

バーチャルリアリティ空間における形状の検出特性

Characteristics of shape detection in virtual reality space

和 崎 夏 子

Natsuko WASAKI

(日本女子大学人間社会研究科心理学専攻博士課程後期)

要 約

本研究では、頭や体を自由に動かせる仮想現実（VR）空間内でのオブジェクトの検出特性を明らかにすることを目的とした。実験では、VR空間においてランダムに配置された円柱の中から、円柱で構成されたオブジェクトやパーツの視覚探索を行った。その結果、オブジェクトの垂直成分を持つパーツに対する検出感度は、オブジェクトそのものへの感度と変わらず、また、水平成分や傾いた成分よりも高くなった。オブジェクトを2次元ディスプレイ上で観察した場合は、こうした傾向は弱まった。以上のことから、3次元オブジェクトの認識は、環境中心座標上で垂直なパーツに基づいている可能性を示している。

[Abstract]

To understand the way in which people recognize and identify objects in their lives is a fundamental question in the field of vision science. In this study, we examined sensitivity toward object and its parts by utilizing virtual reality technology. We found a high sensitivity toward the vertical parts compared to the oblique or horizontal parts of objects presented in virtual reality environments. From the other experiments, we established that the superiority of vertical targets in visual search performance compared to that of oblique or horizontal targets was more conspicuous in VR environments compared to that in standard 2D display environments. We speculate that the dependency on the vertical parts stems from the fact that our daily lives are rich in vertical components represented in spatiotopic reference frames and provide more information than horizontal components.

はじめに

私たちが日常生活の中で、どのように物体（オブジェクト）の形状を認識・識別しているのかを理解することは、視覚科学の分野において重要な課題の一つである。どのようなオブジェクトも様々な部分（パーツ）から構成される。立方体のような単純なオブジェクトも複数のパーツに分解することが可能である（Humphreys & Donnelly, 2000）。オブジェクトの認識はそれを構成するパーツに依存するために、オブジェクト認識における構造記述理論ではパーツの検出過程が仮定されている。この理論では、パーツは一般化円筒（Marr & Nishihara, 1978）やジオン（Biederman, 1987）により記述されている。オブジェクト認識の機序理解に向けて、個々のパーツへの感度を知ることは重要であると考えられる。オブジェクト認識に関してはこれまでに多く

の研究が行われてきたが (e.g., Kaiser, et al., 2019), そうした研究の多くが 2 次元的な画像の観察に基づいていた。しかし日常では, 多くの場合自由な身体動作が伴い, また対象となるオブジェクトに関して複数視点からの 3 次元情報が得られる。

そこで本研究では, 身体動作が可能な仮想現実 (virtual reality, VR) 技術を使用することにより, 強い 3 次元印象がもたらされる空間において, オブジェクトとそれを構成するパーツへの検出感度および検出の特性を明らかに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, 両眼立体視双方が奥行印象をもたらす VR 提示条件に加えて, オブジェクト表面の陰影をなくすことにより 3 次元印象を弱めた視覚刺激を 2 次元平面 (PC ディスプレイ) に提示する条件を実施した。

方 法

実験参加者

28 名 ($M = 23.9$ 歳) が実験に参加した (VR 条件: 16 名, 2D 条件: 12 名)。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。

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) およびリアルタイム 3 D 開発ソフトウェア 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, VR 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 440×1600 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, 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。PC ディスプレイ上における提示条件 (2D 条件) では, 視覚刺激は 24 インチ液晶カラーディスプレイ (BenQ XL2540B, BenQ Corp.) に提示された。

視覚刺激

視覚刺激の要素として 3 次元印象をもたらす円柱を用いた。要素に円柱を用いたのは, 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 (Marr & Nishihara, 1978) やジオン理論 (Biederman, 1987) 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。

実験では, VR 空間内においてランダムに配置された円柱の中から円柱により定義された立方体とそのパーツをターゲットとして探し出す視覚探索課題を実施した。図 1 は, HMD から見た空間の一部を切り取った図である。この例では, 画像ほぼ中央に探索すべきターゲット (立方体) が提示されている。2D 条件の詳細は「実験手続き」に記す。

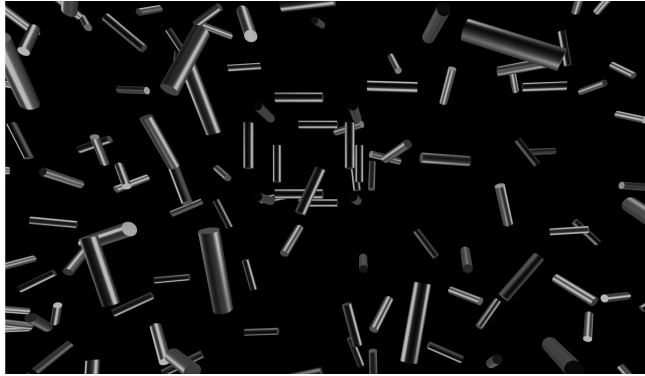


図 1 ターゲットである立方体構造が埋め込まれた VR 空間

図 2 左図は、VR 条件において使用したターゲット、図 2 右図は 2D 条件において使用したターゲットである。2D 条件の視覚刺激は、VR 条件の視覚刺激より陰影を排除しており、3 次元印象がより弱くなっている。ターゲットは、細長く短い円柱の要素を組み合わせた立方体構造を用意し、それを構成する 4 辺から成る平行構造、そして 4 辺のみから成る四角構造として定義した(図 2)。また、これらのオブジェクトの全体的な傾き ($0^{\circ} \sim 90^{\circ}$) を変数とした。VR 空間内において 0° は垂直、 90° は水平となる。平行構造と四角構造は、元のオブジェクトである立方体構造を構成するパーツであるといえる。

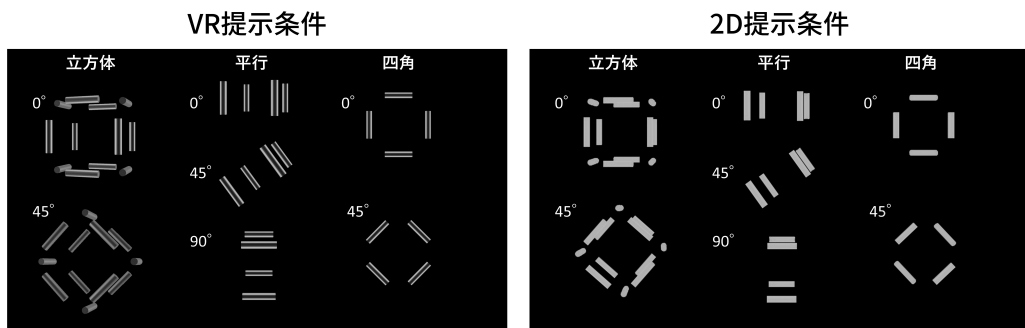


図 2 実験に使用したターゲット刺激

左図は VR 空間における実験で使用した 3 次元印象があるターゲット刺激。右図は PC ディスプレイ上における実験で使用した 3 次元印象を弱めたターゲット刺激。右図の刺激は、左図における刺激から陰影を排除している。 0° は垂直、 90° は水平となる。

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、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要素と同等あるいはそれ以上であり、ターゲットの密度が検出の手がかりに影響しないことを事前に確認した。

実験手続き

VR 条件では、実験参加者は HMD を装着し、図 3 に示す仮想空間の中心に立った。図 3 は、

VR空間内における実験参加者の立ち位置（中心の球体）とターゲットの提示位置（白色の円）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3に白色の円）において、ランダムに提示された。

実験が開始されると、実験参加者は図3の中心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ーを押した際、HMDの視野にターゲットがない場合には、誤答と記録され、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。コントローラ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変色した。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、ターゲットを含まない試行は行わなかった。実験参加者は、ターゲット7種類×繰り返し4回の計28試行を行った。刺激の提示順序は参加者間でランダムとした。

2D条件における実験参加者の課題は、液晶ディスプレイに提示された妨害刺激の中からターゲットをできるだけ早く見つけ出し反応することであった。2D条件では、ターゲットを含まない試行があった。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。反応キーが押されるとフィードバックのためにターゲットが赤く変色した。このフィードバックののち、実験参加者がスペースキーを押すと次の試行が始まった。7種類のターゲットは、ディスプレイのランダムな位置に提示された。実験参加者は、ターゲット7種類×繰り返し14回にターゲットを含まない84試行を加えた、計168試行を行った。刺激の提示順序は参加者間でランダムとした。

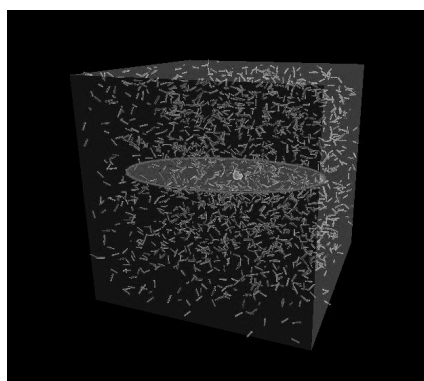


図3 VR空間の模式図

結 果

図4Aは、VR条件におけるターゲットの検出における正答率を示す。図4Aより、平行0°には、元のオブジェクトである立方体0°や立方体45°と同等の感度の高さがみられた。一方で、平行45°や平行90°、四角のパーツに対する検出感度は、立方体や平行0°と比較して大きく低下した。これらの傾向を統計的に調べるため、Bonferroni法によるターゲット間の多重比較を行った。その結果、立方体45°と平行0°を除くその他全てのターゲットと立方体0°との間、立方体0°と立方体45°を除くその他全てのターゲットと平行0°との間に有意な差がみられた ($t_s(15) \geq 4.05$,

$ps < .02$)。なお、反応時間もターゲットの種類に依存し、立方体と平行 0° への反応時間は他のターゲットと比較して大きく短縮した。

図 4B は、2D 条件におけるターゲットの検出における正答率を示す。VR 条件では立方体と平行 0° は同等の感度を示したが、図 4B より、2D 条件では、平行 0° に対する感度は立方体に対する感度と比較して顕著に低下した。ターゲット全体の傾きが 45° の形状に対する感度は、提示条件に依存せず低感度であった。これらの傾向を統計的に調べるため、Bonferroni 法によるターゲット間の多重比較を行った。その結果、立方体 45° を除くその他全てのターゲットと立方体 0° との間に有意な差がみられた ($ts(11) \geq 7.36, ps < .02$)。立方体 0° と立方体 45° を除くその他全てのターゲット間に有意な差はみられなかった ($ts(11) \leq 3.52, ps > .99, n.s.$)。なお、反応時間もターゲットの種類に依存し、感度の高さに応じて反応時間が短縮する結果がみられた。

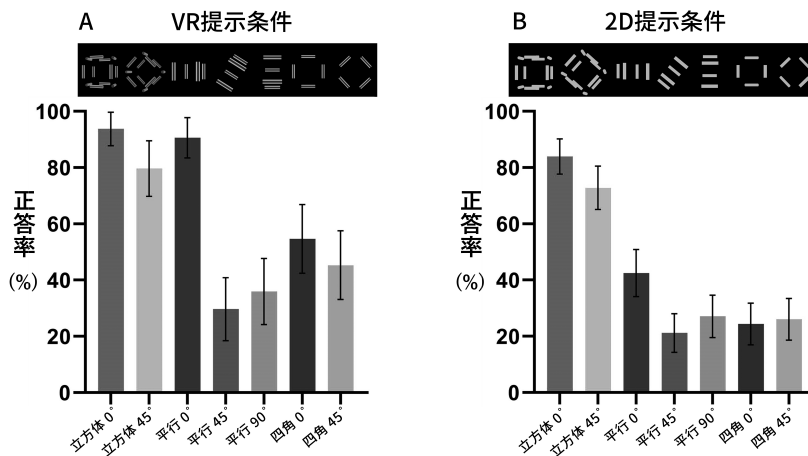


図 4 ターゲット検出における正答率

VR 提示条件 (図 4A)、2D 提示条件 (図 4B) における正答率。それぞれ縦軸は正答率 (%), 横軸はターゲットの種類を示す。誤差棒は 95% 信頼区間。

考 察

本研究では、自由な身体動作が可能な仮想現実空間を用いることにより、オブジェクトとそれを構成するパーツへの検出感度を明らかにすることを目的とした。実験の結果より、垂直に配置されたパーツへの感度は、斜めや水平に配置されたパーツよりも高くなった。元のオブジェクト (立方体) と垂直に配置された平行構造の視覚探索パフォーマンスは同等であったことから、私たちの 3 次元オブジェクトの認識は垂直成分に依存していることが示唆される。

3 次元印象を弱めた視覚刺激を PC ディスプレイ上に提示した、統制条件との比較より、垂直に配置されたパーツにおける感度優位性は、2D ディスプレイ環境よりも VR 環境で顕著となることわかった。VR 環境で実験参加者が身体や頭部を動かした場合には、実験参加者の網膜上ではこの垂直パーツは必ずしも垂直にはならず、水平にもその他の角度にもなりうる。つまり網膜中心座標においては、垂直パーツは必ずしも垂直ではない。しかし、VR 環境内で提示したオブジェクトは妨害刺激、ターゲット共に静止していたため、環境中心座標においては、垂直パーツの形状は物理的に「垂直」のままであった。一方で、2D ディスプレイ提示条件では実験参加

者の顔面を固定していたため、網膜中心座標と環境中心座標における形状の表現はほぼ一致する（実際には眼球運動があるために完全に一致するわけではないが、顔を傾けるといった動作はできないために、垂直成分が網膜上で水平になったりするような大きな角度変化は生じない）。したがって、VR条件においてみられた垂直パーツへの感度優位は、環境中心座標における垂直成分に対する感度が高かった故であると結論づけられる。

なぜ垂直パーツが優位であるのか？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、森林の木々やヒトの立ち姿など、重力に基づく垂直構造（すなわち環境中心座標における垂直構造）は特徴的である。VRにより現実の世界に近い環境を再現した時には、現実世界における環境中心座標上の方位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。一方で、垂直線／水平線に対する感度が斜め線よりも高いという斜め効果（Heeley, et al., 1997）は、重力（環境中心座標）に基づく方位および網膜上の情報（網膜中心座標）に基づく方位の双方に由来する（Mikellidou, et al., 2015）。こうした従来から知られている斜め効果と、本研究で明らかになった垂直構造への高感度との関係については今後の検討課題である。

文 献

- Biederman, I. (1987). Recognition-by-components: a theory of human image understanding. *Psychological Review*, **94**, 115-147.
- Heeley, D. W., Buchanan-Smith, H. M., Cromwell, J. A. and Wright, J. S. (1997). The oblique effect in orientation acuity. *Vision Research*, **37**, 235-242.
- Humphreys, G. W. and Donnelly, N. (2000). 3-D constraints on spatially parallel shape perception. *Perception & Psychophysics*, **62**, 1060-1085.
- Kaiser, D., Quek, G. L., Cichy, R. M., and Peelen, M. (2019). Object vision in a structured world. *Trends in Cognitive Sciences*, **23**, 672-685.
- Marr, D., & Nishihara, H. K. (1978). Representation and recognition of the spatial organization of three-dimensional shapes. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences*, **200**, 269-294.
- Mikellidou, K., Cicchini, G. M. and Thompson, P. (2015). The oblique effect is both allocentric and egocentric. *Journal of Vision*, **15**, 1-10.