arXiv:2301.09394v1 [cs.GR] 23 Jan 2023

虚拟现实中的基于速度的细节层次简化：一种心理测量学方法

David Petrescu 、Paul A. Warren、Zahra Montazeri 和StephenPettifer

曼彻斯特大学

摘要

虚拟现实头戴设备使用户能够通过自主运动来探索环境。这类运动产生的视网膜速度会降低视觉系统分辨精细细节的能力。我们测量了自主头部旋转对参与者在沉浸式虚拟现实环境中检测逼真三维模型质量变化能力的影响。我们根据不同程度的头部旋转速度，改变细节层次（*LOD*）。我们采用心理物理学方法，请 *17* 位参与者在两种不同的最大速度条件下，判断呈现的两个时间区间中哪一个包含质量更高的模型。通过拟合心理测量函数，分析正确回答的百分比与细节层次调整的简化强度之间的关系，我们确定了参与者能够可靠（*75%*）检测出较低细节层次模型的简化强度阈值。即使在最大速度较低的条件下，参与者也能接受约四倍的细节层次简化，而感知质量并未受到显著影响；这表明用户移动时存在相当大的优化空间（知觉不确定性的范围扩大）。此外，在最大头部速度条件下，细节层次还可以显著降低得更多，这表明这些影响确实取决于速度。

CCS 概念

• 计算方法 → 《知觉》；虚拟现实；

1. 引言

近年来，高性能图形技术和消费级头戴式显示器（HMD）的普及，推动了虚拟现实（VR）的广泛应用；如今，VR 已在研究、休闲和商业领域中十分常见。然而，要打造引人入胜、完全沉浸式的 VR 体验，计算成本向来高昂，通常需求远超现有能力。尽管中央处理器和图形处理器的性能不断提升，我们仍迫切需要开发相应的技术和算法，以便在既定的硬件性能水平下，为用户提供最佳体验。实现这一目标的一种方法，是利用人类知觉系统的特性与局限。本文关注人类敏感度的变化，尤其是与观察者运动相关的变化；这种运动会在视网膜上引发整体运动模式。

当我们为了追踪移动物体或注意显著刺激而转动头部（或眼睛）时，人们认为，我们对背景元素的视觉敏感度会降低 [Mur78]。例如，虚拟现实用户在追踪十字准星或物体时，常会快速转动头部或眼球，从而在整个视网膜上产生运动模式。基于这一现象以及先前关于基于速度的细节层次降低方法的研究，我们提出一种心理测量学方法，用以确定观察者运动如何影响人们对背景刺激质量下降的敏感度。

大多数头戴式显示器都支持以六自由度（6DOF）跟踪用户运动，并呈现与此类运动相伴的刺激材料的视觉表征。这使用户能够在虚拟环境中自由移动，并获取来自视网膜之外、与这些运动相关的本体感觉和前庭信息；人们认为，这些信息对于在自身运动过程中正确感知稳定场景至关重要 [WBL22]。然而，也有证据表明，当观察者的眼部或头部运动导致视网膜上出现整体运动时，人类视觉系统（HVS）的敏感度会发生变化 [BSG17]。运动与敏感度之间的关系十分复杂，取决于显示器中的视觉特征以及所进行的运动类型。据我们所知，这些研究结果尚未充分融入当前优化虚拟现实环境渲染的方法。鉴于此，我们将重点探讨两个重要问题：

• 观察者移动时视觉敏感度的降低，是否能让渲染的虚拟模型根据速度降低复杂度，同时不被用户察觉？

© 2023 作者

• 在被察觉之前，复杂度最多可以降低到什么程度?

本文通过探索在商用 VR 头戴式显示器中实现一种依赖速度的场景复杂度简化算法的可行性，来探讨这些问题。几何细节层次表示虚拟模型的复杂程度。通常，模型具有多个不同质量级别的细节层次。这些级别通过简化初始模型的网格复杂度生成。在大多数商业游戏引擎中，当物体与视平面的距离达到某个阈值时，就会发生 LOD变化，因为此时眼睛的空间视敏度不足以察觉差异，但这些引擎并未考虑其他感知因素。近年来，与其他致力于实时基于物理的着色以及采样优化所需感知度量的问题研究相比，感知引导的细节层次系统受到的研究相对较少，但仍是一个值得探索的领域。

因此，本文的贡献如下:

• 我们测试了一种轻量级方法的可行性，该方法仅使用速度作为指导细节层次降级的指标（即不考虑人类视觉系统的其他属性）。

• 通过心理物理学方法，我们清楚地证明，自主诱发的水平头部旋转可使光照充足的模型在细节层次上显著降级（约四倍）。

• 我们提供了证据，表明正如预测的那样，用户能够容忍的降级程度会随着运动速度的加快而提高。

2. 相关工作

2.1. 时空因素与感知渲染

关于如何利用人类视觉系统的局限性，通过检测潜在的渲染伪影来指导算法，已有大量研究。许多此类视觉模型都基于早期心理物理学研究，这些研究考察了各种空间和时间条件下的对比敏感度函数 [Rob66]。对比敏感度函数的各种形式被广泛用于加速图像和动画的渲染，其方法是建立能够预测人类视觉系统感知内容的度量。例如，Daly 的可见差异预测器（VDP） [Dal92] 利用两幅图像的频域，预测对比度变化在何处会变得无法察觉。该方法已应用于许多可获取参考帧的场景，以避免不必要的渲染，因为这些渲染不会带来有意义的感知变化。Kelly 通过分析以不同速度移动的正弦光栅，探索了对比敏感度函数的时空速度模型，以确定我们的敏感度阈值 [Kel79]。随后，Daly 对模型进行了改进，将眼球运动也纳入考量 [Dal98]。Myzskowski 等人采用时空速度方法开发了动画质量度量（AQM） [MRT99] ，从而提升了感知上重要帧（称为“关键帧”）的渲染质量；由于这些帧具有某些容易被人类视觉系统察觉的属性，因此会影响动态场景的整体质量感知。Yee 等人还利用运动估计和注意力模型，创建了包含时空误差图的综合模型 [YPG01]。最近，Mantiuk 等人汇集多篇论文的数据，对涵盖 5 个维度（空间、时间、偏心度、亮度、面积）的对比敏感度函数进行建模，并将其命名为 stelaCSF [MAC22a]。以依赖速度的方式预测运动质量的模型会考虑运动伪影 [DJMM20], ; 其他模型则采用可变速率着色 [NVI18]，对运动造成的退化伪影掩蔽进行建模 [YZK*19]，并对局部着色和刷新率进行建模 [JWMM21]。在本文所述的水平头部旋转过程中，stelaCSF 中的所有维度都与之相关，但这些维度并未考虑用户运动的类型。Lavoué 创建了一种度量，用于生成失真图，以检测几何失真网格与参考网格之间的差异，并可用于指导优化和评估。该度量与人类视觉系统感知此类变化时所采用的机制高度相关 [Lav11]。考虑前庭因素的应用较为少见。Ellis 等人研究了平移和旋转运动中前庭反应与视觉系统之间的跨模态交互 [ECD06、EC06]。他们使用了一种类似“舱体”的六自由度运动模拟器，参与者坐在其中，周围环绕着显示器。屏幕中央区域以高质量（HQ）渲染并进行采样。当舱体进行平移运动，即朝向 HQ 区域移动时，该区域的大小会缩小。根据前庭系统的生物模型，HQ 区域会随舱体的加速度而缩小。在旋转过程中，他们发现仍有改进空间，但要产生显著效果还需要进一步微调。本文与这项工作的关联在于，二者都旨在确定自发运动过程中的此类参数。

2.2. 自适应细节层次

过去，人们广泛采用自适应细节层次方法。生成细节层次会导致几何变化和不规则性。因此，研究人员不断改进算法，以应对这些因素。解决方案各不相同，从通过二次矩阵处理塌缩边或顶点对以保留表面误差 [GH97], 到采用 Hoppe 提出的动态算法 [Hop96]。他提出了渐进网格，这种网格只需使用可用的最高质量网格来计算较低质量的变换，就能实现更平滑、可逆的过渡，且不会增加内存开销。此前已有研究采用视点相关策略来高效选择细节层次；Hoppe 将渐进细节层次生成与视点相关模型相结合，改进了渐进网格的生成 [Hop97]。Luebke 和 Erikson 通过生成一个顶点簇层级来降低细节层次，这些顶点簇在当前视点下可能可见 [LE97]。Watson 等人研究了降低注视周边区域的细节层次会如何影响搜索任务的性能 [WWHW97]。他们发现，在性能受到影响之前，参与者能够容忍近乎两倍的细节层次降级。同样，Murphy 和 Duchowski 在多分辨率网格中使用注视相关方法，降低模型部分区域的细节层次 [MD02]。Howlett 等人使用视线依赖方法，识别物体中观察者可能会注意到的显著特征 [HHO04]。这意味着只有在知觉上重要的区域才使用高分辨率网格。其他方法则研究了各种人类动画或碰撞事件中的细节层次简化，并采用心理测量测试进行数据收集 [OD01]。基于速度的细节层次简化传统上受到的关注较少。Funkhouser 创建了一个

© 2023 作者

基于启发式的质量简化模型；由于高速运动时存在运动模糊，细节难以辨别，因此他将物体的表观速度作为启发式依据 [FS93]。Reddy 创建了一个全面的基于速度的细节层次选择模型，在考虑物体穿越视野运动时的偏心度和速度 [Red98,Red01]。Parkhurst 和 Niebur 使用搜索任务，测试了基于速度的细节层次简化系统的可行性；该系统根据摄像机速度按比例渐进简化细节层次 [PN04]。任务物体的质量会根据视口速度降低或提高。他们发现，这类方法带来的计算节省通常能提高环境的稳定性，并产生行为后果，但也会妨碍任务表现。在这些方法的基础上，我们希望研究现代 VR头戴式显示器中的自生运动如何影响细节层次变化过程中的质量感知。本文提出一种心理测量学方法，用于测量自我运动期间对细节层次变化的知觉敏感度。因此，我们提出一个严谨的框架，用于测量参与者直接判断质量变化时的阈值。

3. 方法

在本实验中，参与者在一系列试次中通过转动头部进行偏航旋转，跟踪一个注视点，同时判断在不同时间区间呈现的两个模型的质量。其中一个时间区间始终呈现参考模型，另一个时间区间则呈现相同的模型，但每当头部旋转速度超过给定阈值时，便对模型进行 LOD 降级（降级程度因试次而异）。参与者的任务是识别包含劣化模型的时间区间。在知觉心理物理学中，这种方法称为双区间强迫选择（2-IFC）程序，此类方法被广泛用于估计知觉阈值 [WBL22]。

3.1. 参与者

招募了 17 名参与者（均为曼彻斯特大学的学生或教职员工，其中 15 人不了解研究目的，另有 2 人具有虚拟现实使用经验）。该研究已获曼彻斯特大学神经科学与实验心理学部伦理委员会批准。所有参与者均提供了知情同意。由于两名参与者的回答噪声较大，无法对其数据拟合汇总参数，因此将其排除在分析之外（拟合程序的相关信息见下文第 3.6 节）。

3.2. 实验设备

本实验的数据是在曼彻斯特大学的虚拟现实研究（VR2）设施中收集的。实验使用 HTC Vive头戴式显示器搭配无线接收器，显示来自电脑的有线传输内容（电脑配置为 Intel i7-7700K中央处理器和 NVIDIA RTX 3080 Ti图形处理器）。HTC Vive 的刷新率为 90 Hz，每只眼睛的分辨率为 1080 x 1200 像素。通过我们的电脑配置，我们将帧率保持在约 90 FPS，与头戴式显示器的刷新率相匹配，从而尽可能减少可能导致恶心或其他不适的丢帧现象。

本实验使用*Unity* 游戏引擎和 Unity 实验框架（UXF）编写，该框架专为心理物理学研究的开发与控制而设计 [BWA*20]。参与者使用左侧或右侧 Vive控制器上的扳机键开始实验试次并作出响应。

3.3. 设计

为了测量头部速度对参与者感知细节层次变化能力的影响，我们将用户头部最大速度设为包含两个水平的自变量（快速和慢速）。我们采用完全被试内设计，即所有参与者均参加两种条件。在两种速度条件下，参与者各完成280个试次，所施加的细节层次降级严重程度（下文称为“简化强度”）在预先设定的七个取值范围内变化（详见刺激部分）。每个简化强度水平下，参与者重复相同次数的试次。在知觉心理物理学文献中，这种方法通常称为恒定刺激法（MCS） [Sim88]。

3.4. 刺激材料

每个试次都会呈现一个移动注视十字（参与者需追踪该十字；见图1的左上部分）。该十字约占视野的 2×2 度。十字采用颜色编码，以区分两个不同的呈现时间区间；所用颜色对色盲参与者也具有可辨别性。注视点在虚拟环境中沿固定半径的圆形轨迹移动，该轨迹以参与者的头部为中心，范围为 100°（即正前方左右各 50°）。半径由参与者与雕像之间的距离决定，在虚拟空间中约为 5 米。注视十字相对于头部的角速度呈正弦变化——见图（3）。在 快速条件下，速度峰值约为 157°/秒；在慢速条件下，约为 52°/秒。头部运动期间，前庭眼反射（VOR）会稳定眼球，因此物体的视网膜图像会更加准确 [PZR81]。尽管有些作者假设峰值速度可高达 900°/秒 [KYK*20]，但有证据表明，VOR 在约 170°/秒时仍保持稳定 [GLA*88]，且在视觉搜索任务中，VOR 反射在速度达到 350°/秒之前都可靠 [PZR81]。

主要刺激是一个相对于环境静止的古希腊雕像模型 《掷铁饼者》，由 Myron 创作，是 *ChamferBox Studio* 在 Unity商店 [Cha18]提供的免费资源。该模型呈现在 Unity 默认场景中，环境光照充足（见图1）。

应用于雕像模型的 LOD 降级过程，是对 Garland 和 Heckbert 提出的二次度量网格简化算法的一个调整版本 [GH97]。该算法是一个以 C# 编写的快速二次边折叠算法，可用作 Unity 资源 [Edl22]，并改编自最初以 C 编写的版本++ [Spa22]。我们采用的方法工作流程如图2所示。该算法旨在减少网格的

© 2023 作者 Eurographics 会议论文集 © 2023 TheEurographicsAssociation。

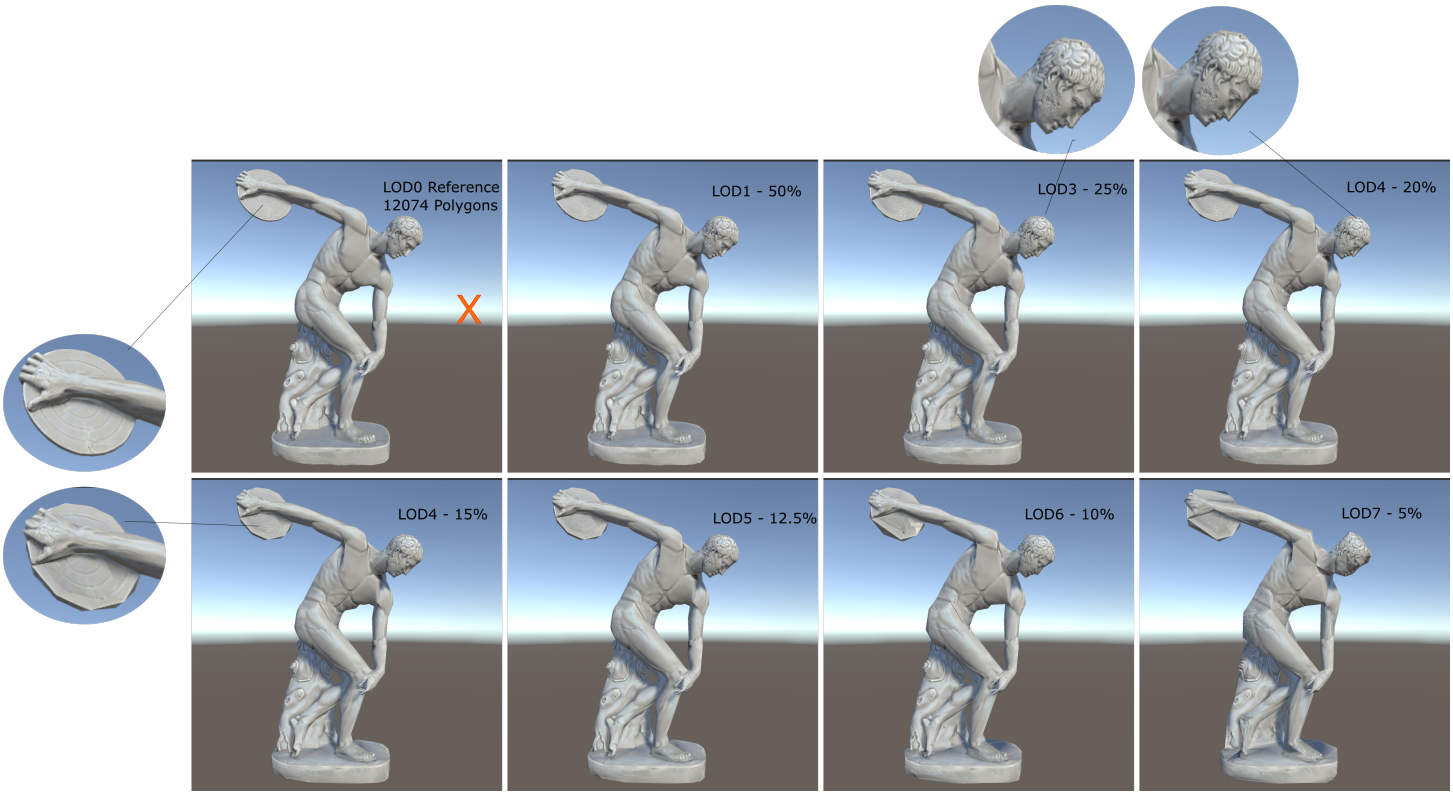

图1： 使用以下算法生成的细节层次级别 *[Edl22]*

多边形数量，并经过调整以支持依赖速度的应用：当用户头部速度超过最小阈值时，便会实施 LOD 降级。降级采用图1所示的七种简化强度之一。参考模型由 12074 个多边形组成；在简化强度最高的 LOD 降级条件下，多边形数量减少了 20 倍，约为 600 个。当头部旋转速度达到注视点峰值速度的 50% 时，雕像的质量便会降低。这意味着，在参与者转动头部的所有帧中，约有一半帧里的雕像质量有所降低。如图3所示，通过绘制参与者在一次试次中的水平角位移，可以看出其与注视点的正弦速度趋势相吻合，这让我们确信试次中实现了预期的头部旋转速度。

3.5. 实验程序

参与者被要求戴上头戴式显示器，并在工作人员协助下调整松紧度和镜片距离，以确保佩戴舒适并获得清晰的图像。对虚拟现实不熟悉的参与者会先在 HTC Vive 家庭环境中体验几分钟，期间工作人员会留意他们是否出现头晕或恶心。任务说明结束后，参与者可以进行几次练习试次，以确保理解任务并熟悉响应按钮。随后将参与者的位置调整至与雕像的正中矢状面对齐。

每个试次开始时，参与者注视静止的注视十字。参与者按自己的节奏按下手持控制器上的一个按钮，启动移动。每个试次中，注视十字的初始位置会在100度范围内随机变化，但研究人员会通过将注视点移至雕像一侧或另一侧，提示参与者十字将要移动的方向。随后，注视十字在每个时间区间内移动2.5秒。接着，研究人员会提示参与者开始第二个时间区间：先呈现另一个静止的注视十字，然后再次移动2.5秒。每个试次中，参考模型会随机呈现在第一个或第二个时间区间，另一个时间区间则呈现其他细节层次模型之一。参与者需要指出哪个时间区间（第一个或第二个）呈现了更高质量的模型。每个试次约持续5秒，另加参与者启动各时间区间并记录答案所用的时间。

在整个实验过程中，每位参与者针对参考刺激与LOD模型的7种可能配对分别作答20次。此外，我们还交错安排了快速和慢速最大头部速度条件下的试次。因此，参与者总共作答280次。为减少参与者疲劳，我们将实验分为2场，每场约40分钟。

© 2023 作者

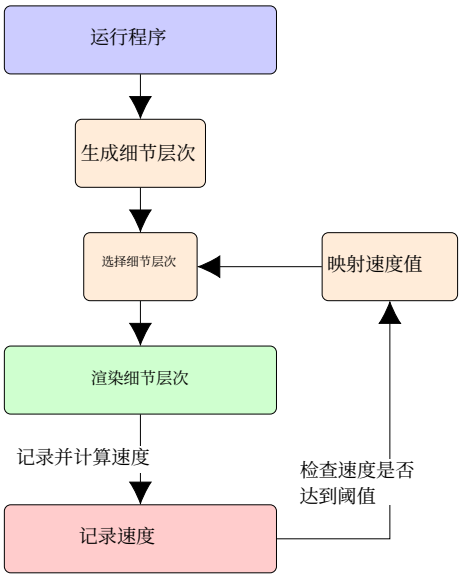

图 2： 我们方法的工作流程。活动开始后，我们的轻量级方法会根据用户输入生成细节层次。在记录任何速度之前，会先选定基础细节层次。渲染完成后，记录速度并将其映射到细节层次映射中。具体做法是将记录的角速度归一化到一个速度区间，其中 *0* 表示静止，最大值表示预期的最大速度（本例中由注视点给出）。

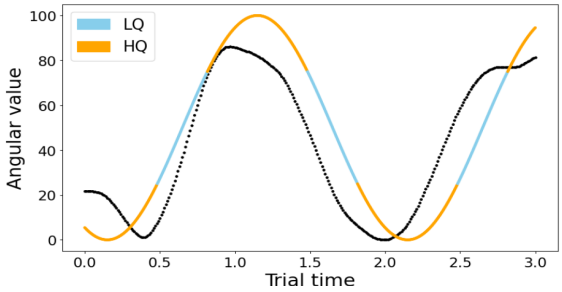

图 3： 试次期间采样的参与者头部角位置（黑色）与注视目标的角位置对照图。刺激发生细节层次变化的位置以橙色和蓝色突出显示。

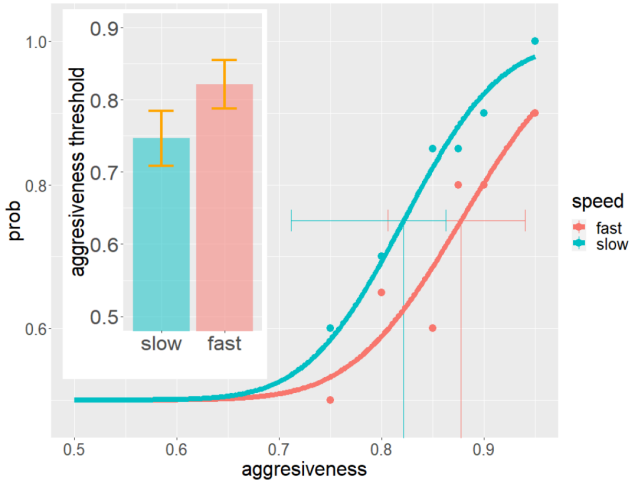

图4： 展示 *75%* 位置均值阈值的条形图（左侧－嵌入式）。从一名参与者的数据中恢复出的心理测量函数示例。快速－红色；慢速－蓝色

3.6. 心理测量函数拟合

为了分析每位参与者在两种最大头部速度条件下的数据，我们首先绘制LOD值与参与者在重复试验（共20次）中正确识别出包含劣化的雕像模型的时间比例之间的关系。所得比例应从LOD降级较小时的50%（偶然水平表现）上升至LOD降级程度很大时的100%（完美表现），并呈现累积分布曲线形状，反映出随着LOD降级程度增加，证据不断累积。我们将这些数据建模为心理测量函数（PF）。心理测量函数表示观察者感知（此处指对哪个模型质量更高的感知）如何随某个物理参数（此处为LOD操控）变化。我们采用具有两个自由参数（均值和标准差）的累积高斯函数作为心理测量函数模型。使用该模型拟合数据时，我们采用了*quickpsy* 软件包 [LLM16]（R语言），该软件包旨在对这类数据进行最大似然心理测量函数拟合。图4展示了两位观察者的示例数据及拟合结果。随后，我们根据这些拟合结果得出使性能达到75%的LOD阈值（图4中的垂直线）。该阈值参数反映了参与者能够可靠地区分参考刺激与劣化刺激（正确率为75%）时对应的LOD值。若参与者区分参考刺激与测试区间的能力较差，则阈值会更高。因此，如果观察到的阈值较高，且随最大头部速度增加而上升，我们的假设便得到证实。

4. 结果

根据上述函数拟合结果，我们得到了每位参与者在各个条件下的统计量。图中嵌入的图表

© 2023 作者 Eurographics 会议论文集 © 2023 Eurographics 协会。

4 展示了本实验 15 位参与者在慢速和快速最大头部速度条件下的阈值均值。请注意，即使在慢速条件下，参与者在能够可靠地识别出包含劣化模型的时间区间之前所能容忍的 LOD 降级约为 75%。这相当于多边形数量减少至原来的四分之一。还请注意，在最大头部速度较高的条件下，该阈值似乎更高。快速条件下的阈值约为 82%。我们对这些数据进行了单尾配对 t 检验，发现快速条件下得到的阈值显著高于慢速条件下（$t = 2.71$，$p = 0.008$），这与我们的假设一致，即这些效应取决于速度。

综合来看，这些数据支持我们的假设，表明：

- 在头部运动期间，人类对几何细节（即我们实验中的多边形数量）的大幅降低明显不敏感
- 头部运动速度越快，他们就越不敏感

这些发现表明，如果渲染质量取决于头部（和/或眼部）运动速度，就有可能采用一种简单的优化方法。

N=15	*slow*	*fast*	*t*	p
LOD%	74.6（标准差 14.8）	82.2（标准差 13.1）	2.71	<0.01

表1： 两种条件的汇总统计量（均值和标准差）及配对 *t* 检验结果

5. 讨论

我们的方法为在不同细节层次之间切换提供了一种新思路，不受场景中摄像机与物体之间距离的影响（这是大多数商业游戏引擎采用的标准方法）。我们已经证明，即使质量劣化非常严重，参与者也无法可靠地察觉这些变化。

尽管如此，如果考虑更高层次的认知过程（例如注意、决策等），显然仍有可能在不造成感知影响的情况下进一步降低细节层次。将我们的细节层次降级方法与 Watson 和 Duchovski 提出的注视相关方法等结合起来 [WWHW97] 可能产生类似于 Reddy 所实现的综合效果 [Red98]。这些结果与 Parkhurst 和 Niebur 的发现一致 [PN04]，他们在搜索任务中将模型的细节降低了三倍以上，却没有影响任务表现。这表明，感知层面的细节层次降级仍值得探索，即使参与者正主动寻找降级效果，也依然如此。

其他类型的用户运动。 请注意，尽管我们使用头部运动来产生视网膜运动，但我们认为，无论运动输入的成因如何，这些结果都可能成立。更具体地说，如果指示参与者通过平滑追踪眼动（SPEMs）跟随目标，我们预计也会观察到相同的效应。SPEMs 使人类视觉系统能够稳定对运动目标的追踪，从而使目标保持在视网膜上最敏感的中央凹区域内。或者，我们也认为，如果要求参与者注视一个静止十字，而雕像以与我们实验中所研究的头部运动所产生的运动相一致的方式移动，我们也会得到类似的结果。虽然我们尚未测试这些可能性，但似乎可以认为，对退化不敏感的关键原因在于运动本身，而非运动的成因；Murphy 在其开创性研究中就指出了这一点 [Mur78]。尤其是对于平滑追踪眼动，Meyer [MLR85], 指出，这种眼动在速度约达 100°/秒之前都较为可靠；超过这一速度后，追踪表现便开始下降，因而需要其他机制（例如眼部与头部同步运动）来辅助追踪。其他研究指出，在背景空间频率变化或亮度变化的情况下，平滑追踪眼动确实会调节用户的视力 [SBE21、BSG17]。在我们的实验中，注视点在慢速条件下以 57°/秒的速度移动，而在快速条件下则以 157°/秒的速度移动。因此，追踪很可能同时涉及头部运动、较少程度的眼动，以及有助于稳定视网膜上目标的前庭眼反射系统 [PZR81]。这项研究表明，有必要更深入地分析观察者运动的不同成因，并可能在更广泛的速度范围内进行分析。从此类分析中提取的指标，或可用于纳入视觉模型，例如 [MAC22b、Lav11、YPG01]。

局限性与未来工作。 我们的方法存在若干局限。首先，由于我们采用了离散 LOD 变化方法，劣化模型偶尔会出现可察觉的闪烁。当然，检测到此类闪烁可能会让参与者得知哪个时间区间包含劣化模型；如果消除闪烁，用户所能容忍的 LOD 降级程度或许还能更高。未来研究可采用平滑技术或 Hoppe 提出的渐进网格等方法来消除闪烁 [Hop96]。

第二个问题是，我们没有追踪眼睛，因此无法确定参与者是否完全遵循了指示。尽管如此，观察到的头部运动总体上与指示的运动相当接近（见图3）。

第三，我们只考察了一种观察者运动类型。显然，对于不同的运动方向、眼睛、头部与模型运动的不同组合，或不同的运动速度，我们可能会发现细微差异。要在本研究中检验所有这些情况并不可行，但显然，它们可以成为未来研究的基础。

第四，对于更有 VR 使用经验的人来说，使用这种方法带来的益处可能较小。这可能是所谓的“专长效应” [BYH11]所致。该效应指出，与缺乏经验的人相比，经验丰富的用户往往能更可靠地发现某些系统中的“问题”。我们的 2 名非新手参与者也符合这一情况，他们的阈值 LOD 低于平均水平。

除了上述提出的问题，未来的研究还应考虑模型的其他质量方面，以及它们如何受到运动的影响。例如，一个潜在的研究方向是考察复杂（且计算开销较大）的材料属性的知觉如何因视网膜运动而改变（视网膜运动可能由

© 2023 作者

用户的运动或材料本身的运动引起）。Mao 等人研究了运动在正确知觉材料属性中的作用 [MLMG19]。为此，他们对一组具有不同材料属性的刺激材料添加了不同程度的运动模糊，并发现运动会显著影响对某些属性的知觉。我们计划扩展这一框架，研究自主运动对材料属性的影响。

6. 结论

本文采用心理物理学方法重新考察了基于速度的渲染这一理念，旨在精确测量：存在视网膜运动时，用户能够可靠地察觉场景中模型劣化的程度。我们的方法与以往方法不同，原因如下：i）模型劣化依据自主运动速度的信息（而忽略场景中的距离或物体速度信息）；ii）考察用户在被直接要求检测此类变化时对质量劣化的敏感度；iii）采用成熟的心理物理学方法，对相关参数作出精确估计。

我们的数据表明，即使在缓慢转动头部时，参与者也能接受模型相对于原始模型劣化高达 75%，即便他们被要求直接注意这种劣化。我们还证实，较高的旋转速度会产生显著更大的影响。鉴于大多数游戏引擎都能轻松获取跟踪式头戴式显示器的位置和运动信息，这种直接的细节层次简化方法或许在未来会很有用。

参考文献

[BSG17] BRAUN D. I., SCHÜTZ A. C., GEGENFURTNER K. R.：平滑追踪和扫视眼动过程中对亮度和色度刺激的视觉敏感度。《视觉研究》136（2017年7月），57–69。网址：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0042698917300974, doi:10.1016/j.visres.2017.05.008。1，6[BWA*20] BROOKES J., WARBURTON M., ALGHADIER M., MON- WILLIAMS M., MUSHTAQ F.：使用虚拟现实研究人类行为：Unity 实验框架。《行为研究方法》52卷2期（2020年4月），455–463。网址：https://doi.org/10.3758/s13428-019-01242-0，doi:10.3758/ s13428-019-01242-0。3[BYH11] BRAJNIK G., YESILADA Y., HARPER S.：网页无障碍评估方法中的专长效应。《人机交互》26卷3期（2011年8月），246–283。出版商：泰勒-弗朗西斯出版集团 _电子预印本：https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07370024.2011.601670。网址：https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07370024.2011.601670，doi:10.1080/07370024.2011. 601670。6[Cha18] CHAMFERBOX S.：《掷铁饼者》雕像 | 3D Props | Unity 资源商店，2018。网址：https://assetstore.unity.com/packages/3d/props/discobolus-statue-107544。3[Dal92] DALY S. J.：可见差异预测器：一种用于评估图像保真度的算法。载于《人类视觉、视觉处理与数字显示 III》（1992年8月），第1666卷，国际光学与光子学学会，第2–15页。网址：https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/1666/0000/Visible-differences-predictor--an-algorithm-for-t

[Dal98] DALY S. J.：关于空间速度和时空视觉模型的工程观察。载于人类视觉与电子成像 III（1998年7月），第3299卷，SPIE，第180–191页。网址：https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/3299/0000/Engineering-observations-from-spatiovelocity-and-时空

10.1117/12.320110.full, doi:10.1117/12.320110. 2[DJMM20] DENES G., JINDAL A., MIKHAILIUK A., MANTIUK R. K.：用于采用自适应刷新率和分辨率进行渲染的运动质量感知模型。ACM 图形学汇刊 39, 4 (2020年7月)。URL：https://dl.acm.org/doi/10.1145/3386569.3392411, doi:10.1145/3386569.3392411. 2[EC06] ELLIS G., CHALMERS A.：平移自运动对高保真动画感知的影响。载于《第 22 届春季计算机图形学会议论文集》（美国纽约州纽约市，2006 年 4 月），SCCG '06，美国计算机协会，第 75–82 页 PAGE@7。URL：https://doi.org/10.1145/2602161. 2602170, doi:10.1145/2602161.2602170. 2[ECD06] ELLIS G., CHALMERS A., DEBATTISTA K.：头部旋转自运动对高保真动画感知的影响。载于《第 3 届图形与可视化应用感知研讨会论文集》（美国纽约州纽约市，2006 年 7 月），APGV '06，美国计算机协会，第 160 页。URL：https://doi. org/10.1145/1140491.1140537, doi:10.1145/1140491.1140537. 2[Edl22] EDLUND M.：UnityMeshSimplifier，2022 年 8 月。原始日期：2018-01-24T13:46:37Z。URL：https://github.com/Whinarn/ UnityMeshSimplifier。3, 4[FS93] FUNKHOUSER T. A., SÉQUIN C. H.：用于复杂虚拟环境可视化的交互式帧率自适应显示算法。载于《第 20 届计算机图形学与交互技术年会论文集》（美国纽约州纽约市，1993 年 9 月），SIGGRAPH '93，美国计算机协会，第 247–254 页。URL：https://doi.org/10.1145/166117.166149, doi:10.1145/166117.166149. 3[GH97] GARLAND M., HECKBERT P. S.：使用二次误差度量进行表面简化。载于《第 24 届计算机图形学与交互技术年会论文集——SIGGRAPH '97》（地点未知，1997），ACM Press，第 209–216 页。URL：http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=258734.258849, doi:10.1145/258734.258849. 2, 3。

doi: . / . . [GLA*88] GROSSMAN G. E., LEIGH R. J., ABEL L. A., LANSKA D. J., THURSTON S. E.：运动期间头部旋转扰动的频率和速度。《实验脑研究》70, 3 (1988 年 5 月)，470–476。URL：https://doi.org/10.1007/BF00247595, doi:10.1007/BF00247595. 3[HHO04] HOWLETT S., HAMILL J., O'SULLIVAN C.：一种预测简化多边形模型显著性的实验方法。载于《第 1 届图形与可视化应用感知研讨会论文集》（美国纽约州纽约市，2004 年 8 月），APGV '04，美国计算机协会，第 57–64 页。URL：https://doi. org/10.1145/1012551.1012562, doi:10.1145/1012551. 1012562. 2[Hop96] HOPPE H.：渐进网格。载于《第 23 届计算机图形学与交互技术年会论文集——SIGGRAPH '96》（地点未知，1996），ACM Press，第 99–108 页。URL：http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237170.237216, doi:10.1145/237170.237216. 2, 6。

doi: . / . . [Hop97] HOPPE H.：渐进网格的视点相关细化。载于《第 24 届计算机图形学与交互技术年会论文集——SIGGRAPH '97》（地点未知，1997），ACM Press，第 189–198 页。URL：http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=258734.258843, doi:10.1145/ 258734.258843. 2[JWMM21] JINDAL A., WOLSKI K., MYSZKOWSKI K., MANTIUK R. K.：自适应局部着色与刷新率的感知模型

10.1117/12.135952.short, doi:10.1117/12.135952。2 he-评估/

© 2023 作者 Eurographics 会议论文集 © 2023 TheEurographicsAssociation。

率。ACM 图形学汇刊 40, 6 (2021年12月)，281:1–281:18。URL：https://doi.org/10.1145/3478513.3480514, doi:10.1145/3478513.3480514. 2[Kel79] KELLY D. H.：运动与视觉。II. 稳定状态下的时空阈值曲面。JOSA 69, 10 (1979年10月)，1340–1349。出版方：Optica 出版集团。URL：https://opg.optica.org/josa/abstract.cfm?uri=josa-69-10-1340, doi:10.1364/JOSA.69.001340. 2[KYK*20] KOTHARI R., YANG Z., KANAN C., BAILEY R., PELZ J. B., DIAZ G. J.：Gaze-in-wild：用于研究日常活动中眼动与头部协调的数据集。《科学报告》10, 1 (2020 年 2 月)，2539。编号：1 出版方：自然出版集团。URL：https://www.nature.com/articles/s41598-020-59251-5, doi:10.1038/s41598-020-59251-5. 3[Lav11] LAVOUÉ G.：用于三维网格视觉质量评估的多尺度度量。《计算机图形论坛》30 (2011 年 8 月)，1427–1437。doi: 10.1111/j.1467-8659.2011.02017.x. 2, 6[LE97] LUEBKE D., ERIKSON C.：任意多边形环境的视点相关简化。载于《第 24 届计算机图形学与交互技术年会论文集》（美国，1997 年 8 月），SIGGRAPH '97，ACM Press/Addison-Wesley 出版公司，第 199–208 页。URL：https://doi.org/10.1145/258734. 258847, doi:10.1145/258734.258847. 2[LLM16] LINARES D., LÓPEZ-MOLINER J.：quickpsy：用于拟合多组心理测量函数的 R 语言软件包。《R Journal》8, 1 (2016)，122。URL：https://journal.r-project.org/archive/2016/RJ-2016-008/index.html, doi:10.32614/RJ-2016-008. 5[MAC22a] MANTIUK R. K., ASHRAF M., CHAPIRO A.：stelaCSF：一种将对比敏感度建模为时空频率、偏心度、亮度和面积函数的统一模型。ACM 图形学汇刊 41, 4 (2022年7月)，1–16。URL：https://dl.acm.org/ doi/10.1145/3528223.3530115, doi:10.1145/3528223. 3530115. 2[MAC22b] MANTIUK R. K., ASHRAF M., CHAPIRO A.：stelaCSF：一种将对比敏感度建模为时空频率、偏心度、亮度和面积函数的统一模型。ACM 图形学汇刊 41, 4 (2022年7月)，145:1–145:16。URL：https://doi.org/10.1145/3528223.3530115, doi:10.1145/3528223. 3530115. 6[MD02] MURPHY H., DUCHOWSKI A. T.：虚拟现实中的知觉注视范围与细节层次：跳出框框看。载于《ACM SIGGRAPH 2002 会议摘要与应用》（美国纽约州纽约市，2002 年 7 月），SIGGRAPH '02，美国计算机协会，第 228 页。URL：https://doi.org/10.1145/1242073.1242241, doi:10.1145/1242073.1242241. 2[MLMG19] MAO R., LAGUNAS M., MASIA B., GUTIERREZ D.：运动对材料外观感知的影响。载于《ACM 2019 年应用感知研讨会》（美国纽约州纽约市，2019 年 9 月），SAP '19，美国计算机协会，第 1–9 页。URL：https://doi.org/10.1145/3343036.3343122, doi:10.1145/3343036.3343122. 7[MLR85] MEYER C. H., LASKER A. G., ROBINSON D. A.：人类平滑追踪速度的上限。《视觉研究》25, 4 (1985 年 1 月)，561–563。URL：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042698985901609, doi:10.1016/0042-6989(85)90160-9. 6[MRT99] MYSZKOWSKI K., ROKITA P., TAWARA T.：利用感知信息加速渲染高质量漫游序列。载于《第 10 届 Eurographics 渲染会议论文集》（德国戈斯拉尔，1999 年 6 月），EGWR'99，Eurographics 协会，第 5–18 页。2[Mur78] MURPHY B. J.：平滑眼动期间运动与静止光栅的图案阈值。《视觉研究》18, 5 (1978 年 1 月)，521–530。URL：https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0042698978901967, doi:10.1016/0042-6989(78)90196-7. 1, 6[NVI18] 英伟达：VRWorks - 可变速率着色 (VRS)，2018 年 7 月。URL: https://developer.nvidia.com/vrworks/graphics/variablerateshading. 2[OD01] O'SULLIVAN C., DINGLIANA J.：碰撞与知觉。ACM《计算机与人类交互汇刊》20, 3 (2001 年 7 月), 151– 168. URL: https://doi.org/10.1145/501786.501788, doi:10.1145/501786.501788. 2[PN04] PARKHURST D., NIEBUR E.：桌面系统上感知自适应细节层次渲染的可行性测试。载于：第 1 届图形与可视化应用感知研讨会论文集（美国纽约州纽约市，2004 年 8 月），APGV '04，计算机协会，第 49–56 页。URL: https://doi.org/10.1145/1012551.1012561, doi:10.1145/1012551.1012561. 3, 6[PZR81] PULASKI P. D., ZEE D. S., ROBINSON D. A.：头部高速旋转时前庭-眼反射的行为。《脑研究》222, 1 (1981 年 10 月), 159–165. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0006899381909525, doi:10.1016/0006-8993(81) 90952-5. 3, 6[Red98] REDDY M.：细节层次选择标准的规范与评估。《虚拟现实》3, 2 (1998 年 6 月), 132–143. URL: https://doi.org/10.1007/BF01417674, doi: 10.1007/BF01417674. 3, 6[Red01] REDDY M.：感知优化三维图形。IEEE《计算机图形学与应用》21, 5 (2001 年 7 月), 68–75. 会议名称：IEEE《计算机图形学与应用》。doi:10.1109/ 38.946633. 3[Rob66] ROBSON J.：视觉系统的空间与时间对比敏感度函数。《美国光学学会杂志》56 (1966 年 8 月)。doi:10.1364/JOSA.56.001141. 2[SBE21] SCHRÖDER R., BAUMERT P. M., ETTINGER U.：平滑追踪眼动中背景与目标速度效应的可重复性和可靠性。《心理学学报》219 (2021 年 9 月), 103364. URL: https://www.sciencedirect. com/science/article/pii/S0001691821001141, doi:10.1016/j.actpsy.2021.103364. 6[Sim88] SIMPSON W. A.：恒定刺激法效率很高。《知觉与心理物理学》44, 5 (1988 年 9 月), 433–436. URL: https://doi.org/10.3758/BF03210427, doi: 10.3758/BF03210427. 3[Spa22] SPACERAT：快速二次误差网格简化，2022 年 8 月。original-date: 2015-07-16T13:31:00Z. URL: https://github.com/sp4cerat/Fast-Quadric-Mesh-Simplification. 3[WBL22] WARREN P. A., BELL G., LI Y.：使用虚拟现实研究不同自身运动过程中的知觉稳定性失真。《知觉》（2022 年 8 月），03010066221116480。出版方：SAGE Publications Ltd STM。URL: https://doi.org/10.1177/ 03010066221116480, doi:10.1177/03010066221116480. 1, 3[WWHW97] WATSON B., WALKER N., HODGES L. F., WORDEN A.：通过周边退化管理细节层次：使用头戴式显示器时对搜索表现的影响。ACM《计算机与人类交互汇刊》4, 4 (1997 年 12 月), 323–346. URL: https://doi.org/10.1145/267135.267137, doi:10.1145/267135.267137. 2, 6[YPG01] YEE H., PATTANAIK S., GREENBERG D. P.：动态环境高效渲染中的时空敏感度与视觉注意。ACM 图形学汇刊20, 1 (2001 年 1 月), 39–65. URL: https://doi.org/10.1145/383745.383748, doi:10.1145/383745.383748. 2, 6[YZK*19] YANG L., ZHDAN D., KILGARIFF E., LUM E. B., ZHANG

© 2023 作者

Y., JOHNSON M., RYDGÅRD H.: 游戏中的视觉无损内容与运动自适应着色。 *ACM* 计算机图形学与交互技术论文集 *2*，1（2019年6月），6:1–6:19。网址：https://doi.org/10.1145/3320287，doi:10.1145/ 3320287。 2

© 2023 作者 Eurographics 会议论文集 © 2023 Eurographics 协会。