

# 自遮挡轮廓和阴影在人类 3D 感知中的作用

李雪睿

悉尼大学

DOI:10.12238/bmtr.v7i1.11844

**[摘要]** 本研究调查了自遮挡轮廓、阴影、细观纹理与人类大脑从2D图像感知3D形状之间的关系。此项试验旨在评估观看方向、物理纵深高度、照明和细观纹理如何影响感知纵深高度(我们设定的3D感知的衡量标准)。我们发现:增加视角和物理纵深高度以及在侧面照明条件下的细观纹理显著增强感知纵深高度。这些发现强调了自遮挡轮廓在深度感知中的关键作用以及细观纹理的细微影响,尤其是与照明条件相关的影响。该研究表明需要进一步探索不同的照明条件如何影响深度感知,这对设计、建筑和虚拟现实应用具有重要意义。

**[关键词]** 3D感知; 阴影感知; 深度感知 (depth perception); 形状感知; 自遮挡轮廓; 细观纹理  
**中图分类号:** R318 **文献标识码:** A

## The role of self-occluding contours and shadows in human 3D perception

Xuerui Li

University of Sydney

**[Abstract]** This study investigated the relationship between self-occluding contours, shadows, and mesoscopic textures and the human brain's perception of 3D shapes from 2D images. The experiment was designed to assess how viewing direction, physical depth height, lighting, and mesoscopic textures affect perceived depth height (our metric for 3D perception). We found that increased viewing Angle and physical depth height as well as microscopic texture under side lighting conditions significantly enhanced perceived depth height. These findings highlight the critical role of self-occluding contours in depth perception and the subtle effects of microscopic textures, especially in relation to lighting conditions. The study shows the need to further explore how different lighting conditions affect depth perception, which has important implications for design, architecture and virtual reality applications.

**[Key words]** 3D perception; shading; depth perception; shape perception; self-occluding contours; mesotexture

### 引言

人类视觉系统从2D图像感知3D形状的能力在我们理解与和环境互动方面起着至关重要的作用。在了解大脑如何形成3D感知之前,需要理解一个更基本的问题:视觉系统如何首先识别出它正在观看一个阴影表面?要解决这个问题,需要理解阴影形状和自遮挡轮廓的概念。

#### 1 阴影与深度感知

阴影是指由于物体、光源和观察者的视点之间的相互作用而导致物体表面光强度的变化。它是由光线照射物体表面不同部分的方式引起的,从而产生被照亮的区域(光线直接照射的区域)和较暗的区域(光线被阻挡或以掠射角照射的区域)。这些亮度差异为大脑提供了有关物体表面纹理、方向和深度的视觉线索,并帮助大脑推断物体的3D形状。例如,从亮到暗的平滑过渡表明表面平缓弯曲,而阴影的突然变化可能表示锋利的边缘或

平坦的区域。阴影对于理解物体形状的细节和在2D图像中创建体积感尤为重要。

#### 2 自遮挡轮廓,视角与3D感知

人类视觉中的自遮挡轮廓是指由于物体自身的形状而隐藏在我们视线之外的3D物体的边界或边缘。这些轮廓通常出现在物体表面远离观察者弯曲的地方,导致其一部分被同一物体的另一部分隐藏。例如,如果你正在看一个圆柱形物体,圆柱体的远端会远离你弯曲,这会形成一个你无法直接看到的轮廓,但你的大脑能够根据可见的形状和表面推断出它。这种现象对于我们感知深度和物体的3D结构至关重要,它使我们能够了解物体的形状和形式,即使它们不是完全可见的。Koenderink和vanDoorn(1982)的研究表明,这些轮廓标记了表面的一部分阻挡另一部分的边界。这向大脑发出信号,表明表面正在弯曲,深度正在减小。当我们从轮廓移动时,表面的顺序深度会减小,直

到达到最小值,从而使大脑能够映射物体的形状。当这些轮廓缺失时,深度感知会大大减弱。实验表明,与遮挡轮廓不相连的表面区域会导致深度判断不佳(Todd&Reichel,1989)。此外,自遮挡轮廓与观看方向相互作用,显著影响深度感知。大脑使用这些轮廓作为重要的参考点,以了解物体在空间中的排列方式。当观察者从隐藏这些轮廓的角度观察物体时,大脑将没有足够的信息来解释物体的3D结构。正如Todd和Akerstrom(1987)所指出的,缺乏可见的遮挡轮廓会导致深度判断的混乱和不确定性。

### 3 细观纹理与表面凹凸感知

纹理也会显著影响人类的深度感知,尤其是对于平滑曲面。它可以提供有关表面方向和曲率的关键信息,这将有助于视觉系统解释深度。然而,人们往往很难仅根据纹理做出准确的深度判断<sup>[1]</sup>。这表明,尽管纹理可以提供信息,但在各种视觉环境中可能并不总是充当可靠的线索(Todd & Reichel, 1989)。纹理与其他视觉线索(如阴影和遮挡轮廓)的相互作用可以改善大脑的深度感知。遮挡轮廓提供了参考点,有助于大脑解释纹理,从而对3D结构产生更连贯的感知(Koenderink & van Doorn, 1982)。相反,当这些轮廓缺失时,深度判断的准确性会显著降低(Todd & Reichel, 1989)。

### 4 光源与物体表面形状感知

Egan和Todd(2015)发现,照明方向会产生轻微的“剪切”效应,是我们观察到的表面似乎朝着光源方向略微扭曲。这意味着当光线来自特定方向时,感知到的表面3D形状会略微向该方向倾斜,使表面看起来好像向光线倾斜。然而,与整体亮度模式或亮度梯度(亮度是指表面的亮度;亮度梯度描述亮度在整个表面上的变化方式)中观察到的更显著的变化相比,这种剪切失真相对较小。因此,与光源带来的方向性剪切效应相比,由于各种照明条件导致的亮度模式变化对形状感知的影响更明显。

Marlow等人(2019)详细阐述了与照片几何线索及其与阴影和自遮挡轮廓的相关性相关的关键发现。研究中确定了两个主要的照片几何原理。第一个原理展示了阴影强度与边界轮廓的局部方向之间的联系。它强调,沿着自遮挡边缘(表面弯曲到看不见的地方),阴影强度会随着轮廓方向而持续变化。本质上,面向同一方向的轮廓段会显示相似的阴影强度,因为它们共享相同的3D表面方向。这创建了从轮廓方向到阴影强度的可靠映射,它使我们的视觉系统能够推断表面几何形状。第二个原理展示了阴影强度与边界轮廓曲率之间的联系。这一发现表明轮廓的形状可以提供有关底层表面3D形状的额外线索。研究表明,当阴影强度与轮廓方向共同变化时,观察者报告了所呈现表面的强烈纵深感和3D感。相反,当这种共同变化较弱时,参与者会感觉到形状更平坦且阴影较少。

自遮挡轮廓和阴影都是人类从二维图像中感知三维形状的重要组成部分。自遮挡轮廓有助于定义物体的边界和形状,而阴影则添加了细微的细节,增强了我们对纵深感的感知。这些过程结合起来,使我们的视觉系统能够从二维表示中重建复杂的三维形状。然而,大多数研究都集中于对特定三维物体的感知,而

不是对表面的感知。因此,我们的实验旨在研究多个变量如何同时影响人类在凹凸不平的表面上对三维的感知。具体来说,我们将通过感知到的纵深高度来评估人类的视觉三维感知,其中自遮挡轮廓通过观察方向和物理纵深高度的变化来评估,阴影通过照明和细观纹理的变化来评估。假设:(1)在不同的照明角度下,随着视角的增加,感知到的纵深高度会增加;(2)在不同的照明角度下,随着物理纵深高度的增加,感知到的纵深高度会增加;(3)细观纹理的存在本身不会对感知的纵深高度产生显著影响,但当它与增加的视角相互作用时,感知的纵深高度会增加。

### 5 研究方法

参与者:83名学生参与了本研究,部分完成了本科心理学课程。所有参与者均表示同意,本研究已获得悉尼大学人类研究伦理委员会的批准。

刺激:图1和图2描绘了观察者在本文中看到的三维(3D)表面。所有表面都具有相同的平滑随机峰谷分布。表面材料暗淡无光泽。反照率(反射光的百分比)为23%,对应于我们所体验到的中灰色<sup>[2]</sup>。照明是一个复杂的自然场景。图1和图2的照明环境方向不同,但每个图中的所有16个表面的方向相同。图2中的主要照明源更多地位于表面的侧面,而图1中的主要照明源更多地位于表面的正面。表面图像使用Maxwell Render(Next Limit Technologies)渲染,这是一种先进且物理精确的光线追踪软件包,旨在生成模拟3D场景的照片般逼真的图像。

参与者在计算机屏幕上观看图像。其中三个独立变量为:

5.1观察方向:相机拍摄表面的角度,范围从浅(更接近于掠过的方向)到陡峭,可操纵该角度来影响自遮挡轮廓的存在和形状。观察方向从图1和图2的左到右变得越来越陡峭(图右侧的表面更多地是从侧面而不是正面观察)。图1和图2中每行所示的表面具有物理上相同的3D形状,并且接收相同的照明;唯一的区别是观察者的观察方向。测试了四个观察方向:15、30、45和60度。

5.2纵深高度:最高峰和最深谷之间的高度差。第一行和第二行(即图的上半部分)中描绘的表面具有“低纵深”;最高峰和最深谷底的高度相差2cm。第三和第四行(即图的下半部分)所示的表面具有“高纵深”;它们的最高峰和最深谷底的高度相差4.5cm,因此它们的纵深比“低纵深”表面拉伸了2.25倍。

5.3细观纹理:一些表面有额外的小凸起(一种称为“细观纹理”的纹理形式),而其他表面则是光滑的。图1和图2的第一行和第三行显示了没有细观纹理的平滑弯曲表面。图1和图2的第二行和第四行显示了添加了细观纹理的相同表面的变体。细观纹理是通过将平滑弯曲的凹凸表面的顶点相对于表面的平滑变体向内或向外移动而创建的。产生细观纹理的位移幅度比产生大而低频的峰谷的位移小得多,空间频率高得多。位移的方向由表面光滑变体的局部三维方向决定(即位移沿着表面法线方向,换句话说,它垂直于光滑表面的方向)。

5.4设计和程序:进行了两个版本的实验。83名学生中的每一位都被随机分配参加实验1a或1b(但不能同时参加)。实验1a

中有39名参与者,实验1b中有44名参与者。两个实验之间的唯一区别是照明方向,实验1b中的照明方向相对于表面的掠射方向比实验1a中的照明方向更明显。实验的两个变体的设计都是受试者内4x2x2,这是4个观察方向、2个纵深高度和细观纹理(存在或不存在的)因子组合。因此,每个实验中有16种条件。在每次试验中,参与者并排查看16个表面中的两个,并被指示单击看起来有最高凸起和最深凹陷的表面。如果比较的两个表面看起来具有相同的纵深高度,他们还被指示随机选择其中一张图像。用鼠标左键单击被选为具有最高凸起和最深凹陷的图像,记录他们的选择,并在短暂延迟后进入下一个试验。16种条件中的每一种都与其他15种条件并排呈现,从而产生了120对刺激组合(120次试验)。相同的条件从未与其自身进行比较,并且每对刺激只被查看一次。每次试验中被查看的两个表面中的一个被随机选择在显示屏的左侧,另一个则呈现在右侧。每个参与者的试验顺序都不同。观察者从未比较过实验1a和1b中不同照明的表面;相同的实验只是以不同的照明方向重复,并由不同的参与者组执行。因变量是每张图像被选为具有最高纵深高度的次数。

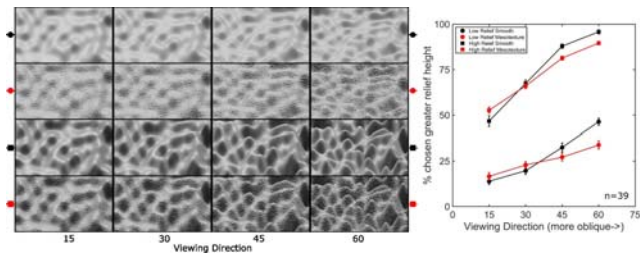


图1 实验1a中使用的16种刺激及其结果。实验1a中最亮的光源比实验1b中更深入地照射到表面的谷底。误差线是所有39名参与者的平均值的标准误差。在某些标准误差小于圆形或方形数据点的情况下,不显示误差线。

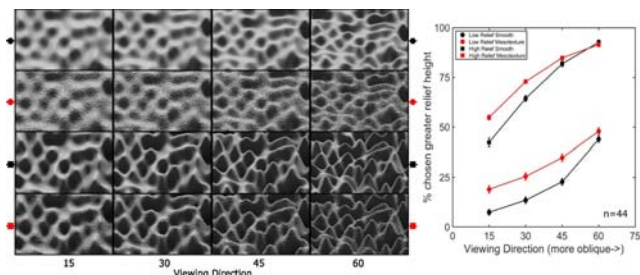


图2 与实验1a相同的表面,但在实验1b中从更倾斜的方向照射。误差线是所有44名参与者的平均值的标准误差。在某些标准误差小于圆形或方形数据点的情况下,不显示误差线。

## 6 研究结果

结果显示在图1和图2右侧的图表中。纵轴显示每种条件被选为具有最高纵深高度的试验百分比(所有参与者的平均值,占每种条件被选出的最大次数的百分比)。误差线是平均值的标准误差。横轴显示视角,从左到右逐渐变陡。黑色和红色数据点分别代表具有和不具有细观纹理的表面。圆形和方形数据点分别代表具有低和高真实纵深高度的表面<sup>[3]</sup>。

实验1a和1b中的两种照明结果的大多数方面相似,但实验1b中当照明来自比实验1a更接近的方向时,细观纹理的影响更强。对于这两种照明,具有物理上相同的纵深高度的表面被误认为随着观察方向变得更陡,纵深高度会增加。这种误解的程度相当大;在“高”纵深条件下,深度是“低”纵深条件下的2.25倍,但参与者经常将从最浅角度看到的高纵深与从最陡角度看到的低纵深混淆。在实验1a中,添加细观纹理仅影响感知纵深随观察角度增加的速率(图1);然而,在实验1b中,添加细观纹理也倾向于增加感知纵深高度,特别是在低纵深和浅观察方向条件下(图2)。换句话说,照明方向是两个实验变体之间的唯一区别,它影响着细观纹理对3D形状感知的影响程度。对于从更多掠射方向照明的表面,它对3D形状感知的影响更大。

## 7 讨论

我们的实验旨在研究观看方向、物理纵深高度、照明、细观纹理和表面3D感知(通过感知纵深高度测量)之间的关系。

我们的前2个假设得到了统计结果的支持,第3个假设得到部分支持:正面照明下细观纹理本身的存在不会对感知纵深高度产生显著影响,但侧视照明下,细观纹理对感知纵深高度有显著影响。细观纹理与观察者视角角度的相互作用不会对感知纵深高度产生显著影响。

结果表明,随着物理纵深高度和视角角度的增加,感知纵深高度(3D感知)也会增加,即使在不同的照明角度下也是如此。这一发现意味着自遮挡轮廓(包括视角和纵深高度的变化)在增强深度感知方面的重要性<sup>[4]</sup>。具体来说,当视角角度或物理高度增加时,大脑拥有更多信息来推断表面的形状和深度,从而产生更强的3D感知感。正如我们的研究所示,结果一致强调了自遮挡轮廓不仅在3D物体的感知中而且在表面感知中的重要性。研究结果表明,随着物理纵深高度和视角角度的增加,感知纵深高度也会增加,揭示了这些轮廓如何在各种情况下增强深度感知。这表明视觉系统依赖自遮挡轮廓作为从2D图像重建复杂表面几何的重要线索。这与Koenderink和van Doorn(1982)的早期研究一致,该研究说明了这些轮廓如何提供有关表面如何弯曲和深度减小的关键信息。正如Todd和Reichel(1989)所指出的那样,如果没有它们,深度判断就会变得不那么可靠。它为大脑提供了推断表面形状和深度的重要信息,从而让我们更全面地了解我们环境中的视觉感知。

关于第三个假设的结果反映了细观纹理在深度感知中的微妙作用,特别是在与照明条件相关的情况下。具体而言,虽然在正面照明下细观纹理的存在不会显著影响感知的纵深高度,但在侧面照明下确实会产生重大影响。然而,回顾以前的研究,人们往往很难仅根据纹理做出准确的深度判断(Todd & Reichel, 1989)。同时,Egan和Todd(2015)声称,光线方向产生的轻微“剪切”效应会扭曲表面朝向光源的外观,但与亮度模式变化引起的更明显的变化相比,这种影响微乎其微。此外,细观纹理与其他视觉线索(如阴影和自遮挡轮廓)的相互作用可以显著改善深度感知(Koenderink & van Doorn, 1982)。有趣的是,我

们的研究表明, 细观纹理与视角之间的相互作用对感知的纵深高度没有实质性影响。此外, 在我们的研究中, 光线方向引起的轻微“剪切”效应变得异常重要<sup>[5]</sup>。这可能表明, 当人类观察在观察一个表面而不是物体时, 细观纹理的有效性更多地取决于照明环境。

基于我们意外发现的部分, 未来的研究可以研究不同的照明条件如何影响深度感知, 特别是通过测试不同类型的照明, 例如彩色的灯光和变化的灯光强度。研究彩色照明如何影响阴影和自遮挡轮廓有助于进一步阐明纹理在深度感知和人类视觉3D感知中的作用。通过提高我们对照明如何与视觉信息处理相互作用的理解, 这项研究可以带来设计、建筑和虚拟现实中的实际应用。

## 8 结语

本报告强调了自遮挡轮廓和阴影在人类深度感知中的关键作用, 特别是在从2D图像判断3D形状时。我们的研究结果证实, 物理纵深高度和视角角度都会显著增强感知纵深高度, 强调了这些轮廓在重建表面几何形状中的重要性。虽然细观纹理本身不会影响深度感知, 但其影响会随着不同的照明条件而变化, 尤其是在侧面照明下改善感知。这些见解强调了视觉处理的复杂性, 表明我们对表面的理解受到多种视觉线索的影响。未来的研究可以探索更广泛的照明条件, 以加深我们对照明如何与这些感知元素相互作用的理解, 这可能对设计和虚拟现实等领域产

生重要影响。

## [文献参考]

[1]Egan, E.J.L., & Todd, J. T. (2015). The effects of smooth occlusions and directions of illumination on the visual perception of 3-D shape from shading. *Journal of Vision*, 15(2), 24.

[2]Koenderink, J. J., & Van Doorn, A. J. (1982). The Shape of Smooth Objects and the Way Contours End. *Perception*, 11(2), 129-137.

[3]Marlow, P.J., Mooney, S.W., & Anderson, B.L. (2019). Photometric Cues to Perceived Surface Shading. *Current Biology*, 29(2), 306-311.e3.

[4]The University of Sydney. <https://canvas.sydney.edu.au/courses/57918/files/39247334?wrap=1>.

[5]Todd, J.T., & Akerstrom, R.A. (1987). Perception of three-dimensional form from patterns of optical texture. *Journal of Experimental Psychology Human Perception & Performance*, 13(2), 242-255.

## 作者简介:

李雪睿(2001--), 女, 汉族, 北京市人, 澳大利亚悉尼大学在读, 主要学科方向: 心理学和神经科学。