視弱視者の両眼間抑制に関する定常視覚誘発反応の測定

斜視は明らかな眼球異常がないのに生じる神経発達に関わる視覚障害で 3% から 5% で発症する。斜視の前兆には、斜視、眼球振盪、高度の遠視と近視、そして形知覚の異常 (先

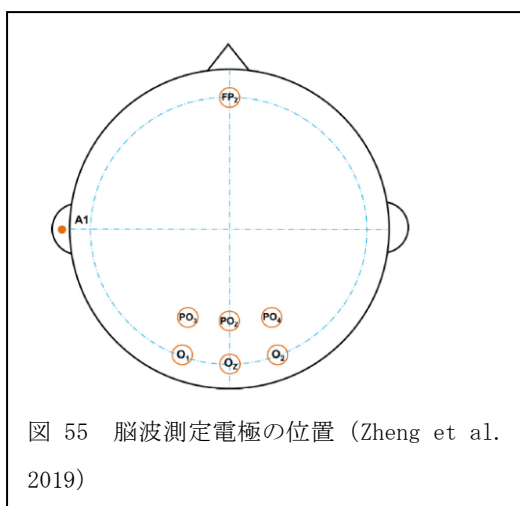


天性白内障、眼瞼下垂) がみられる。斜視の原因は2つで、一つは単眼視覚によるもの、他の一つは眼球間抑制である。動物研究によれば、発達の重要な時期での単眼の視覚異常、すなわち視覚経路での劣位眼の劣等と優位眼の支配による視覚中枢の構造の改変が弱視の原因と指摘した。さらに、両眼に刺激入力されたときV1の細胞が両眼で同期して働かないことも弱視の原因として指摘された。最近、Birch(2013)は、弱視者には劣位眼の正常な視覚発達を妨げる両眼間の抑制が起きることによって正常な両眼視の統合(両眼融合)を妨げられていると報告した。この両眼間抑制はワース四灯テスト(各眼のいずれかに赤、他方に緑の対象を点灯し片眼ずつ知覚させる)、プルブリッチ錯視テスト(片眼にデンシティフィルターをかけ水平に反復移動させる対象が奥行的に円弧を描いて知覚される)を用いて測定されるが、幼児や児童には困難な課題である。脳波(EEG)は、弱視の眼球間抑制を測るもうひとつの手段である。とくに、定常的な視覚刺激を与える定常状態視覚誘発電位の測定は、児童にも負荷を与えることが少ないので活用できる。

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。被験者は11名の斜視者(複合斜視と屈折異同、8から16歳)と12名の健常者(10から15歳)である。実験では異なる時間的頻度の刺激を各眼に別々に提示した。被験者の視力は矯正されたもっとも良い状態で試行した。実験に使用した刺激パターン、両眼に装着したポラロイドグラス、脳波測定装置は、図54に示されている。6個の脳波電極の位置は後頭葉である(図55)。±200μVを越える増幅はアーチファ



クトとしてオミットした。SSMVEPs の刺激パターンは、図 54 にあるように、円形の白黒のチェッカーボードで両眼に装着した 3D ポラロイドグラスで各眼に別々に提示した。被験者には、図 56 に示したように、左・右眼に異なる刺激 (8Hz あるいは 12Hz、8Hz あるいは背景のみ、12Hz あるいは背景のみ) を提示した。



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。

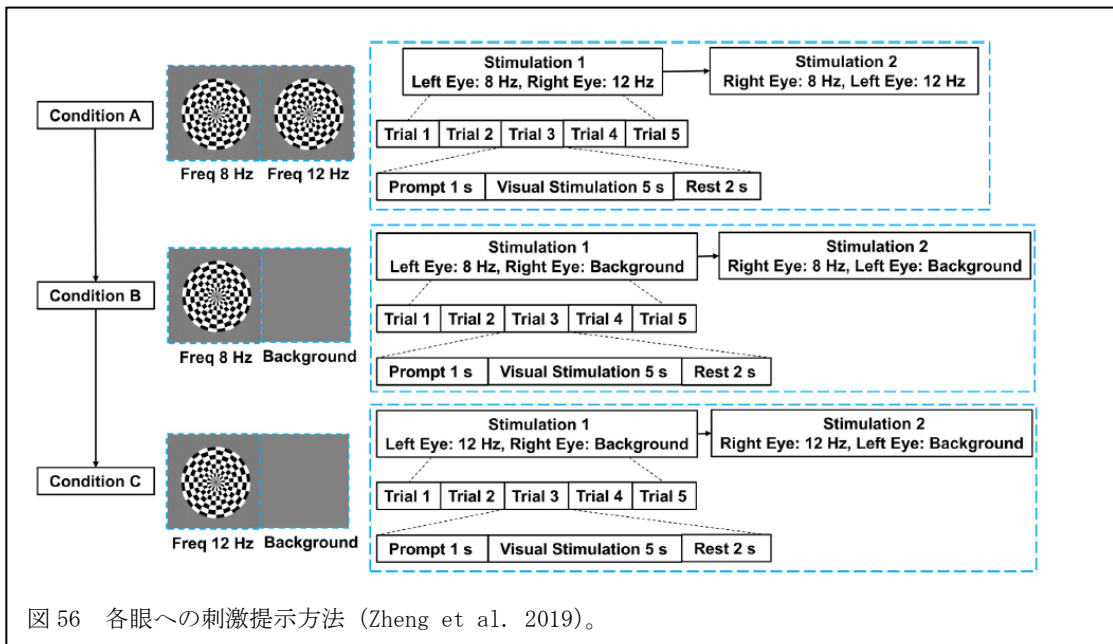


図 56 各眼への刺激提示方法 (Zheng et al. 2019)。

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) と両眼間のマスクング (DM, Dichoptic Masking) を比較検討した。実験の刺激パターンは、図 57 のように、各眼別々にサイン波形のグレーティング

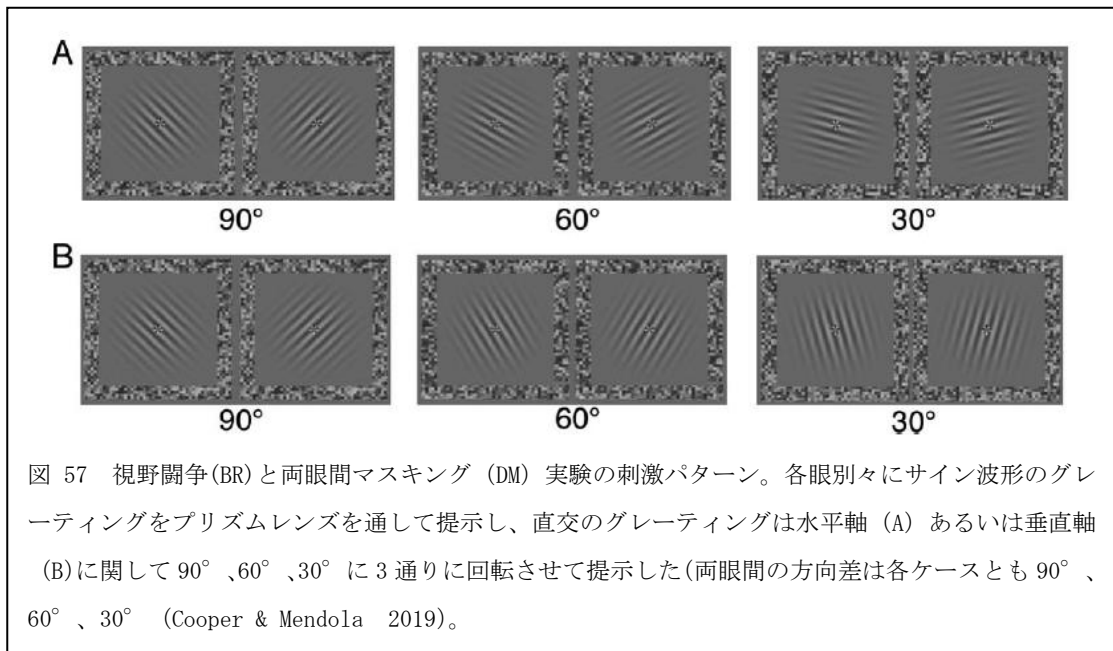


図 57 視野闘争(BR)と両眼間マスクング (DM) 実験の刺激パターン。各眼別々にサイン波形のグレーティングをプリズムレンズを通して提示し、直交のグレーティングは水平軸 (A) あるいは垂直軸 (B) に関して 90°、60°、30° に 3 通りに回転させて提示した (両眼間の方向差は各ケースとも 90°、60°、30° (Cooper & Mendola 2019)。

で、プリズムレンズを通して提示した。直交のグレーティングは水平軸 (A) あるいは垂直軸 (B) に関して 90°、60°、30° の 3 通りに回転させて提示した (両眼間の方向差は各ケースとも 90°、60°、30°)。実験に先立って、被験者の立体視力を Randot Stereoacuity テストと the iPod stereoacuity テストで測定し、また 2 通りのテストを用いて優位眼の決定を行った。BR 実験では被験者に左傾斜パターンが視えたら左矢印キーを、右傾斜パターンが視えたら右矢印キーを押すように教示し、DM 実験では、第 1 試行ではマスク試行で

は非テスト眼にコントラスト一定のマスク刺激、テスト眼に 0° 、 30° 、 60° 、 90° のいずれかの方向のターゲットのコントラストを上下法で変えながら提示し、第2試行では第1試行の前あるいは後に同一のマスク刺激を非テスト眼に、テスト眼にはグレイ色の背景刺激を提示した。被験者は2つの試行のうち左右眼のどちらがターゲット刺激をもっていたか、マスク刺激とターゲット刺激が同時に提示されたときどちらがターゲットと知覚されたかを指示するように教示された。このDM実験では、ターゲット刺激がマスクされた場合の検出に必要なコントラスト量が測定された。

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。

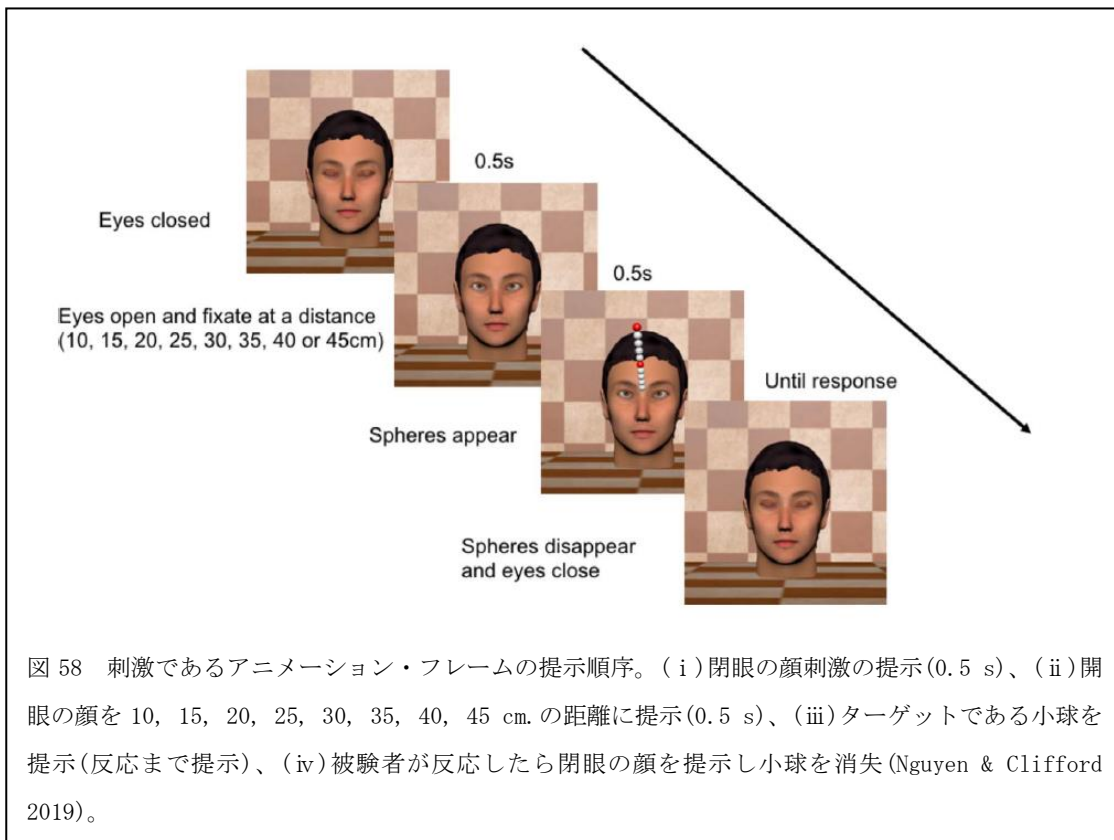
これらの結果から、単眼の感受性と両眼間の抑制は弱視者の両眼立体視における不均衡の原因になっていると考えられる。

1.7 その他の研究

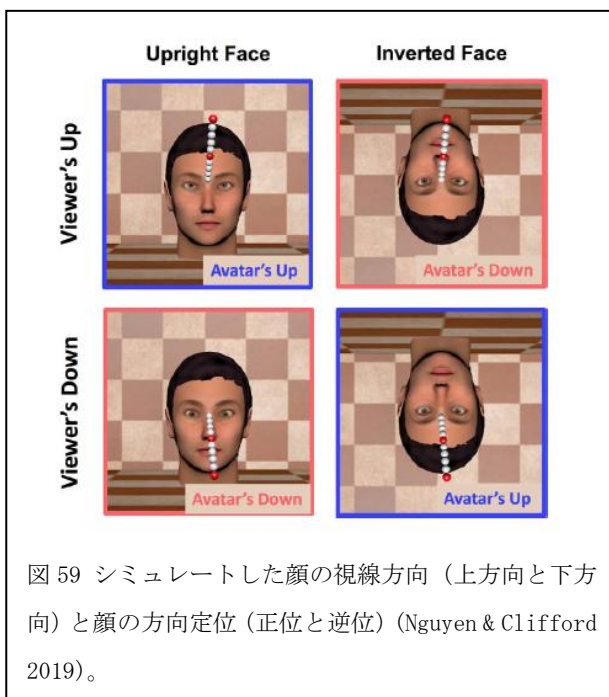
観察者の他者までの凝視距離の知覚

自己と他者の社会的関係において、他者の視線は他者が何に注視しているか、何を考えているか、何を感じているかを知る有力な情報源である。視線を対人関係の研究に用いるとき、視線の指標として視方向と距離があり、視線の距離 (輻輳距離) についての研究は少ない (Nguyen et al. 2018)。

Nguyen, & Clifford (2019) は、他者の顔を注視する絶対距離、および注視方向が違うとその距離も異なるかを実験した。顔を3次元で提示し、注視距離およびその時の距離が測定された。顔刺激は顔モデルとテクスチャから合成 (図 58) され、ステレオビジョンに提示された。顔刺激は、とくに眼球の回転位置と距離測定のためのターゲットの3次元配置に留意され、またリアルな奥行をシミュレートするために2台のカメラ間距離を各被験者の眼球間距離に対応させて設定した。実験手続きは、図に示したように、顔刺激のアニメーション・フレームを、はじめに閉眼の顔刺激の提示 (0.5s)、次に開眼の顔を10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 cm. の距離に提示 (0.5s)、そしてテストターゲットである10個の小球 (5番目の大きさ直径25、10番目の大きさ50cm) を提示し、「1」から「9」と「0」の10個のキー操作で何番目のターゲットが顔の奥行位置に当たるかを被験者に判断させた。この場合、ターゲットが顔にもっとも近い判断をキー操作「1」で、最も遠い判断を「0」キー操作で反応するように教示した。また、図 59 に示したように、シミュレートした顔の視線方向を上方向と下方向に、顔の方向定位を正位と逆位にそれぞれ設定した。



実験の結果、顔刺激の視線が下方にある条件では観察者の顔刺激に対する凝視距離がより過小視になり、その弁別のための距離の限界は輻轉で 35cm 以上であること、また、逆位の顔刺激では凝視距離は顔刺激の視線が上方にある条件でより過小視された。



このことから、観察者の他者までの凝視距離は観察者中心で知覚されていると考えられる。

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。Cesaneck & 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。とくに、ひと

つの奥行手がかりが一定のバイアスで影響されているとき他の学習過程が利用できればそのエラーを解消できるかを問題とした。手がかりの再重み付けは間違っ手がかりがハプティックの手がかりに対応していない場合に生起すると予測される。さらに、手がかりの再重み付けがどのように時間経過に伴って変化するかを視覚－運動課題で試行ごとの運動反応をしらべることで吟味した。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。そのための考案されたハプティックフィードバック実験装置は図 60 に示されている。図の A のように、被験者にはステレオグラスを装着してハーフミラーを通して視覚対象を観察させる。この

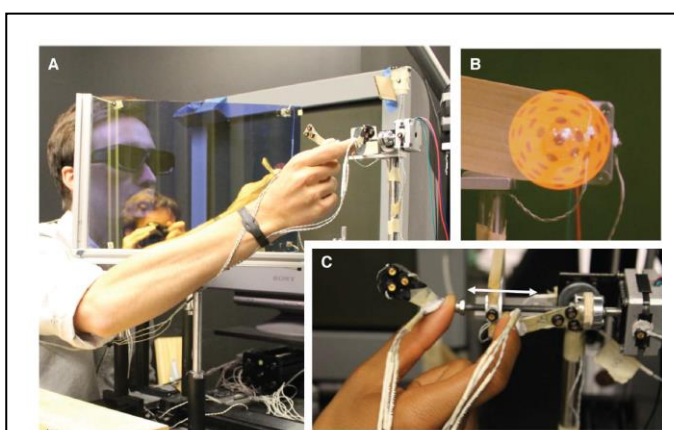


図 60 VR を用いたハプティックフィードバック実験装置。

(A) 被験者はステレオグラスを装着しハーフミラーを通して視覚対象を観察。この対象はモーターで駆動する装置に設置され異なる奥行のハプティック情報をフィードバックする。被験者はこのレンダされたシミュレーション対象に右手の親指で球体の先端に、人差し指で下部に触る。この手のグリップの大きさが測定される。(B) シミュレーションされた放物球体 (paraboloid) でその先端はハプティック情報を十分にフィードバックさせる。(C) ハプティック情報のフィードバック装置でスッテパモーターによって前後にワッシャーを動かして任意に奥行の大きさを変え、被験者には親指を前面に人差し指を後面に触れさせる。放物球体の面はテクスチャあるいはステレオで作成された (Cesaneck & Domini 2019)。

視覚対象はモーターで駆動する装置に設置され異なる奥行のハプティック情報をフィードバックする。被験者にはこのシミュレーション対象に右手の親指を球体の先端に、人差し指を底部に触らせる。このときのグリップの指間の大きさが測定される。図 B は、シミュレートした放物球体 (paraboloid) でその先端はハプティック情報を十分にフィードバックさせることができる。図 C は、ハプティック情報のフィードバック装置でスッテパモーターによって前後にワッシャーを動かして任意に奥行の大きさを変え、被験者には親指を前面に人差し指を後面に触れさせる。放物球体の面はテクスチャあるいはステレオの各手がかりで奥行が作成された。被験者は 18 から 35 歳の右利きの 60 人であった。被験者の右手の動きはモーションキャプチャ・システムで測定した。被験者にはハーフミラーを通してステレオとテクスチャ手がかりで作

成された 3 次元のシミュレートした放物球体を観察させた。

実験 1 では、ステレオあるいはテクスチャ手がかりによる放物球体を用いたマッチング

課題が実施された。そこでは、9つの放物球体がステレオあるいはテクスチャの2つの手がかりを個別に操作して、その奥行が物理的に25、35、45mmになるようにシミュレートされた(図61のa)。図の対角線の図形は2つの「手がかり・一致」条件(ドットが円形の右列下端)、対角線をはずれたものは「手がかり・コンフリクト」条件(ドットが浅い円形の右列上端)である。被験者には手がかり・コンフリクト条件(Standard)での知覚した奥行を

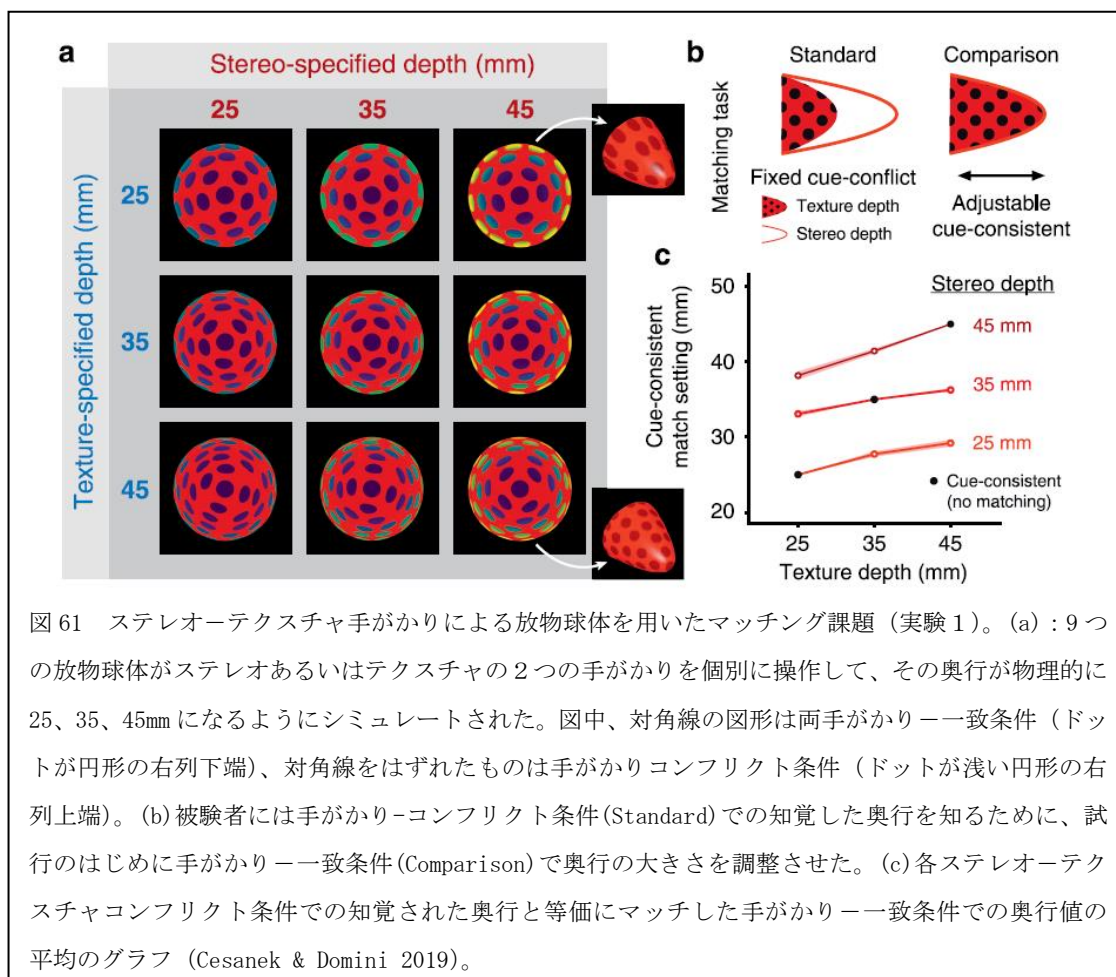


図61 ステレオテクスチャ手がかりによる放物球体を用いたマッチング課題(実験1)。(a):9つの放物球体がステレオあるいはテクスチャの2つの手がかりを個別に操作して、その奥行が物理的に25、35、45mmになるようにシミュレートされた。図中、対角線の図形は両手がかり一致条件(ドットが円形の右列下端)、対角線をはずれたものは手がかりコンフリクト条件(ドットが浅い円形の右列上端)。(b)被験者には手がかりコンフリクト条件(Standard)での知覚した奥行を知るために、試行のはじめに手がかり一致条件(Comparison)で奥行の大きさを調整させた。(c)各ステレオテクスチャコンフリクト条件での知覚された奥行と等価にマッチした手がかり一致条件での奥行値の平均のグラフ(Cesaneck & Domini 2019)。

知るために、試行のはじめに「手がかり・一致」条件(Comparison)で奥行の大きさを調整させた(図b)。図(c)には、ステレオあるいはテクスチャコンフリクト条件での知覚された奥行と等価にマッチした手がかり・一致条件での奥行値の平均をグラフで示した。

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、図2の(c)に示すように、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。

実験2は、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。しかし、利用していた手がかりが突然ノイズを高めると奥行との関係を減じてコンフリクトによるエラーが生起する。そこで、

手がかりの再重み付けは手がかりとハプティックフィードバックが関係を減じたときにエラー反応として起きると予測される。実験2では、ステレオとテクスチャの間に6通りのc「手がかり・コンフリクト」条件が設定された。より奥行の浅い手がかりは20-45mmの範囲に、奥行はのより深い手がかりは30-50mmの範囲とした。被験者群は2つに分け、「Adapt+」群と「Adapt-」を構成した。前者は強化手がかりを2つの手がかりの中でより奥行の深い方で強化され、後者はより浅い方で強化された。両群ともテクスチャとステレオ手がかり単独でハプティック強化するが、試行は別々のセッションで実施した。被験者は手がかりが一致条件と手がかりがコンフリクト条件の間で放物球体の奥行の知覚判断をしてから、指による握り課題 (grasp) を次の5通りのステップで行った。(1) 6通り「手がかり・一致」刺激での知覚的判断させた事態の grasp (baseline)、(2) 手がかり不一致の刺激セットでのハプティック強化を伴う grasping の事前テスト、(3) grasping の順応の実施(「Adapt+」群は10通り、「Adapt-」は5通り)、(4) 「手がかり・不一致」の刺激セットでの grasping の事後テスト、(5) 「手がかり・一致」条件で刺激の知覚的判断を消去する grasping。

実験2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関係を変容することから生じていることが明らかにされた。