

敦煌 285 窟多媒体集成虚拟展示

刘 洋 鲁东明 刁常宇 况 奕

(浙江大学计算机科学与技术学院 杭州 310027)

摘 要 敦煌石窟是我国乃至世界佛教艺术的瑰宝,建于西魏的 285 窟以壁画保存完整,内容丰富而成为敦煌石窟的精品之一.使用虚拟展示技术可以极大地方便人们对敦煌壁画艺术的欣赏,但是对于 285 窟壁画上丰富的佛教故事无法充分的表达.提出了 285 窟多媒体集成虚拟展示,对 285 窟的三维模型进行多媒体嵌入支持扩展,通过在 3DS 文件中增加多媒体信息结点,将三维模型与多媒体数据库进行有机整合;对热点区域建立基于对象而非基于面片的热点定义,有效地避免了在使用 LOD 方法中热点随面片简缩而消失的问题;在实时交互中将多媒体播放嵌入到虚拟场景中,增强了多媒体和虚拟环境的融合程度.通过多媒体集成虚拟展示,丰富了 285 窟的表现形式,展现能力得到了增强,取得了较好的效果.文中对 285 窟的建模技术以及系统中采用的实时绘制技术和真实感绘制技术做了介绍.

关键词 文物数字化;多媒体;LOD;BumpMap;MipMap;虚拟展示;OpenGL
中图分类号 TP339

Dunhuang 285 Cave Multimedia Integrated Virtual Exhibit

Liu Yang Lu Dongming Diao Changyu Kuang Yi

(College of Computer Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract Dunhuang cave is a precious heritage of the world. Cave285 was constructed about 1400 years ago. Because the fresco is protected well and there are lots of stories in the fresco, Cave285 is one of the most precious cave in Dunhuang. It is convenient to people to enjoy Dunhuang fresco using virtual reality technology, but it is not enough to explain the abundant connotation of the fresco in Cave285. This paper proposes the multimedia integrated virtual exhibit of Dunhuang Cave285. The 3D model of Cave285 is extended by adding multimedia nodes into 3DS file, and this can combine 3D model and multimedia database well. It is useful to define hotspot based on object, not on triangles. This can solve the problem aroused by LOD, which may delete the hotspot as the triangles are undergoing data reduction. Multimedia information presentation embedded in virtual environment works well in our system. This paper also introduces the 3D modeling technology of the Cave285, and also introduces the real-time rendering and reality rendering technology in our system.

Key words digital heritage; multimedia; LOD; BumpMap; MipMap; virtual environment; OpenGL

1 引 言

敦煌石窟是我国和世界闻名的珍贵历史文化遗产之一,是佛教艺术的瑰宝.敦煌石窟第 285 窟(简称 285 窟)开凿于西魏,洞窟壁画保存完整,内容异常丰富,是敦煌早期内容最丰富的洞窟之一.当前

的虚拟漫游技术可以较好地解决由于敦煌地域偏远所带来的参观不便,使人们可以免去长途跋涉而欣赏到敦煌的精彩壁画.但是,对于 285 窟壁画上丰富的佛教故事来说,单纯的虚拟漫游技术在表现手法上已经无法满足要求^[1].于是我们考虑是否可以利用多媒体技术丰富的表现手法来弥补传统的虚拟漫游技术的不足.因此,如何将多媒体技术和虚拟

修改稿收到日期:2004-06-18. 本课题得到国家“八六三”高技术研究发展计划(国际合作)(2003AA119020)资助. 刘 洋,男,1979 年生,硕士研究生,主要研究方向为虚拟现实、基于照片的三维建模. 鲁东明,男,1968 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为虚拟现实、多媒体技术、智能 CAD、计算机网络等. 刁常宇,男,1978 年生,博士研究生,主要研究方向为虚拟显示、网络多媒体技术和虚拟感知技术. 况 奕,男,1981 年生,硕士研究生,主要研究方向为虚拟现实、真实感绘制、虚拟感知技术.

场景进行有机地结合成为我们研究的内容,实现 285 窟多媒体集成虚拟展示系统就是在这样的需求下建立起来的. 本文系统利用建模技术、虚拟现实技术和多媒体技术,将多媒体信息嵌入到三维模型中,将多媒体展示和虚拟场景较好地融合,展示了 285 窟珍贵、丰富的内容,为敦煌学者的研究工作提供了极大的便利,为敦煌艺术爱好者提供了形式多样、内容详尽、直观的 285 窟资料.

285 窟所有的墙面上均有壁画,而且保存相当完整,极具艺术和佛教研究的价值,因此对其进行适用于鉴赏和研究的高精度获取是一个很大的挑战. 285 窟中的彩塑造型优雅,曲线柔美,对这些彩塑进行三维建模是非常困难的^[1-2]. 本文将介绍 285 窟的巨幅壁画获取设备和如何使用手持三维扫描仪获取彩塑模型.

285 窟建模完成后数据量非常庞大,对实时绘制提出了相当高的要求,由于 285 窟的墙面颗粒感较明显,因此就要求我们在不破坏壁画数据的基础上尽量体现这种质感. 本文将介绍我们系统中所采用的实时渲染和真实感渲染方法.

2 285 窟三维建模

2.1 巨幅壁画数字化获取

285 窟壁画数字化获取采用的是数码相机摄影的方法. 我们针对石窟壁画的高质量拍摄的需求,设计了一套数字化获取设备,整套数字化获取设备包括:滑动轨道一套、滑轮一对、主支撑框架方框若干、主支撑框架横梁若干、照相机平台框架两个、底座一对、主支撑滑竿一对、照相机平台滑竿一个.

285 窟壁画本身的状态和位置对于拍摄的影响可分为如下两类:壁画幅面比较平整,壁画前的地面比较开阔;石窟墙壁转折处墙面上的壁画. 利用上述设备的结构部件,可以安装如下两种拍摄平台以适应不同的情况^[1].

(1) 普通拍摄平台

普通拍摄平台适用于 285 窟大多数壁画的拍摄要求,这些壁画基本在一个平面上且呈现较为标准的矩形,周围空间较大,能容下平台,其装配图如图 1 所示.

拍摄时平台主要有两个方向上的动作,一是整个上层框架在轨道上(水平方向上)的移动;二是照相机平台框架在主支撑框架滑竿上(垂直方向上)的移动. 普通拍摄平台使得照相机的视角可以覆盖整个壁画幅面.

(2) 垂直转折处拍摄平台

垂直转折处拍摄平台适用于 285 窟在墙壁面垂直转折处的壁画,其装配图如图 2 所示.



图 1 普通拍摄平台



图 2 垂直转折处拍摄平台

垂直转折处拍摄平台的主要操作就是照相机平台框架在主支撑滑竿上的移动.

2.2 彩塑数字化获取

彩塑由于其形体复杂,我们采用三维扫描仪扫描的方法获取三维信息. 我们采用的是 Fast SCAN 实时三维手持激光扫描仪^[1-2],通过该扫描仪可以得到彩塑精确的三维模型,扫描示例如图 3 所示.

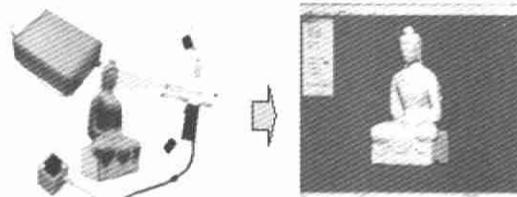


图 3 三维扫描仪获取彩塑模型

Fast SCAN 实时三维手持激光扫描仪最大的不足在于得到的是彩塑单色的三维结构信息,缺乏表面色彩丰富的纹理信息^[2]. 没有纹理信息的彩塑模型是不能满足要求的. 我们提出一种通过普通三维扫描仪扫描获得的物体几何模型和在其周围拍摄的一系列多角度照片来获取物体圆柱贴图纹理的算法,该算法具有直观、对原始照片质量要求小、允许在生成过程中对纹理图进行编辑等优点^[2].

2.3 洞窟建模

285 窟的建筑结构可以根据测绘数据进行三维建模^[1-2]. 已经数字化的壁画和彩塑数据是进行洞窟建模的另一个重要数据来源.

根据测绘图使用 3DMAX 可以建立洞窟的模型. 在建模过程中需要进行一定的扩展来满足多媒体集成虚拟展示的要求,同时洞窟的实时渲染和真实感渲染也要求在洞窟建模中做相应的支持.

3 多媒体集成虚拟展示实现

如何将多媒体集成到 285 窟虚拟环境中是本文描述的重点. 我们采取的方法是在 285 窟三维场景

模型中嵌入多媒体信息^[3-5],通过对已有的 285 窟三维模型进行适当的扩充,用锚点标识多媒体信息结点^[4],解决了多媒体信息在模型中的嵌入问题;通过 OpenGL 中的选取机制^[6],解决了三维场景中多媒体信息热点的选取和激活问题;通过使用文本字幕、声音解说、视频播放三种形式,展示被激活的多媒体信息. 在视频播放中,通过对 AVI 视频文件的解码、视频帧截取、纹理映射等方法,将视频嵌入到三维场景中去,从而突破了传统视频播放的形式,获得更好的多媒体信息展示效果. 本文系统的整体框架如图 4 所示.

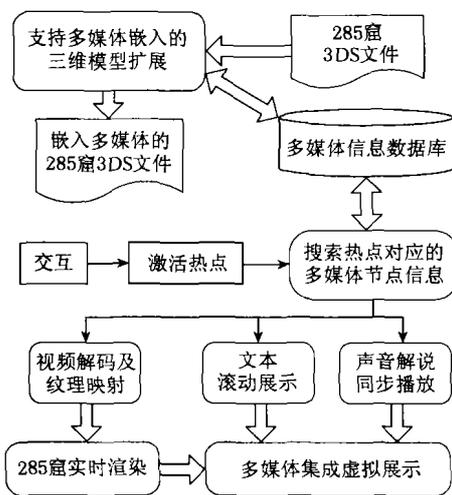


图 4 整体框架图

3.1 支持多媒体嵌入的三维模型扩展

我们建立的 285 窟模型最终是以 3DS 文件输出的,因此如果要对 285 窟模型进行支持多媒体嵌入的扩展,首先要对 3DS 文件做一定的分析. 3DS 文件格式没有被 Autodesk 3DStudio 正式公开,但是利用工具跟踪可以分析出 3DS 文件中的大部分结构. 3DS 文件结构如图 5 所示.

在图 5 中列出了可用的 3DS 模型类型,其中的 MAIN3DS 代表整个 3DS 模型对

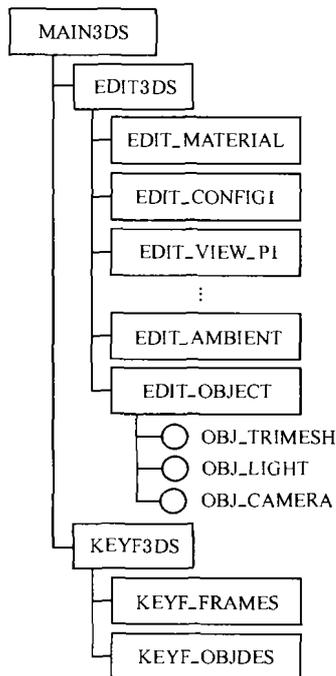


图 5 3DS 文件格式示意图

象,所有模型中的信息都作为 MAIN3DS 的子结点存在. 子结点包括两种主要类型:实体模型结点(图 5 中的 EDIT3DS)和关键帧结点(图 5 中的 KEYF3DS).

本文系统将利用原 3DS 文件格式中实体模型的组织方法来管理模型中的实体、材质、纹理贴图、灯光及视点等信息,忽略原 3DS 模型中的关键帧结点包含的信息. 我们对 285 窟的 3DS 文件进行扩展,在实体模型结点中加入多媒体结点,每个多媒体结点可以包含视频、动画、音频、图片和文本信息等不同类型的结点(具有这个能力的结点叫做“锚点”). 目前,本文系统中每个锚点联合了 3 种不同类型的“信息结点”:文本、音频和视频,每个信息结点包含多媒体数据库中的搜索索引等相关信息.“锚点”的加入如图 6 中 Multimedia 结点所示.

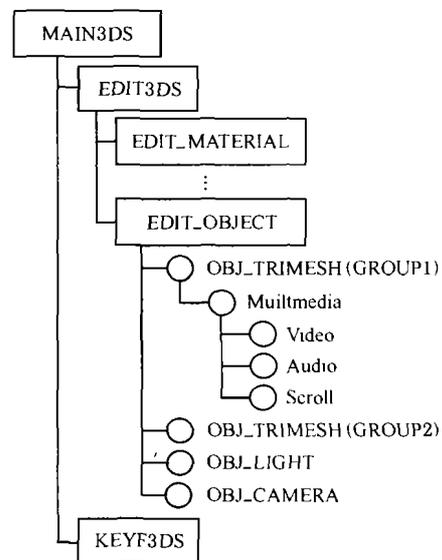


图 6 加入多媒体结点后的数据结构

使用“锚点”的好处有两个^[4]:(1)灵活性. 不论多少种不同类型的多媒体信息结点,只需要添加到锚点里,使之与锚产生联合即可;(2)可扩展性. 通过对锚的数据结构的改进,如添加锚点 id、锚点之间的链接关系等,就可以形成被链接在一起的多媒体结点网络. 这个网络由锚点、链表和信息结点组成,这才是真正意义上的超媒体^[7-9]. 例如,在游览了 285 窟东墙,观看了描述东墙壁画演变历史之后;如果用户游览另一个内容相似的某洞窟墙上的壁画,使两者之间建立链表. 用户可以通过已经链接起来的多媒体结点网络,在相关洞窟壁画之间方便地做搜索、比较、对比研究.

3.2 热点确定和激活

热点位置的确定有很多种方法^[4]:(1)基于三

角面片. 确定当前热点坐标与三角面片的位置关系. (2)基于纹理贴图. 采用先确定当前热点坐标;然后投影至纹理后计算纹理图片内对应坐标;最后根据纹理图片内设定好的区域判断热点内容的方法;(3)基于 Object. Object 是 3D 模型中一个实体对象,一般由一系列的顶点、面片组表示,热点确定和激活过程中需要判断热点坐标与 Object 之间的关系.

第一种方法是最常用的方法. 但是对于本文系统而言,由于使用了 LOD^[10-12] (Level Of Detail, LOD)方法,经过 LOD 处理的模型中三角面片将会根据视点位置动态地减少或者增加,因此不能将多媒体信息绑定在三角面片上面;否则,经过 LOD 处理后的模型中多媒体对应位置关系将发生错误和丢失. 模型简化后,原来的一些三角面片已经不存在,对应的多媒体信息也丢失了^[12-13].

基于纹理贴图的方法虽然可以按自己的意愿将纹理划分为不同的热点区域,但实际操作起来却有障碍. 因为一个纹理信息只包含其本身的属性,并没有纹理在三维场景中的位置信息,纹理信息是通过物体信息、面片信息与三维场景联系在一起的. 要判断鼠标或视点是否在热点区域,事实上还是要判断鼠标与纹理对应的物体的关系. 我们对纹理进行分组,不同的组根据与视点的位置关系分别采用 MipMap 技术,以实现速度上和精度上的提高. 纹理进行分组后,有很多的重合部分,如图 7 所示.

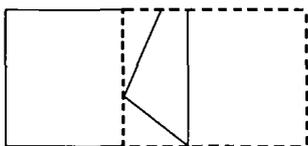


图 7 面片组与对应纹理贴图示意图

相邻的 2 个面片组的贴图有一部分是重叠的(细实线和粗虚线的方框分别代表 2 张贴图). 贴图的热点区域对应到目标物体上,可能只有一部分. 要想在贴图上划分热点区域,其实还是要对应地在物体上划分出热点区域,也就是要在 2 个不规则的面片组上划分出热点区域,然后再把鼠标位置和这一系列的热点区域进行匹配操作. 这在实现上是相当复杂的.

本文采取的是第三种方法——基于 Object 的方法. 所谓热点区域,应该是一个相对完整、有意义的整体,而 Object 本来就是一个有实际意义的元素级别,满足热点区域的基本要求. 对于 LOD 模型而言,为了提高场景的最高精度,即 LOD 级别最高时

模型贴图的精度,在用 3DMAX 建模时,就要有意识地把模型分割成一个个小的物体. 只要在分割时按实际要求把要设置的热点区域划分成单独的一个物体 Object,就可以把热点区域和 Object 对应起来. 采用基于 Object 的方法,可以避免第一种方法中模型简化带来的问题,因为模型简化采取去掉物体内部点的方法,无论三角面片怎么简化,都是在一个 Object 的范围之内,不影响 Object 与热点区域的对应关系. 这也避免了第二种方法实际操作困难的缺点. 在对应 Object 中加入多媒体结点信息后,3DS 文件的结构改变也是最小的.

3.3 多媒体信息展示

在解决了多媒体嵌入三维模型的技术以及热点激活的技术后,下面的工作就是如何将多媒体播放和虚拟场景渲染融合为一体. 音频的播放是比较容易实现的,在热点被激活后,搜索热点的多媒体结点,然后查找多媒体数据库,将相应的音频媒体信息抽取出来,利用 Windows 提供的 PlaySound 中 API 函数实现播放音频信息. 文本信息的展现也相当容易,当搜索到热点的多媒体结点后,若其是文本媒体,则从多媒体数据库中将相应的文本媒体信息抽取出来,然后以滚动字幕的形式在虚拟场景中展现出来. 对于视频媒体信息来说,由于我们要在虚拟场景中嵌入绘制^[14],比如在墙上某热点区域激活后^[4],相应的视频动画就在该墙上播放,所以相对复杂一些. 下面详细叙述视频动画媒体嵌入虚拟场景播放的实现方法.

当前的视频文件格式有很多,不同的文件格式就要对应不同的解码方案. 本文将解码部分独立出来,给一个共同的接口,以对应系统功能扩展后多媒体数据库中媒体数据格式的多样化要求. 下面以系统中实现的 AVI 文件为例进行说明.

我们从 AVI 文件中读出 AVI 视频流,计算出视频流的帧数及每帧的长度和宽度,同时开辟一块 24 位的帧缓冲区;然后把每帧视频数据转化成 bitmap 格式.

由于我们将视频动画播放嵌入到了三维环境中^[14],因此,AVI 格式的视频文件播放可以理解为一个以时间为轴的空间某三维纹理切片实时映射的过程. 每个时刻对应一个纹理切片,将这些纹理切片截取出来,再按顺序实时映射到物体表面,就可以实现视频在模型某纹理所在的空间位置的嵌入播放. 视频帧以纹理贴图的形式映射到物体上^[4,14],可以在任意形状的物体表面播放视频,只要有物体顶

点序列的坐标和相应的纹理坐标即可。

视频播放的基本过程就是视频解码、纹理截取、纹理映射的实现。纹理的更新使用了一定的 OpenGL 编程技巧, `glTexSubImage2D` 可以避免每次重新创建纹理。这样做的优点在于:(1)重新创建纹理比更新纹理需要更大的计算量,这在某些实时的应用中(如实时获取的视频图像作为纹理贴图)格外有效。在实现 AVI 文件播放时,只需要在初始时创建一张纹理贴图,然后通过使用 `glTexSubImage2D`,反复地用新的视频图像更新纹理贴图即可。(2)`glTexSubImage2D` 不仅使 OpenGL 程序变快,而且不要求目标区域的大小是 2 的幂次,这对于视频播放非常有用,因为一帧的大小通常不是 2 的幂次。有了这个条件,我们就可以按物体表面本身的大小播放视频流,而不需要剪切或扭曲视频帧了。视频动画媒体嵌入虚拟场景播放的具体实现流程如图 8 所示。

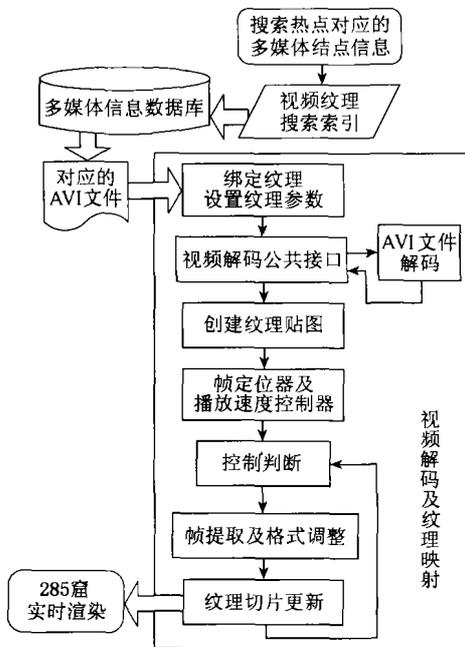


图 8 视频嵌入播放流程

4 285 窟模型绘制技术

在本文系统的应用中,我们既要考虑交互的流畅性,又要考虑精度上满足研究的需要,因此,对我们在 285 窟模型的绘制中的实时绘制技术和真实感绘制技术提出了一定的要求。下面介绍本文系统中所采用的主要绘制技术的应用。

4.1 LOD 方法应用

基于三维建模的优点是具有完整的模型结构信

息,但是随之而来的是模型的复杂度和场景的复杂度相关。高精度的模型在渲染过程中需要大量的运算,这对展示的实时性提出了很大的挑战。通过简单地降低模型的精度可以提高展示的实时性,但是这会大大降低展示的效果。目前有许多技术在既保持展示效果,又提高展示的实时性方面做了许多努力,其中 LOD 方法就是其中一个被广泛采用的方法^[11,15]。

LOD 方法的提出一定程度上实现了即保持展示效果,又提高实时性^[11,15]。LOD 方法提出的思想其实非常简单,即根据视觉原理,近处的物体比较大,看得比较清楚;远处的物体比较小,看得比较模糊^[14]。根据这个原理,在建模过程中为物体建立多分辨率的模型,在漫游过程中动态地调整模型精度:根据物体离视点的距离,近的采用高分辨率的、清晰的模型;远的采用低分辨率的,比较模糊的模型。

4.2 MipMap 技术应用

LOD 方法的思想同样可以应用在纹理贴图上。场景模型在进行渲染时,每个分组与视点间的距离各不相同,有的分组距离视点位置较近,有的分组距离视点则较远。因为模型在视点中的透视投影关系,距离视点越远的分组在渲染结果中的体积越小,因此这样的组对应的纹理图片必须缩小后与模型融合在一起。如果对全部的分组都采用最高精度的贴图纹理,不仅会大量浪费计算机的计算时间,而且在纹理渲染的过程中会产生抖动的问题。

在 OpenGL 中提供了 Mipmap 技术解决上述问题,在渲染过程中可以指定表面纹理的 LOD 级别,从而得到较好的视觉效果,并能够有效地减少计算时间。在本文系统中上述技术的效果是明显的。因为石窟中精美的壁画是通过表面纹理来体现的,石窟模型中表面贴图纹理都采用了较高的原始分辨率,从而合理地降低距离视点远处的壁画精度将大大减少因为贴图纹理渲染而花费的计算时间。

4.3 BumpMap 技术应用

BumpMap 与纹理贴图很相似。不同之处是,对于待处理的多边形来说,纹理贴图赋予模型材质感,而 BumpMap 则让它更有物理上,或者确切说是光学上的真实感。它们都让物体看来更加生动逼真。BumpMap 是光线追踪渲染技术的一个扩展,通过 BumpMap,我们可以实现原来需要大量多边形才能达到的效果。在光线追踪渲染中,贴图面在多边形上用均值法平铺,而追踪法线则用来计算某像素的亮度。因此,当在模型上增加了 BumpMap 时,只需很简单地按 BumpMap 的信息,稍稍改变一下追踪法线的

角度,就可以改变原来像素的亮度,如图 9 所示。

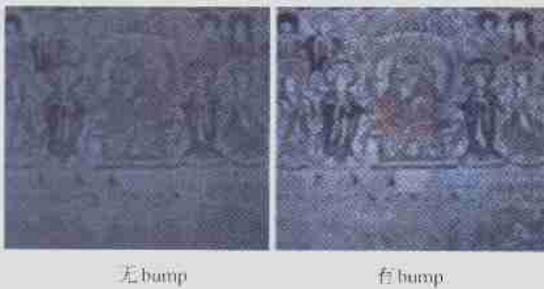


图 9 BumpMap 效果对比

图 9 所示为我们在本文系统中使用 BumpMap 的效果示意图,墙面的凹凸不平的真实感不是通过建立墙面凹凸不平的三维模型生成的,而是通过使用 BumpMap 的技术生成的。

5 实验结果分析

下面借助几张系统抓屏图来看一下实验效果,图 10 所示为文本媒体滚动字幕在 285 窟虚拟场景中的播放效果,图 11 所示为视频媒体在 285 窟虚拟场景中嵌入播放的效果。



图 10 字幕滚动效果

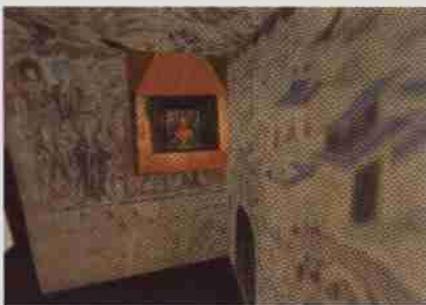


图 11 视频嵌入播放

6 总结与展望

本文利用测绘数据建模,高质量壁画获取设备、

三维扫描仪等,成功地对敦煌 285 窟进行了三维建模,通过对 285 窟三维模型的扩展,加入了多媒体信息结点,以较少地改动 3DS 文件的代价将多媒体信息较好地嵌入到三维模型中,使用模型纹理切片实时更新达到了视频播放和虚拟场景较好的融合,本文所使用的 LOD 方法和 MipMap 技术在不降低渲染质量的基础上有效地提高了系统运行的速度,使用的 Bump 技术提供了较好的真实感效果,将多媒体集成到虚拟场景中并且做到较好地嵌入展示是本文的一大特点。

今后的工作主要包括三个方面:(1)进一步增强多媒体和虚拟场景的融合程度,以达到更好、更和谐的视觉效果,(2)基于 Object 的热点定义过程比较烦琐,还有待改进,(3)加强多媒体信息结点之间的关系,如何建立多媒体信息结点网络还有待研究。

参 考 文 献

- [1] Shi Yihui, Lu Dongming, Pan Yunhe. Technical research on virtual color shading of Dunhuang fresco [J]. Application Research of Computers, 2002, 19(6): 68-71 (in Chinese) (石宜辉, 鲁东明, 潘云鹤, 敦煌石窟彩塑漫游技术[J]. 计算机应用研究, 2002, 19(6): 68-71)
- [2] Chen Ren, Lu Dongming, Pan Yunhe. Generating textures of irregular objects from models and photo-sequences [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8A(8): 902-906 (in Chinese) (陈 任, 鲁东明, 潘云鹤, 基于几何模型与照片序列的不规则物体纹理获取[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8A(8): 902-906)
- [3] Mackinlay J D, Robertson G G, Cord S K, et al. The perspective wall: Detail and context smoothly Integrated [C]. ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'91), New Orleans, Louisiana, 1991, 473-479
- [4] Diao Changyu. A group based LOD model and its technologies [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2003 (in Chinese) (刁常宇, 分组 LOD 模型及相关技术[D]. 杭州: 浙江大学, 2003)
- [5] Phillips R L. MediaView: A general multimedia digital publication system [J]. Communications of the ACM, 1991, 34(7): 74-83
- [6] Xie Zhipeng, Chen Duansheng. Developing 3D interactive virtual scene by OpenGL [J]. Computer Applications, 2002, 20(8): 38-40 (in Chinese) (谢志鹏, 陈殿生, 用 OpenGL 开发三维交互式虚拟场景[J]. 计算机应用, 2002, 20(8): 38-40)
- [7] Robertson G G, Mackinlay J D, Cord S K, et al. Cone trees: Animated 3D visualizations of hierarchical information. A., In: Proceedings of the ACM Conference on Human Factors in Computing Systems (CHI'91), New Orleans, Louisiana, 1991, 189-194

- [8] Halasz F G. Reflections on NoteCards: Seven issues for the next generation of hypermedia systems [J]. *Communications of the ACM*, 1988, 31(7): 836~852
- [9] De Mey, Vicky, Gibbs, *et al.* A Multimedia component kit, experiences with visual composition of applications [A]. In: *Proceedings of the ACM Multimedia 93 Conference Proceedings*, Anaheim, CA, 1993. 291~300
- [10] Cignoni P, Moman C, Rocchini C, *et al.* A general method for preserving attribute values on simplified meshes [A]. In: *Proceedings of the Visualization'98 Conference of IEEE*, Research Triangle Park, North Carolina, 1998. 59~66
- [11] Seo H, Thalmann AF. LOD management on animating face models [A]. In: Thalmann D, ed. *Proceedings of the IEEE Virtual Reality [C]*. New Brunswick: IEEE Computer Society, 2000. 161~168
- [12] Cignoni P, Poppo E, Scopogno R. Representation and visualization of terrain surfaces at variable resolution [J]. *The Visual Computer*, 1997, 12(7): 199~217
- [13] Pan Zhigeng, Ma Xiaohu, Shi Jiaoying. Overview of multiple level of detail creation [J]. *Journal of Image and Graphics*, 1998, 3A(5): 754~759 (in Chinese)
(潘志庚, 马小虎, 石教英. 多细节层次模型自动生成技术综述[J]. *中国图象图形学报*. 1998, 3A(5): 754~759)
- [14] Roccrini C, Cignoni P, Montan C. Multiple texture stitching and blending on 3D object [A]. In: *Proceedings of the Rendering Technique, Granada, Spain, 1999*. 119~130
- [15] Shi Jiaoying, Pan Zhigeng, Cheng Chiyi. A new representation method for multi-resolution models [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2001, 13(7): 1~7 (in Chinese)
(石教英, 潘志庚, 成迟意. 一种新的多分辨率模型表示方法[J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2001, 13(7): 1~7)