

1. 両眼立体視

両眼視における生態学的アプローチ (ecological approach)

環境に起因する最近の両眼視に関するレビューである。特に J. ギブソンとそれに続く研究の内、単眼による奥行の勾配、および全体的立体視 (global stereoscopic) と局所的両眼視間の多義的問題を取り上げる。

図 1.1 は、Wheatstone (1838) のステレオグラムで両眼に異なる要素で構成した奥行を知覚させる図形である。両眼イメージの相違は視差であるが、しかし方向差の視差、曲率そして空間周波数も、図のように、奥行知覚を生ずる要因である。これらの要因は位置や幅の視差に較べて直接的な視覚効果がある。

J. ギブソンの両眼視ステレオプシス研究は少ない。唯一「The Perception of the Visual World」で言及し、環境の 3 次元の面の知覚が視覚理論の基礎になることに触れたときである。その理論では面 (surface) 上の視えの奥行は、(1) テクスチャの大きさ、(2) 運動視差の勾配、(3) 両眼視差の勾配、という光学的勾配から原理的に成立すると考える。ギブソンによると、この勾配は距離にもなってパースペクティブが減少するので眼球調節や輻輳手がかりなど 2 次手がかりで補うとする。この理論では、両眼のステレオプシスは遠距離では関係しないとされ、運動視差と両眼視差の勾配は観察者の近距離でもっとも効果的であり、距離が大きくなるにつれて最小となる。結局、両眼視差と運動視差の両要因はどちらも網膜上の勾配では規定できないとし、オプティックアレイ (optic array) を重要と考えた。これは観察位置からの光の構造をさし、観察者の眼球から独立に決められるもので、運動とステレオプシス間、また網膜とオプティックアレイ間とは異なる関係である。

もう一つ複雑にしているのは面がオクルードされることである。ギブソンの研究はこのオクルードが観察者の動きでもたらされ、この手がかりが用いられとする。とくに観察者が移動すると遠くにある対象が部分的にあらわれたり隠れたりし、単眼での観察の方が多く生ずる。この面の部分は両眼の視差ではなく単眼で生じる。

Gillam (2022) と共同研究者は、さまざまなオクルードのステレオ刺激事態で視えの奥行距離の正確さを実験している。ギブソンはこの結果に生態的観点から次の図 1.2 から図 1.5 に示すように、ステレオ視の傾斜面とオクルージョンの曖昧さに言及した。図 1.2 では、同一の水平視差が傾斜面と部分のオクルージョンを生む。1 本の線分が

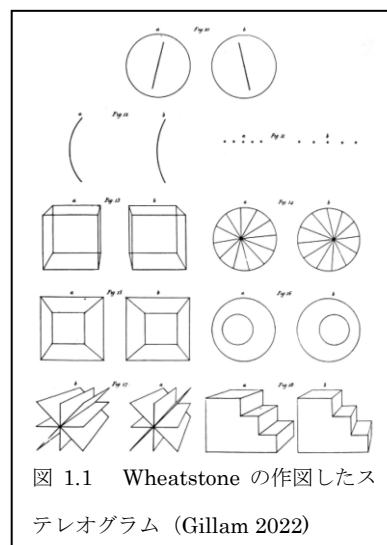


図 1.1 Wheatstone の作図したステレオグラム (Gillam 2022)

その間の違いを分けていないけれども、図 1.3 によれば複数の幅の異なる線分の視差パターンによって違いが起きている。図 1.3 では、(a)左図形と中央図形の交差視差の融合で傾斜奥行の主観的輪郭が、一方中央図形と右図形で主観的輪郭ではなく傾斜面の線分がさまざまに視える。一方(b) 左図形と中央図形の融合で奥行方向にカーブした主観的輪郭が、一方左図形と中央図形の融合で主観的輪郭ではなくさまざまな傾斜面の線分が視える。ここでは、(b)の場合のみ個々の線分傾斜が傾斜を生んでいる。

このことから単眼視の領域が両眼視でも生態学的意味がある。単眼視の図形の一部のギャップが両眼視で奥行を生んでいる例が図 1.4 に示されたように、左右眼で異なる矩形で右眼にのみギャップがあるステレオグラムであり、これを観察すると、右眼にのみ2つの黒の領域面間に部分的に白色の背景が見られ、右眼では見えない。図 1.5 では、3通りのステレオ視の条件が示され、両眼と

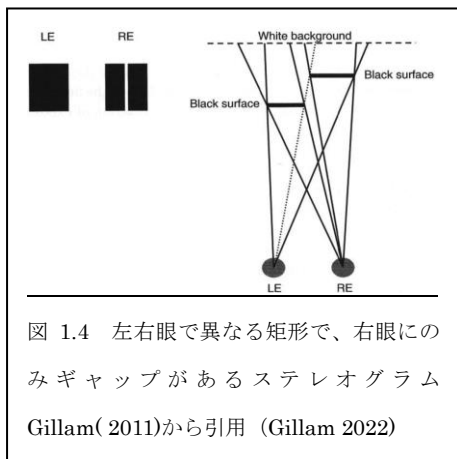


図 1.4 左右眼で異なる矩形で、右眼にのみギャップがあるステレオグラム
Gillam(2011)から引用 (Gillam 2022)

単眼刺激で生じている奥行のステレオ視閾値が比較された。図 1.5 の (a) では二つの面の間の奥行の差を示す共通点をもたないギャップによる普

通のステレオグラムであり、図(b)では単眼視にのみギャップのある面(単眼視ギャップ条件)であり、さらに図(c)では傾斜面に一致するエッジ視差をもつステレオグラムである。これら3条件の奥行閾値を比較すると、単眼視ギャップ条件はステレオギャップ条件と同等となり、左右眼別々の各図形が融合して暗に一つの図形のように知覚される。この結果は、単眼視ギャップとステレオギャップは重複しているが、しかし傾斜面を生むのは異なることを示す。もう一つの生態

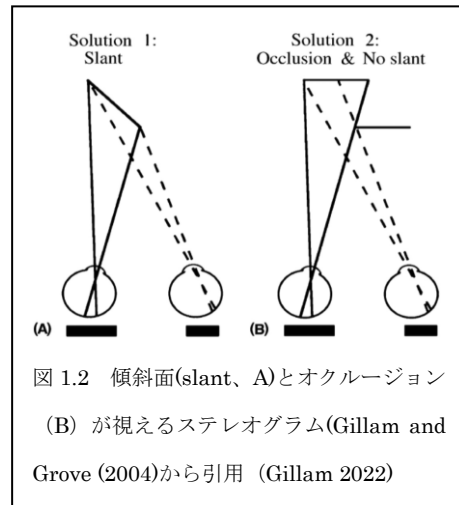


図 1.2 傾斜面(slant、A)とオクルージョン(B)が視えるステレオグラム(Gillam and Grove (2004)から引用 (Gillam 2022)

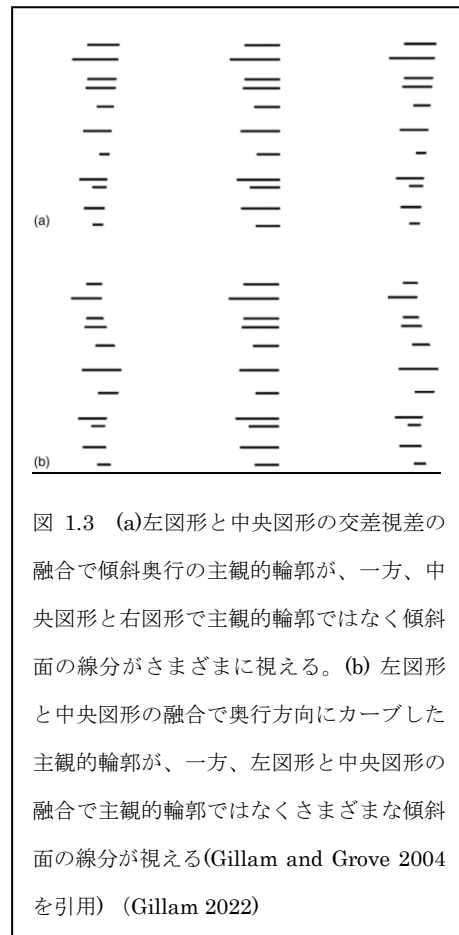
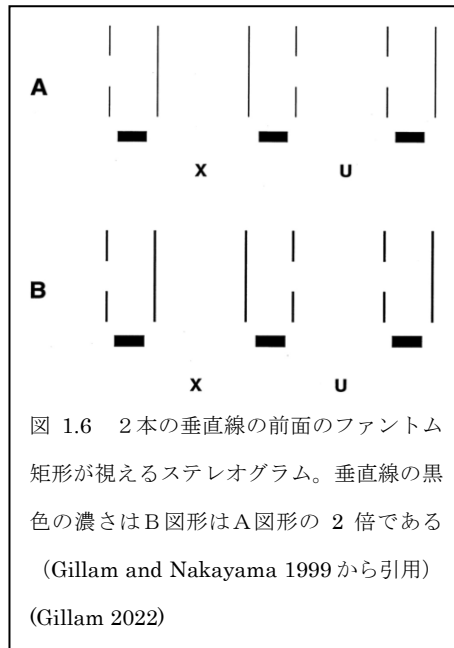
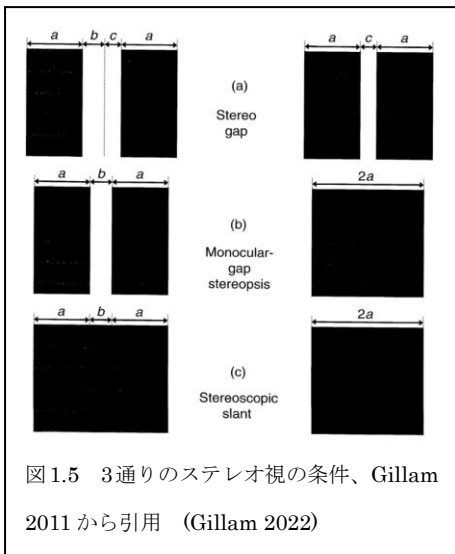
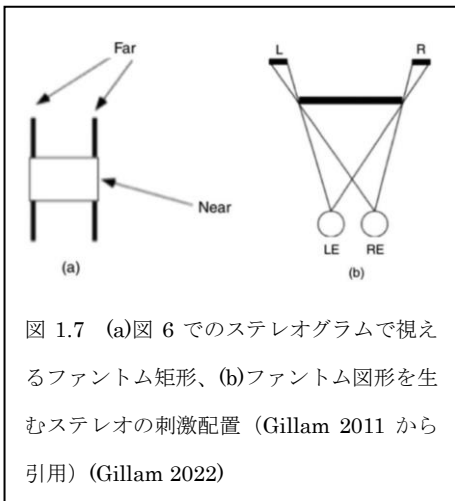


図 1.3 (a)左図形と中央図形の交差視差の融合で傾斜奥行の主観的輪郭が、一方、中央図形と右図形で主観的輪郭ではなく傾斜面の線分がさまざまに視える。(b)左図形と中央図形の融合で奥行方向にカーブした主観的輪郭が、一方、左図形と中央図形の融合で主観的輪郭ではなくさまざまな傾斜面の線分が視える(Gillam and Grove 2004を引用) (Gillam 2022)



的効果は、図 1.6 に示したような左右眼のパターン間の垂直線に位置の視差が無いのに右眼で視ると左線分にギャップが左眼には右線分にギャップがみえることである。図 1.7



この両眼間のパターン差は面の前方で浮いている部分的オクルージョンからでていると考えられ、またこれは(a)図に示したように、そのような空間配置のキクロピア的な視え方である。これが前にファントム面、そして2本の垂直線の部分的オクルージョンが視える。さらに、ここで視える奥行はステレオグラムのオクルードされた領域の幅(線分の濃度)によって量的に生み出される。

ここで紹介した研究例は、両眼の視覚は生態的に適切に働く単眼視の領域を伴うことを示してい

る。単眼視領域は知覚した空間の配列で抑制や視野闘争をするのではなく二つの領域の間のギャップがあっても単眼で視たものだけとはしていない。これらの研究から視知覚では生態学的なアプローチが重要なことを示す。

両眼立体視に障害を持つ人のステレオ視の改善と回復研究のレビュー

(1) はじめに

Levi (2022) は霊長類の両眼視とステレオプシスの神経生理の基礎を概観し問題点を論述した。とくにステレオプシスのテストの限界およびその典型的発達の限界、さらにステレオ視の欠陥とステレオブラインドの原因を検討し、最後にステレオ視を回復あるいは改善する研究をレビューした。

Barry (2009) は、「Fixing My Gaze」本のなかで、48歳になったときに両眼立体視(ステレオオプシス)を生まれて初めて経験した男の例を紹介した。それによると、その者の

脳はステレオ情報が失われも、まるで生涯にわたってステレオ視ができたという。これはパラドックスである。両眼視健常者はステレオオプシスがなければ世界をイメージできないし、ステレオブラインド者はステレオオプシスでは世界を想像できない。通常のステレオオプシスは、両眼をステレオ視のために機能的に発達させることが必要とし、さらに両眼からの網膜像をマッチさせ両眼視差と他の奥行手がかりを統合して奥行を計算しなければならない。ステレオオプシスが損なわれると視覚-運動が悪くなり、複雑な地形の歩行やスポーツが制限されうる。

過去 10 年間に 3 次元知覚の神経生理には新しい知見が生まれ、そのメカニズムや通常の発達を妨げる要因が明らかにされ、さらにステレオブラインド、異常の原因と回復の方法がわかってきている。

(2) 両眼視とステレオオプシスの神経生理

図 1.8 には、コラレート（両眼刺激の明暗が同一）とアンチコラレート（両眼刺激の明暗が反対）の RDS に応答する視覚野が示されている。コラレートのステレオグラムが奥行視に関係するが、それらの脳部位の反応は半々で中図に示した領域のみコラレートドットステレオグラムに有意に反応する。初期視覚野（V1 と V2）は必ずしもコラレートステレオグラムに選択的に反応せず、また背側（gray）、腹側、および以降の脳部位と頭頂中枢（green）も選択的に反応する。

ステレオ視に求められる計算機モデルでは、両眼からのシグナルの標準化と左右眼からのシグナルに対応そしてそれらの統合が必要となる。最近の研究では V1 と V2 領域の間の対応ノイズが皮質ニューロンにある刺激情報を縮小して奥行識別のための情報を限定していることから新しいモデルが提示されている (Chen, Chen, & Tyler, 2021; Ding & Levi, 2021)。一つの重要な点は、絶対視差（左右眼のフォービアを挟む角度差）と相対視差（絶対視差間の差）の違いで、絶対視差は輻輳の重要な手がかりであり、相対視差はステレオオプシスの手がかりである。V1 のニューロンは絶対視差に反応するが、相対視差には反応しない。しかし V2 を含めて下流のニューロンは相対視差に感受性がある。異なる視差に対応して受容野の位置が決められている。表 1 は両眼立体視におけるアンチコラレート刺激、相対視差に反応する皮質領野 (Parker, 2007 にもとづく) である。

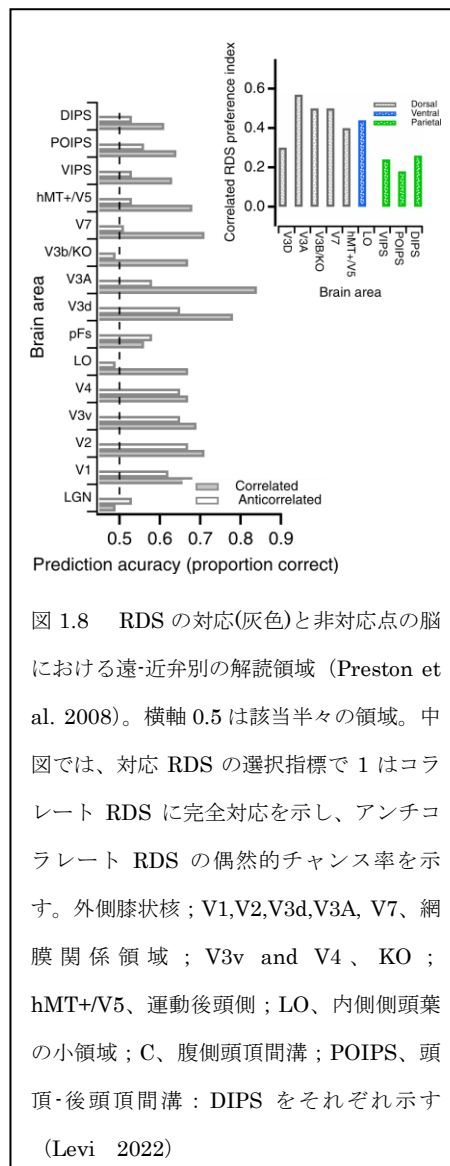


図 1.8 RDS の対応(灰色)と非対応点の脳における遠-近弁別の解読領域 (Preston et al. 2008)。横軸 0.5 は該当半々の領域。中図では、対応 RDS の選択指標で 1 はコラレート RDS に完全対応を示し、アンチコラレート RDS の偶然的チャンス率を示す。外側膝状核；V1,V2,V3d,V3A, V7、網膜関係領域；V3v and V4、KO；hMT+/V5、運動後頭側；LO、内側側頭葉の小領域；C、腹側頭頂間溝；POIPS、頭頂-後頭頂間溝；DIPS をそれぞれ示す (Levi 2022)

アンチコラレート刺激にはニューロンが反応せず相対視差に感受的であることが重要である。

もう一つの課題は、ステレオプシスの粗度（コース coarse）あるいは密度（ファイン fine）の機能の違いである。ファイン・ステレオプシスはで量的奥行情報を、コース・ステレオプシスは遠近情報に関係し、発達の初期に機能するようになりファイン・ステレオプシスよりは発達の異常が起きにくい。

(3) 両眼視とステレオプシス

乳児は初期視覚野（V1 と V2）に受容野をもつが、成人に比較すると V2 野は空間周波数に対応して反応する。下流の領域の皮質は初期視覚野よりは視覚経験にもとづいて出生後に成熟する。問題は相対視差に対する乳児の発達時期を他の手がかりを除去して特定することが難しいことである。相対視差の発達は単調でなく、その視差の弁別閾の最小（Dmin、minimum disparity）と最大（Dmax、largest disparity）を測定しては決められない。Takai et al (2005) は、大きな視差のランダムドットステレオグラム（2480”）に乳児は 4 か月齢に最初に反応し、28.9 月齢まで改善し、5 歳齢で停まると報告した。EEG 研究では、相対的視差に対し 4-6 月齢の段階では反応が質と量で未成熟、4-7 歳齢で成人の段階になる（Norcia et al. 2017）。この発達に伴う変容は視覚ニューロンの髄鞘部分のシグナル伝達速度が高まったことによる。異なる奥行手がかり（視差とテクスチャなど）の統合は発達後のおおよそ 12 歳後である。心理測定と fMRI 測定によると 10.5 歳より若い児童には視差と運動の奥行手がかりの融合の証拠はないけれども、それより年齢の高い児童は皮質 V3B の領野で感覚融合の証拠が成人と同様にみられる（Murphy, Ban, & Welchman, 2013）。

(4) ステレオ視の欠陥と不自由

斜視と弱視はステレオ視の欠陥と不自由の主な原因であるが、頭頂皮質と右側頭皮質の損傷、外傷性損傷による非融合、相対的視差欠如による失認も含む。臨床性異常が知られていない障害も含めステレオプシスが弱い人は実際に多いといえる。これらの人は臨床的異常をもたないが 3%から 30%の人にステレオプシスが弱い人がいると評価されている。これはテストの種類や基準が異なるためである。興味あることは、一卵性双生児の研究から、ステレオプシスの能力は斜視とともに遺伝性という説もある（Richards 1970, 1972, Wilmer & Backus, 2009）。

(5) ステレオ視能力の測定のチャレンジ

これに関しては、実線（ライン、エッジ）のステレオグラムを用いての検討か、あるいはランダムドットのような単眼では形状知覚できないステレオグラムを用いているかで問題となる。前者では両眼の実線の対応が、後者では両眼間の最適な局所要素の対応が問題となる。発達のみにみるとランダムドットのステレオプシス(global stereogram)を欠いたブラインド者は線形のステレオグラム(local stereogram)によって訓練すると、かなり小さい視差まで立体視可能となる（Chopin et al 2021）。奥行知覚には複数の手がかりがあるので視差反応だけを取り出すことは難しい。単眼の手がかりが縮小されても健常な両眼

視できるものは90度回転ステレオグラムにも偶然確率以上に反応できる。したがって純正なステレオプシスは奥行についての遠近情報が与えられていると判断ミス正せる。

(6) 両眼視とステレオプシスの発達を阻害する要因

先進国では片眼の白内障によるイメージの損失が両眼視とステレオプシスの発達阻害の原因ではなく、貧弱な両眼対応イメージが脳の情報を無視あるいは抑制した結果、人口の2から4%に弱視、発達の障害をもたらす。弱視は神経生理的、知覚的、眼筋的そして臨床的異常の原因となり、ステレオプシスを阻害する。視中枢の興奮と抑制のバランスを指摘する研究は両眼間の変更や興奮の抑制の縮小を指摘する (Hou et al, 2021)。

(7) 両眼視とステレオプシスを阻害する要因

斜視と弱視がステレオ視の障害とブラインドの主たる原因であるが、そのほかにも原因となるものが多々ある。それらの原因は頭頂皮質、右側の後頭-頂頭部そして外傷性の脳の融合喪失、相対視差手がかりの喪失による失認がある。人口の少なからぬ人 (3%から約30%以上) が臨床的異常はないのにステレオ視に障害がある。立体視力とオートステレオグラムの自己能力、そして神経と軸索の発達に関連した遺伝子の変化の間には有意な関係がある (Bosten et al. 2015)。

(8) 神経型のステレオ視の改善

神経型のステレオ視の視力はその閾値近辺の知覚トレーニングでほぼ改善できる (Fahle et al. 1995)。その改善はRDSの要素の方向に特化され、ガボール刺激の4オクターブまでの帯域幅では知覚学習が進むが、トレーニングした低空間周波数以上の周波数では学習の転移が起きない。この転移は特定の間で起き、たとえば空間周波数、方向と網膜位置、選択的注意などである。それはV1などのステレオ視障害に関係した低皮質領域に限定される。一方、ステレオプシスの知覚学習ではビデオのゲームを用いた場合には広い範囲の知覚課題に改善が見られる (Zhang et al. 2021) し、また3Dのビデオのゲームでは神経系の障害型のステレオ視力が改善する (Levi & Li, 2019)。さらにステレオ視の障害者の知覚学習によるリハビリは何回にもわたる訓練が必要で屈折不能の弱視の成人の場合では高空間周波数のステレオグラムで立体視が不能である (Li et al. 2016)。

(9) ステレオブラインドとステレオ障害者の回復

乳児と児童における斜視と弱視は両眼視とステレオ視の障害の主な原因であり、乳児期あるいは子どもの頃に診断されると外科手術がなされるが、早期の手術は良くないことがある。もし残っている視力が5-6°ならば両眼視とステレオプシスは損なわれる。初期に手術を受けた内斜視でボトリヌス毒素の処置を受けた幼児の30%は良くて50%が粗い視差のステレオ視、視差が精緻 (60 arc sec) 以下になった者は20%程度であった。斜視と異なり弱視は幼児あるいは児童期まで分からずに、学校でのスクリーニングで症状診断される。弱視の眼科的処置はレンズで矯正するかあるいは非弱視にパッチをかけることであるが、弱視眼の方にパッチをかける処置は児童には有効であった (Holmes & Levi, 2018)。しかしパッチを装着する期間が何ヶ月あるいは何年と長くなると次の処置の障害となった。視

力回復させるために知覚学習、ビデオゲーム、両眼と単眼の処置などがなされ、弱視の改善の目的を達した (Brin et al. 2021)。このような改善は V1 ニューロンには変化はなく学習は神経伝達の下流で起きていることが示唆される。

(10) 最近のステレオプシの改善のストラテジー

ステレオ視力は両眼間の網膜像不対応、とくに大きさ、明瞭性、コントラスト、時間差など、さらに高周波数には特に悪くなる。

(i) 皮質に入力するシグナルを均等化

両眼間の一方の抑制を弱めるステレオ視および一般的視力は必ずしも改善が起きないし、さらに両眼間の刺激を均等化することが重要である。

(ii) 両眼間の網膜イメージを適正に配列

両眼間のイメージの融合とステレオ視の回復のためには両眼間のイメージ位置を矯正するためにプリズムあるいは VR を使用し両眼分離トレーニングやビデオゲームトレーニングが広く行われる。しかし健常者と弱視のグループでトレーニング効果を比較すると、両眼視健常グループと特別な処置グループ間には平均値とメディアン値での差は皆無だった。

(iii) 3次元視における大きな視差はステレオ視の情報基盤ではないこと。

奥行弁別は運動とステレオ手がかりの統合が重要で、これは中枢の V3B/KO で機能する。したがって、細かく変化する視差によるステレオプシに注視を維持することが重要で、大きな視差からの 3D ビデオを用いると神経型と弱視型の成人のステレオ視力を回復する (Li et al. 2018)。また、ステレオプシが弱いあるいは欠けている成人に両眼への視差を単眼で対応する位置に手がかりとして提示しフィードバックによって単眼への適切な情報と組あわせる方法や、あるいはパースペクティブの手がかりと奥行視差を連合させて方法でそれらの知覚学習の効果が検討された。その結果、貧弱なあるいは全くステレオ視が欠けた成人にも確実なステレオ情報を学習させ、ステレオ視力を大きく改善した (Vedamurthy et al. 2016)。これからは、このようなステレオ視の回復や改善が皮質の神経基盤で変化が起きているのか、あるいはステレオ視の情報を視覚が効果的に利用できるようになったのかは、課題である。

(iv) 輻輳融合の改善

斜視患者には輻輳の働きを訓練することが両眼視融合とステレオ視を維持するために重要である。改善した輻輳は共軛眼球運動のサーケイドを縮小し、眼球間のサーケイド、注視持続時間、読書時のサーケイドの後退を矯正する (Daniel et al. 2016)。

(v) フィードバック

知覚学習ではフィードバックは必ずしも必要がないが、しかし知覚学習を速く、そして効果的に行える (Asher & Hibbard, 2020)。例えばステレオブラインド者は知覚学習に 2D と対応した 3D をともに使用して訓練した場合には 3D のステレオ手がかりにウェイトを置くようにフラストレーションなく改善した (Saunders & Knill, 2005)。

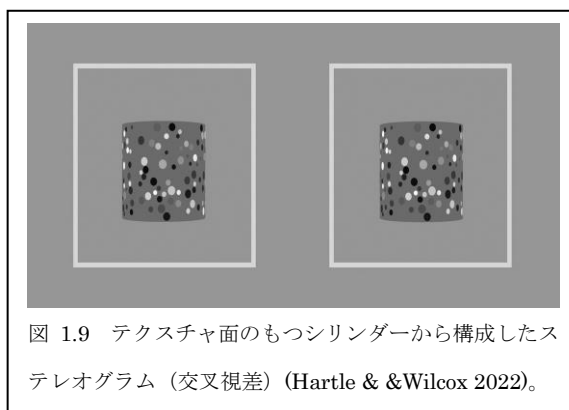
以上、Levi (2022) は神経タイプとステレオ視の障害をもつ人の改善と回復のいくつかのアプローチをレビューし、それを改善するいくつかの方法を紹介した。

両眼立体視における実際の事物とそのバーチャルな対象物の奥行恒常性

両眼視差による対象の知覚には奥行距離が変わると体系的に形状が歪むことがとくにバーチャルな刺激について知られる。しかしこの奥行恒常性は奥行距離の判断が正確ではなく、したがってバーチャルな環境については未だ明確にされていない。Hartle & Wilcox (2022) は、バーチャル環境での観察距離変化による奥行距離の評価とそのバーチャルな対応物について実験して検討した。そのために単眼視と両眼視条件でバーチャルなシリンダーとそれと同一の 3 次元にプリントしたもの (図 1.9 のステレオグラム) で知覚した奥行距離が測定された。

奥行距離知覚の実験においてはバーチャルと実物の比較は調節と輻輳の手がかりコンフリクトというディスプレイによる刺激提示に固有な問題がある。3 通りの実験環境、すなわちミラーステレオスコープ、HMD (head mount display) と十分な手がかりのある実環境 (PTE) で、ミラーステレオスコープと HMD の間の比較は HMD の光学装置の程度によって測定が歪む。

実験ではバーチャルと実物からなる刺激を観察距離 83cm と 130cm に提示し、単眼視と両眼視で観察させ、測定のバイアス除いて奥行距離を同じ手法で判断させた。被験者は 16 名の大学の学生で両眼立体視が可能であることを確認してから実験は試行した。



実験条件は、ミラー、ステレオスコープおよび PTE で 3 次元の形状がシリンダーのものを提示し、そのバーチャルなものは実物と等しくし、またその大きさおよび観察距離の変化による視角を操作して提示するシリンダーの視差を決めた。すべてシリンダーは高さと幅を固定し、近距離と遠距離の観察距離に対応した視角 (9.6、6.2°) に設定した。シリンダーの深さ (Z 次元) は 3, 5, 7, 9 cm の 5 段階、各シリンダー面はランダムなアレイ (図 1.9) とした。シリンダーの各要素にはエッジや頂点が知覚できるように単眼の手がかりを追加した。

物理的刺激はコンピューターでコントロールされた装置 (図 1.10) で提示された。装置は近距離の観察のための PTE でポスターボードは観察者から 83cm、また LED ライトとカーテンの間に観察者から 50cm の黒色のボードには一つの観察の窓を設けた。実物シリンダーは 3.8cm の厚いボードにマグネットで埋め込まれ印刷したシリンダー面が見えるように工夫された。ボードは駆動装置に連結されシリンダーの位置を試行中変えることができた。観

観察者の前面 50cm にあるホールは観察窓で、周囲の視野（近距離 29 deg あるは遠距離 19deg）を限定した。被験者には、奥行面の距離を単眼視と両眼視でステレオスコープ、HMD、そして PTE の 3 条件で感圧ストリップ（人差指で観測した距離目盛りを押す）を用いて評価させた。

結果は linear mixed-effects model (階層ベイズモデルを用いて奥行評価の個人差を検定) にそって分析された。

このモデルはランダム切片モデルをベイズ的な方法によって推定し最大尤度の予測値を得る。データの分析は、各条件（観察距離の遠近、単眼視と両眼視、ミラーステレオスコープ、HMD と PTE）の間の評価した奥行値と予測値間のスロープ関係を比較した。予測値は次の計算式によった。

$$\Delta d = D2 * \delta / IPD - \delta * D$$

(δ) : 面のトップの両眼視差、(IPD) : 両眼間距離、 Δd : 知覚距離

実験の結果、単眼視条件では実距離に対する奥行距離の評価はステレオスコープ条件と HDM 条件より高く、またステレオスコープ条件と HDM 条件の評価は類似し、個人差はなかった。しかし、実環境の条件で実験順序を初めに開始した被験者は奥行評価が他の実験開始の被験者より実距離に対する奥行距離の評価は勾配が急で有意に正確であった。両眼視条件での評価は単眼視条件より正確で、予測値と実験値は有意に観察装置、観察距離、実験開始順序間での相互作用が有意に明らかにされた。これは奥行評価の結果が装置と観察方法で有意に差があることを示した。奥行距離評価の結果は物理的距離と予測値が試行順序と観察距離が短距離を除いて一致した。しかしこの結果は物理的距離が長い場合の試行を最初にしたケースで、バーチャルな観察条件で試行順序が最初の被験者では予測した距離評価値より一貫して小さかった。

両眼立体視 (Stereoscopic) の奥行恒常性の有無のために各グループ条件での近距離と遠距離の奥行関数と切片をしらべたところ、この奥行恒常性は試行順序最初の被験者での実環境条件でのみ妥当するが、バーチャルの 2 条件では該当しなかった。恒常性は奥行き手がかりが豊富な環境では成立するが、バーチャルな環境では輻輳と調節の手がかりがない

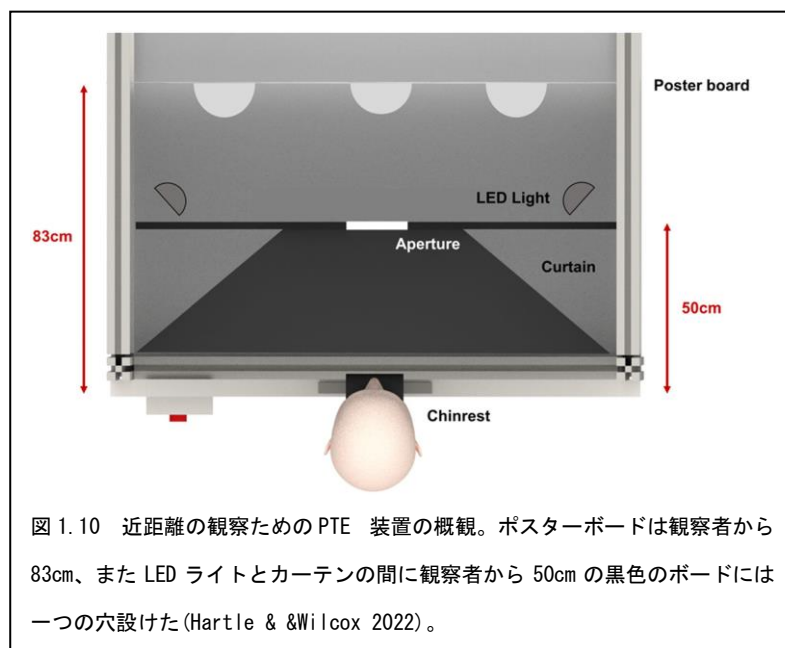


図 1.10 近距離の観察のための PTE 装置の概観。ポスターボードは観察者から 83cm、また LED ライトとカーテンの間に観察者から 50cm の黒色のボードには一つの穴設けた (Hartle & Wilcox 2022)。

ので成立しないし、さらにバーチャルな環境および実環境とも先行経験が強く奥行知覚に影響する。

ステレオ立体視におけるトップダウン注意の制御

ステレオ立体視は視覚的注意に導かれた結果である。視覚的探索は対象が固有の奥行にある場合に効果的となり、一方奥行面の異なる対象にそれぞれ分けて探索するのは自然な注意作用にはみえない。このような事実は刺激に駆動される奥行プレーンの知覚、すなわちボトムアップの作用と考えられる。Nakayama and Silverman (1986)は、ターゲットが固有の奥行プレーンにあり、他の事物が別の奥行にある場合には検索時間は他の事物の数には関係しないことを見いだした。

Zou et al. (2022)は、特定の奥行プレーンにボトムアップの注意を向ける能力をしらべるために実験して検討した。実験1では、異なる奥行距離あるいは色彩にあるアイテムをクラスターに分けて実験して統計的に分析するパラダイムを用いて、被験者の一部が8個の奥行プレーンのどれかに特定の注意フィルターをかけて判断しているか、もしそれならばそれらの被験者は少なくとも特定の奥行プレーンに直接的に正確に注意していると仮定し実験、実験2では8個の奥行プレーンで視覚探索を実施し、有効な手がかりあるいは不十分な手がかり条件で遠いあるいは近い奥行プレーンに注意を向けて実験した。実験3では2個の奥行プレーンのみでアイテムを提示しターゲットの奥行プレーンの情報を観察者により効果的な探索ができる事態で同等な実験を実施した。セントロイドパラダイムでは奥行手がかり情報の注意によるコントロールを定量的に測定でき、ターゲットのあるプレーンと注意の最中の無関係な奥行プレーンの選択的加重を知ることができる。この加重はステレオ立体視情報の注意フィルターとして考えられる。

セントロイド実験のパラダイムは図 1.11 に示した。実験の間、被験者にはドットの一群が短く提示されるが、ターゲットプレーンの3個のドットがターゲットで他の奥行プレーンのドットは誤答を誘うドットである。3個のドットの重心位置を決めさせ、その他のドットは無視するように教示する。すべてのドットの位置および観察者によって評価されたセントロイドに基づき、ターゲットの奥行と非ターゲット奥行の干渉の加重が定量的に回帰モデルによって測ることが可能である。被験者には非ターゲットをなるべく無視し3個のターゲットの重心の中央を評価するように教示した。すべてのドット位置及び被験者によるセントロイドに基づきターゲットの奥行と非ターゲットの奥行の加重を回帰法で測定した。奥行プレーンはステレオ立体視のため

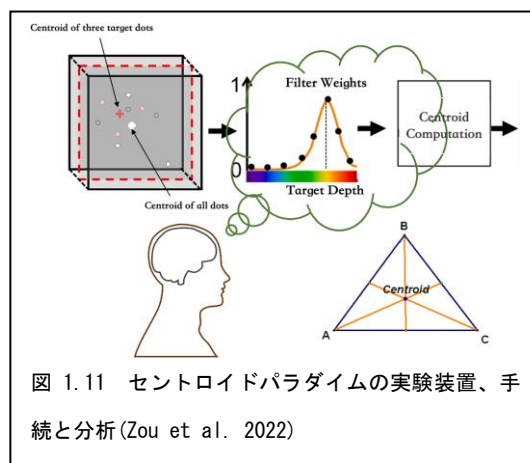


図 1.11 セントロイドパラダイムの実験装置、手続と分析(Zou et al. 2022)

被験者には非ターゲットをなるべく無視し3個のターゲットの重心の中央を評価するように教示した。すべてのドット位置及び被験者によるセントロイドに基づきターゲットの奥行と非ターゲットの奥行の加重を回帰法で測定した。奥行プレーンはステレオ立体視のため

の視差をつけ各プレーンのそれぞれに 3 個のターゲットを割り当てた。もし被験者が正しくターゲット奥行を選択して他の奥行を無視すれば評価したセントロイドはいくぶんエラーが伴っても 3 個のターゲットの中心のなるはずである。しかし、もし被験者が十分にターゲットの奥行を選択できなければ、他のドットがセントロイドの判断に参与する。したがってこの種のトップダウンの注意制御過程は、ターゲット奥行のプレーンのための注意フィルターを左右するので、この方法の精度は各プレーンのセントロイド評価を分析すればするほど悪くなる。

被験者は選び抜いて 17 人の中から 5 人とした。したがって被験者の何人かがステレオ立体視が良く、この実験を可能にしていた。図 1.12 は、セントロイド実験のクロス交差の刺激例である。ドット刺激の赤点はターゲットのある奥行プレーンにある 3 点の矩形点のセントロイド（重心）を示す。図 1.12 は、セントロイド評価実験のステレオグラム（クロス交差）で円の赤点はターゲットのある奥行面にある 3 点の矩形点のセントロイド（重心）を示す。奥行プレーンのステレオ立体視の視差は -56 arcmins から 56 arcmins の範囲で変え、また隣接する奥行プレーン間の視差の差は 16 arcmins とした。実験手続きは図 1.13 に示すように、以下のように進行させた。

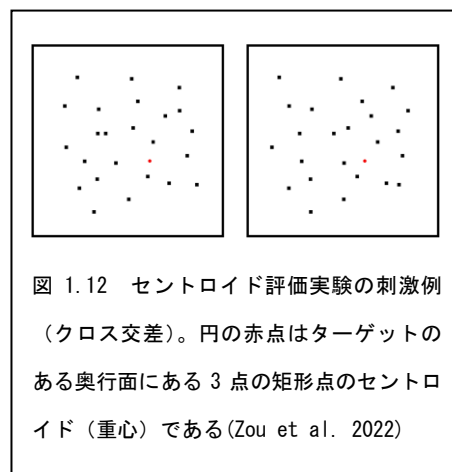


図 1.12 セントロイド評価実験の刺激例（クロス交差）。円の赤点はターゲットのある奥行面にある 3 点の矩形点のセントロイド（重心）である (Zou et al. 2022)

(a) 注視枠 (1 s)、(b) 刺激 (300ms)、(c) 反応がなされるまでの画面、(d) 反応後のフィードバックのディスプレイ面で刺激、セントロイドターゲット、観察者反応点とエラー点を示すとともに視差による 2 つの面を提示

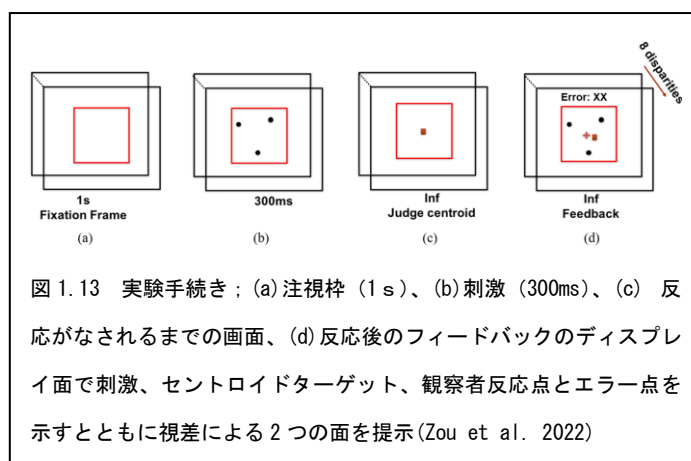


図 1.13 実験手続き ; (a) 注視枠 (1 s)、(b) 刺激 (300ms)、(c) 反応がなされるまでの画面、(d) 反応後のフィードバックのディスプレイ面で刺激、セントロイドターゲット、観察者反応点とエラー点を示すとともに視差による 2 つの面を提示 (Zou et al. 2022)

被験者にはデストラクタのドットの中のセントロイドターゲットを見つけてマウスで正確にクリックして評価するように教示した。本実験に先駆けてステレオ視力のスクリーニングを図 1.14 に示したステレオグラムで実施した。テストに合格させた基準はステレオ視判断の時間で 500 ms とし、合格した 5 名の被験者には本実験を課した。

実験 1 ではセントロイド判断のトレーニング試行を実施した後に、異なる奥行プレーン (8 個) で異なる数のドット (1, 2, 6, 12, 24 個) のセントロイド判断トレーニング (20 試行) を実施した。

実験の結果、セントロイド判断値のために用いた刺激に固有なエラーを含めてデータ駆動率 (Data-drivenness) (D) を計算し、 $1 - D$ 式でセントロイド位置を導出した。ここでもし $D = 1$ ならば被験者は完全に刺激に依存してセントロイド判断値を判断し、もし $D = 0$ ならば刺激を全く考慮せずに判断していることになる。

実験の結果、ターゲットに最も近接したドットのセントロイド評価 (0.86) が最も高く、それ以外のドットの評価値 (0.05 以下) 小さかった。これはターゲット奥行にないデストラクタードットはほとんど影響していないことを指す。

次に実験 2 では、奥行知覚においてこの種の選択性を常用しているかを、とくに観察者が視空間を前面から後面に、あるいはその反対に視覚探索しているかを検討した。これは視覚探索中の注意で誰でも用いる能力であろう。そこでこの可能性をしらべるために多次元奥行での視覚探索課題を前面から後面に探索するための確率の手がかりに依拠して実験した。実験装置は実験 1 と同様で、ステレオ視差による奥行プレーンを -21 か 21 arcmins の間に設定した。すべての刺激は 32 個の 6×6 のグリッドアレイにランダムに散らして提示し立体視ができる十分な観察時間を設けた。ターゲットがある場合は 50% に設定してあるので被験者にはターゲットを見つけたらキー反応を、またターゲットがないことがわかったら同じように反応することを教示した。実験では 2 色で 3 種類のセットの大きさ (8、16、24 個) 差を手がかりに被験者には、奥行プレーンの遠近差を赤色の色合いで知ることができる、または色彩は手がかりではないと教示した (図 1.15)。実験 2 の被験者は 14 名ですべて健全な視力を有しステレオ視力も確認された。実験結果は探索時間、セットの大きさ (8、16, 24 の 3 段階) および多次元レベル (Multi-depth: 1 for near, 8 for far. Multi-color: 1 for red, 8 for yellow.) に分けて検討した。

実験 2 の結果、反応時間はセットの大きさに探索にほぼ比例して大きくなり視覚探索の手がかり (色) の効果はなかった。したがって、観察者が特定の奥行に注目していてもそれを可能にはできないことを示した。

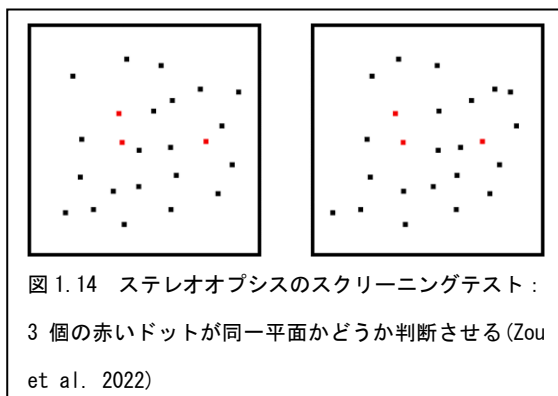


図 1.14 ステレオオブシスのスクリーニングテスト：3 個の赤いドットが同一平面かどうか判断させる (Zou et al. 2022)

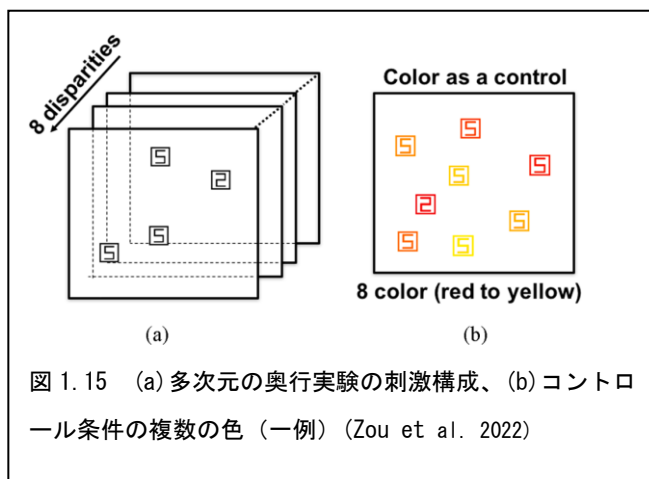


図 1.15 (a) 多次元の奥行実験の刺激構成、(b) コントロール条件の複数の色 (一例) (Zou et al. 2022)

そこで実験 3 として奥行プレーンを 2 箇所を設定し、1 箇所条件と視覚探索の効果を比較し、被験者にターゲットがあれば前にあるか後ろにあるか、もしくは無い、を応えさせた。その結果、奥行プレーンが 2 箇所条件ではターゲットがある場合も無い場合有意に反応時間が縮小された。すべての刺激が一つの奥行プレーンにある場合と比較すると、反応時間と視的検索効果はターゲットの有る無しに関わらず 2 つの奥行に分割した方が改善した。

これらの結果、注意作用は奥行のプレーンに直接向けられるが、この作用は視覚探索を簡単にはしないこと、また視覚探索における奥行は比較的粗いとみられ特定の奥行のプレーンを注目させる手がかりは少ないと考えられる。結局、この実験からステレオ立体視でのトップダウンの見方は可能であるが、しかし立体視における対象検索としては難しいと言える。

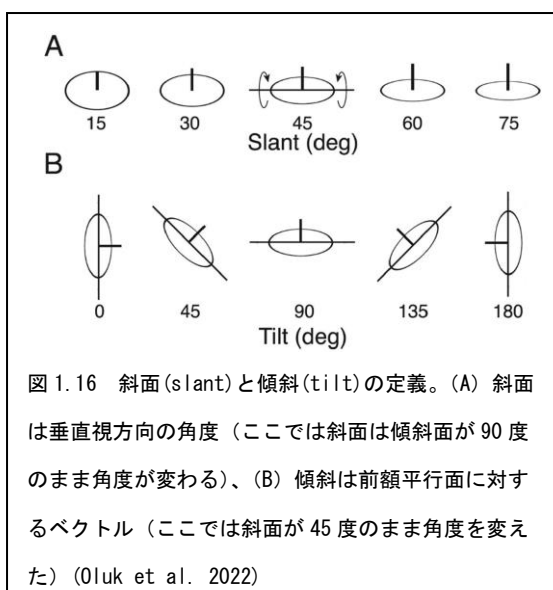
平面状の 3D 表面のステレオ傾斜の弁別：前額平行面マッチング 対 平面マッチング

ステレオ立体視の両眼手がかりは 3D 面の方向を識別するために重要、近距離では特に重要である。Oluk, et al. (2022) はテクスチャのあるプラナーの周囲から濃密なテクスチャプラナーのテスト面を識別を検討する。ここでは人間とモデル観察者を参照としたスラントおよび両眼への対応しないノイズを提示した条件でスラント識別の閾値を測定した。

面の角度の斜面 (スラント slant) と回転面 (チルト tilt) は、図 1.16 (A) と (B) に示したように、斜面は図 (A) のように、面が垂直視方向の角度 (ここでは傾斜面が 90 度のまま角度が変わる)、また回転面は図 (B) のように前額平行面に対するベクトル (ここでは斜面が 45 度のまま角度を変えた) と定義した。3D の形状では部分的スラントとチルトが統合されて形が知覚されると一般には考えられている。

今回の実験では 2 つのプラナー面を同時に提示し、ランダムに奥行距離を変化させ周囲の参照面の前に小さいテスト面を提示

した。刺激は両眼視と単眼視手がかりを含む方向のある面をレンダリングして作成した。単眼視手がかりを縮小するためには刺激はテクスチャの規則性と形状をなくしシルエットにした。さらに実人間とモデル観察者と比較するために各眼のテスト領域にガウス型の空間ホワイトノイズを提示した (1.17)。モデリングはステレオ視差によるスラントプラナー面の識別のためのベイジアン理想観察者からおおよそ導いた。理想観察者のモデルは課題の計算機的原理を明らかにし、人間のパフォーマンスと比較できる適当な基準 (ベンチ



マーク) をセットし、さらにヒューリスティックなメカニズムの効果を評価するために用いた。理想観察者はスラントと奥行距離を各眼のイメージに基づいてバックワードとフォワードのルールによって計算する。

このようなスラントと奥行距離の最適モデルはプラナーマッチングモデル (PMモデル) とよばれ、利用できる幾何学的情報をすべて用いた最適なモデルといえる。また、ステレオ立体視の対応問題を局所的に解決するモデルをPMモデルとし、また局所スラントと奥行距離の評価をテスト領域のすべてで計算する局所的プラナーマッチングモデル(LPMモデル)もある。このモデルは両眼間のイメージを局所的に対応するもので位置視差とパターン視差(location disparities and pattern disparities)に基づく。さらに簡単な仮説は 対応問題を局所の前額平行面でマッピングする方法で、これは標準的な視差交差対応 (LFM、両眼の対応する位置の差の検出) と同等である。このモデルは人間のステレオ視で使われる。スラント面の評価は対応問題を解決し局所的なスラントと奥行をまとめ上げることで、局所的プラナーマッチングとよぶモデルである。これまでは両眼間に方向を付けたりあるいはスケール差を付けると明瞭なスラント面を知覚できると考えられてきたが、しかし局所的な構造視差が 3D の方向の評価に直接関係するとも考えられる。したがって位置視差が最初に計算され、後に 3D 面の方向を決定するために結合されるという仮説は排除できない。本研究の目的はそれらも仮説の検証にある。ここでは、実人間とモデル観察者のスラントの識別を参照スラントと各眼のイメージに付加した非対応のホワイトノイズ条件で測定し、各条件の閾値を比較する。

実験で使用したステレオイメージは被験者の眼から 100cm の位置ディスプレイの中心に提示、刺激は中央の小さいテストプレーンと周囲の参照プレーンの 2 面からなる (図 1.17)。テストプレーンと参照プレーンのスラントが両方変えられる (すなわち両面は垂直軸でスラントされる)。3D 空間では矩形の参照プレーンは幅(23 cm)と高さ(16 cm)は固定、その中心は 102cm の位置に配置する。右眼には参照プレーンのスラントに関係なく、その大きさは窓を設け、参照プレーンのスラントが変化時には左眼の窓の大きさは変えた。テストプレーンは参照プレーンの中心に提示した。被験者の課題は中心のテストプレーンが参照プレーンより傾斜しているか否かを手元のダイヤルを操作して判断を求める。図 (C) は、奥行識別実験の上下図で参照プレーンは前額平行、被験者にはスラントテストプレーンが近いか遠いかを尋ねた。被験者にはテストプレーンが参照プレーンより傾いているか問い、その傾きの方向をノブで回して応えさせた。ホワイトノイズは 3 段階 (5%, 17.5%, or 34%) に設定した。コントロール実験は、単眼視条件でのスラントの識別実験、他はテストプレーンの方向ではなく参照プレーンとの間の奥行の弁別実験である。次式は理想観察者のモデルの計算式である。

$$p(\text{" more slanted" }) = \left(\frac{\Delta s - \beta}{2\sigma} \right) \quad (1)$$

(1) 式では、 s は (テストスラントー参照スラント)、 σ は標準偏差パラメータ、 β はバイアスパラメータ (心理測定関数)、標準偏差値は閾値で決定、弁別閾 (d) は s/σ と同等。理想の観察者とほぼ近似した観察者のモデルはテストプレーンの左右眼のイメージを入力して造られた。テストプレーンの領域の左右眼イメージは次の式で記述される (2)、(3)。

$$R(x, y) = R_t(x, y) + R_n(x, y) \quad (2)$$

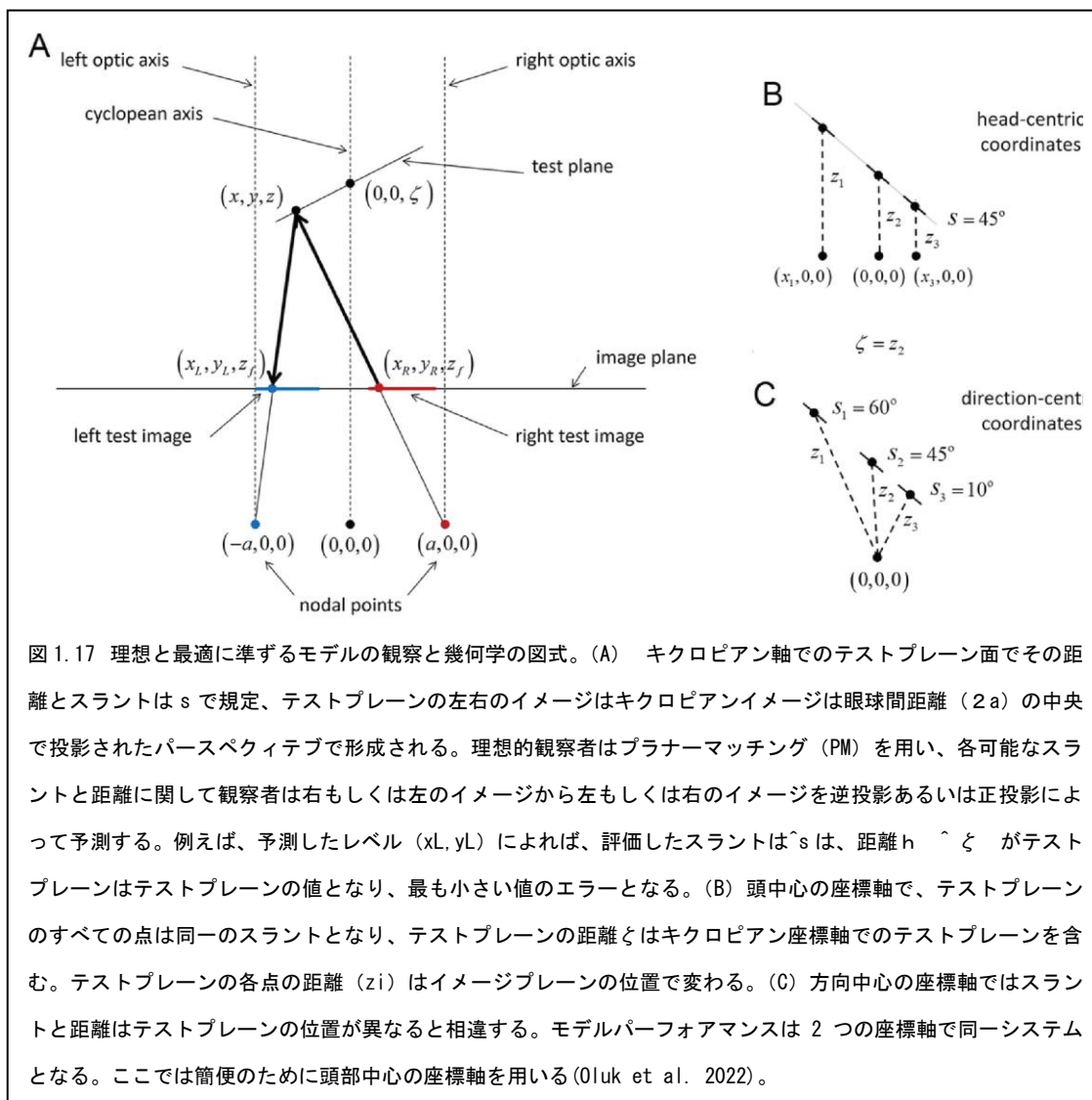


図 1.17 理想と最適に準ずるモデルの観察と幾何学の図式。(A) キクロピアン軸でのテストプレーン面とその距離とスラントは s で規定、テストプレーンの左右のイメージはキクロピアンイメージは眼球間距離 ($2a$) の中央で投影されたパースペクティブで形成される。理想的観察者はプランナーマッチング (PM) を用い、各可能なスラントと距離に関して観察者は右もしくは左のイメージから左もしくは右のイメージを逆投影あるいは正投影によって予測する。例えば、予測したレベル (x_L, y_L) によれば、評価したスラントは \hat{s} は、距離 \hat{h} と $\hat{\zeta}$ がテストプレーンはテストプレーンの値となり、最も小さい値のエラーとなる。(B) 頭中心の座標軸で、テストプレーンのすべての点は同一のスラントとなり、テストプレーンの距離 ζ はキクロピアン座標軸でのテストプレーンを含む。テストプレーンの各点の距離 (z_i) はイメージプレーンの位置で変わる。(C) 方向中心の座標軸ではスラントと距離はテストプレーンの位置が異なると相違する。モデルパフォーマンスは 2 つの座標軸で同一システムとなる。ここでは簡便のために頭部中心の座標軸を用いる (Oluk et al. 2022)。

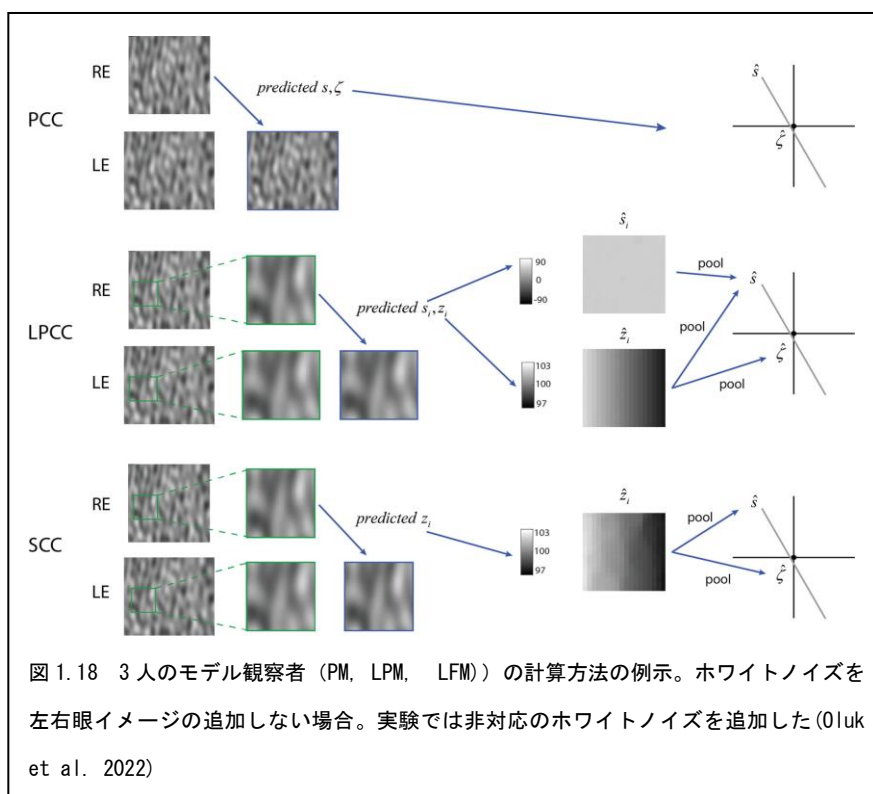
$$L(x, y) = L_t(x, y) + L_n(x, y) \quad (3)$$

ここで、 R_t と L_t は左右眼の 3D テクスチャのサンプルのイメージ、 R_n と L_n は左右眼に付加したホワイトノイズのサンプルである。

図 1.17 には、理想と最適に準ずるモデルの観察と幾何学の図式を示した。図の (A) は、キクロピアン軸でのテストプレーン面で、その距離とスラントは s で規定、テストプレーンの左右のイメージではキクロピアンイメージは眼球間距離 ($2a$) の中央で投影された

パースペクティブで形成されることを示す。理想的観察者はプラナーマッチング (PM) を用い、各可能なスラントと距離に関して観察者は右もしくは左のイメージから左もしくは右のイメージを逆投影あるいは正投影によって予測する。例えば、予測したレベル (xL, yL) によれば、評価したスラント \hat{s} は、距離 $\hat{\zeta}$ がテストプレーンはテストプレーンの値となり、最も小さい値のエラーとなる。図 (B) には、頭中心の座標軸で、テストプレーンのすべての点は同一のスラントとなり、テストプレーンの距離 ζ はキクロピアン座標軸でのテストプレーンを含む。テストプレーンの各点の距離 (z_i) はイメージプレーンの位置で変わること示し、図 (C) には、方向中心の座標軸ではスラントと距離はテストプレーンの位置が異なると相違することを示す。モデルパフォーマンスは 2 つの座標軸で同一システムとなる。ここでは簡便のために頭部中心の座標軸を用いる。図 3 の幾何学に基づくパフォーマンスは一般的なものであるが、モデルの計算は眼球の位置と方向に依拠し、さらにシーンからイメージへの投影を記述する座標軸システムに依拠する。

モデルでは、図 1.18 の上行に示したように、最初の 2 つのイメージではスラントが +



60° で intercept distance が 99 cm の事例を示す。もし評価したスラントと距離が正しければ投影されたイメージは左眼のイメージに近似する。もし評価は非対応ノイズがなければ非常に正確になる。参照プレーンは非対応ノイズを含まないのでそのパラメータはいつも精度よく評価されている。他のモデルでも同様に正しく、

したがって参照プレーンのスラントと距離は明確仮定できる。

局所的プラナーマッチングでは、図 1.19 に示すように、モデル PM でのテスト領域が比較的大きいのですべて一度きに計算で知ることは考えにくい。そこで、適当な広さで比較

的適切なモデルを予測し、各パッチは基本的にテスト領域が局所的パッチにある場合を除いて計算された。

同様に、前額平行面マッチングおよびノイズなどでのモデル作りの方法が実行され、このモデルによって予測された。予測されたスラント弁別閾はモデル観察者のテストプレーンと参照プレーン間のスラントの差の評価値をシミュレートして得た。同様に局所的前額平行マッチングと評価されたノイズなどのモデルが計算で作られた。

モデルの予想は、スラントの予想弁別閾値がモデル観察者の評価によるテストプレーンと参照プレーンの弁別閾値の差をシミュレートすることで得られた。試行ごとにモデル観察者はその閾値の差にもどる。予想閾値を得

るためには、スラント差の評価値がモデル観察者の提供する特定のテストプレーンと参照プレーンを生成する。各条件でフィットしたモデルのスラント差の平均と標準偏差を計算した。それらから内的ノイズとスケールパラメータから仮定されるエラー率を計算した。さらに内的ノイズとスケールパラメータは尤度を最大することによって評価した。予測する閾値はエラー率から計算した。

実験の結果、PM 条件の観察者は LPM と LFM 条件の観察者よりはおよそ $2^\circ \times 2^\circ$ のテストプレーンですべての視差情報を利用できる理由から実質的に良好な結果であった。LPM 条件の観察者は LFM 条件観察者より、とくに大きなパッチとスラントで良好でパッチの大きさやスラント面に影響されなかったために良好な結果を示した。

これらモデルの結果を人間の観察者と比較すると、スラント弁別の閾値は参照プレーンが大きくなると減少、非対応ノイズのレベルが変わると増大した。閾値のパターンは 3 人の人間観察者の間で共通、またコントロール実験では人間観察者の閾値はステレオの手がかりにのみ基づき、奥行距離の弁別よりはスラントの弁別の方が効果的な結果を示した。したがって、3 通りのモデルはおおよそ量的に等しく正確な閾値を予測していた。

実験と考察の結果、ステレオスラントの弁別結果の成績が両眼視差手がかりに基づいてテクスチャ面が精確にレンダリングされた状態で測定された。そこで人間の結果とモデル (PM と LPM) を比較した結果、人間のスラント弁別の閾値のパターンは 3 つのモデルに等しく予測されていることを明らかにした。しかしながら、LFM モデルは最も簡単で単純であるけれども LPM モデルの方ではスラント弁別が実質的に良好だった。これらのモデルをもっと互いに精細にしていくことが求められる。

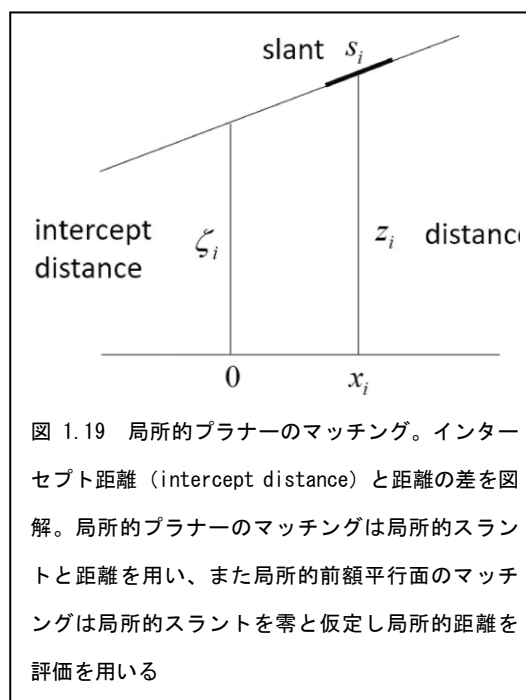


図 1.19 局所的プラナーのマッチング。インターセプト距離 (intercept distance) と距離の差を図解。局所的プラナーのマッチングは局所のスラントと距離を用い、また局所的前額平行面のマッチングは局所のスラントを零と仮定し局所の距離を評価を用いる

自然シーンにおける形状判断：形状凸性とステレオプシス

地面を知覚するためのステレオ立体視は重要であるが、単眼と両眼視条件間で地面のレリーフを知覚する奥行手がかりの役割を実験的に検討する。Hartle et al. (2022)は、両眼立体視した草原を模した地形（グラウンド）の中央にさまざまな高さのマウンド（凸状）あるいは深さの凹みを付けた自然シーンをシミュレートし、このち地面の奥行弁別課題を実験・分析した。

グラウンドの特徴は放射するシンメトリックなガウスの奥行をもつ凹凸立体を中心においてシーンをレンダーして表現した。下記に示した計算できる式(1)による2次元のガウス関数で地形を描いた。ここで、

$$f(x, y) = Ae^{-(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 / 2\sigma^2} \dots \dots \dots (1)$$

A：最大の深さ、 x_0 と y_0 ：中心の位置、
 σ ：0.4mの標準偏差。

両眼間距離 6cm、地上距離 9.1m と仮定すると、相対視差量は 12 から 227secs / arc となり、また地上面は非交差視差に設定された。

各グラウンドのレリーフの高さの陰影条件では、前額平行面の平均輝度は一定に保ち各4種の方向差と包囲光の比率を操作した（図 1.20）。実験装置とシミュレートしたグラウンド刺激(側面)は図 1.21 に示した。観察者位置はスクリーンから 6.1m、頭部位置はスクリーンの中心グラウンドまでの距離は 9.1m に設定した。被験者には 3次元視可能なステレオスコープを装着、その反応はゲームパッドで答えさせた。レリーフの高さの弁別閾値は恒常法（0.15, 0.23, のステップ）が用いられて測定された。レリーフの高さ（深さ）は 10 段階としランダムな順序で各陰影条件 20 回提示した。実験条件は陰影、照射方向、両眼視および単眼視とした。

実験の結果、平均弁別閾値は低照度条件で0.19mそして高照度条件では0.21mとなったが、高照度条件では被験者の約 30%が常に凸状態と知覚していたし、70%の者は少なくとも 0.38m の高さ変化が必要であった。これらの結果は精神物理的関数に適合せず t

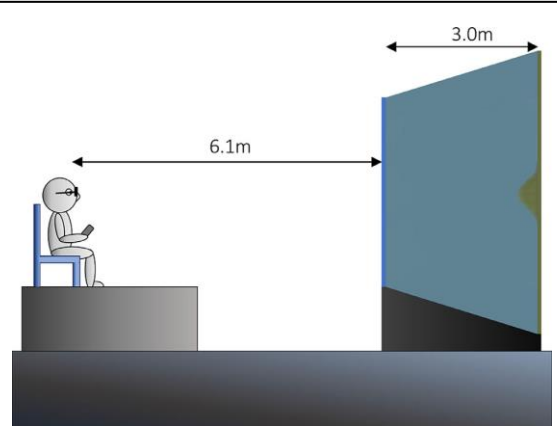
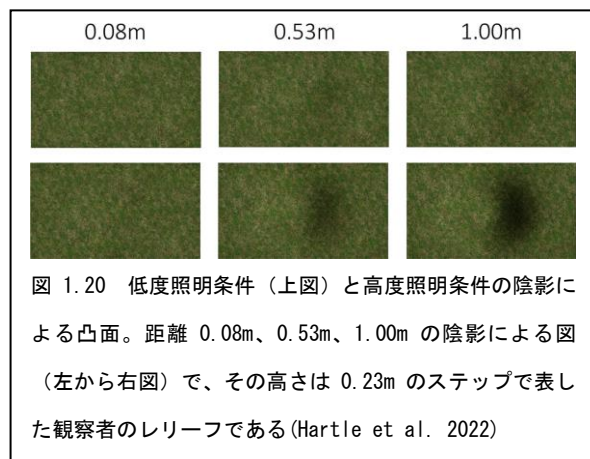


図 1.21 実験装置とシミュレートした地面刺激(側面)。観察者位置はスクリーンから 6.1m、地面までの距離は 9.1m のイメージで設定(Hartle et al. 2022)

検定の結果でも有意差はなかった。しかし両照度条件のバイアスは大きく、標準偏差の範囲は±2.1 JND に達しているため、これは凸状知覚バイアス (CB) と考えられた。そこで被験者を実験結果によってバイアスの強度を 3 段階に分類して統計をとると、陰影手がかりが強度条件で 30% はステレオ立体視条件の凹形状でも凸面が視えると報告し、バイアスがあることを示した。

この結果、地面の凹凸知覚の奥行きがかりについて照射条件 (強、弱) を変えてその効果をしらべたところ、陰影手がかりは平面の凹凸事象で凹状を強く抑制して凸状に視るバイアスがあることを示した。これらの結果から、(1) 地面を視るとき凸状を仮定するという個人差の傾向が有意に高いこと、(2) この傾向は実生活でも凹凸判断に影響しているが奥行きがかりが十分な環境では影響がないこと、などを明らかにした。

ステレオブラインドの経験によるテクスチャのある傾斜面による改善

ステレオ視が不可能な人は両眼視差を 3 次元視の手がかりに用いることができないし、他の手がかりに変えて知覚するのかが不明である。Yang et al. (2022) は、ステレオブラインド (ステレオ視不能者) と可能者でスラント面の弁別と評定課題を両眼視と単眼視条件を用いてその可能性を実験した。

被験者中、ステレオブラインド者 24 名 (14 女性、10 名男性)、健常者は 24 名 (13 女性、11 男性) ですべて Randot ステレオテストを用いて検査、またすべて視力は正常であったがひとり視力が低いので除いた。実験で用いるバーチャルなスラントはパースペクティブが観察できるようにコンピュータで製作し、その面にはポロノイパターンを付けた (図 1.22)。面の傾斜度は低条件 (0, 15, 30 度)、高条件

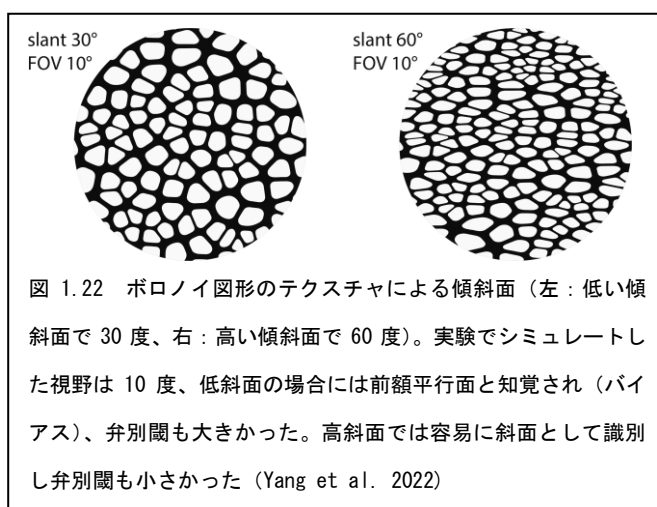


図 1.22 ポロノイ図形のテクスチャによる傾斜面 (左: 低い傾斜面で 30 度、右: 高い傾斜面で 60 度)。実験でシミュレートした視野は 10 度、低斜面の場合には前額平行面と知覚され (バイアス)、弁別閾も大きかった。高斜面では容易に斜面として識別し弁別閾も小さかった (Yang et al. 2022)

(45, 60, 75 度) とし、実験ではランダムに変えた。視野を直径 10 度になるように制限するボードの穴を通して被験者に観察させ、右手に付けた傾斜度測定のためのボードで視えの傾斜度を両眼視で測定した。

実験では最初にステレオブラインドの程度 (奥行き弁別) をテスト (Stereoblindness screening) 後、被験者には継時提示した 2 つの傾斜面のどちらが傾斜角度が大きいかの弁別を問う (図 2)、また傾斜度測定課題では、右手の傾斜度測定装置で角度を測定した。

実験の結果、弁別課題ではテクスチャによる両眼視条件のスラントの弁別値に対してブラインド群はステレオノーマル群とは有意に劣ったが、しかし単眼視条件では両グループ間

に差はなかった。高傾斜度面では、しかしながら、両グループ間と両条件間の有意な差はみられなかった。これはテクスチャの手がかりがステレオ手がかりより効果的な奥行手がかりであるためと考えられる。

スラントの評定実験では両眼視条件は単眼視条件と比較すると、単眼視条件ではステレオノーマル群は傾斜角に伴う測定値の変化がリニアではないのに対して両眼視条件ではほぼリニアに変化した。ブラインド群では傾斜角に伴う変化はリニアではなく手がかり効果はみられなかった。課題間のバイアスを比較するために、スラントの知覚ゲイン（利得）をその評価値から計算したが、ただ評価値をもちいるのに難しいのは個人間の評定法に基づくバイアスを一定のバイアスと正すことが難しいことがあった。そこで前面（0°）は正しく知覚されるとし、前面に対する知覚ゲインを次式で計算した。

$$g(S) = (H(S) - H(0)) / S$$

(S：シミュレートした傾斜角、H(S)：スラントSにマッチした手の方向、H(0)：前面にマッチした手の方向の平均)

この式では、知覚したスラントと評定した手の方向角における一定のバイアスが除去できる。計算の結果、ステレオノーマル群の知覚ゲインは両眼視条件ではスラント知覚は実際の傾斜に近似した。他の条件群は知覚ゲインは前面に近く知覚される場合低く、そしてシミュレートした傾斜面に知覚する場合は増大した。ステレオノーマル群はスラントと観察条件間に有意さがあり、各シミュレートスラントの知覚ゲインも両眼視条件で高く、スラントの傾斜が大きくなるとゲインの差は小さくなることが示された。また、ステレオブラインド群では知覚ゲインは両眼視条件のスラントでのみ高かった。これらの分析から、ステレオブランド群とノーマル群を比較すると、両眼視条件はスラント傾斜角度を正確に知覚し、ブランド群はスラントの傾斜角を過大に知覚するが示された。

実験の結果、ステレオブランド群はノーマル群よりテクスチャの手がかりからの知覚ゲインが大きいことが明らかにされた。ステレオブランド者はスラントの知覚において両眼視差の手がかりが利用可能できるが、両眼視にすることでスラント知覚が利されている。

くとトップダウン理論で、もう一つには経験による情報処理と視覚系の順応に低位のレベルにもとづくボトムアップで説明されている。現在、それらの2つの過程が関与して知覚反転が必然的な起きているが、しかし高度のレベルの認知過程に影響され遅延あるいは促進されて必然的に交替する認知の抗争がおきる。

Zhang & Brascamp(2022)は、トップダウン過程に照準を当て多義的な事態を観察した時の明瞭な知識の影響を検討した。多義的に解釈できる事態での交替反転する能力は明瞭な知識を必要とし観察者に多義的な対象そのものと対象の知覚の間を連想させることが介在すると考えられた。

Zhangらは、観察者の知識がない場合に必然的に反転するアイデアの抗争事態を設定して実験して検討した。実験では多義的な動的刺激を用い、被験者には知覚反転の多義性のあることを隠して報告させた。実験の被験者(800名の学生)に図1.23のような回転する多義的な球体で運動方向が時々交替し知覚される運動刺激(ランダムに配置した白いドット)である。この実験はオンラインで実施し在宅で実施された。実験では、刺激の角度を 3.8° から 4.5° に設定し、また回転はサイン波形(垂直軸をよぎる時最大速度、回転方向はエッジに到達したときに逆転)、回転速度も秒あたり0.2サイクルとした。実験中、被験者には回転する球

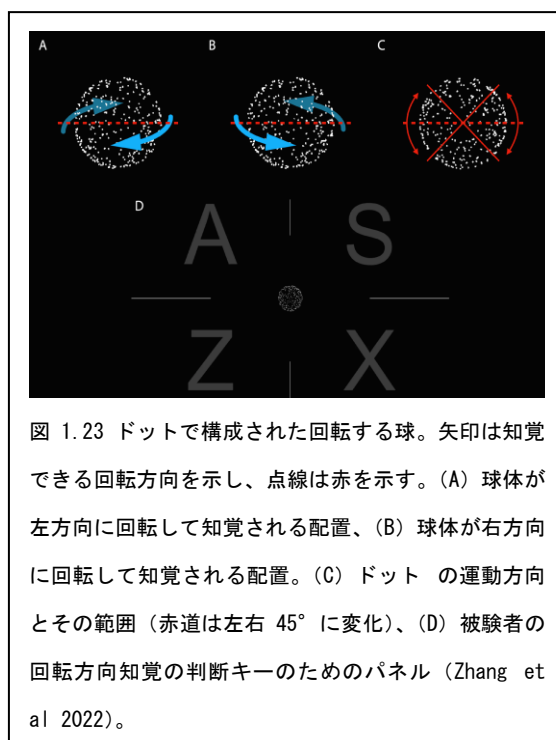


図 1.23 ドットで構成された回転する球。矢印は知覚できる回転方向を示し、点線は赤を示す。(A) 球体が左方向に回転して知覚される配置、(B) 球体が右方向に回転して知覚される配置。(C) ドットの運動方向とその範囲(赤道は左右 45° に変化)、(D) 被験者の回転方向知覚の判断キーのためのパネル(Zhang et al 2022)。

体を注視するように教示し、突然に球体をスクリーンに中心にとどめるがドットは運動を続けさせた。被験者には徐々に変化する回転方向の球体を注視させた。スクリーンに提示した座標軸の4つの欄の当該キーで球体運動の方向変化を押しように求めた。実験に先立ち被験者には球体の見え方が変化することを伝える群(inform)と伝えない群(uninform)を設定した。

この課題で測定する主要な測度は単位時間あたりの知覚反転の回数であり、またその知覚内容の初発持続時間値である。また、球体のスクリーンの4コマ欄ごとの方向変化と知覚した回転方向の反転数をしらべた。多義的な球体を観察し連続して対象の回転方向の報告に与える被験者の実験前と実験後の知識の知覚反転への影響をしらべた。

その結果、最初の知覚反転の時間には有意な知識の影響が無いけれども、その後は知覚反転に影響が有意に示された。実験では、知識を教示されていた実験群は非教示

群より有意に知覚反転し、明確な知識の反転交替の促進があることが示唆された。しかしこの知識の有無の効果は知覚反転に限定的であった。多義的な刺激を知覚する場合にトップダウンとボトムアップの両過程が知覚に関わると考えられる。

運動によるシーン関連対象の奥行知覚

視覚システムの重要な働きは 3 次元構造を 2 次元の網膜像から構成することである。観察者が移動すると網膜に投影されたイメージも動いて潜在的奥行手がかり、運動視差となる。しかし、シーンに関して対象が動けば運動視差による奥行の計算がイメージの動きの要素が加わるために複雑になる。従来の運動視差理論では対象が動くことを想定していなかったため、対象の動きと観察者の移動を考慮する必要がある。

そこで、French & DeAngelis (2022) によって実験では対象がいろいろな速度で静止あるいは運動している場合について注視点からの奥行距離が求められた。図 1.24 にあるように、対象が静止し車が右に動いた場合にはすべて対象は静止、この場合のイメージの速度は 3 次元配置の対象と観察者の動きで決定できる。従って眼球はレンズのためにイメージは逆転して静止対象は注視点より近方となりイメージは右方向になるが、対象は注視点より遠方になりイメージは左方向に

動く(図 b、d)。この場合、注視点からの静止対象の奥行(d)は、網膜イメージ速度($d\theta/dt$)、シーンに対する眼球速度($d\alpha/dt$)および注視距離(f)で計算される(図 1.23b)。シーンの対象は運動追跡法則(motion-pursuit law)によると小さな角度に計算されるので静止対象の奥行距離はイメージの運動からシーンの眼球速度が既知ならば計算できる。

これまで対象の動きは奥行知覚の計算には無視されていた。対象が動きしかも観察者が自ら運動する場合、網膜イメージ(v_{ret})はシーンの中にある対象の動きと観察者自身の運動の両方で決まる(d)。

図 a の移動する車の動きに関するイメージの運動(v_{obj})、観察者の移動のイメージモーションおよび車の奥行位置 v_{self} (d) が構成要素である(図)。運動追跡法則を用いて運動視差から車の奥行距離を精確に計算するためには(1)式によるので、観察者の自己運動のイメージモーション v_{self} を下記式

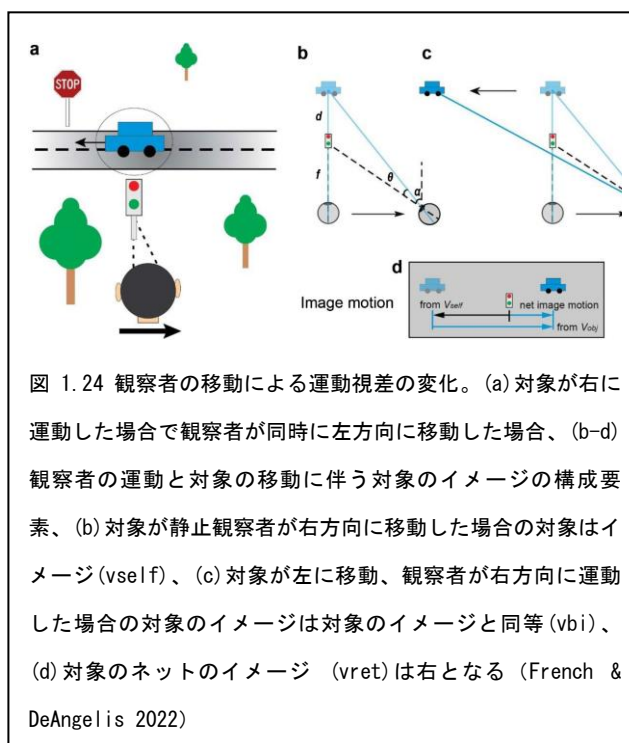


図 1.24 観察者の移動による運動視差の変化。(a) 対象が右に運動した場合で観察者が同時に左方向に移動した場合、(b-d) 観察者の運動と対象の移動に伴う対象のイメージの構成要素、(b) 対象が静止観察者が右方向に移動した場合の対象はイメージ(v_{self})、(c) 対象が左に移動、観察者が右方向に運動した場合の対象のイメージは対象のイメージと同等(v_{bi})、(d) 対象のネットのイメージ (v_{ret}) は右となる (French & DeAngelis 2022)

$$d \approx d\theta / dt / d\alpha / dt * f \quad (1)$$

を用いる一方、対象の運動のイメージモーション v_{obj} を無視することになる。言い換えれば、もし v_{self} をまちがえ、 $d\theta / dt$ の中に v_{obj} を組み入れないと奥行距離の算出も間違えることになる。ここでは、観察者の自己運動とシーンの対象の運動から構成された網膜の速度の解析は、これを用いて運動追跡法 (the motion-pursuit law) によって奥行を評価できる。もしこれら構成要素の解析の流れから異なる網膜速度が得られるならば運動視差 (すなわち v_{self}) からだけで奥行を評価できる。

図 1.25 に示したように、観察者は知覚奥行距離のバイアスを知ることで対象の動きにつながるイメージモーション (v_{obj}) を割り引くことができ、そして奥行を正確に計算できる。もし運動視差以外の手がかりがなければ、 v_{obj} から v_{self} を区別する手がかりがないので、図 (f) の予測のままになる。実験では単眼視条件で明瞭な大きさ手がかりを入れてあるので観察者は v_{obj} から v_{self} を区別できる。またこの実験の両眼視

条件では強力な両眼ディスパリティの手がかりがあり、したがって両眼視条件で減じられる単眼視でのバイアスが得られる。

実験での被験者は成人 6 名で視力は正常。初めにコンピュータの前に座り、観察距離 57cm でディスプレイを観察させた。被験者の眼球運動はアイリンクで追跡され、中心視

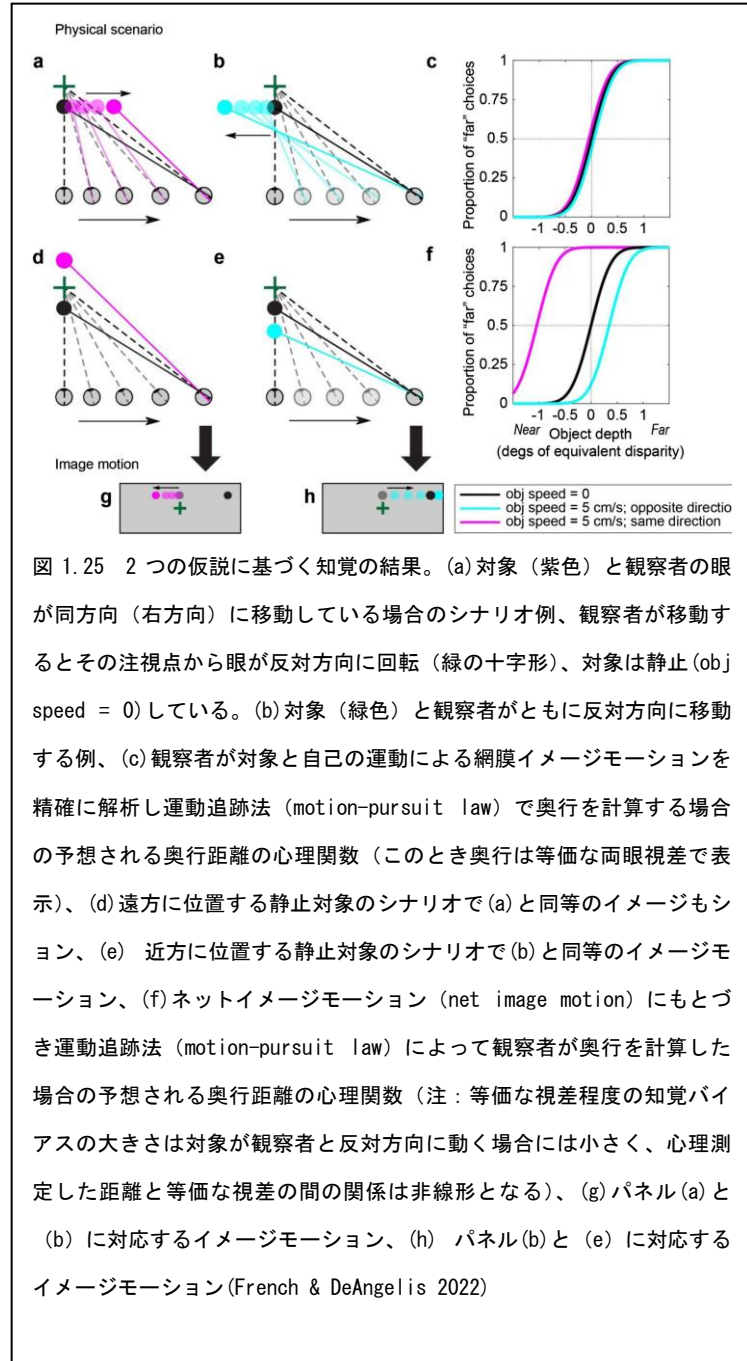


図 1.25 2つの仮説に基づく知覚の結果。(a)対象(紫色)と観察者の眼が同方向(右方向)に移動している場合のシナリオ例、観察者が移動するとその注視点から眼が反対方向に回転(緑の十字形)、対象は静止(obj speed = 0)している。(b)対象(緑色)と観察者がともに反対方向に移動する例、(c)観察者が対象と自己の運動による網膜イメージモーションを正確に解析し運動追跡法(motion-pursuit law)で奥行を計算する場合の予想される奥行距離の心理関数(このとき奥行は等価な両眼視差で表示)、(d)遠方に位置する静止対象のシナリオで(a)と同等のイメージモーション、(e) 近方に位置する静止対象のシナリオで(b)と同等のイメージモーション、(f)ネットイメージモーション(net image motion)にもとづき運動追跡法(motion-pursuit law)によって観察者が奥行を計算した場合の予想される奥行距離の心理関数(注:等価な視差程度の知覚バイアスの大きさは対象が観察者と反対方向に動く場合には小さく、心理測定した距離と等価な視差の間関係は非線形となる)、(g)パネル(a)と(b)に対応するイメージモーション、(h) パネル(b)と(e)に対応するイメージモーション(French & DeAngelis 2022)

(距離 3.57m) の視線が外れたら再試行した。3次元のステレオシーンは赤緑のフィルターを左右眼に装着し、両眼融合が正しいこと、両眼ディスパリティと運動視差が互いにシミュレートして奥行一致していること、さらに輻輳と調節の手がかりも対象の動きにそれぞれが一致していることを確認した。シーン内には 9 個の静止対象を設定し位置と大きさを施行ごとに変えた。観察者の自己運動 (シミュレートしたオプティックフロー) によるフローはガウス関数でシミュレートして横軸にそって設定した。観察するシーンでは当初静止しているが少しずつ動き始める。被験者は注視点に対する対象の奥行を判断させるために注視点を追跡させ、続いて眼を注視点のシミュレートした自己運動の反対方向にスムーズに回転して注視を維持するように教示する。その後に刺激を消して 1.5 秒後に対象が注視点の近くにあるのか、あるいは遠くかをキーで反応させた。実験は単眼視と両眼視条件でトレーニング試行の後にテスト試行を実施した。実験条件は depth (7 段階)、対象の速度 (5 段階)、自己運動速度 (2 段階) であった。テスト試行は常に単眼視条件が両眼視条件に後で試行してバイアスを避けた。

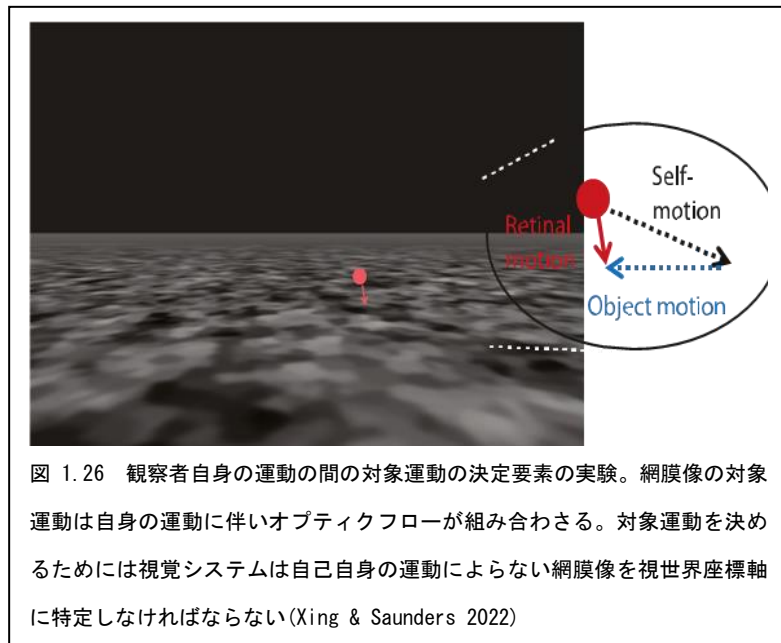
実験の結果、シーンにある対象の運動は単眼視条件の奥行判断でバイアスが強く、被験者は対象が遠いとする判断が観察者自己と合わさって運動対象の速度と動きに比例して逆転して知覚したので、これを対象標識速度 (signed object speed (SOS)) と呼んだ。この SOS は対象と観察者が反対方向に動くとき「遠い」判断が明瞭 (ポジティブ)、同方向だと「近い」判断が示された。そこで奥行の心理測定データを SOS 仮説のよって奥行バイアスを分類すると奥行が「遠い」とする選択に比例して累積ガウス関数が合致した。「遠い」と「近い」を選択した確率から奥行の閾値 (PSE) を算定すると、単眼視条件では被験者は対象と同じ方向に動き網膜速度のみで判断する場合 (negative SOS) には、対象の速度が速いと「遠い」と判断するバイアスが增大すること、さらに被験者が対象と反対方向に動き網膜速度のみで判断する場合 (positive SOS) は、対象の速度が速い場合「近い」と判断するバイアスが增大することが示された。そこですべての被験者の PSE 値を算定すると、SOS の増大につれて単調に増大し、単眼視条件の場合には大きさの手がかりが存在するのに、シーン内の対象が動くときイメージモーションを奥行判断時に追うことができなくなる。両眼視条件の場合ではディスパリティ、運動視差、大きさの手がかりが利用可能であるが、多くの被験者は両眼視条件で対象が自己と同方向に動くとき「遠い」バイアスを、反対方向に動くとき「近い」バイアスを示したが、そのバイアスの程度は単眼視条件の 10 倍以上になった。両眼視条件の PSE と SOS の関係をみるとシーン内の対象のモーションは多くの被験者に奥行判断のバイアスを組織的に両眼ディスパリティが存在しても与えていた。しかし、両眼視条件のバイアスはより小さく、網膜のモーションのみからの予測された奥行量ほどである。さらに眼球追跡ゲインと輻輳角度を分析してみるとシーン内の対象運動による奥行知覚に関してのバイアスには何らの影響が無いことが示された。したがって、この実験ではシーン関連の対象の運動は観察者の自己運動がある間は奥行知覚判断を惑わせるといえる。

観察者自身の動きによる対象運動の知覚—頭部の方向と対象の運動における判断のバイアス

Xing & Saunders (2022)は、対象観察中の頭部方向と独立に動く対象の知覚間の相関について二重課題パラダイム（個人が2つのタスクを同時に実行することを要求する）で対象運動の判断が頭部方向の知覚とバイアスが共に同一の条件で一致し、また試行毎も一致しているかをしらべた。

実験1では、ヘッディング（heading）の方向判断におけるバイアスの条件をしらべ、対象運動の判断がヘッディングの判断のバイアスと一致しているかを検討した。実験2では、視覚的あるいは非視覚的手がかりが抗争的な情報のときに非視覚的手がかりが視覚的

手がかりがある場合と同様に働くかがしらべられた。両実験ではヘッディングの知覚の変数を試行ごとに変えて対象運動の判断のバイアスをしらべた。観察者が動くと網膜上では自己の運動と対象の運動が組み合わされたオプティクスのフローができる（図1.26）。このとき動く対象を捉えるには、視覚システムは自己運動ではない網膜上の動きを識別しなければならない。



手を識別しなければならない。図1.27には、知覚した頭部にバイアスが生じない場合あるいは生じた場合の対象運動の判断の予測が示されている。

実験1では、被験者には中心から±15°自身が動くシミュレーションを観察させてヘッディング方向、および対象のみが左または右方向に動くかを判断させた（図1.28）。実験2では、被験者には視覚と身体の自己運動の手がかりがコンフリクトにある事態でVRの中を歩かせて対象運動を判断させた（図b）。被験者には遠くのターゲットに歩き、別に動いている対象の方向を判断させた。この場合の歩行コントロール条件が視覚的あるいは非視覚的事態で各手がかりの相対的加重の指標を測定した。対象運動の判断は運動対象が静止していると知覚した方向の各手がかりの被験者頻度が用いられた。

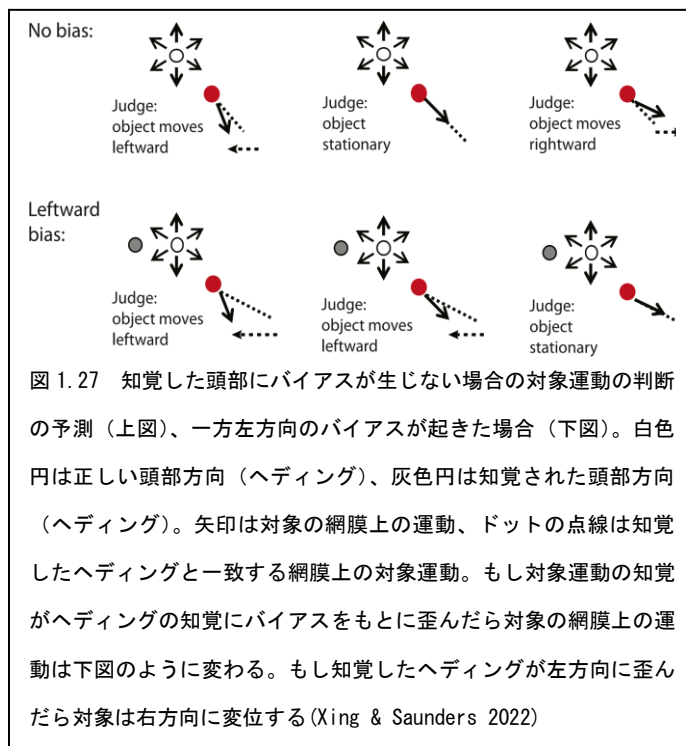
被験者は 24 人の大学の学生が参加し、バーチャルな環境はヘッドマウンドディスプレイを用いて実験した。被験者は 2 つの同時に行う課題をシミュレートされた自己の前方への動きのもとで遂行した。1 m のシミュレートした動きの後で対象運動は 1 秒のあいだ視えていた。この後、被験者には対象が左あるいは右方向のいずれに動いたかの判断を求めた。さらに被験者にはヘッディング方向が問われ、カーソルを動かして示すように教示した。

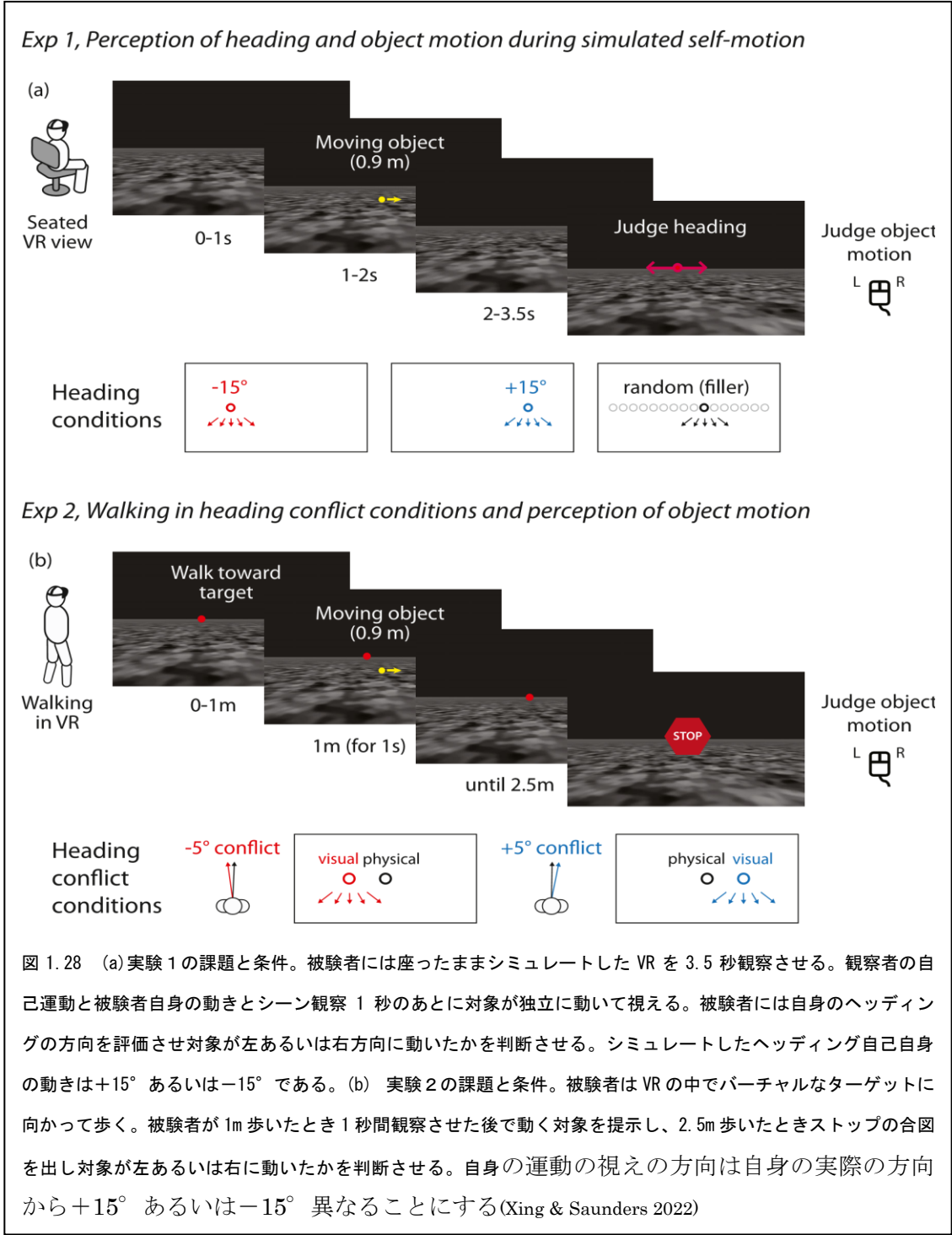
実験 1 の結果、ヘッディング方向の判断は視野の中心にバイアスし、また対象運動はヘッディング

方向と一致するようにバイアスが観察され、その程度は同等だった。しかし設定した 2 つ課題間でバイアスは個人間で全体では一致しなかった。試行ごとではヘッディング方向判断と対象運動の判断の相関をみると対象運動のいくつかとヘッディング方向で予測できた。

実験 2 の結果は実験 1 と同じように、被験者が動いている間の対象運動の判断については、被験者の歩行方向と対象運動の知覚時のコントロールが視覚あるいは非視覚情報に関わらずに同様だった。また試行ごとではヘッディング方向判断の変化は対象運動のバイアスと関連した。視覚と身体の自己運動の手がかりが抗争しているバーチャルな事態で被験者がターゲットに向かって歩き、対象運動とは別々に判断した。二つの課題条件において視覚と非視覚情報の平均的加重値を求めた残余変数をしらべると、その間に相関があった。両課題で加重係数と相関係数が同様なことは、対象運動の知覚がヘッディング知覚と共通の過程であると示唆された。

本実験では、ヘッディング知覚と対象運動の知覚は、両知覚が視野の中心方向のバイアス傾向、視覚と非視覚の手がかりはそれらを組合せて用いること、そしてヘッディングエラーは対象運動の判断に試行毎に予測的に変わることが結論された。これらの結果から自己運動と対象運動の知覚は共通する過程があると示唆される。





3. 奥行距離の知覚

環境の異なる条件（インドア、アウトドア、暗室）での奥行距離の測定

Dukes et al. (2022) は、これまでの研究より精細に環境文脈（インドア、アウトドア、暗室）を変えて、観察者から対象までの知覚距離（絶対奥行距離）を測定した。実験 1 の目的は視的環境文脈を変えた条件での奥行距離知覚の変容を、実験 2 では単眼と両眼視の可能な効果を考察した。これは両眼視差が明室環境より暗室環境の方が奥行知覚に効果が高く、また単眼視条件の暗室環境では手がかりが少ないと考えられたためである。しかし視差以外には多くの手がかりがあり、その場合には視差は重要な手がかりでは無いと考えられる。実験は各環境条件で 2 等分割法 (bisection task) で被験者 (4 人) に自分のいる位置からターゲット (ポール) までの奥行距離を等分に 2 分割する位置を実験者に指示したインドア条件は実験室、アウトドア条件は草地、暗室条件は暗い部屋とし、両眼視と単眼視でランダムに実施し、初めのポールは 8 m の位置に置いた。

実験の結果、アウトドアでは遠方ほど収縮して奥行距離が知覚され、反対にインドアでは遠方が拡大して知覚され、これには有意な差が示された。この差は主にリニアパースペクティブ (線分の輻輳) が有るかあるいはあまり無いかに関わる。

そこで実験 2 ではリニアパースペクティブをある場合と無い場合 (暗室空間に (四方に点光源を設置してパースペクティブ) 操作してアウトドア (奥内廊下) とインドア (キャンパス草原) で絶対奥行距離を測定した。被験者は 9 名で内 4 名は実験 1 と同じ。

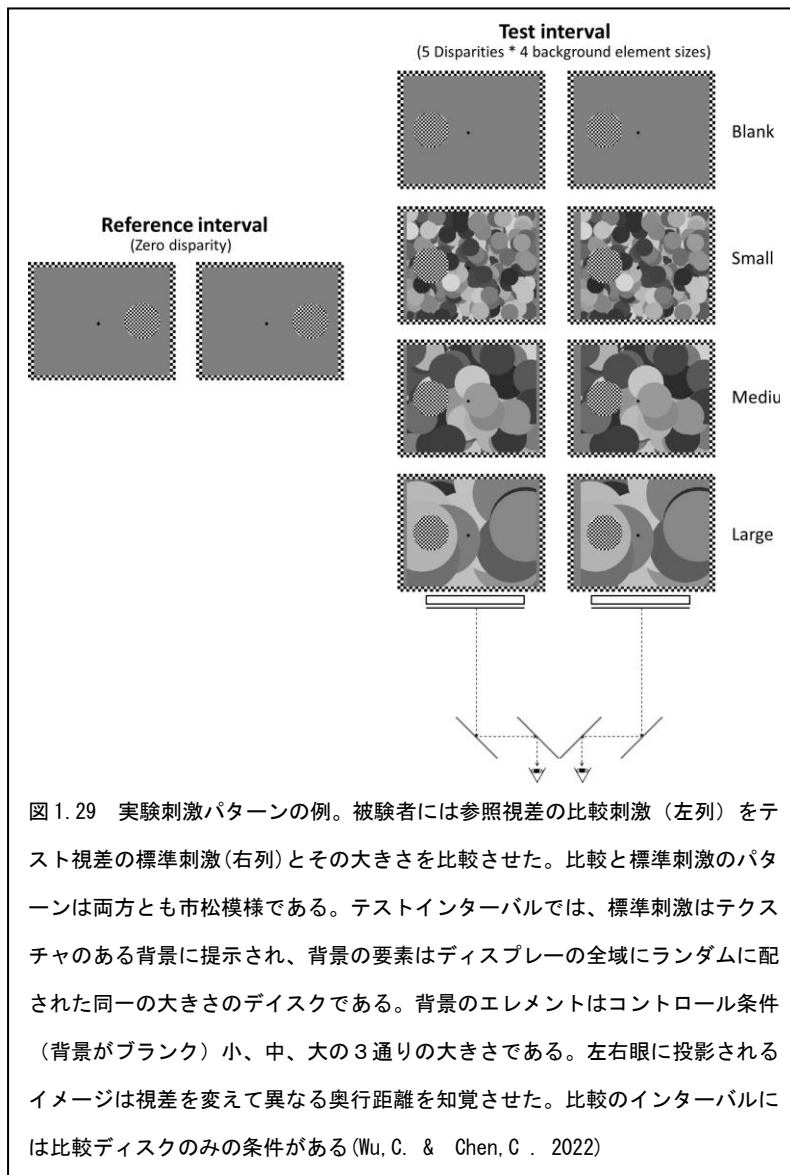
実験 2 の結果、アウトドアとインドアともにリニアパースペクティブ条件では遠方の距離の知覚的拡大が示された。しかし、奥行知覚距離の正確度はパースペクティブのあるなしに関わらずに両条件とも過大視された。

両実験の結果、奥行知覚の正確さと精密さは環境文脈や両眼視差とリニアパースペクティブの手がかりによって変容する。

奥行距離と大きさに及ぼすテクスチャ背景の効果

知覚した大きさは 2 次元あるいは 3 次元という空間的文脈だけではなく網膜の投影像と知覚した奥行距離に影響されるが、その要因はいまだ解明されていない。そこで Wu & Chen (2022) は、投影された大きさに対する知覚奥行距離とその背景要素の大きさの文脈の効果について両眼視差を変化させてステレオスコープで実験した。実験では知覚するターゲットの大きさを知覚奥行距離と空間条件をそれぞれ設定して提示、標準刺激をテクスチャのある背景に置き比較刺激をブランクの背景に置いてどちらが大きいのか 2 刺激強制選択法で答えさせて測定した。

図 1.29 のように、被験者には一定の視差をもつ比較刺激 (左列) を提示しテスト視差の標準刺激 (右列) とその大きさを比較させた。比較と標準刺激のパターンは両方とも市松模様である。実験は標準刺激の後で比較刺激を時差 (インターバル) を設けて提示、比較刺激はテクスチャのある背景に提示され、背景の要素はディスプレイの全域にランダムに



配された同じ大きさをもつディスクである。背景の要素はコントロール条件（背景がblank）を除き小、中、大の3通りの大きさとした。左右眼に投影される比較刺激のイメージは視差を変えて提示し異なる奥行距離を知覚させた。各試行は 600ms の刺激間隔 (ISI) をおいて 500ms の刺激インターバルを 2 回設けてその後被験者には応えさせた。試行では 2 通りのインターバルをランダムにとりテスト刺激と比較刺激が提示された。スクリーンにはフレームと注視点を提示し、被験者には 2 通りのインターバルをとるなかでどれが大きなディスクを持つかを完全上下法で判断させ、主観的等価値を測定、ターゲットの知覚さ

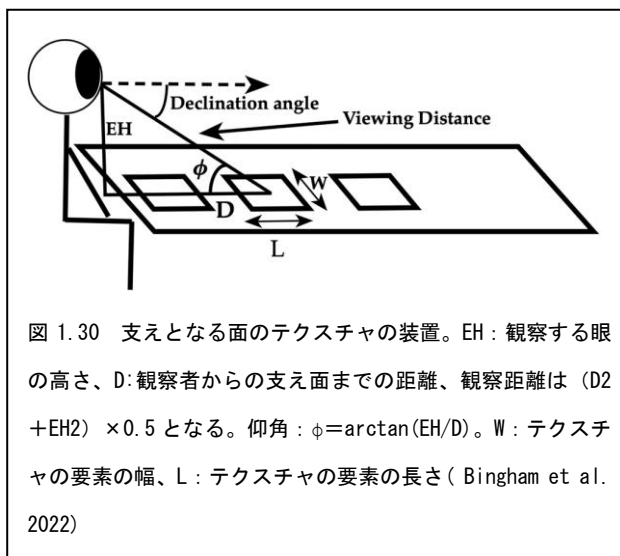
れた大きさが知覚的奥行にともなってどのように変化するか、さらに空間文脈が知覚的大きさと知覚的奥行距離の間を実験の結果、ターゲットの大きさでの 2 次元面（ゼロ視差）での影響は、PSE による比較刺激の知覚的大きさでみると、背景の要素の大きさが大きくなるとスムーズに小さく変わることが示された。知覚されたターゲットの大きさの変化率はターゲットの大きさの 0.273% でエビングハウス錯視とほぼ等しく、背景ディスクの大きさの影響はみられなかった。また、背景の大きさと視差をそれぞれ変えた条件の知覚された大きさの平均値は、背景の要素が大きく、かつ視差が大きくなるにつれてリニアに増大することが有意に示された。この二つの空間文脈（2次元と3次元）の知覚的大きさ値の間に有意さが有り、空間文脈はターゲットの大きさ知覚に影響することを示した。これらの結果から、ターゲットの知覚的大きさは背景要素が大きくなると減少し、視差が大きく

なると増大することが示され、この結果に基づいて計算機的モデルによる説明が検討された。そのモデルは視差によって変調したいくつかの大きさ選択チャンネルを統合している。各チャンネルのターゲットからの反応は空間文脈情報からの明瞭なシグナルを受けるので、知覚した大きさはそれらチャンネルからの加重平均値で決定される。このモデルに基づくと得られた平均のデータは 91%以上の可変性があり、したがって知覚する奥行距離とコンテキストに影響された対象の大きさとともに異なるメカニズムで担われ、したがって知覚した奥行距離とターゲットの知覚的大きさは、視差に変調された背景刺激の大きさによる抑制の相互作用を受けて決まると考えられる。

単眼視のリーチングによる奥行相対距離におけるテクスチャの特性

ものに手を届くためには単眼あるいは両眼視条件ともにオプティカルなテクスチャが対象を支える面上にある場合は、それらを利用しすばやくそして正確にできる。Bingham et al. (2022)は、観察者からの奥行距離を知覚するためにオプティカルテクスチャのどの要素（イメージの幅、高さ、形状など）が用いられるのかしらべた。

実験装置は図 1.30 に示したもので、手によるリーチングの床面上のテクスチャの影響をしらべる装置である。装置の構造の仕様は以下であった。EH：観察する眼の高さ、D：観察者からの支え面までの距離、したがって観察距離は $(D^2 + EH^2) \times 0.5$ となる。仰角： $\phi = \arctan(EH/D)$ 、W：テクスチャの要素の幅、L：テクスチャの要素の長さ。この異なるテクスチャに関わる観察実験でのファクターは、一つには観察距離、他は視線とテクスチャ面との間の光学的角度 ϕ である。テクスチャイメージの高さは観察距離と ϕ の逆関数となり、またテクスチャのイメージの形は、イメージの高さの比、イメージ幅、 ϕ ($\sin(\phi)$) になる。



この実験では、観察者がファクターの観察距離と ϕ のいずれか、あるいは両方を用いて奥行距離を単眼視条件で知覚しているかを検討した。このリーチングタスクは対象としている問題を、厳密に解析解が求められる問題に小さな「ずれ」(摂動項) が加えられた問題と見なすことで近似解を求める摂動法で求めた。この手法によれば被験者がすべての可能な刺激特性を用いているかを識別できる。ターゲットは右側のテクスチャ面に奥行距離を変えて提示し、左側のテクスチャ面のターゲット距離までに手を置くように被験者に求めた。

実験の手続きでは、左側にテクスチャ面が提示され、右側に提示したターゲット距離に手を用いて届くように求め、どのテクスチャ面で被験者のゆらぎが起きるかを識別した。

実験 1 では被験者はジョイスティックを用いてバーチャルな環境に手のアバターを動かしてターゲットまでリーチさせる。実験 2 では、被験者はバーチャルな条件と同等な実際の環境で実験 1 と同等にリーチを実施した。

実験結果は EH の揺らぎの関数として各テクスチャのリーチを次の公式で予測した (P は左右側の面の高さで左側 EH の百分率、TD はターゲットの距離)。

Optical image width の RD(reach distance)は以下の公式で計算：

$$\sqrt{RD} = \frac{TD^2 + EH^2(2p - p^2)}{2EH}$$

イメージの高さ (Optical image height)：

$$\sqrt{RD} = \frac{TD^2(1 - p) + EH^2(p - p^2)}{2EH}$$

純粹な遠近率 (Pure foreshortening)：

$$\sqrt{RD} = TD(1 - p)$$

で計算される。

もし被験者がターゲットのある面の位置に正しく手でリーチすれば、それは右側の高さが高くなるにつれてオーバーシュートになる。すなわち観察距離を正しくするためには被験者はさらに遠くにリーチしそして EH の値にしたがってどのくらい遠くに知覚しなければならないかを示す。テクスチャが正方形の場合、その形状はあるいは遠近法による形状は光角の関数となり、もし被験者が正しい遠近法に従いリーチをするためには右側の高さが高くなると少しずつ短くシュートしなければならない。テクスチャの高さは観察距離と光角で決まるのでリーチにマッチするためのその高さは観察者の EH とターゲット距離で予測できる。したがって眼の高さが小さい (~15 cm) とシュートが短くなり、大きい (~50 cm) とシュートが近い距離では長くなり、短い距離では大きくなる。

実験装置 (図 1.31) 内で空間は半分に仕切られ左側にはターゲット (大きさ一定の矩形面) が直角に提示、手の代わりになるイメージアバターの大きさは 7 段階 (8 × 14 cm, 11 × 7 cm, 14 × 11 cm, 9 × 12 cm, 7 × 11 cm, 13 × 9 cm, and 14 × 11cm) の中からランダムに選んで提示した。ターゲットと手のアバターとなる面の

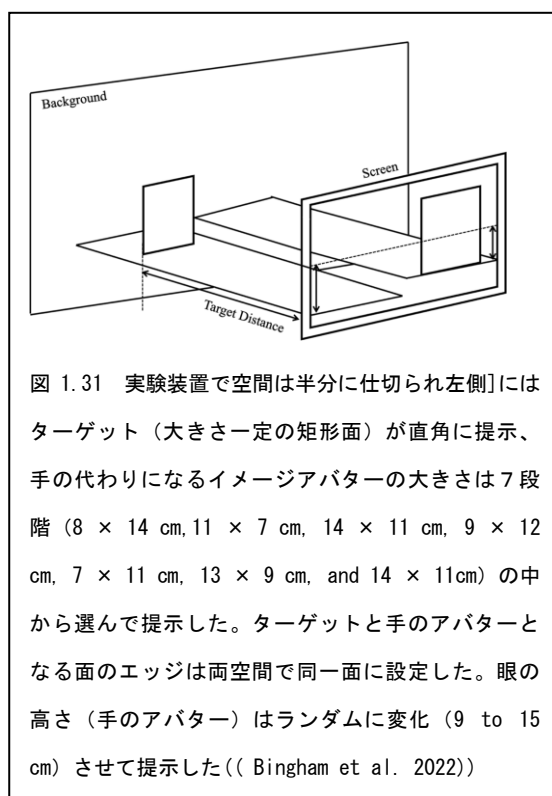


図 1.31 実験装置で空間は半分に仕切られ左側にはターゲット (大きさ一定の矩形面) が直角に提示、手の代わりになるイメージアバターの大きさは 7 段階 (8 × 14 cm, 11 × 7 cm, 14 × 11 cm, 9 × 12 cm, 7 × 11 cm, 13 × 9 cm, and 14 × 11cm) の中から選んで提示した。ターゲットと手のアバターとなる面のエッジは両空間で同一面に設定した。眼の高さ (手のアバター) はランダムに変化 (9 to 15 cm) させて提示した ((Bingham et al. 2022))

エッジは両空間で同一面に設定した。眼の高さ（手のアバター）はランダムに変化（9 to 15 cm）させて提示した。

被験者は10人（18から35歳）で右手が利き手の成人である。被験者には実験台にチェンレストを用いて座らせコンピュータスクリーンに手を置いてから単眼で観察させ、ジョイスティックを操作してターゲット面の奥行距離(20, 45, 60 cm)に調整させた。

手のアバターの動作軌跡が記録されターゲットまでの9通りの奥行距離リーチの平均が面の高さ条件（0, 2, 4, 6cm）ごとに集計された。その結果、リーチによる奥行距離の測定結果は奥行距離が遠くなるにつれてリニアに増大し、眼の高さが大きくなるにつれて有意に減少した。また、眼の高さによる奥行距離の過小およびイメージの大きさによるリーチの影響は示されなかったし、面の高さによる揺らぎは等しく予測されていた。

したがって、イメージの大きさはリーチすることには影響しないが、イメージの高さは距離リーチのゆらぎには関係する。しかしイメージの高さとリーチの縮小の間の影響は不明であった。

実験2では、実験1を実際の環境で試行し、リーチのEHを50cmにして形状の大きさが異なるテクスチャを右と左の面にそれぞれ施して実施した。左右の奥行距離間のリーチのマッチ差を予測する公式（p：左と右面間の高さの比、s：両面間のテクスチャの大きさの比）はつぎのようになる。

イメージの大きさ：

$$\sqrt{RD} = \frac{TD(s^2) + EH(2p - p^2 + s^2 - 1)}{2}$$

イメージの高さ：

$$\sqrt{RD} = \frac{TD(s - ps) + EH(2p - p^2 - ps + s - 1)}{2}$$

この公式では奥行距離の純粋な縮小はテクスチャの大きさには影響されないし、面のテクスチャの大きさ減によるリーチの揺れの影響はリーチの距離を縮小すると予測される。その代わりに、左空間のテクスチャの大きさが大になるとリーチ距離の予測値を高める。もし仮に奥行距離の縮小がリーチによるマッチングに用いられるとこの揺れの影響はないことになる。

被験者は中国の大学生4名で男性（18—25歳齢）。装置は図1.32に示したような左と右側の大きさが異なるテクスチャ、右側は小さいテクスチャ。テクスチャの大きさは左側が2cm一定、右側は1あるいは3cmのいずれか、そして高さの差は0 cm, 5 cm, 10 cm, or



図 1.32 実験装置の左と右側の大きさが異なるテクスチャで右側は小さいテクスチャ。テクスチャの大きさは左側が 2cm 一定、右側は 1 あるいは 3cm のいずれかとした (Bingham et al. 2022)

15 cm (EH : 0.0, 0.1, 0.2, or 0.3)とした。被験者の人差し指には3次元センサーを装着し、ターゲットの面へのリーチ位置を測定し奥行距離値を得た。

実験 2 の結果、ターゲットの奥行距離は面の高さによって有意差があるが、テクスチャの大きさに有意差はなかった。リーチの奥行距離は左右側の面の高さが変わると漸進的に減少した。また、リーチの平均距離は面の各高さの予測値（回帰値）と一致した。

結局、テクスチャ面からの光学的要素が単眼視においてターゲットと観察者の間の奥行距離を手のリーチ方法で測定した結果、リーチによる奥行距離の知覚は観察事態の幾何学で予測でき、イメージの大きさ、高さ、形状によっては異なること、実験 2 の結果でも同様なことが示され、視覚運動リーチングのモデルが妥当することが示された。

3. 絵画的要因の3次元視

錯視現象のもうひとつの考え

Rogers. B (2022)は錯視がどのように起きるかについてこれまでの研究成果のもとづいて考察した。これまでの見解は現実と知覚したことのミスマッチと理解されていた。しかしその考え方は適切ではない。それは第1に錯視 (illusion) を真実 (veridical) のことにしたこと、第2には錯視事態が眼に投影されたもう一つの現実的事態のコピー (facsimiles) と見なしたこと (これでは現実事態をしらべて類似したものを検討できなくなる)、第3に線分、ドット、格子パターン (grating pattern) などを不十分で適切でない方法、例えばタキストスコープ、制限視野、2次元絵画、隔離手がかり、そして暗視野などの制限された事態ではリアルな知覚特性はほとんど得られない。

従ってRogers. Bは、恒常性、閾値、順応のような特定される知覚のように十分な説明をすれば錯視と言わず知覚システムの結果といえるようになると論じている。

水平-垂直錯視 (HVI) における矩形と階段の描画の高さを過大視する第2順位 (Second-order) のテクスチャグレイテング (grating)

水平-垂直錯視 (HVI) は階段状パターンの知覚高さを増すと転倒の原因と考えられていた Toe clearance のために描画を変えることが提案されている (Schofield 2022)。輝度コントラストの高い垂トライブは錯視効果を増すために接合部のTジャンクションに隣接する直のする水平エッジの輝度による階段の高さを高めるために置かれるのが通常である。そこで、いくつかのHVI錯視の図形が考えられ、輝度グレーティング (L)、第2順位のコントラスト変化 (CM)、空間周波数 (FM) と方向 (OM) として錯視量が操作された。実験では被験者には面矩形、調整してない矩形や線形矩形で輝度やパターンのグレーティングを変え、その視かけの高さを比較することを求めた。

実験1ではストライプパターンとモジュール非変換パターンのテクスチャ条件で階段と矩形による誘導効果の知覚的高さが比較検討

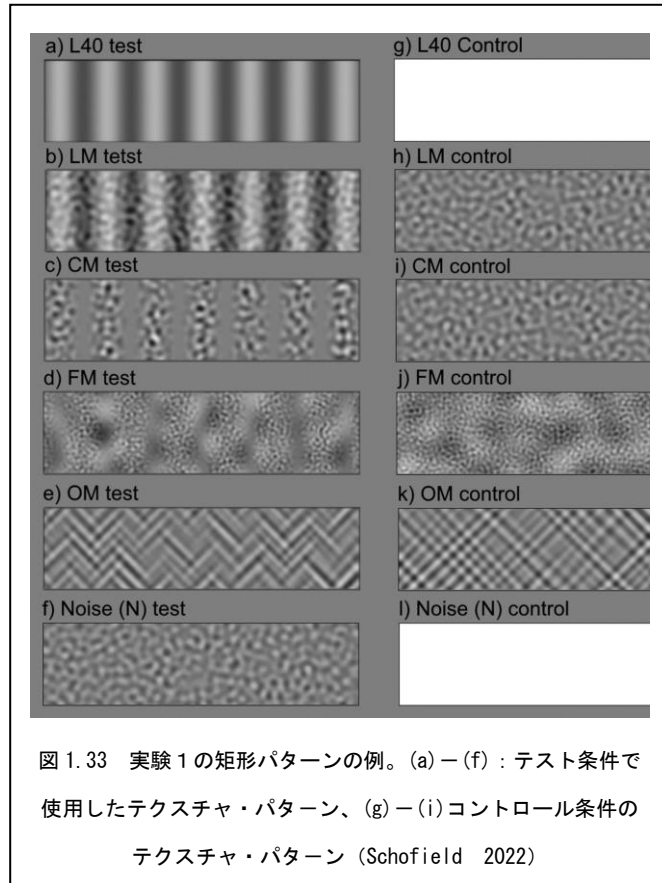


図 1.33 実験1の矩形パターンの例。(a) - (f) : テスト条件で使用したテクスチャ・パターン、(g) - (i) コントロール条件のテクスチャ・パターン (Schofield 2022)

された。被験者には、図 1.33 と図 1.34 のパターンを提示し 6 種類のテクスチャ条件 [luminance stripes at 40% contrast (L40: 図 a), luminance stripes added to visual noise (LM: 図 b), contrast modulated visual noise (CM: 図 c), frequency modulated noise (FM: 図 d), orientation modulated noise (OM: 図 e), and an unmodulated noise pattern (N: 図 f) およびコントロールパターンで階段と矩形の視えの高さを統制条件パターン { (L40 & N: 図 g & 1) あるいは (LM, CM, FM, & OM: 図 h-k) } と並列に並べて提示し、2 段階の時間差を置き選択させた。

テスト刺激のテクスチャとコントラスト輝度からは、図 1.33 と図 1.34 に示すようにテクスチャを関連する特性に従って空間周波数がサイン波的にモジュレートし、またテクスチャコントラストはモニター面の平均的輝度と刺激輝度を変えて作成し提示した。実験では被験者の視力を矯正した後 2 選択強制法でどちらの刺激パターンが高いかを選択させた。テスト刺激 (6 cm or 2.15 deg high) と比較刺激 (3.6 - 8.3 cm; 1.3 - 2.97 deg から 11 段階 high) は、常にテクスチャ条件、他は非モジュレートあるいはコントロール刺激とした。このテストと比較刺激の組合せは 220 回であった。被験者には継時的に提示したにテストと比較刺激のどちらが高く見えるかを問うた。被験者は成人 18 名。

その結果、比較刺激に対する閾値が求められ輝度条件のグレーティングと同様に第 2 順位のテクスチャのモジュレーションのコントラストは、HVI 錯視が誘導されることを示した。第 2 順位のその他のモジュレーション条件では錯視が生じなかった。また、階段図形では空間周波数を付したストライプの輝度変化条件では HIV 錯視は生じないことも示された。

実験 1 では、コントロール刺激のサイン波形空間数のモジュレーション条件が弱く、図形のエッジの輝度が高くさらにテクスチャが非モジュール、しかも矩形の中が空白のために錯視を起きないように強

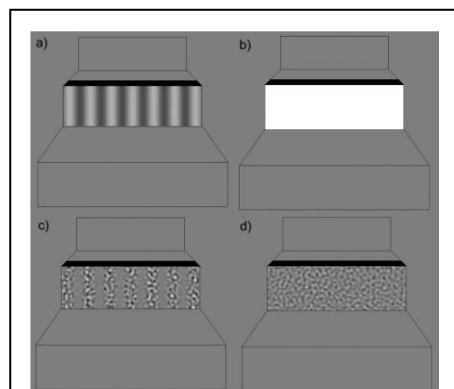


図 1.34 実験 1 の刺激パターン例、a) 刺激輝度 (L40) のテスト刺激、b) 輝度 (L40) のコントロール刺激、c) CM テスト刺激、d) CM コントロール刺激。これ以外の階段刺激はストとコントロールテクスチャから作成した (Schofield 2022)

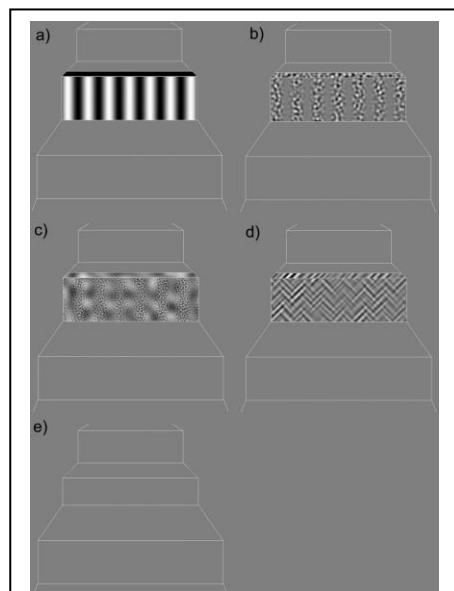


図 1.35 実験 2 の階段状の刺激パターン例。(a) テスト刺激 L100)、(b) テスト刺激 CM、(c) テスト刺激 (FM)、(d) テスト刺激 (OM)、(e) コントロール刺激 (Schofield 2022)

めたと考えられた。そこでエッジの高輝度を高めた条件と暗い輝度のエッジ条件で錯視量を実験した（実験 2）。図 1.35 のように、階段状の 4 種類のテクスチャパターン（CM：非モジュレートノイズ、FM：低空間周波数、OM：45° のガボールパターン）とコントロール条件で視えの高さが測定された。被験者には矩形の高さを判断させる矢印を提示させ視えの高さを該当する矢印を判断させた。被験者 10 名。実験 2 の結果、モジュレートしたテクスチャの矩形は線形だけの刺激に対しすべての矩形で HVI の錯視量が高かった。この結果は非モジュレートの空白の矩形でも高さ錯視が起きることを示した。

そこで、実験 3 では残る課題である矩形をかたどる輝度の弱い線分の錯視に対する阻害があるかを検討した。階段パターンは明るいエッジと上階段の間の輪郭が薄い白線で描写してあるが、連続状の階段には線分が描かれていない。被験者は 11 人。

実験 3 の結果、第 2 順位のテクスチャパターンのコントラスト（CM）と方向（OM）のモジュレーションは階段の視えの高さを、エッジが共に明るい場合、あるいは明るくなくしかもテクスチャのない階段と比較した場合には錯視が誘導された。輝度のモジュレーションの条件でもこの結果は同様に強い錯視を誘導した。結局、階段板状のストライプはエッジの明るさと結びついているならば錯視を妨げることはない。錯視はすべての第 2 順位の手がかりで妨げられた。そして階段板と明るいエッジ間に狭い線分（.013 deg）がある場合には輝度が弱まること示された。

この実験は、第 2 順位のコントラストの手がかりが HVI 錯視を誘導できるかのテストのために、実験 1 と 2 では輝度と各種の第 2 順位の手がかり効果を変えて描画で表現された HVI の階段と矩形の高さの視えの高さを比較する実験であった。これらの実験では、錯視のコントラストや方向を変えられた刺激が矩形に階段や矩形の錯視に組み付けられない場合、あるいは輝度の縞状テクスチャがもちいられている場合にさえ影響することが示された。さらに実験 3 では、より高くそして輝度がエッジ明るさの要素で構成された狭い線図形でも錯視を妨げることなく、したがって階段の隣接部分が錯視の重要性を示し、さらにコントラストと方向が変化された HVI 錯視階段を誘導した。これらの実験から錯視の照明の方法は精確な刺激の構成に関与することを示唆している。

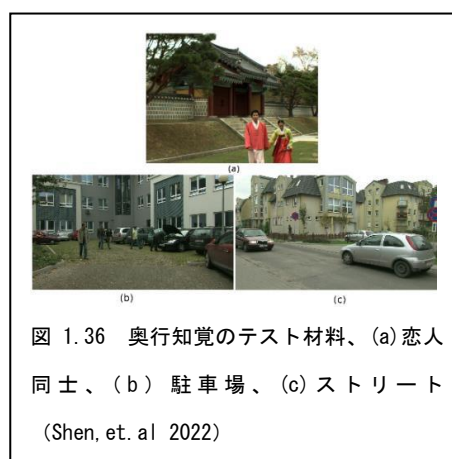
これらの実験の結果、第 2 順位のモジュレーションから構成された垂直グレーティングテクスチャは、模様のない面をもつ矩形あるいは線形だけの階段の図形では錯視が誘導されるが、輝度グレーティングの条件では強くあるいは信頼できる錯視は誘導されないことが示された。コントラストモジュレーションの第 2 順位の手がかりがこの錯視にはもっとも強い。方向のモジュレーションは、錯視を生じるが、しかしこれは第 2 順位のためかあるいは第 1 順位のためかはさらに検討がいる。階段状の図形では垂直線分と明るい T 線分箇所間の薄い線分は錯視を妨げた。矩形と階段図形の錯視はそれぞれ別のメカニズムかもしれない。

固定視点における没入型の視野の知覚特徴でのフォービエーション (Foveation : 広角中心筒視覚センサは画像の視野の中央を拡大し, 一方で視野の周辺を縮小) と奥行の分析

バーチャルリアリティ (VR) のデバイスは急速に開発されているが、そのために多次元のデータは大量となり豊富で大きな経験を生み出す。鮮明な VR の世界を構成するためには高度の解像度の内容が必要となる。ハードウェアには限界もあるので効果的なデータの圧縮がこの現代に生み出された装置のディレンマを解決する一つの手段である。この研究では対応する手段として視知覚に対して圧縮の仮説、すなわち固定視点からのビデオの内容を提示し、その主観的評価を説明する仮説を立てた (Shen, et. al 2022)。実験では奥行知覚に関係したボケを混入した各種のビデオシリーズを作成し急速に周辺視力を消失させた。被験者にはそのビデオのボケの強度を変えて両眼視させ、主観的に視ている環境を評価させた。

実験にあたっての仮説は、大量の視知覚内容を圧縮できる視覚特性の重要性を評価し、豊富な環境にある知覚の特質を探るために連続して遂行するビデオシリーズを作成することであり、そのために提案する仮説のひとつは奥行知覚に関するもので、他の一つは中心視に関するものである。奥行知覚に関する仮説は大量のビデオでは対象の距離が近い場合、ボケによる歪みが前面に出て見えるので主観的にはビデオの質に強く影響し、その歪みが距離が離れるほどより強くなりビデオの質がより悪くなる。中心視に関する仮説では、網膜の中心窩に高度な視細胞が分布しているのでビデオの質に影響が大きいために歪みがそれら視る重要なポイントに近いと主観的質は悪くなる。この第 2 の仮説はその領域に歪みが高いとビデオの質は悪くなるだろうというものである。

実験では被験者の主観的意見評価 (MOS) に基づきより良いビデオ圧縮を目指す。その初めに奥行のマップを用い、図 1.36 (恋人、駐車場、ストリート) に示すようにシーンの前景と後景に切り分けてそれぞれ 4 段階のボケと歪みを導入したビデオシリーズを実験群とコントロール群に評価させ仮説の検証をした。奥行に基づいて歪みを導入するために、2 つの領域に異なる色づけそれぞれ奥行地図の情報を与えて閾値の根拠とした。背景の場合、最大の歪みを一番端の位置に最低の奥行値を割り当て、徐々に前になるほどガウス関数にしたがって歪みを縮小し、一方前景に対してもこの方法で歪みをかけた。圧縮は客観的な質 (PSNR) をコントロールして用いた。



中心窩に関する仮説では、網膜の中心では大きな影響をビデオの主観的な質に関わるので歪みが中心点に近づくほど主観的質は良くなり、中心点からの離れると歪みが悪くなり、図 1.37 のように中心窩の感受性は変わる。

中心窩に関する実験のビデオの作成では、ビデオの中心を中心窩にして興味を惹きつけ、次に Space Variant Imaging System (SVIS) (中心窩の感受性にもとづくボケの歪みをたすけるモデル) を利用してすべての方向の感受性を等価にしてデータを簡素化し処理した。ボケの処理については各点の歪みをとらえ、次いで低空間周波数のフィルターで通過したイメージを求め、再構成した。各課題シーンの中心窩の歪みの処理したフレームを一つに融合した。圧縮の実効性を確認するために客観的な質をコントロール要因とし、曖昧さを避けるために低い PSNR を避けるためにコントロール群には PSNR 値を高くとった。実験群とコントロール群に 4 段階のレベルの質を設定して処理した。

ビデオの主観的評価は 49 名の被験者にヘッドマウントディスプレイを装着し、被験者の意見は 11 段階 (低の 0 から最高の 10) の主観的質感の評価シート (Double Stimulus Impairment Scale (DSIS)) で記録をとった。

ボケの歪みにもとづく仮説の検証結果は 3 通りの課題 ((a) 恋人同士、(b) 駐車場、(c) ストリート) の各実験群とコントロール群の意見スコアの平均 (mean opinion scores (MOS)) を比較して得た。その結果、ボケの歪みによる実験群ですべてビデオの質を向上させると操作してないコントロール群より優れていた。特に客観的にビデオの質を向上させた群では PSNR 値が増大した。この結果から豊富な環境では観察者に身近な対象は知覚された質が高いことが示された。

中心窩に関する実験ではその中心から離れたボケの歪み条件でテストしたグループと逆に中心の近くに歪みの条件のグループの結果は、一般的にコントロール群 PSNR 値は高く、一方実験群は値が低かった。もし中心窩の感受性仮説が有効ならば実験群のビデオ鑑賞の MOS はコントロール群より高くなるはずであるが、実験の結果、ビデオシーン (アウトドアのバスケットと街頭、インドアの電話かけとアンブレラ、) によって仮説の妥当性が異なった。ビデオの内容が複雑な場合には中心視でビデオの質が高いこと、またシーンが平均的に視覚の質が良い場合にはボケの歪みが中心窩の近傍にあっても主観的な質は影響を受けやすいことが示された。

すべてのテストの結果は主観的な質に関係する視覚的に意味にある領域は中心窩の感受性のある領域でぼけの歪みは一貫して主観的な質を損なう。従ってビデオの質を高くするためには人間の知覚における能力を考慮し、ヒューリスティックな圧縮が効果的である。そのため、検証した仮説にもとづいた簡単な圧縮技法の手順を図 1.38 に示し実験して効果を検証した。中心窩仮説と奥行仮説のどちらかに基づいた豊富な内容のビデオに関しては圧縮の最初に低減フィルター (low-pass filter) をかける。このフィルターでは、ボケは知



図 1.37 中心窩での知覚のテスト材料。
(a) アンブレラ、(b) 電話で呼ばれる場面、
(c) バスケットボール、(d) 市電の停留所
(Shen, et. al 2022)

覚の質に影響しないのでその歪みを中心視から離す、あるいは奥行マップを規定する背景を強調する。さらに便利なビデオ圧縮ソフト、例えば High Efficiency Video Coding (HEVC) でビットレートを縮小する。

実際にこの技法でビットレートを圧縮したビデオで検証実験をした結果、主観的な質を犠牲にしないで有意に維持することが示された。



図 1.38 写真の前面と背景。(a)恋人同士、(b) 駐車場、(c)ストリート (Shen,et.al 2022)

4. その他の研究

太った顔の錯視からの顔認識過程

Galusca, et al (2022) は、多数の顔認識の認知過程を「太った顔の錯視 (fat face illusion)」の効果（縦に提示された顔パターンの中下部に置いた顔が大きく見える）を用いてしらべた。顔認識では個人、人種、社会的属性の違いなどによる研究がなされているが、視覚システムの認知のしくみはまだほとんど明らかにされていない。そこで、そのしくみを 2 つの顔パターンを縦に提示する方法で視覚順応させて実験し分析した。

実験 1 a では、ジャストロー錯視でも下部のパターンが大きく見える錯視が生起するが、この fat face illusion では、被験者（中国人、フランス人、カナダ人の男女）による錯視量を、上部提示フェース刺激 (top) が大きさ同一、上部が下部 (bottom) フェースが大 ($Top > Bottom$) および下部がジョブより大きい ($Top < Bottom$) の 3 条件で下部提示のパターンが選択される割合を測定した。

実験の結果、この 3 条件の反応に対する大きさの錯視量では、中国女性の顔パターンの偏好は他の顔カテゴリーに比較して有意に少ないこと、またこの結果が特異な人種特性によるかを統計的に比較すると、アジア人種に固有な特性によらないことが判明した。そこで他の特異的顔情報が顔の人種属性カテゴリー間で大きさ知覚差となっていないかを実験 1 b で試した。実験 1 a、b

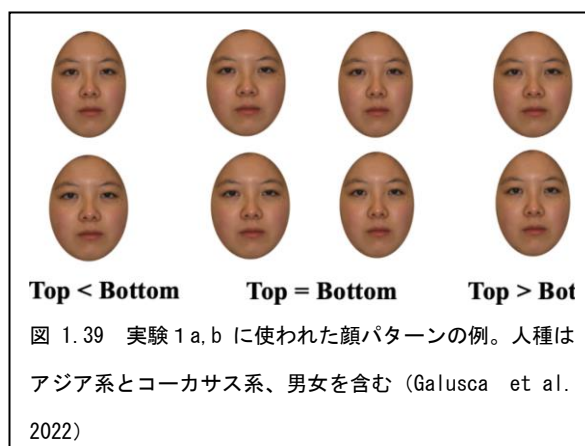


図 1.39 実験 1 a, b に使われた顔パターンの例。人種はアジア系とコーカサス系、男女を含む (Galusca et al. 2022)

に使われた顔パターンの人種は男女を含むアジア系とコーカサス系で人種に固有な情報を取り除くために卵型の枠で囲み顔のみとした (図 1.39)。その結果、実験 1 a と同様に上下に配された顔の大きさ知覚は顔の種の属性とジェンダ-属性に影響されないことが示された。さらに実験 1 c では、実験に伴い下図のパターンの選択好悪の影響をしらべた結果でも被験者の選択誤差がないことも示された。

実験 2 では、実験 1 で人種属性（自分の種あるいは他人の種）に関わらず錯覚には影響しないことが確認されたので視覚システムの基本的能力に Fat Face 錯視が依存している。そこで顔パターンを上下に配置するために、下部のパターンが奥行方向遠くに見え、そのために大きく知覚されるのではないかと考えて、単眼視と両眼視条件で顔パターンの大きさ知覚を測定した。上部と下部に同一の顔パターンを提示しアジア系を被験者にして単眼視条件群と両眼視条件群の間の大きさ選択率をしらべると、単眼視条件群は上部刺激を選択する率が少なかった。これらの結果、両眼視の奥行知覚に

おける役割が重要で、視覚システムは縦方向に提示された場合には遠くに知覚する刺激が大きく見える錯視が起きることが明らかにされた。

オクルージョンのダイナミック変化の解明—輪郭の幾何とテクスチャの増大と消失

運動に基づく手がかりは対象面の奥行の順序を明確にしてその対象の知覚体制を築く。相対的奥行の重要な手掛かりは輪郭境界のテクスチャの出現と消失 (accretion/deletion) である。見ている面の出現/消失は隣接面が「現れる/隠れる」と解釈される。「現れる/隠れる」という相対的奥行は別の面が隠れていると知覚解釈される。しかし、この面の「現れる/隠れる

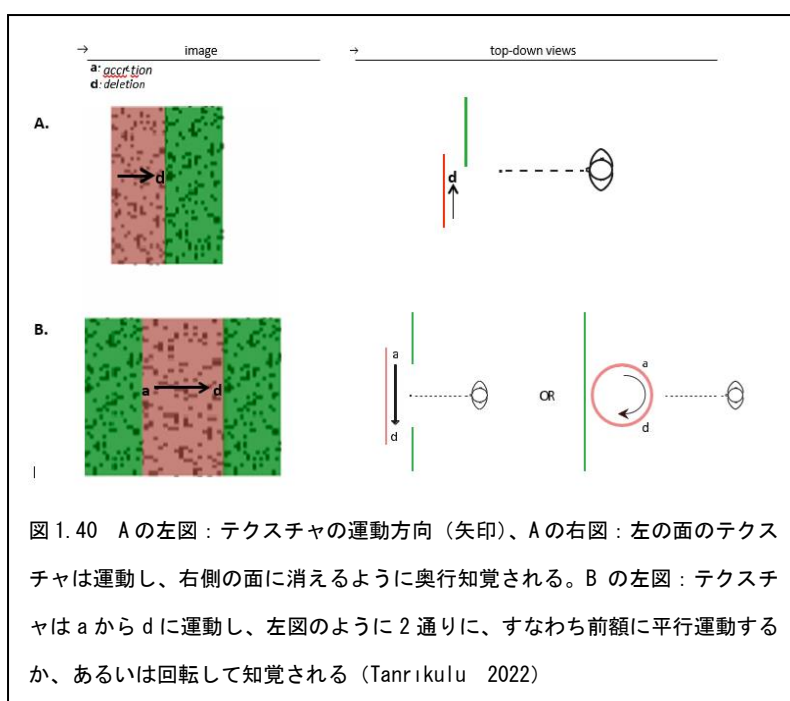


図 1.40 A の左図：テクスチャの運動方向（矢印）、A の右図：左の面のテクスチャは運動し、右側の面に消えるように奥行知覚される。B の左図：テクスチャは a から d に運動し、左図のように 2 通りに、すなわち前額に平行運動するか、あるいは回転して知覚される (Tanrikulu 2022)

(accretion/deletion)」という刺激は隣接する領域で奥行に回転すると知覚解釈もする。この解釈は輪郭の影響を無視した解釈と考えられる。

そこで Tanrikulu et al. (2022) は、知覚的に相対的奥行を決定する事態での輪郭による凸面効果とテクスチャの「現れる/隠れる」効果を手がかりに変化させ、その総合した役割をしらべた。図 1.40 (A) に示されたように、テクスチャの運動方向（矢印）にあると (A の左図)、左の面のテクスチャは運動し、右側の面に消えるように奥行知覚される (A の右図)。図 B の左図のようにテクスチャは a から d に運動し、左図の右のように 2 通りに、すなわち前額に平行運動するか、あるいは回転して知覚される (Tanrikulu et al. 2022)。図 B のような事態では、「現れる/隠れる」は対象面が奥行方向に回転して知覚されるが、いまだ体系的には研究されていない ((Royden, et al. 1988)。したがって「現れる/隠れる」の対象面の知覚現象は計算機モデルに即しても再考察がいる。さらに、この現象はテクスチャの動きから分析され輪郭の幾何効果が刺激の静止事態ばかりか動的な事態では一層欠かせない。

さらに、図 1.41 に示されたように刺激面が背後でスライドするという見えと前面で 3 次元のコラムが回転するという見えという 2 つの知覚解釈が Froyen et al. (2013) によって報告された。これは明るいあるいは暗い領域が前面にある、または奥行回転するという 2 つの知覚解釈の起きる例である。コラムが直線の領域をもち図と地に関して多義的な場合、暗い面の前で明るいコラムが回転する見えと明るい面の前で暗いコラムが回転する見えの 2 つの知覚解釈となる。

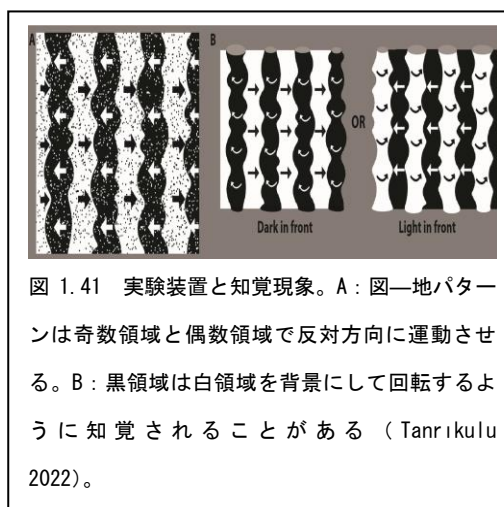


図 1.41 実験装置と知覚現象。A：図—地パターンは奇数領域と偶数領域で反対方向に運動させる。B：黒領域は白領域を背景にして回転するように知覚されることがある (Tanrikulu 2022)。

しかし凹あるいは凸の幾何的特徴を導入すると片方の解釈に固定される。特に、凸型の輪郭線は凹型に比較して奥行が前方に出現し、凹凸のない線輪郭はシリンダーに出現しやすい。さらにドット上

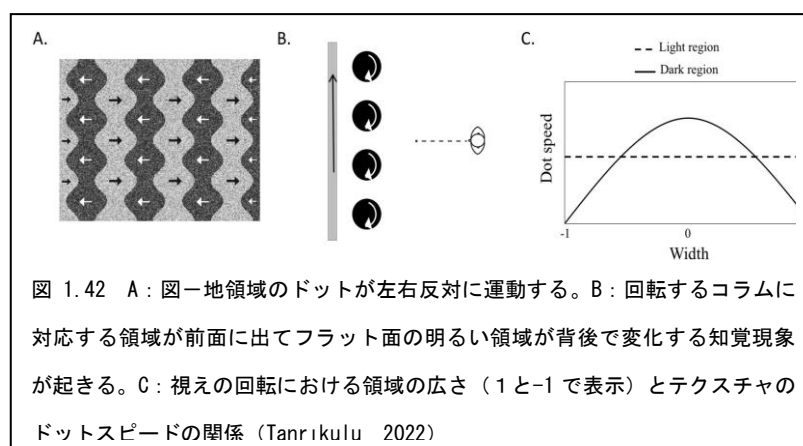


図 1.42 A：図—地領域のドットが左右反対に運動する。B：回転するコラムに対応する領域が前面に出てフラット面の明るい領域が背後で変化する知覚現象が起きる。C：見えの回転における領域の広さ（1と-1で表示）とテクスチャのドットスピードの関係 (Tanrikulu 2022)

のテクスチャ面が回転すると図 1.42 のようにオプティクフローが知覚される。図 A では図—地領域のドットが左右反対に運動、図 B では回転するコラムに対応する領域が前面に出てフラット面の明るい領域が背後で変化する知覚現象が起きる。図 C では見えの回転における領域の広さ（1と-1で表示）とテクスチャのドットスピードの関係が示されている。ここでは、フラット面の運動は低速で動き、また回転する 3 次元シリンダーはサイン波形の速度で動く。輪郭の幾何がテクスチャ面の「現れる/隠れる」効果と相互作用して知覚現象にかかわるかについてはいまだわかっていない。

そこで、輪郭の幾何的手がかりとテクスチャの「現れる/隠れる」要因を両方操作し、それらの手がかりが隣接する面の相対的奥行を決めるかを実験で検討する。実験 1 では、輪郭を挟んだ 2 つのテクスチャ領域の密度を相対的に変化してテクスチャの要素の「現れる/隠れる」効果に基づく知覚変化を、実験 2 では「現れる/隠れる」テクスチャの速度を操作、および輪郭線の凸型効果を操作して相対的奥行の知覚の効果を探る。

実験 1 と 2 での被験者は大学生 7 名、すべて健常な視力をもつことを確認した。刺激は、図 1.41A の示した交互に白と黒の 8 本の垂直領域から構成、その中で奇数あるいは

は偶数の領域は大きな凸形状のバイアスを施し、図としての明瞭性をなくした。図 1.43 には、凸形状を操作した条件での凸形状の 3 次補間法で予測される 3 本の曲線である。左の曲線は領域の両側がバイアスのない類似した条件のサインカーブ (unbiased)、中央の曲線は両側の領域の凸形状が弱い条件で凸状が強まり (weak convexity)、右曲線は両側の領域の凸状が強い条件で凸状が明瞭に出現する (weak convexity)。図 1.44 に、このモデルに基づいて作成し、実験で用いた刺激パターンを示した。さらに、図 1.45 のように凸状の領域のドット密度を操作し、凸状のない条件の領域のドット密度 (non-convex region) を 4%、凸状領域の密度はこれを基準に 5 段階を (1/4、1/2、1、2、と 4) に操作した。最後に、テクスチャ領域のドットは、左または右方向に運動をテクスチャのコラムを基準に変化させ、またテクスチャの色は 2 項分布方式で再サンプルされ 1.8°/sec の速度で動かした。被験者には 3 条件の凸状態、5 段階のテクスチャ刺激密度、テクスチャの運動方向条件すべて 960 試行を実施し、刺激パターンの視えの奥行の順序を強制選択で報告させた。

実験の結果、テクスチャ面の「現れる/隠れる」の強い反応が凸状態の弱い条件でも増大することを、また凸刺激が知覚の決定因となることを示した。特に、(1) 凸状態が強まると前面で回転する知覚が生起することが高まる、(2) テクスチャの密度と面の運動速度が増大するとテクスチャ面が背後で知覚されやすくなる、(3) 両方の手がかりが存在すると凸状態の出現が支

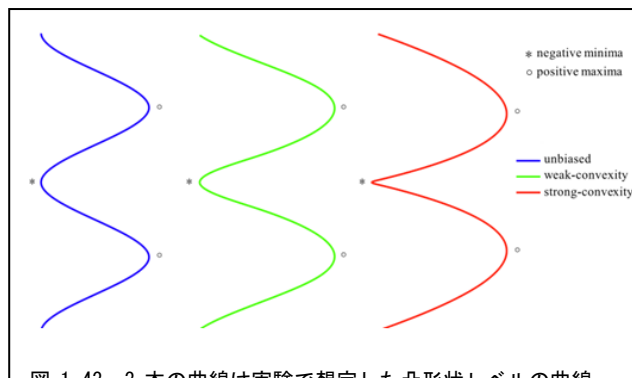


図 1.43 3 本の曲線は実験で想定した凸形状レベルの曲線。左の曲線は領域の両側がバイアスのない類似した条件のサインカーブ、中央の曲線は両側の領域の凸形状が弱い条件で凸状が強まり、右曲線は両側の領域の凸状が強い条件で凸状が明瞭に出現する (Tanrikulu 2022)。

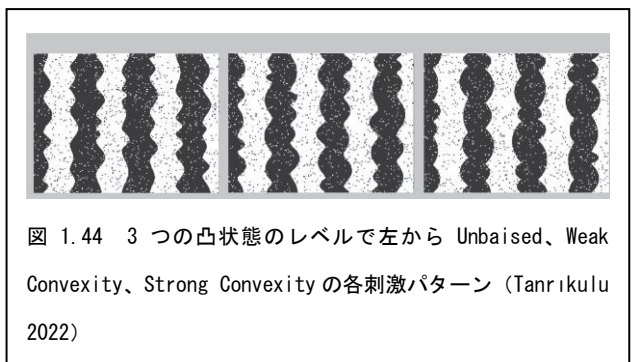


図 1.44 3 つの凸状態のレベルで左から Unbiased、Weak Convexity、Strong Convexity の各刺激パターン (Tanrikulu 2022)

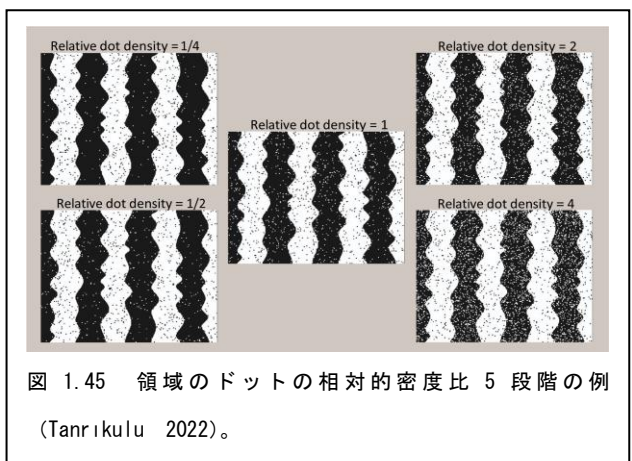


図 1.45 領域のドットの相対的密度比 5 段階の例 (Tanrikulu 2022)。

配的に出現することなどが示された。従って輪郭線の幾何効果はテクスチャ面の「現れる/隠れる」効果およびダイナミックな知覚体制に影響しないこと、またテクスチャ面の「現れる/隠れる」効果より凸状態の知覚が優勢であることが示された。これらの結果から、刺激パターンが運動することが輪郭効果より知覚体制について重要な要因で再考する必要があるが示唆された。

4. バーチャルリアリティの奥行知覚研究

バーチャルリアリティの全方向シーンにおける視覚—運動の協応の傾向

視覚課題では中心視と周辺視が 2 次元の場合の視差を中心にその知覚特性や機能について主に研究されてきたが David et al. (2022) はバーチャルリアリティの中心視あるいは周辺視を除去した注視条件の実験を 2 次元面および 360 度のシーンの探索に限定して視覚—運動のバイアスを特定する研究を行った。この研究の目的は注視位置からの予測モデル、例えばシーン内容の圧縮やストリーミングに応用するため、観察者が刺激を探索するために頭部をどのように用いたら良いかに応用するためである。バーチャルリアリティの注視を条件としたパラダイムにおいて人工的に視野喪失をシミュレートして、観察者が全方向の自然シーンを自由に見えるように設定した。ここでのプロトコルは 80 度以上の視野の視覚喪失をシミュレートし、観察者の頭部の注意の働きを研究した。

視覚—運動協応の事態では中心視野と周辺視野がスクリーン上のオンライン式のシミュレーションによって研究されている。これまでの研究では、2 次元モニターを用いた場合、その周辺視野が狭いこと、注視のシステムを人工的に覆うマスクが一眼のみか両眼の限定領域を用いること、刺激を観察する身体と頭部の運動が限定されている。そこで、110 度の視野がある HMD (head-mounted display) を用いてそれらの限界を取り除いて視覚—運動、注視の時間経過に伴う注視のマスキングのある場合と無い場合で実験を試行した。観察者はサックードを起こしシーンを探索するとき周辺視野の有力な領域を利用することができる。HMD は 1 眼ごとに視野喪失を観察したシーンをシミュレートするディスプレイとして用いる。ディスプレイと眼球追跡装置を観察者の頭部に装着してあるので、観察者は全身を用いて移動し視覚課題を遂行できる。この実験では、したがって、注視を条件としたプロトコルとバーチャルリアリティを関係させて注視作用、眼球と頭部運動および中心視と周辺視の喪失の影響をしらべる、その結果を全方向の自然観察時のスクリーンを用いた実験と視覚—運動のバイアスと比較することを目指す。

実験では主に 50 人の大学生 (32 人の女性で平均年齢 22.5、19 歳から 49 歳) で、全方向の刺激を坐位で自由に観察するように教示した。実験の手続きを確認後、被験者には 56 個の刺激をランダムに 20 秒間観察させる (図

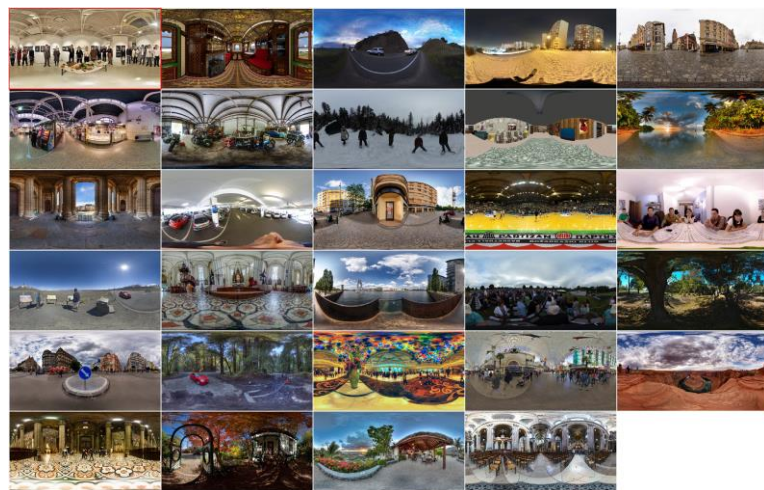


図 1.46 実験で使用した 29 個の全方向シーン (David et al. 2022)

1. 46)。全方向の内容は試行最初の頭部回転によって経度が相殺されるので、被験者はすべて同一の経度をはじめに観察することになる。被験者には一度だけ刺激をランダムな順序で提示されるマスキング条件すべてで観察を求める(各条件 56 試行)。眼球運動はアイトラッカーで、頭部運動はHMDからのトラッキングデータで観測した。眼球運動の軌跡は3Dの眼球運動に2次元データから変換した。

実験の結果、中心視野の妨害(マスキング)条件の注視時間は縮小し、一方周辺マスキング条件は増大し、またマスクの大きさが注視時間に影響、中心マスキング条件では中心の開口部が大きいと注視時間は短く、周辺視条件では開口部が小さいと注視時間は長くなった。眼球運動は中心視がマスキングされると振幅が大となり、周辺視をマスキングすると減少した。マスクの半径は中心視のマスキングと周辺の開口部が大の条件ではともにサッケードの振幅が大きくなった。頭部運動も注視固執条件で有意に減じ、一方周辺マスキング条件では頻繁になった。頭部運動の振幅はマスキングがあると被験者の頭部運動可能性を減じ、一方視野の消えた領域の変化への興味を減らし、視野の周辺と中心の間の頭部運動を激化させた。中心領域の大きなマスキングはサッケードを長くし、一方周辺のマスキングも同じことが観察された。観察者の眼球運動のサッケードの方向は主に水平方向で注視の動きとともにまれに下方方向に動いた。サッケードのバックワード(リターン)が正確に注視点に向かい、特にコントロール条件では被験者は頻度高く前進(forward)と後退(backward)を繰り返したがスクリーン条件では前進が多かった。VR条件でのサッケードの方向は注視とともに明確に前進し、これはスクリーン条件も同様だった。したがってコントロール条件では頭部と共にサッケードを前進させ、反対に眼球運動は前後方向にバイアスが生じた。この結果に基づいて研究モデルを構築するとき、試行の最初からコントロールを含めてすべての条件で注視が持続し5秒後には速やかにその持続が減じ、17秒後から最後まで減少が続いた。眼球運動の振幅は視野1度の非マスキング条件で2.5秒間動かして増大し安定した。中心マスキング条件で観察中の眼球運動の振幅の平均は増大、また周辺マスク条件では減少が2.5秒間続いた。これはマスキングがあったので視覚システムは運動系に遅延を伝えたのかも知れない。全方向条件の被験者は即座には探索を示さず5秒後にゆっくりと頭部の運動を増大した。サッケードの振幅の平均は初期に短く、5秒後に強く大きくなったが、しかし周辺マスキング条件では生起せずその代わりに眼球運動は有意に減じた(図1.47)。

相対的サッケードの時間的経過はバックワードのサッケードが平均してマスクが無い条で安定的に続き、これには眼球、頭



部、注視運動が伴っていた。バックワードのサッケードはおおよそ 2 秒後に起きたが、他方、頭部の関連した運動は試行時間を通してマスク条件では起きなかった。

実験の結果、VRT での注視とサッケードの絶対的と相対的方向はスクリーン用いた場合とほぼ同じことが示されたが、ただ一つの違いは被験者のスタート時の注視が長いこと、およびサッケードが小さいことだった。その他に頭部運動は視野が広いので水平方向に注視を広げまたシーンを探索することが多くなることであった。したがって、注視に条件付けられた環境では眼球運動が環境刺激に強く影響され、一方頭部運動はマスクに邪魔されずに目標を探索するように働くことであった。

5. 手がかりの統合

明瞭なまた暗々裡の手がかりの統合：実対象についての組織的バイアスの証拠

これまで奥行き手がかりの統合は 3 次元対象や環境の知覚が手がかりの優加的 (数列の不等式が任意の m, n が満たす場合の加算) に加算統合されると考えられている。これは intrinsic constraint (IC) モデルの基本的考え方に基づく (Di Luca, et al. 2010; Domini & Caudek, 2003, 2009, 2010, 2011, 2013; Domini et al. 2006, 2011; Kemp, et al. 2018)。すなわち、視覚システムは単一の奥行き手がかりの特性のみではバイアスを伴わずに知覚することができない、両眼視差と運動視差からは奥行きマップをバイアス無く構成できるとされる。これらの二つの手がかりを統合すること (intrinsic constraint) によって 3 次元世界を構成できるとする。このモデルは優加的なために奥行き手がかりの統合を IC モデルで予想、あるいはベイズの確立で手がかりを評価してフラットな環境のバイアス、さらに観察者の奥行き判断の誇張によるバイアス、あるいは人工的でバーチャルなディスプレイの使用のために正確に奥行きマップをよみだすことができない。

そこで Campagnoli et al. (2022) は、IC モデルによる加算モデルが実世界の 3 次元を予測しているかを被験者に物理的対象を交互に判断させて測定し検討した。実験ではカード型の 2 枚のプリズムを設置してディスパリティ、モーション、フォーカスの手がかりによる対象の 3D 形状の奥行き知覚量を手がかり条件ごとにマッチングさせた (Manual Estimation)。対象の 3D 知覚では、実験中、対象の手によるグリップの大きさテストも用いて奥行き知覚量を測定した ((Maximum Grip Aperture))。

単独手がかりの奥行き知覚量モデルの予測公式による評定値と実質奥行き値の関係は図 1. 48 のようである。これは、優加的モデルによる奥行き知覚の評価予測グラフで、手がかり統合 (Combined)、ディスパリティ (Disparity) 単独、モーション (Motion) 単独、手がかり不足 (Focus) の 4 条件で単独手がかりの公式から予測である。

実験装置では、ディスパリティ手がかりをモーション手がかりと効果が同等にするために、図 1. 49 の装置を開発した。これは、回転するドラムに刺激を背中合わせに 2 枚のプリズムを通して提示し、両眼のディスパリティは前額平行面にしたがって傾けたものである。モーション手がかりは一定の角速度で運動させて提示する、水平にした

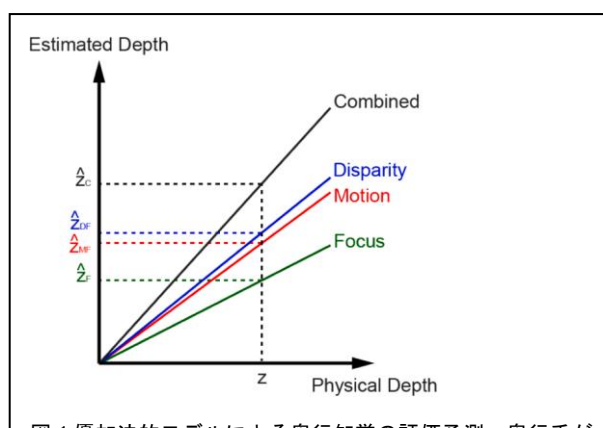


図 1 優加的モデルによる奥行き知覚の評価予測。奥行き手がかり条件は手がかり統合 (Combined)、ディスパリティ (Disparity) 単独、モーション (Motion) 単独、手がかり不足 (Focus) の 4 条件で単独手がかりの公式から予測 (Campagnoli et al. 2022)

場合は左右眼の網膜像は一直線となり両眼のディスパリティは対応問題が解けないので特定できない。刺激が前額平行から傾くと両眼のディスパリティは明確になり、また網膜に対する誤配置は 90° の傾きで最大となる。被験者は 43 人の学生で、18 歳から 24 歳、29 名は女性であった。

実験では初め、各被験者の Optotrak のセンサー位置をカリブレーションしキクロピアンアイと視線に一致する方向を決めた。次に被験者の指の位置を記録し刺激からの位置をマークした (図 1.50A)。

被験者には明瞭な知覚課題とやや不明瞭なグラスプ課題を 4 回各ブロックで実施した。明瞭課題では各試行のはじめに照明し、被験者に対象の上辺と下辺間の距離を親指と人差し指で等しくなるように評定させた。対象の大きさは小さいプリズムには 28.3、大きいリズムには 44.7mm とした。実験中、被験者には手を見ないように教示した。

明瞭では無い課題では、照明をつけてから腕を伸ばし親指と人差し指で対象の上辺と下辺のエッジを触らせ、その位置を特定して指の間の大きさを測定した。(図 B)。観察条件は 6 条件(Baseline, Disparity 10 deg tilt、Disparity 20 deg tilt、Motion, Combined 10 deg tilt、Combined 20 deg tilt)とした。

実験結果、マニュアル評価値 (Manual Estimation、ME) と最大のグリップの大きさ (Maximum Grip Aperture MGA) の最小値はともに手がかり統合条件で IC モデルと一致した。これは、奥行情報が統合され 3D 形状情報の感受性を最大にしていることを示した。また、マッチングによる知覚実験と手指による大きさによる実験の間の一致は明瞭な事態と明瞭で無い事態と同等で、有意な差は認められなかった。これは手がかりの組合せが実験で得られた評価値の間で有意差があり、手がかりが多くなるほど被験者の評価は大きくなることを示している。明瞭な事態と明瞭で無い事態でもこの結果は同じだった。明瞭な

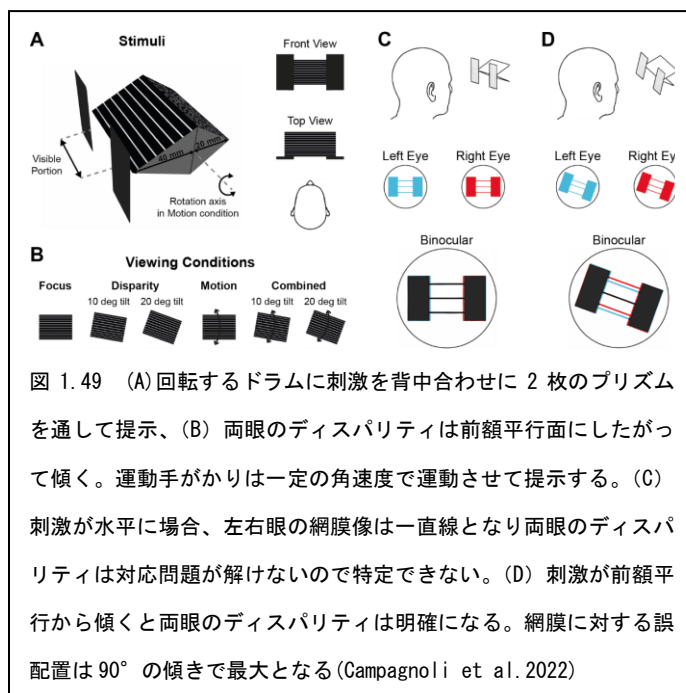


図 1.49 (A) 回転するドラムに刺激を背中合わせに 2 枚のプリズムを通して提示、(B) 両眼のディスパリティは前額平行面にしたがって傾く。運動手がかりは一定の角速度で運動させて提示する。(C) 刺激が水平に場合、左右眼の網膜像は一直線となり両眼のディスパリティは対応問題が解けないので特定できない。(D) 刺激が前額平行から傾くと両眼のディスパリティは明確になる。網膜に対する誤配置は 90° の傾きで最大となる (Campagnoli et al. 2022)

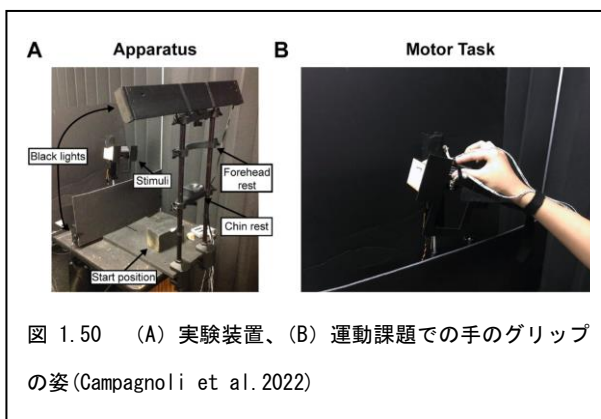


図 1.50 (A) 実験装置、(B) 運動課題での手のグリップの姿 (Campagnoli et al. 2022)

事態では被験者のマニュアルな評価値はフォーカス条件から、ディスパリティ、モーションの組合せ条件になるに従い大きくなった。また、明瞭で無い事態での結果は明瞭な事態の課題と正確に一致した。この一致は行動と知覚が強調して奥行情報となっている重要なことを示す。明瞭な事態と明瞭で無い事態での手がかりの統合の結果は優加法的 IC モデルにしたがって検証すると、各被験者の各課題の条件で物理的サイズの大きさに対する大きさ評定の精神物理的関数のスロープは両事態で合致した。

実験の結果、実対象の用いた優加法的モデルの検証で明瞭な事態 (Manual Estimation) と明瞭では無い事態 (Maximum Grip Aperture) 事態の両方で IC モデルが妥当なことが実証され、奥行の手がかりが優加法的に利用されて 3 次元対象が知覚されている。