

6. その他の3次元視研究

没入感のあるVR事態での奥行方向と距離のための手がかりの組合せ

観察者が移動する場合、環境内の対象の視えの方向は変化するが、視覚システムがこれにどのように対応するかはまだよく分かっていない。そこで Scarfe & Glennerster (2021) は、観察者の知覚方向の判断が標準的な手がかりの組合せで予測可能か否かを検討した。

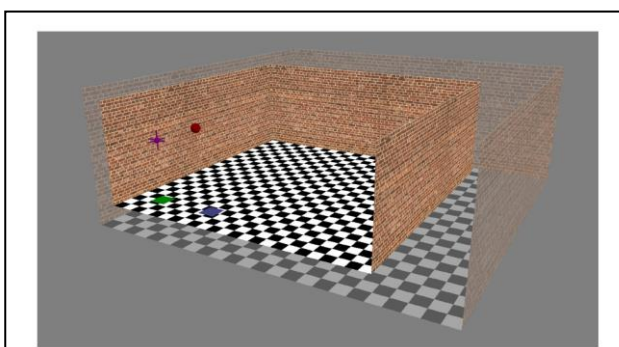
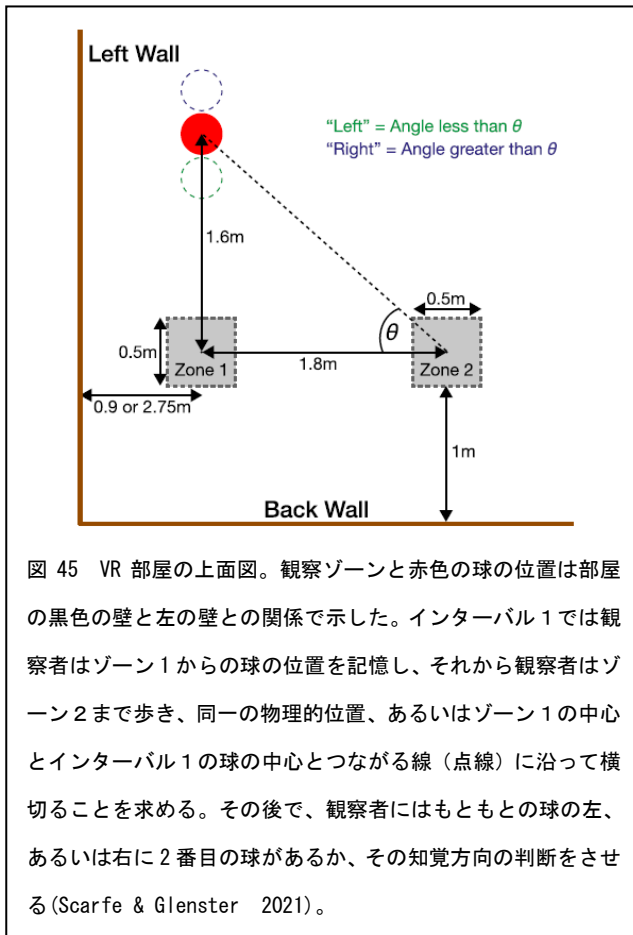


図 44 レンダリングした VR ルーム。近い壁の条件での緑色の矩形はインターバル1の観察ゾーン的位置、青の矩形はインターバル2の観察ゾーン的位置を示す。観察者実験中、ゾーン1の前方に置かれた赤い球の知覚した方向と距離を判断する。ゾーン1の上方の紫色の基準マーカーは観察者のキクロピスの眼位置である。実験ではVRの部屋は拡大。収縮をキクロピスの眼を中心として繰り返す。部屋が拡大するとキクロピスからの壁のレンガとフロアのサイズも部屋の収縮拡大に伴い変化する。これがテクスチャベースと物理的ベースの両手がかりのコンフリクト事態となる(Scarfe & Glenster 2021)。

実験では観察者にVRを用いてヘッドマウントディスプレイにシミュレートした部屋(図44)を所定の時間(インターバル1)で提示し歩き出す前の対象の位置を判断させ、さらにインターバル2で歩いた後の位置を判断させた(図45)。

各インターバル内で移動する部屋のスケールを変えてその時に作用している2種類の手がかり、すなわち視覚情報(texture-based)および両眼視差と運動視差を含む自己受容的体性感覚情報(physical-based)をシーンが観察者の移動に伴って再構成される際にコンフリクト事態にして知覚的方向と距離を判断させた。この2つの手がかり、すなわち一つは純粋な視覚情報、他は移動する際の位置の変化から生じる眼球間のオプテックセンター間の距離情報が移動した事態で知覚にどのような役割を果たすかをしらべた。

この実験の目的は、自由に歩く観察者において視方向の判断が2つの手がかり(physical-based および texture-based)の加重した平均で予測できるかをしらべることである。観察者には、ヘッドマウントディスプレイを装着し、レンダされた部屋の壁とターゲットをもつ広さ8m×8m×3mのVRルームを提示した。VRの部屋の観察ゾーンと赤色の球の位置は部屋の黒色の壁と左の壁との関係で示され、インターバル1では観察者はゾーン1からの球の位置を記憶し、それから観察者はゾーン2まで歩き、同一の物理的位置、あるいはゾーン1の中心とインターバル1の球の中心とつながる線(点線)に沿って横切ることを被験者に求めた(図45)。その後で、観察者にはもともとの球の左あるいは右に2番目の球があるか、その知覚方向の判断をさせた。被験者は9名、そのうち1名は著者であった。チェッカーの床とレンガ壁の個数は同一で、その大きさは部屋の大きさの変化に伴い比例して変えられた。加重平均モデルの検証のために、2種類の手がかり



(physical-based と texture-based) の一方を変え、一方をコンスタントに保つ条件と両方を変化させる条件でインターバル 1 と 2 の間の視方向および視距離が測定された。被験者には、VR の部屋内の指定した対象の位置と方向を歩行の前と後で判断することを求めた。

その結果、手がかりの一方のみ変化条件では方向と距離の判断は予測された通りになったが、2 種類の手がかりを変えた条件ではももとの手がかりの組合せの枠組と一致した。しかし、視距離に対する視方向の組合せの判断を比較すると視距離と視方向は互いに一致しなかった。

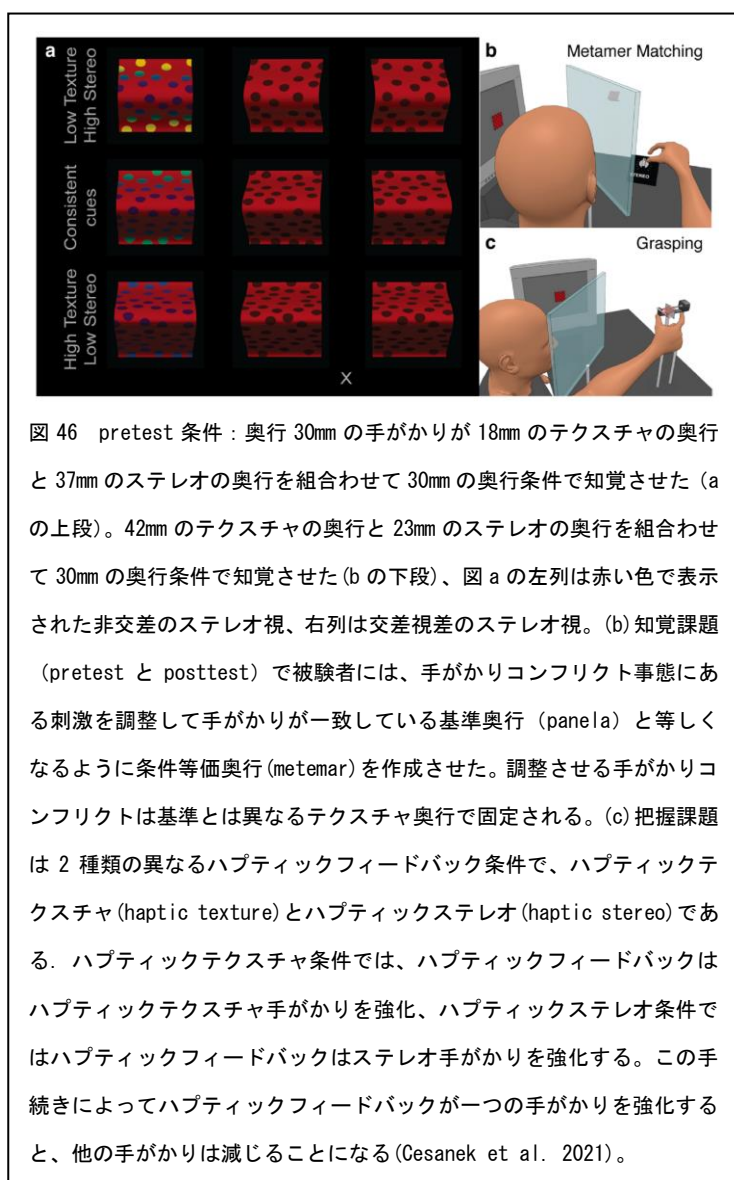
この結果から、観察者は 2 つの手がかりをそれらの加重平均に最適に組み合わせる視方向の判断をすると考えられる。

持続的把握のエラー (Persistent grasping errors) に基づく奥行手がかりの再加重の効果

把握する対象は期待するものより大きくあるいは小さく感じられる。ハプティックのフィードバックが奥行手がかり効果の再加重 (reweight) の過程を通して 3 次元の形状知覚に影響していると考えられる。この運動筋肉の再加重が上位中枢の知覚過程で生起しているのか、あるいは別の過程かは不明である。

Cesane et al. (2021) は、視覚に導かれた運動からの感覚フィードバックが 3D 形状の知覚精度をどのように改善するかを実験的にしらべた。正確な運動行動を視野にすると、最適以下の手がかりの組合せが 3D 形状知覚にコンスタントなバイアスを生み出すのかはとくに問題にはならない。この場合、運動の処理過程は、感覚運動の順応を通して知覚バイアスを急速に補う。このようなしくみであれば、古典的な感覚運動のパラダイムのなかで視覚が変容すると考えるならば知覚的過程では何も起こらないことになる。これに対して、もし奥行手がかりが少ないながら物理的形状に関係しているならば手がかりの組合せに大きく寄与し、そのために 3D 形状知覚のエラーがコンスタントなバイアスよりさまざまに生起すると考えられる。たとえば、捉まえたい対象の奥行を不確かな手がかりで過小に知覚していれば指先は早くに届き、したがって対象把握の行動計画は再計算することを

強いられる。また、対象までの奥行を過大視すれば対象を把握できず、これもまた計画は再計算しなければならない、対象把握を反復することになる。この感覚運動の学習問題に関する Cesanek & Domini (2019)の研究では、知覚した対象の大きさとハプティックフィードバックの間の一定のミスマッチでは学習に十分ではなく、手がかりの再計算を要する不定のエラーが必要なことを明らかにした。



そこでさらに、Cesanek et al. (2021)は、運動制御における手がかり効果の再加重が情報処理の上で知覚的再加重の結果であり、そしてこの知覚的加重が持続的な体系的運動エラーの原因で生起するかを確かめる実験を試みた。ここでの実験仮説は、3D 形状が把握する視覚運動を導き、したがって、視覚の手がかりと連携する処理過程が視覚運動の間に受け取るエラー信号に感受性をもつである。実験では体系的運動エラーを生じさせるために、被験者に同一の奥行が同じ手がかりの異なる組合せで作成された対象 (depth metamer) を繰り返し経験させた。手がかりとしてテクスチャと両眼視差を用い、知覚的に相互に打ち消し合うように組み合わせて手がかりの効果が逆比例させて提示した (図 46a)。被験者別に depth metamer を、テクスチャの奥行

値を 5 段階に増大し、一方でステレオの奥行値を 5 段階に減じて、それらをペアにして作成した (図 b)。被験者ごとに作成された depth metamer は、知覚における 2 つの手がかりの相対評価とする。これらの視覚運動を metamer 刺激と相互作用させて被験者に物理的な対象形状についてのハプティックなフィードバックを提供し、ステレオとテクスチャ手がかり効果の相対的ウェイトの変化を探った (図 c)。これを実現するために、手がかりの一

つを選択的にフィードバックして強化した。この操作は被験者にいろいろな運動エラーをもたらすと予想される。被験者には日時を変えてハプティックテクスチャおよびステレオテクスチャ条件を試行した。

実験 1 では、プリテストとして手がかりのひとつを強化するフィードバック後の把握課題での個人別の depth metamer をセットで特定し、ポストテストとしてプリテストからの手がかりの加重の変化について測定した。

実験 2 では、テクスチャ条件におけるハプティックフィードバックを一定に維持したまま、ステレオ条件では固定したバイアスを導入した条件で一貫したエラーが起きない場合には手がかりの再加重が得られないことを確かめた。

実験の被験者は 56 名で 18 歳から 35 歳の健常者である。実験環境は CRT モニターを用いハーフミラーで液晶ゴーグルを装着させステレオ視させたバーチャルリアリティ (VR) で構成し、右手の動きを親指と人差し指に赤外線ダイオードを装着してトレースした (図 46)。被験者にはテクスチャとステレオ手がかりがレンダリングされた 3 次元対象を観察させた。対象の形状は正方形で上段と下段が同一の奥行で面の中央を凸状にした。ハプティックフィードバックは対象の凸面状の凸部分と平面部分間の隔たりをステップモーターで制御し、フィードバック刺激を被験者に与えた。

実験条件は、図 47 に示したように、pretest 条件では 18mm のテクスチャの奥行と 37mm のステレオの奥行を組合わせて 30mm の奥行をもつ手がかり一定の標準条件 (fixed cue consistent、上段) とし、同様に 42mm のテクスチャの奥行と 23mm のステレオの奥行を組合わせて 30mm の奥行をもつ手がかり一定の標準条件 (fixed cue consistent) で知覚させた、図 2a の左列は赤い色で表示された非交差のステレオ視、右列は交差視差のステレオ視である。知覚課題 (pretest と posttest) では被験者に、手がかりコンフリクト事態にある刺激を調整して標準奥行 (panela) と等しくなるように奥行 (metemar) を作成させた。調整させる手がかりコンフリクトは標準とは異なるテクスチャ奥行で、その値は固定される。把握課題は 2 種類の異なるハプティックフィードバック条件で、ハプティックテクスチャ (haptic texture) とハプティックステレオ (haptic stereo) でとした。ハプティックテクスチャ条件では、ハプティックフィードバックでハプティックテクスチャ手がかりを強化、ハプティックステレオ条件ではハプティックフィードバックでステレオ手がかりを強化する。この手続きによってハプティックフィードバックが一つの手がかりを強化すると、他の手がかりは減ることになる。

実験手続きは、図に示すように、前テスト、後テスト、そして metamer マッチングを実施した。被験者の調整する手がかりコンフリクト事態は 4 個の固定されたテクスチャ奥行 (18, 24, 36, 42mm) で、被験者にはキー押しによってステレオ奥行の大きさを少しずつ増大し、知覚的にマッチしたら報告を求めた。把握課題では、被験者に対象をつかめるように前後に手を動かし、親指で対象の前面を人差し指で背後に置くように教示した。metamer マッチングと把握課題の刺激と手続きは図 2 に示してある。metamer マッチング(上

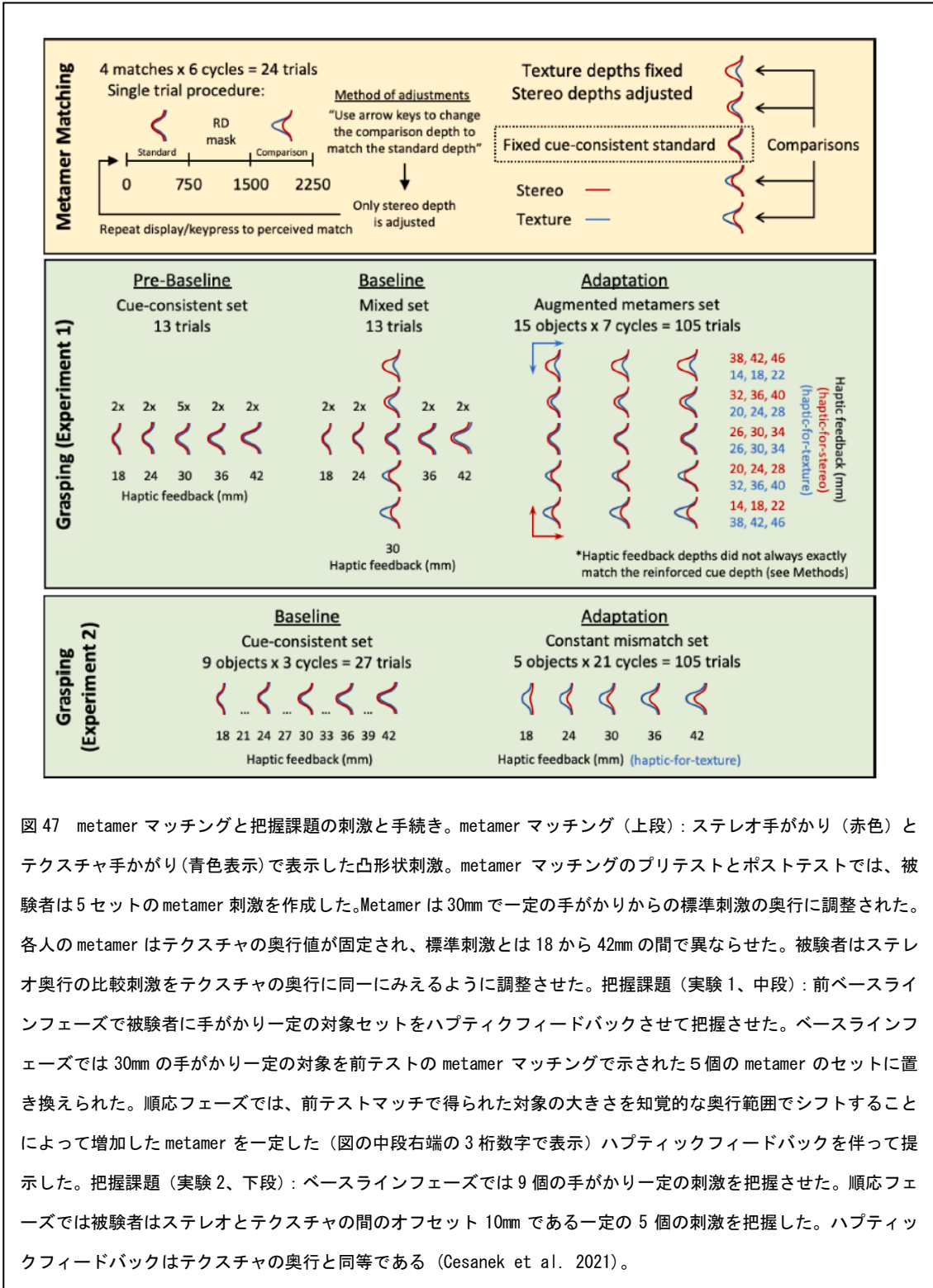


図 47 metamer マッチングと把握課題の刺激と手続き。metamer マッチング（上段）：ステレオ手がかり（赤色）とテクスチャ手がかり（青色表示）で表示した凸形状刺激。metamer マッチングのプリテストとポストテストでは、被験者は 5 セットの metamer 刺激を作成した。Metamer は 30mm で一定の手がかりからの標準刺激の奥行に調整された。各人の metamer はテクスチャの奥行値が固定され、標準刺激とは 18 から 42mm の間で異ならせた。被験者はステレオ奥行の比較刺激をテクスチャの奥行に同一にみえるように調整させた。把握課題（実験 1、中段）：前ベースラインフェーズで被験者に手がかり一定の対象セットをハプティックフィードバックさせて把握させた。ベースラインフェーズでは 30mm の手がかり一定の対象を前テストの metamer マッチングで示された 5 個の metamer のセットに置き換えられた。順応フェーズでは、前テストマッチで得られた対象の大きさを知覚的な奥行範囲でシフトすることによって増加した metamer を一定した（図の中段右端の 3 桁数字で表示）ハプティックフィードバックを伴って提示した。把握課題（実験 2、下段）：ベースラインフェーズでは 9 個の手がかり一定の刺激を把握させた。順応フェーズでは被験者はステレオとテクスチャの間のオフセット 10mm である一定の 5 個の刺激を把握した。ハプティックフィードバックはテクスチャの奥行と同等である（Cesane et al. 2021）。

段に表示) はステレオ手がかり（赤色表示）とテクスチャ手がかり（青色表示）で構成した凸形状刺激で、metamer マッチングのプリテストとポストテストを実施した。ここでは被験者には 5 セットの metamer 刺激を 30mm で一定の手がかりからの奥行を標準刺激として調整

させた。各人の metamer はテクスチャの奥行値が固定され、標準刺激は 18 から 42mm の間に異ならせた。被験者はステレオ奥行の比較刺激をテクスチャの奥行に同一にみえるように調整した。把握課題（実験 1、中段表示）では、前ベースラインフェーズで被験者に手がかり一定の対象セットをハプティックフィードバックさせ把握させた。次のベースラインフェーズでは 30mm の手がかり一定の対象を前テストの metamer マッチングで示された 5 個の metamer のセットに置き換えて実施した。順応フェーズでは、前テストマッチで得られた対象の大きさを知覚できる奥行範囲でシフトすることによって増加した metamer を一定した（図の中段右端の 3 桁数字で表示）ハプティックフィードバックを伴って提示した。把握課題（実験 2、下段表示）では、ベースラインフェーズでの 9 個の手がかり一定の刺激を把握させた。順応フェーズでは被験者にステレオとテクスチャの間で効果が一定の 10mm の 5 個の刺激を把握させた。

metamer マッチングの前テストの結果、テクスチャのハプティック条件では、4 個のテクスチャ奥行（18、24、36、42mm）はステレオ奥行 36.9、32.1、26.1、23.1mm にそれぞれ対応してマッチングされ、テクスチャの加重値は 0.217 となった。ステレオのハプティック条件では、4 個のテクスチャ奥行（18、24、36、42mm）はステレオ奥行 36.5、31.7、26.2、and 22.6mm にそれぞれ対応してマッチングされ、テクスチャの加重値は 0.263 となった。予想とおり、ステレオ奥行のマッチングはテクスチャ奥行のそれと反比例にあることが示され、また把握課題でのハプティックフィードバック課題は、強化した手がかりと正の相関となり、他の手がかりと負の相関となった。

把握課題実験の結果について、知覚と運動の働きを分析するために各個人の測定した知覚値の変化を metamers にわたる予測値である MGA 尺度（把握運動のグリップ間隙の最大値）に変換した。MGA 尺度（kmetamers）の算出は、以下の式で算出した。

$$kmetamers = ((1 - wSPost) - (1 - wSPre)) / wSPre$$

(wSPre : 前テストステレオ加重値)

(wSPost : 後テストにおけるステレオ加重値)

その結果、前ベースラインフェーズでは、MGAs は手がかり効果が一致して作成された奥行の増大に伴ってリニアな勾配変化(0.64)を示した。ベースラインフェーズでは、被験者は metamers のすべてにわたって同一の MGA を示し、それらの知覚と同等な値とみなせた。MGA 尺度はテクスチャ奥行条件で-0.01、ステレオ奥行条件で-0.06 となり、この結果は奥行の metamers 手がかり条件が異なるにも関わらず、視覚運動反応としては違いがみられなかった。順応フェーズではハプティックテクスチャ条件で MGA が順応刺激セットの増大に伴いリニアに高くなる傾向が示され、テクスチャに対して手がかり信頼性が高まること示された。しかし、ハプティックステレオ条件では MGA の減少が示されず、したがってステレオ手がかりの信頼性が損なわれなかった。

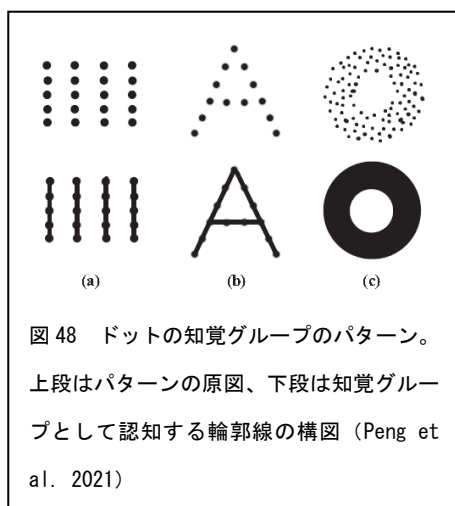
この研究の主目的は知覚判断における奥行手がかり効果の加重の変化に把握遂行がどのように対応しているかであった。前テストと後テストをステレオセッチング条件で知覚手

がかりの加重値を比較するとハプティックテクスチャ条件の後テストテクスチャ加重値は 0.308 (テストより 0.270 アップ)、ステレオ条件のそれは 0.259 (前テストより 0.263 の減少) となり、これらの手がかり加重値の変化は有意にフィードバック条件でもみられた。これはハプティックステレオ条件より手がかり効果が知覚でも視覚運動においても高いことを意味する。この結果は順応における個人間の知覚変化、および運動の制御にも対応していた。

これらの実験結果から、知覚と行動の相互作用では知覚が直接行動を導き、また行動が運動や知覚学習のエラー信号を出していると考えられる。

ドットパターンなどについてのゲシュタルト近接性の計算モデル

視覚システムは部分をそれより大きい意味あるものにまとめる能力をもつ。知覚的群化は個々別々の要素をまとめあげ意味あるものにする働きである(図 48)。Peng et al. (2021) はトランス空間理論 (tolerance space theory) を用いてドットパターンの計算モデルを考えた。このモデルではドットパターンが拡張トランススペース (ETS) で表されること



を仮定した 1 と 2 の背伸び方法 (one- and two-reach methods) が提案され、ETS とこの背伸び方法は近隣グラフ比 (RANG、ratio neighborhood graph) を作成する方法として用いられた。これは、ダイアグラムからトランスを計算、さらに新たな RANG を計算、これに基づき新たな RANG からつながりのある構造を再構築する方法である。ゲシュタルト心理学では近接、類似、閉鎖、良い連続、そして共通運命が知覚の体制化法則として提示された。この古典的ゲシュタルト理論は視かけの刺激配列から考えられたものであった。

Tolerance space theory (Zeeman, 1962; Sossinsky, 1986) は、個々別々のパターンの知覚体制化 (グルーピング) のための適切な数学的アプローチで、個々別々のパターンにトランス関係を当て回帰と対称性をもつ連続体を公式化する方法である Chen (2005)。この理論を用いてドットパターンの大局の手がかりを探す近隣グラフ比を生成され、RANG 理論を一般化する新しい考えの ETS が提案された。tolerance space とは異なり ETS はデータの要素とトランスの間に特有の関係をもたせる。この考え方に基づくと、多くの個々別々のパターンが適切な ETS に表せ、連続した要素はトランススペースを満足する。したがって ETS の適切なトランス関係を見つけることがこの提案モデルにとって重要になる。

ここでは、one-reach strategy に基づき two-reach method へと進める複雑な構造を処理して RANG を生成、その後でこの RANG 個々のパターンから連続する構造を再構成するため

の組合せの処理過程が設計された。このモデルでは one-reach と two-reach method を採用し、均一ではないドットパターンを知覚的にグルーピングする方法をとる。意味あるパラメータとしては閾値 (thID) 1 を設定し、thID 1=0.12、thID 2=0.035 をモデルでは設定した。このモデルによるシミュレーションの結果と人間知覚の結果の間の一致は量的に判定した。

トランス (tolerance) とは、最少可知差異 (least noticeable difference) であり、

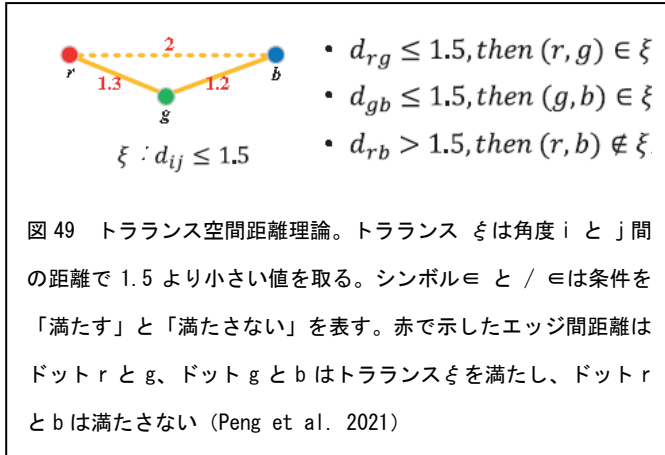
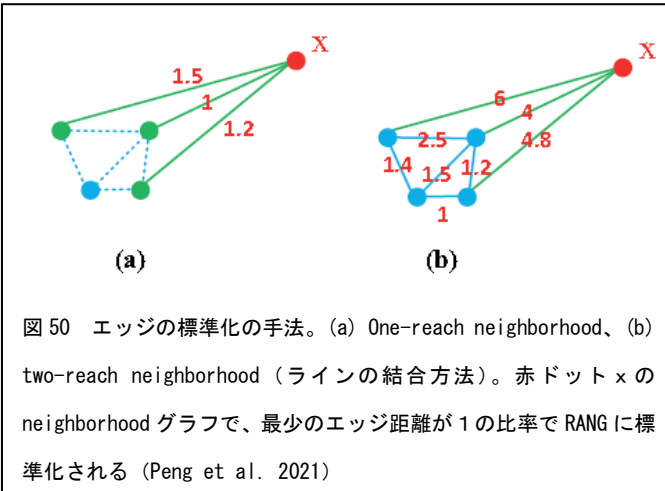


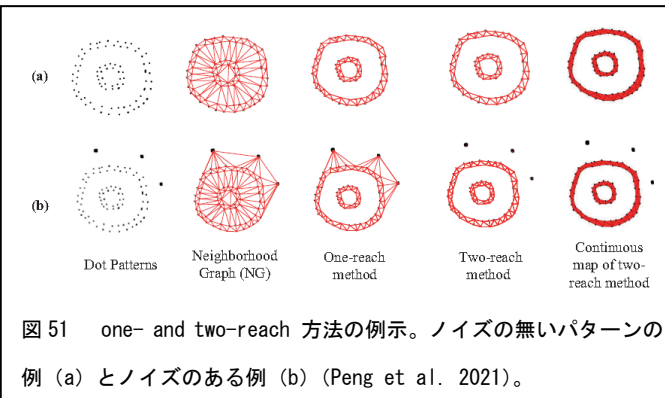
図 49 に示したように計算される。

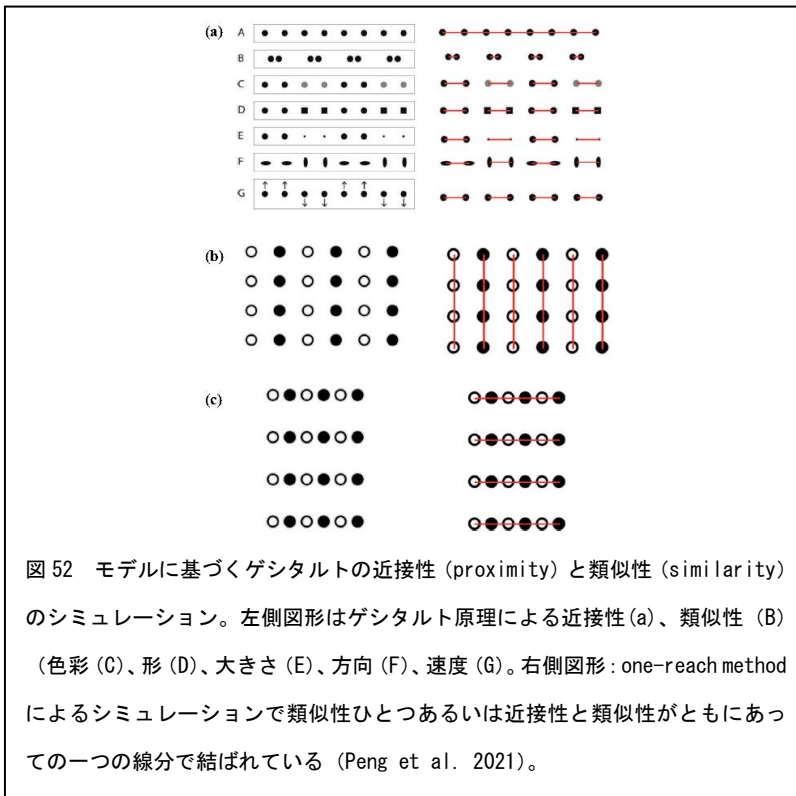
トランス空間距離理論では、トランス ξ は角度 i と j 間の距離で 1.5 より小さい値を取る。シンボル \in と \notin は条件を「満たす」と「満たさない」を表す。赤で示したエッジ間距離はドット r と g 、ドット g と b 間のトランス ξ を満たし、ドット r と b は満たさないと計算する。距離空間内に離散的に分布した点の集合は、ドロネー図 (ドロネー三角形分割) で得られる。図 50 には、one- and two-reach 方法が例示されている。ノイズの無いパターン a とノイズのある例の隣接する最少エッジの比率は異なるが、最終的に two-reach 段階では隣接するエッジは無くなり明確に輪郭検出を改善する (図 51)。



ゲシタルト近接性モデルの検証

実験は、10 人の被験者のドットパターン各種 10 個で実施された。被験者にはドットパターンと近接性グラフを同時に提出し、そのグラフの余分な線分をカットし連続した形の線分にするように教示した。被験者の結果はモデルとの整合性をチェックするグラウンドトルス (ground truth) とした (図 52)。また、このモデルを用いたイメ

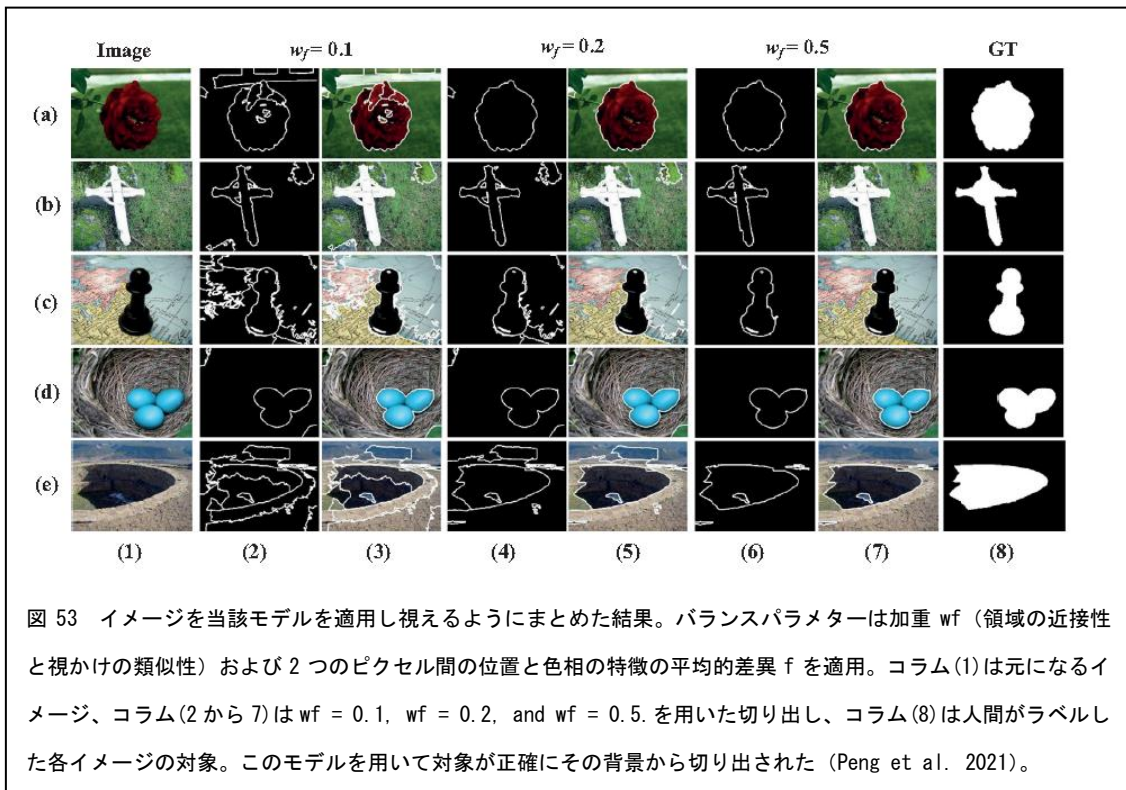




ージの切り出し手法と結果は図 53 にある。バランスパラメータは加重 wf (領域の近接性と視かけの類似性) および 2 つのピクセル間の位置と色相の特徴の平均的差異 f を適用。図中のコラム (1) は元になるイメージ、コラム (2 から 7) は $wf = 0.1$, $wf = 0.2$, and $wf = 0.5$. を用いた切り出し、コラム (8) は人間がラベルした各イメージの対象をそれぞれ示した。このモデルを用いて対象が正確にそ

の背景から切り出されたことがわかる。

実験およびその結果の質的評価によると、提案したモデルが連続した構造の再構造を近



接性、類似性原理からシミュレーションし、イメージの切り出しを行い、知覚のグルーピングとコンピュータビジョンを可能にしたといえる。