

1. 視野闘争

透明な運動事態と視野闘争における特有な偏好の分離過程

先の研究によれば、透明な運動刺激による視野闘争事態での運動方向は特有な方向に偏好知覚される (Mamassian & Wallace, 2010; Schütz, 2014)。しかし、この知覚偏好は視野闘争の初期の段階に見られるという研究報告もある ((Carter & Cavanagh, 2007; Stanley et al. 2011)。

Hwang & Schütz (2020) は、透明な運動刺激による視野闘争とその運動刺激事態の偏好知覚の関係をしらべた。実験では、一群のドットをふたつ作り、両群とも両眼に提示し、相反する方向に動かし、被験者にはどちらのドット群が手前に知覚するかその方向を報告させた。透明な 2 つのドット群を反対方向に運動させると互いにまとまってスライドする透明な面が知覚できる。ここには奥行となる手がかりは存在しないが、どちらかが手前に知覚される。これは運動による透明奥行闘争 (motion transparent depth rivalry) と呼ばれ、視野闘争と透明な運動刺激の知覚闘争間には知覚現象が異なるのに、その知覚バイアスが視覚路の共通するレベルでの闘争 (Andersen & Bradley, 1998; Tong, Meng & Blake, 2006) があると考えられるが、しかし視野闘争と透明な運動による 3 次元視の間の知覚時間の持続が一致しなく (Brascamp et al, 2018; Cao, et al, 2018; Steinwurz et al, 2020)、さらに透明な運動刺激による運動方向のバイアスは 2 次元の運動信号より 1 次元のそれと類似し、これは V1 領域あるいは中側頭回領域 (MT) の反応に依存する (Schütz & Mamassian, 2016) と考えられる。もし、透明な運動刺激と視野闘争の知覚バイアスが個人内で類似していれば、この特有なバイアスは透明な運動刺激 V1 が関与し、もし異なれば MT が関与すると考えられる。

検証実験で用いられた刺激は、グレイ色を背景にした白あるいは黒の同色、または白と黒の 2 グループからなるランダムドット・キネマトグラムで、透明な運動 (transparent motion) 事態では両眼に提示し各グループのドットを反対方向にオーバーラップして動かし、視野闘争事態では各グループを左と右眼にそれぞれ提示した。ドット群の運動方向は 0° から 345° の範囲で 15° ステップで変えて提示し、透明な運動事態では被験者に手前の知覚されるドット群の色 (白または黒) を報告させた。実験では、コントラスト比、眼球能力の個人差、運動方向条件などに帰因する個人的偏好を得られたデータから計算し、他の要因を除去して単独に個人的知覚バイアスを計算した。

その結果、反対方向に運動するドットグループのコントラスト比が異なる場合 (白あるいは黒)、視野闘争条件の方向バイアスは強いコントラスト比の影響が示されたが、透明な運動事態のそれは 2 つに分離して知覚された。ドットグループのコントラスト比が同一の場合には、視野闘争条件での方向の個人的バイアスはコントラスト比に左右されず、眼球の能力差によった。ドット群のコントラスト比が同一の場合は、視野闘争において眼球の能力個人差によるバイアスは増えたが、知覚方向バイアスには影響しなかった。これらの結果に基づいてコントラストバイアスを最小化する計算を視野闘争事態ですると、このバ

イアスは消されたが、眼球能力の個人差は残った。運動するドット群を各眼に分けて提示しコントラスト比と眼球能力個人差を最小化した視野闘争事態では、強い方向知覚バイアスが示されたが、透明な運動事態に比較すると弱かった。また、方向知覚の偏好は視野闘争と透明運動事態で相関が示されなかった。

これらの結果から、透明な運動知覚における特有な偏好が示されたが、コントラスト比による偏好は弱かった。この結果は、逆に、視野闘争では運動方向知覚の偏好は弱くコントラスト比による強い偏好が示された。視野闘争での方向の知覚偏好が弱いことは、他の多義的なタイプの刺激と対照的である。これらの結果は、運動方向知覚のような視覚特性における個人的に特有な偏好が視覚情報処理過程の異なる段階で分離して処理されていると示唆される。

大局的ゲシタルトによるコンフリクトの視野闘争の抑止

Brascamp et al. (2020)は、ローカルな刺激要素からなるグローバルなゲシタルト形状が視野闘争を抑制することを明らかにした。実験に用いた刺激パターンは、図1に示したように、9×9の方形のグリッド状に1個ずつ提示した9個の緑色のクロス形と方形の9個の赤色の十字形で各眼にそれぞれ提示、両眼融合視させ、その中心の注視点の周りに灰色

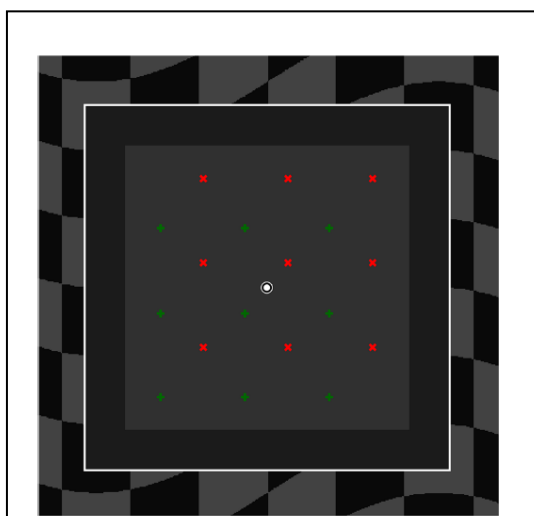


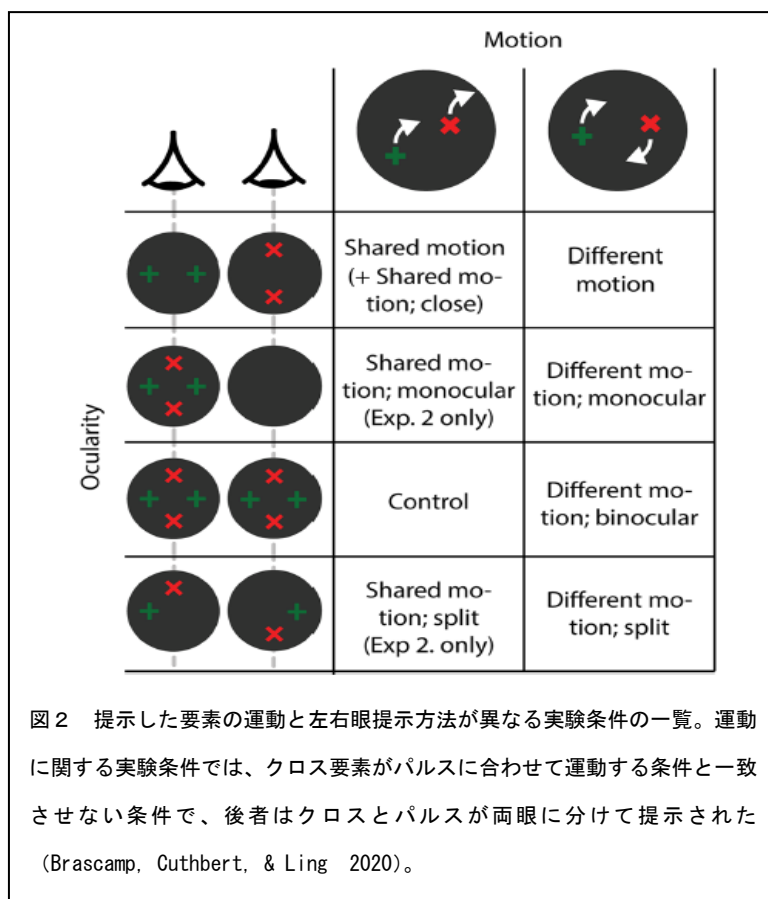
図1 実験に使用した刺激。このパターンは2つの単眼イメージが一つの図に示されているが、実際には単眼にそれぞれ提示された (Brascamp, Cuthbert, & Ling 2020)。

を背景としてディスプレイに提示された。実験の目的は、この2種類の刺激要素が一つのゲシタルトの形成にどのくらい関与するかを調べることである。すなわち、ひとつは2種類の刺激要素からなる一つの面、または緑色のクロス形からなる1面と赤色の十字形からなる1面でできた別々の面である。2種類の刺激要素を半径状に動かすと、すべての要素がまとまって運動するか、あるいはクロスと十字形の間で反対方向に運動するかのどちらかが知覚される。もしゲシタルトの共通運命の法則に従うならば要素の形状に関わらず一つに属する形状印象が生じ、そうでなければ緑色クロス群と赤色十字形群は空間的には重なると、そのうちどちらか別々の印象が生じる。したがって実験条件は、(1)運動の分配(shared motion)条件：緑色のクロス形が一眼に、赤色の十字形が他眼に提示され、

すべて同方向に運動。(2)異なる運動(different motion)条件：緑色のクロス形が一眼に、赤色の十字形が他眼に提示されるが、それぞれ反対方向に運動。ここでは、ゲシタルト要因と眼球能力による要因間の相互作用を知るために、次の実験条件(図2)を加え

た。(1) 異なる運動条件；単眼提示：クロスと十字形の運動方向反対、他眼は灰色背景のみ提示、背景のみの他眼とクロスと十字形提示の間にコンフリクトがあるものの眼球間のコンフリクトは減少。(2) 異なる運動条件；両眼提示：クロスと十字形の運動方向反対、すべての要素は両眼に提示、提示した面のレベルでのコンフリクトを残して眼球間コンフリクトは除去。(3) 異なる運動条件；分離：クロスと十字形の運動方向反対で両眼分離で提示、クロスと十字形は両眼間に分布し、面レベルの知覚対象はそれぞれの眼からの刺激に対応し、とくに横表示方向で一定の範囲のすべての要素をカウントすると、一眼は奇数の、他眼は偶数の要素をすべて観察できる (図 2)。106 人の被験者 (30 男、76 女、18-20 歳) にミラーステレオスコープを通して 2 台のディスプレイ上の刺激を提示し、9 個のグリッドのいくつかが知覚的に消えたらスペースバーを押すように教示した。

実験 1 の結果、グローバルな特徴によるコンフリクト条件 (ゲシタルト刺激によるコン



フリクト) はローカルな特徴によるコンフリクト条件以上に知覚消失を促進することが示された。また実験 2 では、非局所的特徴によるグローバルな面のコンフリクト条件 (方向の異なる運動条件) は多次元の要素からなる同一の面を形成するコンフリクト条件より知覚消失を起こしやすく、これに対して単一の局所的な要素あるいは多次元の異なる面が生じる条件では知覚消失が起きた。

この結果から、非局所的コンフリクトは眼球間の抑制を強めることが示されたが、局所的特徴による眼球間コンフリクトが必要ではないということではなく、反対に

グローバル面のコンフリクト (反対方向の運動条件、両眼視条件) を強めることでローカルな刺激による眼球間コンフリクトを除き知覚的抑制を除去していると考えられる。これらの結果は、両眼視野闘争がローカルに異なるイメージ要素を抑制することから生じるが、この抑制はこれらの要素からなるグローバルなゲシタルトによって生起すると結論できる。

2. 両眼立体視

異なる角度からの両眼立体視の恒常性 (研究レビュー)

知覚は、対象観察時の方向、照度や位置が異なり網膜に投影された属性が異なるにも関わらず、対象の特性をコンスタントに知覚できることにある (visual constancy)。大きさの恒常性は各観察距離からの前額平行における対象の大きさをいい、奥行の恒常性は各観察距離における斜め方向からの面の大きさを言う。この両眼立体視の恒常性は立体視の空間幾何学とホロプター概念 (equi-disparity circle) が関係する。Allison & Wilcox (2021) は、自己を中心とした対象の 3 次元位置の奥行距離要因ばかりでなく方向要因を考慮した研究をレビューした。その結果、対象の面の方向ホロプターの形を考慮し、また奥行を計算するには視差からの距離とともに方向要因で修正する必要があると結論した。ホロプター幾何学と奥行恒常性との関係を明確にする必要がある。

両眼融合と奥行知覚の新たなモデル (sensory fusion model)

Ding & Levi (2021) は、両眼視融合と広範囲の奥行知覚に関する新たなモデル (sensory fusion model) を提唱した。このモデルは、相対的な水平視差 (位置視差) と 0、+90、±180、-90° からなる眼球間のフェーズ視差 (Interocular phase disparity) のペアの空間周波数フィルターで構成される。この異なる空間のプロフィールをもつペアのフィルター (non zero phase disparity) が眼球間の対応の誤りを計算して両眼のフェーズ視差エネルギー (binocular fusion energy) を出力し、位置視差にそって対応の誤りがなくなり正しい融合が達成されるまで適切なフィルターを選択する。ペアフィルター (0 phase disparity) は位置視差エネルギーを計算する。両眼視融合後、位置視差と残っている可能なフェーズ視差エネルギーは共同して両眼による奥行知覚を計算する。両眼視融合は粗い段階から密な段階の多様なスケールで起きる。ある位置における視えの奥行はすべての空間周波数チャンネルのなかで残されたフェーズ視差の組合せでシフトされ、そして刺激の空間周波数と刺激コントラストによって加重される。

このモデルは、図 3 に示すように、視差閾値の最大 (D_{max}) と最小 (D_{min}) の Max オペレーターをもつ統合モデルである。最初の段階の処理過程では、両眼のイメージは最初の段階の空間周波数フィルターの 2 つの TE (興奮性信号に調整、tuned excitatory) ペアを通過させる。この各フィルターペアでは一つは刺激のプロフィールが同一か否かを、もう一つには水平方向の視差を検出する。2 組の TE ペアの両眼視エネルギーの総計は単眼視エネルギーによって標準化され、MAX オペレーターによって最大の相関を計算し対応する位置視差を選択し、それからローカルな位置エネルギーを計算する奥行視差関数を通す。次の処理段階では、最初の段階のフィルターの両眼の出力コントラストを標準化する DSKL 回路を各眼に通す。その調整の後で両眼の 2 段階目のコントラスト調整が 2 段階目の空間周波数フィルターを通して処理される。2 組の TE ペアの両眼視エネルギーの合計は、MAX オペレーターと 2 段階目の位置視差エネルギーの出力のため奥行視差関数を通して。奥行視差関数は検出力と

指数的減衰関数の結果で、初めは視差にともない増大するが視差がさらに増大すると指数的に減少する傾向となる。

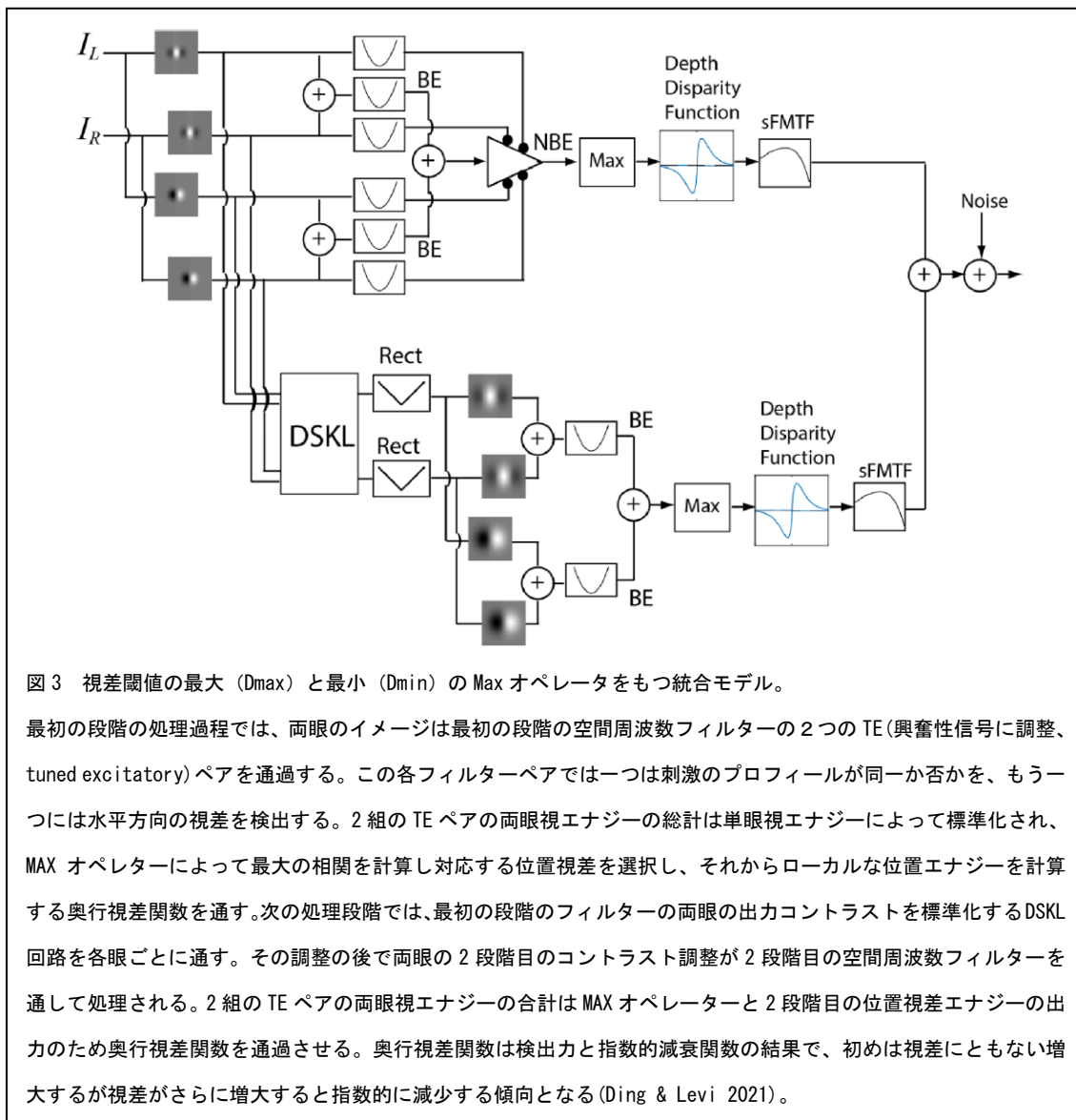


図3 視差閾値の最大 (Dmax) と最小 (Dmin) の Max オペレータをもつ統合モデル。

最初の段階の処理過程では、両眼のイメージは最初の段階の空間周波数フィルターの2つのTE(興奮性信号に調整、tuned excitatory)ペアを通過する。この各フィルターペアでは一つは刺激のプロフィールが同一か否かを、もう一つには水平方向の視差を検出する。2組のTEペアの両眼視エネルギーの総計は単眼視エネルギーによって標準化され、MAX オペレーターによって最大の相関を計算し対応する位置視差を選択し、それからローカルな位置エネルギーを計算する奥行視差関数を通す。次の処理段階では、最初の段階のフィルターの両眼の出力コントラストを標準化するDSKL回路を各眼ごとに通す。その調整の後で両眼の2段階目のコントラスト調整が2段階目の空間周波数フィルターを通して処理される。2組のTEペアの両眼視エネルギーの合計はMAXオペレーターと2段階目の位置視差エネルギーの出力のため奥行視差関数を通してさせる。奥行視差関数は検出力と指数的減衰関数の結果で、初めは視差にともない増大するが視差がさらに増大すると指数的に減少する傾向となる(Ding & Levi 2021)。

このモデルを検証するために、異なる眼球間コントラストの視差で3つの空間周波数の最小値と最大値(DminとDmax)が測定された。提示刺激はランダムガボールパッチ(RGP)でランダムな位置とフェーズからなるが固定した空間周波数とはしない。被験者は両眼で同一のアレイをもつパターンで水平方向にシフトしたものでコントラストの異なるパターン(図4)を観察した。その結果、モデルの予測通りに、2つのコントラストの標準化メカニズムがあることを明らかにした。その1は、エネルギーの標準化(EN):両眼視エネルギーは両眼視の結合領域の後に単眼エネルギーによって標準化される。これは両眼間のコントラストを変えても一定のDminの閾値を予測する。その2は、DSKL(両眼間相互作用のモデル):

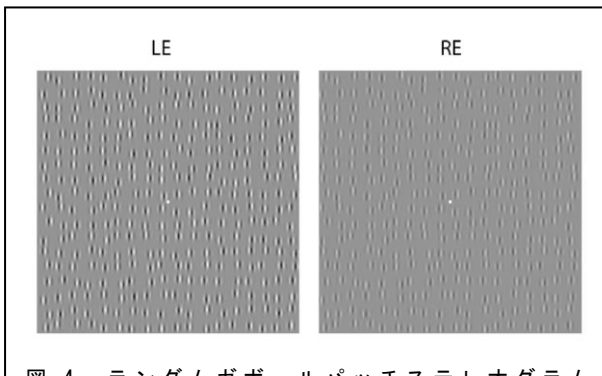


図 4 ランダムガボールパッチステレオグラム (Random-Gabor-patch stereograms)。位置とフェーズはランダムとするが空間周波数は固定。被験者は両眼で同一のアレイをもつパターンで水平方向にシフトしたものでコントラストの異なるパターンを観察(Ding & Levi 2021)。

このモデルのシミュレーションの結果からこの統合モデルは閾値以上の奥行知覚を論理的に予測できると考えられる。

視差からの奥行知覚のための感度調整を組み入れた gain-control disparity energy model

Chen et al. (2021)は、既存の視差のエネルギーモデルに輝度コントラストが考慮されていないので、それを含めた新たな視差モデルを提唱した。このモデルでは視差の処理過程にコントラスト要因をニューラルなレベルで標準化してエネルギーモデルに組み込み、コントラスト要因が視差による奥行の知覚に依存することを説明できることを提示した。

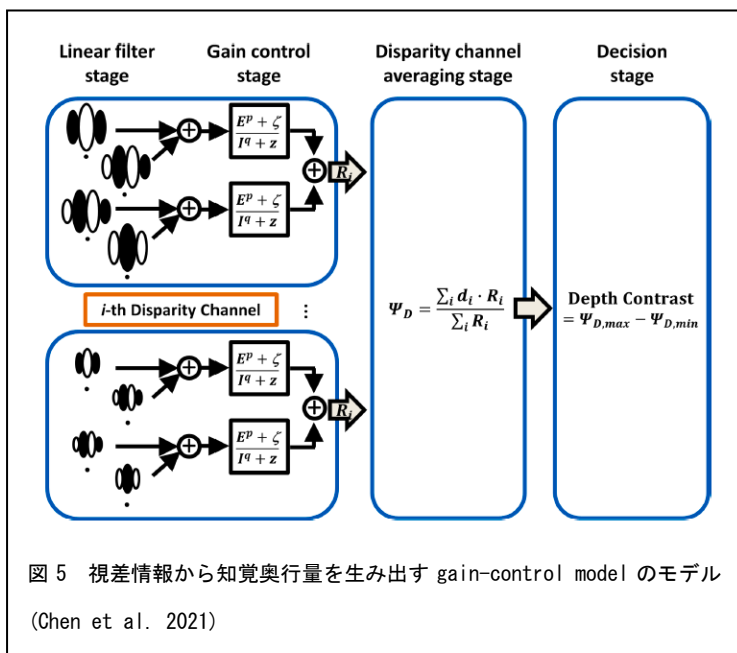
Marr & Poggio(1976)や Pollard et al. (1985)たちは、ステレオ立体視のモデルとして、視覚システムが一眼のイメージの部分了他眼のそれとどのように対応するかに焦点をあて、その対応関係が視差からの奥行をどのように計算するかについてモデル化した。一方、視差エネルギーモデル(Ohzawa et al.1990)では、第1視覚領の単純野と複雑の受容野に基礎を置き、次のようにモデルを構成した。第1に、左右の眼のそれぞれの受容野は同一の空間周波数の選択性を共有し、左右の受容野は位置シフトかあるいはフェーズシフトを用いて視差情報を符号化する。第2に、両眼の複雑セルが各セルの異なるフェーズを二乗して知覚する奥行を決定する。知覚する奥行を決定するためには、視覚システムが異なる視差チャンネル間で視差エネルギーを比較し、例えば勝者総取り方式で決定する。このように奥行知覚は最大の視差エネルギーをもつ視差チャンネルで決定される。Marr & Poggio(1976)の cooperation-competition モデルではイメージの輝度コントラスト要因を両眼間の対応をしないかの判断に組み込まないが、エネルギーモデルでは、両眼の単純セルの反応を両眼間の受容野での感覚プロフィールの線形総和として捉え、また入力したイメージは輝度コントラストに比例すると考える。視差処理の新たなニューラルモデルでは、視差の平均化操作にコントラストのゲインコントロールのメカニズムを組み込む。その主たるモデ

単眼のコントラストは、両眼間のコントラストにおけるゲインコントロール (gain-control) とゲイン増進 (gain-enhancement)を通して両眼の結合の領域の前に標準化される。これは D_{max} 閾値にコントラストが依存することを予測する。

実験ではモデルの広範囲にわたって検証され、DSKLによる2段階の処理過程、眼球間相互作用、さらには第1段階での各空間周波数帯域での EN の過程を通過させると、 D_{min} と D_{max} の両方をよく説明できることが示された。

ルへの影響は各輝度コントラストにおける知覚された奥行が刺激の視差調整の大きさに逆U型関数となると考える。したがって、各刺激の視差における知覚された奥行は輝度コントラストに伴い増大し、さらに知覚された奥行の最大となる視差のピークが輝度コントラストとともに増大すると予測する。

図5は視差情報から知覚奥行量を生み出す gain-control model のモデルのフローチャートである。視差チャンネル (Disparity channel stage)、視差チャンネル平均化段階 (Disparity channel averaging stage) を経て奥行



(Disparity channel averaging stage) を経て奥行コントラストの決定段階 (depth Contrast Decision stage) へと処理される。視差チャンネルは左右眼の単純セル受容野に組み込まれた異なる感度のガボールフィルタで処理され、その後、その出力を両眼総計メカニズムで結合する。各視差チャンネルの受容野は特定の空間周波数に調整されているのでイメージによるチャンネルのコントラ

スト感受性は選択された空間周波数に依存する。このように、コントラストをもつ視差情報はガボールフィルタでの検出値がゲインコントロールでの算出を経て視差チャンネル平均化段階に伝えられ、最後の段階で最大の奥行と当該の奥行の差である知覚された奥行コントラスト値が決定される

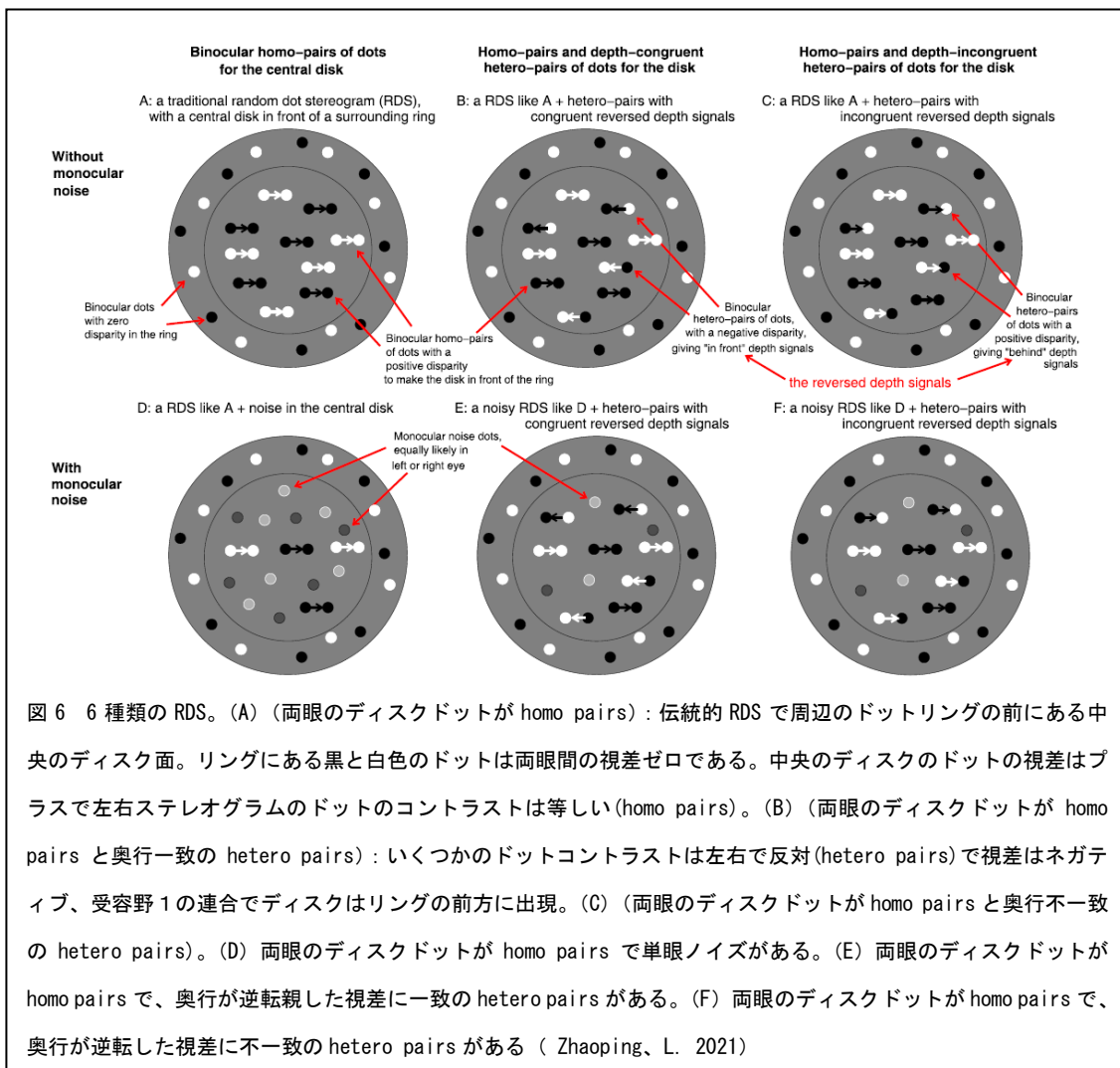
このモデルは Chen et al. (2016) に報告されたデータで検証された。その結果、コントラストと視差の変化に対する知覚された奥行量を 90% レベルでこのモデルが予測することが示された。コントラストの gain control のメカニズムは輝度コントラストの変化に対応して知覚された奥行量を捉え、視差平均化機能は遠近両方の範囲の知覚された奥行と視差の間に逆 U 型の関係になることを説明した。このモデルは、視差から知覚した奥行量に影響する輝度コントラストがどのように働くかを説明したものとなっている。

逆コントラストのランダムドット・ステレオグラムにおける視覚中枢の働きー視覚推論におけるダイナミックなフィードフォワードーフィードバック過程

RDS においては両眼間の視差はコントラストのあるドットに対応し対象の奥行面を決める。もし両眼間でドットコントラストが対応しなければ視差に調整された V1 ニューロンは選んだ視差 (preference) が非選好の視差に高次過程で逆転する。RDS においては両眼間で対

応するドットのコントラストが逆であると、V1 視覚野の視差にチューニングされたニューロンは選んだ視差をあたかも非選好の視差のように高次過程で取り入れ反応するしくみがある。

これまでは、両眼間でコントラスト逆転の RDS では視野の中心で奥行の逆転は起こらないと考えられていた (Cumming, Shapiro, & Parker, 1998; Read & Eagle, 2000; Doi, Tanabe, & Fujita, 2011; Asher & Hibbard, 2018)。そこで、これを検証するために、Zhaoping (2021)



は、図 6 に示す左右眼のステレオグラムのドットのコントラストを 6 通りに変えた RDS を考案して検証した。図に示した 6 種類の RDS は以下の通り。(A) 両眼間のディスクドットが homo pairs で伝統的 RDS 刺激で周辺のドットリングの前にある中央のディスク面を形成する。リングにある黒と白色のドットは両眼間の視差ゼロである。中央のディスクのドットの視差はプラスで左右ステレオグラムのドットのコントラストは等しい(homo pairs)RDS。(B) 両眼のディスクドットが homo pairs と奥行一致の hetero pairs で、いくつかのドットコントラストは左右で反対(hetero pairs)となり視差はネガティブ、受容野 1 の連合で

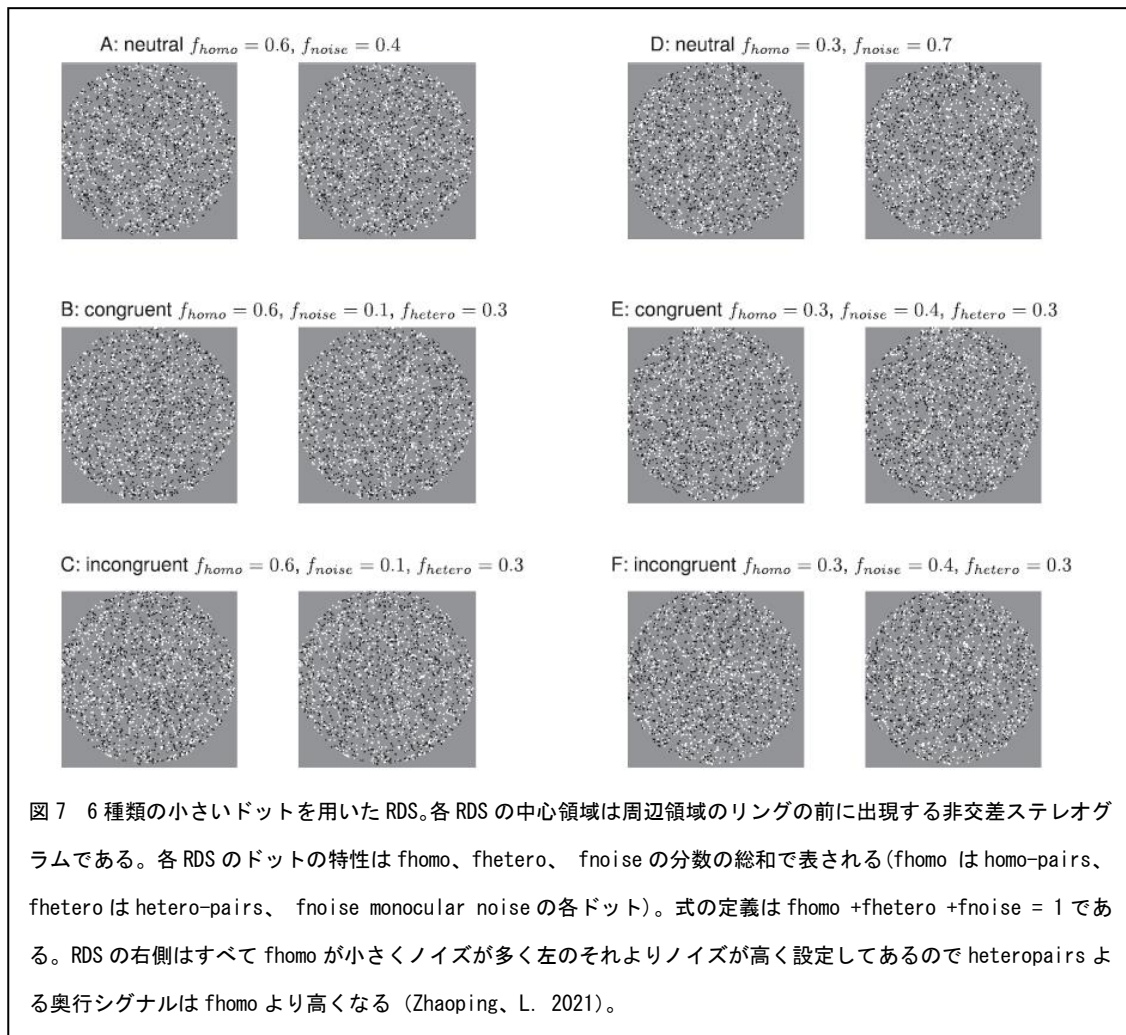
ディスクはリングの前方に出現する RDS。(C) 両眼のディスクドットが homo pairs と奥行不一致の hetero pairs の RDS。(D) 両眼のディスクドットが homo pairs で単眼ノイズがある RDS。(E) 両眼のディスクドットが homo pairs で、奥行が逆転した視差に一致の hetero pairs がある RDS。(F) 両眼のディスクドットが homo pairs で、奥行が逆転した視差に不一致の hetero pairs の RDS である。

表 1 RDS ステレオグラムの特徴一覧

	Fractions f_{homo} , f_{hetero} , and f_{noise} of dots for depth	for reversed-depth	for noise	disparities d_{homo} and d_{hetero} in homo- and hetero-pairs
Noiseless RDSs				
Fig. 1A, a neutral RDS,	$f_{homo} = 1$,	$f_{hetero} = 0$,	$f_{noise} = 0$	no hetero-pairs
Fig. 1B, a congruent RDS,	$f_{homo} < 1$,	$f_{hetero} > 0$,	$f_{noise} = 0$	$d_{homo} = -d_{hetero}$
Fig. 1C, an incongruent RDS,	$f_{homo} < 1$,	$f_{hetero} > 0$,	$f_{noise} = 0$	$d_{homo} = d_{hetero}$
Noisy RDSs				
Fig. 1D, a neutral RDS,	$f_{homo} < 1$,	$f_{hetero} = 0$,	$f_{noise} > 0$	no hetero-pairs
Fig. 1E, a congruent RDS,	$f_{homo} < 1$,	$f_{hetero} > 0$,	$f_{noise} > 0$	$d_{homo} = -d_{hetero}$
Fig. 1F, an incongruent RDS,	$f_{homo} < 1$,	$f_{hetero} > 0$,	$f_{noise} > 0$	$d_{homo} = d_{hetero}$

これら 6 通りの RDS の特徴は表 1 に、また実験に用いられた 6 種類の小さいドットを用いた RDS を図 7 に示した。各 RDS の中心領域は周辺領域のリングの前に出現する非交差ステレオグラムである。各 RDS のドットの特徴は f_{homo} 、 f_{hetero} 、 f_{noise} の分数の総和で表される (f_{homo} は homo-pairs、 f_{hetero} は hetero-pairs、 f_{noise} monocular noise の各ドット)。式の定義は $f_{homo} + f_{hetero} + f_{noise} = 1$ である。RDS の右側はすべて f_{homo} が小さく、しかも左のそれよりノイズが多く設定してあるので heteropairs より奥行シグナルは f_{homo} より高くなる。

実験にあたっては図 8 のような予測仮説を立てて実験した。図の A には、 f_{homo} 条件のドットの RDS のタイプ (一致、中性、不一致) (incongruent, neutral, or congruent) 別に表した視えの奥行の仮説で、効果なし (no effect) は青線分で表示。congruent RDS は the neutral RDS より明瞭に奥行が知覚されることを予測 (pro-effect)、incongruent RDS は明瞭に奥行が知覚されないこと予測 (incongruent RDS)。図の B には、2 つの RDS の同一の f_{homo} (もし 2 つとも同一の non-neutral の f_{hetero} ならば)、実験 1 で視えの奥行が明瞭に比較できると予測された。PN-I、PC-N、また PC-I は RDS が neutral-incongruent (PN-I > 0)、congruent-neutral (PC-N > 0)、また congruent-incongruent (PC-I > 0) 条件の時に RDS の congruent RDS における P 値が高まる。図の C には、ノイズのある RDS で奥行順序を識別するために必要なドットの homo-pairs (f_{homo}) 条件の閾値あるいは最少の分数 (fraction) を示し、実験 2 で測定される。この閾値は、もし pro-effect あれば neutral RDS より congruent になるので低下するはず、また anti-effect があれば neutral RDS より高くなるはずである。



これらを予測して、実験1では、被験者に f_{homo} あるいは f_{hetero} またはcongruentあるいはincongruentの組合せの2つのRDSを継時的に提示し、2つのRDSの奥行面の視えの明瞭度と奥行順序、次に周囲領域に対する中央領域が前か後ろかを個別に答えさせた。実験2では、1つのRDSを2秒間提示し、被験者にRDSの消失後に中心領域と周辺領域の視えの奥行順序をボタンで答えさせた。

実験1の結果、眼には視えない逆奥行のシグナルはhomo-pairsのノーマルな奥行シグナルと混合し視えの奥行を増強した。とくに、両眼間で非対応のノイズをもつ場合のRDSでは、視えの奥行順序はノーマルな奥行シグナルと連合して逆奥行とノーマル奥行のシグナルが奥行順序で一致する場合にはより明瞭に出現した。この増強効果は、同量のノーマルな奥行およびcongruentな奥行のシグナルをもつ2種類のノイズのRDSと比較して明瞭に出現した。実験2では、congruentでreverseな奥行シグナル(homo-pairsの組合せ)は奥行順序を識別するのに必要なノーマルな奥行シグナルの閾値を減じた。また、reverseな奥行シグナルが奥行順序に一致しないincongruentな場合、明瞭に奥行順序を知覚できなかった。

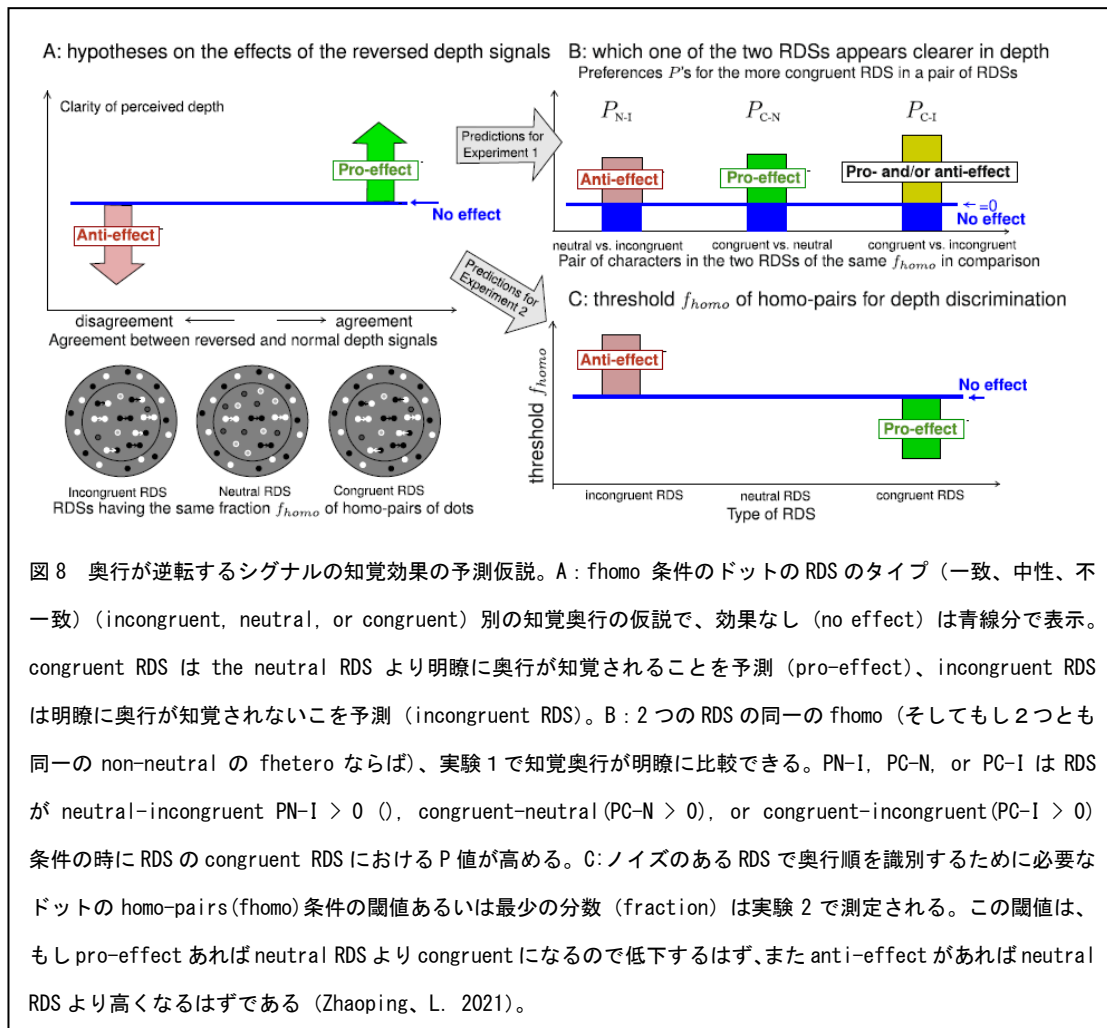


図8 奥行が逆転するシグナルの知覚効果の予測仮説。A: f_{homo} 条件のドットのRDSのタイプ(一致、中性、不一致)(incongruent, neutral, or congruent)別の知覚奥行の仮説で、効果なし(no effect)は青線分で表示。congruent RDSはthe neutral RDSより明瞭に奥行が知覚されることを予測(pro-effect)、incongruent RDSは明瞭に奥行が知覚されないことを予測(incongruent RDS)。B: 2つのRDSの同一の f_{homo} (そしてもし2つとも同一のnon-neutralの f_{hetero} ならば)、実験1で知覚奥行が明瞭に比較できる。 P_{N-I} , P_{C-N} , or P_{C-I} はRDSがneutral-incongruent($P_{N-I} > 0$), congruent-neutral($P_{C-N} > 0$), or congruent-incongruent($P_{C-I} > 0$)条件の時にRDSのcongruent RDSにおけるP値が高める。C: ノイズのあるRDSで奥行順を識別するために必要なドットのhomo-pairs(f_{homo})条件の閾値あるいは最少の分数(fraction)は実験2で測定される。この閾値は、もしpro-effectあればneutral RDSよりcongruentになるので低下するはず、またanti-effectがあればneutral RDSより高くなるはずである(Zhaoping, L. 2021)。

この結果から、noisy RDSにcontrast-reversed dotsが付加されたステレオグラムの中心領域では視えの奥行が増強あるいは減じることが示された。奥行に関する知覚の増強はreverseな奥行シグナル同一の視差が報告されたノーマルな奥行シグナル、そして観察時間に関わりなく生じた。奥行に関する知覚の減少は奥行のシグナルがreversedおよびnormalな条件が相互にincongruentな場合およびRDSの観察時間が短いときに生じた。

この結果は視覚処理の中枢でおきる視覚的推測のためのフィードフォワードな過程(Feedforward-Feedback-Verify-and-reWeight (FFVW))を反映すると考えられ、高次中枢から低次中枢への強力なトップダウン型のフィードバックで、視野の中心領域と周辺領域を二分し、ノイズの曖昧な入力の多義性を無くす役割をする。RDSの観察時間が短くフィードバックが小さいとき、増強と減衰はコントラストが逆のドットからreversedな奥行シグナルをフィードフォワードな、ノーマルな、そして奥行シグナルに追加することによって作動する。十分に観察時間が長い場合、フィードバックはincongruentな、reversedな奥行シグナルを拒否し不完全なreversed奥行シグナルを合成と分析計算によって修正あるいは十全なものにする。

両側シンメトリの多面体における大きさと観察距離の変化によるステレオ形状の恒常性

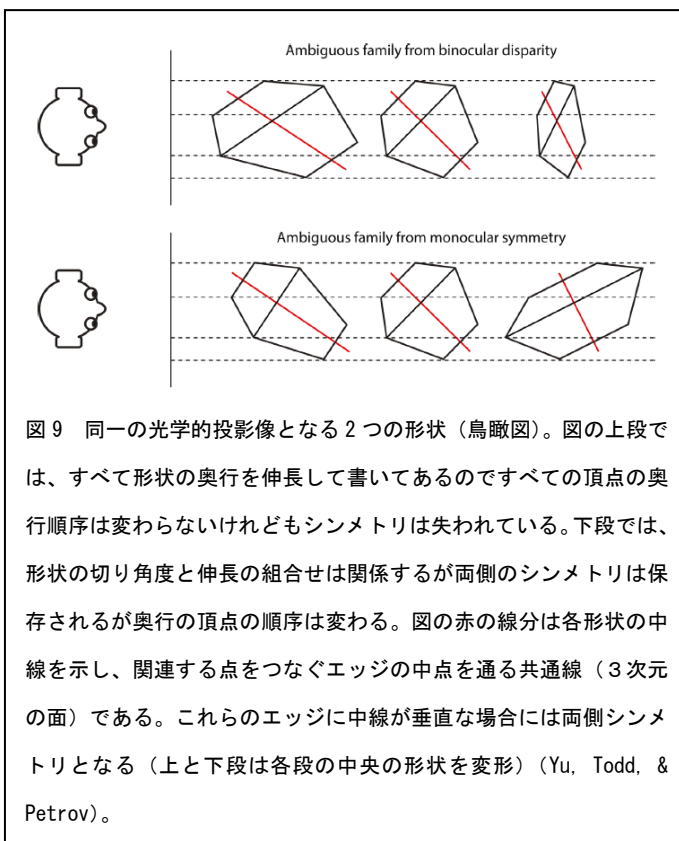
3次元形状の知覚では視刺激が基本的に多義的なことが問題となるので、ここでは2つの可能な情報源である両眼視差と両側シンメトリの知覚的効果について、それらが知覚形状を相互に束縛する程度を3D形状の正確度から分析する。両眼視差によるパターンは3次元の構造のもっとも強力な情報源であるが、しかし観察者は対象の視差のスケール問題を精確には解決できない。というのも、両眼視差による対象の視えの奥行的広がりには観察距離によって拡大あるいは収縮するからである。たとえば、Johnston (1991)によると、楕円形のシリンダーの軸が拡大あるいは収縮するかの判断を円形のシリンダーに関して観察者に求めると、刺激が1mの観察距離にあるときには円形に近いと知覚判断するが、しかし観察距離が0.5mでは対象は拡大して知覚され、2mでは縮小されて知覚される。この観察距離と形状の間の知覚現象は、シリンダー、ピラミッドあるいは二面の角度をもつ形状にみられる (Glennerster, et al. 1996)。

Yu, Todd, & Petrov (2021)の研究によると、図9には、1次元のパラメータの形状群を示しているが、同一の光学的投影像となる2つの形状（鳥瞰図）で、図の上段では、すべて形状の奥行を伸長して書いてあるのですべての頂点の奥行順序は変わらないけれどもシンメトリは失われている。下段では、形状の切り角度と伸長の組合せは関係するが両側のシンメトリは保存されるが奥行の頂点の順序は変わる。図の赤の線分は各形状の中線を示し、関連する点をつなぐエッジの中点を通る共通線（3次元の面）である。これらのエッジに中線が垂直な場合には両側シンメトリとなる（図の上と下段は各段の中央の形状を変形）。

観察者は視差のスケール問題を一義的に解決できないので観察距離が異なると拡大や収縮して視える。

もう一つの本当の形状の情報源には両側のシンメトリがあり、対象の一面は他の半分の形状の構造を補足的に強いる (Francois et al, 2002)。シンメトリあるいはシンメトリをもつ構造からの形状復元はシンメトリが他の側の構造を反復するためにコンピュータビジョンでも利用される。

この研究では両側性シンメトリをもつ多角図形を視線方向に提示し、ステレオ視させてその観察距



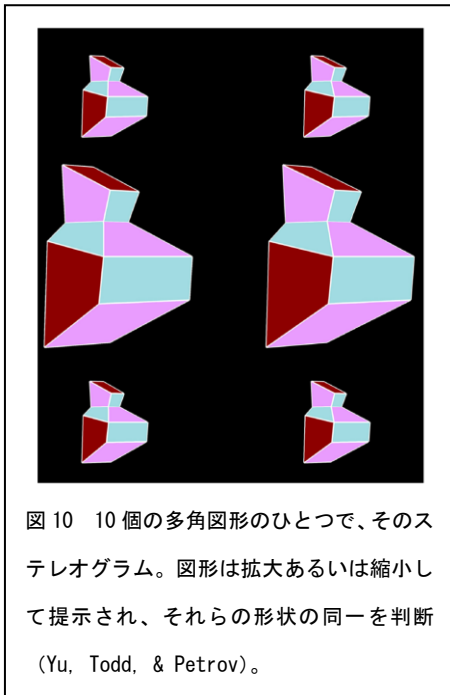


図 10 10 個の多角図形のひとつで、そのステレオグラム。図形は拡大あるいは縮小して提示され、それらの形状の同一を判断 (Yu, Todd, & Petrov)。

離を変えて形状を判断させた。

被験者は著者 3 人、他者 9 人の計 12 人でステレオ画像を LCD のシャッター眼鏡で両眼視させた。刺激パターンは 10 個の多角図形のひとつで、そのステレオグラム。図形は拡大あるいは縮小して提示され、それらの形状の同一を被験者に判断させた (図 10)。実験手続きでは、図 11 に示したように、標準 (テスト) 刺激は常に右側、観察距離 1.5m に提示、比較 (調整) 刺激は常に右側で観察距離 0.7m、1.5m、2.3m の位置にレンダラされた。被験者には比較刺激が視かけ上、標準対刺激と一致するように対象の奥行を拡大あるいは縮小して調整させた。標準刺激は常にシンメトリック、調整する比較刺激は非シンメトリックとした。被験者は 2 つの異なる実験条件、一つは固定した物理的サイズ、もう一つは固定した投影

サイズであった。調整する比較対象は試行毎に異なるサイズのため直接に奥行の広がりできないので標準刺激の奥行 - 広さ (depth-to-width) と比較刺激の比をとりで大きさ比較を標準化した。その比率 (relative aspect ratio, RAR) は、以下の式で示される。

$$S = \frac{Z_{adj}/X_{adj}}{Z_{ref}/X_{ref}}$$

(Z : 奥行軸、X : 幅の大きさ、ref : 標準刺激、adj : 比較刺激)

実験結果、12 人の被験者中 10 人の RAR は、固定した物理的大きさ条件では標準

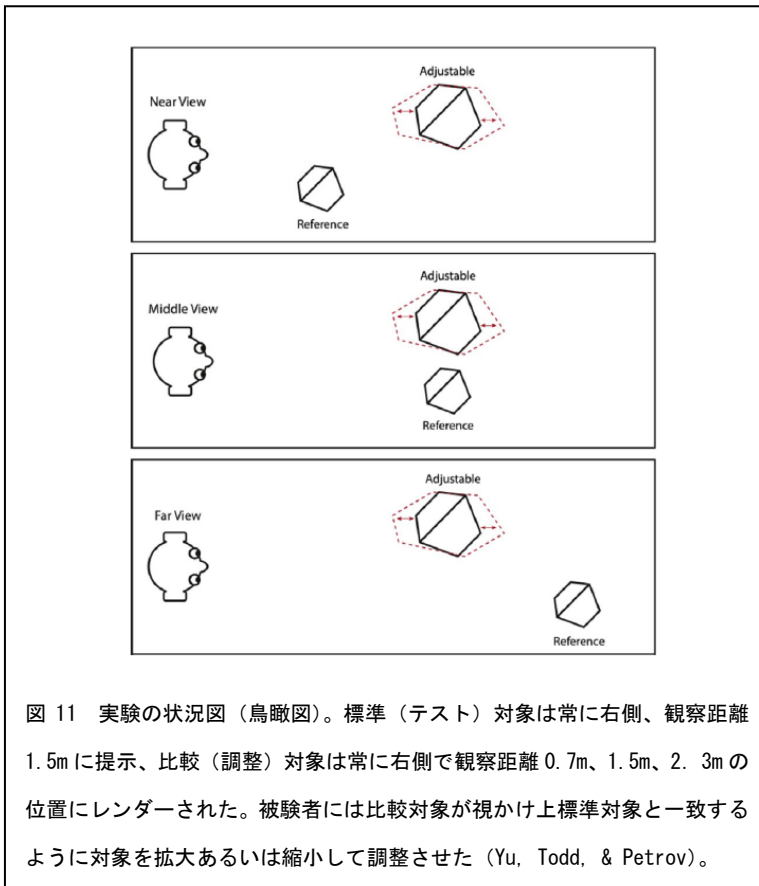


図 11 実験の状況図 (鳥瞰図)。標準 (テスト) 対象は常に右側、観察距離 1.5m に提示、比較 (調整) 対象は常に右側で観察距離 0.7m、1.5m、2.3m の位置にレンダラされた。被験者には比較対象が視かけ上標準対象と一致するように対象を拡大あるいは縮小して調整させた (Yu, Todd, & Petrov)。

刺激の観察距離が小さくなるにつれて距離 0.7m で 0.2、2.3m で -0.5 と有意に漸減したが、

固定した投影大きさ条件では 0.7m で-0.4、2.3m で-0.3 とほぼ平準であった。また、同じ結果をベイズのモデルにしたがって観察予測値を計算すると、ほぼ同等の結果が得られた。また、この結果には個人差があり、とくに観察距離が遠い条件で被験者間の対象の奥行の縮小が 0-65%にわたっていた。10 人の被験者の 9 人までが有意に対象の奥行の縮小を示した。

そこで、実験 1 では、標準刺激をシミュレートした観察距離 70cm で固定しそのサイズは体系的に変えていたが、実験 2 では 2 つのより小さいサイズ 7.8cm(6.35°) と 5.2cm(4.25°) の刺激を加えた。実験 1 と同様に比較刺激はシミュレートした観察距離 70cm、その物理的は 15.6cm(6.3°) で固定した。このようにすると被験者の形状知覚はサイズと距離が変わっても一定を維持するし、予測に反しておおきなエラーを示すと考えられる。

実験 2 の結果、標準刺激の大きさが大になると相対的アスペクト比はリニアの増大を示し、これはベイズの予測モデルに合致した。また、知覚された刺激サイズは対象が拡大あるいは観察距離が大きくなるにつれてその光学的投影の前面は後面より大きく拡大した。この範囲はステレオ視の水平と垂直視差の範囲の増大であった。

これらの実験結果から、妥当な方向にある複雑な形状の知覚は、意外な方向にある対象と同じように観察距離が増すと組織的に圧縮されることが示された。これらの知覚判断が標準および比較刺激の視えの拡大と比較して生じているのではなく、それらの対象は異なるサイズをもつのでその補償の正規化が求められるためと考えられる。3D 形状を簡単なアルゴリズムで正確に計算して再現することは可能でも、人間はそのようなアルゴリズムに従っていないことを結果は示した。

物理的あるいは VR 事態における奥行手がかりの拒否

3次元物体の奥行に関する知覚においては運動視差と両眼視差の手がかりが役立っている。しかし、両手がかりが利いても手がかりのコンフリクトのためにしばしば知覚ミスが起きる。

Hartle & Wilcox(2021)は、ディスプレイ上に提示した手がかりのコンフリクト事態での手がかりの統合を物理的とバーチャルな対象の奥行知覚の比較を通じて分析した。ステレオ方式のディスプレイ事態では、調節要因は 3次元対象に当てられるのではなく、その事態の背景に当てられ、輻輳要因とはコンフリクトになるので、対象の観察者からの距離が不一致となる。調節と輻輳が一致していれば、両眼視差からの手がかりと共に対象の奥行知覚が正確になる(Ono & Comerford, 1977)。運動視差と両眼視差の間にも、手がかりのコンフリクトが生じ、絶対距離と相対距離に不一致をもたらす。

実験では(1)運動視差単独、(2)両眼視差単独、(3)運動視差と両眼視差の手がかり条件でバーチャルと自然(物理)事態で 3次元対象の大きさを測定した。すべての手がかり条件では手がかり情報は刺激の奥行を一致させ、またバーチャル事態は HMD で観察できるようにレンダリング、また自然事態はオートマチックな物理的テスト環境(PTE)を作成した。測

定対象は先頭を切断したピラミッド形状とし、被験者にはピラミッドの下底と上底が前面の横の距離より長いか短いかを弁別させた。

手がかりの統合にはベイズのモデルを(1)線形型、(2)妥当しない、(3)相互組合せのいずれになるかを実験結果で判定し、バーチャルあるいは物理的条件の被験者の最も適合するモデルが3つの手がかり条件のどれかを判定した。

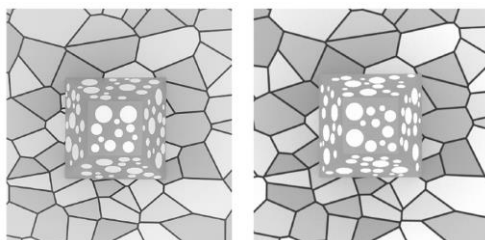


図 12 左は6cmのピラミッドの非編集の画像、右はHMDから右眼位置で見える同様なピラミッドの画像で、それぞれはレンダーして作成 (Hartle & Wilcox 2021)。

実験では8人の大学生としステレオ視力および通常視力をもっていた。刺激は灰色の背景のランダムな白色円からなるテクスチャの正方形のピラミッド(図12)とし、等価なバーチャルと物理的条件のものを作成した。ピラミッドの前面と底面の大きさは6×6および12×12cmの2条件、観察距離は底面で83cm(視角8.27 deg)、またピラミッドの奥行によって前面は4.30から4.64 degに変えた。ピラミッドの底面

から前面の距離(ピラミッドの奥行)を6cmを基準として0.5cmと1.0cmのステップで変えた。被験者のステップサイズは本実験前の試行で設定し、物理的条件のピラミッドのテクスチャ要素とバーチャルの表面の輝度のコントラストは等価に調整された。

物理的ピラミッドの前面を6cmの広さ(幅)に固定して被験者にはそれを基準にしてピラミッドの奥行を被験者ごとに変えて評価させた(図13)。この測定は前面の大きさは測定するのではなくピラミッドの面と奥行間の大きさの差を相対評価するものである。この方法を採用したのはベイズの統計学で知覚する奥行と前面の広さを測るためであり、したがって前面の広さの知覚をマグニチュード方法で別に実施した。

実験の結果、(1)ステレオ視と運動視差の手がかりの奥行知覚の精度については、両眼視差単独あるいは運

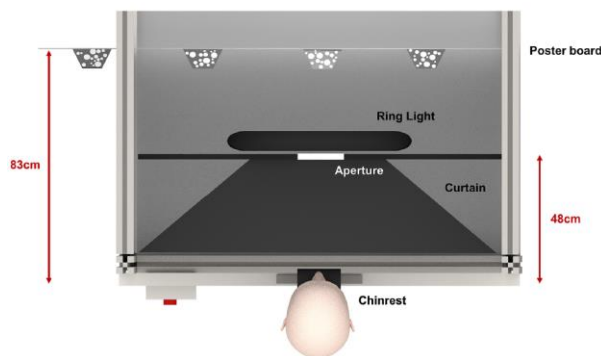


図 13 実験装置 PTE (automated physical test environment)。観察者の83cm前方にポスターボードが設置され、16.7cm平方の開口部が黒色のポスターボードに開けられ右のリング状の明かりと左のカーテンによる囲い間に観察者から48cmの位置に置かれた。この開口部は観察者の視野を、リングライトとポスターボードに取り付けた隣接ピラミッドをブロックして限定した。この黒のカーテンは装置の枠組とし、また余分な明かり、および囲いの中の観察者の視野をブロックする (Hartle & Wilcox 2021)。

動視差と両眼視差の手がかり組合せ条件で奥行知覚の評価に関して差は生じなかった。しかし、運動視差単独ではバーチャルと物理的事態の両方で精度が劣った。この結果が生じたのは、両手がかり単独による奥行知覚精度は輻輳および眼球と運動の自己受容の手がかりに基づく奥行絶対距離知覚の精度によると考えられる。(2)ターゲットの大きさ知覚の精度については、物理的ピラミドの前面の大きさよりバーチャルなそれは過小評価された。ターゲットの前面の知覚された大きさは有意に奥行の範囲を超えることはなく、さらにバーチャルと物理的な刺激の両方において前面の大きさ(広さ)が実の大きさより55から66%も縮減して評価された。知覚した前面の大きさはピラミドの奥行の範囲を有意には変えなかった。知覚した基準となる前面がバーチャルと物理的事態の場合、得られたピラミドの奥行の知覚のPSEはマグニチュード方法によるものと何ら関係しなかった。

実験の結果、運動視差と両眼視差の組合せ条件はバーチャルと物理的事態の大幅な視差範囲で奥行判断を改善しないことが示された。そこで実験データにもっとも適合する奥行手がかり(両眼視差、運動視差およびそれらの結合した手がかり)の統合モデルを決めるために、(1)線形(linear)、(2)拒否(veto)、(3)相関結合(correlated combination)の各モデルを比較した。各被験者の実験による心理測定関数と最適なモデル予測とを比較するために観察者のベイズの心理測定関数を3条件の手がかりについて計算した。手がかりの組合せ条件における被験者モデルと予測モデルの間のベイズ理論による基準値(BIC、Bayesian information criterion)がリニア、拒否あるいは連携のモデル条件ごとにバーチャルと物理的事態で計算された。BIC関数は各モデルの差をパラメータで説明する。どのベイズモデルが最もフィットするかは各手がかり条件のモデルからバーチャルと物理的事態の両方でリニアモデルのBIC関数を差し引いて決定した。

もし、最少のBIC差が10より大であればその最小値のモデルが被験者のパフォーマンスに最適にフィットするとすれば、バーチャル事態では8人の被験者の中7人の手がかり連携条件で最適にフィットしたのは拒否モデルであり、一方他の被験者のデータは連携モデルか拒否モデルに該当した。バーチャル事態でリニアモデルに適する被験者はいなく、また物理的事態では拒否モデルをとる被験者は8人中6人だった。結局、拒否モデルがすべての手がかり観察条件で大多数の被験者にもっとも適合したモデルであった。

これらの結果から、運動視差は両眼視差と組み合わせて働いても両眼視下でも奥行評価を助けないことを示したが、これは手がかり加重ニアモデルの予測に反している。その代わりに、運動視差と両眼視差が使える条件では被験者は運動視差からの情報を拒否し、両眼視差からの情報に基づいて判断した。

実験結果から、確率的モデルでは手がかりがリニアに効果的に働くモデルは物理的あるいはバーチャル事態で適合しないこと、一方、個人間差はあるものの運動視差などのあまり信頼できない手がかりを除いてすべての事態で拒否モデルが妥当することが予測された。

豊富なバーチャルリアリティ環境の方向と距離を判断するための手がかりの結合

観察者が動くときには環境の視方向が変化する。しかし奥行距離知覚と比較すると視覚システムがこの変化を計算するしくみはあまり分かっていない。標準的な手がかりの組合せを設定して被験者がどの程度視方向を予測して判断するかを検証した。視方向を正確に知覚するためには2つのことが要請される。第1は観察者の動きの軌跡で、視覚以外の音、自己受容体性などの諸感覚が統合されて知覚されていなければならない。第2は観察者がこれらの情報をシーンや位置の表象を適切に最新のものに書き換える必要がある

Scarfe & Glennerster (2021) は、2つの目的を持って実験的に検討した。第1の目的は自由に動き回る観察者が視方向を物理的手がかりとテクスチャ手がかりの加重平均で予測できるか。感覚手がかりの組合せは、加重された手がかりの組合せの評価とシーンの統合された表象を最大に正確にすることにあるということをこれは仮定している。第2に距離と方向の判断は相互には別々と考えられるか。

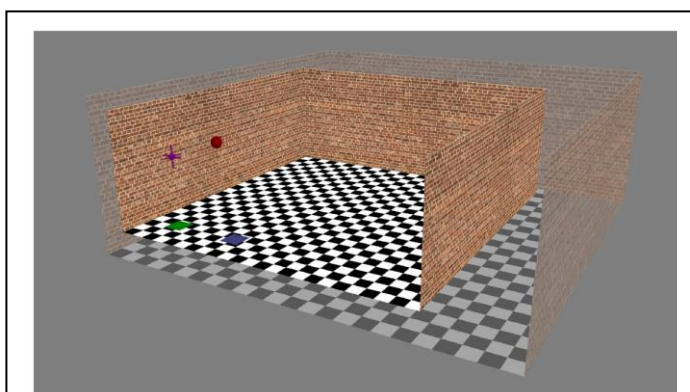


図 14 ルームの壁を取り除いてレンダリングしたバーチャルルームで、緑の四角印に被験者をインターバル1の実験中に立たせて、次に壁を移動させて被験者の近くに設定し青の四角印に位置にインターバル2の実験中に被験者を立たせる。実験では被験者に赤色印の矩形の距離と方向の知覚を判断させた。インターバル1では紫色のマーカーを両眼視におけるキクロピアン位置を示すものとする。実験中、ルームはダイナミックにキクロピアン点の周りで拡大あるいは縮小する。テクスチャによる手がかりと身体的手がかりがコンフリクトするように、ルームが拡大したときは壁とフロアの大きさが変化する前後でキクロピアン点からのスケールが同じように見えるように設定した(Scarfe & Glennerster 2021)。

豊富なバーチャル環境で手がかりの統制を通してこれらの仮説を実験した。被験者にはヘッドマウントを装着し、シミュレートされた部屋で歩行する前に別の部屋で一つの対象の位置を判断し、次に少し時間を開けて対象が最初に期待した視方向にあるかどうかを判断させた。判断と判断の間のインターバルと部屋の大きさを操作し（被験者に見せない）、シーンの再構成のため、に2つの組の手がかりコンフリクト、すなわち視覚情報に依存する条件および自己受容感覚情報に依存する条件を設定した。

図 14 に示したように、はじめはルームの壁を取り除いてレンダリングしたバーチャルルームで、緑の四角印に被験者を実験中に立たせて（インターバル1）、

次に壁を移動させて被験者の近くに設定し青の四角印に位置に被験者を立たせる（インターバル2）。実験では被験者に赤色印の矩形の距離と方向の知覚を判断させた。インターバル1では紫色のマーカーを両眼視におけるキクロピアン位置を示すものとする。実験中、

ルームはダイナミックにキクロピアン点の周りで拡大あるいは縮小する。テクスチャによる手がかりと自己受容の手がかりがコンフリクトするようにルームが拡大したときは、壁とフロアの大きさが変化する前後でキクロピアン点からのス大きさが同じように見えるように設定した。

被験者は 9 人、すべてに HMD を装着しバーチャルシーンを両眼視させた。シーンは垂直 72° 、水平 102° 、両眼の重複は 50° のそれぞれ視野をもつ。HMD の位置はトラッキングシステムでモニターされた。実験に使用したルーム (図 15) で、被験者にはゾーン 1 の位置

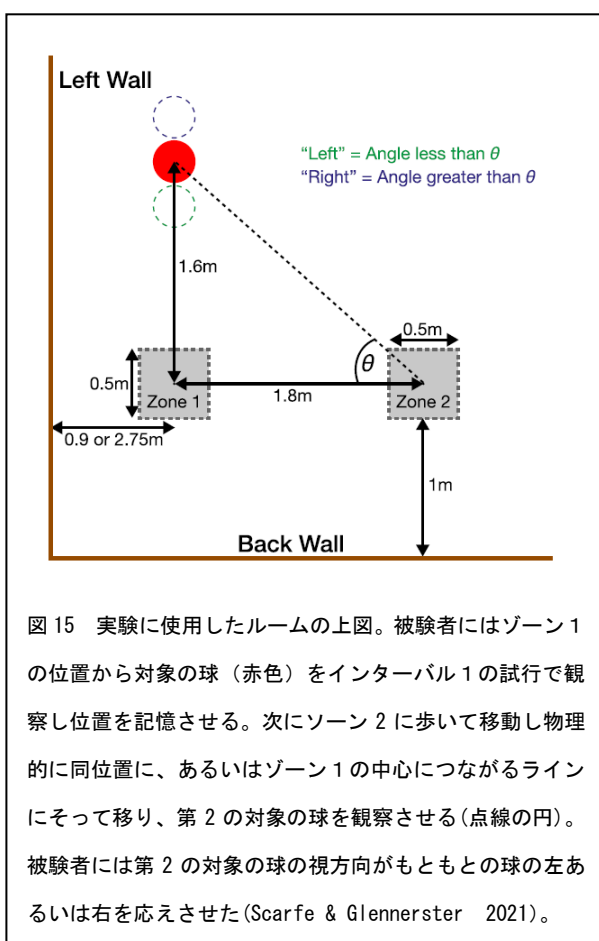


図 15 実験に使用したルームの上図。被験者にはゾーン 1 の位置から対象の球 (赤色) をインターバル 1 の試行で観察し位置を記憶させる。次にゾーン 2 に歩いて移動し物理的に同位置に、あるいはゾーン 1 の中心につながるラインにそって移り、第 2 の対象の球を観察させる (点線の円)。被験者には第 2 の対象の球の視方向がもともとの球の左あるいは右を応えさせた (Scarfe & Glennerster 2021)。

から対象のボール球 (赤色) をはじめに観察し位置を記憶させる (インターバル 1 の試行)。次にゾーン 2 に歩いて移動し物理的に同位置に、あるいはゾーン 1 の中心につながるラインにそって移り、第 2 の対象の球を観察させる (点線の円、インターバル 2 の試行)。被験者の課題として、第 2 の対象のボール球の視方向がもともとの球の左あるいは右のいずれかを応えさせた。インターバル 2 のボール球の大きさはルームの大きさに合わせたので被験者はボールの物理的大きさに基づいて判断できず、また大きさはランダムに変えられた。

実験結果は、加重平均モデルに依拠し、手がかり単独条件、および複数手がかり条件ごとに視方向と知覚距離が各被験者について計算されグラフ化された。その結果、累積ガウス関数は Matlab で計算し、最大の尤度によって観察者のデータに平均値と関数のスロープが自由パラメータ

でフィットさせた。PSE (累積関数の平均およびフィットした関数のスロープ) は 95% の信頼区間 (1000 個のブートストラップ) で評価された。関数のスロープの逆数でだした累積ガウス関数の SD 値は観察者の手がかりの効果を決めるのに使用できる。

全体的に 2 つの手がかりを変えると、9 人中 7 人の被験者は視方向を過小評価、2 人は過大評価傾向にあった。そこでこのモデルに依拠してテクスチャ手がかりベースと物理的ベースの加重および両手がかりの共変の各条件にもとづいて視方向と知覚距離について予測した。その結果、視方向と知覚距離についてはリニアモデルが予測値と観察値がテクスチャ条件でルームの大きさに関わらずに最小自乗法によって有意にフィットすることがしめ

された。また、対象までの視方向と知覚距離の評価はそれぞれ別々なので相互に一致しない。そこで、モデルの比較を4つのモデル、すなわちモデル1は距離と方向間の異なる加重とバイアスを認める(4個のフリーパラメータ)、モデル2は異なる手がかりの加重を認めるがバイアスを一定の要素(3個のフリーパラメータ)に限る、モデル3は異なる手がかりバイアスを認めるが加重するものを限る(3個のフリーパラメータ)、それとモデル4は加重とバイアスを一定のものに限る(2個のフリーパラメータ)で実施した。その結果、モデル1はモデル2より90%、モデル3より80%、モデル4より100%の適合を示した。

結局、2つの手がかりの1つを固定、他を変えた条件の奥行知覚感度は両手がかりを変えた条件に較べて予測が正確なことが示された。視方向の判断とその知覚距離を比較すると方向と距離の知覚は相互に異なることも示された。

傾斜面における視差の不連続の弁別

両眼視差は3次元構造シーン、とくに面と面の間にも不連続があっても識別可能である。Goutcher & Wilcox(2021)は、面の不連続知覚の与える要因を分析検討した。連続しない視差がある場合、奥行差を弁別するのが困難である(Cammack & Harris, 2016)。このような効果には多くの要因が絡むが、ゲシュタルト原理も知覚的奥行量を軽減するように働く(Deas & Wilcox, 2014, 2015)し、また視差に規定された不連続な奥行は不連続が同一の面かあるいは反対の面かによって増大、あるいは減少する(Goutcher et al, 2018)。これは視差の差を符号化するメカニズムのもつ特性によると考えられる。

Goutcher & Wilcox(2021)は、視差で規定された不連続のある面においてステレオ視力が隣接する面の構造にどのように影響されるか、また、その神経生理過程を検討した。実験では不連続(溝)のどちらかの側が反対方向に傾斜している場合のステレオ視力の閾値

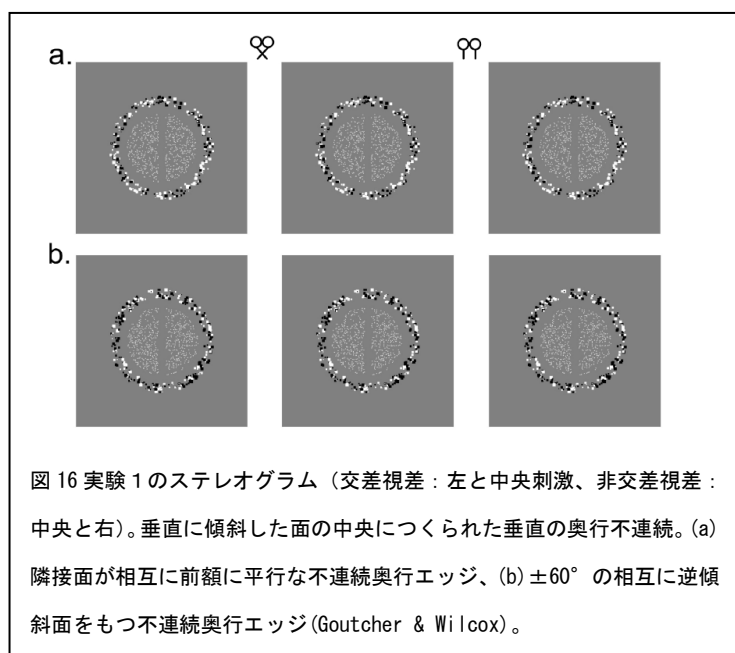


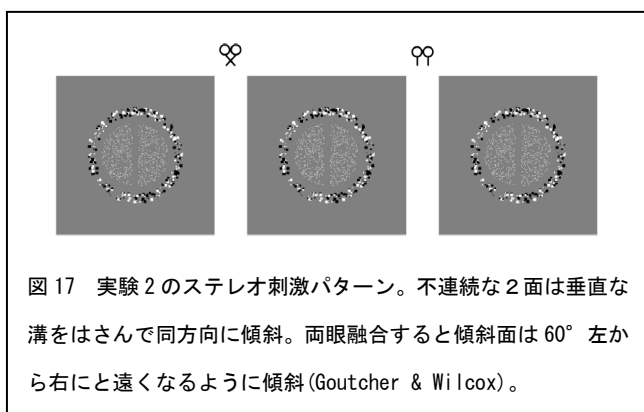
図 16 実験 1 のステレオグラム (交差視差 : 左と中央刺激、非交差視差 : 中央と右)。垂直に傾斜した面の中央につくられた垂直の奥行不連続。(a) 隣接面が相互に前額に平行な不連続奥行エッジ、(b) $\pm 60^\circ$ の相互に逆傾斜面をもつ不連続奥行エッジ(Goutcher & Wilcox)。

が損なわれるか否かがしらべられた。実験に使用したステレオグラムは、図 16 に示したように、ランダムドットで構成され、水平あるいは垂直な反対方向に傾斜する面 ($\pm 60^\circ$ 、 $\pm 30^\circ$ 、 0° の 3 段階)の中央に空白の溝(6.6、13.2、26.4arcmin の 3 段階)があり不連続となる。被験者(7人)には Wheatstone 型のステレオスコープで RDS を観察し左あるいは右端のエッジの奥行が観察者に近く見えるための閾

値を視差を段階的に変化させ（9段階）、恒常法で測定した。

実験結果、ステレオ視力の弁別閾は、面方向が水平で溝の大きさが6.6、10.7、13.2 arcminの場合9.5、10.7、9.8 arcsecとなり、傾斜面が大きいと増大することが示された。実験1の結果は、両眼視の面が傾斜した面に不連続があるとステレオ視力が損なわれることを示した。そこで、この効果がローカルな絶対視差による傾斜面によるか否かを、溝に隣接する傾斜面が同方向の事態で、その弁別閾値を測定した。もし傾斜面のステレオ視力に対する影響が絶対視差の知覚に不安定を増大したために起きているならば、傾斜面の条件を変えても閾値の上昇になんら影響しないと考えられ実験2を試行した。

実験2のステレオパターンは、図17に示したように、実験1に類似するが不連続な2面

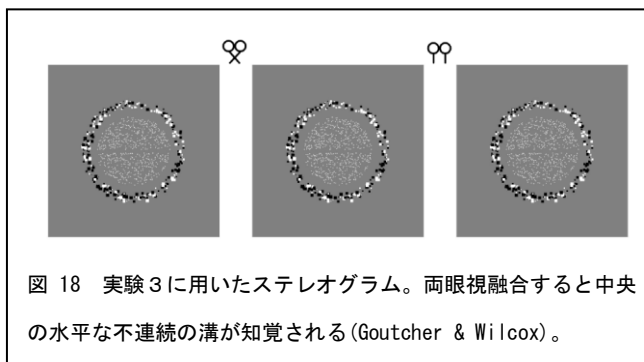


は垂直な溝をはさんで同方向に傾斜させ、両眼融合すると傾斜面は±60°、±30°、0°で左から右にと遠くなるように傾斜、また溝の大きさを3段階(6.6、13.2、26.4 arcmin)に設定した。被験者には視差を段階的に変化し右あるいは左端のエッジが近いか遠いかを恒常法で測定した。

実験2の結果、面の傾斜は不連続な溝の弁別を悪くする効果をもつこと

が実験1と同様に示された。この効果を不連続面が傾斜面に直交する場合についても実験3(図18)で検討した。

実験3では、傾斜面は6通り(±60°、±30° and 0°)で不連続の溝(6.6、13.2 arcmin)は水平に設定され、被験者にはトップあるいはボトムいずれが近く見えるか、その弁別域値を視差を段階的に変えて恒常法で求めた。実験3の結果、不連続面の奥行の弁別に対する傾斜面のステレオ視力におよぼす効果は減少し、ローカルな絶対視差の知覚不安定の増大によっては説明できないことが示された。これは相対的な視差の符号化が傾斜面事態のステレオ視力の減損に関係し、不連続面の相対的奥行の判断には、相対的視差の変化を処理するメカニズムが関与していると考えられる。



相対視差がステレオ視力に及ぼす影響を相対視差の変化である2階微分におけるゼロ交差を求める不連続の弁別モデルが提案された。そのモデルは、図19に示したように、実験1-3で用いられた刺激の位置に対する相対視差および絶対視差の1次元軸の変化で示される。それによると、

面の位置で計算された絶対視差値の1次的変化（前額平行に隣接する面（黒表示）不連続をもつ事態）および60°傾斜面（実験1の場合、赤表示）が図(a)に、aと同一の事態での相対視差の変化が図の(b)に、同一の事態の相対視差2階微分値の変化（前額平行面はゼロ交差し、60°傾斜面でゼロ交差はなし）を図の(c)にそれぞれ示し、図の(d)には実験2と

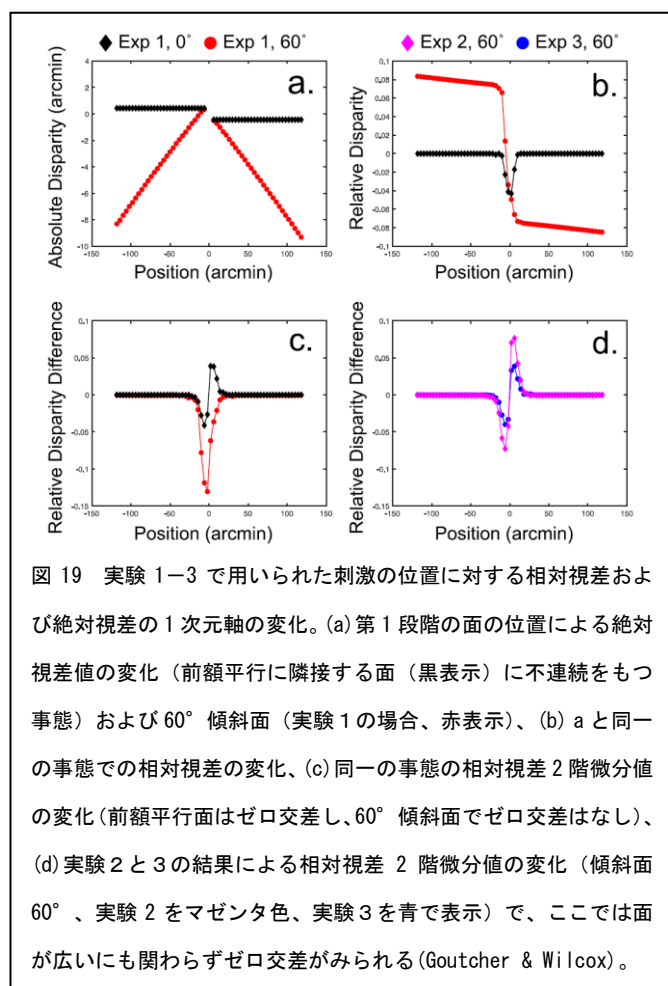


図 19 実験 1-3 で用いられた刺激の位置に対する相対視差および絶対視差の1次元軸の変化。(a)第1段階の面の位置による絶対視差値の変化（前額平行に隣接する面（黒表示）に不連続をもつ事態）および60°傾斜面（実験1の場合、赤表示）、(b) aと同一の事態での相対視差の変化、(c)同一の事態の相対視差2階微分値の変化（前額平行面はゼロ交差し、60°傾斜面でゼロ交差はなし）、(d)実験2と3の結果による相対視差2階微分値の変化（傾斜面60°、実験2をマゼンタ色、実験3を青で表示）で、ここでは面が広いにも関わらずゼロ交差がみられる(Goutcher & Wilcox)。

3の結果による相対視差の2階微分値の変化（傾斜面60°、実験2をマゼンタ色、実験3を青で表示）が示され、ここでは面が広いにも関わらずゼロ交差がみられる。ここには、前額平行面と傾斜面の間の相対的視差の変化の違いが明瞭にみられる。とくに、不連続面の等価な視差において前額平行面は2階微分値するとゼロ交差が生起するが、対抗する傾斜面ではそれが生じないことが注目される。また、ゼロ交差は同一の傾斜面と傾斜にたいして直角な不連続事態でも生起する。これを踏まえて、この実験結果がガボールフィルターの奇関数をもつ視差の2階微分差に相関するモデルに当てはまる。

これらのことから、不連続の感受性はローカルな絶対視差と相対視差の両方の処理過程が関係し、相対視差のローカルな差の符号化に基

づいた不連続面の弁別モデルで説明できると考えられる。

パヌムの融合範囲と輻輳ホロプター

輻輳運動は遠い注視点から近い注視点にかわりと眼球は内転し、逆に近い注視点から遠くに移ると外転する。パヌムの融合領域は注視点に近接した場合には狭く、離心が大きいと大きくなる。Harrold & Grove(2021)は、輻輳ホロプターは注視点に近いと狭く、離心が大きいと広くなると考えた。ここでは、輻輳ホロプターが水平と垂直線にそっての変化をしらべるために、パヌムの融合領域が離心につれて増大するか否かを実験1で確かめた。

しかし、水平の視差ホロプターは両眼の中心（nodal point）を通るけれども、各眼の垂直な軌跡は両眼の回転の中心を通るので2組の軌跡は注視点から互いに逸れる。これらの

差は小さいので、輻輳ホロプターは水平ホロプターに類似し離心が小さければ輻輳ホロプターは狭く、離心が大きいと輻輳ホロプターは広くなる。そこで実験2では実験1と対象の位置を同じにしてパヌムの融合範囲を輻輳ホロプターとの関係をしらべた。

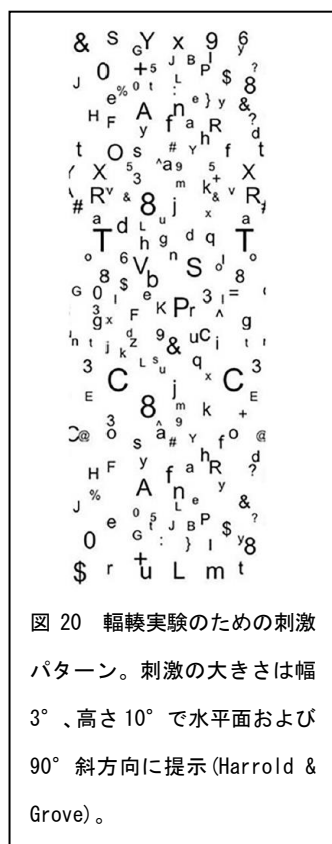


図 20 輻輳実験のための刺激パターン。刺激の大きさは幅 3°、高さ 10° で水平面および 90° 斜方向に提示 (Harrold & Grove)。

実験1では、被験者(9人)にミラー型のステレオスコープを用いて刺激を、周囲のフレームを見えないように、またチンレストなど頭を固定して提示した。光学的および輻輳距離は 65cm で 1 ピクセルの大きさは 1.5arcmin とした。輻輳を誘う刺激はランダムな文字とシンボルでその位置もランダムに配列した(図 20)。刺激パターンは水平面に垂直方向に設置し、また垂直に 90° 回転した。これら刺激要素は注視点に最も近傍のエッジが左右 5 段階の離心(±1、3、5、7、10°)に、また注視点の上下もおなじく 5 段階ずつの離心に提示した。輻輳ホロプターを測定するために視差の範囲を 3、6、9、12、15 arc min に交差、非交差ともに設定し、各離心条件に提示した(図 21)。眼球輻輳運動の測定は中心の注意刺激のノニウスラインを上下で一直線に配列するように被験者に求めることによった。もし、眼球が提示面からノニウスラインの動きによってはずれれば、それを被験者にわかるように設定した。眼球の輻輳運動は恒常法で測定された。被験者には、はじめに注視点

点を提示、そしてノニウスラインを真っ直ぐにすることを求められ、そのあとでノニウス

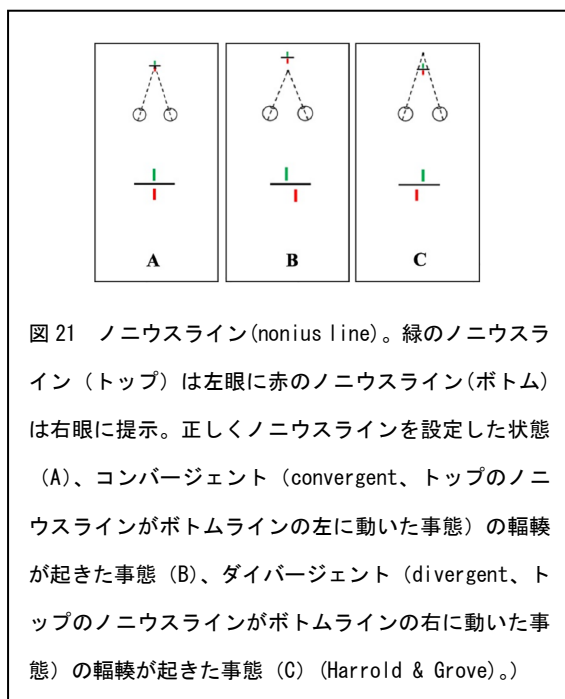


図 21 ノニウスライン(nonius line)。緑のノニウスライン(トップ)は左眼に赤のノニウスライン(ボトム)は右眼に提示。正しくノニウスラインを設定した状態(A)、コンバージェント(convergent、トップのノニウスラインがボトムラインの左に動いた事象)の輻輳が起きた事象(B)、ダイバージェント(divergent、トップのノニウスラインがボトムラインの右に動いた事象)の輻輳が起きた事象(C) (Harrold & Grove)。

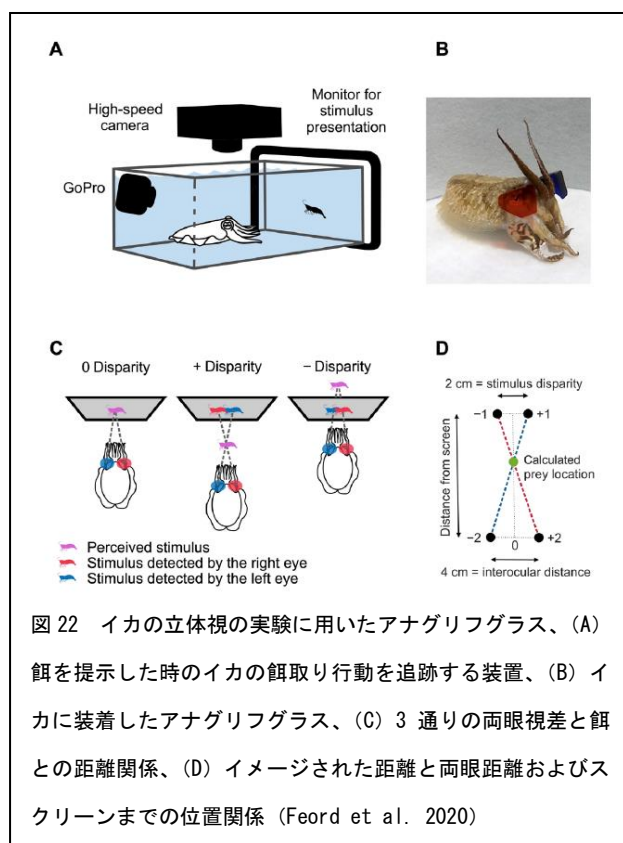
ラインが消失し決められた離心位置にあらかじめ決められた視差でテクスチャイメージが 500ms 提示された。被験者にはテクスチャイメージに眼球を動かしたり無視したりしないように教示し、その後にノニウスラインが 200ms 再提示され、それからノニウスラインとテクスチャパッチが消失させた。被験者には、ノニウスラインのトップが左あるいは右に、さらにはトップとボトムが一直線に位置して見えるかを答えさせた。各離心位置で各視差を 20 回測定した。交差視差条件ではコンバージェントが予測され、被験者の報告はノニウスラインのトップがボトムラインの左に、非交差条件ではそれが右になると予測される。

実験の結果、被験者の輻輳眼球運動の視差範囲は注視点から離心点が大きくなると増大すると予測されたが、実験の結果は水平と垂直の両注視面で輻輳ホロプターは離心距離あるいは高さ距離が増しても大きくなり、比較的安定していることが示された。とくに、水平プレーンにおける輻輳ホロプターの中点はスクリーンの中心にあるように見え、ホロプターが湾曲していないことを示した。これはパヌムの融合領域より輻輳ホロプターが融合領域より固定した領域をもつと考えられる。

そこで実験2では、輻輳ホロプターとパヌムの領域間の関係を同一の離心と高さ距離で測定した。そのために、斜方向のプレーンで注視点の上・下の位置にあるパヌムの融合領域を測定した。融合限界を測定のために左右眼に楕円 (60 × 15 arc min) を提示した。融合限界は水平と垂直の子午線 (±1, 3, 5, 7 & 10°) にターゲットを提示し、恒常法で測定した。被験者は注視刺激の注視点を維持して観察するように教示された。

実験2の結果、水平のプレーンにおいて輻輳ホロプターはパヌムの融合範囲内に中心的に位置し、垂直のプレーンにおいて輻輳ホロプターは対応する融合範囲よりやや傾いた。

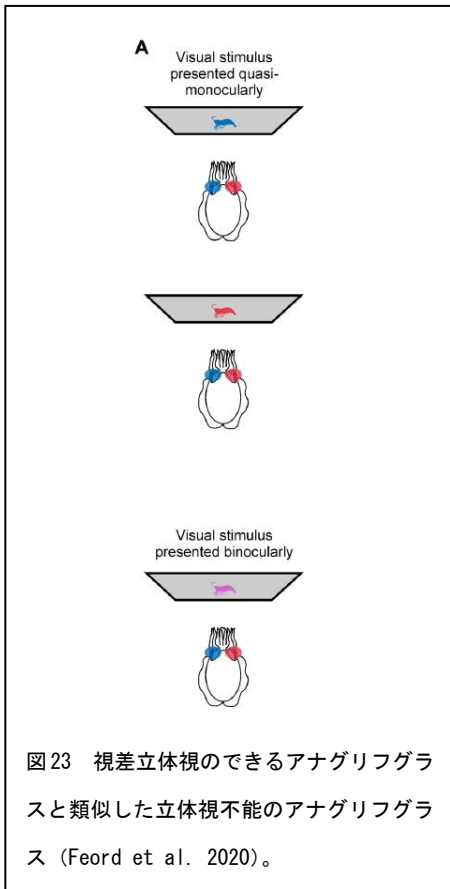
2つの実験を通して、輻輳ホロプターは離心距離で変わらず、また水平プレーンのパヌムの融合範囲の中心に重なり、対応する融合範囲から傾いていないことが示された。これらの結果は水平方向の輻輳運動の初動が中心と周辺の間の変化で起こるのではないことを示した。眼球の輻輳運動が視差に対する動きで直接観察されることから、この運動は融合のメカニズムを解析するために有効に利用できると思われる。



イカの両眼立体視

頭足類のイカを対象にアナグリフグラスを装着させて両眼立体視可能か否かが、Feord et al. (2020)によって実験された。イカを研究対象にしたのは、(1)頭足類の2つの眼がカメラタイプで脊椎動物と同じような機能を示し、角膜、レンズ、ガラス体、それに網膜を供えていること、(2)視覚情報の統御と処理がこの立体視の計算とアルゴリズムを解析する能力をもつこと、(3)このようなステレオ立体視のしくみが人間とは異なるイカの脳に備わるか否かをしらべることが可能、などが根拠地として挙げられる。

Nityananda et al (2017)はカマキリを対象にステレオ視の研究をしたが、



その時使われたのがアナグリフ立体鏡であった。イカには両眼の輻輳によるイメージのオーバーラップがあり両眼のしくみを利用し餌を捕るための適切な奥行距離を得ていると考えられる。したがって、ここでは、イカを対象に選択してステレオ視のしくみが明らかにされた。

実験では、図 22 に示したアナグリフ立体鏡をイカに装着し、餌を正確に獲れるかを試した。視差は-1 から 3cm まで変えられた結果、これらの視差に応じて反応し、視差 0 条件で餌までの距離知覚が有意に正確なことが示された。これはイカが両眼視差を手がかりにして奥行距離を知覚できることを示した。また、視差の変化によって触覚先端の餌までの到達距離も変化することも確認された。さらに餌であるエビが歩いたり泳いだりしている 3 次元刺激でも対応できた。

餌獲りに両眼視が機能的なことを分析するために完全なステレオ立体視と擬似的なステレオ視条件（実際は単眼視、quasi-monocular）で図 23 のよう

に実験がなされた。その結果、餌に狙いを付ける位置によっては、擬似的な両眼視では餌に狙いを付け、歩き、最後の一撃をするまでにステレオ視条件より長い時間がかかることが有意に示された。

さらに、イカのステレオ視でステレオグラムをコラレート（左右眼のドットコントラストが対応し正常な視差をもつ）、アンチコラレート（視差が対応するがドットコントラストが反対）、非コラレート（対応する視差なし）の 3 通りに設定し、餌に対する反応をしらべられた。その結果、11 個体試行したイカのなかで 6 個体がコラレートとアンチコラレートステレオグラムで餌を成功裏に獲ったが、コラレートステレオグラムでは失敗した。

ステレオ視には両眼の輻輳・開散が必要になる。被験体の両眼の動きを解析した結果、餌反応の初期には両眼間の輻輳が少なく有意に個別に動いていたが、餌取りの近くでは差がなくなった。

実験の結果、イカは両眼視差を手がかりとして、餌までの距離と時間を縮小し餌獲り（ハンティング）に効率的に利用していると考えられる。

両眼視差と運動要因の 3 次元手がかりの時空的統合

二つの基本的手がかり、すなわち両眼間の速度差および両眼視差は、基本的には 3 次元運動の知覚を担う。これらの手がかりは 3 次元の運動の手がかりに関わっているが、手が

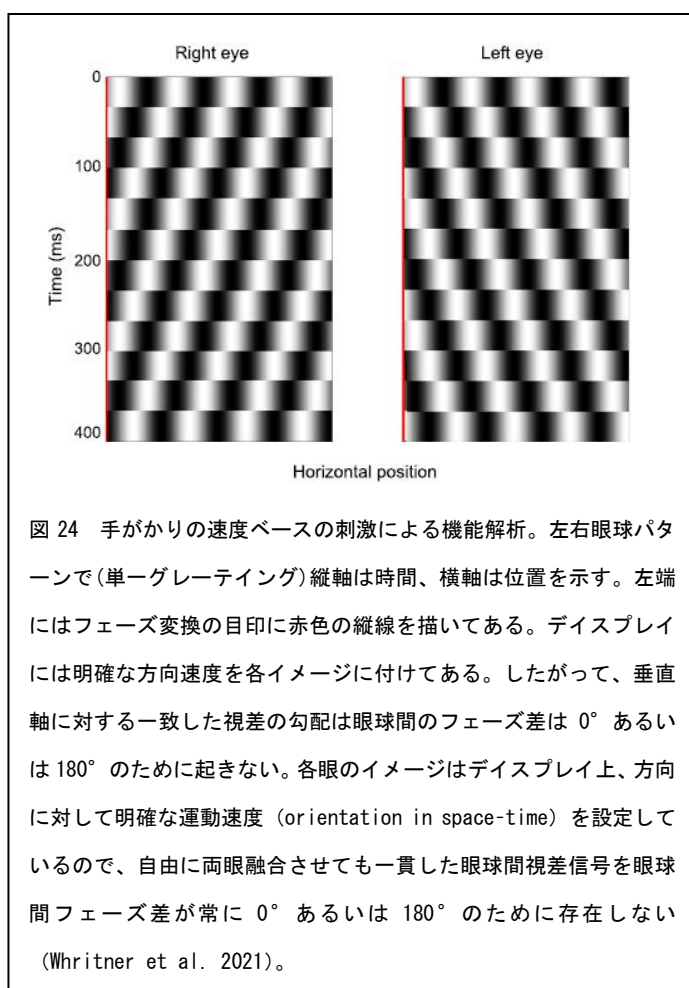
かりが交叉しているために手がかりの時空的構造が明確ではない。前者の3D運動による手がかりは網膜に投影される対象の両眼間速度差であり、後者は両眼間の視差で運動に伴う変化をさす。したがって、この二つの手がかりの時間に伴う両眼間の刺激位置の統合に基づく3D知覚の奥行の弁別判断をしらべる必要がある。

これまでは、これらの2つの手がかりそれぞれのしくみで奥行を弁別し、刺激の辺縁および中心程度では速度ベースの情報が強く、視差ベースの情報は中心窩と傍中心窩の位置でゆっくりした速度で優勢となり、これらの情報を独自に加重し総合すると考えられていた(Nefs et al. 2010)。しかし例えば、速いボールをキャッチする場合は速度ベースに多く依存し、手術の細い糸を通すような場合には視差ベースの過程に依存すると考えられる。

そこで、Whitner et al. (2021)は、その2つの手がかり機能を個別に明らかにするために眼球運動の速度差の特性をもとに、個々の手がかりを分離する手法をとった。速度ベースによる感覚は時間が短い場合急激に増大し、観察時間が長くなると刺激を強化するほぼ十分の段階になると仮定し、一方、視差ベース過程は観察時間が長い場合に信号が蓄積されると仮定される。この観察時間における漸進的依存過程は確率論的総和から期待できる。すなわち、感受後ノイズ信号の統合は時間経過に伴う改善を反映するが、ノイズの

無い事態での統合には及ばない。

そこで、Whitner et al. (2021)は速度ベースと視差ベースの手がかりの時間的統合のメカニズムを純粹に手がかりを分離して直接測定する実験を試みた。被験者は4人でそのうち3人は筆者たちであった。刺激はプロジェクターを用いてステレオ視できるように提示した。被験者は3Dグラスを装着しスクリーンの前のチンレストに顎を載せ観察した。眼球間フェーズの考え方(速度ベースの手がかり分析)は図24に示した。左右眼球パターン(単一グレーティング)で縦軸は時間、横軸は位置を示し、左端にはフェーズ変換の目印に赤色の縦線を描いてある。ディスプレイには刺激の運動方向が見えるように明確な速度を各イメージに付けてある。したがって、



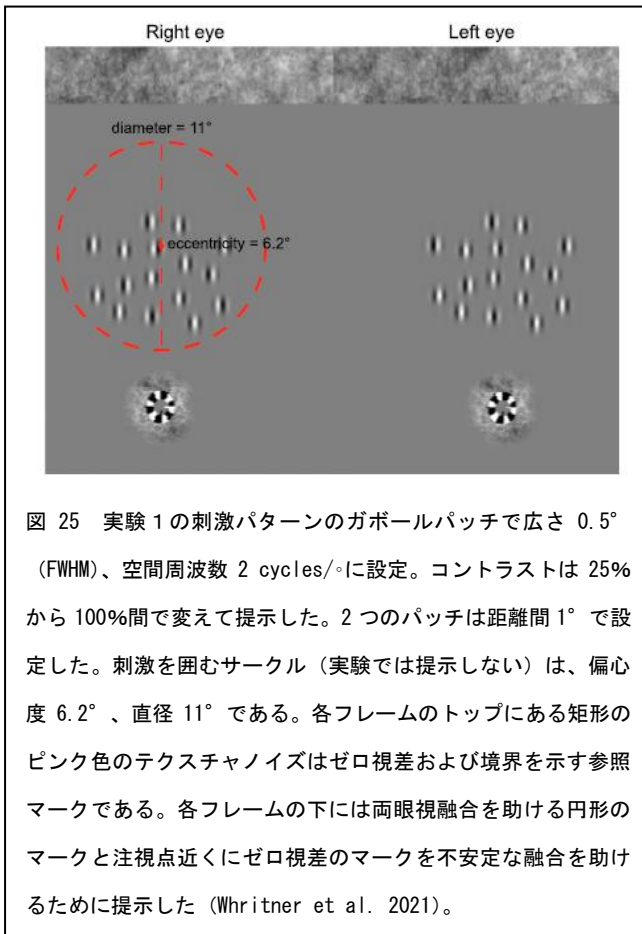


図 25 実験 1 の刺激パターンのガボールパッチで広さ 0.5° (FWHM)、空間周波数 2 cycles/° に設定。コントラストは 25% から 100% 間を変えて提示した。2 つのパッチは距離間 1° で設定した。刺激を囲むサークル (実験では提示しない) は、偏心度 6.2° 、直径 11° である。各フレームのトップにある矩形のピンク色のテクスチャノイズはゼロ視差および境界を示す参照マークである。各フレームの下には両眼視融合を助ける円形のマークと注視点近くにゼロ視差のマークを不安定な融合を助けるために提示した (Whitner et al. 2021)。

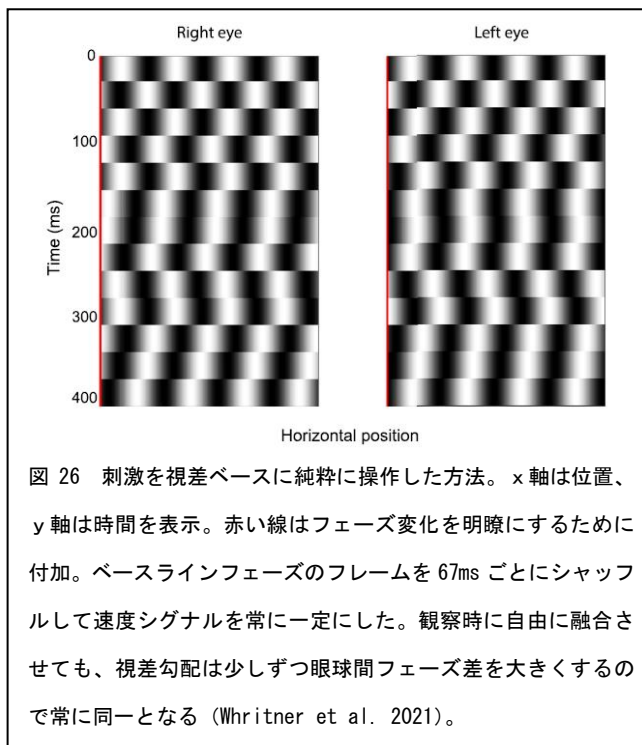


図 26 刺激を視差ベースに純粹に操作した方法。x 軸は位置、y 軸は時間を表示。赤い線はフェーズ変化を明瞭にするために付加。ベースラインフェーズのフレームを 67ms ごとにシャッフルして速度シグナルを常に一定にした。観察時に自由に融合させても、視差勾配は少しずつ眼球間フェーズ差を大きくするので常に同一となる (Whitner et al. 2021)。

垂直軸に対する一致した視差の勾配は眼球間のフェーズ差は 0° あるいは 180° のために起きない。「空間-時間」に関して各眼のイメージをディスプレイの方向に対して明確な運動速度 (orientation in space-time) を設定しているため、自由に両眼融合させても一貫して眼球間視差信号を眼球間フェーズ差が常に 0° あるいは 180° のために存在しない。ノイズを縮小するために眼球間フェーズ差を 16 個のガボールパッチ (幅 0.5° 、 2 サイクル/° 、 25% ミカエルソンコントラスト) とした。図 25 にはその刺激を例示した。この刺激は、4 フレームごとに書き換えられたので、単眼の各要素は $1/4$ の波長が反対方向にシフトし、観察者の後方にトンネルのような運動する知覚が生まれた。被験者はすべて 6% のコヒーレンスレベル (coherence level) の速度ベースの刺激条件で実験を試行した。

一方、視差ベースの刺激条件では 3D の方向は両眼視差の変化のみで、単眼速度間没有关系が存在しない事態を設定した。眼球間の速度ベースの手がかりを阻止するために各フレームのベースラインのガボールフェーズをランダムに設定し純粹に視差変化を生むように設定した。図 26 にあるように、ベースラインフェーズのフレームを 67ms ごとにシャッフルして速度シグナルを常に一定にし、観察時に自由に両眼融合させても、視差勾配は少しずつ眼球間フェーズ差

を大きくするので常に同一となるように設定した。

実験では、刺激持続時間を変えて3Dの弁別課題の間での正確な反応を測定した。速度ベース条件では試行は17から750msの間で、また視差条件では67から1067msの間で67ms

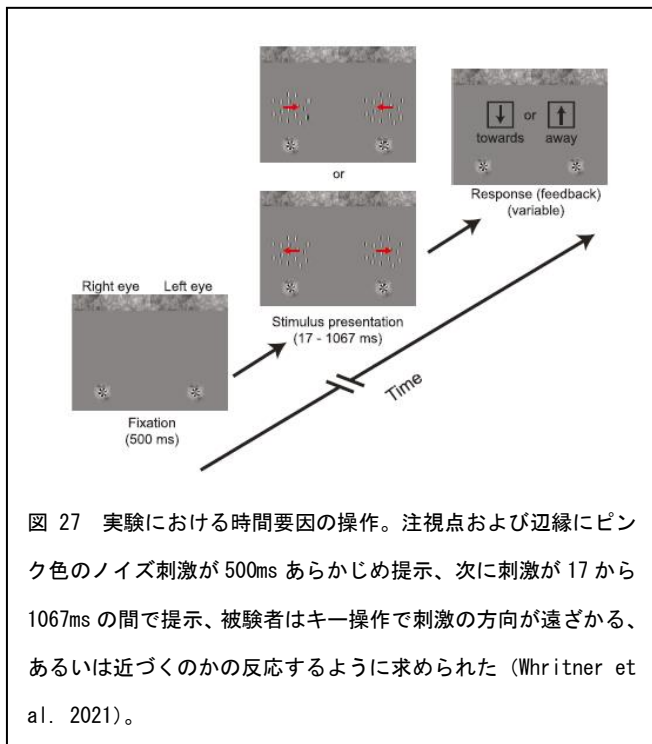


図 27 実験における時間要因の操作。注視点および辺縁にピンク色のノイズ刺激が500ms あらかじめ提示、次に刺激が17から1067ms の間で提示、被験者はキー操作で刺激の方向が遠ざかる、あるいは近づくのかの反応するように求められた (Whitner et al. 2021)。

ごとに線形に増大させてそれぞれ実施し、被験者はキー操作で刺激の方向が遠ざかる、あるいは近づくのかの反応するように求められた(図 27)。

実験 2 では、実験 1 のように手がかり分離の手続きを実施し、空白部分の操作を左右眼で異なる大きさセクター (α) を設定して、図 28 にあるように、(A) $\alpha = 180^\circ$; (B) $\alpha = 90^\circ$; (C) $\alpha = 45^\circ$; or (D) $\alpha = 22.5^\circ$

(大きさ表示は実験では無表示) とした。ただしセクター領域が大きい場合には、空白部分はエレメントで埋められた。実験 2 でも被験者は、実験 1 と同様に、速度ベースあるいは視差ベース条件の刺激を観察し、

刺激が前方あるいは後方のいずれかをキーで反応した。

手がかり統合の時間要因に関する実験 1 の結果、速度ベース条件での手がかり感度は200ms までに飽和し、一方、視差ベース手がかり条件での感度は持続時間とともに増大を示

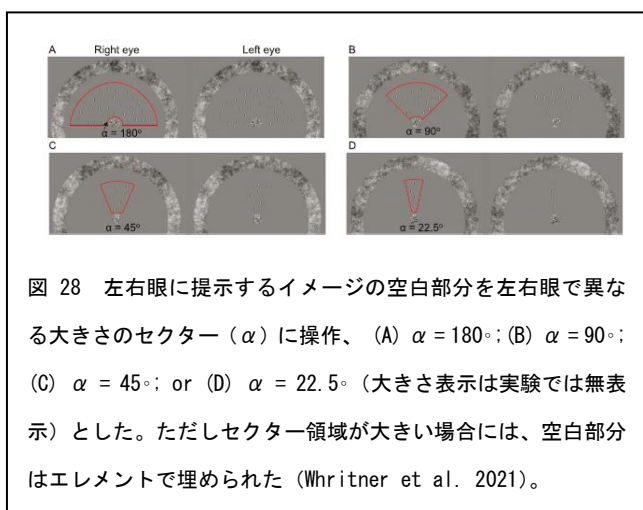


図 28 左右眼に提示するイメージの空白部分を左右眼で異なる大きさのセクター (α) に操作、(A) $\alpha = 180^\circ$; (B) $\alpha = 90^\circ$; (C) $\alpha = 45^\circ$; or (D) $\alpha = 22.5^\circ$ (大きさ表示は実験では無表示) とした。ただしセクター領域が大きい場合には、空白部分はエレメントで埋められた (Whitner et al. 2021)。

した。単変量解析の結果、3D 知覚における手がかりの単独の時間効果は、個人差があるものの速度要因の効果が視差効果より 2 倍速く機能していることが示された(飽和時間指標 τ とすると、速度条件の τ 値=0.079、視差条件の τ =0.161)。

3D 知覚の手がかり統合の空間要因に関する実験 2 では、手がかりの分離するために刺激の大きさを操作することで3Dの運動方向の弁別の精度を測定した。この種の手がかりの空間的

統合では、分離した手がかりが刺激の大きさを増大することで刺激弁別が類似の漸進的増大を示し、刺激が MT 領域に近づく二つの両眼手がかりが共通する神経基礎のために平均

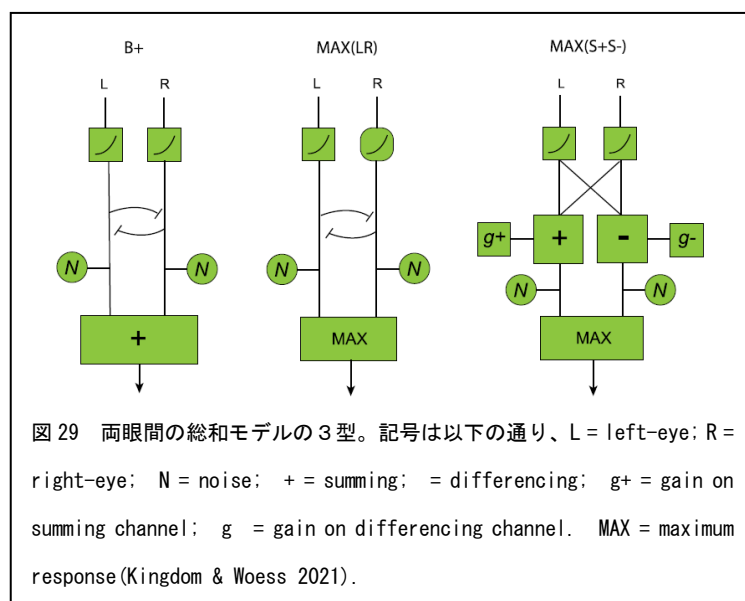
化すると仮設した。実験の結果、正確な知覚反応は刺激の面積が増大すると増し、 180° で飽和することを示し、これまでの空間に関する 3D の方向知覚の MT の大きさ受容野の見解がこれと一致した。

特筆すべきは個人差で、速度ベース条件では 750ms の刺激提示時間でほぼ 80% の弁別精度が正確になったが、視差ベース条件では個人間差が大きいことが示された。さらに弁別の正確度は刺激の大きさでも生じ、被験者はすべて刺激が大きくなるにつれて精度が増大したが、視差ベース条件ではその精度に個人差が生じた。

これらの結果から、速度ベースによる判断は、はじめに急速に感覚過程として機能し、その後視差ベースの感覚過程が続き 3D の方向知覚が成立すると考えられる。空間知覚の手がかり統合は MT 領域の受容野で同様な過程が起きていると思われる。

両眼加算 (summation) と効率的符号化

両眼加算のしくみは左右眼からの入力を総和する神経によって媒介されていると考えられてきたが、Cohn ら (Cohn, Leong & Lasley, 1981) によって提唱された左右眼間の相互作用と Baker et al. (2018) らの効率的符号化の枠組に基礎をおいたモデルを Kingdom & Woessner (2021) は次のように考えた。MAX (S+S) と呼ぶモデルでは両眼間の加算は、加算 (S+) および各眼の個別シグナルである差 (S-) を計算するチャンネルに担われ、これらの (S+ と S-) シグナルは個々のノイズに妨げられるが個々のゲインをもち、MAX ルールにもとづく検



出に対応する。両眼加算は眼と両眼間の知覚できるコントラスト閾値の比 (BSR) で決められ、この閾値の上限値のレベルで眼球間の抑制効果のしくみを組み込んだ加算値 (B+) を提示する。この加算 (“B+) の二者択一の値が単眼の理論的閾値となる。この単眼の検出値 (B+) を加算したモデルが図 29 の左端に表示した。また、ターゲットの提示時間によって両眼

シグナルが一方のシグナルは単独よりは大きく、既知の “MAX” rule 式の加算となる (図の中央に表示した MAX {LR})。そこで、左右眼からの加算 (MAX) の加算モデルは各眼の加算値が等しいとしても左右眼の検出値 (B+) の加算よりは小さいと予測できる。そこで、左右眼の検出 (S+, S-) の 2 通りのゲイン (g+, g-) を組み込んだモデル (MAX {S+S-}) を提唱した。

Kingdom & Woessner (2021)は、(MAX {S+S-}) のモデル理論の立場を維持しつつ、精神物理学的そして電気生理学的に検証を試みた。実験は2人を被験者とし、刺激はミラー型のステレオスコープを用いて各眼に別々に提示した。刺激は水平指向の様々な空間周波数と帯域をもつガボールパッチとした。左右眼の刺激は両眼融合されて視野の中心の円形窓に投影された。検出(detection)と弁別(discrimination)の条件別に刺激を提示(条件は図30)した。実験条件は探知条件(a)、弁別条件の提示配列とし、非テスト間隔条件ではテストの時間間隔を差し引いた時間間隔、Iは左眼への刺激、Rは右眼への刺激、Bは両眼への刺激を示す。実験手続は左・右眼および両眼条件で上下法で提示された400msの時間内

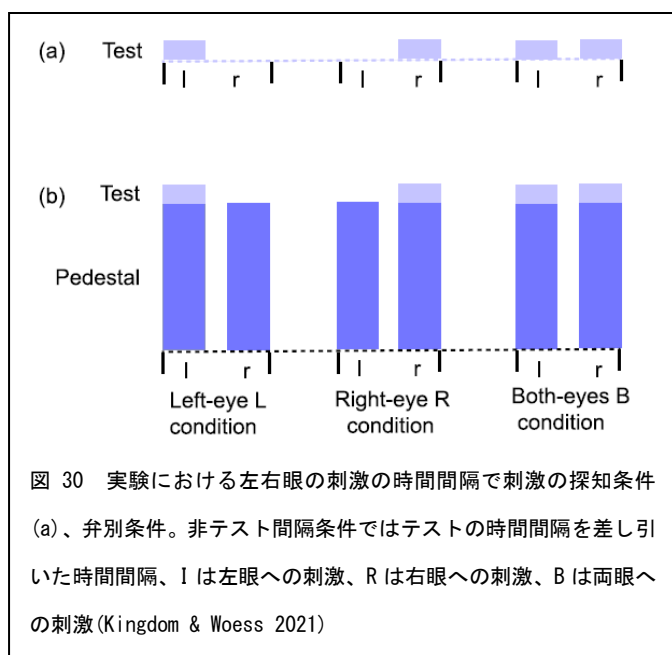


図 30 実験における左右眼の刺激の時間間隔で刺激の探知条件 (a)、弁別条件。非テスト間隔条件ではテストの時間間隔を差し引いた時間間隔、Iは左眼への刺激、Rは右眼への刺激、Bは両眼への刺激(Kingdom & Woess 2021)

(cosine temporal envelope)に提示した刺激に対して明るさの視えが変わったら報告する2選択肢の回答方法でなされ、コントラスト閾値と刺激増量閾値が求められた。

実験の結果、データは信号検出理論(SDT)の心理測定方法によって次式で計算された。

$$PC = \Phi\left(\frac{d'}{\sqrt{2}}\right)$$

$$d' = (gC)^{\tau}$$

ここで d' はSDTの測定感度、 Φ は累積正規分布、PCは正反応の比率、

Cはコントラストgと τ はフリーのパラメータで基礎となるトランスデューサーのゲインと指数で決まる。

モデルの成績が両眼からのシグナルが片方からの条件(MAX(LR))および両眼からのシグナルが単独のチャンネルからの条件(B+)と比較された。MAX(S+S)モデルは他の二つのモデルと同等の成績であり、かつ、広範囲の両眼行動を支える個々のゲインで制御された(S+)と(S)のシグナルが関与されていた。したがって、MAX(S+S)は両眼の加算の実行可能なモデルと考えられる。

プルフリッチ錯視における光源の減衰効果

プルフリッチ錯視では、奥行のある運動対象が両眼間の輝度、コントラストあるいは空間周波数の差分で誘導される網膜視差あるいは両眼間速度差によって生起する。これらは両眼間の網膜イメージに関わる視覚障害や光学的修正によって起きる。しかし、どの程度瞳孔不同が起きると錯視が生じるのかは明らかでない。これらの障害や修正の中で奥行の

錯視が起きるのはほとんどが、明るさ減少によって視覚中枢が経験する情報の伝達さによる両眼視差か、あるいは両眼間の網膜輝度差から生じる情報の速度差によっている (Read & Cumming, 2005、Wu et al. 2020)。

しかし、ノーマルな観察者で両眼間の光学的あるいは生理的な差がどのくらいになると錯視が起きるかは、まだ知られていない。これまでの実験では広範囲の光学的濃度で錯視が生じることが明らかにされている。(Burge et al. 2019、Reynaud & Hess, 2017; Rodriguez-Lopez, et al. 2020)。

錯視が生ずる最少の輝度濃度はまだ明らかにされていないので、網膜の両眼間の差をしらべた。これをしらべるために、Durai et al. (2021)は反対方向に運動する2つのランダムなフィールドの両眼間に提示する明るさに差を設定して錯視を誘導し、その閾値を24人の健常眼をもつ被験者で実験した。実験では左眼に NDF(神経密度フィルター、Neural Density Filter)を装着し、右側から左側に視野の下辺のドットを運動して交差視差を、上辺の視野を反対方向に運動して非交差視差をモニター上にそれぞれ出現させた。これは下

辺の領域のドットは観察者の手前に、上辺は遠くに知覚される (図 31)。

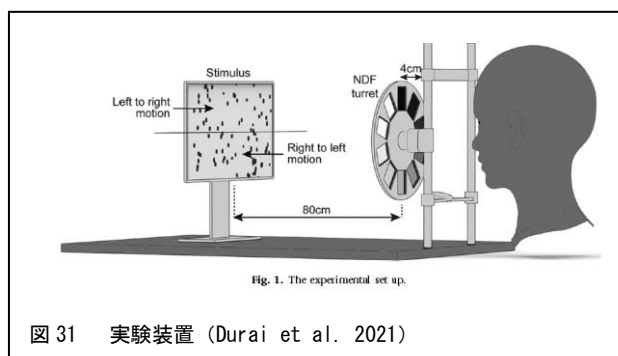


図 31 実験装置 (Durai et al. 2021)

9種類の NDF フィルターとフィルターなしの10種類を用いて絶対的輝度レベルが各条件10回、計100回、各被験者でテストされた。下辺が手前、上辺が遠くに知覚される割合は NDF フィルター強度が強まるに従いチャンスレベルから大きくなった。奥行錯視のためのウ

エバー (Weber constant) の定数を決めるためにモニターの輝度を10, 20, 30, 50 and 80 cd/m²に設定した。

実験結果による精神測定関数は、次式で求められた。

$$f(x) = 0.5 \times [1 + \operatorname{erf}((x - \mu)/(\sigma \times \sqrt{2}))] \quad (1)$$

$$\operatorname{NDF}_{\text{pse}} = \sqrt{2} \times (\mu/\sigma) \times \operatorname{erfinv}(2 \times (0.5 - 1)) \quad (2)$$

$$\operatorname{NDF}_{\text{Threshold}} = \sqrt{2} \times (\mu/\sigma) \times \operatorname{erfinv}(2 \times (0.76 - 1)) \quad (3)$$

ここで、 $f(x)$; 上辺の領域より下辺領域が手前に知覚される NDF フィルターの範囲、 μ と σ はガウス分布の平均と標準偏差をそれぞれ示す。

被験者24人中、16人がプルフリッチ錯視を示し、また8人は結果の集計から除いた。残りの被験者の視えの奥行回転の閾値は10から80 cd/m²の範囲で相違し、この差は絶対輝度レベルの範囲でもおおよそコンスタントであった。

実験結果、網膜輝度の眼球間の差による奥行運動錯視は眼科的疾患あるいは光学的介在があるように考えられるが、網膜輝度の通常的眼球間の変容の結果として出現するもので

はないことを示し、そうではなく、他の運動視と容易に経験される個人差によるところが多いと考える方が妥当である。

このプルフリッチ錯視は個人の眼球間病理あるいは網膜間イメージをもたらす光学的矯正によって生じると考えられているが、しかし今回の実験結果は明らかな視覚障害あるいは光学的矯正のない被験者を対象として錯視の現れるしくみを探ったところ、自然条件では、プルフリッチ錯視を出現させるためには両眼間輝度差が非常に大きくしなければならぬこと、網膜照明が中程度のレベル（ベースラインから 40 -45%の差）が錯視を起こすのに必要なこと、したがって一方の眼に対して照明を多大に減衰する必要があること、網膜照明と瞳孔サイズは密接に関連し、両眼間網膜輝度差が閾値に到達していると最少瞳孔不同が 2-3 mm あると錯視が起きることが示された。モニター輝度が同一の場合、瞳孔サイズが小さいと網膜輝度が減少するので両眼間の網膜輝度差が錯視を起こす閾値が達すると考えられる。

これらのことから、プルフリッチ錯視は眼球間の網膜輝度差の診断的測度として適切ではないと言える。この錯視は眼科的病理あるいは光学的問題から引き起こされた眼球間の網膜輝度差によって生じるが、健常な眼球間の変性では生起しないこと、またこのような錯視の経験による個人差も重要な要因と示唆される。