

Web 端室内三维交互系统的快速构建与优化

马洪石¹, 王行风^{1,2}, 薛磊¹, 刘晨¹

(1. 中国矿业大学环境与测绘学院, 江苏徐州 221116;

2. 中国矿业大学江苏省资源环境信息工程重点实验室, 江苏徐州 221116)

摘要:针对使用 WebGL 原生应用程序编程接口(application programming interface, API)进行三维程序开发时效率较差以及室内虚拟场景构建难度较大的问题,提出一种依靠层次模型构建室内场景并通过三维图形引擎开发 Web 室内三维原型系统的方法。该方法利用 Unity3D 引擎和 C# 语言,以某车站候车大厅前厅为研究实例,实现快速、高效地构建具备交互能力的三维原型系统;并在此基础上进行基于 WebGL 标准的内容发布并根据优化方案对原型系统进行性能优化,使用户能够获得更真实、流畅的观感。实验结果表明:与使用 WebGL 原生 API 开发的三维程序相比,该原型系统开发速度快、运行效率高,能够实现预期的功能需求并具有良好的交互性,结合优化方案可以优化性能,符合 Web 三维技术的发展趋势,具有良好的研究和应用价值。

关键词:三维地理信息系统;WebGL;室内场景;Unity3D 引擎

中图分类号:TP319;P209

文献标志码:A

文章编号:2095-2783(2019)05-0518-06

Rapid implementation and optimization of Web 3D indoor interactive system

MA Hongshi¹, WANG Xingfeng^{1,2}, XUE Lei¹, LIU Chen¹

(1. School of Environment Science and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2. Jiangsu Key Laboratory of Resources and Environmental Information Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: It is inefficient and difficult to develop 3D programs and model complicated indoor virtual scenes using WebGL APIs (application programming interface). To solve these issues, this paper proposes a method of developing a 3D Web prototype system by building hierarchical structure models to model indoor scenes and 3D graphics engine. Taking lobby of a railway station waiting hall as a study example areas, the method uses Unity3D engine and C# language to develop a 3D interactive system quickly and efficiently, and release the WebGL-based content of system. Besides, the performance of prototype system is optimized based on the optimization framework, thereby enabling users to obtain more realistic and smooth feeling. Results show that comparing with 3D programs based on WebGL native APIs, this prototype system has the advantages of development speed and efficiency, and fit the expected functional requirements with a better interactivity. Moreover, combining with the optimization framework, the program can obtain performance optimization, which conforms to the development trend of Web 3D technology with a good research and application value.

Keywords: 3D GIS; WebGL; indoor scene; Unity3D engine

计算机图形学和网络技术的发展使得 Web 三维应用开发成为一个热门研究方向,常见应用包括产品展示、三维游戏、辅助设计等。传统的桌面三维应用软件,多是利用 OpenGL 或 Direct3D 等底层三维函数库,使用运行效率高的 C++ 程序语言编制,大多存在开发难度大、完成实现周期长、兼容性较差等问题,不能满足当前应用需求^[1]。而利用 Web 三维相关理论及研究成果,实现跨平台、全方位三维场景展示以及具备丰富易扩充的交互操作已经成为三维应用开发的一种趋势。当前人们处于室内的时间越来越多以及建筑物内部结构愈加复杂,使得人们对室内地图的研究也越来越多。传统的二维平面室内地图在表现上不够直观、真实,且地图形式较为单一;将三维技术应用于室内环境下可以极大地提升

室内地图的表现力,使空间结构更加直观化^[2]。当前对于室内三维的应用主要包括游戏类应用和展示类应用^[3-6],但其普遍为桌面软件,跨平台能力弱且对交互性的三维应用研究较少。而基于 Web 的三维系统主要为 Web 可视化程序,以三维展示如服装展示^[7]与设计^[8]、文物展示^[9]为主要功能,功能及交互逻辑单一,但面向室内特定场景的应用实例较少。

在此背景下,研究利用 Web 三维技术构建三维室内场景交互系统,实现对室内空间的多感知、高效率表达,具有重要研究意义。针对利用 WebGL 及其相关框架开发三维程序效率较低、周期长、难度高等问题,本文借助 Unity 三维引擎成熟的开发方案及其跨平台的特性,完整、高效地构建了 Web 三维原型

收稿日期:2018-10-09

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFB0502104)

第一作者:马洪石(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为三维地理信息系统

通信作者:王行风,副教授,主要研究方向为移动地理信息系统、室内地理信息系统, xzwind@cumt.edu.cn

系统;在系统运行测试的基础上针对性地提出优化框架并应用优化框架提高了系统性能,为 Web 三维程序构建及室内虚拟场景表达等相关研究提供了新的思路。

1 系统总体设计

本文研究区域主要为室内空间,重点是构建室内场景并发布为 WebGL 内容使得系统能够在浏览器端进行运行显示,用户能够直观地、可交互地、自由无限地观察室内空间。系统的主要功能需求包括:

- 1) 构建真实的虚拟室内场景模拟室内真实环境,并构建其中的重要实体;
- 2) 能够通过鼠标、键盘等输入设备实现场景的人机交互操作以及第三人称漫游功能;
- 3) 在 Web 前端流畅运行原型系统。

实验实现的必要流程主要包括选取 Unity3D 开发环境作为基础开发平台,导入外部模型数据在 Unity 中进行基于层次模型的场景构建、整合,并发布为 WebGL 内容,调试构建优化框架进行优化,具体技术流程如图 1 所示。

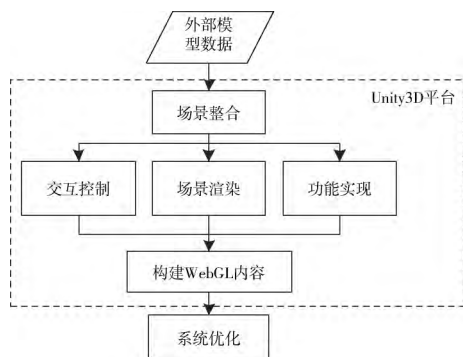


图1 系统实现技术流程

2 相关技术介绍

2.1 WebGL 技术

早期的 Web 三维技术缺乏统一的标准,开发或使用一个非常简单的 Web 三维图形程序需要根据不同浏览器获取不同插件的支持且画面粗糙、性能较差,这些不足大大限制了 Web 三维程序的普及应用。而 HTML5 规范及三维绘图标准 WebGL 的出现,弥补了这些不足,开发者可以通过 JavaScript 脚本语言设计三维图形程序,无需任何浏览器插件支持^[10],而基于 OpenGL ES 2.0 的 WebGL 标准能够利用底层图形硬件进行图形渲染,这将大大提升渲染效果和性能。因此,利用 WebGL 技术构建 Web 三维程序是一个较好的选择。

但在实际开发过程中,被设计工作在底层图形硬件端的 WebGL 相比其他典型 Web 技术更加复杂,且使用 WebGL 原生 API 的开发者必须掌握大

量的计算机图形学知识,在开发过程中则会大大降低开发效率、延长开发周期。图 2 为一个基本的 WebGL 工作流程,开发者需要具备代数知识以计算各种变换矩阵,并在渲染过程中设置顶点着色器、片元着色器及计算纹理贴图位置。

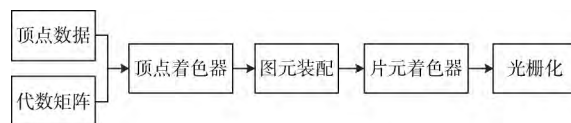


图2 WebGL 绘制一般流程

2.2 Unity3D 引擎介绍

Web 平台的优势吸引着许多顶尖科技公司进行 Web 三维技术的研究,如谷歌公司通过使用 GWT (Google Web Kit) 工具结合开源的 Java 3D 游戏引擎 Jake2 完成了交叉编译 Javascript 脚本的工作,结合 WebGL 技术完成了桌面三维游戏雷神之锤 2 (Quake 2) 的渲染,并在浏览器中运行演示。而 Unity 公司开发的 Unity3D 游戏引擎也完成了向 WebGL 技术和 HTML5 标准的靠拢,并得到了游戏开发者们的广泛应用。Unity3D 是一个跨平台能力出众且拥有强大三维图形渲染能力的专业图形引擎,并附带封装虚拟场景的交互开发环境^[11-12]。通过使用 Unity3D 工具,开发者可以将项目构建为使用 WebGL 进行渲染,能够在浏览器中运行的内容。类似于谷歌公司进行的研究,Unity 公司同样使用对代码进行交叉编译的方案。通过使用 emscripten 开源工具,将 Unity3D 引擎的运行时代码编译成高性能的 Javascript 代码,使得底层 C++ 图形引擎得以直接在浏览器中运行;同时为将 C# 脚本转换为 Javascript,Unity 开发了一种名为 IL2CPP 的技术来将 C# 转换为 C++ 源文件,并使用 emscripten 编译转换为 Javascript^[13-15]。Unity3D 集成开发环境如图 3 所示。

2.3 三维室内场景交互技术

虚拟世界中主要的交互方式包括移动、选择、操纵、缩放,主要的实现方法主要包括直接交互、物理控制和虚拟环境交互控制^[16]。直接交互是将用户在现实中的动作转换在虚拟场景中实现,如常见的体感交互、手势识别等;物理交互是用户使用物理设备实现在场景中的交互,如操纵杆等;虚拟环境控制交互则在虚拟环境中添加控制、方向等虚拟按钮实现用户与虚拟环境的交互。三维世界中,实现诸如平移、缩放或是旋转的操作是通过 1 个 4×4 的矩阵进行运算的^[17]。设场景中实体的变换矩阵为

$$T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & t_{14} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & t_{24} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & t_{34} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & t_{44} \end{bmatrix}。$$

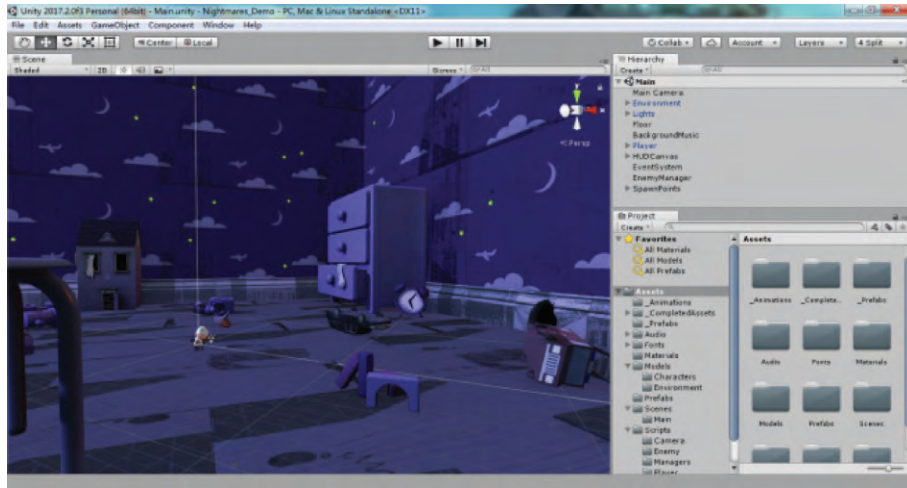


图3 Unity3D 集成开发环境

式中:子矩阵 $T_1 = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix}$ 表示实体的比例或旋转变换;行矩阵 $T_2 = [t_{41} \quad t_{42} \quad t_{43}]$ 表示进行平移变换; $T_3 = \begin{bmatrix} t_{14} \\ t_{24} \\ t_{34} \end{bmatrix}$ 表示进行投影变换; $T_4 = [t_{44}]$ 表示整体比例变换因子。因而,进行平移变换、缩放变换的变换矩阵分别为

$$T_P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ t_x & t_y & t_z & 1 \end{bmatrix}, T_S = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

式中: t_x 、 t_y 、 t_z 分别为在 3 个轴上的平移量; s_x 、 s_y 、 s_z 分别为在 3 个轴上的缩放比例。围绕 x 坐标轴旋转 θ 角度的变换矩阵表示为

$$T_{R_x} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

围绕 y 轴或 z 轴旋转一定角度的变换矩阵与 T_{R_x} 类似。通过利用以上变换矩阵对场景中的主相机进行几何变换,从而实现与室内虚拟场景的交互,完成基本的人-物操作逻辑。

2.4 室内场景漫游技术

场景漫游的关键技术问题是在规定的时间内,绘制并显示出当前视点的图像帧。目前,主流的场景漫游方式主要为自由交互式的漫游方式,本质主要是通过相机的漫游来实现。用户通过操作输入设备,使用设定好的控制命令连续不断改变视点位置、方向以实现场景中随意漫游的过程。这个过程主要包括 2 个阶段,即几何变换阶段和光栅化阶段。几何阶段完成从三维场景世界坐标系到计算机屏幕视点坐标系的转换,并在此过程中考虑视点位置方向

用以将视景外实体进行裁剪;而光栅阶段则进行最终的像素生成及显示^[18]。因此,实现虚拟场景漫游的基本流程为:

Step1,接受用户操作指令,并判断用户操作类型;

Step2,获取当前帧与前一帧下视点位置,计算视点位置变化量与相机角度变化量;

Step3,根据以上变量计算相机旋转矩阵,以计算相机上方、前方视景体等相关参数;

Step4,转换坐标系到屏幕坐标系,并改变相机位置和观察点位置;

Step5,渲染显示当前帧相机视景中的实体。

通过自由交互式漫游可以帮助用户按照自己的意图进行场景浏览,十分方便用户观察;缺点是在三维场景中较易迷失方向,通过使用方向罗盘或二维小地图则可以很好地解决这个问题。

3 系统实现

3.1 室内模型构建与场景生成

室内场景模型是构建系统的基础,对系统的构建乃至运行时的性能至关重要。由于基于图像的三维重构当前并没有成熟稳定且高效的解决方案,考虑利用建模软件进行场景的三维几何模型构建以及添加材质、贴图增强表现效果。构建完成三维模型后,将其导入 Unity 开发环境中进行场景整合。考虑室内三维场景的复杂性,外部模型导入 Unity 中效率较慢以及三维模型导入后分布零散、较难整合等问题,直接构建整个室内环境的三维模型不现实。本文通过借鉴工业基础类标准(industry foundation class,IFC)标准中对室内区域的划分,建立室内环境框架模型,分层进行三维室内场景的生成:即分别导入重要实体的三维模型,通过层次模型在 Unity 环境中进行组织,如图 4 所示。

虚拟场景(图 5)创建完成后,首先需要根据场景

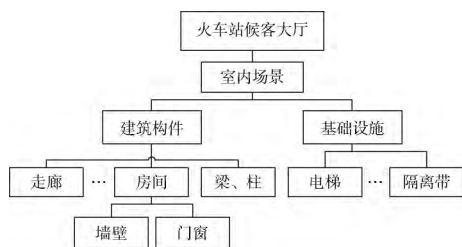


图4 基于层次模型的室内场景建模

的具体需要进行光源的设置并通过光源和材质计算实时阴影,从而使得空间得到更加真实的显示效果;添加虚拟照相机(Camera)来模拟观察实时场景世界,照相机负责将观察的三维内容投影到二维屏幕上进行渲染,在实验中选择更为接近现实世界、具有消失感和距离感的透视相机进行室内三维场景渲染。

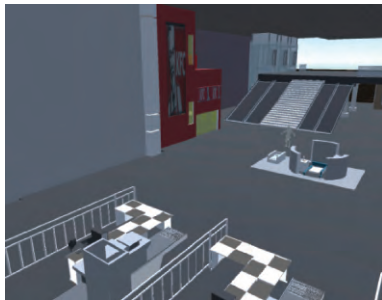


图5 车站前厅模型的整合

3.2 Web室内三维场景交互系统的实现

在Unity3D开发环境中构建基本三维室内场景后,利用Unity3D引擎封装的各种三维图形对象及提供的各类图形接口并结合C#脚本,对系统功能模块进行实现;基础功能实现后,在开发环境中开始构建基于WebGL标准的Web端项目。

结合一般交互操作逻辑,使用鼠标滚轮的移动来进行场景平移、鼠标滚轮滚动实现场景的缩放、鼠标右键实现角度的旋转、双击鼠标右键回到场景中心位置,使用CameraFollow脚本完成以上操作并将脚本附加到主摄像机上。以第三人称视角通过使用键盘按键来完成场景漫游功能以提高用户参与感,键盘的键入即可产生一个事件将其转换为相应的控制命令来控制漫游角色,W/S/A/D或上下左右键分别对应角色的前进、后退及向左、向右移动,使用PlayerMovement脚本完成以上功能代码并将其添加在角色上。功能确认完成且调试通过后,开始在开发环境中构建WebGL内容并发布,主要流程如下:

Step1,在构建选项的平台列表中选择WebGL,选择是否将工程构建为发布版本;

Step2,精简WebGL代码,将Unity3D中与工程无关的一些组件、原生引擎代码或第三方插件在构建时去除以精简代码;

Step3,进行发布设置,设置为Web工程分配的内存大小、脚本运行时是否抛出异常等。

发布时,Unity会将完成的工程项目打包发布为1个html文件、装有模板资源和加载工具条的文件夹及装有工程输出文件的文件夹。发布完成后,在Web服务器中部署工程(或是本地跨域调用)并通过浏览器访问工程目录下指定文件以打开Web系统,如图6所示。



图6 原型系统功能展示

3.3 系统功能测试与性能优化

依据上述方法,为验证系统完备性,对已完成构建的系统进行功能测试,测试时基本软硬件环境为Windows 7、CPU 2.6 GHz、8 G内存、Google Chrome 69.0、Fraps工具等。具体功能测试结果见表1。

表1 功能测试结果统计

测试功能	实验结果
平移操作	按下鼠标中键场景能够平移
缩放操作	滚动鼠标滚轮场景自由缩放
场景旋转	按下鼠标右键场景进行选择
键盘操作进行场景漫游	利用键盘中W/A/S/D进行前后左右移动
场景罗盘	人物移动时通过罗盘进行指向

对完成的原型系统进行优化是系统构建的重要部分,也是提升用户体验的最直接方法。本文以系统实际应用为出发点,从模型构建、WebGL内容封装及前端加载等方面进行优化,优化方案概述如下。

1)降低场景三维模型的复杂度是提升系统性能的最直接方法:可以通过三维建模软件中的减面工具(3ds Max的Polygon Cruncher工具),在保持模型基本不变的情况下减少三维模型的面片数量;同时,对于重要性较低或较为复杂的室内实体可以使用纹理贴图代替多边形建模,以提高渲染效率。场景整合时,利用模型距离摄像机视点的距离选择精度不同的多细节层次(levels of detail, LOD)模型,摄像机视点距离模型较近时使用精度较高的LOD模型,反之则使用精度低的模型,这样会大大降低渲染负载。

2)在构建 WebGL 内容时,由于跨平台的局限性将会使得某些图形特性缺失,如 Unity 中的某些材质在 WebGL 中并未定义使用时,则会变成普通材质从而影响程序性能,而这就需要开发者事先了解并手动修改。在发布 WebGL 内容时,开发者需要针对具体的应用场景选择不同的发布选项。除此之外,保证系统顺畅运行的一个基本条件是内存分配合理,优化内存分配方法如下:通过实验测试系统内存占用峰值,以确定 Unity 堆内存大小;同时利用官方 API 提供的 `GetTotalReservedMemory()` 函数获取总预留内存,堆内存与总预留内存之和为最优分配的内存大小。

3)完成内容构建后将考虑如何在浏览器端进行优化,由于所有的系统逻辑代码都被构建为 JavaScript 的一个子集 asm.js,因而使用 asm.js 规范的浏览器在理论上将获得最好的性能。同时,利用官方插件在前端创建本地 IndexedDB 以缓存不持久的资源文件,加载完成后清除缓存将会大大提高系统流畅度。

总结以上实验中的优化方案,概括为如图 7 所示的优化框架。

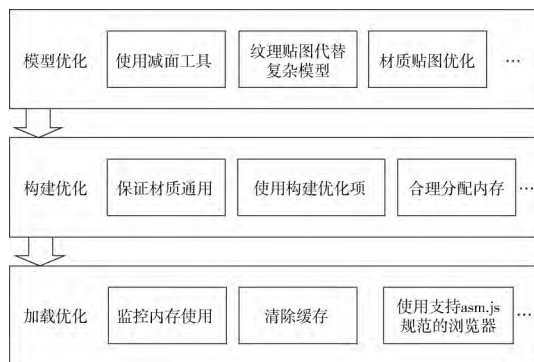


图 7 系统优化

性能优化实验选取冷启动时间、内存消耗及单位时间内渲染帧数(frames per second,FPS)等 3 个性能指标,对系统优化前、后的结果进行对比。对比结果如图 8 所示。由图 8 可以看出,优化前、后冷启动时间缩短,运行时每秒帧率明显提高、内存消耗也相应减少。

4 结 论

随着 Web 三维技术的不断发展及 WebGL 标准的不断完善,在 Web 端必将会出现越来越多功能强大的三维应用,而如何最优模拟虚拟场景并快速、高效地构建三维系统已经成为亟待解决的问题。因此,本文提出建立层次模型模拟室内环境,依靠成熟的第三方图形引擎 Unity3D 快速构建原型系统并根据实验提出优化框架进行程序优化。实验结果表明:1)Unity3D 平台能够导入通用的三维模型,并依靠层次模型快速构建室内虚拟三维场景;2)利用三

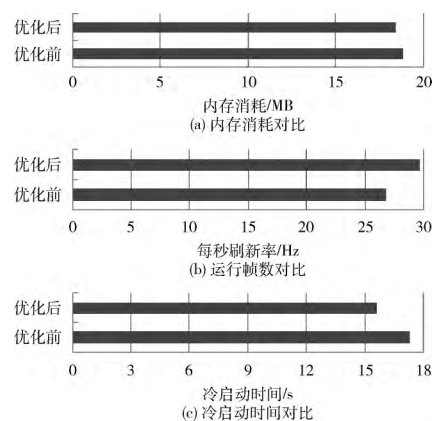


图 8 优化前、后主要性能指标的对比

维图形引擎可以完成基本功能需求,能够进行自由漫游及虚拟场景的缩放旋转,以及基于 WebGL 内容的发布;3)本文提出的优化框架能够对系统进行一定程度上的优化。

(由于印刷关系,查阅本文电子版请登录 <http://www.paper.edu.cn/journal/zgkjlw.shtml>)

[参考文献] (References)

- [1] EVANS A, ROMEO M, BAHREHMAND A, et al. 3D graphics on the Web: a survey [J]. Computers & Graphics, 2014, 41: 43-61.
- [2] 许华燕,李志辉,王金月. 室内地图应用现状及展望[J]. 测绘通报, 2014(9): 119-121.
XU Huayan, LI Zhihui, WANG Jinyue. Present status and prospect of indoor map application [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(9): 119-121. (in Chinese)
- [3] 赵沁平. 虚拟现实综述[J]. 中国科学(F 辑: 信息科学), 2009, 39(1): 2-46.
ZHAO Qiping. An overview of virtual reality [J]. Scientia Sinica (Informationis), 2009, 39(1): 2-46. (in Chinese)
- [4] 马萍. 三维虚拟校园立体场景的设计与实现[D]. 济南: 山东师范大学, 2013.
MA Ping. Design and implementation of the three-dimensional virtual campus stereoscopic scene [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2013. (in Chinese)
- [5] 李俊军. 基于 Unity3D 的室内建筑三维建模与交互系统实现[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2014.
LI Junjun. Indoor building 3D modeling and interactive system implementation based on Unity3D [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2014. (in Chinese)
- [6] 郭兵兵, 赵广兴. 基于虚拟现实技术的三维矿井漫游演示系统开发与应用[J]. 中国煤炭, 2013, 39(3): 64-67, 72.
GUO Bingbing, ZHAO Guangxing. Development and application of 3D mine roaming demonstration system based on virtual reality technology [J]. China Coal, 2013, 39(3): 64-67, 72. (in Chinese)
- [7] 王柳兵, 景军锋, 苏泽斌. 基于 WebGL 的纽扣三维展示系统[J]. 西安工程大学学报, 2017, 31(5):

- 606-611.
WANG Liubing, JING Junfeng, SU Zebin. A 3D display system of buttons based on WebGL [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2017, 31(5): 606-611. (in Chinese)
- [8] 郭丹. 服装博物馆虚拟展示系统平台研究[D]. 北京: 北京服装学院, 2017.
GUO Dan. Research on virtual display system platform of clothing museum [D]. Beijing: Beijing Institute of Fashion Technology, 2017. (in Chinese)
- [9] 杨浩. 骨刻文三维模型展示系统的设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2012.
YANG Hao. The design and implementation of the display system for three-dimensional model of Gukewen [D]. Jinan: Shandong University, 2012. (in Chinese)
- [10] 王磊, 高珏, 金野, 等. 基于 Web3D 无插件的三维模型展示的研究[J]. 计算机技术与发展, 2015, 25(4): 217-220.
WANG Lei, GAO Jue, JIN Ye, et al. Research on three-dimensional model display based on Web3D without plug-in [J]. Computer Technology and Development, 2015, 25(4): 217-220. (in Chinese)
- [11] 宣雨松. Unity 3D 游戏开发[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2012: 2-8.
XUAN Yusong. Game development based on Unity3D [M]. Beijing: Posts & Telecoms Press, 2012: 2-8. (in Chinese)
- [12] 丁明华, 李允旺, 王勇. 基于 Unity3d 的麦克纳姆轮移动平台避障算法仿真[J]. 中国科技论文, 2016, 11(10): 1191-1195.
DING Minghua, LI Yunwang, WANG Yong. Simulation of obstacle avoidance algorithm on Mecanum wheel platform based on Unity3d [J]. China Sciencepaper, 2016, 11(10): 1191-1195. (in Chinese)
- [13] 任国栋, 陈林华, 陶学锋, 等. 基于 Unity3D 的虚拟博物馆信息可视化系统[J]. 计算机系统应用, 2013, 22(9): 86-90, 59.
REN Guodong, CHEN Linhua, TAO Xuefeng, et al. Virtual museum information visualization system based on Unity3D [J]. Computer Systems and Applications, 2013, 22(9): 86-90, 59. (in Chinese)
- [14] 汪浩, 田丰, 张文俊. 基于 WebGL 的交互平台设计与实现[J]. 电子测量技术, 2015, 38(8): 119-122, 128.
WANG Hao, TIAN Feng, ZHANG Wenjun. Design and implementation of interactive platform based on WebGL [J]. Electronic Measurement Technology, 2015, 38(8): 119-122, 128. (in Chinese)
- [15] HOETZLEIN R C. Graphics performance in rich internet applications [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 2012, 32(5): 98-104.
- [16] 温孟夏. 基于 Unity 3D 的数据中心三维交互的设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
WEN Mengxia. Design and implementation of data center 3D interaction based on Unity3D [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2016. (in Chinese)
- [17] 白建军, 朱亚平, 梁辉, 等. OpenGL 三维图形设计与制作[M]. 北京: 人民邮电出版社, 1999: 108-153.
BAI Jianjun, ZHU Yaping, LIANG Hui, et al. 3D graphic design and production based on OpenGL [M]. Beijing: Posts & Telecoms Press, 1999: 108-153. (in Chinese)
- [18] ROSSIGNAC J, BORREL P. Multi-resolution 3D approximation for rendering complex scenes [M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 1993: 455-465.
- (上接第 480 页)
- [18] 孙永河, 韩钰萍, 冯志鹏, 等. 海拉尔盆地贝尔凹陷断裂系统及其对油气运聚的控制作用[J]. 地质论评, 2011, 57(1): 89-100.
SUN Yonghe, HAN Yuping, FENG Zhipeng, et al. Fault systems and its control on hydrocarbon migration and accumulation in Beier sag, Hailaer basin [J]. Geological Review, 2011, 57(1): 89-100. (in Chinese)
- [19] 罗群, 庞雄奇, 姜振学. 一种有效追踪油气运移轨迹的新方法——断面优势运移通道的提出及其应用[J]. 地质论评, 2005, 51(2): 156-162.
LUO Qun, PANG Xiongqi, JIANG Zhenxue. A new method for effective trace petroleum migration path: concept of fault section dominant migrating channel and its application [J]. Geological Review, 2005, 51(2): 156-162. (in Chinese)
- [20] 姜海燕, 刘滨莹, 孙同文, 等. 断面优势运移通道有效性等级及控藏作用[J]. 特种油气藏, 2017, 24(3): 49-53.
JIANG Haiyan, LIU Binying, SUN Tongwen, et al. Gradations and controlling effect on hydrocarbon reservoirs of the effectiveness of dominant migration pathways along fault surfaces [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2017, 24(3): 49-53. (in Chinese)
- [21] 刘景东, 蒋有录, 马国梁. 断面优势运移通道的有效性及其对油气的控制作用[J]. 特种油气藏, 2011, 18(3): 47-50.
LIU Jingdong, JIANG Youlu, MA Guoliang. Effectiveness of fault surface dominant migration pathway and its control action on oil and gas [J]. Special Oil and Gas Reservoirs, 2011, 18(3): 47-50. (in Chinese)
- [22] 胡志伟, 徐长贵, 杨波, 等. 渤海海域断裂对油气优势运移通道的影响及其控藏类型[J]. 地质科技情报, 2017, 36(3): 38-45.
HU Zhiwei, XU Changgui, YANG Bo, et al. Influence of faults on the petroleum dominant migration pathway and its controlling reservoir types in the Bohai area [J]. Geological Science and Technology Information, 2017, 36(3): 38-45. (in Chinese)
- [23] LINDSAY N G, MURPHY F C, WALSH J J, et al. Outcrop studies of shale smears on fault surface [M]// FLINT S S, BRYANT I D. The Geological Modelling of Hydrocarbon Reservoirs and Outcrop Analogues. Oxford, Boston: Blackwell Scientific Publications, 1993: 113-123.