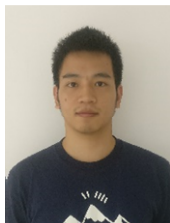


虚实融合的实景视频 WebGIS 系统

余亦豪, 谭冲, 周忠, 吴威

(虚拟现实技术与系统国家重点实验室, 北京航空航天大学, 北京 100191)



摘要: 当前智慧城市已经成为信息时代城市治理和社会发展的重要趋势, 虚实融合技术作为呈现智慧城市信息的一种有效的方式, 一直受到研究者的关注。然而目前大部分的虚实融合技术有着硬件要求高、跨平台性差等缺点, 很难推广到普通用户群中。针对该问题, 本文提出并设计了一种虚实融合的实景视频 WebGIS 系统, 将多个监控摄像头的实时视频流与三维地理场景融合显示, 得到了虚实融合、动静互补的显示效果。我们的融合方法基于 WebGL 实现, 并最终集成到了一个 3D WebGIS 系统中, 具有资源需求低、跨平台性好等优点。该系统实现了在三维数字地球上一个校园级场景的演示, 提高了用户的实际体验。最后的实验结果也表明本系统使用方便、高效, 便于在互联网上广泛地推广应用。

关键词: 虚实融合; 实时视频流; WebGL; WebGIS

文章编号: 1004-731X (2002) xx-xxxx-x

中图分类号: TP391.41

文献标识码:

Augmenting WebGIS with Real-Time Video

Yu Yihao, Tan Chong, Zhou Zhong*, Wu Wei

(State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: At present, smart cities have already become an important trend of urban governance and social development in the information era. As an effective display method to the smart cities, augmented virtual environment technology has long been a common concern of researchers. However most of current augmented virtual environment technology has the disadvantages of high hardware requirements, poor cross-platform capability, so it is difficult to promote to the common users. To solve this problem, in this paper, we present an augmented virtual environment system that combines the real-time monitor video stream with the 3D geographic scene. Our fusion method is based on WebGL, and finally integrated into a 3D WebGIS system, with lower hardware resource requirements and better cross platform performance. The system is demonstrated in a campus-wide area, which is constructed in a 3D digital earth, and it enhances users' experiences in the experiment environment. The final experimental results also show that the system is easy operation but performant. Therefore, it is convenient to generalize among ordinary users in the Internet.

Keywords: virtual-reality integration; real-time video streaming; WebGL; WebGIS

0 引言¹

当前智慧城市已经成为信息时代城市治理和社会发展的重要方向。智慧城市带来了海量的城市信息, 可视化技术是一种帮助人们理解和管理这些信息的有效方法。例如, 地理信息系统 (Geographic Information System, GIS) 让用户可以在桌面端或移动端对世界各地的城市进行浏览, 查看其中的 3D 建筑模型及街景, 还能实时获取场景的交通、餐饮和旅游等信息。这种可视化技术虽然能够提供丰富的信息, 但这些信息是静态的, 无法反映场景的动态变化。

与此同时, 世界各地分布着海量的监控摄像头, 这些网络摄像头具有极高的刷新率, 且能提供场景的实时视图^[1]。

这些网络摄像头的监控画面是互相割裂的, 相互之间的空间位置联系难以直接得到, 而 GIS 附带的地理位置信息正是解释这些视频图像的有力工具。将监控视频画面和虚拟地理环境融合显示, 就可以更直观地了解相机的位置和方向, 还能确定摄像头视图中每个点的实际地理位置以及不同相机画面间的联系。将网络摄像头的视频图像与虚拟地理环境融合可以给人们带来更为丰富和全面的可视化信息, 这些可视化信息使得更加深入地分析、理解场景成为可能。

这种将真实场景融入到虚拟场景中的技术称为增强虚拟环境, 也称为虚实融合技术, 其目标是通过技术手段减少虚拟环境与真实视频图像间的视觉差异, 从而达到两者的无缝融合, 最终实现虚实融合、动静互补的显示效果并为用户

收稿日期: 2017-07-31

修回日期: 2017-10-10

基金项目: 国家 863 计划(2015AA016403); 国家自然科学基金(61572061, 61472020).

作者简介: 余亦豪(1994-), 男, 硕士研究生, CCF 学生会会员, 主要研究方

向为虚实融合; 谭冲(1994-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为虚实融合; 周忠(1978-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 论文通讯作者, 主要研究方向为网络化; 吴威(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, CCF 高级会员, 主要研究方向为分布式虚拟环境。

带来更好的沉浸式体验,它被广泛地应用在三维地图、场景监控和景区展示等方面。

现有相关技术大多基于桌面客户端程序实现,未能实现轻量级的虚实融合系统,且存在系统要求过高,视频渲染耗费资源过多和维护困难等问题。这些不足限制了虚实融合系统在浏览器乃至移动端的广泛应用。

在本文中,我们提出了一种基于 WebGL 的虚实融合方法,通过纹理投影^[2]和单幅照片建模^[3]等技术实现了多个监控相机视频图像与虚拟场景的有机结合,增进了用户对场景认识与理解。进一步地,我们提出了一种实时视频流与场景融合的处理方法,可将多个网络摄像头提供的实景视频在虚拟场景中融合显示,实现了虚实融合场景对真实环境的实时再现。该方法使用了流媒体服务器处理网络监控相机与浏览器间的通信,可对网络相机的视频流数据进行缓存、预处理和批处理,这样减少了计算和通信的开支,使得系统可以在移动端流畅运行。为更好地实现视频模型在虚拟场景中的渲染绘制,本文中还提供了一种新的视频模型文件格式 IBMT,提升了视频模型存储和渲染绘制的效率。

在此基础上,我们实现了一个校园级场景虚实融合的 WebGIS 系统进行验证,该系统将实景视频融入到三维网络地理信息系统(3D WebGIS)中,用户使用浏览器即可访问、游览,便于系统的传播与体验。

1 相关工作

虚实融合技术主要研究视频与虚拟场景的关系。早在 1996 年, Moezzi^[4]等就提出视频与三维场景融合的想法。Neumann^[5]等人则首次提出了增强虚拟环境(Augmented Virtual Environment, AVE)这一概念,并在此基础上实现了校园级的虚实融合系统。之后 Shichao Qu^[6]等研究人员实现了虚实融合系统在视频监控方面的应用。Decamp^[7]等则在 AVE 系统基础上通过对空间划分区域解决了多相机部分纹理重叠的问题。

GIS 近来在 Web 端取得了飞速的发展,国内外一批比较成熟的系统如超图、Google earth^[9]和 ArcGIS 等 GIS 系统由于其良好的跨平台性,可扩展性等特点得到了广泛的应用。WebGIS 的快速发展也让研究人员开始考虑虚实融合技术在其上的应用。例如,台湾国立大学的 Chen^[8]提出将虚实融合技术与地理信息系统(GIS)相结合,并实现了多分辨率和兴趣区域等功能。Kim 等人^[10]引入了不同的方法来分析四种不同场景下城市的监控视频从而得到场景的实时和动态信息,并由此创建了增强型空中地球地图(AAEM)。Austin^{[11][12]}通过用户人工标定对应点实现了数百台网络摄像机在 3D Map 上的注册。[13][14][15]则着重讨论了智慧城市与大数据包括视频监控数据在 WebVRGIS 上的应用。

网络视频直播的主要目的是实现视频流数据的实时传输与播放。最近移动端浏览器的迅速普及与发展对 HTML5 下的视频实时传输协议和编码有了新的要求。对此,华中科技大学的李长洲^[17]等对如何在互联网上使用流化技术构造实时视频传输系统展开了研究。大连理工大学的董杰^[18]则实现了 Android 系统上 H.264 编码视频的实时播放。Alam^[19]等人设计实现了一个 Android 应用程序 LiTMaS,该应用在智能手机和街道摄像机之间采用基于云的代理服务,从而为驾驶员提供路口交通摄像头的实时监控数据。

综上所述,不难发现目前视频流与 GIS 的融合方法较为简单,大多数研究者只是使用监控视频为 GIS 创建虚拟模型提供了数据源,或者简单地将视频稍作变形然后直接与 GIS 结合,渲染效果不理想,实时性差,不能给用户更好的体验。近年来,由于 WebGL 与 HTML5 的快速发展,将实景视频流与 WebGIS 更好地融合在一起也成为了可能。

2 基于 WebGL 的虚实融合方法

对相关工作的分析可以看出,现有的多视频流虚实融合方法普遍存在着画面畸变、融合效果差以及虚实对准代价过高等问题。Web 端可用的资源更为有限,实现不错的融合效果更为困难。例如,[11][12]中相机画面依赖于用户手工标定,且约束点过少导致渲染效果不够理想。[14]里的视频与虚拟场景的融合同样需要用户手动修正,且只适用于一些特定视角的监控。为了在 Web 端虚拟场景环境中实现视频流的融入,本文采用单幅照片建模技术^[3]将网络摄像机及其监控画面所描述的空间还原成一个视频模型,并使用投影映射^[2]的方法将监控视频画面作为视频模型的动态纹理进行实时渲染。

为了更好地实现视频模型的存储、传输和渲染,本文使用一种自定义的文件格式 IBMT 来描述单幅照片建模得到的视频模型。该文件主要内容包括:(1)模型文件,用于描述相机画面建模得到的视频模型,视频图像最后投影映射到该模型上显示,得到融合显示的效果。(2)XML 格式的相机标定文件,包含相机的焦距和位姿等信息,用于计算模型变换矩阵及最佳视点。(3)纹理图片信息,包含视频模型的默认纹理图片、裁剪纹理和校正纹理图片。

视频模型的显示效果如图 1 所示。其中(a)为不带纹理的视频模型;(b)为带纹理的视频模型;(c)为最佳视点下的视频模型,此时可得到接近真实所见最佳显示效果。

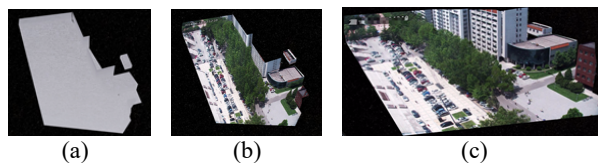


图 1 IBMT 视频模型示意图

为了实现视频模型在 Web 端的高效渲染与绘制, 需要对模型做进一步的处理。首先读取 IBMT 格式文件得到视频模型的顶点信息以及模型与视频间的纹理投影关系, 再将得到的信息转换为 WebGL 可直接读取的 JSON 格式对象, 最后读取纹理视频的信息并加载即可在三维虚拟场景中融合绘制带有动态视频纹理的视频模型。

具体融合绘制步骤如图 2 所示: 首先读取相机在真实环境中的位姿信息, 将其转换为三维空间中的位姿信息; 再用得到的相机位姿信息计算出相机的模型-视图矩阵 M_{mv} 和投影矩阵 M_p , 由此可计算得到模型表面顶点 p 对应的片元纹理坐标 t :

$$t = M_p \cdot M_{mv} \cdot p \quad (1)$$

之后对模型做遮挡检测, 然后裁剪当前被遮挡不可见的模型区域, 以此来减少计算量加速融合的过程。最后调用 WebGL 接口进行渲染加速, 在显卡中自动进行片元纹理化和色彩化操作, 片元经过光栅化后最终转换为屏幕上所见到的像素。其中, 视频模型的纹理是由 HTML5 的 <video> 标签从流媒体服务器读取的本地视频或实景视频流数据。

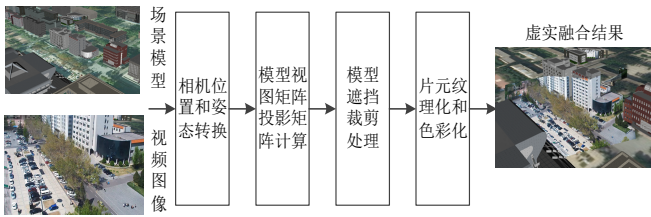


图 2 视频模型融合绘制方法示意图

由于使用了 WebGL 和 HTML5 来实现融合显示, 所以本系统不仅能支持桌面端各类浏览器的访问, 还实现了在移动端的高效传输及渲染显示。

3 虚实融合系统的设计与实现

在上述基于 WebGL 的虚实融合方法的基础上我们实现了一个验证系统, 该系统是开放式可扩展的, 其整体系统架构如图 3 所示。

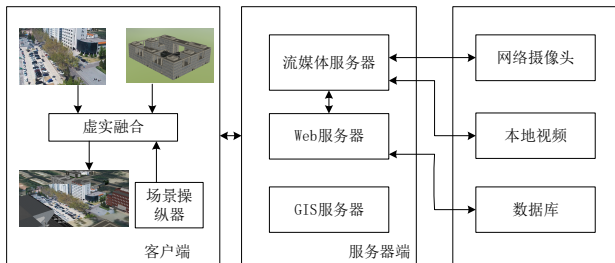


图 3 系统架构图

该系统主要由三个部分组成: (1)客户端, 这是用户使用本系统的入口, 它可以是桌面端或移动端的浏览器, 也可以是基于 HTML5 实现的应用程序等。客户端的主要作用是接收服务器传来的数据和服务, 浏览器根据网页代码对视频流

进行解码并绘制整个场景; (2)服务器端, 几类服务器为客户提供所需的代码与数据, 主要包括 Web 服务器、GIS 服务器和流媒体服务器三类。(3)底层数据源, 主要由网络摄像机、数据库和一些必要的配置文件组成。

3.1 重要组件

GIS 服务器: 在本系统中, 我们使用地理坐标系即经纬度坐标来描述相机和模型的精确位置, 所以使用 GIS 服务器可以帮助更有效地管理这种大型场景。这种基于真实世界坐标的地理系统可以让场景和真实世界更好地对应起来。本系统的 GIS 服务器上运行了一个三维 WebGIS 系统, 该系统主要维护了一个三维数字地球, 该三维数字地球带有地形信息和卫星底图, 视频和三维模型通过地理坐标系定位在数字地球上, 实现了精确的相对位置。

Web 服务器: Web 服务器管理着整个系统, 确保每一模块按预定功能协同工作。系统管理人员可通过登陆 Web 服务器管理、维护系统。此外, Web 服务器通过 HTTP 协议向用户提供数据和服务, 当用户发出请求访问系统的时候, Web 服务器将 HTML 文件和相关模型数据等打包传给客户端的浏览器。

3.2 流媒体转发服务

虚实融合系统视频模型纹理所需的视频流数据由流媒体服务器提供, 视频流可以是网络摄像头实时获取的监控视频图像, 也可以是流媒体服务器缓存的本地视频。其中实时视频流用于虚实融合系统视频模型实时显示, 本地视频流数据则用于回应用户的重播、回放等请求。

流媒体转发服务器的架构如图 4 所示, 流媒体服务器维护一个消息队列来接收浏览器的数据请求, 并向浏览器发送所需视频流数据。如果用户浏览器请求实时视频流, 则流媒体服务器通过实时消息传输协议 (Real Time Messaging Protocol, RTMP) 从网络摄像头处获取视频图像。RTMP 协议的兼容性较差, 但实时性较好, 可以减少传输过程中的延迟。流媒体服务器通过专门的模块来从网络摄像头拉取视频流数据, 经过统一的编码处理后发送给发出请求的浏览器。以这种方式, 流媒体服务器可以使得虚实融合系统能更好地支持不同类型、不同编码的相机数据而不涉及具体的相机型号和驱动, 这样使得向系统添加新的相机及数据更为方便, 保证了系统的可扩展性。如果用户请求的是本地缓存的视频, 流媒体服务器则直接找到对应的缓存文件并发送给用户浏览器。

视频流到浏览器端的传输使用的是 HLS (HTTP Live Streaming) 协议。HLS 协议本质上是一个个 HTTP 请求和响应, 支持多码率自适应, 不受防火墙的影响, 而且同时支持桌面端和移动端浏览器, 跨平台使用方便, 缺点是延迟较大。

传输原理如图 4 所示, 流媒体服务器将视频文件按照

HLS 协议分片处理, 再通过 HTTP 发送给浏览器 video 标签。浏览器端的 video 标签首先请求得到的是实时流的配置文件, 通过读取该文件中的信息得到具体视频分片的配置信息和相关路径, 从而找到对应的视频分片。其配置文件和视频分片随着时间不断更新, 这样就在浏览器上不依赖插件实现了实景视频流的获取。

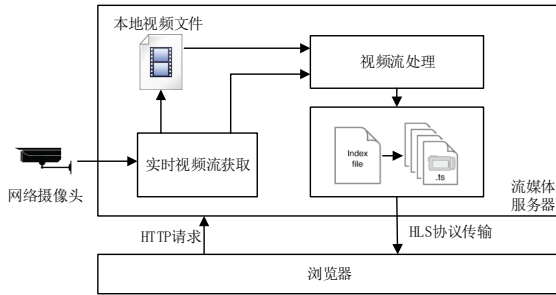


图4 流媒体转发流程

4 实验结果分析

我们进行了一系列实验, 来评估我们提出的融合方法以及系统的性能与可用性。实验使用海康威视网络摄像头作为实时视频流采集设备, 装有 win10 64 位操作系统、主频 3.5GHz、内存 8GB, 配有 Intel Xeon E5-1620 CPU、NVIDIA GeForce GTX 970 显卡的台式机同时作为服务器端和客户端进行实验。实验包括三部分, 分别是系统性能分析、系统可视化效果分析以及系统可用性评估。

4.1 虚实融合系统性能分析

4.1.1 资源占用分析

运行时内存与显存、CPU 与 GPU 的占用反映了客户端对硬件资源的需求。本文客户端的资源占用主要与场景中普通模型的个数, 视频模型和视频流的路数以及视频流分辨率的大小有关, 实验主要研究视频路数以及分辨率大小与资源占用的关系。实验中系统的帧速保持在每秒 30 帧以上, 即不低于视频采集的最高速度 30 帧/秒。

由图 5 可知, 客户端运行时对内存的占用比对显存的占用略高; 对内存和对显存的占用, 都随着视频流路数的增加而显著提高; 除此之外, 资源占用随视频流的分辨率增加而略有增加。

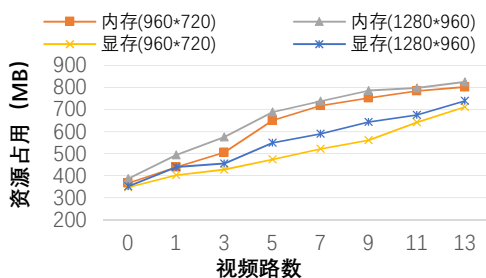


图5 内存、显存占用与视频流路数间的关系

由图 6 可得, 客户端运行时对 CPU 的占用比 GPU 的占用低, 并且 GPU 与 CPU 的消耗都随着视频流路数的增加而提高, GPU 对视频流分辨率的变化较为敏感, 而 CPU 的占用百分比对它的变化波动不大; 从结果来看, 本文系统在多路流的情况下对 CPU 的资源占用率低, 对 GPU 的占用百分比也在可接受的范围内。

虚实融合系统按需求需要支持同时播放至少十路实时视频流, 实验表明此时的资源占用对用户而言是可以接受的。

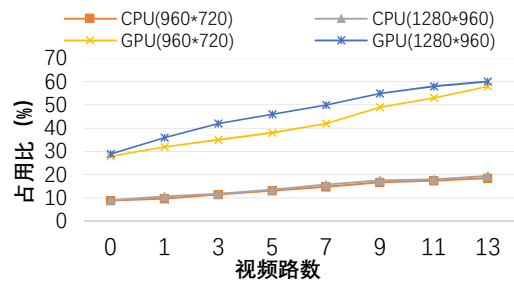


图6 CPU、GPU 占用与视频流路数间的关系

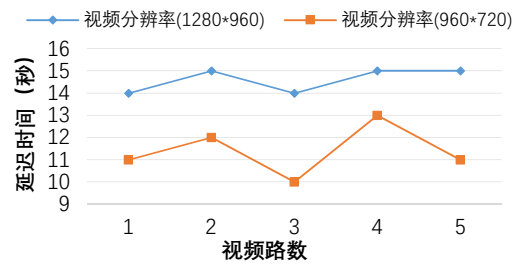


图7 系统延时与视频流路数和视频分辨率间的关系

4.1.2 直播系统的延时

本文所述的实时系统的一个重要衡量指标就是视频流的传输延迟情况, 视频流的传输延迟越小对用户体验越好, 但开发成本随之提高, 所以流媒体服务器的搭建应当综合考虑用户的需求以及开发的成本。本节实验是在 m3u8 配置文件索引 3 个长度为 1 秒的 TS 文件的前提下进行的。本直播系统延时指标的具体实验数据如图 7 所示。

从图 7 可以看出, 系统的延时随着传输视频流分辨率的提高而增大, 而在分辨率一定的情况下, 系统的延时随着视频流路数的增加呈现出微小的波动, 这说明视频路数在合理的范围内时, 对直播系统的延时影响不大。从图上的数据还可以看出本文搭建的直播系统的延时对用户来说是可以接受的。

4.2 虚实融合可视化效果分析

系统的 3D 渲染层基于 WebGL 引擎实现, 网站层使用 HTML、JavaScript 和 PHP 开发。在实现虚实融合的基础上, 我们还为系统客户端添加了场景漫游、场景信息显示、视频纹理控制和 VR 模式等功能。最终实现效果如图 8 所示。其中(a)~(c)为系统总览图, 包括初始三维地球和校园演示场景的总览图。第二部分(d)~(l)为相机漫游节点的部分截图, 用

用户可以按既定路线漫游整个场景,也可以自由选择某个特定场景节点游览。最后一部分(m)~(p)为系统功能示意图,视频模型播放控制功能允许用户可以选取任意的视频模型对其画面进行回放和播放速率控制。场景信息显示功能让用户可以查询每个建筑物或视频模型的介绍以及当前位置经纬度坐标和高度等信息。VR功能让用户在使用VR设备浏览本系统时可以获得VR显示效果。

综合来看,本系统实现了多个视频模型在虚拟环境中的实时渲染与显示,系统的功能也能够满足用户大部分的需求,但是在视频模型的可视化方面仍然存在着一些问题。例如,由于分辨率和明暗度的不同,视频模型与周边建筑和环境间存在着较为明显的分界线,而且由于监控画面视角的限制导致了视频模型部分区域存在撕裂的情况。

4.3 系统可用性评估

为了评估虚实融合系统的可用性,我们进行了用户研究。在我们的可用性评估中,体验者对系统的效果和可用性较为满意,但表示系统功能比较简单,这表明该系统在保证跨平台性的基础上实现了必要的功能,可以作为当前2D卫星地图或桌面GIS系统的良好替代品,但仍有进步空间。从结果看来,本系统能满足用户对智慧城市信息展示的基本需求,

在景区游览、视频监控等领域有着良好的应用前景。

5 结论

本文结合WebGL和流媒体直播技术,在浏览器上使用投影纹理的方法实现带有实时视频纹理的视频模型的渲染与绘制。并在此基础上将增强虚拟场景融入三维数字地球,实现了一个校级场景演示的虚实融合的实景视频WebGIS系统,该系统实现了视频回放控制和自动漫游等功能。实验结果表明,我们的系统可以实现多路实时视频流的流畅播放,整个系统所需的资源在一个可接受的范围内。用户在桌面端或移动端可以很方便地通过访问网页来浏览本系统的增强虚拟场景。

尽管如此,本文方法还存在着一些不足之处:1.受Web客户端资源的限制,难以加载超过15路的视频流同时播放,且大范围的建筑模型加载时间较长。2.由于明暗和分辨率的不同,视频与建筑物模型间有较为明显的分界线,影响用户的观感。3.系统延时较大,未能很好地满足实时性的要求。在未来的工作中,我们将尝试通过多细节层次和相机调度等思路来着手解决这些问题。

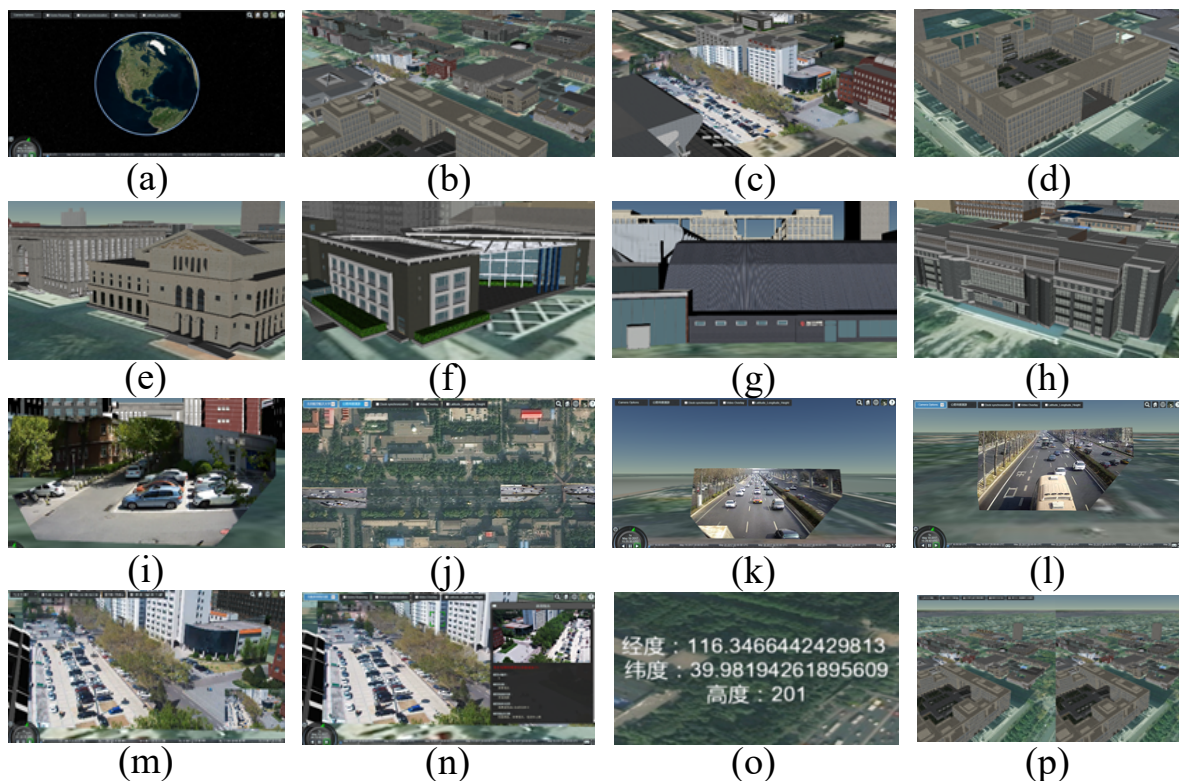


图8 系统显示效果截图:(1)系统总览:(a)系统初始界面,三维数字地球;(b)(c)北航校园场景总览;(2)校园场景自动漫游节点:(d)~(h)校园场景建筑模型,(i)校园场景视频模型,(j)~(l)北三环天桥视频模型;(3)系统功能:(m)视频模型播放控制,(n)模型信息显示,(o)地理位置信息查询,(p)VR模式

参考文献:

- [1] N. Jacobs, W. Burgin, N. Fridrich, A. Abrams, K. Miskell, B. H. Braswell, and R. Pless. The global network of outdoor webcams: Properties and applications. In ACM International Conference on Advances in Geographic Information Systems (SIGSPATIAL GIS), Nov. 2009.
- [2] Segal M, Korobkin C, et al. Fast shadows and lighting effects using texture mapping. ACM SIGGRAPH Comput Graph, 1992, 26: 249–252
- [3] Zhou Z, You J, Yang J, et al. Method for 3D scene structure modeling and camera registration from single image, US20160249041[P]. 2016.
- [4] Moezzi S, Katkere A, Kuramura D Y, et al. Reality modeling and visualization from multiple video sequences[J]. Computer Graphics and Applications, IEEE, 1996, 16(6): 58-63
- [5] Neumann U, et al. Augmented Virtual Environments(AVE): for Visualization of Dynamic Imagery[C]. IEEE Virtual Reality 2003. 2003: 61-67
- [6] Qu Shichao, Karuppiah D R, Fagg A H, et al. An Augmented Virtual Reality Interface for Assistive Monitoring of Smart Spaces[C]. Proceedings of the Second IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications (PerCom'04). IEEE Computer Society, 2004: 33
- [7] Decamp P, Shaw G, Kubat R, et al. An immersive system for browsing and visualizing surveillance video. Proceedings of the International Conference on Multimedia, Firenze, 2010. 371–380
- [8] Chen S C, Lee C Y, Lin C W, et al. 2D and 3D visualization with dual-resolution for surveillance. Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, Providence, 2012.23–30
- [9] Lisle R J. Google Earth: a new geological resource[J]. Geology Today, 2006, 22(1):29–32.
- [10] K. Kim, S. Oh, J. Lee, et al., “Augmenting aerial earth maps with dynamic information,” Proc. the 8th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality, Orlando, pp. 35-38, October 2009.
- [11] A. D. Abrams, R. B. Pless, “Webcams in context: web interfaces to create live 3D environments,” Proc. the International Conference on Multimedia, Firenze, pp. 331-340, October 2010.
- [12] Abrams A, Fridrich N, et al. Participatory integration of live webcams into GIS[C]. Proceedings of the 1st International Conference and Exhibition on Computing for Geospatial Research & Application. ACM, 2010:1-8.
- [13] Wang W, Lv Z, Li X, et al. Virtual Reality Based GIS Analysis Platform[C]. International Conference on Neural Information Processing. Springer International Publishing, 2015:638-645.
- [14] Lv Z, Li X, Zhang B, et al. Managing Big City Information Based on WebVRGIS[J]. IEEE Access, 2016, 4:407-415.
- [15] Lv Z, Yin T, Zhang X, et al. Virtual Reality Smart City Based on WebVRGIS[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2017, 3(6):1015-1024.
- [16] O'Sullivan J D, Stylianou A, Abrams A, et al. Democratizing the visualization of 500 million webcam images[C]. Applied Imagery Pattern Recognition Workshop. IEEE, 2015:1-5.
- [17] 李长洲, 周曼丽. 基于 Web 的流式视频直播技术[J]. 微型机与应用, 2001, 20(6):52-55.
- [18] 董杰, 辛吉涛, 连捷. 基于 Android 系统的 H.264 视频直播技术研究[J]. 电视技术, 2015, 39(4):11-15.
- [19] Alam S M I, Fahmy S, Lu Y H. LiTMaS: Live road traffic maps for smartphones[C]. World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks. IEEE, 2015:1-6.
- [20] 周忠, 周颐, 肖江剑. 虚拟现实增强技术综述[J]. 中国科学:信息科学, 2015, 45(2):157-180.