

文章编号:1007-2780(2018)01-0085-07

基于 HTC Vive 的全景视频显示质量评估

汪泽伟*, 于有光, 杨付正

(西安电子科技大学 综合业务网理论及关键技术国家重点实验室, 陕西 西安 710071)

摘要:近年来,科技界掀起一场“虚拟现实”风暴,给人们带来了前所未有的视听体验。全景视频作为虚拟现实的主要构造方式之一,凭借其良好的用户体验与人机交互性被广泛应用于医疗、娱乐、教育以及工业设计等诸多领域,在一定程度上改变了原有的生产设计方式。与此同时,用户对于全景视频视觉体验的要求也日益增长,如何为用户提供良好的全景视频视觉体验已成为近年来相关领域的研究热点。本文以 HTC Vive 平台为基础,结合虚拟现实技术相关指标以及用户对于全景视频视觉体验的要求,搭建了全景视频显示系统,并在此平台上通过主观实验分析了渲染全景视频时的球体网格面片数与全景视频主观质量之间的关系。实验结果表明,对于分辨率为 720 P、1 080 P 以及 4K 的视频,当面片数小于 64 时,视频的主观质量与面片数量成正相关关系;当面片数超过 64 后,视频主观质量方可由其自身参数所决定。本文中所搭建的全景视频显示系统以及文中相关结论可为后续有关全景视频的研究与应用开发提供有效的建议。

关键词:虚拟现实;全景视频;显示系统;视觉体验;质量评估

中图分类号:TN919.8 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20183301.0085

Panoramic video display quality assessment based on HTC Vive

WANG Ze-wei*, YU You-guang, YANG Fu-zheng

(State Key Laboratory of Integrated Service Networks, Xidian University, Xi'an 710071, China)

Abstract: In recent years, "virtual reality" has been more and more popular and brought with it an unprecedented fantastic user experience. Panorama video, as one of the main construction ways of virtual reality, on account of its good user experience and human-computer interaction ability, has been widely used in many fields, such as medical, entertainment, education and industrial design. With the increasing demands for good user experience, how to ensure the user experience of panorama video in various applications now becomes the next hot topic. In this paper, we proposed a panoramic video display system based on the HTC Vive platform. The relationship between the number of patches of the sphere used for rendering and the subjective quality of the panoramic video is analyzed by subjective experiment. The result indicates that for 720 P, 1 080 P and 4K videos, when the number of patches is smaller than 64, the subjective video quality has a positive correlation with it. When the number of patches exceeds 64, the subjective quality will be determined by the video parameters. The proposed panoramic video display system and the relevant conclusions can provide effective suggestions for the subsequent research and application development of panoramic video.

收稿日期:2017-07-14; **修订日期:**2017-10-24.

基金项目:国家自然科学基金(No. 61571337)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61571337)

* 通信联系人, E-mail: wzewei@stu.xidian.edu.cn

Key words: virtual reality; panoramic video; display system; visual experience; quality assessment

1 引言

随着多媒体技术以及计算机图形学的发展,虚拟现实技术以其良好的用户体验与高效的人机交互方式备受关注。在 Microsoft、Google、Facebook 等公司的推动下,市场上涌现出一批令人印象深刻的虚拟现实产品,如: HTC Vive、Oculus Rift 等,为虚拟现实技术的推广奠定了良好的基础。用户在享受由虚拟现实技术带来的沉浸感和科技感的同时,也愈发关注其显示质量。如何提升显示质量,为用户提供更好的视觉体验,已成为这个领域内的热门话题。

在虚拟环境的诸多构造方式中,全景视频凭借其成熟的处理算法,较高的编辑时效性,以及“身临其境”的观看体验成为了当前使用最为广泛的虚拟环境构造方式。因此,全景视频视觉体验的相关研究已成为近年来多媒体领域的研究热点,在早先的研究中,直接使用先前传统视频质量评估^[1]中的方法如: PSNR(Peak Signal to Noise Ratio)^[2]、SSIM(Similarity Structural)^[3]、VQM(Video Quality Model)^[4]、MOVIE(Motion-based Video Integrity Evaluation)^[5]等方法对全景视频的视觉体验进行分析,然而这些方法的分析结果与用户体验的差异较大。因此后续一些研究结合全景视频的特点对其用户体验进行了分析。Simone 和 Luca^[6]将影响全景视频视觉体验的因素分为低级视觉和高级视觉因素,并以此为基础提出一种针对全景视频的客观评估方法。文献[7]分析了不同映射方式的全景视频的视觉体验并对各种映射方式的编码效率进行了评估。Chen^[8]等进一步分析了深度分辨率、木偶剧院效应以及纸盒效应等因素对全景视频视觉体验的影响。Zakharchenko、Kwang 等^[9]结合全景视频的投影变换提出了一种加权的 PSNR 用于分析全景视频的质量,此方法目前在业内认可度较高,多种提案均参考了此方法。虽然近年来有关全景视频视觉体验的研究大量涌现,但多以分析全景视频相关参数与主观质量之间的关系为主,而有关显示系统与其视觉体验的关系的研究依然相对

匮乏。

对于视频业务服务商以及相关软件设计人员而言,分析全景视频显示系统参数与用户视觉体验之间的关系对于提升用户体验是至关重要的,基于分析结果,相关人员可以在保证用户体验的同时对编码、传输以及渲染参数进行灵活调整。本文结合 HTC Vive 平台,搭建了全景视频显示系统,可以为用户提供清晰、流畅的全景视频观看体验,并通过主观实验分析渲染时球体参数对于全景视频视觉体验的影响。主观实验分析结果可以为后续研究以及相关平台的搭建提供可靠的依据。

2 基于 HTC Vive 的全景视频显示系统设计

全景视频作为当前虚拟现实环境主要的构造方式之一备受人们关注,其中 ERP(Equirectangular Projection)是当前全景视频使用最为广泛的映射方式,由于此种映射方式的全景视频采集、压缩以及传输等处理算法相对成熟,而且随着拼接算法性能的提升,球极区域的失真得到了有效控制,极大地提升了用户的视觉体验,因此目前全景视频相关标准的制定多以此种映射方式为基础展开。本文结合 HTC Vive 平台,以 ERP 为基础,设计了全新的全景视频显示平台,可为用户提供更好的全景视频观看体验。

本次搭建基于 HTC Vive 的全景视频显示平台时,选用 OpenGL、SDL 以及 OpenVR 完成各部分的处理。主渲染框架按照 OpenGL 渲染管线搭建,调用 SDL 完成显示器上窗口的内容渲染工作,并通过此窗口将虚拟现实设备内所显示图像在显示器上实时地呈现出来。OpenVR 所提供的 API 在本次搭建的系统中负责设备信息的更新,渲染图像的提交以及交互事件的处理等工作。同时还为渲染管线提供各个组件的位置、姿态等信息,OpenGL 结合此类信息完成相应矩阵的更新,实时地对渲染参数进行调整。

全景视频的显示是标准的计算机图形学渲染

流程,类似“虚拟拍照”的过程,将全景视频中某个视角区域的图像呈现出来。如图 1 所示,渲染流程主要分为 3 个环节:顶点处理、图元处理和片段处理。通过以上 3 个环节,可以将输入的顶点、几何属性(例如:法线、面片种类等)、纹理贴图等信息转换为最终输出图像的像素信息。

结合渲染流程以及设备刷新率、相关组件的姿态及位置、视域等虚拟现实的基础要求,我们将整个系统分为以下几个模块:虚拟空间的创建、全景视频的贴图显示以及人机交互。

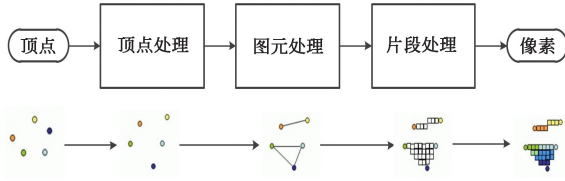


图 1 渲染流程的环节

Fig.1 Rendering pipeline

2.1 基于 ERP 的虚拟空间创建

在构造虚拟现实的内容时,首先需要建立对应的虚拟空间,而基于 ERP 的全景视频通常将视点置于一个球体的球心位置(如图 2 所示),将视频内容显示于球体表面,为用户营造出一种身临其境的感觉,因此,虚拟空间的创建是全景视频显示技术的关键。

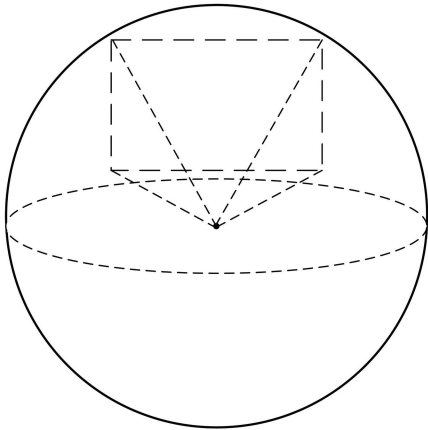


图 2 基于 ERP 的虚拟空间

Fig.2 Virtual space based on equirectangular projection

在本系统中绘制球体模型时,根据 ERP 的特点将球体模型按照经纬度划分为若干个面片,经度和纬度划分面片数的比值为 2 : 1。各面片的

顶点对应的经、纬度由式(1)、式(2)计算出:

$$\theta = \frac{360}{2N}i, \quad (1)$$

$$\varphi = \frac{180}{N}j, \quad (2)$$

其中: i 为沿经度方向划分的第 i 个区域, j 为沿纬度方向划分的第 j 个区域, N 为沿纬度方向划分的面片数量, θ 为球体上点的经度, φ 为纬度。

然后可通过各顶点的经、纬度信息计算其空间坐标:

$$x = R \cos(\varphi) \sin(\theta), \quad (3)$$

$$y = R \sin(\varphi), \quad (4)$$

$$z = R \cos(\varphi) \cos(\theta), \quad (5)$$

式中: R 为球体的半径, x, y, z 分别为该顶点对应的空间坐标。在计算机图形学中,显示屏幕空间所对应的三维坐标的方向与通常使用的笛卡尔坐标系有所区别(如图 3 所示),屏幕深度方向为 z 轴,高度方向为 x 轴,宽度方向为 y 轴。因此,本系统中按照此规则进行了相应的调整,球的两极位于坐标系 y 轴的 R 和 $-R$ 处,赤道位于 z 轴与 x 轴所形成的平面上,球心位于坐标系原点位置。

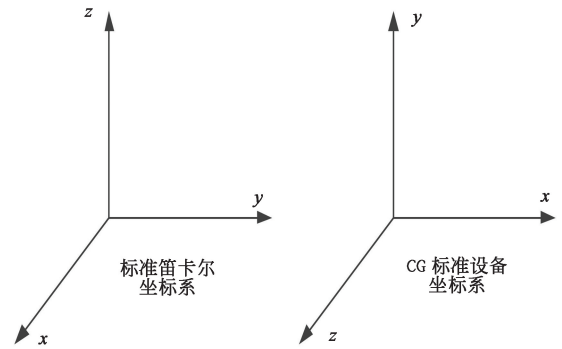


图 3 坐标系示意图

Fig.3 Coordinate system diagram

待球体创建完成后,通过调整观察矩阵^[10]将视点置于虚拟空间的中心(即球心)处:

$$\mathbf{M}_{\text{Viewpoint}} = \begin{bmatrix} R_x & R_y & R_z & 0 \\ U_x & U_y & U_z & 0 \\ D_x & D_y & D_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & P_x \\ 0 & 1 & 0 & P_y \\ 0 & 0 & 1 & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

上式中,第一个矩阵主要控制视点的朝向信息,第二个矩阵中的 P_x, P_y, P_z 代表视点位置的空间坐标,在本系统中被设置为 $(0, 0, 0)$ 。通过上

述步骤,虚拟空间的创建工作已完成,在此基础上可进行下一步的渲染工作。

此处需要说明的是,在系统的设计和搭建过程中,我们发现球体划分的面片数量对于全景视频的显示质量存在一定的影响,面片数过少时无法客观反映出全景视频本身的质量,而面片数过多时又会造成渲染时的效率下降,这对于虚拟现实的用户体验而言都是不理想的。

2.2 基于并行处理的全景视频纹理映射

根据 HTC Vive 研发人员在 Game Developers Conference 2015 与 Game Developers Conference 2016 的会议报告,所提交的渲染结果需在下一个时间同步信号到达前完成渲染工作,否则会产生 GPU 气泡(GPU Bubble),造成 GPU 的效率降低。每个时间同步信号的间隙为 11 ms,因此单次渲染工作需在这个时间内完成。根据此要求,本次搭建的显示系统中纹理贴图模块主要由视频处理和纹理映射两部分构成。视频处理部分负责将视频解码并将得到的 YUV 数据转换为纹理贴图所需的 RGB 数据;纹理映射部分负责将已经解码和转换的图像映射到先前绘制的球体上。

由于全景视频的解码和颜色转换过程需要消耗较多的时间,会导致系统无法满足虚拟现实的要求,因此在视频处理模块中我们使用了多线程技术,将解码过程与颜色空间转换过程同时处理,并将已经完成处理的视频图像存入缓冲区供纹理映射使用。同时,为进一步提高速度,在进行颜色空间转换的过程中通过调用 SSE2 指令集完成相应计算,大幅提升运算效率。最后,根据视频帧率的要求,对缓冲区的内容进行更新。

当缓冲区中存有已完成处理的图像时,视频序列中的每一帧图像可以通过纹理映射的方式与先前所建立的球体模型相关联。此处将每一帧图像按照先前绘制球体时的经、纬度划分方式对其进行划分,确定球体上每个顶点所对应的贴图顶点信息,具体计算公式如下:

$$u = \frac{i}{2N}, \quad (6)$$

$$v = \frac{j}{N}, \quad (7)$$

式中: N 为绘制球体时沿纬度划分的总块数, u 、

v 分别对应于贴图顶点位置坐标。

纹理映射中另一个关键部分是滤波方式的确定,滤波方式直接决定着最终渲染结果的质量。目前在计算机图形学中使用最为广泛的是最邻近插值和双线性滤波两种方式。最邻近插值以离插值点最近的像素点的颜色作为此插值点的颜色信息,此种方式在纹理缩放时会产生明显的失真。因此,在本次所搭建的系统中全景采用双线性插值的方式完成滤波,以保证用户可获得较好的视觉体验。

此外,在纹理映射时还需考虑内存的使用情况。通常对单幅图像而言,只需为纹理数据创建一次纹理对象即可,但对于视频而言,每一帧图像都创建对应的纹理对象会耗费大量的时间及内存。而且纹理对象只在渲染工作完成后释放,若用来处理视频,则会造成内存溢出。为解决此类问题,可以使用纹理替换技术,在显示第一帧时创建一个新的纹理对象,之后只需将后续各帧图像绑定到当前纹理对象上,从而达到减少渲染时间与内存消耗的目的。经过以上处理,可有效地将纹理映射模块的单次运行时间控制在虚拟现实设备所要求的 11 ms 以内,为用户提供流畅、清晰全景视频观看体验。

当上述各部分完成后,则可根据当前的设备信息调整摄像机矩阵中相应的朝向信息,对观看视角进行调整。最后,将对应区域的渲染图像提交至显示设备完成该区域的显示。

3 球体参数对画面质量的影响

如前文所述,球体模型的参数对全景视频的显示质量存在一定的影响,本节以主观实验的方式分析创建模型过程中的面片数量对于显示质量的影响程度,并以此为基础确定绘制球体时的参数,优化显示效果。

3.1 主观实验设计

3.1.1 实验环境

本次主观实验所采用的 VR 设备为 HTC Vive,此设备由两块显示屏及菲涅耳透镜组成显示系统,单眼分辨率为 $1\,080 \times 1\,200$,最大视域(FoV)为 110° ,设备刷新率最高可达 90 Hz。所配备的计算机硬件具体参数如表 1 所示。

表 1 硬件配置

Tab.1 Hardware configuration

硬件名称	配置
处理器	Intel Core I7 6700K 4.00 GHz
显卡	NVIDIA GeForce GTX 1080
内存	32G(DDR 4)

结合此设备特点以及硬件的图形处理能力,在进行渲染时,将视域按照设备最大视域 110° 进行设置,可视区域范围设置为 $0.1 \sim 30$ m,其他相关实验环境参考 ITU-T 制定的 P.910 标准^[11]进行设置。

3.1.2 测试序列

本次主观实验共选择了 3 种不同类型的全景视频,分别是 Canolafield、Kiteflite 以及 Skateboarding,3 个序列的画面截图如图 4 所示。这些序列在内容的复杂程度、运动的剧烈程度等方面具有一定的代表性。其中,Canolafield 的内容复杂程度较高,油菜花运动方向的随机性较大,较为复杂;Kiteflite 场景复杂度适中,视频中运动平缓且规律性较强;Skateboarding 的场景复杂度较低,运动较为剧烈,但运动方向具有一定的规律性。通过 FFmpeg,我们将视频序列编码为 720 P (1280×640)、1080 P (1920×1080)、4K (3840×1920) 三种不同分辨率的 H.265 码流。

为分析球体划分面片数对全景视频显示质量造成的影响,我们将球体的面片数设置为 8、16、32、64、128、256、512 等共计 7 组。因此,在本次实验中每个测试人员须观看 63 段(3 种视频 $\times$ 3 种分辨率 $\times$ 7 种球体面片数量)全景视频序列。

3.1.3 主观实验描述

本次主观实验共有 27 位非本领域的专业人员参与,年龄范围在 21~29 岁之间,平均年龄为 24.5 岁,其中包括女性 12 人,男性 15 人。所有参与测试的人员的视力或矫正视力符合要求,辨色能力正常。实验过程主要参考 ITU-T 制定的 P.910 中相关内容,分为 4 个阶段,首先向参与测试的人员介绍实验环境以及如何在虚拟现实设备上观看全景视频;接着,在训练阶段中,测试人员需熟练使用测试平台并对全景视频主观质量的波动建立初步印象;在正式实验阶段,测试人员在观看



(a)测试序列 Canolafield

(a)Test sequence: Canolafield



(b)测试序列 Kiteflite

(b)Test sequence: Kiteflite



(c)测试序列 Skateboarding

(c)Test sequence: Skateboarding

图 4 测试序列画面

Fig.4 Screenshots of test sequences

每一段视频后根据自己对于所观看序列的质量进行评分;最后对每一位参与测试的人员进行采访,询问其主观感受。此外,为确保数据的有效性,要求每个测试人员在正式测试前调整透镜与眼睛的间距,以确保能观看到最清晰的图像。同时,根据全景视频的特点,要求测试人员在观看视频序列时需转动头部改变观看视角,全面的观察视频中所呈现的内容。在对所观察的序列进行评分时,采取五分制的评分系统,1~5 分分别对应于视频显示质量“很差”、“差”、“一般”、“好”、“很好”。

除上述各要点之外,由于长时间佩戴虚拟现实设备会造成“晕动症”,为保证实验数据的有效性和可靠性,每段视频序列的时长控制在 $10 \sim 20$ s,每次测试时长被严格控制在 30 min 之内。若测试人员产生视觉疲劳或有眩晕感,则稍作暂停,待不适感消除后再继续进行主观实验。

3.1.4 数据筛选

本次主观实验共获得 1 701(63×27)个样本,通过计算每名测试人员的评分结果与平均意见分值 MOS(Mean Opinion Score)之间的皮尔森相关系数 PCC(Pearson linear Correlation Coefficient),将 3 位相关系数低于 0.8 的测试人员的数据进行剔除,得到剩余的 24 组有效的主观测试数据,共 1 512 个样本。

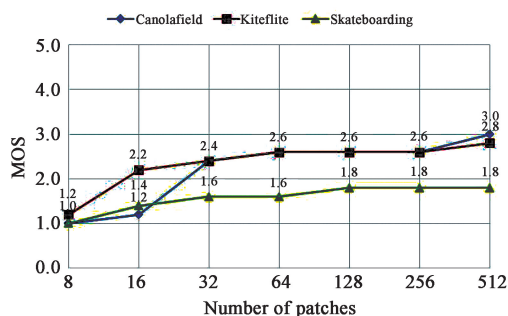
3.2 实验数据分析

为进一步挖掘球体参数与全景视频显示质量之间的差别,此处将不同分辨率、不同面片数量所对应的 MOS 以散点图的形式呈现出来。由于面片数是以 2 的幂次递增的,因此横轴采用对数坐标。图 5(a),5(b),5(c)分别对应 720 P($1\,280 \times 640$)、1 080 P($2\,160 \times 1\,080$)、4K($3\,840 \times 1\,920$)三种分辨率下各序列映射于不同面片数的球体上的主观质量。

当全景视频分辨率为 720 P 时,测试人员普遍认为视频的主观质量不理想,从图 5(a)中可以看出,当面片数量小于 64 时,序列 Canolafield 在整体的主观质量较低,然而,随着面片数的增加,主观质量有明显的提升,当面片数大于 64 之后,主观质量趋于稳定;序列 Kiteflite 在面片数量由 8 变为 16 时质量波动最为剧烈,当面片数大于 64 时,视频的主观质量相对较高且波动较小;序列 Skateboarding 的主观质量整体偏低,均在 2.0 分以下,随着面片数的增加主观质量的波动较小,当面片数大于 16 时,其主观质量趋于稳定。

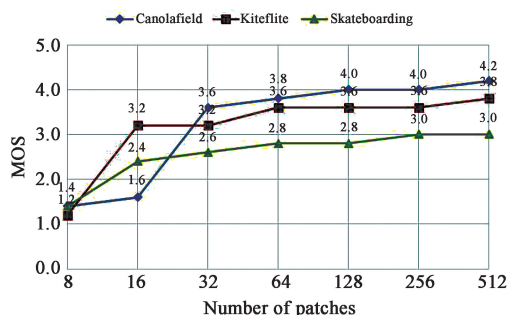
相对于 720 P 而言,当视频分辨率提升至 1 080 P 时,视频的主观质量随着面片数的增加提升幅度较为明显。如图 5(b)所示,当视频分辨率为 1 080 P 时,序列 Canolafield 在面片数量大于 64 之后,整体的主观质量波动较小,稳定于 4 分左右;序列 Kiteflite 的主观质量波动情况与序列 Canolafield 类似,当面片数量大于 64 时,整体的主观质量较为稳定;序列 Skateboarding 的主观质量相对于 720 P 有了明显的提升,当面片数量大于 64 时,此序列主观质量的整体波动情况趋于稳定。

目前主流视频网站所提供全景视频的最高分辨率为 4K,如图 5(c)所示,在此分辨率下,序列 Canolafield 与序列 Kiteflite 趋势较为一致,当面片数量大于 64 时,主观质量的整体趋势趋于平



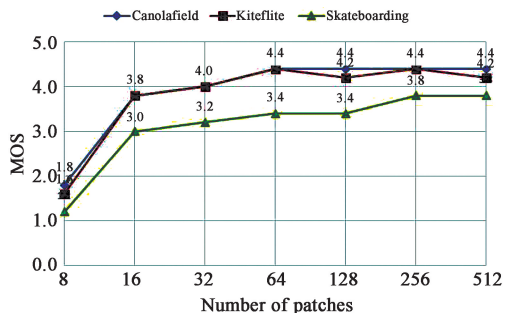
(a)分辨率为 1 280 × 640

(a)Resolution: 1 280 × 640



(b)分辨率为 2 160 × 1 080

(b)Resolution: 2 160 × 1 080



(c)分辨率为 3 840 × 1 920

(c)Resolution: 3 840 × 1 920

图 5 不同分辨率下面片数与 MOS 分值之间的散点图

Fig. 5 Scatter diagram between the number of patches and MOS scores under different resolutions

稳;对于序列 Skateboarding 而言,虽然当面片数量为 256 时视频的主观质量有小幅上升,但总体而言,当面片数量大于 64 之后整体变化趋于平缓,没有出现较大变化。同时,可以看出当球体划分面片数大于一定数量之后,4K 分辨率的全景视频能为用户提供较为满意的视觉体验。

综上所述,球体参数对于全景视频的显示质量存在一定的影响,若构成球体的面片数过少,则无法真实的反映出全景视频本身的质量,只有当面片数达到一定数量之后,所显示的全景视频的主观质量才由其视频本身相关参数所决定。对于 720 P、1 080 P 及 4K 分辨率的视频,这一数字为 64。

4 结 论

随着多媒体技术以及计算机图形学的发展,虚拟现实技术以其良好的用户体验与人机交互得到了广泛关注,用户在享受由虚拟现实技术带来的沉浸感的同时,也愈发关注虚拟环境的视觉体验。因此在保证沉浸感的同时,提升显示质量从

而提高用户体验,是下一个热门的研究领域。

本文基于 HTC Vive 平台搭建了全景视频显示系统,可为用户提供良好的观看体验。在此平台的基础上,我们通过主观实验的形式分析了显示系统中渲染球体的面片划分数与全景视频主观质量之间的关系。实验结果表明,对于 720 P、1 080 P 以及 4K 分辨率的视频而言,当面片数低于 64 后,视频显示质量与面片数成正相关关系,当面片数超过 64 后,主观质量则主要由其视频参数所决定。

目前,由于虚拟现实技术自身仍存在一些局限与不足,给人们的体验带来了一些影响。在今后的研究中我们将结合本文所述显示系统与相关结论,对影响全景视频显示质量的客观指标,以及造成晕动症的原因进行进一步的量化分析。

参 考 文 献:

- [1] 姚军财,刘贵忠.结合人眼对比度敏感视觉特性的视频质量客观评价[J].光学精密工程,2016,24(3):659-667.
YAO J C, LIU G Z. Video quality objective assessment combined contrast sensitivity characteristics of human visual system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(3): 659-667. (in Chinese)
- [2] HUYNH-THU Q, GHANBARI M. Scope of validity of PSNR in image/video quality assessment [J]. *Electronics Letters*, 2008, 44(13): 800-801.
- [3] WANG Z, BOVIK A C, SHEIKH H R, et al. Image quality assessment: from error visibility to structural similarity [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(4): 600-612.
- [4] PINSON M H, WOLF S. A new standardized method for objectively measuring video quality [J]. *IEEE Transactions on Broadcasting*, 2004, 50(3): 312-322.
- [5] SESHADRINATHAN K, BOVIK A C. Motion tuned spatio-temporal quality assessment of natural videos [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19(2): 335-350.
- [6] LEORIN S, LUCCHESI L, CUTLER R G. Quality assessment of panorama video for videoconferencing applications [C]//*Proceedings of the 2005 IEEE 7th Workshop on Multimedia Signal Processing*. Shanghai: IEEE, 2005: 1-4.
- [7] YU M, LAKSHMAN H, GIROD B. A framework to evaluate omnidirectional video coding schemes [C]//*Proceedings of 2015 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Fukuoka: IEEE, 2015: 31-36.
- [8] CHENY J, WU K S, ZHANG Q. From QoS to QoE: a tutorial on video quality assessment [J]. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 2015, 17(2): 1126-1165.
- [9] ZAKHARCHENKOV, CHOI K P, PARK J H. Quality metric for spherical panoramic video [J]. *SPIE*, 2016, 9970: 99700C.
- [10] 施珂奕,邓春健,邹昆.基于 OpenGL 的三维模型点坐标拾取方法[J].液晶与显示,2016,31(7):708-713.
SHI K Y, DENG C J, ZOU K. Point pick-up in three-dimension model based on OpenGL [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(7): 708-713. (in Chinese)
- [11] ITU-T RECOMMENDATION P. Subjective video quality assessment methods for multimedia applications [J]. 2008: 34-35.

作者简介:汪泽伟(1995—),男,安徽六安人,硕士研究生,研究方向为计算机图形学与虚拟现实。E-mail: wzewei@stu.xidian.edu.cn