

1. 両眼立体視

1.1. 視野闘争

プローブ (probe) の随伴提示による視野闘争のメカニズムの探求

視野闘争の研究では、各眼に提示した2つのパターンのいずれかを短くフラッシュして強調するとその閾値が他眼に提示したパターンより小さくなる (Blake et al, 1990; Fox, 1991; Fox & Check, 1968; Wales & Fox, 1970)。これは視えていないパターン (意識にのぼらない) が抑制されていることを意味する。抑制されている側に提示されたプローブは非抑制側パターンへの反転を促進するが、一方、優位眼に提示されたプローブは反転を抑える (Blake et al., 1990; Fox, 1991;

Fox & Check, 1968; Metzger et al., 2017; Walker & Powell, 1979)。Valle-Inclan et al. (1999) は、プローブ提示のない条件では、各眼のパターンの知覚時間は等しくなることを示した。問題は、プローブが対象パターンの内部あるいは外部に提示されても視野闘争への効果が等価になるか否かである。すなわち、これまでの研究では、プローブの効果はパターンのある眼にあるのか、あるいはパターン上にあるのかに限定されていた。

Metzger & Beck (2020) は、視野闘争におけるプローブの効果が眼球間のコンフリクトにあるのか、あるいはパターン間のそれにあるのかを検討するために、プローブのパターン上の位置を操作し、各知覚時間を指標として実験した。視野闘争は、**図1**に示すように、左右眼パターンが顔パターン (男あるいは女) とテクスチャ (砂利あるいは砂) がペア (顔とテクスチャ) で構成され、赤あるいは青色のいずれかでそれぞれ彩色された。刺激パターンの組合せは2組の「男×テクスチャ」と2組の「女×テクスチャ」、これにそれぞれに「青色×赤色」の組合せが加わるので総計8組の刺激条件を構成した。被験者 (20人、18から24歳) はプリズムレンズによって左右眼の刺激パターンをそれぞれの眼で観察させ、顔あるいはテクスチャのいずれが優位に知覚されているかを2つのボタンで視えている限りの時間押し続けるように教示した。実験1での左右眼への刺激パターンに加えられたプローブは白と灰色の小さな四分円で、その位置は優位眼あるいは抑止眼のどちらかで、**図2**に示したように、顔あるいはテクスチャに重なる楕円形領域の外あるいは内側4箇所のひとつにのみ200msの時間、1回の試行で1回のみ提示した。左右眼どちらかの知覚優位は1回のみとし、その持続時間が測定された。実験1では、プローブを対象図形 (顔あるいはテクスチャ) に重なるように、あるいは対象の外側に提示し、その位置に関係な

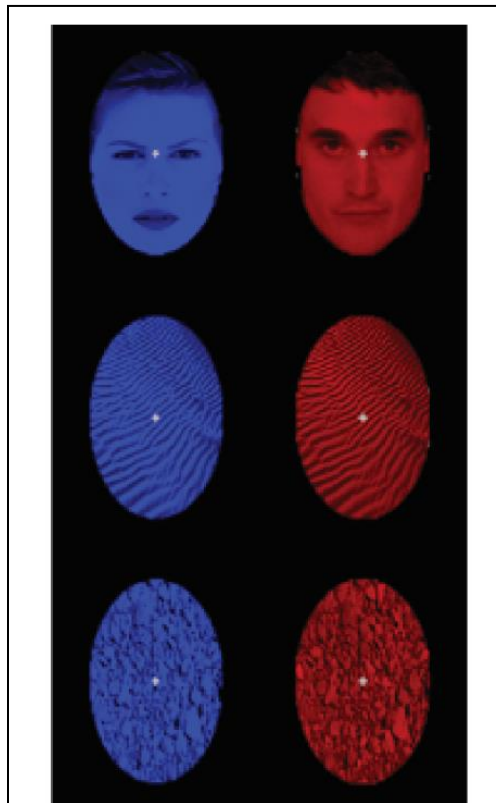


図1 視野闘争実験(1と2)の左右眼パターン。顔パターンとテクスチャで構成され、赤と青色で彩色されている (Metzger & Beck 2020)。

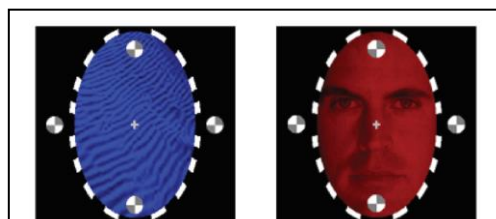


図2 実験1での左右眼への刺激パターンに加えられたプローブの位置。プローブは優位眼あるいは抑止眼のどちらかで、しかも描画位置のひとつにのみ出現 (Metzger & Beck 2020)。

くプローブの効果があるのか、あるいは対象に重なることに効果があるのか（両眼間

コンフリクトに関係するのか）を検証した。その結果、抑制された眼球とプローブを付した優位眼の間の対象知覚持続時間は、対象に重なるようにプローブを提示した条件(On-object)の方が対象の外に提示した条件(Off-object)より有意に長いこと、また、「On-object」条件は「Off-object」に関わらず抑制眼側の知覚持続時間は非抑制眼より有意に短いこと、さらに優位眼でもプローブを提示した条件の知覚時間は非プローブ条件より有意に長いが、抑制眼のそれは非プローブ条件とは有意に異なることも示された。そこで、プローブをつけた抑制眼と付けない優位眼の間、およびプローブの位置（「On-object」と「Off-object」）の間で顔とテクスチャで知覚持続時間が変わるかをしらべると、顔の知覚時間はテクスチャのそれとは異なることが示された。これは視野闘争に関して対象が顔であったという偏好は存在しないことを意味した。

これらの結果から、プローブのある抑制眼は非抑制眼より知覚持続が短いこと、また「On-object」のプローブ配置条件は「Off-object」条件より知覚持続が短いことが示された。このことは、プローブによる対象の反転が対象の上にプローブを配置させなくてもその周辺ならば効果があることを示唆する。

実験 2 では、プローブが「Off-object」でも、対象の近傍にあれば知覚持続時間に影響するかもしれないが吟味された。「Off-object」条件のプローブの位置は、**図 3**のように、7箇所、「On-object」条件は1箇所である。対象図形である顔とテクスチャは垂直軸に関して伸張して提示した。「Off-object」条件のプローブの位置は対象の注視点である中心から等距離に配置したので対象からの距離は単調に増加する（対象の中心からプローブまでの距離は視角にして 0.26 度、0.57 度、0.83 度）ので、注視点からの偏心度を等しくした条件で

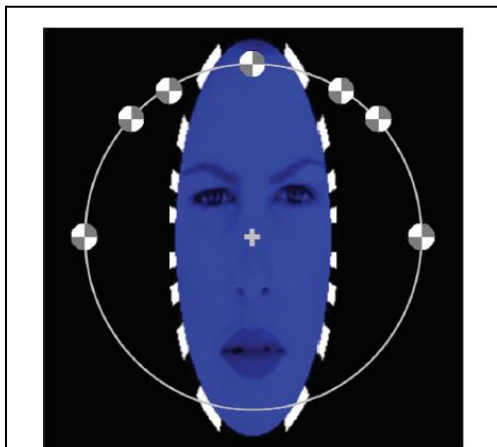


図 3 実験 2 におけるプローブで、実プローブは優位眼あるいは抑制眼のどちらかで、しかも描画位置のひとつにのみ出現。サークル円は注視点からの一定の離心範囲をさす（実験では非表示）(Metzger & Beck 2020)。

プローブの知覚反転への効果を比較した。プローブは優位眼あるいは抑制眼のどちらかに提示し、しかも描画位置のひとつにのみ出現させた。サークル円は注視点からの一定の離心範囲をさす（実験では非表示）。

実験 2 の結果、実験 1 と同じくプローブの「On-object」条件では知覚持続時間は「Off-object」条件より長いこと、優位眼は抑制眼より知覚持続時間は長いがしかし対象からのプローブ距離による有意な差は見られないこと、

「On-object」条件と「Off-object」条件の知覚持続時間

は、プローブを用いない条件と有意に異なることが示された。

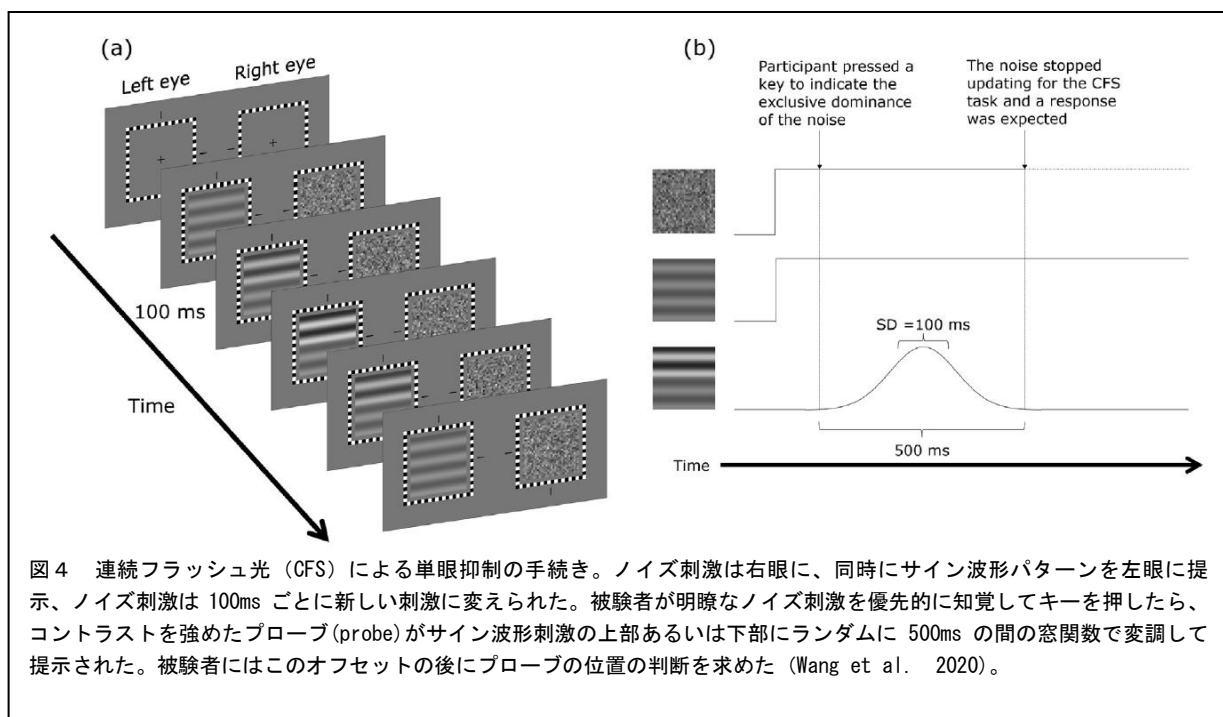
これらの結果から、一眼に提示したパターンにプローブをつけるとプローブを付けない他眼より知覚の反転を促進するし、しかも「On-object」条件の方が「Off-object」条件のより強い効果あることが明らかにされた。

これらの 2 つの実験から、プローブを導入した視野闘争事態においては「On-object」条件の方が「Off-object」条件より強い知覚抑制効果があり、その結果、視野図形の反転を促進すると考えられる。

短時間の単眼遮蔽による遮蔽眼の眼球間抑制の減少

一方の眼を2—3時間遮蔽すると、非遮蔽眼の感覚の優位が増大することが哺乳類で知られている。1964年にHubel & Wieselは単眼遮蔽による脳の環境への順応がもたらす視覚野の変容をまとめた、この変容は片眼のみの遮蔽によるアンバランスがもたらす特有のものであるとした。片眼遮蔽による眼の優位の逆転は、その効果が続く時間は限定される(Blakemore et al.1978; Swindale, et al. 1981)。

これらの研究を踏まえて、Wang et al. (2020)は、第1に短い単眼遮蔽によって視野闘争が両眼間で変えられるか、第2に短い時間の遮蔽によって各眼の優位性が連続的なフラッシュ光(continuous flash suppression, CFS)による検出閾の測定から抑制が確かめられるか、第3にパターンのコントラストを増強したことによる各眼の閾値の変化には眼球優位性が随伴するか、などについて実験で確かめた。22歳から49歳の被験者のステレオ視力を測定した後に、ミラーステレオス



コープを用いて視野闘争刺激を左・右眼に別々に提示した。図4にあるように、ノイズ刺激を片眼(右眼)に、同時にノイズ刺激と同等のコントラストのサイン波形パターンを他眼に提示した。ノイズ刺激を 100ms ごとにドットの輝度をランダムに変えて提示し、被験者が明瞭なノイズ刺激を優先的に知覚したらキーを押して反応するように教示した。さらにコントラストを強めたプローブ (probe) がサイン波形刺激の上部あるいは下部にランダムに 500ms の時間窓関数で変調して提示し、被験者にはこのオフセットの後にプローブの位置の判断を求めた。ノイズ刺激は 10Hz の頻度で連続して変えられ、他眼のグレーティング刺激を抑制した。視野闘争 (BR) 測定では、左右眼への提示刺激は CFS 事態で用いられたのと同じとし、両方とも静止刺激で提示した。BR 事態では、被験者に明瞭なノイズ刺激、グレーティング刺激あるいは混合刺激のどれが知覚されているかをキー押しで問い、その事態が続く限りキー押しも続けるように求めた。CFS 事態ではプローブによる測定法が用いられ、他眼に提示したダイナミックノイズ刺激による抑制を脱けるために必要なコントラストの増大量が測定された。被験者には、はじめに注視点である十字形を注視し、その後ノイズパター

ンが明瞭に知覚されたらすぐキー押しでプローブを提示するように教示した。プローブのコントラストを徐々に増強し、グレーティングパターン上のプローブの位置（上あるいは下）が知覚されたらキー押しで被験者に反応させ、その閾値を測ることで抑制が脱ける値が求められた。プローブのコントラストは40%からスタートし、上下法で上げ下げしてパフォーマンス79.3%の正反応が得られるまで試行した。CFSとBR事態は非利眼を不透明パッチで遮蔽する前と後で実施し、遮蔽時間は150分、実験は脱遮蔽後35分以内に完了した。これら一連の実験は24時間を挟んで3回実施された。CFS事態でのコントロー条件として単眼のみでの測定も実施した。このように、総体的な両眼間の優位性について視野闘争（BR）の変容過程を追跡することで、また連続的フラッシュによる抑制（CFS）事態でのプローブの検出閾値の変化から両眼間の抑制についての感度を明らかにすることが試みられた。

実験の結果、(1)150分の単眼遮蔽による視覚剥奪はBRとCFS事態の両方で両眼間抑制バランスを変え、両眼間優位性を変えること、(2)BR事態における知覚された持続時間に対する明確なノイズとグレーティングパターンの累積確率分布を遮蔽前の値に基づいて標準化して比較すると、遮蔽眼条件は非遮蔽眼条件よりノイズあるいはグレーティングパターンのフェーズ時間が長くなるにつれて累積生起確率も高く維持され、遮蔽眼への相対的優位が示されたこと、(3)CFS事態では、遮蔽された眼の眼球間抑制が減じ、しかも他眼への補足的な変化も伴わないこと、(4)CFS事態では、遮蔽眼のプローブ検出のコントラスト閾値はBR事態とは反対に大きく、眼球間の感度が弱まること、などが示された。

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

短時間の眼球優位性の可塑性

視野闘争は、一つには眼球間相互の抑制によって、他には眼球内の抑制が知覚意識の闘争を引き起こすことで生じる(Klink et al.2010; Said et al. 2013)。抑制は優位刺激の提示を長くすることによって増大し他眼のイメージが優位になる。これは磁気共鳴法（magnetic resonance spectroscopy）でも実証され、抑制物質であるGABA(gamma-amino butyric acid)が優位なイメージに関係する後頭葉で増える(Pitchaimuthu et al. 2017; van Loon et al.,2013)。この半球内のGABA物質は半球間の抑制や統合にも関与している。とくに抑制の基礎となる視野の周囲の抑制に関与し、これが刺激間の競合を通して一つの刺激の視覚処理に影響を及ぼす。また最近の研究では、GABAの抑制物質は視覚中枢における可塑性に影響し、成人の脳の働きばかりでなく発達過程にも関与する。この可塑性の特性は、感覚のシステムが徐々に体制化される幼児期に最大となる(Berardi et al.2000; Hubel & Wiesel, 1970; Hubel, Wiesel, & LeVay, 1977; Wiesel & Hubel, 1963)。しかし、脳は柔軟性を維持している。例えば、ある視方向を数時間剥奪すると、その方向への感度が高まる(Zhang et al. (2009)) こと、また一眼のコントラストを2時間剥奪すると剥奪された眼の明るさ感度が一気に強まる(Binda & Lunghi, 2017; Lunghi et al.2015; Zhou et al. 2014)ことなどが報告された。重要なことは、この一時的な感度の高まりが弱視者でもパッチの除去後数ヶ月視力が改良されていることにある(Lunghi, Sframeli et al, 2019)。しかし、この効果には個人差が

あり、遮蔽眼の一時的感度の高まりと後頭葉の GABA 減少の間には強い相関がある (Lunghi, Emir, et al. 2015)。

Steinwurz et al. (2020) は、脳の恒常的な可塑性と GABA 間の関係を前提として、3 種類の知覚課題 (両眼視野闘争、運動による奥行視、傾き錯視) の個人間差をしらべ、また両眼視野闘争では単眼剥奪事態でもしらべた。被験者 54 人 (40 女性、14 男性、平均年齢 26.5 歳) が 3 種類の知覚課題に取り組んだ。傾きの錯視課題ではターゲットは 45 度傾斜 (点線)、背景と $\pm 15^\circ$ 違うように提示し、被験者にはターゲットがどちらかといえば垂直あるいは水平かを答えさせた。運動による奥行視課題で、白と黒のドットは反対方向に運動させるとシリンダーが視える。被験者には観察時間中のシリンダーが時計方向あるいは反時計方向、またはそれらが混合しているかを 3 種類のキーで答えさせた。両眼視野闘争課題では左・右眼でガボール刺激を直交 ($\pm 45^\circ$) するように提示し、3 分間の単眼視剥奪の前と後に、テスト試行として視野闘争刺激を 3 分間提示して継続的に刺激の角度と回転方向 ($+45^\circ$ あるいは -45° 、右回り方向か左回り方向か、あるいは不明瞭な混合知覚) を反応キーで応えるように被験者に教示した。単眼剥奪の手続きは、視野闘争課題条件のみで、2 時間の視野闘争実験で平均的なフェーズが長く出る方の眼を優位眼と特定し、パッチを装着することで試行した。このように、実験では 2 種類の知覚課題の間の連関、および 2 種類の知覚課題のパフォーマンスについて 50 人の被験者間の相関、および視野闘争課題では単眼剥奪前・後のパフォーマンスがしらべられた。

実験の結果、50 人の被験者の知覚課題の結果の被験者間の相関をみると、視野闘争における優位性フェーズの持続時間は運動による奥行視の課題と密接に関連し、さらに傾斜錯視の中心と周辺の相互作用とも関連した。このような競合的知覚課題において「視野-中心」と視野闘争が共通の視覚システムに担われていることが示唆された。視野闘争課題での 2 時間の単眼剥奪の結果については、眼球優位性は剥奪眼の方にシフトし、単眼剥奪後の知覚フェーズの大部分は剥奪以前のものとなった。

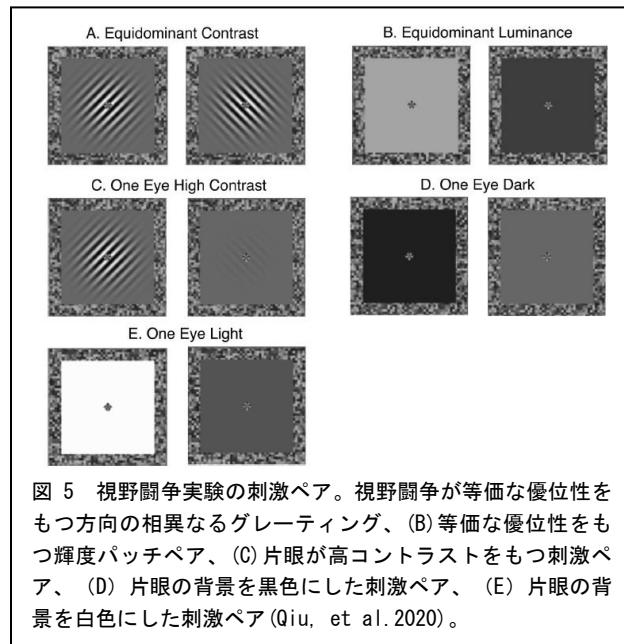
これらの結果をもっとも予測できる因子の一つは剥奪前の混合知覚の比率 (優位性知覚以外のフェーズ) で、剥奪後の眼球優位性に関係していた。他の予測因子は優位性フェーズの持続時間で、これは混合知覚と相互に作用し、剥奪後の眼球優位性のアンバランスが約 50% の値で予測できた。同様な予測因子は傾斜錯視の程度であり、また運動による奥行視のフェーズの持続時間が視野闘争の優位性のフェーズの代用となる。

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

輝度とコントラストによる視野闘争-Levelt の修正命題

視野闘争の知覚現象は、両眼間の抑止メカニズムを探る有益なツールとなる。この知覚現象を用いた研究方法として Levelt は 1965 年に次のように 4 つの命題を提示した。(1) 片眼の刺激の知覚優位性を強めること、(2) 他眼の平均的優位知覚持続期を弱めること、(3) 視野交替頻度 (AR) を強めること、(4) 両眼の刺激を等価に強めること。これらを受け 2015 年に Brascamp et al. は修正した以下の 4 つの修正命題を提示した。(1) より強い刺激の知覚優位性を強化すること、(2) より強い刺激の優位知覚持続期を平均的に強化すること、(3) AR を減少、そしてオリジナル刺激と同等を維持すること、(4) 両眼間の刺激を両方等しく強化し AR を増大すること。これまでの研究から、方向

グレーティングと輝度パッチの要因が知覚優位を一眼から他眼に移る遷移に関しそれぞれ異なる働きをすると考えられる。



そこで、Qiu, et al. (2020) は、修正した視野闘争実験の命題に依拠し、方向グレーティングと輝度パッチの刺激強度を変えて視野闘争の知覚がどのように変化するかを実験した。この実験で作成された刺激ペアは 5 通りで、下記の実験条件では操作した一眼の刺激が強まることを示した。(I) 視野闘争が等価な優位性をもつ方向の相異なるグレーティング、(II) 等価な優位性をもつ輝度パッチペア、(III) 片眼が高コントラストをもつ刺激ペア、(IV) 片眼の背景を黒色にした刺激ペア、(V) 片眼の背景を白色にした刺激ペアを作成した。図 5 の刺激ペア A、B、C は一眼を固定し他眼の刺激を変化させる操作なので修正命題(I)から(III)に該当、また、知覚優位性が等価な刺激の範囲をしらべるためには命題(IV)で刺激を操作した。実験で

は被験者(成人 11 人)に 90 秒間の刺激提示時間にどちら側の眼の刺激が知覚優位かを左ならば左の、右ならば右のキーを押すように、また混合あるいは融合知覚の場合はスペースをキー押しで応えるように教示した。刺激ペアはスクリーンに投影し、プリズム眼鏡を装着して両眼視観察させた。

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

両眼間の刺激強度差を体系的に操作した実験したこれらの結果は、Levelt の修正命題によく一致することを示している。

1.2. 両眼立体視

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

有効両眼コーディン理論(efficient binocular encoding, Li and Atick 1994)によると、視差ニューロンの感度は、両眼からの感度の総和($S+=SL+SR$)と差分($S-=SL-SR$)式によって示される。

「S+ 信号」と「S-信号」は、それぞれ別々に両眼情報を符号化する際にその効率を最大限にするように加重される。このような視覚システムの順応は各ニューロンの感度を変えて両眼視差の働きを

変更し、結果として知覚された対象のステレオスコピックな奥行が変わることを予測する。この場合、選択的に同一のあるいは他の刺激によって順応されると、視差ニューロンのチャンネルの感度が低下すると考えられる。すなわち、総和と差分のチャンネルはコラレートあるいはアンチコラレートのランダムノイズの順応を受けて抑制される (May et al. 2012; May & Zhaoping, 2016, 2019)。

もしノイズをNで表すと各眼にコラレートノイズを提示する場合には、総和チャンネルでは $N+N=2N$ 、差分チャンネルでは $N-N=0$ 、

もしアンチコラレートノイズの場合には、総和チャンネルでは $N-N=2N=0$ 、差分チャンネルでは $N+N=2N$ 、となる。

Kingdom et al. (2020)は、これを検証するために、コラレートあるいはアンチコラレートのラン

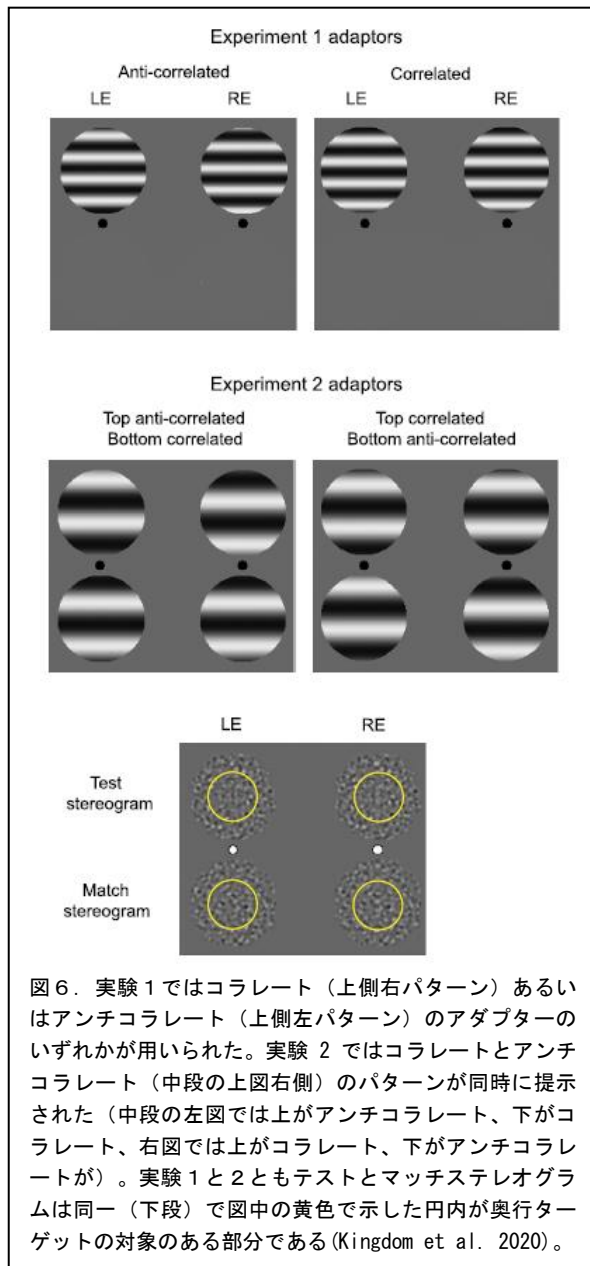


図6. 実験1ではコラレート (上側右パターン) あるいはアンチコラレート (上側左パターン) のアダプターのいずれかが用いられた。実験2ではコラレートとアンチコラレート (中段の上図右側) のパターンが同時に提示された (中段の左図では上がアンチコラレート、下がコラレート、右図では上がコラレート、下がアンチコラレート)。実験1と2ともテストとマッチステレオグラムは同一 (下段) で図中の黄色で示した円内が奥行ターゲットの対象のある部分である (Kingdom et al. 2020)。

ダムノイズに順応後のステレオスコピックの奥行を測定し、総和と差分シグナルによる感度低下が起きるかを実験してしらべた。被験者は6人の成人とし、ステレオグラムはミラー型のステレオスコープに提示された。実験1と2では、図6に示された順応試行での順応刺激 (アダプター)、およびテスト試行でのターゲットとマッチステレオグラムが使われた。アダプター

(狭帯域の空間周波数) は、実験1ではノイズがコラレート (上側右パターン) あるいはアンチコラレート (上側左パターン) のいずれかが、実験2ではコラレートとアンチコラレート

(中段の上図右側) のパターンが同時に提示された (中段の左図では上がアンチコラレート、下がコラレート、右図では上がコラレート、下がアンチコラレート)。実験1と2ともテストとマッチステレオグラムは同一 (下段) で図中の黄色で示した円内が奥行ターゲットの対象のある部分である。アダプターは45秒間提示したが、500msごとに刺激がリフレッシュされた。テストとマッチパターンを広帯域のラプラシアン-ゴージアン

(Laplacian-of-Gaussian) のマイクロパターンで作成し、アダプター提示の前と後にテストパターンを提示、被験者にはテストパターンをマッチパターンを上下法で変えて提示して、テストパターンとの間のステレオ奥行を比較・判断させ、そのPSEを測定した。テスト刺激の視差は0.15, 0.3, 0.6 degの3通りを設定した。

実験1の結果、コラレートとアンチのノイズ刺激による2通りの順応条件における奥行閾値 (PSE) をテスト刺激の視差変化を変えて測定した結果、

コラレート順応条件の閾値はアンチコラレート順応条件より有意に大きくなった（コラレートに対するアンチコラレート比は 36%）。これは、コラレート順応条件はアンチコラレート順応条件よりターゲットの奥行が大きく知覚される（背景に近づいて知覚される）ことを意味する。

実験 2 では、アダプター刺激のコラレートとアンチコラレートパターンを同時に注視点の上あるいは下に提示し、テストでは常にテストパターンを注視点の上にマッチパターンを下に提示した。アダプター刺激は 6 通りの単一波形の空間周波数（0.23, 0.46, 0.92, 1.84, 3.68, 7.36cpd）のグレー

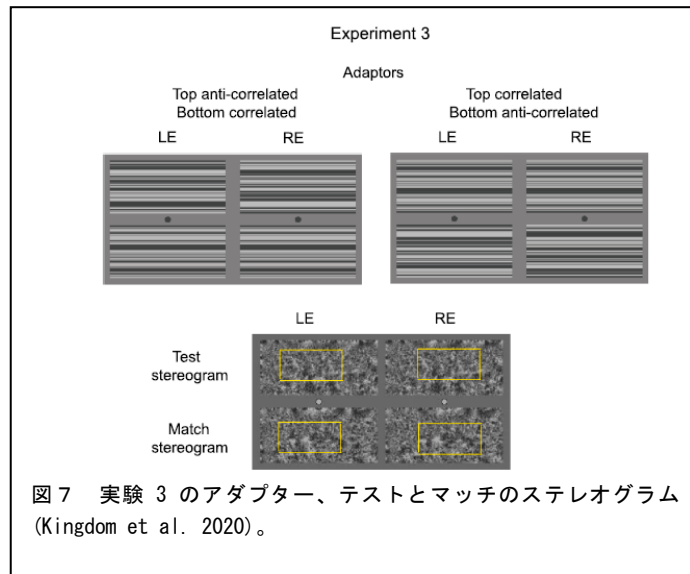


図 7 実験 3 のアダプター、テストとマッチのステレオグラム (Kingdom et al. 2020)。

ティングとし、テスト刺激の視差は 0.2deg に固定し、テストとマッチパターンは 0.05、0.1、0.2 SDs のマイクロパターンとした。被験者 2 人の実験の結果、すべてのアダプター順応条件でコラレート順応条件はアンチコラレート順応条件より有意に奥行が大きく知覚された。奥行閾値の幾何平均を順応条件間で比較すると（A/C に対する C/A）、1.32 となり約 32%奥行がコラレート順応条件で大きく知覚された。

実験 2 では、順応刺激に狭帯域の空間周波数が使われたが、広帯域の刺激パターンにしたときにどのようなようになるかが実験 3 として試行された。図 7 はアダプター、テストとマッチで用いたステレオグラムであ

る。被験者 5 人の実験結果は、実験 2 と同様に、奥行閾値の幾何平均を順応条件間で比較すると（A/C に対する C/A）、1.20 となり 20%奥行がコラレート順応条件で大きく知覚された。

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

視差に規定されたマスキング刺激によるキクロピアン面の減損

立体形状はテクスチャなど単眼の手がかりがなくとも視差手がかりで知覚できるが、その際、多次元の視差情報を統合する必要がある。しかし、このキクロピアン課題には視差評価に生じるエラーとこの評価の統合は難しいことに伴う限界が起きる。両眼視差のみからによる対象の 3 次元形状を知るキクロピアン知覚は、視差処理の初期の段階での絶対視差の評価過程（両眼間の刺激位置に基づくクロス相関に類似した過程）による限界があると考えられる一方、この知覚の減損には相対視差の評価の限界あるいはその評価を利用してキクロピアン形状の形成に直接的な原因があると考えられる (Goutcher & Wilcox, 2016; Goutcher et al. 2018; Wardle & Gillam, 2016)。

Goutcher, R. & Hibbard, P. B. 2020 は、異なる種類のランダムドットマスクング刺激がある場合、キクロピアン形状知覚がどのように損なわれるかを実験した。マスクング刺激のひとつはターゲットに対してアンチフェーズ(antiphase)をもつサイン波形とし、他は奥行にランダムに分布するドットとした。被験者には視差で規定されたランダムドットの波形の方向の識別を求めた。このような異なるマスク刺激を用いることでキクロピアン形状知覚の限界が絶対視差の評価過程のみで説明できるかを吟味した。絶対視差の評価過程はクロス相関に類似しているとし、それは神経生理的研究でも確かめられている(DeAngelis, Ohzawa & Freeman, 1991; Nienborg, et al, 2004; Ohzawa, DeAngelis & Freeman, 1990)。クロス相関モデルによる視差の評価は、一眼のイメージパッチを他眼のイメージパッチと比較することで検証する(図8)。ここには、絶対視差の評価とクロス相関、

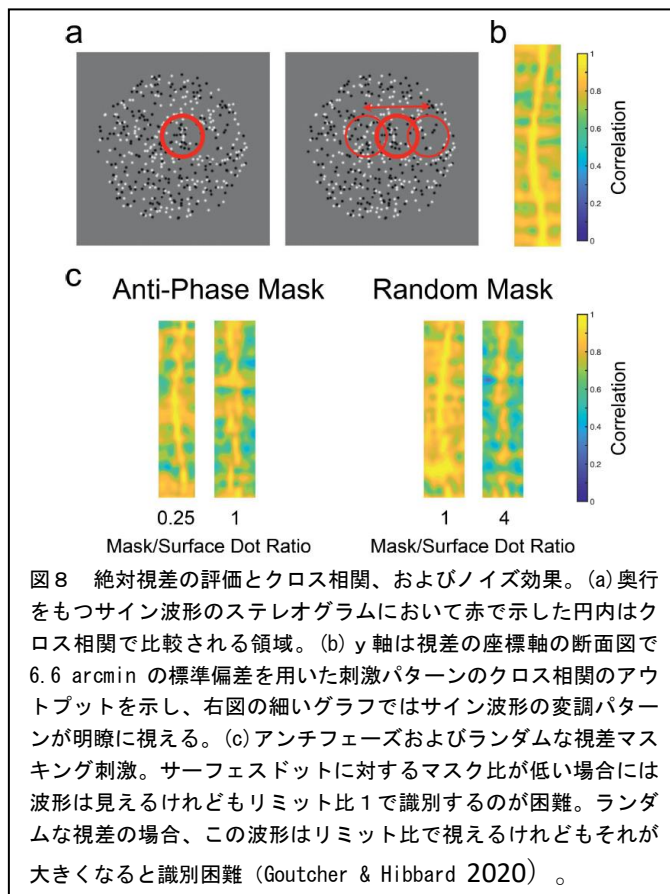


図8 絶対視差の評価とクロス相関、およびノイズ効果。(a)奥行をもつサイン波形のステレオグラムにおいて赤で示した円内はクロス相関で比較される領域。(b) y 軸は視差の座標軸の断面図で 6.6 arcmin の標準偏差を用いた刺激パターンクロス相関のアウトプットを示し、右図の細いグラフではサイン波形の変調パターンが明瞭に視える。(c) アンチフェーズおよびランダムな視差マスクング刺激。サーフェスドットに対するマスク比が低い場合には波形は見えるけれどもリミット比1で識別するのが困難。ランダムな視差の場合、この波形はリミット比で視えるけれどもそれが大きくなると識別困難(Goutcher & Hibbard 2020)。

およびノイズ効果の関係を示し、図(a)には奥行をもつサイン波形のステレオグラムで赤で示した円内はクロス相関で比較される領域を、図(b)には y 軸は視差の座標軸の断面図で 6.6 arcmin の標準偏差を用いた刺激パターンクロス相関のアウトプットをそれぞれ示し、右図の細いグラフではサイン波形の変調パターンを示した。図(c)にはアンチフェーズおよびランダムな視差マスクング刺激で、サーフェスドットに対するマスク比が低い場合には波形は見えるけれども、リミット比1で識別するのが困難となる。また、ランダムな視差の場合、この波形はリミット比1で視えるけれどもそれが大きくなると識別困難となることを示す。つまり、視差はパッチ間の各要素の位置を相殺することで規定され、所定の位置相殺(オフセット)の相関が大きいとその視差シグナルも大きいと考えられる。つまり、このメカニズムはローカルなイメージの構造を検出するように働く。もしパッチが同一ならば両眼の位置の相殺が0になるので強い相関が生じ、もし片眼のイメージ構造

と他眼のそれが一致しなければ相関は低下する。クロス相関メカニズムによれば、ローカルなイメージ構造を評価する能力とローカルなイメージ構造が、位置のオフセットの相違との間のトレードオフとなる。アンチフェーズのマスク条件では一貫したローカルイメージ構造を他のターゲット視差から提供するので、非ターゲット視差の相関を増すことになるがターゲット視差の相関は減少する(図8のc)。一方、ランダム視差のマスク条件ではサイン波形の縦横の方向の一貫したシグナルを提供しない。ランダムマスクはアンチマスクの一貫して対立するシグナルよりはクロス相関においてランダムな変化を生じるので高レベルのノイズ条件を除いて相関を一般的には縮小させる。したがってこのことから、視差処理の早期の段階ではランダム視差マスク条件は、キクロピアンによる知覚を妨げないと予測される。

一方、絶対視差のクロス相関メカニズムはローカルイメージの構造が壊れる程度に限定されるが、キクロピアンでの面の知覚の減損は相対的視差過程の程度に左右される。この相対視差の減損は視差自体の処理におけるノイズ、あるいは視差シグナルからの形状を作成する視覚システムに関係する。したがって、基礎となる視差処理が損なわれているノイズ限定のパフォーマンスと、ターゲットの関連—非関連情報の誤ったリンクによって不明確になったキクロピアン構造の複雑性ベース (complexity-based) のパフォーマンスとを相互に区別する必要がある。一般にターゲット刺激の輪郭を検出する際にその検出に紛らわしい刺激 (distractor) があると、紛らわしい要素の間違ったグルーピングや紛らわしい要素が介在するためにターゲット要素のグルーピングメカニズムが損なわれ、その結果、複雑性関連ファクターによって検出能力が悪くなる。ここでは、キクロピアン面の知覚における複雑性ベースの限界、すなわちマスクング刺激それ自体による相対視差、およびそれによるターゲット面のグルーピングを明らかにする。

視差評価の実験にあたってはクロス相関モデル、およびキクロピアン方向知覚は方向 (x と y 軸)、高度 (x 軸の角度についての高度) の統計分布によるとする dipole モデル (dipole model) が仮説として提示された。クロス相関モデルによると、左右眼のイメージの視差相関が各眼のパッチの位置ごとに評価され、その相関マップが視差構造となる。dipole モデルによると、ノイズが関係しないサイン波形が視差を規定する場合、dipole の高度の広がりにはターゲットの方向に対して最少となり直角方向に対して最大となる。したがって、パフォーマンスはマスクに関連した dipole の統計、すなわちマスクの要素によって規定された 1 つあるいは両方の点からなる dipole あるいはその分布を妨害する程度によってその限界が規定される。もし方向と高度の分布のノイズがマスクの dipole に加えられたら、それらはパフォーマンスを低下させるはずである。ここでは、したがって、

キクロピアンに提示した刺激の方向の弁別においてランダムな視差のパフォーマンスとアンチフェーズのパフォーマンスを比較し、クロス相関と dipole モデルのどちらが妥当か実験された。

実験では奥行方向のサイン波形を出現するランダムドット・ステレオグラムをグレーティング刺激 (振幅 1.1 arcmin、キクロピアン周波数 0.84 cpd) を用い、そのグレーティングの方向は $\pm 20^\circ$ とし、ランダムに提示した。ドットで構成された刺激には奥行を示すドットに加え、マスクングのドットも含められ、視差をランダムに配置させたりあるいはターゲット面と同一の方向、振幅、周波数の奥行の波形を持つようにフェーズをシフトしたりして構造化して提示した。実験条件は、図 9 に示したように、刺激は視差で規定した垂直から $\pm 20^\circ$ 方向傾斜したランダムドットのサイン波形面で、ターゲット面はサイン波形 (黒色) で表示、マスク刺激は赤色で表示してある。サイン

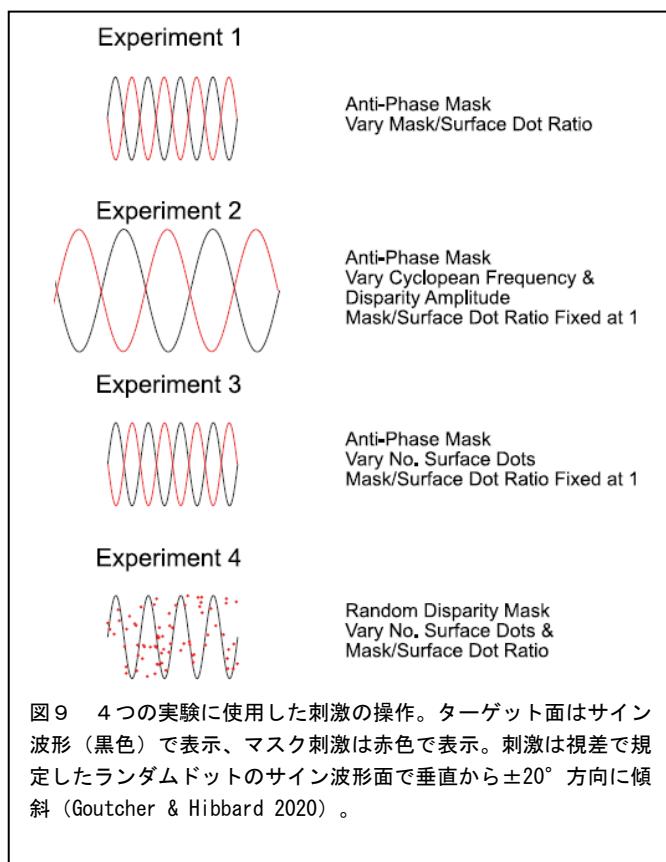


図9 4つの実験に使用した刺激の操作。ターゲット面はサイン波形 (黒色) で表示、マスク刺激は赤色で表示。刺激は視差で規定したランダムドットのサイン波形面で垂直から $\pm 20^\circ$ 方向に傾斜 (Goutcher & Hibbard 2020)。

波形を規定するドット数は 60 から 700 個に変化させ、ターゲット面のドット密度と同等となるようにした。奥行を規定するドットに加えて各実験にはマスキングのためのドットを加えた。

方向の弁別に関する要因を明らかにするためにクロス相関モデルにあつては絶対視差レベルでのノイズの影響を、dipole モデルにあつてはキクロピアン事態の方向弁別についてのグルーピング過程をしらべた。すなわち、前者のモデルでは視差評価でのノイズ限定(noise-limited)の影響、後者のモデルではキクロピアン事態の方向弁別における相対視差の複雑性限定(complexity-limited)の影響がしらべられた。クロス相関モデルでは、左右眼イメージの決められたある範囲の視差が評価されるので、この相関マップは図 10 の(a)のような視差構造となる。図の(a)はクロス相関モデルで右時計回りの視差 1.1 arcmin の奥行サイン波形のテンプレート（マスクの無い条件）を示す。

絶対視差構造のレベルでキクロピアン方向知覚が損なわれる程度をしらべるためにガウスのウィンドーパッチの大きさが変えられた (SD が 3.3 と 35.2 arcmin の間)。Dipole モデルでは、一对のステレオスコピックイメージの処理から始まるのではなく両眼間の視差の各点 (x, y) が分かっていると仮定され、視差処理のマップではなく相対視差の刺激情報を描くことにあり、視差処理過程を示すことではない。このモデルでは、ステレオグラムの各ペアドットの刺激の方向、高度、長さ (dipole) が計算され、この dipole (双極) が 3D 構造をもっとも簡潔に捉える。ステレオスコピックイメージの方向に関する知覚判断を考える上で dipole 分布のテンプレートマッチングが用いられた(図の c、d)。図 b には、高度と方向という dipole 結合の可能性を示す (dipole の長さは 14 と 22 arcmin の間) dipole model のテンプレートを、(c)は dipole 距離が長い条件 (163 と 172 arcmin の間) のテンプレートをそれぞれ示す。

実験では 5 人の被験者を用いた。両眼への刺激提示はミラー型のステレオスコープを用い、輻輳と眼球調節は刺激の観察距離に合わせた。被験者にはひとつのランダムドット・ステレオグラムを提示し、そのサイン波形の傾きが時計回りあるいは反時計回りかをキー押しで応えさせた。ドットの数固定されているのでドットの「マスク対サーフェス比」が変えられ、キクロピアン事態の方向知覚の閾値を求めた。

実験 1 でキクロピアンマスキング事態でのランダムドット・サイン波形の奥行の閾値を求めた結果、

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

実験 2 ではキクロピアンにおける空間周波数 (0.21, 0.42, 0.63, 0.84 cpd) および視差の振幅 (1.1 と 2.75 arcmin の間で 5 段階) を変え、サイン波形の奥行構造が変化した事

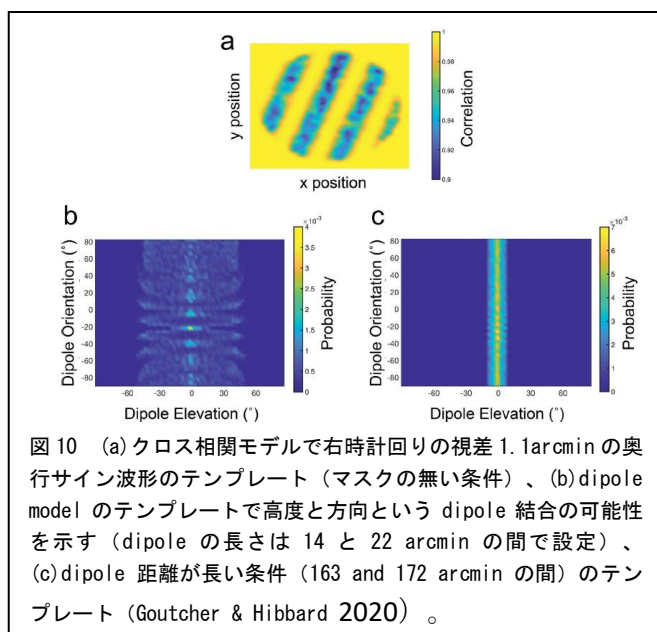


図 10 (a) クロス相関モデルで右時計回りの視差 1.1 arcmin の奥行サイン波形のテンプレート (マスクの無い条件)、(b) dipole model のテンプレートで高度と方向という dipole 結合の可能性を示す (dipole の長さは 14 と 22 arcmin の間で設定)、(c) dipole 距離が長い条件 (163 and 172 arcmin の間) のテンプレート (Goutcher & Hibbard 2020)。

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

実験 3 では刺激の要素数を変えて (100 から 700 個の間で、総ドット密度は 10.3 から 71.9 dots per degree²、ターゲット面の密度 5.1 から 35.9 dots per degree² を設定しパフォーマンスの効果がしらべられた。その結果、サーフェスドットが増大するとマスク刺激のドットも増えているにも関わらず、方向知覚判断のパフォーマンスも増大した。この結果の 2 つのモデルへのマッチは、実験 2 と同様で、クロス相関モデルとくにウィンドの大きさが多い場合によくフィットした。

実験 4 ではランダムドットで規定された奥行を示すサイン波形の視差をランダムにしたマスクングドットを用いて、方向知覚判断のパフォーマンスをしらべた。この事態では、「マスク対サーフェス比」が 0.2 から 0.6 の間で変えられ、したがってターゲットサーフェスのドット数 (60 から 200 dots の間) も変えられた。その結果、方向知覚判断の閾値はサーフェスドットの個数が増えるとは大きくなった。ここで示された閾値はアンチフェーズマスク条件で示された閾値より大きくなることを示し、ランダムなノイズマスクはアンチフェーズマスク条件よりキクロピアンサーフェス知覚を妨害する影響が小さいこと示した。これらの結果をクロス相関モデルと dipole モデルに当てはめると、被験者のこのパフォーマンスを前者のモデルの予測と比較すると大幅に異なるのに対して、後者の予測するところと一致を示した。Dipole モデルの閾値は「マスク対サーフェス比」が 1.4 と 2.5 となり、被験者が示した閾値およびサーフェスドット数が増えると閾値も減少し、モデルの予測するところと良く一致した。このことは、ランダムな視差のマスクングの効果は相対視差情報に関連する複雑性中心の処理過程によると考えられる。

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

ノイズマスクングによる両眼視差の個人差の要因の解析

人間では、両眼視差の閾値は 5 arcsec よりも小さいが、これには個人差がある (McKee, 1983; Stevenson, et al. 1989, Bosten et al., 2015; Dorman & van Ee, 2017; Hess et al., 2015; Hess et al., 2016; Zaroff et al. 2003)。Bosten et al. (2015) は、相対視差検出の個人差をしらべて被験者の約 10% は交差もしくは非交差視差のどちらかを検出できないこと (350 arcsec 以上の閾値)、約 5% の者は交差と非交差視差の両方を検出できないこと (350 arcsec 以上の閾値)、約 3% の者は弱視であること、非弱視者の少なくとも 12% の者は一方のあるいは両方の視差に異常に大きな閾値をもつことを示した。ステレオアノマラスはこのような説明ができないタイプのステレオ異常者のことをいう。

Carrillo et al. (2020) は、相対視差の検出における個人差をノイズマスクングをターゲットに加えることによってしらべた。はじめに 53 人のノーマルな視力を持つ被験者を対象に交差と非交差の視差ターゲットで閾値を測定した。この結果を受けて 18 人の被験者を選んで刺激に視差ノイズを新たに加えてマスクングとし、視差の検出閾値を測定した。ノイズマスクングを加えた場合、加えられた外的ノイズレベルが小さいと閾値には影響しないが、しかしそれが一定以上のレベルを越すと

閾値はリニアに上昇する。その閾値の変換点は与えられた課題を行う被験者の内的ノイズ（シグナルとノイズの比率を反映したシグナル）と等価なところにある。もし外的ノイズが小さければ課題のパフォーマンスは内的ノイズによって決まる。逆に外的ノイズが大きければ被験者のパフォーマンスは外的ノイズに左右される。ここでの研究は、視差検出の個人間差および交差と非交差に関する個人内の差異をしらべることが目的である。

実験1に用いたステレオグラムでは、**図 11** に示したように、ターゲットがランダムドットで構成されたくさび（半径 4.5deg）形とし 4 分の 1 の円のいずれかに出現させ、また輻輳しやすくするために周囲を白と黒の縁で囲んだパターンである。両眼視差は各眼のパターンを水平に等しい量を同方向あるいは反対方向にシフトして（交差あるいは非交差）形成した。実験2では、視差ノイズをランダムに変化、その視差の平均はターゲットと同等にした。ステレオグラムはシャッターグラスを用いて各眼に提示して両眼立体視させ、ターゲットが 4 分の 1 の円のいずれの位置にあるかを 4 択（キー操作）で選択させた。視差の閾値は視差を上げ下げする上下法で求められた。

実験1の結果、個人別に相対視差の検出閾値が求められ、それは 24 から 275arcsec の間に分布すること、非交差視差の閾値が交差視差より高いけれどもそれらは大まかに一致すること、被験者全体の幾何平均をとると、交差視差では 58arcsec、非交差視差では 73arcsec となることが示された。

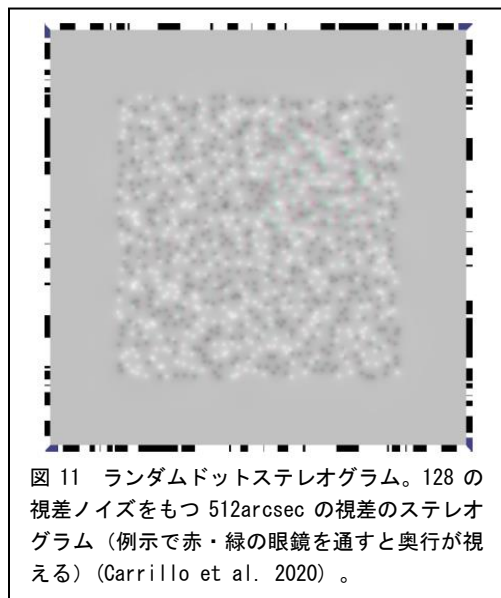


図 11 ランダムドットステレオグラム。128 の視差ノイズをもつ 512arcsec の視差のステレオグラム（例示で赤・緑の眼鏡を通すと奥行が視える）(Carrillo et al. 2020)。

実験2のノイズマスキングの結果、外的ノイズを導入するとターゲットの視差検出閾値を個人別にみると、交差と非交差視差とも外的ノイズが小さいレベルでは閾値は変わらずに一定を維持するが、ある値を超えると外的ノイズとともにリニアな上昇を多くの被験者で示された。外的ノイズがなくても交差と非交差の視差検出閾値の違いを有意に示した被験者は、外的ノイズの変化に対して急激な上昇を示した。これは交差と非交差視差の処理過程の効率に差があるためと考えられる。また、外的ノイズにともなう視差検出の閾値のカーブがフラットから上昇に変わる交差と非交差の点の違いは、等価な内的ノイズ（視差シグナルに対するシグナルとノイズの比）の個人差の違いを示すと考えられる。

実験2の 18 人の被験者の結果をリニアに出力が増大すると仮定する線形増幅モデル(linear amplifier model)で解析すると、等価な内的ノイズと視差処理の効率（ノイズ情報の処理を反映）の間には有意な相関は無かった。これは被験者間の違いを説明する単純な特性が無いことを示唆する。そこで、実験1から交差視差の閾値と内的ノイズ、および非交差視差の閾値と内的ノイズの相関、ならびにこれら視差閾値と線形増幅モデルのパラメータである視差処理の効率の間の相関をとると、閾値の高さはそれに対応する内的ノイズの増大と関係し、また同時に処理過程の効率を縮小することが示された。交差あるいは非交差の視差の方向については、回帰分析の結果、各被験者の視差の閾値は対応する内的ノイズと処理効率の両要因によって個人差が生起することが示された。

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

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

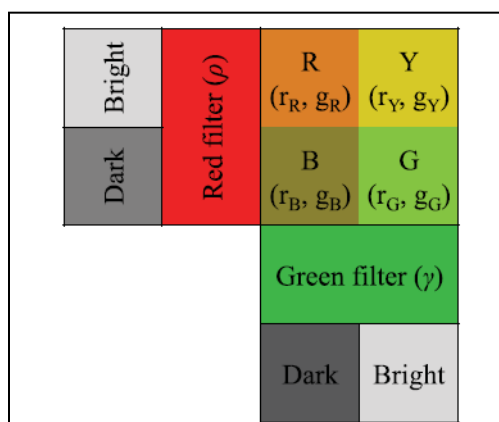
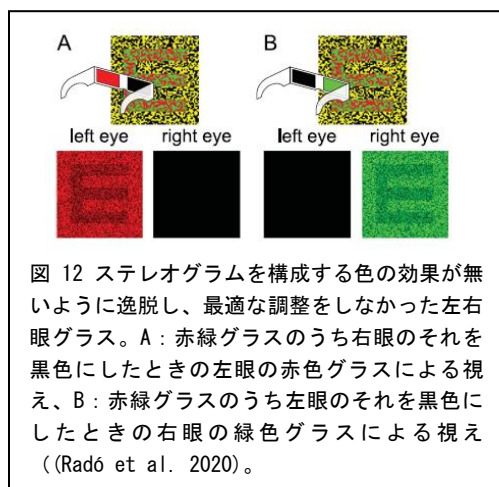


図 13 赤(ρ)と緑(γ)の色フィルターから見たランダムドットステレオグラムやコレログラムを構成する4種類の論理的カラー (Radó et al. 2020)。

rR: digital video value of red component of logical red color
gR: digital video value of green component of logical red color
rG: digital video value of red component of logical green color
gG: digital video value of green component of logical green color
rB: digital video value of red component of logical black color
gB: digital video value of green component of logical black color
rY: digital video value of red component of logical yellow color
gY: digital video value of green component of logical yellow color.

アナグリフの方法あるいはポラロイドガラス法で両眼立体視させた場合、各眼には照射方向などの違いによって明るさあるいはコントラストが若干ことなるので、完全に同一の刺激が投影されず、これがプルブリッチ効果のような単眼手がかりを与える。アナグリフステレオグラムでは、上図は E 文字を埋め込んだダイナミック・ランダムドットコレログラム (DRDCs) のアナグリフステレオグラム、中図は片眼で最適に色調整したアナグリフカラーステレオグラム、下図はコラレート (+1) あるいはアンチコラレート (-1) 条件のステレオグラムを赤緑フィルターで観察したときの視えの相違である。このような両眼立体視で人為的エラー (アーチファクト) は、輝度コントラストの左右眼の差が主要因となる。

図 12 には左眼あるいは右眼の輝度コントラストを変えたステレオグラムとその視えを示す。図 13 の A には赤緑フィルターのうち右眼のそれを黒色にしたときの左眼の赤色フィルターによる見え、B には赤緑フィルターのうち左眼のそれを黒色にしたときの右眼の緑色フィルターによる見えである。このように、両眼立体視のアーチファクトな手がかりである単眼の手がかりが両眼立体視のしくみを乱すので適切なアナグリフの調整が必要となる。

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

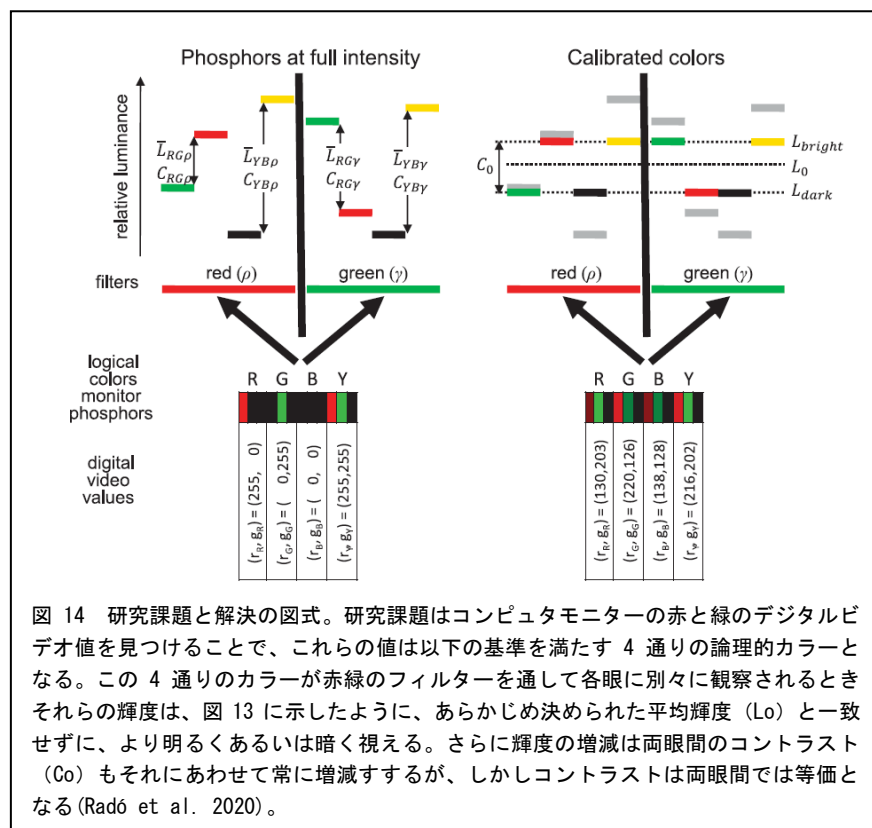
実験では、まずコンピューターディスプレイのデジタルビデオ値を用いて輝度とコントラストを要求にあうように調整した。このために、デジタルビデオ値とコントラストの関係をしらべ、2 種類の色フィルター (ρ, γ) との組合せから 4 通りの異なる輝度特性を用いることにした (図 13)。ここでは、赤緑フィルターを通さないで観察した色を論理的カラーと呼ぶが、この論理的カラーの輝度とコントラストは、蛍光体の輝度が等しくないこと、照明の減衰、そしてフィルター間の混雑から等価とならない。したがって、論理的カラーを構成する赤と緑の蛍光体 (phosphor) およびそれらの輝度とコントラストを調

整して補正する必要がある。図 14 に示したように、まず、あらかじめ決めた基準を満たす 4 通りの

論理的カラーを規定するコンピュータモニターの赤と緑のデジタルビデオ値を見つける。この 4 通りのカラーが赤緑のフィルターを通して各眼に別々に観察されるとき、それらの輝度は、図に示したように、あらかじめ決められた平均輝度 (L_0) と一致せず、より明るくあるいは暗く見え、さらに輝度の増減は両眼間のコントラスト (C_0) もそれにあわせて常に増減するが、しかしコントラストは両眼間では等価となる。それゆえ、平均輝度とコントラストを両眼間で、図の右図のように、それぞれのタイプ別に等価にする必要がある。これはコンピュータモニターの蛍光体のもつ赤 (r)、緑 (g)、光と赤 (ρ)、光と緑 (γ) のフィルターの組合せで生じるからである。赤緑フィルターのゴーグルをかけないで観察すれば、4 通りのカラー (論理的カラー) のドットからディスプレイは構成されているはずである。もしこの論理的カラーが十分な輝度で赤緑の純粋な光から構成されていれば、それらの平均的輝度とコントラストは互いに等価にはならない。これを解決するには数式を立て、輝度 (L_0) とコントラスト (C_0) 値をディスプレイの全領域に渡って最小化する必要がある。そこで、アナグリフステレオグラムを正しく観察するために使用したディスプレイデバイスの特性に応じて見え方のエラーを最少にする輝度とコントラストからデジタルビデオ値を決める数式を作成し、それが正しい 3 次元視覚を与えるかを被験者で精神物理的実験をする必要があった。

実験に使用するモニターとフィルターの特性を測定した後に、16 人の被験者を対象にアーチファクトである単眼の手がかりの起きる生起確率をしらべた。ステレオグラムはコレログラム (DRDCs) とし、白・黒のドットで構成され、1 秒間に 60 回書き換えられた。コラレート条件では、両眼のドットのコントラストは同一 (+1) とし赤と緑アナグリフを用いるので、黒と黄色の色を用いることによって理論的には合致する。アンチコラレート条件ではドットは両眼で反対コントラスト (-1) となるので赤と緑の色を用いると理論的には合致する。実際の刺激は、コラレートされた背景に E 文字が出現するアンチコラレート領域で構成された。被験者は常に片眼のみでステレオグラムを観察し、他

眼はアイパッチで覆い、各眼は別々に試行された。また RGB はフィルター (赤あるいは緑) を装着した側 (右眼あるいは左眼) のみを変化させ、フィルターが赤色ならばその RGB が変えられた。被験者には、E 文字を左右上下のいずれかに提示し、4 択のキー操作で反応させた。ダイナミックランダムドットコレログラム (DRDC) に埋め込まれた文字 E は、DRDC のアンチコラレートとコラレートの領域はステレオ視では別々に知覚されるので、両眼で知覚可能である。コラレートの背景の知覚はモニター面ではノイズであるが、一方、文字 E



のアンチコラレートの領域ではもやもやした

不定な奥行が知覚されるはずである。最適に計算された刺激では E 文字の方向は両眼視で観察されるならば正しく知覚される。もし一方が閉眼されれば、E 文字は見えなくなり、その方向が同定できない。精神物理的研究の目的は、したがって、単眼による視えを最少にするために RGB カラーの範囲を決めることにある。明と暗のドット間のコントラストあるいはコラレートとアンチコラレートの領域内の輝度が背景を両眼間で不等価にして、その視えを異なるものにする。したがって、もし RGB の数値予測が正しければ単眼視による文字 E の知覚が困難になるはずである。

単眼視のアーチファクトを測定するための DRDC での精神物理的実験の結果は、図 15 のようになった。縦軸は両眼立体視の正しい知覚反応で x 軸は R チャンネル値、y 軸は正しい知覚反応率である。

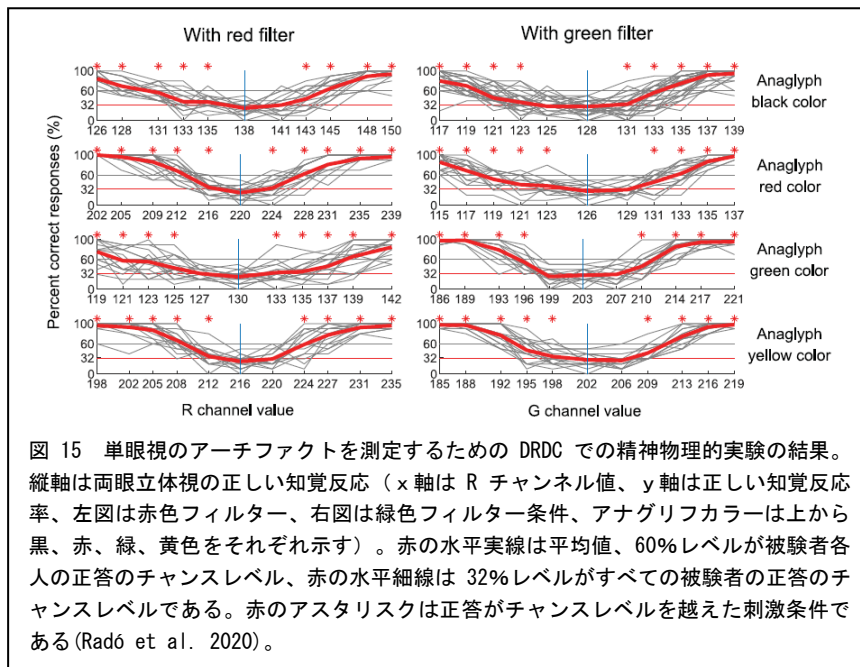


図 15 単眼視のアーチファクトを測定するための DRDC での精神物理的実験の結果。縦軸は両眼立体視の正しい知覚反応 (x 軸は R チャンネル値、y 軸は正しい知覚反応率、左図は赤色フィルター、右図は緑色フィルター条件、アナグリフカラーは上から黒、赤、緑、黄色をそれぞれ示す)。赤の水平実線は平均値、60%レベルが被験者各人の正答のチャンスレベル、赤の水平細線は 32%レベルがすべての被験者の正答のチャンスレベルである。赤のアスタリスクは正答がチャンスレベルを越えた刺激条件である(Radó et al. 2020)。

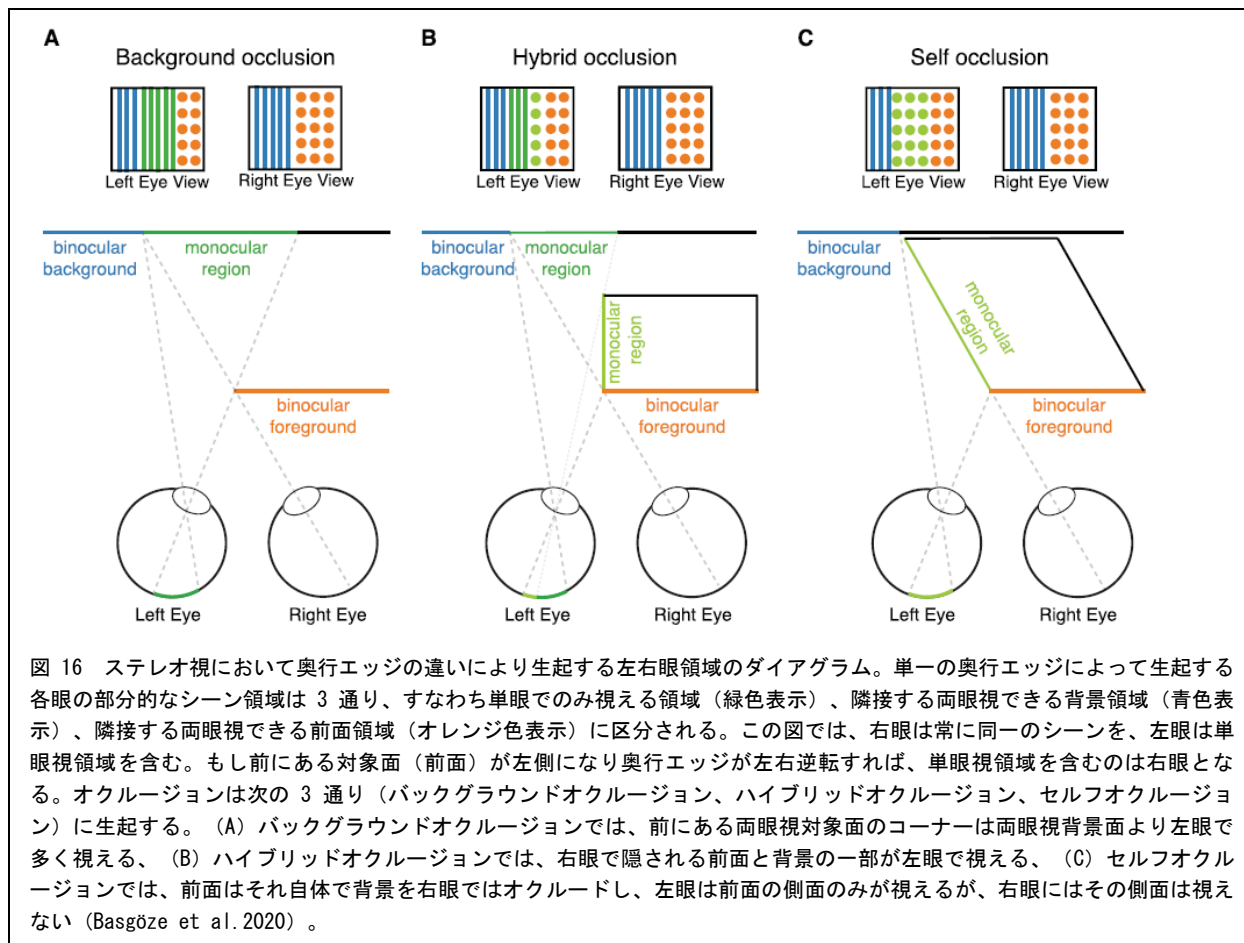
図の左図は赤色フィルター条件、右図は緑色フィルター条件、アナグリフカラーは上から黒、赤、緑、黄色をそれぞれ示す。赤の太線は平均値、60%レベルが被験者各人の正答のチャンスレベル、赤の細線は 32%レベルがすべての被験者の正答のチャンスレベルである。赤のアスタリスクは正答がチャンスレベルを越えた刺激条件である。この精神物理的実験結果に基づいて単眼で視えるアーチファクトを最少にするデジタルビデオ値が数値解析法

で決められた。

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

自然シーンのステレオ視に知覚安定をもたらす奥行エッジ領域の構造特性

ステレオ視は左右眼で一对一の対応点で融合するが、しかし自然シーンにおいてはすべての対応点が正しく融合していない。奥行のエッジではシーンの一部の範囲は一方の眼だけに視える (ハーフオクルージョン、half occlusion)。この場合、単眼に視える領域は正確に知覚されず、知覚が安定しない (図 16)。もし、このような単眼領域が検出されなければ、視覚システムは非対応領域間で対応し、不安定な知覚をもたらす (視野闘争) ので、視覚経験にもとづく処理をして安定をもたらしていると考えられる。このような単眼領域に絡んだ経験則による処理は強力で、両眼イメージの奥行エッジの面の視覚特性に制約されて生じる (Harris & Wilcox, 2009)。3次元シーンで生じる単眼視領域の原因は、背景のオクルードのされ方にある。図 16 は、ステレオ視において奥行エッジの違いにより生起する左右眼領域のダイアグラムで、単一の奥行エッジによって生起する各眼の部分的なシーン領域は 3 通り、すなわち単眼でのみ視える領域 (緑色表示)、隣接する両眼視でき



る背景領域（青色表示）、隣接する両眼視できる前面領域（オレンジ色表示）に区分される。この図では、右眼は常に同一のシーンを、左眼は単眼視領域を含む。もし前にある対象面（前面）が左側になり奥行エッジが左右逆転すれば、単眼視領域を含むのは右眼となる。オクルージョンは次の 3 通り（バックグラウンドオクルージョン、ハイブリッドオクルージョン、セルフオクルージョン）に生起する。バックグラウンドオクルージョンでは、前にある両眼視対象面のコーナーは両眼視背景面より左眼で多く見える (A)、ハイブリッドオクルージョンでは、右眼で隠される前面と背景の一部が左眼で見える (B)、セルフオクルージョンでは、前面はそれ自体で背景を右眼ではオクルードし、左眼は前面の側面のみが見えるが、右眼にはその側面は視えない (C)。もし視覚システムが自然シーンにおいてこのように奥行エッジを処理するならば、知覚実験によってステレオ視に対応する経験的規則の手がかりを見つかることができると考えられる。例えば、背景オクルージョンが単眼視領域によって起きているならば、視覚システムは、単眼視領域のイメージが両眼視で見える前面より両眼視で見える背景に似ていると、処理するであろう。

Basgöze et al. (2020) は、自然シーンにおいて単眼視領域が視覚的に両眼視領域とより類似していれば、知覚が安定すると考えられるので、2つの実験を試みた。実験では Burge et al. (2016) による自然シーンの 100 個のデータセットから抽出して使用した。これはカメラ間 6.5cm から撮影した奥行のエッジをもつ比較的大きな単眼視領域のあるステレオ写真である。単眼視領域の範囲を設定するために、視差勾配（視差を視角で除した数値）を計算し、2.0 を越える所は単眼視領域とした。ステレオイメージパッチは $3.8^\circ \times 1.5^\circ$ (195×78pixel) とし単眼視領域の奥行エッジを中

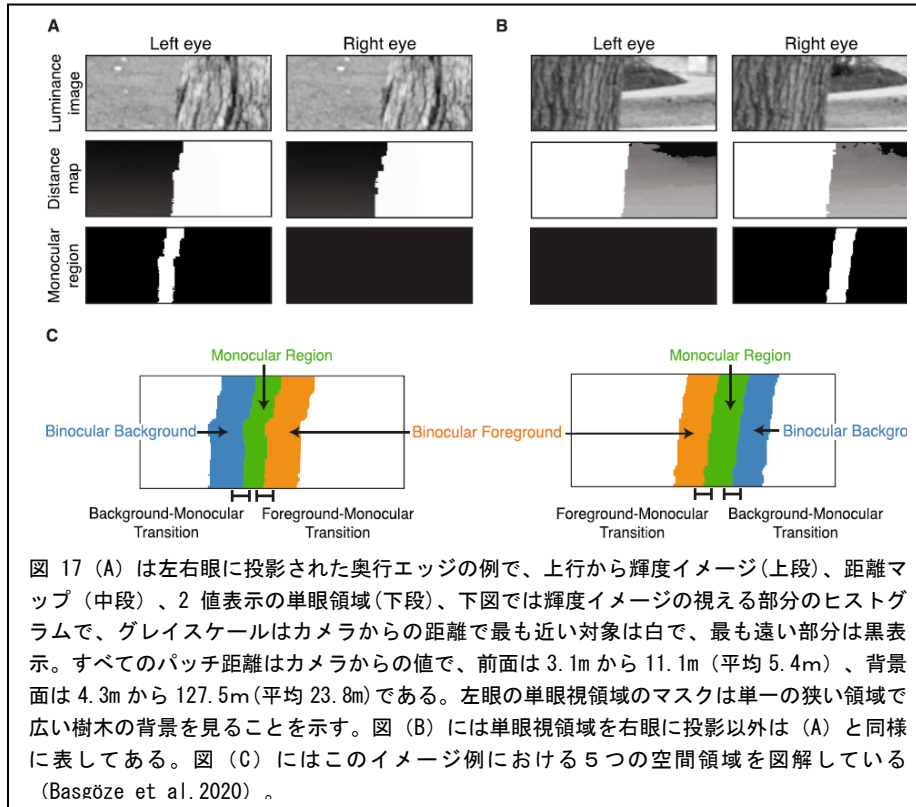


図 17 (A) は左右眼に投影された奥行エッジの例で、上行から輝度イメージ(上段)、距離マップ(中段)、2 値表示の単眼領域(下段)、下図では輝度イメージの見える部分のヒストグラムで、グレイスケールはカメラからの距離で最も近い対象は白で、最も遠い部分は黒表示。すべてのパッチ距離はカメラからの値で、前面は 3.1m から 11.1m (平均 5.4m)、背景面は 4.3m から 127.5m(平均 23.8m)である。左眼の単眼視領域のマスクは単一の狭い領域で広い樹木の背景を見ることを示す。図 (B) には単眼視領域を右眼に投影以外は (A) と同様に表してある。図 (C) にはこのイメージ例における 5 つの空間領域を図解している (Basgöze et al. 2020)。

最も遠い部分は黒表示。すべてのパッチ距離はカメラからの値で、前面は 3.1m から 11.1m (平均 5.4m)、背景面は 4.3m から 127.5m(平均 23.8m)である。左眼の単眼視領域のマスクは単一の狭い領域で広い樹木の背景を見ることを示す。図 (B) には単眼視領域を右眼に投影する以外は (A) と同様に表してある。図 (C) にはこのイメージ例における 5 つの空間領域を図解している。自然シーンの奥行エッジの解析のために、5 つの領域、すなわち単眼視領域、隣接両眼視前面領域、両眼視背景領域から単眼視領域の移行領域、両眼視前面領域から単眼視領域移行領域である。距離マップから単眼視領域、隣接両眼視前面領域、隣接両眼視背景領域の平均的距離を計算、また輝度イメージからは平均的輝度とコントラストをそれぞれ計算した。両眼視領域から単眼視領域の移行領域

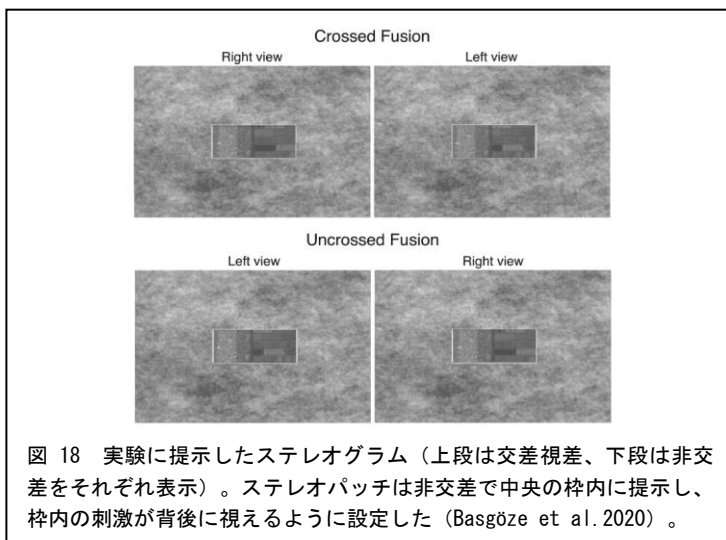


図 18 実験に提示したステレオグラム(上段は交差視差、下段は非交差をそれぞれ表示)。ステレオパッチは非交差で中央の枠内に提示し、枠内の刺激が背後に見えるように設定した (Basgöze et al. 2020)。

心として構成した。とくに、単眼視領域は両眼視において前面と背景とに視覚的に明瞭に分かるように設定した。このようにして作成し実験に使用した奥行エッジを含むステレオパッチの例が図 17 である。図 (A) は左右眼に投影された奥行エッジの例で、上行から輝度イメージ(上段)、距離マップ(中段)、2 値表示の単眼領域(下段)、下図は輝度イメージで見える部分のヒストグラム、グレイスケールではカメラからの距離で最も近い対象は白で、

最も遠い部分は黒表示。すべてのパッチ距離はカメラからの値で、前面は 3.1m から 11.1m (平均 5.4m)、背景面は 4.3m から 127.5m(平均 23.8m)である。左眼の単眼視領域のマスクは単一の狭い領域で広い樹木の背景を見ることを示す。図 (B) には単眼視領域を右眼に投影する以外は (A) と同様に表してある。図 (C) にはこのイメージ例における 5 つの空間領域を図解している。自然シーンの奥行エッジの解析のために、5 つの領域、すなわち単眼視領域、隣接両眼視前面領域、両眼視背景領域から単眼視領域の移行領域、両眼視前面領域から単眼視領域移行領域である。距離マップから単眼視領域、隣接両眼視前面領域、隣接両眼視背景領域の平均的距離を計算、また輝度イメージからは平均的輝度とコントラストをそれぞれ計算した。両眼視領域から単眼視領域の移行領域

では、前面と背景面間のイメージ特性の変化に焦点をあてその視覚特性から異なる 2 面間の距離を計算した。自然シーンの奥行エッジが知覚安定に影響するかについて 2 通りの実験を実施した。実験 1 (被験者 10 名 9) では奥行エッジに関する仮説作成のために、実験 2 では実験 1 で作成された仮説を別の被験者群 (被験者 15 名) に実施した。データセットからのステレオグラム (図 18) を 5 秒間被験者に提示、ステレオグラムの中央にバーチャルな枠を非交差でディスプレイと奥行が同

一になるよう枠内の刺激が背後に視えるように設定し、視えのちらつきの程度から視覚安定を 0—100 の数値評定するように教示した。実験 1 と実験 2 のステレオグラムのパッチセットは 92 個と 125 個で、実験 1 では輝度とコントラストは一定範囲内に治まるように設定、実験 2 では固定する設定は行われなかった。知覚の不安定は、両眼視と単眼視の変わり目の領域にある垂直エッジが奥行エッジの知覚安定を調整すると仮定した。これは刺激パッチにおけるコントラストが高いほど知覚不安定度と関連することを意味する。被験者個々の知覚不安定度から平均的反応値を差し引き標準偏差値で除して得られる Z スコア (score) に変換して計算した。その上で、各刺激パッチのコントラストと平均的 Z スコア間のピアソン相関を求めた。

自然シーンにおける奥行エッジにおける知覚不安定 (視えのちらつき) を測定し、被験者個人内と個人間の評定の相関をみた結果、実験 1 では係数 0.45、実験 2 では 0.61 を得て、個人内で有意に信頼できる結果を得た。この結果にもとづき、提示した刺激パッチごとに評価値の平均的 Z スコアを求めたところ、刺激パッチによって低から高へしだいに変化することが示され、類似した刺激パッチの Z スコアは等しかった。また、知覚不安定は相対対応視差量が大きいと不安定を有意に増大させた。

この自然シーンにおけるステレオ視の知覚安定度の実験データから、知覚安定—不安定のモデルとして相対視差量がただ一つの知覚安定要因とする「視差単独モデル」および両眼視—単眼視の移行帯における垂直エッジ輝度が有力な要因とする「エッジモデル」が仮説され、実験データである評価値と視差量あるいはエッジコントラストから予測評価値とをつき合わせた。その結果、「視差単独モデル」と「エッジモデル」はともに有意に視差量によって変わることが示された。「エッジモデル」では、垂直エッジの輝度が弱いと知覚が安定し、強いと不安定になることから、輝度強度が知覚安定—不安定に有意な効果があることも示された。尤度比テストから「エッジモデル」の方がデータに有意に適合した。このことから、両眼視—単眼視の移行帯におけるイメージの手がかりは知覚安定に影響すると言える。

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

この結果が一般的に成立するためには空間の大きさを 3 段階 (2-10m、0.2-1m、0.1-0.5m) に設定して小さくし、空間内の対象の大きさと配置から予測される両眼視背景領域、両眼視前面領域から奥行エッジの単眼視領域の比率をレイトレーシングでシミュレートして、対象の大きさ変化に対する背景、自己、隠された面、ハイブリッドオクルージョンの各領域の占有比率をしらべた。このシミュレーション実験の結果からも、小さな空間や対象の大きさを変えても奥行エッジが自然シーンで生起する事態に類似するほど知覚安定がもたらされることが明らかにされた。

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

自然シーンの両眼視差処理過程のモデリング


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

1. 自然シーンにおける両眼視差の統計モデルと神経的選択度と奥行知覚の関連

1.1 自然シーンの両眼視差の範囲(range)

Yang & Purves (2003)は自然シーンの実際の3次元距離をレーザーのレンジファインダーで測定して、観察者と対象となる面間の物理的距離は3mをピークにして指数関数的に知覚距離が減じることを示した。これは奥行知覚の判断に影響し、この条件下では対象は2-4mの奥行距離範囲に定位されて知覚される傾向(specific distance tendency)をもつとした。Yang and Purves (2003)そしてHibbard (2007)は、両眼視差には眼球位置と輻輳が関係し、レンジイメージにもとづく視差の分布と注視の影響を明らかにした。視差の分布は中心視より周辺視で広く、さらに両眼が水平位置および視角が数度の範囲でピークになることを示した(Liu et al. 2008)。この視差範囲は心理物理的に測定した機能範囲と一致している(DeAngelis & Uka, 2003)。Sprague et al. (2015)は、内外の自然空間での移動、社会的相互作用、簡単な仕事(サンドイッチをつくる)などの眼球位置とステレオカメラからの3Dのシーン幾何学的配置を同時に測定し、そのデータ化から視差の分布を計算し、それがマカクのV1領域の測定分布と同じことを示した(中心から周辺にいくにつれてバイアスが大きい)。Gibaldi, Canessa, and Sabatini (2017)はVRの自然シーンにおける周辺視空間を提示し、視差分布への注視の役割を正確に測定し、ランダムなVR観察者と比較した視差は神経生理学的データに類似し、行動的研究からの予測レンジとも近いことを見いだした。これらの研究結果は、自然シーンの視差を正確に統計するためには視野における注視点が切り離せないことを示した。

1.2. 視野にける位置と両眼視差の間の統計的関連

Hibbard and Bouzit (2005)は、交差あるいは非交差に関わらずステレオグラムの注視点を低くすると注視点より奥行が接近、注視点を上にすると後退して知覚されるとした。Hibbardらは、 19のCにあるように、交差あるいは非交差視差に関わらず注視点が視野の下位あるいは上位に提示された事態の奥行遠近知覚で、注視点が下位位置で提示されると交差視差(黒色表示)でも注視点の前に、また注視点が上位位置で提示されると非交差視差が注視点の後ろに知覚されるとした。Sprague et al. (2015)は、マカクの初期視覚領での水平視差の受容野(RFs)では上位視野は非交差、下位視野では交差に対応しているとした(図B)。この神経上のバイアスは自然シーンの視差分布によく対応し、水平視差値は視野の下位の交差視差から上位の非交差視差へと勾配をもって変化することを見いだした(図A)。Nasr and Tootell (2018)はV2とV3領域の水平両眼視差コラムでfMRIシグナルが上位視野の近刺激および下位視野の遠刺激でそれぞれ強いことを示した。水平視差と視野の高さの関係は経験的ホロプターと同じで、ホロプターの垂直方向は後の傾き(tilt)をもち、この傾きが自然シーンの視差分布に反映する。Cooper and Pettigrew (1979)は、ネコとフクロウのホロプターを比較し、ヒトのホロプターの傾きは大きいことを示した。また、水平視差と視野の高さの関係は輻輳にも影響する。さらにBurge et al. (2016)は、この傾きは垂直軸の傾きより水平軸で大きく、このバイアスは傾きの知覚で変わることを見いだした。垂直視差は斜方向からの観察時の視野の周辺でのみ効果があるが、中心視野と周辺視野におけるマカクのV1の細胞に

おける電気生理的研究では中心視野における垂直視差のレンジは縮小されていた (Durand et al. 2002, 2007)。

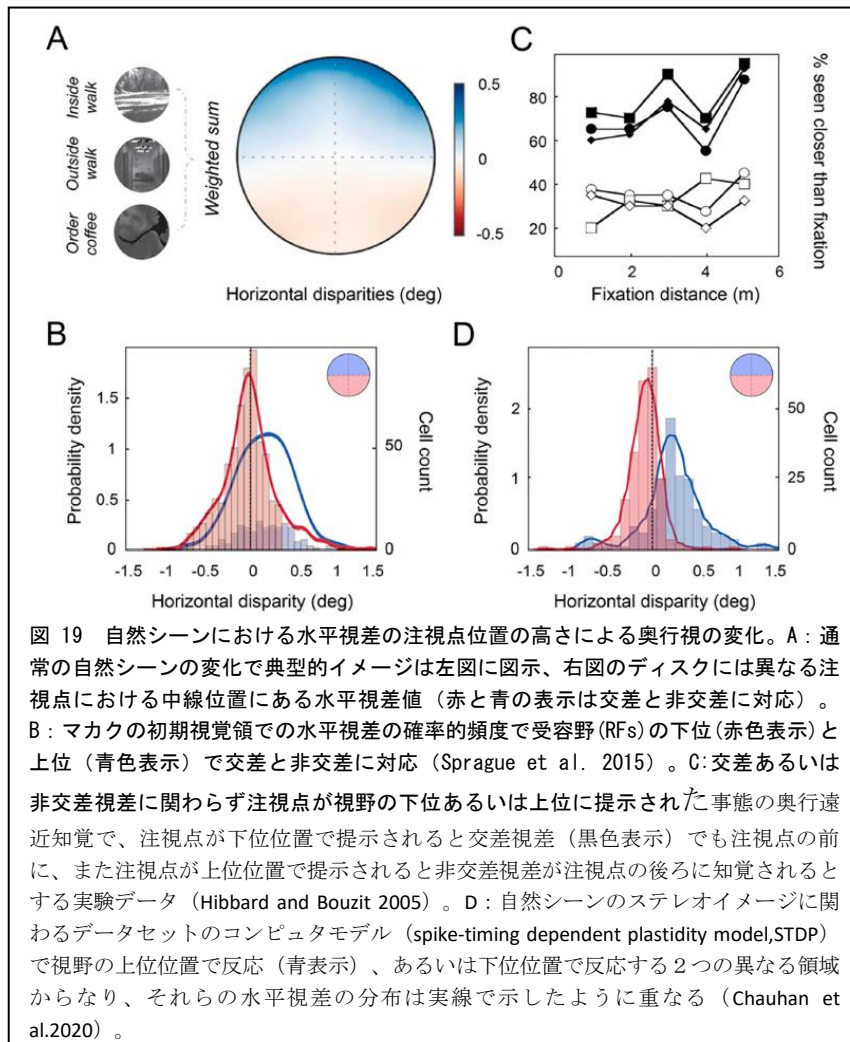


図 19 自然シーンにおける水平視差の注視点位置の高さによる奥行視の変化。A: 通常自然シーンの変化で典型的イメージは左図に図示、右図のディスクには異なる注視点における中線位置にある水平視差値 (赤と青の表示は交差と非交差に対応)。B: マカクの初期視覚領での水平視差の確率的頻度で受容野 (RFs) の下位 (赤色表示) と上位 (青色表示) で交差と非交差に対応 (Sprague et al. 2015)。C: 交差あるいは非交差視差に関わらず注視点が視野の下位あるいは上位に提示された事態の奥行遠近知覚で、注視点が下位位置で提示されると交差視差 (黒色表示) でも注視点の前に、また注視点が上位位置で提示されると非交差視差が注視点の後ろに知覚されるとする実験データ (Hibbard and Bouzit 2005)。D: 自然シーンのステレオイメージに関わるデータセットのコンピュータモデル (spike-timing dependent plasticity model, STDP) で視野の上位位置で反応 (青表示)、あるいは下位位置で反応する2つの異なる領域からなり、それらの水平視差の分布は実線で示したように重なる (Chauhan et al. 2020)。

さらに、中心窩のニューロンは水平視差によく反応し、周辺のそれは水平、垂直視差の両方に反応することを示した。これらの研究から、中心視野では垂直視差の反応は起きないが、斜め方向の周辺視になるにつれて反応は増大すると言える。

1.3 両眼視差と他の視覚特性との関係

両眼視差は、他の視覚特性、輝度、色度、テクスチャ、方向、面の凹凸が合わさって処理される。Samonds, Potetz, & Lee (2012) は、マカクの V1 ニューロンで輝度と視差の間の相関をみると明るいコントラストの多くは奥行の近傍に反応し、遠くに反応するニューロンは暗いコントラストに反応することから、この間の相関関係はネガティブであるとした。両眼視差と輝度の相関は、人間でも見いだされ、

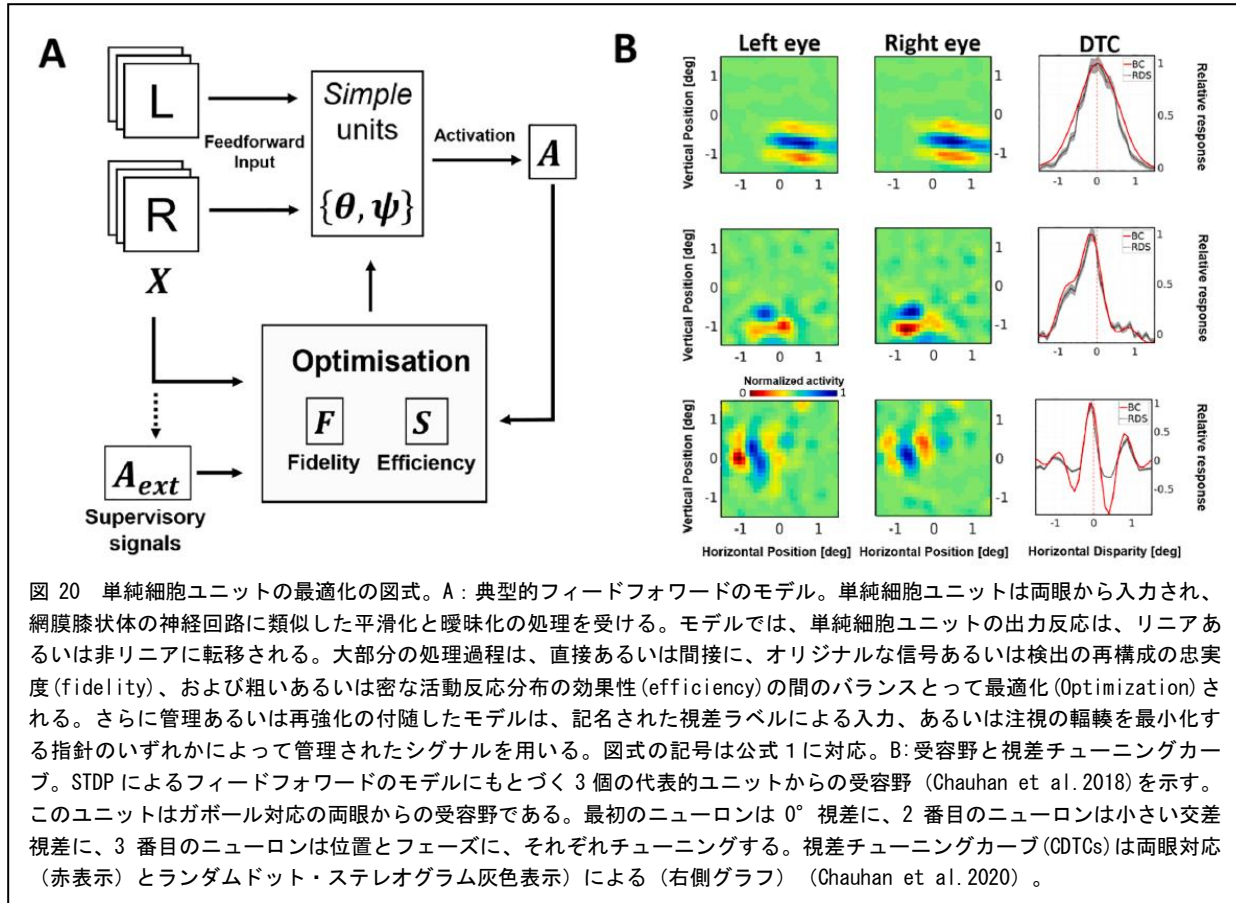
Su et al. (2013) は自然シーンにおけるローカルな視差と輝度の変化に共変化があり、また視差と色度の間にも同じ共変化があることを示した。Verhoef et al. (2015) は、マカクを対象とした脳機能イメージングで測定し、視差と色度は脳領域でも部分的にオーバーラップしていることを見いだした。連続した面での 3D 知覚も同様な手がかり間の関係があることを Burge et al. (2016) は示し、視差が信頼できる手がかりの場合、視差、輝度とテクスチャの 3 つの手がかりの一致が増大すると、ベイズの統計による計算値は最適になることを明らかにした。実際、傾斜度の知覚の結果はこのベイズによる計算値と一致することを示した。霊長類の脳においては fMRI (Murphy et al., 2013) および電気生理的研究 (Rosenberg & Angelaki, 2014; Sanada et al., 2012) で、これら異なる複数の手がかりによって 3D の傾斜方向が表現されていることが実証された。

視覚システムは図-地の分擬に対しても奥行手がかり間に関係をもたせている。図-地の分擬の手がかりは凸状、大きさ、コントラストがあり、「地」から「図」を視差手がかりと結んで分擬する。視差が分かっている場合、観察者は凹みより凸状部分がオクルードされていると知覚する。視覚中

枢のニューロンでは、周辺より「図」の方が奥行的に近い場合に反応する振幅が増大する (Cottreau et al. 2011, 2012)。

2. 視差対応反応のモデル

初期視覚システムでの視差の計算機モデルが必要な仮定とともに提示された。



2.1 モデル形成の背景

最初に、図 20 に示したように、単純細胞ユニットの最適化のしくみを図式して提示する。図 2 の A は典型的フィードフォワードのモデルで、単純細胞ユニットは両眼から入力され、網膜膝状体の神経回路に平滑化と曖昧化の処理を受ける。モデルでは単純細胞ユニットの出力反応は、リニアあるいは非リニアに変換される。大部分の処理過程は、直接あるいは間接に、オリジナルな信号あるいは検出を段階的にどこまで表現するか忠実度 (fidelity)、および粗いあるいは密な活動反応分布の有効性 (efficiency) の間のバランスをとり最適化 (Optimization) される。さらに管理 (supervise) あるいは再強化を付随したモデルは、記録された視差ラベルによる入力、あるいは注視の輻輳を最小化する指針のいずれかによって管理されたシグナルを用いる。図式の記号は次の公式 1 に対応。

$$\Phi = F(X, A(\theta, \psi, X), A_{ext}) + \lambda S(X, A(\theta, \psi, X), A_{ext})$$

ここで、入力セット X があたえられると、受容野 (ϕ , RFs) の最適なユニットを同定するために入力を正確に統計する忠実度とエネルギーコストを可能な限り低下させる有効性の間でバランスをと

る。A は入力 X と外部シグナル (Aext) に対する反応のなかで (θ, ϕ) によって記述されるネットワークの活動量である。F は入力に関するネットワークの忠実度、S はネットワークに課された有効性である。

2.2 Unsupervised models

モデル形成においては忠実度-有効性のカテゴリの他に unsupervised モデルと supervision モデルのカテゴリの検討が必要である。この unsupervised モデルでは外部シグナル (Aext) が無視される。このモデルは初期視覚野における神経細胞群の選択性について直接の強い影響を示し、外側膝状核と視放線受容層の間のフィードフォワードの連結が初期視覚野において活性化するという観察から、モデルに重要な影響を与える。とくに、このモデルでは両眼からの視差の選択性を両眼からの網膜信号によると限定し、網膜からの信号の空間配置はシーンの 3D 実験構造の情報が眼球間の信号の間に相互に影響する関係をもたらす。この正確な相互関係は眼球間距離、眼球面の高さ、眼球輻輳などの手がかりによって幾何学的に決められる。結局、unsupervised なモデル構築は、視差の選択性が一義的には入力の特性によるのが基本となる。

このモデルでは、部分的には網膜膝状体の初期のシナプス処理では正しいが、末端のニューロン層からのフィードバックと皮質間抑制がさらに加わるので多くのニューロンはそれ以上の機能を得る。

2.3 Supervised モデル

Supervised モデルには探知や識別の課題における学習が関与する。公式 (1) における Aext の要因は無視されず、トレーニングの間、入力関数は常に $A_{ext} = A_{ext}$ となる。ここでは明瞭にフィードバックされたシグナルを含む。観察者の挿込み動作、輻輳や調節などの反応性の皮質における予備トレーニングがもう一つの supervisor の原因となり、目標指向的要求になる。この場合、モデルへの入力は活性化している出力と絶え間なく相互作用し、この監視された信号は学習を強化する。

このように、このレビューでは、自然シーンにおける両眼視差の初期の視覚領に与える神経生理学的反応からいくつかのコンピューショナルモデルをレビューし、視覚経験を通してそのシステムの機能を明らかにしようとしている。

3. その他の研究

空間周波数に依存する弱視の両眼間抑制の相互作用

弱視は、発達の臨界期に十分な情報が視覚中枢に伝わらないために生じる神経発達の障害である。弱視は片眼に生じ、両眼からの情報に対して弱視眼に抑制が起き、視力が回復しても両眼視の働きの障害は続く。Harrad and Hess (1992) は両眼間の抑制のアンバランスが弱視の原因であると示した。これを受けて、Baker, Meese, and Hess (2008) は減衰抑制仮説 (attenuator explanation of suppression) を提唱し、弱視眼がコントラストに対する感度が低いために両眼視した場合に注視眼のマスク効果が弱くなるためと説明した。これに対して、弱視眼の抑制は、両眼間の健全なマスキングに従わずにすべての空間周波数に対して単一の感度変化が生じとするものである。この場合、特定の空間周波数のターゲットを観察する弱視眼に抑制が起きるかどうかは注視眼で観察されたターゲットの空間周波数によることになる。

Beylerian et al. (2020) は、弱視における両眼間抑制の相互作用が類似した空間周波数に同期した細胞間に起きているのか、あるいは同期していない空間周波数にグローバルに起きているのかをしらべた。はじめに、抑制が空間周波数に対して広く生じているかを高、中、低の空間周波数で健常者と弱視者を対象にしらべた。テスト刺激は検出程度が調査済みのガボールパッチとし、またマ

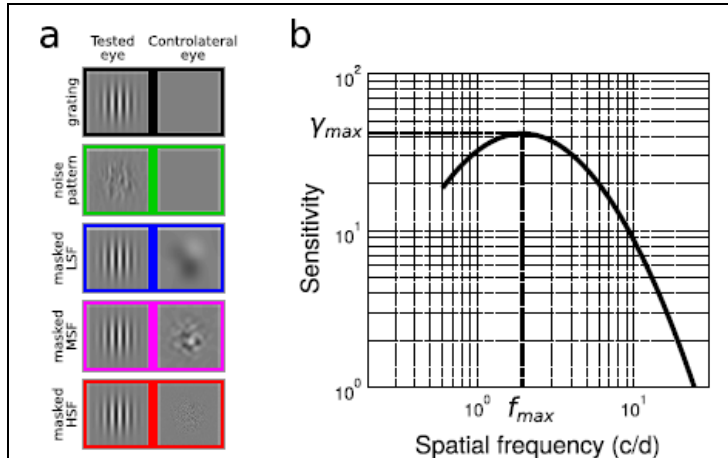


図 21 実験で用いたマスク刺激の形状。左列図の上から順に、黒枠表示の単眼グレーティングの探索パターン (monocular grating detection、黒枠表示)、単眼方向ノイズ探索パターン (monocular oriented noise pattern detection、green 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の低空間周波数パターンのマスク刺激 (grating detection with a dichoptic low-spatial frequency mask LSF、blue 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の中程度空間周波数パターンのマスク刺激 (grating detection with a dichoptic mid-spatial frequency mask MSF、Magenta 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の高空間周波数パターンのマスク刺激 (grating detection with a dichoptic high-spatial frequency mask HSF、red 表示) Kingdom et al. (Beylerian et al. 2020)。

スク刺激は 2 次元の帯域濾過した 3 通りのピーク空間周波数 (0.25c/d, 1.31c/d, 4.93c/d) ノイズとした。被験者は 15 人の弱視者 (平均年齢 35 歳) と 17 人の健常者 (平均年齢 32 歳) であった。マスク刺激は、図 21 の左列図に示したように、単眼グレーティングの探索パターン (monocular grating detection、黒枠表示)、単眼方向ノイズ探索パターン (monocular oriented noise pattern detection、green 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の低空間周波数パターンのマスク刺激 (grating detection with a dichoptic low-spatial frequency mask LSF、blue 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の中程度空間周波数パターンのマスク刺激 (grating detection with a dichoptic mid-spatial frequency mask MSF、Magenta 表示)、弱視眼に提示した両眼分離の高空間周波数パターンのマスク刺激

(grating detection with a dichoptic high-spatial frequency mask HSF、red 表示) の 5 種類を用い、両眼分離のマスク事態でのコントラスト感度を測定した。

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

この実験から、弱視眼はマスクングが異常に弱いと考えられる。

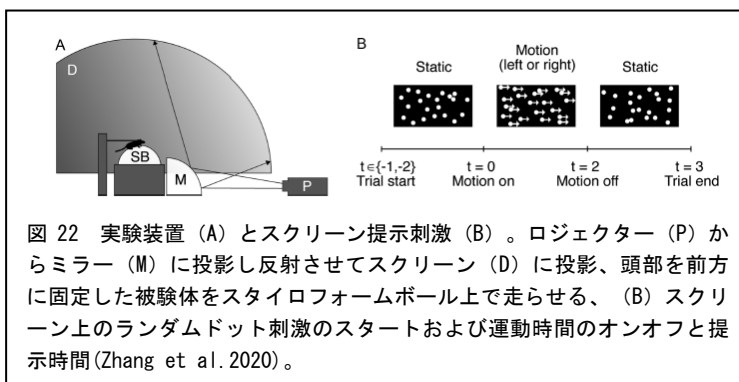


図 22 実験装置 (A) とスクリーン提示刺激 (B)。プロジェクター (P) からミラー (M) に投影し反射させてスクリーン (D) に投影、頭部を前方に固定した被験体をスタイロフォームボール上で走らせる、(B) スクリーン上のランダムドット刺激のスタートおよび運動時間のオンオフと提示時間 (Zhang et al. 2020)。

マウスにおけるランダムドットモーションの単眼と両眼の光学的自発運動の偏向

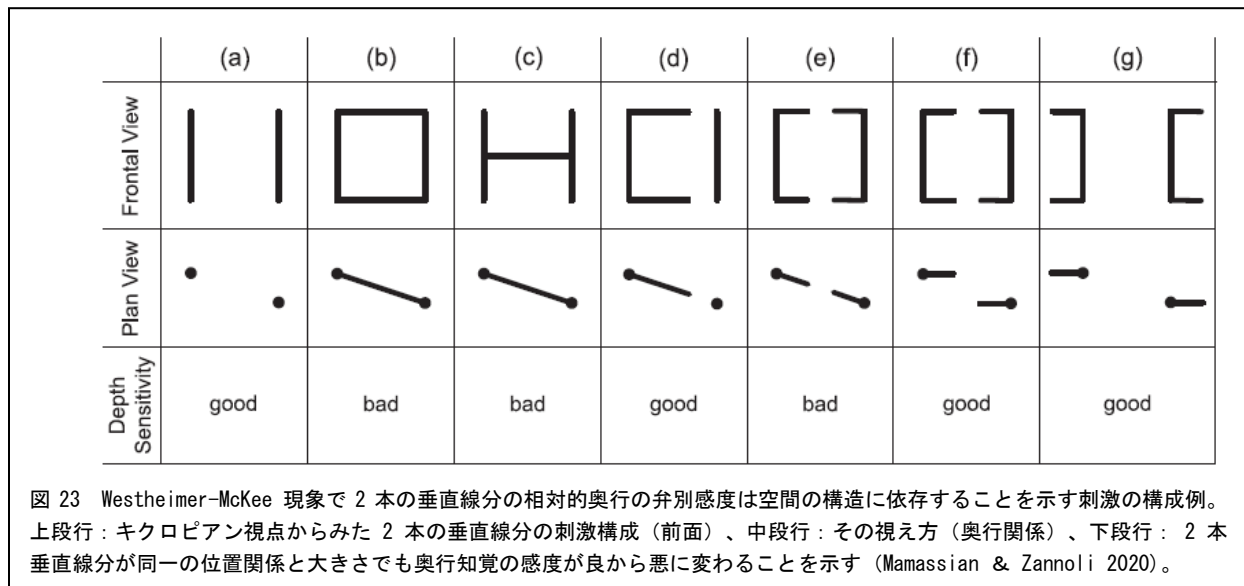
Zhang et al. (2020) はネズミのマウス (mouse) に動くランダムドット刺激を提示し、その視覚刺激の受容と運動するマウスの反射反応の変化をしらべた (図 22)。被験体には

頭部を前方に固定してボールタイプのランニングマシン上を走行させ、走行時の眼球反射 (opto-locomotor reflex、OLR) を単眼条件と両眼条件で測定した。黒の背景に白のドットで構成されランダムドットパターンを、36deg/s の速度で左あるいは右に動かした。1 日に 15 分、静止刺激と運動刺激 (左あるいは右) のセッションを毎日実施し各セッション 80 回まで反復した。ランニングマシンでは被験体の走行方向の揺れを検出器で検出した。

実験の結果、単眼条件と両眼条件とも試行直後の 700ms にランダムドットの運動方向による OLR の偏向が同方向に生じたが、しかし次にはその偏向が速やかに解消した。OLR は単眼条件と両眼条件ともほぼ同じ傾向で両眼間には相互の連絡がないことが示された。

対象の奥行関係の知覚によるステレオ視の感度の減退

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



Wilcox (2009) はステレオ視における両眼視差には、対象の分割が重要な手がかりとなると指摘した。とくに Westheimer (1979) は、ステレオ視で奥行の異なる垂直線分で正方形を構成するように連結して配置すると、図 23 の a と b に示したように、垂直線の奥行を知覚できない (Westheimer-McKee phenomenon) ことを報告、また McKee (1983) は図 c のように、刺激が非閉鎖の H 字状に連結して配置しても奥行の正常な知覚が失われたことを報告した。しかし図 d のように、垂直線の連結の配置にオープンな領域を設け 2 個の別々の構成にすると奥行が知覚できること、また図 e のよう奥行のある 2 本の垂直線分間の連結にわずかな間隙を設定し両方の連結面が視差により傾斜面を持つようにすると逆に知覚は悪くなることも示された。しかし図 f のように 2 本の垂直線分を前額に平行に配置すると奥行の知覚は正常にもどった。さらに図 g のように、垂直線分を外向きに連結して矩形をつくと正常に奥行が知覚された。このように、Westheimer-McKee phenomenon は 2 個の対象の閉鎖的 (closure) あるいは開放的 (open) 配置によって奥行視の正確度が変わることを示した。

Mamassiana, P. & Zannolib, M(2020)は、実験1A で図 24A のように、2本の垂直線で図形の構成

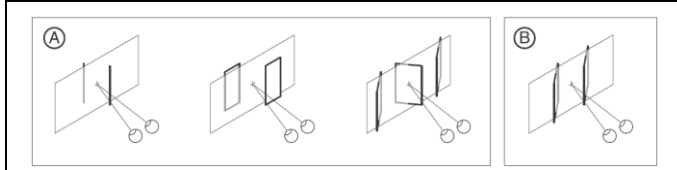


図 24 ステレオ視の感度とバイアスをしらべる刺激の配列。被験者には注視点近傍の 2 つの垂直線のどちらが前に知覚判断するかを教示した。(A) 実験 1A では、2 本、4 本あるいは 6 本の垂直線がコントラストを違えて提示、それに小さな水平線が前額平行面あるいは奥行傾斜面を構成するように加えられた。(B) 実験 1B では、4 本の垂直線がそれぞれペアをなし 2 つの奥行傾斜面を構成するように提示 (Mamassian & Zannoli 2020)。

にしたがって水平視差を設定した。基本となる図形構成は 2 本の垂直線で構成し、前額平行面事態では 2 本の垂直線に短い水平線を加えて面を構成するように連結し、異なる奥行が出現するように構成、さらに奥行傾斜面事態では前額平行面事態に 2 本のペアとなる垂線を加え、その各ペアの視差がそれぞれ反対になるように設定し、短い水平線で奥行傾斜面となる事態を構成した。実験 1B では、4 本の垂直線がそれぞれペアをなし 2 つの奥行傾斜面を構成するよう

に提示し、中央の 2 線分の間には視差 (-1, -0.5, 0, 0.5, 1 arcmin) をつけて左あるいは右の傾斜面を設定した。ステレオ視させた被験者 (5 人) には注視点近傍の 2 つの垂直線のどちらが前に知覚判断するかを教示した。右垂直線が左垂直線より前方に知覚される確率を恒常法で視差を変化させて測定した。

実験の結果、実験 1A では刺激配列が前額平行面事態では視差 2 arcmin で正解確率は平均 97.9% となったが、傾斜面事態では視差を増やしても正解確率は有意に減じて平準化した。これは図形の群化原理が働き、単体の対象の奥行知覚に影響することを示した。2 つの傾斜面の傾き方向の知覚実験 1B では、傾斜角度を増大すると傾斜の方向を誤認するバイアスが增大した。これらの結果は、ステレオ視が視差対応モデルだけでは解決できなく、対象の局所の特徴を考慮する必要があることを示唆した。

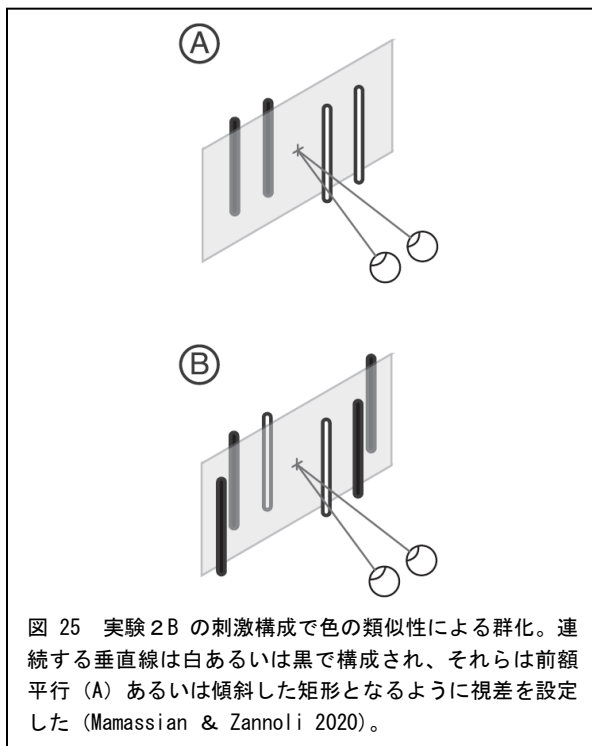
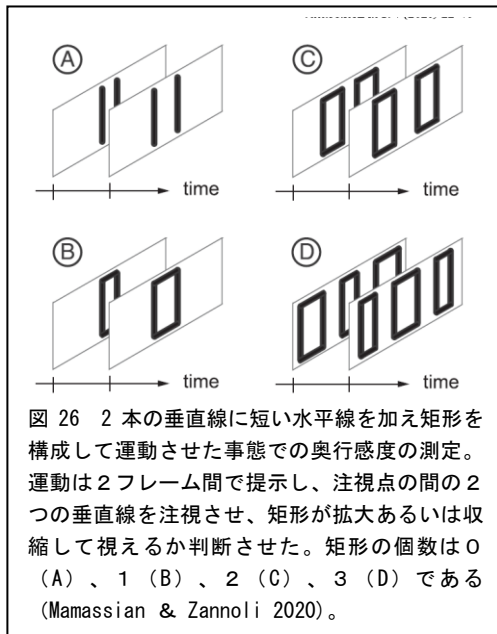


図 25 実験 2B の刺激構成で色の類似性による群化。連続する垂直線は白あるいは黒で構成され、それらは前額平行 (A) あるいは傾斜した矩形となるように視差を設定した (Mamassian & Zannoli 2020)。

そこで実験 2 として、2 本の垂直線間の距離 (object size、10, 15 or 20 arcmin) を広げることで群化原理を弱くし図形の一体を妨げることでステレオ視力が影響されるか否か、さらに隣接垂直線の色を操作 (図 25) して異なる群化を設定して、ステレオ視における群化原理の影響を検討した。実験 2A では、4 本の垂直線を前額平行の矩形あるいは奥行傾斜の矩形をそれぞれ構成し、それらの矩形の大きさを変えて群化の働きを操作し、奥行知覚感度をしらべた。実験 2B では、連続する垂直線を白あるいは黒に設定し、類似性の群化原理の働きを検証した。被験者 (3 人) に注視点に隣接した左・右の垂直線のどちらが前あるいは後かの奥行の知覚を恒常法で判断させた。

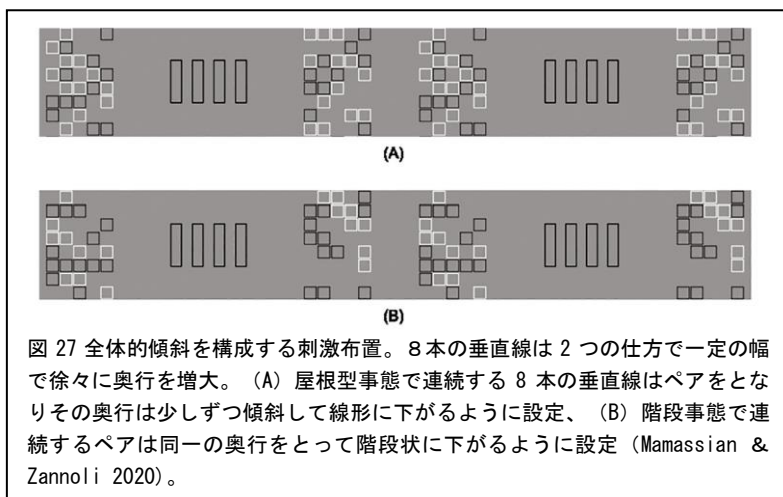
実験 2 の結果、矩形が平行に提示された階段状の奥行事態では奥行感度の減少が示されなかったが、矩形が傾斜面奥行事態では奥行感度の減少は顕著に示されたものの、しかし刺激間の距離による影響は小さかった。これらの結果は、提示刺激



が図形として一体化できる群化の手がかりが奥行感度に大きく影響することを示唆した。

異なる感覚の組合せによる群化が奥行き感度にも影響するかが試された。立体視できる垂直線をひとつずつ連続して提示、それに併せて同一あるいは異なる音程の音を同時提示した。最初から2行までは同一の奥行で垂直線を提示し3行目からは奥行を変えて提示。これに同期させ、音程も最初の2音は同一、3音目から音程を変えた(同期条件)。垂直線と音程を同期させない場合、最初の音程を次の2音程とは異ならせ、音程と視差変化を不一致にして奥行知覚の感度をしらべた(非同期条件)。5人の被験者に、視差の大きさを4段階に変え、恒常法で最後に提示した2本の垂直線の視えの奥行を判断させた。その結果、同期条件は非同期条件より有意に奥行知覚判断が正しくなされ、刺激と音程の組合せがすべて同一のベース条件と同等であった。

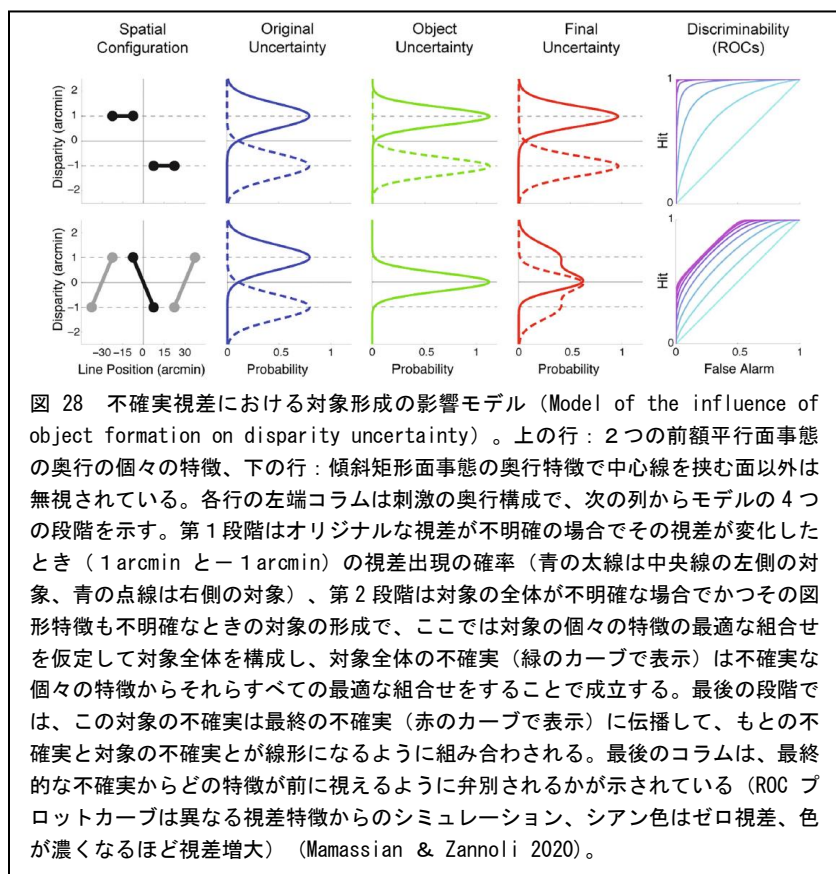
さらに、矩形刺激が運動する事態を図26のように設定し、群化の程度が奥行感度にあたる影響をしらべるために、実験4では2本の垂直線に短い水平線を加え矩形を構成して運動させた事態で奥行感度の測定を試みた。運動は2フレーム間で提示し、注視点を挟む2つの垂直線を注視させ、矩形の拡大あるいは収縮の知覚を判断させた。刺激はモニターに提示して単眼視させ連続2個のフレームを提示、また矩形の個数は0 (A)、1 (B)、2 (C)、3 (D)の4通り設定した。垂直線2本と矩形1個の場合には2本の垂直線を反対方向にそれぞれ動かして提示、矩形2個の場合には最初に提示した2本線分をある方向に動かし、次のフレームでは反対方向に動かして提示、そして矩形3個(垂直線6本)の場合には垂直線1本をある方向に次の2本を反対方向に、次の2本を戻す方向に、後の1本をその反対方向に動かして提示した。9人の被験者には注視点の両脇にある垂直線を注視し、それらが内側あるいは外側かを知覚して判断するように教示した。実験の結果、2本垂直線と2個の矩形では拡張あるいは収縮についての知覚弁別が優れていた。しかし1本あるいは3個の場合には弁別が悪いことが示された。前者ではペアの刺激対がひとつのまとまりとして運動するのがわかるが、後者では非剛体(non rigid)に視え複雑な奥行回転が生じたからであった。



最後に全体の刺激構成の中で異なる奥行をもつ刺激ペアの局所特性が全体の知覚的群化に与える影響を実験5で試した。刺激は、図27のように、全体的傾斜を構成する布置とし、8本の垂直線は2つの仕方で一定の幅で徐々に奥行を増大させた。その1は屋根型事態で連続する8本の垂直線はペアをとなりその奥行は少しずつ傾斜して線形に下がるように設定(図A)、その2は階段事態で連続する

ペアは同一の奥行をとって階段状に下がるように設定 (図 B) とした。被験者 (2人) には 2 つの刺激のなかで右刺激に対して左刺激の奥行が近いか遠いかを判断させた。実験の結果、奥行判断は屋根勾配型事態より階段事態の方が有意に正確であった。屋根勾配型事態と階段事態の違いは連続ペアとなる 2 本の線分の視差が同一あるいは異なるか否かであり、これは全体の視差の平均値は同等なのに隣接した視差が異なるために局所的に傾斜した屋根勾配型事態の奥行判断は難しいことを示した。

このような事態で重要なことは全体の平均的特徴 (たとえば視差の平均) より対象の局所的特徴の評価にあると考えられ、不確実視差における対象形成の影響モデル (Model of the influence of object formation on disparity uncertainty) が提案された。このモデルは図 28 に図式化したように 4 段階から構成された。



図の上行には2つの前額平行面事態の奥行の個々の特徴を、下の行には傾斜矩形面事態の奥行特徴を中心線を挟む面以外は無視して表示してある。各行の左端コラムは刺激の奥行構成で、次の列からモデルの4つの段階を示す。第1段階はオリジナルな視差が不明確の場合で提示された視差 (1 arcmin あるいは -1 arcmin) を中心としての視差出現の確率 (青の太線は中央線の左側の対象、青の点線は右側の対象) をガウス分布 (標準偏差 σ) になると仮定して算定したのである。第2段階では対象の全体が不明確な場合でかつその図形特徴も不明確なときの対象の形成で、全体の奥行は各対象をグルー

プにまとめて知覚すると仮定し、対象全体の不確実 (緑のカーブで表示) は不確実な個々の特徴からそれらすべてを最適に組合せにすることで成立すると仮定したものである。2つの対象の分散は等価なので、対象の不確実はガウス分散値が半分の確率で構成されると仮定できる。最後の段階では、この対象の全体の視差は対象を構成する個々のエレメントに逆伝搬する。この逆伝搬 (back propagation) の方法はいくつかあるが、ここでは不確実な全体の視差と不確実な個別の視差とが線形になるように組み合わせられ (加重総和) 最終の不確実 (赤のカーブで表示) の結果が得られると仮定した。第4のステージでは注視のどちら側の刺激が奥行的に前後にあるかが計算される。最後のコラムは、最終的な不確実からどの特徴が奥行的に前後に弁別されるかが受信者応答特性 (ROC, Receiver Operating Characteristic) で示されている (このプロットカーブは異なる大きさの視差特徴からのシミュレーションで、シアン色はゼロ視差、色が濃くなるほど視差増大する)。

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