



3次元形状認識における輪郭線統合

Contour integration in recognition of 3-D shape

和崎夏子^{1,2)}, 竹内龍人¹⁾

Natsuko WASAKI and Tatsuto TAKEUCHI

1) 日本女子大学大学院 人間社会研究科 (〒112-8681 東京都文京区目白台 2-8-1, n1464063wn@ug.jwu.ac.jp)

2) 日本学術振興会特別研究員

概要: 本研究では VR 空間において輪郭線を構成する要素が, 形状認識の際にどのように統合されるのか明らかにすることを目的とした. 多数の円柱がランダムに配置された中から, 円柱で構成した立方体などの形状を検出する課題を VR 空間上で行った. その結果, 特に3次元印象が強い場合に, 立方体を構成する円柱が垂直, かつ互いに平行であり端点が接しない構造が検出されやすいことがわかった. 2次元平面上では, 方位が類似した要素の端点が連結されることにより輪郭線が知覚される, と考えられてきた. しかしながら3次元空間では, 垂直方向の要素が検出・統合されることにより, 全体的な形状が知覚されると考えられる.

キーワード: 形状認識, 輪郭線統合, 3D, VR

1. はじめに

輪郭線は, 形状認識に必要な情報であると共に, 3次元空間を把握するための奥行きがかりを構成している. 例えば, 線遠近法はその一例である.

輪郭線の検出特性は, 主に2次元平面上において検討されてきた. Fieldら[1]およびHessら[2]は, ある方位を持つ個々のガボールパターンを輪郭線の要素であると見なし, 要素が統合された際に知覚される全体的な輪郭線への感度を実験的に検討した. その結果, ガボールパターンの端点が接続して仮想的な輪郭線が形成される構造(図1A)の方が, ガボールパターンの方位が仮想的な輪郭線に対し直角に配置された非接続構造(図1B)よりも, 検出しやすいことがわかった. この結果よりFieldら[1]は, 2次元平面上では, 輪郭線を構成する要素の端点同士が作る連合場(association field)が輪郭線全体の認識に重要であると結論づけた.

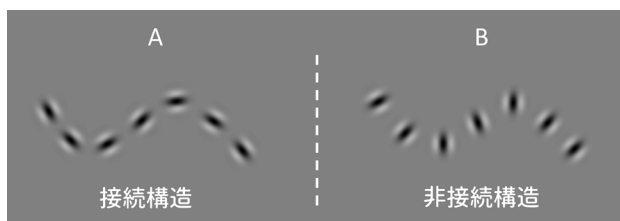


図1: ガボールパターンによる輪郭線の模式図
(Hessら[2]を元に作図)

和崎・竹内[3]は, こうした結論が3次元空間においても成立するかを検討した. そのために要素刺激としては, 2次元的なガボールパターンではなく, 3次元印象をもたらす円柱を用いた. また要素が形作る輪郭線としては直線のみを検討した. 図2に用いた刺激を示す. 細長く短い円柱を要素とし, 直線構造を構成する際の円柱の角度を変数とした. 実験参加者の課題は, 空間内で円柱を1000個以上ランダムに配置し, その中から図2のように5本の円柱から成り立つ直線的な構造(輪郭線)をターゲットとして検出することであった(図3). 直線構造を形作る円柱の配置としては, Fieldら[1](図1)に習い, 各円柱の端点が接続する構造(図2の赤枠で囲った刺激), および端点が接続しない非接続構造(図2の緑枠で囲った刺激)を検討した. これらの刺激は2次元平面上で提示された. 図3では画面ほぼ中央に検出すべきターゲット(輪郭線)が提示されている.

実験の結果, 接続構造の輪郭線については, 円柱間の角度増加と共に検出率が低くなり, 反応時間も遅くなった. 一方で, 非接続構造の輪郭線は角度の変化に依存せず高確率で検出され, 反応時間も速かった. これらの結果は, 非接続構造の検出(図1B)は困難であるとしたFieldら[1]の結果と異なっていた. 和崎・竹内[3]の視覚刺激(図3)では, 線遠近法や陰影といった単眼立体視の要因により3次元的印象がもたらされている. こうした印象がFieldら

[1]の結果との違いを生み出したと考えられる。

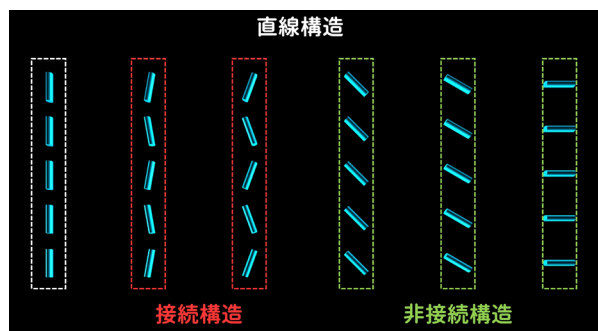


図2:要素刺激に基づく直線的な輪郭線 (ターゲット) の例

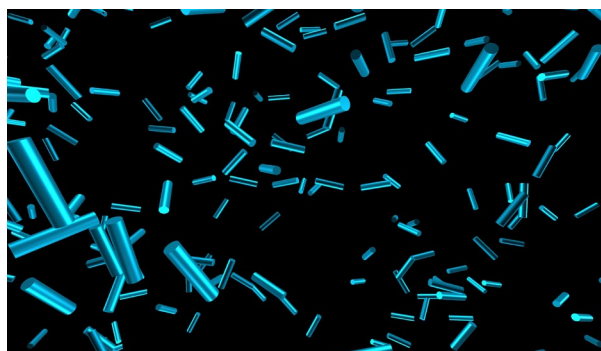


図3: ターゲットである直線的な輪郭線 (画面中央) 埋め込まれた刺激画像

そこで本研究では、3次元的印象がより強まる仮想現実 (VR) 空間において、ここで紹介した先行研究のように要素刺激を操作することにより、どのような形状がより認識されやすいのか、また形状認識の際には輪郭線を構成する要素はどのように統合されるのか、という点を実験的に検討することを目的とした。実験では比較のために、単眼立体視、両眼立体視双方が興行き印象をもたらす VR 提示条件に加えて、和崎・竹内[3]のように単眼立体視の情報のみを与える2次元平面 (2D) における提示も行った。

2. 方法

2.1 実験参加者

実験には、2D 提示条件 9 名 (M=23.5 歳, SD=1.49 歳), VR 提示条件 5 名 (M=24.4 歳, SD=1.35 歳) が参加した。実験参加者全員が矯正視力を含む正常な視力を有していた。

2.2 装置

実験のセッションは、パーソナルコンピュータ (Dell Precision 5820, Dell Inc, OS: Windows 10, CPU: Intel Xeon Processor W-2223, RAM: 32.0 GB, GPU: NVIDIA Quadro P1000) および Unity (Unity2019.3, Unity Technologies) により制御された。視覚刺激は、Unity により作成し、2D 提示条件では 24 インチ液晶カラーディスプレイ (BenQ XL2540B, BenQ Corp.), VR 提示条件ではヘッドマウントディスプレイ (HMD) である VIVE Pro Eye (HTC Corp.)

に提示された。カタログ値による HMD の解像度は 1440 × 1600 ピクセル (片眼), リフレッシュレートは 90Hz, 視野角は最大 110 deg であった。実験参加者は、2D 提示条件ではキーボード, VR 提示条件では Vive コントローラーを、課題遂行時における反応の入力装置として使用した。

2.3 視覚刺激

要素としての視覚刺激は、和崎・竹内[3]と同様の円柱とした。要素としてこうした円柱を用いたのは、オブジェクト認識を説明する構造記述理論における要素として仮定されている一般化円筒[4]やジオン[5]に類似した、単純な構造による検討を可能にするためである。

和崎・竹内[3]では実験参加者が検出する刺激は直線構造のみ (図2) であったが、本研究では、要素による立方体構造 (図4A), 立方体を構成する4辺から成る平行構造 (図4B), そして4辺のみから成る四角 (図4C) を検出すべきターゲットとして用意した。またこれらの形状の全体的な傾き (0°~90°) も変数とした。

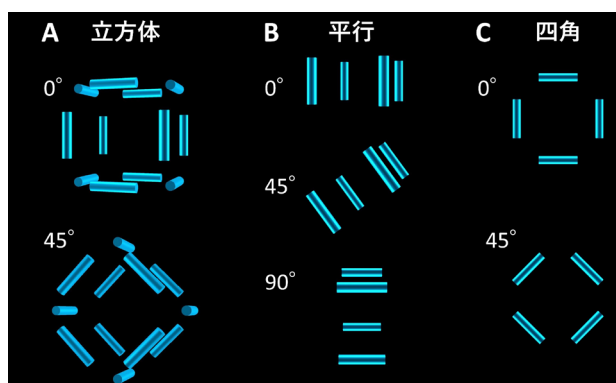


図4: 使用したターゲット刺激の形状

妨害刺激は単一の円柱とし、仮想空間内の特定の範囲にランダムに 1900 個配置され (図5), ターゲットはこの中に埋め込まれた。なお、ある範囲における妨害刺激の数は、ターゲットを構成する辺数と同等あるいはそれ以上であり、ターゲットの辺数による密度がターゲット検出の手がかりに影響しないことを事前に確認した。

2D 提示条件では、Unity 内で使用される仮想空間を映し出すカメラにおける視野角の関係上、実際に映し出される妨害刺激の数は 200 個程度であった。VR 条件では、実験参加者は HMD により図5に示す仮想空間の中心に位置し、妨害刺激は 1900 個すべてが提示された。

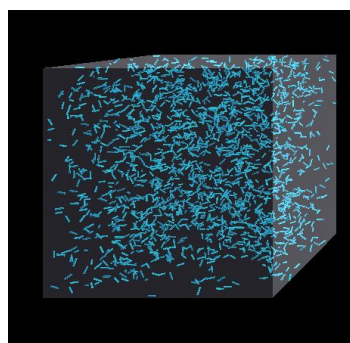


図5: 妨害刺激 (1900 個) を配置した仮想空間

2.4 手続き

2.4.1 2D 提示条件

実験参加者の課題は、液晶ディスプレイ上に提示された妨害刺激の中からターゲット（図 4A, B, C）をできるだけ早く見つけ出し反応することであった。実験参加者は、ターゲットがあると判断した場合はキーボードの J キー、ターゲットがないと判断した場合は F キーを押した。ターゲットがある試行の場合、キーを押すとフィードバックのためにターゲットの色が赤く光った（図 6）。反応キーが押されると画面が 1 秒間暗転し、自動的に次の試行が始まった。ターゲットの形状は 7 種類あり（図 4）、ディスプレイ上のランダムな位置に提示された。また、それと同じ数の 7 試行にはターゲットは含まれなかった。この 14 試行を 1 セッションとし、実験参加者は 10 セッション、計 140 試行を行った。刺激の提示順序は実験参加者間でランダムとした。

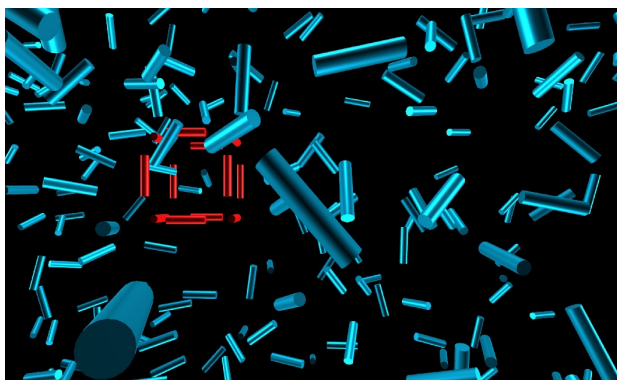


図 6：立方体 0° 刺激（図 4A）がターゲットとして埋め込まれた刺激画像。反応後のフィードバックとして、ターゲットの色が赤くなる。

2.4.2 VR 提示条件

実験参加者は HMD を装着し、2D 提示条件と同様の課題を VR 空間内において行った。図 7A に実験の様子を示す。図 7B は VR 空間内における実験参加者の立ち位置（黄色の球体）とターゲットの提示位置（オレンジの円）を模式的に示している。ターゲットは、実験参加者を中心として一定の半径における円周上（図 7B におけるオレンジの円）のランダムな位置に提示された。

実験が開始されると、実験参加者は図 7B の黄色の球体の位置に立っていることになる。そこからターゲットをできるだけ早く検出する課題を行った。ターゲットを見つけた場合は、ターゲットを見ながらコントローラーのパッドを押した。実験参加者がコントローラを押した際、HMD の視野にターゲットがない場合には、誤答と記録された。ターゲットが見つからない場合は、実験参加者は口頭で実験者にその旨を知らせた。なお、HMD の装着による実験参加者への負担および所用時間を考慮し、VR 提示条件ではターゲットを含まない試行は行わなかった。1 試行が終了すると実験者が次の試行を開始させた。2D 提示条件と

同様に、ターゲットは 7 種類あった（図 4）。この種類分の 7 試行を 1 セッションとし、実験参加者は 4 セッション、計 28 試行を行った。刺激の提示順序は実験参加者間でランダムとした。

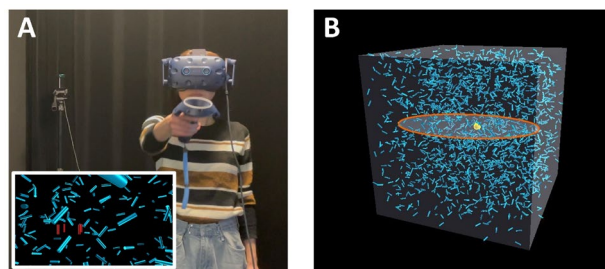


図 7：実験の様子 (A) と VR 空間の模式図 (B)

3. 結果

3.1 2D 提示条件

図 8 左に 2D 提示条件の結果を示す。グラフの縦軸は正答率(%), 横軸はターゲットの形状である。各グラフにおけるドットは個人のデータを示す。チャンスレベルは 50%, 誤警報率は 6.82%であった。ターゲット全条件を 1 セッション内で提示したため、誤警報率は条件間で同一となっている。2D 提示条件の結果から、立方体 0°の検出が最も容易であり、続いて立方体 45°および平行 0°が見つかりやすいことがわかった。それ以外の形状のターゲット検出は困難であった。立方体構造の検出は、その傾き (0°/45°) に大きくは依存しなかったのに対し、平行構造の場合は傾きに依存し、垂直 (平行 0°) 以外の形状に対しては感度が大幅に低下した。

3.2 VR 提示条件

図 8 右に VR 提示条件の結果を示す。VR 提示条件では全ての試行にターゲットが含まれていたために、チャンスレベルは 30.5% (=110° (HMD の視野角) / 360° (ターゲットが提示される範囲)) となる。VR 提示条件では全実験参加者が、立方体 0°および平行 0°のターゲットを見逃すことはなかった。立方体 45°と四角 0°に対しては比較的高い感度が保たれたが、それ以外の形状を見つけることは困難であった。

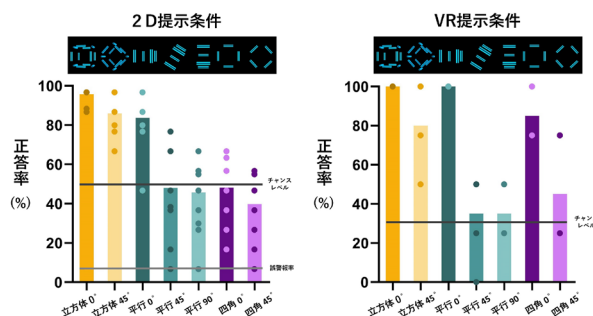


図 8：2D 提示条件（左、N=9）と VR 提示条件（右、N=5）における結果

4. 考察

断片化された情報の連結により輪郭線が検出される場合は、連結の強度は各断片の方位に依存するという連合場仮説[1,2]から、本研究の結果を考察する。まず2D提示条件において、立方体 0° と立方体 45° が検出しやすいという結果は、連合場仮説から説明できると考えられる。各円柱が途切れずに連続している接続構造(図1)がみてとれるからである。四角 0° と四角 45° では検出困難であったことは、接続構造への感度は円柱の数といった情報量に依存している可能性や、立方体に対して特異的に感度が高い可能性を示唆している。

2D提示条件の結果が先行研究[1,2]と顕著に異なる点は、平行構造に対する感度である。円柱が垂直、かつ互いに平行であり端点が接しない構造(平行 0°)は検出しやすい傾向にあるが、これは非接続構造(図1)の検出は困難であるとする連合場仮説とは合致しない。なお、斜め(平行 45°)や水平(平行 90°)の非接続構造は見つけにくいという異方性がみられた。2次元平面上では、垂直/水平線分は 45° 線分よりも検出・弁別が容易であるという傾き効果[6]が知られているが、この結果は傾き効果とも合致しない。

本研究では先行研究[1,2]と異なり、視覚刺激に3次元的印象をもたらす手がかりを与えており、それが連合場仮説では説明できない理由かもしれない。実際に、3次元的印象がさらに強まっているVR提示条件では、平行 0° のターゲットに対する感度は、立方体 0° と並んで最も高くなっている。同時に、平行 45° 、平行 90° に対する強い異方性も現れている。さらに、2D提示条件と比べて、四角 0° が検出しやすくなっている。これは、VR提示により平行 0° に対する感度が高くなったことと関連していると考えられる。つまり、四角 0° については、接続構造のために検出が容易となったのではなく、垂直2辺の存在が重要であった可能性がある。

以上の結果から、3次元空間における形状認識は、2次元平面上における輪郭線統合の様式からは説明できないと結論づけられる。2次元平面上においては、輪郭線を構成する線分の端点同士が連結される連合場が重要である一方で、3次元空間では、まず垂直方向の形状が検出され、それらが統合されることにより、全体的な形状が知覚されている可能性を本研究結果は示唆している。この仮説からすると、円柱の数が多い立方体 45° において感度が低下したのは、垂直形状が利用できなかったためであるといえる。

垂直線/水平線に対する感度が斜め線よりも高いという傾き効果は、重力に基づく方位および網膜に基づく方位の双方に由来する[7]。VR提示条件では、身体動作が可能であり、実際に体を大きく動かしながら探索する実験参加者もいた。この場合であっても立方体 0° や平行 0° に対して感度が高かったことから、本研究で見いだされた垂直優位の効果は、重力由来であると考えられる。

ビルなどの人工的な造形物では垂直構造は顕著ではあ

るが、自然界においても重力由来、例えば森林の木々やヒトの立ち姿など垂直構造は特徴的である。VRにより現実世界に近い環境を再現した時には、現実世界における情報の偏りに基づく視覚特性が、ターゲットへの検出感度の違いとして現れたと考えられる。

引用文献

- [1] D. J. Field, A. Hayes, and R. F. Hess. Contour integration by the human visual system: Evidence for a local "association field". *Vision Research*, Vol. 33(2), pp. 173-193, 1993.
- [2] R. F. Hess, A. Hayes, and D. J. Field. Contour integration and cortical processing. *Journal of Physiology Paris*, Vol. 97(2-3), pp. 105-119, 2003.
- [3] 和崎夏子, 竹内龍人: 3次元空間における輪郭線の検出特性, 日本視覚学会 2021 冬季大会, オンライン(東京工業大学), 2021年1月20日.
- [4] D. Marr, and H. K. Nishihara. Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, Vol. 200, pp. 269-294, 1978.
- [5] I. Biederman. Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, Vol. 94(2), pp. 115-147, 1987.
- [6] D. W. Heeley, H. M. Buchanan-Smith, J. A. Cromwell, and J. S. Wright. The oblique effect in orientation acuity. *Vision Research*, Vol. 37(2), pp. 235-242, 1997.
- [7] K. Mikellidou, G. M. Cicchini, P. G. Thompson, and D. C. Burr. The oblique effect is both allocentric and egocentric. *Journal of Vision*, Vol. 15(8):24, pp. 1-10, 2015.