

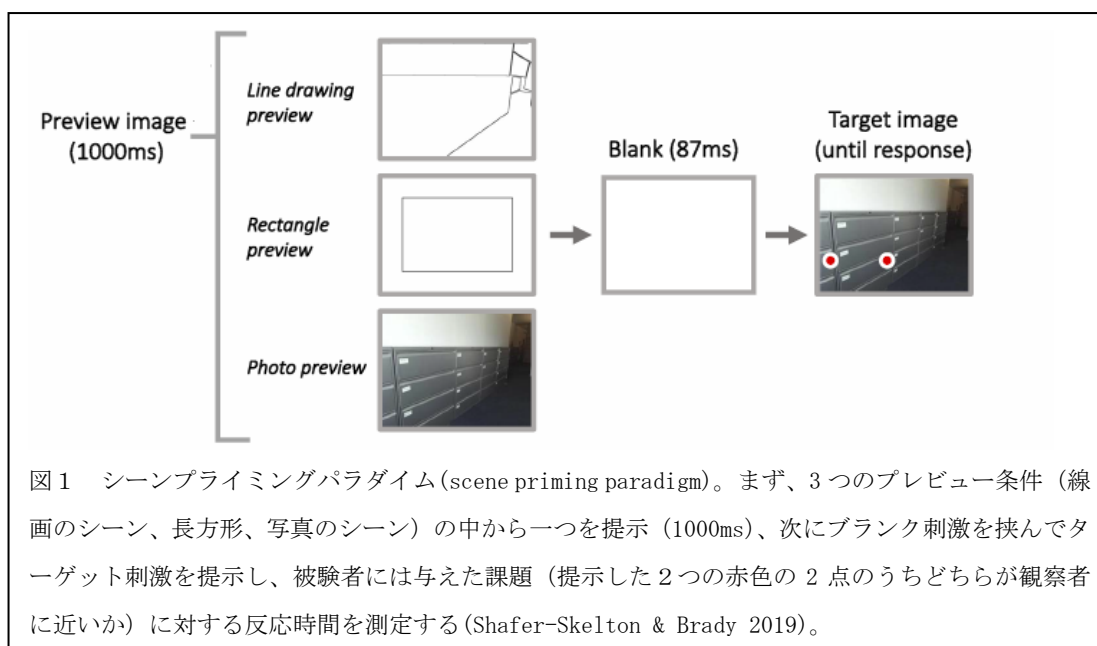
4. 視空間の構造

4.1 シーンを理解

シーン・レイアウトのプライミングと視覚記憶（アイコーニック・メモリ）

空間シーンを知覚し記憶し日常生活の課題に役立てるためには、シーンの構造を理解する必要がある。シーンの視覚探索やナビゲーションのためには正確で一貫したシーンの視覚記憶が必要である。視覚的シーンは個別の対象および広がりをもつ面の空間のレイアウトからなり、fMRIの研究によれば個別の対象と面の情報は別々に視覚処理される((Epstein, 2005; Epstein & Kanwisher, 1998; Kravitz et al. 2011, Park et al. 2011)。このためにはシーンのレイアウト情報が記憶の中に留められる必要がある。これに関する研究は少ないが、この問題に対するひとつの研究手法にシーンプライミングパラダイム(scene priming paradigm)がある。これは最初に異なるシーンを短時間提示し、次いでターゲットを提示し、それに対する反応時間を測定してシーンのプライミング効果をしらべる方法である。

Shafer-Skelton & Brady(2019)は、プレビュー条件として写真（映像）あるいはその線画シーンのどちらをプライミング効果があるかを試す実験を試行した。図1に示したように、まず、3つのプレビュー条件（写真のシーン、その線画、長方形、）の中から一つを提



示（1000ms）し、次にブランク刺激を挟んでターゲット刺激を提示し、被験者には与えた課題（シーン内のいろいろな箇所に提示した赤色の2点のうちどちらが観察者に近いか）に対する反応時間を測定した。被験者は102名の働く成人とし、課題にできる限り速く反応するように教示した。その結果、写真シーンによるプレビュー条件の反応速度は、線画シーンや長方形条件より有意に速いことが示された。また、奥行弁別の正確度は写真と線画シーン間で差はみられなく、速度と正確度との間のトレードオフはないと考えられた。このことから、写真による全シーンは、意味ある奥行情報をもつ線画よりプライミング効

果が高く、ターゲットである奥行弁別にメリットがあるといえる。

この実験ではシーンなど 1000ms の提示後 87ms のブランクを置いてターゲット刺激が提示されるので、プレビューイメージの低レベル視覚情報は映像記憶であるアイコニックメモリ (iconic memory) に蓄えられる。したがって、被験者はプローブ刺激 (2つのドット) を欠いただけの映像プレビューイメージに引き続き提示された映像ターゲット刺激 (2つのドット) を効果的に探索・弁別できたと考えられる。図2に示されたように、2種類のプレビューイメージ (写真、長方形) を 1000ms 提示し、アイコニックメモリが消えない

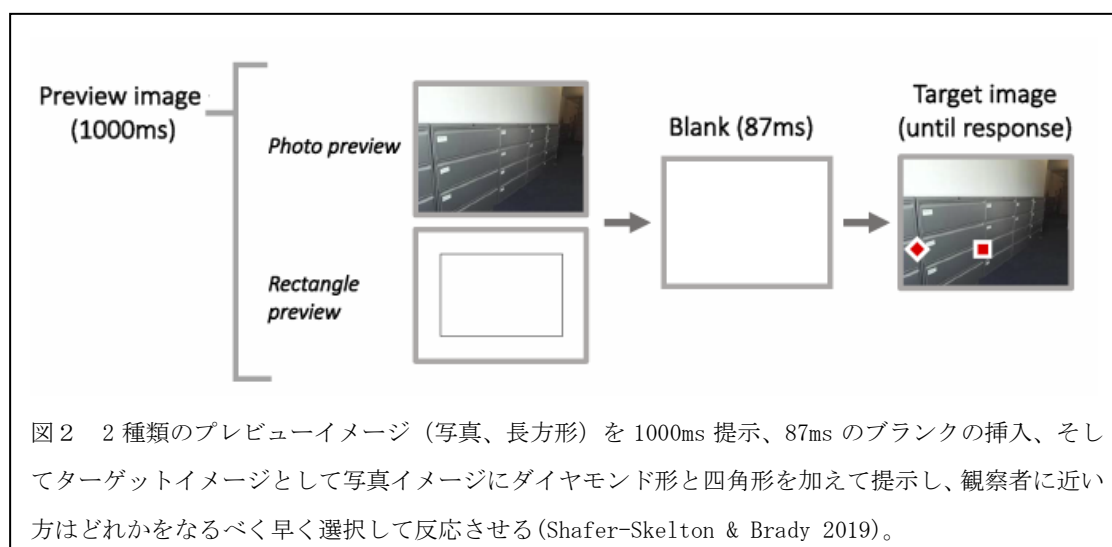
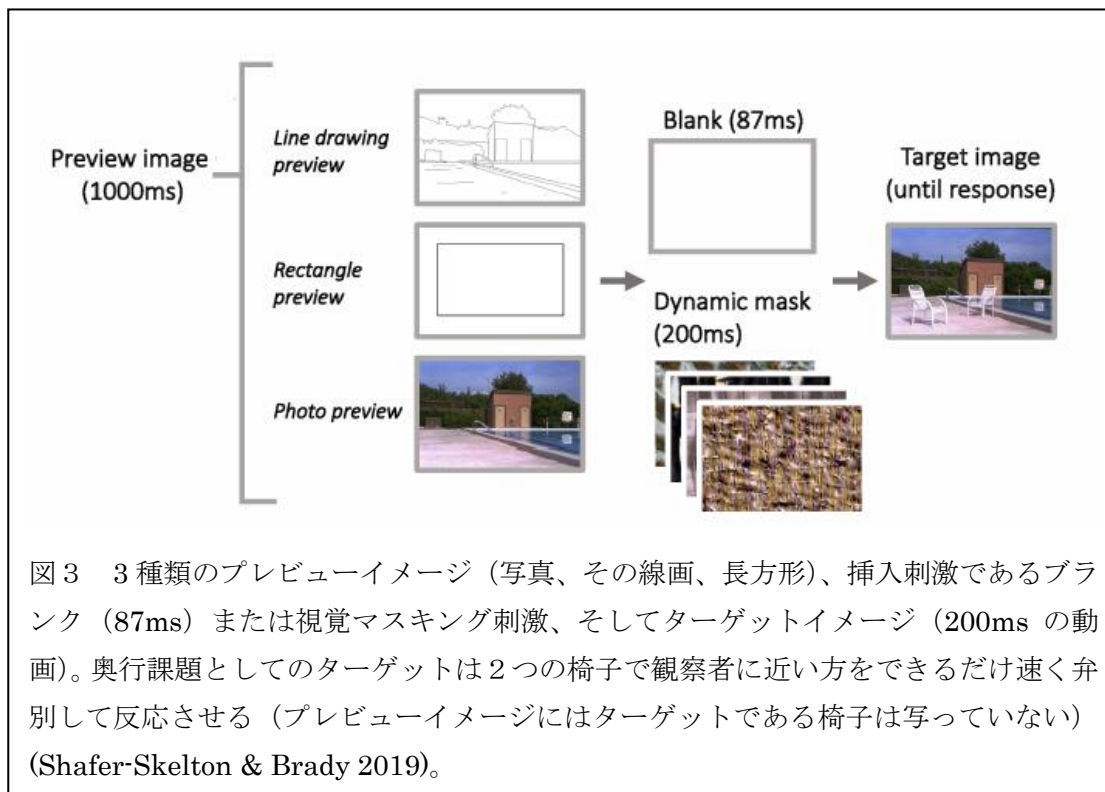


図2 2種類のプレビューイメージ (写真、長方形) を 1000ms 提示、87ms のブランクの挿入、そしてターゲットイメージとして写真イメージにダイヤモンド形と四角形を加えて提示し、観察者に近い方はどれかをなるべく早く選択して反応させる (Shafer-Skelton & Brady 2019)。

時間である 87ms のブランクの挿入、そしてターゲットイメージとして写真イメージに小さなダイヤモンド形と四角形を加えて提示し、被験者 (100名の働く成人) に近い方はどれかをなるべく早く選択して反応させた。その結果、写真イメージのプレビュー条件は長方形イメージ条件 (814ms の反応時間) より有意にターゲット間の奥行を速く弁別 (777ms の反応時間) できることが示された。

この種のプライミング効果がアイコニックメモリにおけるプレビューシーンとターゲットシーンの統合によって生起するならば、この記憶はプレビューシーンとターゲット刺激の間に視覚マスクを挿入あるいはシーン間の時間を延ばすことで妨害されると考えられる。そこで、図3に示したように、3種類のプレビューイメージ (写真、その線画、長方形)、挿入刺激であるブランク (87ms) または視覚マスキング刺激 (200ms の動的刺激)、そして課題であるターゲットイメージをそれぞれ提示した。課題は2つの椅子で観察者に近い方をできるだけ速く弁別して反応させることであった (プレビューイメージにはターゲットである椅子は写っていない)。被験者は 306名の成人の働きをもつ者とした。その結果、非マスク事態では写真と線画条件は長方形条件と較べると反応時間に有意な差が生じたが、マスク条件ではこのような差は起きなかった。また、マスクと非マスク事態を比較すると、プレビュー事態での線画と長方形条件および写真と長方形条件の反応時間は、マスク事態で有意に短かった。さらに、マスクと非マスク事態の反応の正確さを比較すると有意な差

は出なかった。



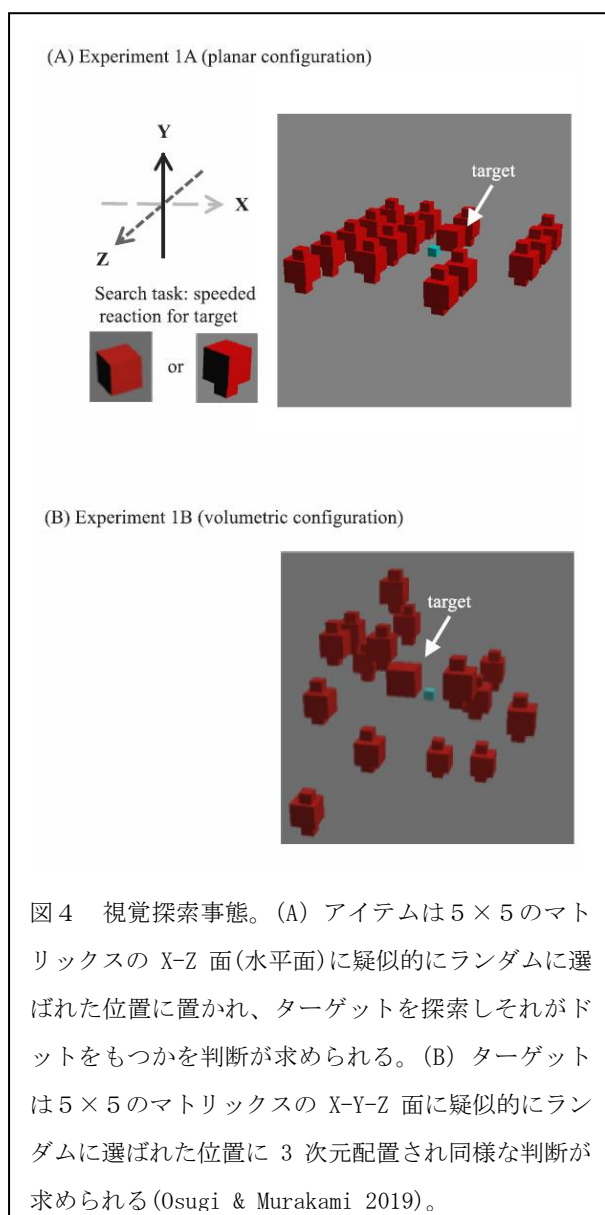
このことから、長いブランク刺激時間およびマスク刺激の挿入がプライミング効果を妨害することが示されたが、これには視覚記憶、とりわけアイコーニックメモリが関係していることを示す。そしてこのプライミング効果はメモリ内のシーンレイアウトの情報を遅延時間中にバラバラにするのではなく、プレビューで記憶した情報と現在のイメージ情報を統合して視覚探索を促進すると考えられる。

3次元の回転事態でのアイテム探知課題におけるプレビューの効果

視覚シーンは多くの対象が存在し空間を構成するための視覚情報に満ちているが、視覚システムの能力には限りがあるのですべての空間情報が処理されない。視覚システムはある瞬間に必要な情報に限定して処理（注意の作用）することで、この能力の限界を克服する。視覚探索では2つのタイプが示唆されている。ひとつはイメージによるボトムアップ方式で、単一に絞られた対象および急激な刺激の出現によって探索する。もう一つは知識に基づくトップダウン方式でターゲットの位置や特徴に対する期待で探索する(Treisman & Gelade, 1980; Yantis & Jonides, 1984; Egeth et al. 1984a, 1948b)。この2つの方式は視覚探索において広範囲に使われる。

Osugi & Murakami(2019)は、現実世界を反映するようにシミュレートした3次元世界で視覚探索をしらべた。とくにプレビューベネフィット(preview benefit)、すなわち、誤認要素(distractor)を下見させるとそのアイテムが除外されて視覚探索が容易になるプレビュー

効果(Watson & Humphreys 1997)が分析された。実験では図4に示したように、探索場面として2次元面と3次元面が設定された。図の(A)はターゲットとアイテムが置かれる2



次元面を示し、アイテムは5×5のマトリックスのX-Z面(水平面)に疑似的にランダムに選ばれた位置に置かれ、ターゲットを探索しそれがドットをもつか否かの判断が求められる。図の(B)ではターゲットは5×5のマトリックスのX-Y-Z面に疑似的にランダムに選ばれた位置に3次元配置され、静止した条件とY軸中心にリジットで回転する条件とで同様な判断が求められた。アイテムのセットサイズは4、8、16個とした。図5には、3通りの刺激の提示順序条件、すなわちプレビュー条件で元のアイテムが提示され1秒後に新しいアイテムを加えて提示される条件(A)、完全提示条件ですべてのアイテムが同時に提示される条件(B)、半数のアイテム提示条件で新規なアイテムのみを提示される条件(C)である。被験者にはターゲットを探しそれがドットをもてば「6」キーを、ドットをもたなければ「4」キーをなるべく速く押すように求め、反応時間を測定した。反応時間が10秒より長い場合、あるいは間違っている場合にフィードバックがなされた。

実験の結果、アイテム数に伴う反応時間はリニアに増大し、しかも半数提示条件が有意に最速、つぎにプレビュー条件、そして完全提示条件となった。これらの関係はX-Z面、X-Y-Z面、およびY軸回転事態で同様な傾向を示した。

これらの結果から、ターゲットの探索事態においてプレビューベネフィットが確認され、3次元の座標においてプレビュー時のアイテムが記憶のテンプレートに保存され用いられ、さらにこれらのプレビューベネフィットは2次元面のみでなく垂直軸に回転する3次元面でも効果があるので記憶テンプレートは3次元空間座標でコード化され保持されると示唆される。

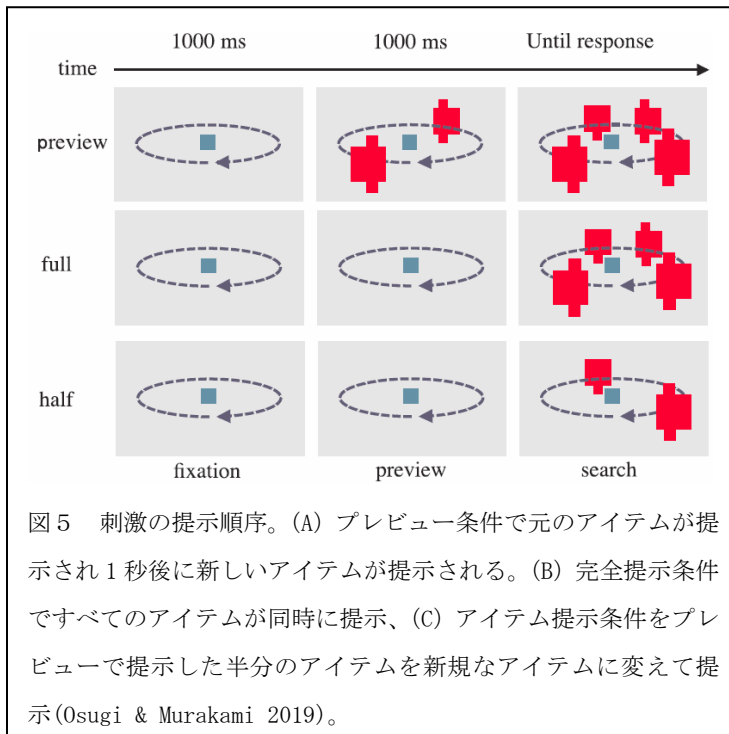


図5 刺激の提示順序。(A) プレビュー条件で元のアイテムが提示され1秒後に新しいアイテムが提示される。(B) 完全提示条件ですべてのアイテムが同時に提示、(C) アイテム提示条件をプレビューで提示した半分のアイテムを新規なアイテムに変えて提示(Osugi & Murakami 2019)。

4.2 視覚方向の不安定

ロッドフレーム錯視における焦点となる刺激(ロッド)の視方向の不確実性

頭部方向知覚は前庭感覚と視覚が統合されて決まると考えられている。ここでの視覚の役割は、ロッドフレームテストでしらべられる。このテストではロッドとそれを囲むフレームの関係でロッドの方向が決まり、フレームが垂直ならば垂直方向を求めたロッドも正しく定位されるが、フレームが傾いていればロッドもその方向に傾いて定位され(ロッドフレーム錯視)、頭部方向を指し示すと考えられている。

Pomante et al.(2019)は、このロッド錯視におけるロッドが前庭感覚と視覚の統合過程に何らの役割を果たすことなく単なるノイズになって頭部方向の指示の代理として機能するために生起するのかを再検討した。図6には、垂直の知覚評価に関わる感覚の統合モデルを示した。図(A)には、一般に視覚と前庭感覚の統合によって観察者の最適な頭部方向の知覚評価 $\sim H_s$ が求められることを示した。一方、ロッドフレームテストでは、頭部方向の手がかりはグローバルな視覚枠組で与えられ、各眼における焦点となる視線分 $\sim LE$ が唯一の情報であり、これに眼からのシグナル $\sim EH$ と頭部のシグナル $\sim H_s$ が付加されて視空間 $\sim L_s$ 内の線分 $\sim L$ の方向が知覚評価される。頭部が傾くと、前庭感覚に駆動される計数的回転機能が眼球の方向を規定する。相互作用仮説(interaction hypothesis)によれば焦点となる線分は視覚枠組と相互作用して空間内の頭部方向の知覚評価 $\sim HS_{vis}$ に直接に関わる。したがって、このテストにおいて出現する不確実性は統合の最適化の結果となる。付加仮説(addition hypothesis)によれば、焦点となる視線分は網膜上の線分 $\sim LE$ を提示するだけで頭部シグナルの方向計算とは無関係と仮定される。図(B)には、付加仮説(左図)と相互作用仮説(右図)の知覚評価における不確実性とバイアスの量的推定モデルを示す。付加仮説によれば線分方向が主にロッドの方向によって決められるので、焦点となる線分の不確実性を操作(線分から楕円に代え離心率を変化)すると評価の不確実性がフレームが傾いていないときには増すが、一方バイアスには変化が起きないと予測される。相互作用仮説によれば、ロッドがフレームと相互作用するのでこれが視覚に誘導された空間内の

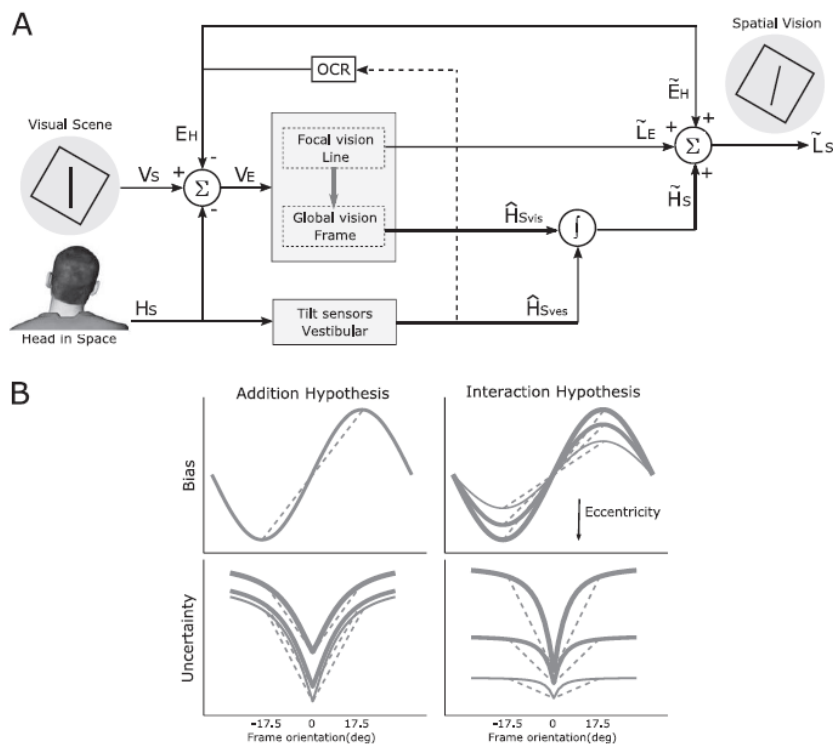


図6 垂直知覚評価における感覚の統合モデル。(A) 視覚と前庭感覚の統合によって観察者の最適な頭部方向の知覚評価 \hat{H}_S が求められる。ロッドフレームテストでは、頭部方向の手がかりはグローバルな視覚枠組で与えられ、一眼における線分方向 \tilde{L}_E が唯一の情報であり、これに眼からのシグナル \tilde{L}_E と頭部のシグナル \tilde{E}_H が付け加わり空間内の線分方向を評価する。頭部が傾くと、前庭感覚に駆動される計数回転機能が眼球の方向を規定する。相互作用仮説(interaction hypothesis)によれば焦点となる線分は視覚枠組と相互作用して空間内の頭部の知覚評価 \hat{H}_{Svis} に直接に関わる。したがって、このテストにおける不確実性は統合の最適化の結果である。付加仮説(addition hypothesis)によれば、焦点となる視線分は網膜上の線分方向 \tilde{L}_E を提示するだけで頭部シグナルの方向計算とは無関係と仮定される。(B) 付加仮説(左図)と相互作用仮説(右図)の量的推定モデル。付加仮説によれば線分方向が主にロッドの方向によって決められるので、焦点となる線分の不確実性を操作(線分から楕円に代え離心率を変化)すると評価の不確実性はフレームが傾いていないときには増すが、一方バイアスには変化が起きないと予測される。相互作用仮説によれば、ロッドがフレームと相互作用するのでこれが視覚に誘導された空間内の頭部方向評価 \hat{H}_{Svis} に影響するために、視覚の主観的な垂直評価の不確実性は楕円の離心率とともに減じるが、一方フレームの傾きによる強い効果が出ると予測される。このときのバイアスは楕円が円に近づくとき多元的感覚統合の影響を受けて増大する。この2つの仮説の妥当性が、フレームの傾斜角度を3通りに変えた場合(-17.5°、0°、17.5°)の3通りに離心率(0.74、0.82、0.99)の楕円条件で、フレーム傾斜角度に対する不確実性とバイアスの変化(点線で表示)から検討された(Pomante et al. 2019)。

頭部方向評価 $\sim H_{Svis}$ に影響するために、視覚の主観的な垂直評価の不確実性は楕円の離心

率とともに減じるが、一方フレームの傾きによる強い効果が出ると予測される。このときのバイアスは楕円が円に近づくとき多元的感覚統合の影響を受けて増大する。この2つの仮説の妥当性が、フレームの傾斜角度を3通りに変えた場合（ -17.5° 、 0° 、 17.5° ）の3通りに離心率（0.74、0.82、0.99）の楕円条件で、フレーム傾斜角度に対する不確実性とバイアスの変化（点線で表示）をみることで検討された（図7）。実験では、視覚によるロッドのみがロッド-フレーム課題において付加的なノイズとは無関係に主観的視えの垂直

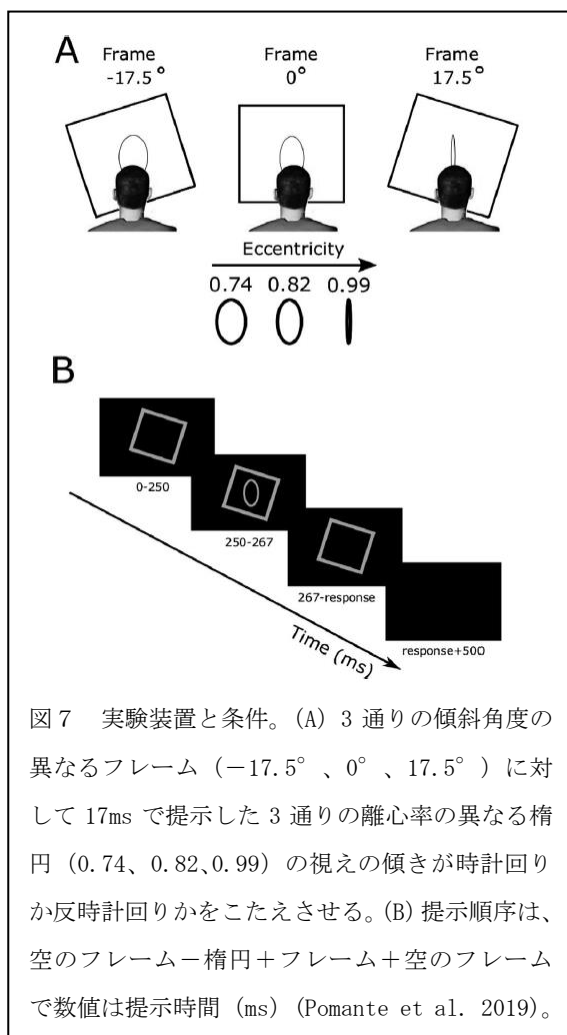


図7 実験装置と条件。(A) 3通りの傾斜角度の異なるフレーム（ -17.5° 、 0° 、 17.5° ）に対して17msで提示した3通りの離心率の異なる楕円（0.74、0.82、0.99）の視えの傾きが時計回りか反時計回りかをこたえさせる。(B) 提示順序は、空のフレーム-楕円+フレーム+空のフレームで数値は提示時間（ms）(Pomante et al. 2019)。

（SSV）に影響する（付加仮説）のか、あるいはフレームとの相互作用を通じて複合的な感覚統合にバイアスを生じさせ、その結果、頭部方向の知覚評価がなされる（相互作用仮説）のかが検討された。そのためにロッドの線分を楕円に取り換え、楕円の離心率を変化することで垂直知覚評価における不確実性を操作した（楕円の離心率を0にして円にすると垂直の知覚評価がもっとも逸脱）。被験者は36名の男女の成人（20-50歳）とし、楕円刺激が視かけ上垂直に対して時計回転方向にあるいは反時計回転方向のいずれかをキー操作でこたえるように求めた。

実験の結果からフレームの傾き条件ごとに焦点となる楕円刺激の傾きが時計方向に半々（50%）に判断される点を求めると、視えの垂直はフレームが 0° に比較してその角度が大きいと変位され、このことからバイアスが大きいことが示された。視えの垂直はフレームの傾きが 0° に比較してフレームが左・右に傾くと、その方向に変位されたが、しかし、このバイアスは楕円の

離心率には影響されず、したがってフレームに囲まれた楕円の不確実性が主観的垂直（SSV）のバイアスには影響しないことを示唆した。SSVの不確実性は楕円の離心率が増大すると減少し、とくにフレームが垂直の場合に著しかった。フレームが左（ -17.5° ）あるいは右（ 17.5° ）に傾くと約2度フレームの傾き方向に視えの傾きがシフトしたが、楕円の離心率の変化にはこのようなバイアスは皆無だった。

実験結果から、焦点となる楕円の離心率が主観的垂直（SVV）の不確実性に与える影響はフレームが垂直の場合に大きく、SSVのバイアスも離心率に影響されないことが示され

た。これは楕円が頭部を含む方向知覚評価を変位させるグローバルな視覚処理過程の一部であるフレームとの相互作用がないことを示す。このことから、相互作用仮説が否定され、そのかわりに網膜における楕円の方向についての不確実性が処理過程において主たる役割を果たすという付加仮説、すなわち視えの方向は眼と頭部からのシグナルからなる空間の座標軸で決められると考えられる。

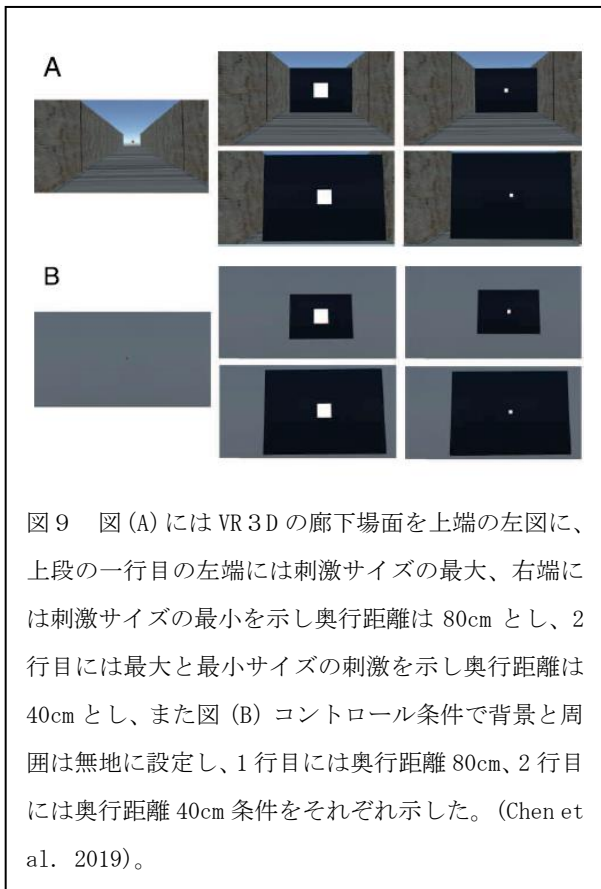
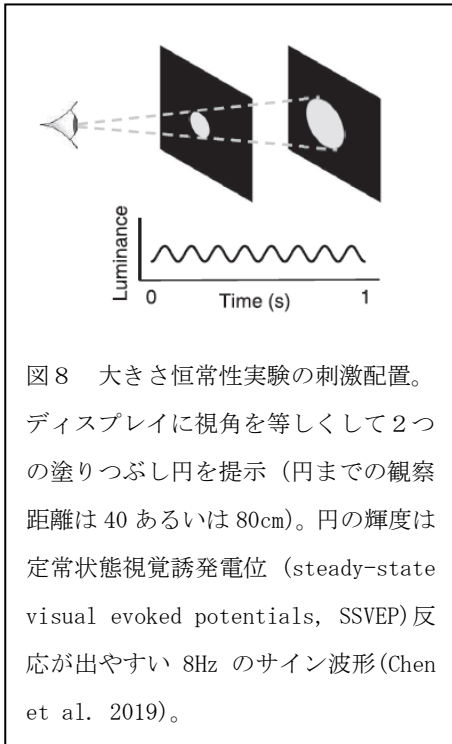
4.3 大きさの恒常性

大きさの恒常性の初期視覚野

大きさの恒常現象はその観察距離に伴う網膜上の対象の大きさ変化に対応しないで知覚されることをいう。すなわち、視覚刺激に応答する神経細胞が持つ空間的な構造を表すレチノトピー (retinotopy) から逸脱する現象である。大きさ恒常性のニューラルな基礎はいまだ明らかではないが、主に1次視覚領で生じているとする研究がいくつかある(Murray et al.2006; Fang et al.2008; Sperandio et al. 2012; Ni et al. 2014; He et al. 2015)。これは対象の網膜の位置と1次視覚野が対応関係をもつ(網膜位相)ことを示唆する。しかし、大きさ恒常性は網膜と視覚野が一对一の固定的なマッピング関係を妥当ではないと否定する。Sperandio et al. (2012)は、物理的距離に伴う大きさ恒常性を残像を利用してしらべ、1次視覚野(V1)において大きさ恒常性がエンメルトの法則(Emmert, 1881)に比例して変化することを示した。しかしこの研究では物理的刺激と残像を量的に比較することが難しいという難点がある。

そこで、Chen et al.(2019)は、大きさの直接比較が可能な事態で知覚的測定と神経生理的測定を試みた。たとえば、等しいサイズのオーバーラップしない対象が異なる奥行距離に同時に観察される場合、より遠くの対象の視覚野の表象の大きさは視覚野で2つの対象がオーバーラップしている場合にもそのサイズは大きくなるように誘導されると考えられる。大きさ恒常性の脳皮質における修正は、網膜位相からの何らかの逸脱がシーンの神経的表象のトポロジーの変化をもたらすと考えられるので重要である。この問題は、リアルな世界とバーチャルな世界(VR)における大きさ恒常性の知覚程度をしらべること、すなわち完全な恒常から恒常ゼロの事態を設定し皮質における神経活動と知覚的恒常との相関を定常状態視覚誘発電位(定常的な刺激を与えることで脳皮質視覚野に生じる視覚誘発電位、SSVEP)をもちいることによってアプローチできる。

実験1では、2つの奥行距離(40cmと80cm)に視角の等しい対象を提示し、SSVEPを測定、実験2では高次視覚野での反応を減衰するために刺激フリッカーを変化させて提示し、大きさ恒常性が起きる否か、実験3では、VR事態での大きさ恒常性を測定、実験4ではリアルな世界とVR世界での恒常性測定、などこれらの4通りの実験を実施した。図8には、実験1と2の大きさ恒常性実験の刺激配置を示し、ディスプレイに視角を等しくして2つの塗りつぶし円を提示(円までの観察距離は40あるいは80cm)し、円の輝度は定常状態視覚誘発電位(SSVEP)反応が出やすい8Hz(あるいは比較としての30Hz)のサイ



ン波形の周期で提示した。被験者には中央の注視点を注視させ、実験円は視角1°から10°まで1°ステップで、あるいは2°から8°まで1°あるいは2度のステップで増大あるいは減少方向を決めて大きさを変えて提示し、フリッカーする刺激を受動的に観察させた。観察距離を40cmと80cmと変えるが、視角は観察距離40cmに等しくなるように操作した。VR環境(実験3)条件は、図9に示した。その図(A)の上段の左図には3Dの廊下場面を、また一行目の左端には刺激サイズの最大を、右端には刺激サイズの最小を奥行距離80cmに、2行目には最大と最小サイズの刺激を奥行距離40cmに設定して示した。また図(B)はコントロール条件で背景と周囲は無地に設定(featureless)し、1行目には奥行距離80cm、2行目には奥行距離40cm条件を示した。EEGは32

箇所(Oz)の電極を頭皮に置き、実験1では1000Hzのサンプリングレートで、実験2では500Hzのサンプリングレートで、実験3のVR実験では被験者にヘッドセットを装着させるため反応が出やすい1箇所(Oz)で、それぞれ測定した。実験4における知覚とSSVEPの恒常性インデックスの計算式は、図10に示されている。4つの大きさ(a、b、c、d)は物理的サイズを表す(dは物理的な大きさの比較のために記したが、実際は計算されていない)。

Perceptual size constancy index

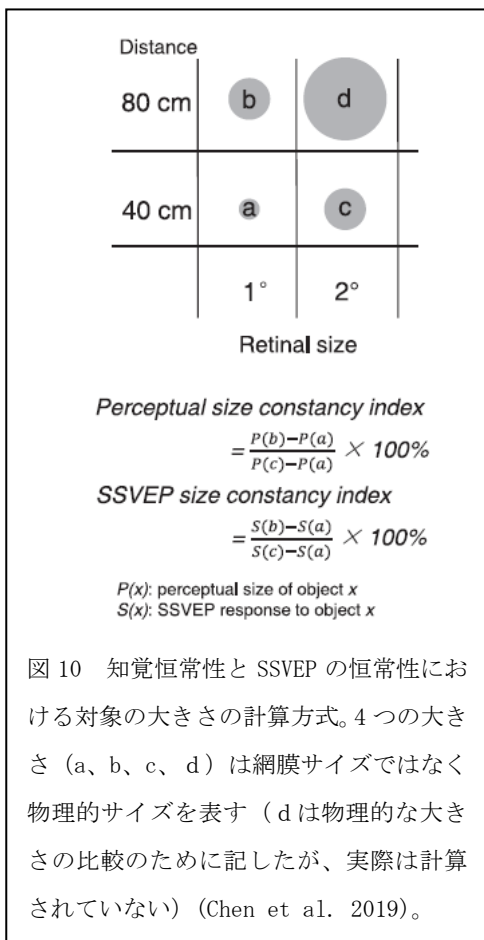
$$= \frac{P(b) - P(a)}{P(c) - P(a)} \times 100\%$$

ここで、Pは対象の知覚された大きさである。

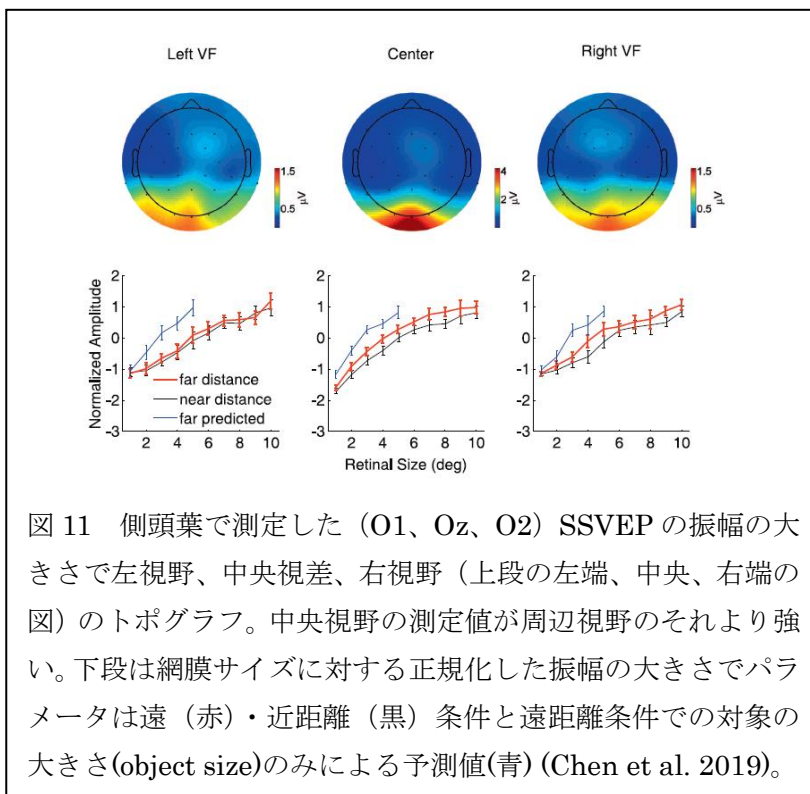
SSVEP size constancy index

$$= \frac{S(b) - S(a)}{S(c) - S(a)} \times 100\%$$

ここで、Sは対象のSSVEPの増幅値である。



実験の結果、(1)刺激に対する側頭葉の SSVEP 反応を振幅の大きさを左視野、中央視野、右視野 (上段の左端、中央、右端の図) のトポグラフで示したものが図 11 である。また、図の下段は網膜サイズに対する正規化した振幅の大きさをパラメータは遠距離 (赤)・近距離 (黒) 条件、および遠距離条件での対象の大きさ(object size)のみによる予測値(青)である。中央視野の測定値が周辺視野のそれより強いことがわかる。もしこれらの反応が網膜サイズのみによっていけば2つの奥唯距離の反応は同一になるはずであるが、より遠い位置の対象の反応 (赤曲線) が近い位置のそれ (黒曲線) より強く、したがってより大きく知覚され、恒常性が生起した。(2)フリッカー頻度数 (8あるいは 30Hz) による SSVEP 反応は頻度数による相違は見いだせなかった。フリッカー頻度が大きいほど高次の視覚野を反映し、したがって 30Hz のフリッカー条件で反応が減衰すると予測したが、両フリッカー条件で SSVEP の反応結果は同じであ



あった。(3)VR 事態の SSVEP 反応は奥行手がかりがある廊下事態で近くの対象 (40cm) より遠くの位置条件 (80cm) で大きく、また手がかりを欠いた事態 featureless) では遠・近ともに SSVEP 反応の差は大きく減じ、したがって奥行手がかりの有る条件では知覚恒常性が起きていることを示した。(4)精神物理的測定では、奥行距離 40cm と 80cm のリアル事態での大きさ恒

常性は 95.9%(測定値／実際の大きさ)、VR 廊下事態のそれは 50.7% (size index)、そして手がかりの無い事態のそれは 26.2%であり、リアル事態ではこれまでの研究と同等の恒常性が生起した。(5) SSVEP の反応強度から得られた恒常度を精神物理的測定値と比較すると、その恒常度はリアル事態および VR 事態の知覚的恒常度の約半分であることが示された。(6) SSVEP のフェーズは対象の奥行距離および網膜サイズに影響されないことも示された。

これらの結果から、V1 のレチノトピー (retinotopy)は知覚した対象のサイズによって明瞭に調整されていること、しかし知覚判断の程度には及んでいないことが示されている。