

仮想現実空間における大きさの恒常性

Size Constancy in Virtual Reality Space

橋 本 悠 那

Yuna HASHIMOTO

(日本女子大学大学院人間社会研究科 心理学専攻博士課程後期)

要 約

ポンゾ錯視の生成機序は、一般的に大きさの恒常性の誤適用によって説明される。それでは、ポンゾ図形がもたらす立体感を3次的に再現した状況では、大きさの恒常性が成立するであろうか？恒常性が正確に機能していれば、ポンゾ錯視は消失し、異なる奥行きにある二線分の長さは等しく見えるはずである。そこで、ポンゾ図形に似た壁を仮想現実 (VR) 空間で構築した上で二線分を併置し、両眼視により比較した。すると、2次元平面におけるポンゾ錯視とは反対に、遠くにある線分の方が短く見えた。VR空間上で壁を無くし、宙に浮いた二線分の長さを比較すると、遠くにある線分は壁がある場合よりもさらに短く見えた。以上の結果は、VR空間では、網膜像に依存して長さが判断される傾向があることを示している。この傾向は、空間内に奥行き手がかりがない状況ではさらに強くなる。つまり、大きさの恒常性は現実にも類似した場面では必ずしも十分に機能しないといえる。

[Abstract]

The Ponzo illusion is typically explained by a misapplication of size constancy. In a recreated three-dimensional Ponzo figure, would size constancy still apply? If it did, the illusion would disappear, and the lengths of two lines segments at different depths would appear equal. To test this, a VR space with a wall like the Ponzo figure was created, and two lines segments were compared using binocular vision. Unlike the 2D Ponzo illusion, the line segment perceived as farther away appeared shorter. When the wall was removed, the farther line segment appeared even shorter. This suggests that in VR, length judgments depend on retinal images and this tendency is stronger without depth cues. Thus, size constancy doesn't always work well in realistic scenes.

はじめに

「大きさの恒常性」とは、網膜像や2次元画像における線遠近法やテクスチャー勾配といった奥行き手がかりに基づいて、視対象が存在する奥行きが知覚され、その見かけの奥行きに基づいて、視対象の実際の大きさや長さが推定されるという機能である。視対象の網膜像の大きさが視距離とほぼ反比例の関係であるにもかかわらず、視距離が変化しても対象の見えの大きさは大きく変わらず一定に保たれるのは、この大きさの恒常性が機能しているからである (Sperandio & Chouinard, 2015)。Shepard (1990) による大きさの恒常性錯視やミュラーリヤー錯視、ポンゾ錯視 (図 1A ~ C) といった一部の幾何学的錯視成立の要因は、大きさの恒常性の誤適用仮説によって説明される場合が多い (Gregory, 1968)。例えばポンゾ錯視 (図 1C) の場合は、2本ある平行線分の

うち上にある線分の方が長く見えるが、実際は2本の線分は同じ長さである。大きさの恒常性の誤適用仮説によると、ポンゾ錯視図形に特徴的な2本の斜め線分が線路や道路などに見られる3次元的な奥行き印象を喚起させる。そのために、同じ大きさ（長さ）の2本の平行線が存在する奥行きは異なると解釈され、網膜像としては同じ長さではあるが、より遠くにあるはずの平行線の方が長いと推測する時に錯視が生じる。この推測とは、距離に左右されず正しい大きさを見極めることを意味し、これが恒常性の達成につながる。実際には、2次元画像である幾何学的錯視図形に奥行き関係は存在せず、目に映る刺激は全て観察者から等距離の平面上にある。よって、恒常性を達成するための距離の推測は正しくないのである。このように、我々は網膜像をそのまま認識しているのではなく、奥行き情報を使って正しい大きさを推測しようとし、その過程で錯視が生じることがある。

図1Dはポンゾ錯視の変形バージョンであり、通常のポンゾ錯視にみられる効果がより強くなっている（Ganel, et al., 2008）。通常のポンゾ錯視では、比較する線分は同じ長さであるが、この変形ポンゾ錯視図形では、右側の線分は左側の線分より短いにも関わらず、右側の線分の方が長く感じられる。これも、背景にある壁のような図形（誘導刺激）における線遠近法とテクスチャー勾配によりもたらされる3次元的な奥行き印象が錯視の原因である。

大きさの恒常性の誤適用理論によれば、誘導刺激の3次元的な奥行き印象が強まれば、錯視効果もより強まる。したがって、より立体感をもたらし誘導刺激を用いれば、ポンゾ錯視量は増加すると予測される。そこで橋本ら（2022）では、コンピューターグラフィックス（CG）を利用して変形ポンゾ錯視図形の誘導刺激（壁）をよりリアルに再現したCG図形（図1E）を作成し、その見かけの奥行き量をシステマティックに変化させ、錯視量を測定した。その結果、奥行き手がかりをより多く含むCG図形は、単純な線分のみで構成された図形よりも強力なポンゾ錯視効果をもたらし、また見かけの奥行きが大きい場合に錯視量が大きくなった。つまり、3次元的印象が強く、見かけの奥行きが深くなるほど遠くにあると判断される線分を過大評価した。この結果は恒常性の誤適用仮説を支持している。

しかし、恒常性の誤適用はあくまで2次元情報（単眼立体視）に対する過程であると考えられる。なぜならば、実際には存在しない奥行きを推定するという過程が必須だからである。では、変形ポンゾ図形がもたらし立体感を、より3次元情報が豊富な仮想現実（VR）空間において再現した状況では、大きさの恒常性は正しく成立するだろうか？ VR空間においてリアルな奥行き情報がシミュレートされ、かつ大きさの恒常性が機能していれば、こうした錯視は生じずに正確に長さ（大きさ）判断ができると考えられる。そこで本研究では、図1Eで示した壁をVR空間で再現した状況と、壁が無い状況の双方で2本の線分の長さを両眼視により比較し、3次元情報の増減が恒常性に与える影響を検討する。

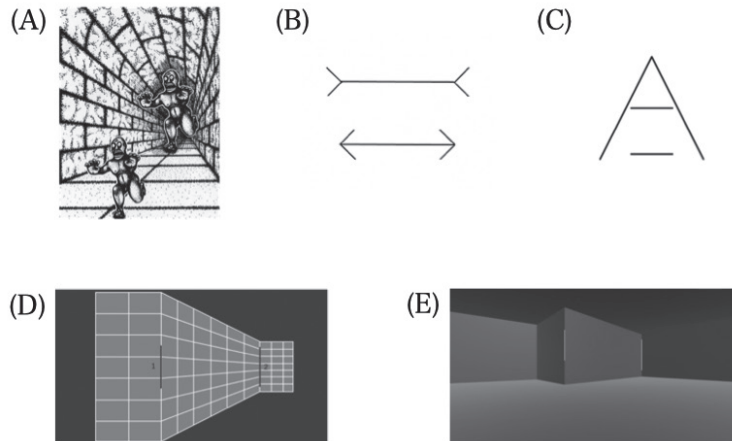


図1 大きさの恒常性に関連する図形

A: 大きさの恒常性錯視 (Shepard, 1990)。B: ミュラーリヤー錯視図形。上の横線が長く見えるが、実際は同じ長さである。C: ポンゾ錯視図形。上の横線が長く見える。D: 変形ポンゾ錯視図形 (Ganel, et al., 2008)。線分1より線分2の方が長く見えるが、実際は線分1の方が長い。E: CG図形の例。左右垂直線分の長さは同じである。

実験

方法

実験参加者

矯正視力を含む視力が正常範囲にある12名が実験に参加した。

視覚刺激

変形ポンゾ錯視図形を参考に作成したCG図形(図1E)の3次元空間を、リアルタイム3D開発プラットフォームUnity(Unity Technologies)を用いてVR環境内で再現した。ヘッドマウンテッドディスプレイ(HMD)を装着することで、CG図形の壁が実際に目の前にあるように見える。この時、VR空間上で壁の奥行き構造(z座標)を操作することにより、見かけの奥行き量を $z=5, 10, 20$ と段階的に変化させた3種類の空間を用意した。この空間にCG図形において標準刺激(右垂直線分)、テスト刺激(左垂直線分)となった2本の線分オブジェクトを、壁のコーナーに貼りついて見えるように配置した。奥行きが知覚される場合には、標準刺激は観察者にとって遠くに、テスト刺激は観察者にとって近くに見える。さらに、それらの線分の配置はそのままに、壁構造を取り除いた(線分が宙に浮いて見える)3種類の空間も作成し、合わせて6種類のVR空間で実験を行った(図2A～C)。標準刺激の長さは、3.0(Unityスケール)とした。テスト刺激の長さは2.4, 2.6, 2.8, 3.0, 3.2, 3.4, 3.6(Unityスケール)だった。以上より、6(VR空間)×7(刺激セット)の合計42の視覚刺激を用意した。

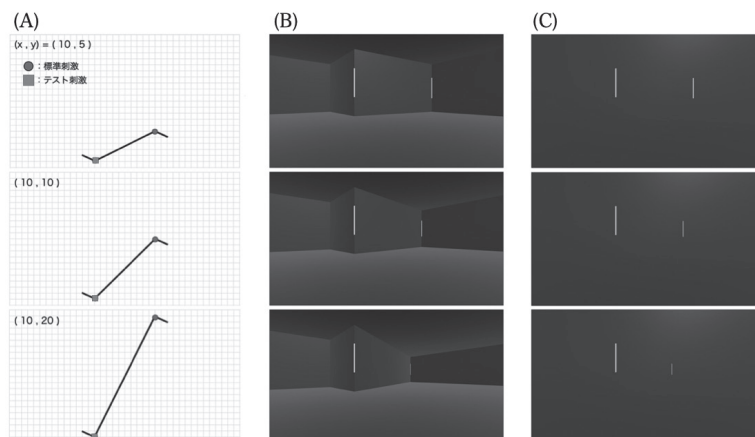


図2 実験に使用した VR 空間

A : 上部から見た壁構造 (Unity で作成)。B : A の壁構造を側面から見た図。C : B の壁を取り除いた図。
左右垂直線オブジェクトは宙に浮いて見える。z 座標は A ~ C いずれの図も上から z=5、10、20 である。

装置

刺激提示のために、デスクトップパソコン (Precision 5820 Tower, Dell, Inc) と HMD (VIVE Pro Eye, HTC CORP) を使用した。また、刺激の操作用に VIVE Pro Eye に付属されているコントローラーを用いた (Niehorster, et al., 2017)

手続き

実験参加者の課題は、2つの線分オブジェクトのうち、左右のどちらが長いと感じるかを答えるというものであった。

実験開始前に、参加者の視線の高さと初めの立ち位置をそろえるために、HMD を装着した状態で、床からの高さを 1.6m としてキャリブレーションを行った。実験は、実験参加者が左手に持つコントローラーのトリガーを 1 回引くと試行が開始され、HMD 上で視覚刺激が提示された。それを見て、2つの線分オブジェクトのうち、右の方が長いと感じたときは右手に持っているコントローラーのトラックパッドを、左の方が長いと感じたときは右手に持っているコントローラーのトラックパッドを押した。回答後、すぐに次の試行が開始された。実験参加者は 42 の刺激について 1 回ずつ長さ判断を行った。実験参加者の頭や体の動きは制限しなかった。実験終了後、データの集計を行った。左と答えた回数を数え、そこから標準刺激より長いと判断した割合を求めた (標準刺激より長いと判断した割合 = 左と答えた合計数 ÷ 12 × 100)。

結果

結果を図 3 に示す。それぞれのグラフでは、横軸は標準刺激の長さとテスト刺激の長さの比である。標準刺激の長さとテスト刺激の長さが等しい時は横軸が 1 となり、テスト刺激の方が長い場合は 1 より大きくなる。縦軸はテスト刺激の方が標準刺激より長いと判断された割合 (%) である。テスト刺激の長さと標準刺激の長さが同じ時に、判断の比率 (縦

軸)が50%であった場合は、錯視が生じず長さの判断は正確であったといえる。判断の比率が50%より小さい場合は、標準刺激(右側の線分オブジェクト)が長く感じられたことを意味する。一方で、ポンゾ錯視とは逆の効果が生じた場合は、標準刺激(右側の線分オブジェクト)が短く感じられるため、テスト刺激が長いと判断する比率は50%より大きくなる。

さらに、得られた結果に対して、シグモイド関数(式1)を近似し心理測定関数を導出した。その結果を図4に示す

$$Y = Bottom + \frac{Top - Bottom}{1 + 10^{-(\log EC50 - X) \cdot HillSlope}}$$

式 (1)

X: テスト刺激と標準刺激の長さの比
Y: テスト刺激の方が長いと判断した割合
Top: 反応の最大値 (100%)
Bottom: 反応の最小値は (0%)
EC50: 反応が 50% の時の比
HillSlope: シグモイド関数の傾き

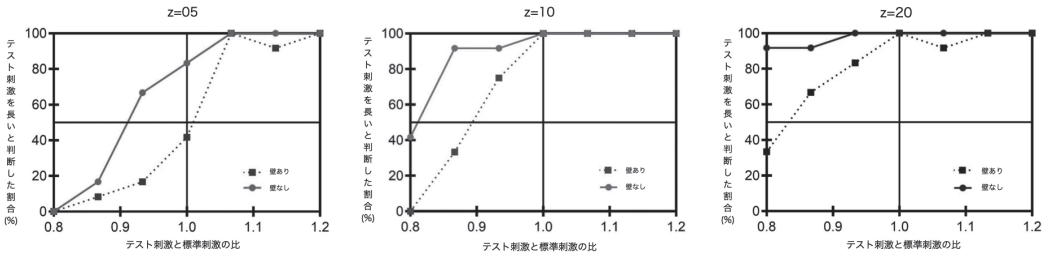


図3 壁あり条件と壁なし条件の比較

横軸は標準刺激とテスト刺激の長さの比、縦軸はテスト刺激の方が長いと判断した割合を示す。各グラフ内の関数は、破線が壁あり条件、実線が壁なし条件の結果を示している。3つのグラフは左からz = 5、10、20 というz座標の違いを示す。

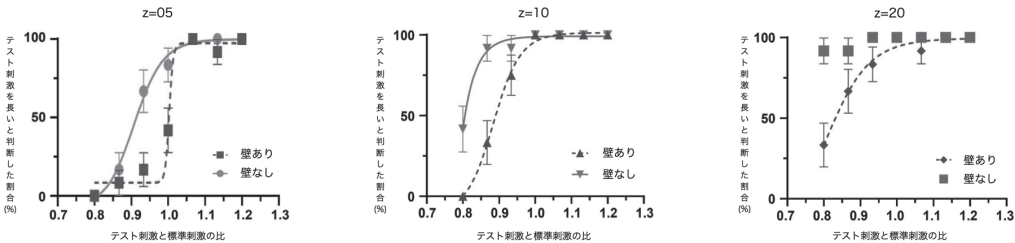


図4 シグモイド関数による錯視量の近似

横軸は標準刺激とテスト刺激の長さの比、縦軸はテスト刺激の方が長いと判断した割合を示す。エラーバーは±1SEである。破線は壁あり条件、実線は壁なし条件の近似曲線である。3つのグラフは左からz = 5、10、20 というz座標の違いを示す。

グラフから、壁あり条件かつ $z=5$ の場合を除いた全ての条件において、左右の線分比が1のとき、判断の比率が50%を上回っているため、標準刺激である右線分（遠くの線分）が短いと判断されたといえる。また右線分が短いと判断された奥行き（ z 座標）ごとの錯視量を比べると、壁の有無にかかわらず奥行きが大きいほど関数は左にシフトした。さらに、壁の有無による奥行きごとの錯視量は、どの条件でも壁が無い場合の方が、錯視量が多く、遠くの線分が過小評価された。

図4の近似の結果を見ても、 z 座標（奥行き）のシミュレート量が大きいほど関数が左にシフトしており、奥にある線分は過小評価されている。壁が無い場合はさらにその傾向が強くなった。近似ができた場合に、判断の比率（縦軸）が50%になったテスト刺激と標準刺激の比（横軸）をみると、 $z=5$ の時は1.0（壁あり）と0.91（壁なし）、 $z=10$ の時は0.89（壁あり）と0.64（壁なし）、 $z=10$ の時は0.82（壁あり）、近似不可（壁なし）となった。 $z=5$ における壁ありの条件を除いては推定された比が1より小さく、全般的に遠くの線分（標準刺激）が過小評価される傾向があった。また、壁がある場合よりも壁がない場合に比が小さくなっていることから、壁がなくなると遠くの線分がより過小評価されたと結論づけられる。

以上の結果から次のことが言える。

- ① VR空間では、遠くの線分の長さを過小評価しており、これは2次元ディスプレイ上のポンゾ錯視とは逆の傾向である。
- ② VR空間における奥行きが深くなるほどその傾向が強まる
- ③ 壁が消失すると、2本の線分の奥行き関係は保たれているにもかかわらず、遠くの線分の長さはさらに過小評価される

考察

実験の結果、実世界でポンゾ錯視図形のように線分を配置した場合、より奥に配置した線分の方を過小評価するといった、ポンゾ錯視とは逆の現象が生じた。これは実際の3次元情報が得られる環境では、網膜像における長さに依存する形で、線分の長さが評価されたということである。通常、観察者から遠くにある刺激は、網膜上には小さく映るため、奥行きが大きい条件ほど、二線分の網膜像の大きさは差ができる。よって、参加者は網膜に映った像（近刺激）を実際の物理的な長さ（遠刺激）と認識していると考えられる。このことから、壁による線遠近法の奥行き手がかりだけでは、脳で線分の大きさを補正できず、近刺激がそのまま遠刺激として認識された、つまり大きさの恒常性が正確に機能しない可能性がある。壁が消失した場合に奥にある線分がより過小評価されたことも以上の仮説を支持しており、シンプルなシーンである実験空間において、限られた奥行き手がかりのみでは、大きさの恒常性による補正が不完全であることを示している。

これを反対の視点から考えると、壁と線分オブジェクトで構成された実験空間よりも、線分オブジェクトのみで構成された空間でより錯視量（手前の線がより長く見える錯視）が多くなったことは、無地の壁が少なからず大きさの恒常性機能を補正していることを意味しているともいえる。大きさを比較するためのオブジェクトが増えれば、より正確な大きさの推測が可能になると考えられているが（Yildiz, et al. 2022）、そうした先行研究と合致する結果だといえる。

大きさの恒常性とは、周囲からもたらされる奥行き情報により網膜上の情報が変調され、現実の大きさや長さが認識できる仕組みである（Gregory, 1968）。本研究から、VR空間においては

きさの恒常性が必ずしも成り立たず、網膜像に大きく依存する可能性が示された。2次元平面上で錯視を生み出すほど強い大きさの恒常性 (図1) と、VR空間や現実空間 (橋本ら, 2022) において観察される大きさの恒常性の「弱さ」が、いかなる関係にあるのか、検討していく必要がある。そのため壁の構造といった線遠近法にもとづく奥行き情報以外、例えば、単眼立体視や調節、輻輳開散運動といった眼球の特性についても今後の研究課題としたい。

文献

- Ganel, T., Tanzer, M. & Goodale, M. A. (2008). A double dissociation between action and perception in the context of visual illusions: opposite effects of real and illusory size. *Psychological Science*, 19, 3, 221-225.
- Gregory, R. L. (1968). Perceptual illusions and brain models. *Proceedings of the Royal Society London B: Biological Science*, 171, 1024, 279-296.
- 橋本悠那, 和崎夏子, 竹内龍人. (2022) ポンゾ錯視と逆ポンゾ錯視の生成機序. 日本視覚学会2022夏季大会 (金沢大学角間キャンパス).
- Niehorster, D. C., LI, L. & Lappe, M. (2017). The accuracy and precision of position and orientation tracking in the HTC Vive Virtual Reality System for scientific research. *Iperception*, 8, n.3, p.1-27.
- Shepard, R. N. (1990). *Mind Sights: Original visual illusions, ambiguities, and other anomalies, with a commentary on the play of mind in perception and art*. W.H. Freeman and Company.
- Sperandio, I. & Chouinard, P.A. (2015). The mechanisms of size constancy. *Multisensory Research*. 28, 253-283.
- Yildiz, G. Y., Sperandio, I., Kettle, C., & Chouinard, P. A. (2022). A review on various explanations of Ponzo-like illusions. *Psychonomic Bulletin & Review*, 29, 2, 293-32