

文章编号:1005-1538(2018)02-0127-06

文物三维数字化设计及其实验方法研究

宗立成

(西北大学艺术学院,陕西西安 710069)

摘要: 文化遗产的数字化设计为文化遗产的保护、传承和利用提供了新的方法。针对文化遗产的数字化设计理论和方法,研究了文化遗产的三维数字化设计关键技术,构建了基于计算机辅助的三维扫描文物数字化重建方法,提出二维图像标定的三维网格纹理映射思路。通过商晚期出土的青铜牛尊文物三维数字化实验,完整地构建了文物数字化设计流程框架,并对文物数字化设计理论和方法进行验证。

关键词: 文化遗产;文物;数字化;三维扫描

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A

0 引言

文化遗产是一个国家、民族的精神支柱,其体现的是民族的文化、经济、技术、科技等多方面融合的实力,是国家民族持续发展的基础和动力,有必要对其进行保护、传承和发展。21世纪,人类正经历着信息化和数字化发展的重要时期。中国国民经济和社会发展十一五规划纲要中明确提出“加快国民经济和社会信息化”建设步伐,“推动信息产业与文化产业结合”。数字化具备数据压缩、可编辑修改、重复利用、虚拟现实等特征,非常适合文化遗产的采集、保护、开发和再利用。特别是近年来三维扫描技术、仿真模型技术的发展,可以将文化遗产中的文物进行高精度数字化转换,对于研究人员来说便于对文物进行全方位的数据获取、结构分析、多次或者同步实验分析;对于普通观众来说可以近距离、不受时空限制、交互式地全方位观赏文物。目前国内针对文化遗产的数字化研究主要集中于数字化理论、模式、体系^[1]等方面的研究。例如赵东^[2]研究了历史文化资源的数字化理论和可行性方案,建立了陕西地区的文化遗产数字化保护与开发模式;谭必勇^[3]从技术、文化和制度三个角度研究文化遗产的数字化体系。文献[4]研究了数字技术在非物质文化遗产数字化采集、存储、复原、再现、展示和传播中的基本方法路线;文献[5]研究了文化遗产的数字化保护机制,利用 web 技术构建满族非遗的数字化平

台。美国、英国和日本在文化遗产的数字化研究方面起步较早,基于快速发展的计算机信息技术,针对文化遗产进行数字化保护、转换和传播。例如历史文物的三维数字建模和文物的增强现实展示等等。Debevec^[6]提出了基于少量静态图像的文物建模和渲染方法,结合摄影测量技术和立体算法,构建了大型物质文化遗产场景的虚拟建模方法;Levoy^[7]将米开朗基罗进行数字化采集、处理、复原和展示;Lambers^[8]研究基于图像的文物建模问题,提出了数字影像和三维扫描技术的文物数字化采集方法;Liarokapis^[9]研究基于增强现实技术的信息交互平台,在现实学习环境中叠加虚拟多媒体学习内容,增强了文化遗产的数字化展示、学习和传承方式。文物数字化设计方法的关键技术主要是数据的采集、数据处理、数字化展示和数字化开发利用。文物三维数字化设计和实验的目的是构建完整、可行的文物三维数字化技术路线。

1 文物信息的数字化

1.1 文物数字化信息的获取

文化遗产的数字化保存的前提条件是数字信息的获取,文物数字化转换就可以很好地解决这类问题。在物质文化遗产中,文物的数字化基本要求是准确的数字化还原。目前来说,针对非平面文物的数字化主要有基于图像的三维模型重建方法;基于测量的三维重建方法和文物的三维实体扫描方

收稿日期:2016-10-02;修回日期:2017-06-02

基金项目:国家科技支撑计划资助(2013BAH49F03),西北大学科研基金资助(0110/389031512)

作者简介:宗立成(1985—)男,博士,讲师,研究方向为数字化设计、智能设计、计算机辅助设计。E-mail: zlcclz_002@163.com

法^[10]。基于三维扫描方法的文物数字化三维模型构建路线具备精度高和速度快的特点,三维数据扫描和计算机辅助数据配准是目前文物数字化设计的主要研究方向。三维扫描技术的原理是利用激光三角测距原理,通过发射出的水平激光束扫描物体,并接受物体表面的反射激光束,利用 CCD 传感器采集帧数据,计算和统计采样点的水平投影距离,利用统计数据重构采样点的三维坐标还原被扫描模型。

1.2 数字信息的处理

三维扫描仪可以快速扫描物体,获得大量的扫描数据。一般来说这类扫描数据量庞大,需要进行拓扑处理才能使用。在扫描的过程中,根据被扫描物体的不同,扫描的方式和结果需要调整,而且在扫描的过程中,需要建立多个视点,多个视点扫描的数据进行配准才能获得物体的准确三维数据。珍贵文物无法进行多次直接接触和多角度放置,因此在扫描时会出现空洞数据,需要对空洞数据进行修补。

2 文物数字化设计技术

2.1 基于扫描数据的重建

文物三维扫描的过程中,需要确立三维扫描的视点^[11],被扫描物体往往需要建立 4~8 个以上视点,大型场景往往会达到几十个视点。这些视点获取的扫描点云相对于视点本身是局部坐标,需要将各个视点的点云数据进行拼合,才能准确获得物体的完整坐标数据。在进行各视点数据拼合之前,需要将各视点的点云数据进行压缩和去噪处理,利用多边形细分理念,对于某一视点的三维点云区域内的 $M \times N$ 点:

Step 1: 首先计算 $M \times N$ 构成的四边形网格内的点是否处于同一平面;

Step 2: 判断: 同一平面执行 step 3; 不同平面执行 step 4;

Step 3: 保留 $M \times N$ 平面内的四个顶点, 删除其余所有的三维点, 结束运算;

Step 4: 将 $M \times N$ 平面进行一次细分, 分为四个四边形;

Step 5: 执行 step 1。

在进行扫描的过程中,扫描本身需要设置适当的简化和优化级别,获取的扫描数据进行多边形细分压缩的过程中,如何判断被扫描物体的点云数据去噪合适,需要根据平均距值原理。三维物体的点

云密度越大,采样点之间的平均距值就越小,根据扫描物体的具体要求和用途,采用平均距值原理。只需要判断采样点之间的平均距值大小,从而决定是否删除多余的点云数据,进行扫描物体的点云数据压缩。

平均距值的主要步骤为:

Step 1: 定义采样立方体变长 d 和欲精简数据点百分比 θ ;

Step 2: 定义平均点距立方体,如图 1 所示;

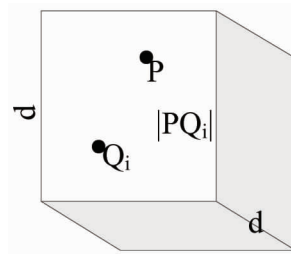


图 1 采样立方体

Fig. 1 Sampling cube

Step 3: 计算 P 到点 Q_i 集内任意一点的距离

$$|PQ_i| = \sqrt{(P_x - Q_{ix})^2 + (P_y - Q_{iy})^2 + (P_z - Q_{iz})^2}$$

Step 4: 计算平均距离

$$\bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n |PQ_i|}{n}$$

Step 5: 对比定义的精简百分比 θ , 删除比 θ 小的数据点。

经过上述的数据采集和去噪处理,对文物扫描点云数据进行了优化。通过优化的三维点云数据重建三维模型进行文物的数字化处理。

关于三维重建,采用三角剖分原理的三角网格生长法,其优势在于能够将扫描的点云数据进行快速重建,并能够较好地耦合一些三维模型软件,例如 MAYA、3D MAX 等进行视觉化的呈现和二次修改利用,尤其是扫描数据的修补。由于三维扫描不可能做到被扫描面的全覆盖,在扫描数据的处理中也会造成数据配准不一致,由此这类问题造成的空洞数据需要进行适当的人工修复。三角网格生长法的基本步骤如下:

Step 1: 选择起始点;

Step 2: 搜索、连接与起始点最近的点,并将其所在的 Delaunay 三角网的一条边作为基线,找出 Delaunay 三角网的第三个点并连接;

Step 3: 由基线的两个端点与 Step 2 搜索到的第三点构成新的基线;

Step 4:迭代以上两步;

Step 5:无法搜索第三点,结束。

文物三维模型的重建需要把握的原则是文物与模型的高度一致性,三维扫描获取了文物的庞大点云数据,需要进行数据处理,将简化的结果进行三维视觉化的呈现,同时进行空洞数据修补、三角面处理以及文物的尺寸、比例和纹理校对。

2.2 数字纹理映射

在进行文物数字化还原时,三维扫描记录的是文物的空间坐标信息^[12],为了准确还原文物的完整信息,需要三维扫描的过程中,同步记录文物的高精度纹理信息。三维扫描仪可以同步获取文物纹理数据,但受限于实验环境、扫描仪设置和分辨率,扫描获取的纹理信息质量很低,目前绝大多数的文物纹理实验都是基于人工的多重纹理贴图,利用专业的三维图形软件,例如3d MAX等进行人工交互方式,将文物的高精度图片贴到文物三维模型上。借鉴透视投影成像原理,利用三维扫描透视投影模型,将文物的网格模型与图像标记点进行匹配,使文物网格模型坐标变换到所拍摄图像的摄像机坐标系,生成文物的二维色彩图像,从而进行文物的图像与模型之间的纹理映射,详细步骤如下所示:

Step 1:标记文物色彩图像上一点 P 的坐标为 (u, v) ;

Step 2:设文物网格模型上该点 P 的坐标为 (x, y, z) ;

Step 3:那么, (u, v) 和 (x, y, z) 则称为一组特征对应,它们之间的关系式表达如下:

$$\begin{vmatrix} u \\ v \\ 1 \end{vmatrix} = M \begin{vmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{vmatrix}$$

其中, $M \begin{vmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \end{vmatrix}$ 为透视投影矩

阵;

Step 4:标记 P_n 点,获取 M_n 组矩阵,求解透视投影矩阵;

Step 5:将计算出的 P 点RGB值赋予网格模型;

Step 6:将文物主要的纹理取值点进行标记,进行Step 2~Step 5计算。

文物数字化还原不仅要求对文物的三维模型进行准确建模,还需要对文物的质感和色彩进行逼真还原,这就取决于纹理映射。在进行文物透视投影

原理的纹理映射过程中,文物的数字模型色彩纹理效果与标记点取值有关,标记点越多效果越好,但计算量会急剧加大。因此,在实际的文物数字化实验中,采取数值计算和人工贴图相结合的方法,对文物的纹理质感和色彩进行数字化还原,便于进行后期的文物数字化应用。

3 文物数字化实验

为了检验上文所研究的方法有效性,针对青铜牛尊文物进行数字化设计实验。实验采用InSpeck三维扫描仪,该扫描仪通过并行获取数据的方式,获取速度可以达到30万点每秒。案例的青铜牛尊文物是出土于衡阳的商晚期文物,高14cm,长19cm,现藏于湖南省博物馆。该文物设计巧妙,分为盖和背两部分,盖部为牛首立虎形物,杯部有凤鸟纹路,是一件精巧的尊类器皿。在进行青铜牛尊的数字化实验中,对青铜牛尊文物进行扫描,将文物的立姿侧面进行扫描,获取青铜牛尊的三维点云数据,并进行数据处理和重建获得三维模型并进行数字化设计应用,具体实验步骤如下:

Step 1:实验环境设定

青铜牛尊(图2)文物年代久远,为了保护文物不受伤害,对实验室的光线控制在300lux(日光)+50lux(人工光),控制实验环境湿度低于40%,温度保持23℃室温左右,并将文物置于扫描转盘,设定摄像机视角与扫描转盘保持水平角度,用于记录相同角度的文物纹理照片。



图2 青铜牛尊文物

Fig. 2 The relics of bronze cow

Step 2:三维扫描设定

为了保证扫描数据的准确性,在扫描之前首先对扫描仪进行校准,设定扫描分辨率为2.00mm,定位坐标个数为10个,优化扫描网格为20,简化扫描网格为10,扫描纹理投影方式为自动,纹理尺寸为4096×4096。

Step 3: 文物扫描设定

由于青铜牛尊文物的主要数据设计面都位于足部之上,采用立姿基本可以扫描文物 90% 的数据面。关于文物足部底面的数据面采用人工修补的方式,这样可以避免文物倒置对文物造成的伤害,也提高了实验进度。

Step 4: 三维扫描数据的获取

对青铜牛尊文物进行数据扫描,获取文物的三维坐标信息(点云数据)。在进行扫描的过程中,设定扫描仪的转盘转动刻度为 15° ,将文物从设定的原始位置开始扫描,每转动 15° 进行一次扫描,一共进行 24 次扫描。同时对这 24 次相同角度的文物进行 24 次拍照,记录 24 次文物纹理照片如图 3B 所示。

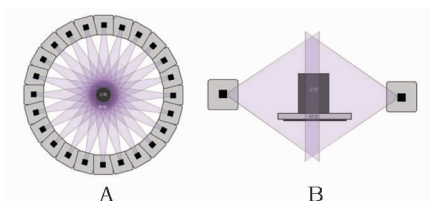


图 3 扫描示意图

Fig. 3 Scanning diagram

Step 5: 文物扫描数据的处理

经过 24 次扫描获得了大量的文物三维点云数据,这些点云数据需要经过处理才能使用。运用上文所构建的平均距值精简方法,将获取的点云数据进行精简运算,其中根据文物的实验目的和用途定义精简百分比如表 1 所示。

表 1 数据精简百分比

Table 1 The percentage of data reduction

用途	精简百分比/%	原始面片	精简后
数字还原	53	117648	55295
精度还原	26	117648	87060
文物展示	48	117648	61177
影视动画	64	117648	42354

实验的设定目的是对青铜牛尊文物进行数字化还原与再设计,因此不需要特别高的还原精度。因此,将精简百分比定义为 53%,通过实验可知青铜牛尊的原始面片为 117648,经过精简后的面片数为 55295。InSpeck 三维扫描仪提供了 FAPS 数据处理系统,将精简之后的数据导入 FAPS 系统,进行三维图像数据处理。基本原理是通过数据生产相函数图像和深度图像,将深度信息转换成三维信息进行选

代优化。

Step 6: 文物三维视觉重建

论文基于 VC++ 和 ARX 工具进行数据处理实验,将精简之后的文物数据导入 FAPS 系统中,提取青铜牛尊的三维信息生产文物的三维模型。将简化的结果导入 FAPS 系统中,进行三维视觉化的呈现。由于在文物扫描的过程中,采用了文物立姿状态扫描,足底部没有扫描数据,因此需要进行人工空洞数据修补,这部分工作在 MAYA 三维软件里进行。通过三维重建,获得了文物的一个完整网格模型,该网格模型已经足够用于普通的文物三维展示和文物数字化设计应用。因此可以得 step 4 定义的 53% 精简率的有效性。同时将获得的网格模型导出为 FBX 或 OBJ 格式,可以应用于绝大多数的三维模型软件和虚拟开发平台,如图 4 所示。

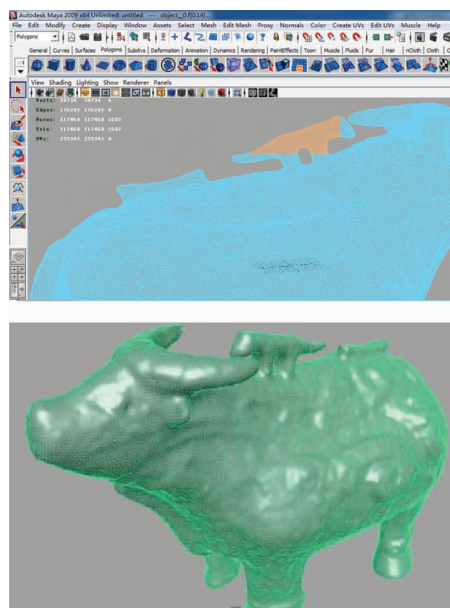


图 4 文物三维模型及面片数统计

Fig. 4 Three - dimensional model of cultural relics and statistics

Step 7: 模型纹理映射

纹理映射的目的是将文物进行完整的数字化还原,将模型网格点上的颜色信息与文物进行对应。在 Step 1 阶段时,同步获取了文物的纹理照片。三维扫描的同时记录的是文物表面的三维坐标信息和三维点的颜色信息。因此,最终获取的三维模型具备了纹理信息,模型的网格点已经记录了颜色值(RGB)。但在实验的过程中发现,受到实验环境的影响,在扫描的过程中,每转动 15° 扫描数据不受影响,但是记录的纹理信息受到光线影响较大,这部分工作需要后期修正。因此,基于上文的透视投

影原理方法,选取 0°,90°,180°,270°四副图像作为纹理映射的基础图案,进行网格点标定,用于二维图像和三维模型网格点的配准,从而获得三维模型的纹理,最后获取的效果如图 5 所示。

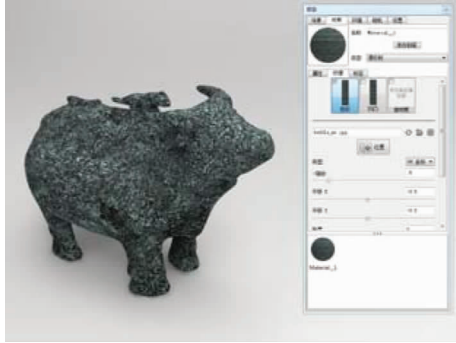


图 5 纹理映射标定及贴图

Fig.5 Texture mapping and demarcating

Step 8:文物数字化展示

文物数字化关键技术研究,文物的数据获取、处理和重建是研究的重点和难点。在文化遗产的数字化研究工作中,最直观呈现就是文物的视觉化虚拟展示,这也是最为有效的文化遗产数字化保护和传承方式。利用虚拟现实技术可以让大众切实感受文化遗产的数字化成果,了解、保护和传播文化遗产。基于 Virtools 平台开发文物虚拟展示方案,Virtools 是一套具备丰富的互动行为模块的实时 3D 环境虚拟编辑系统,可以制作出许多不同用途的 3D 产品,如网络、计算机游戏、多媒体、交互式教育训练、仿真与产品展示等。在前面的实验流程中,已经获得了文物的三维仿真模型,利用 Virtools 内置的交互行为模块和网络传输功能模块,将青铜牛尊三维数字模型倒入 Virtools 系统,设置和编辑展示交互模式,设计基于 web 的文物交互式虚拟展示,普通用户通过互联网就可以浏览和控制数字复原模型的 360°旋转、缩放和细节展示,如图 6 所示。

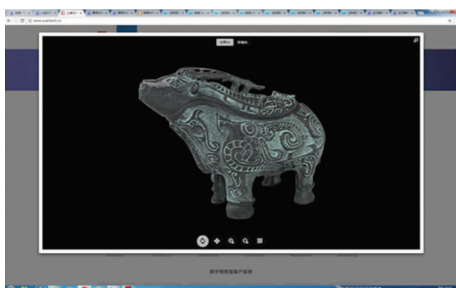


图 6 文物虚拟展示

Fig.6 Virtual display of relics

整体的实验流程图如图 7 所示。

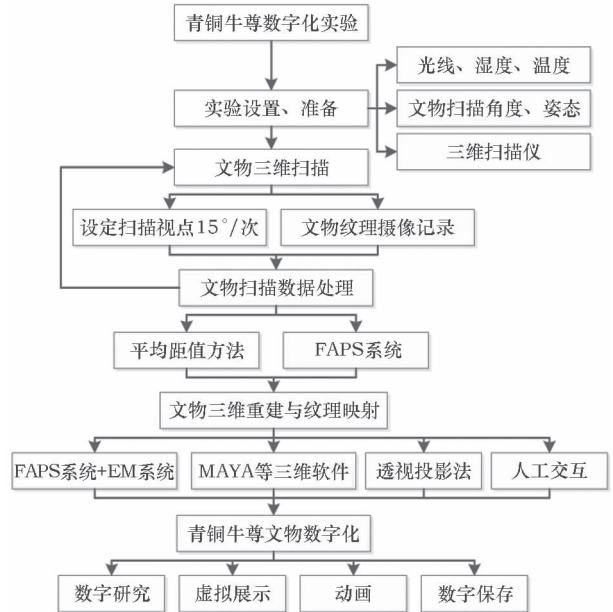


图 7 青铜牛尊数字化实验流程图

Fig.7 The flow chart of digitize experimental on bronze cow

4 结论及展望

文化的三维数字化设计涉及文物的数据获取、处理等关键技术,三维扫描方法可以快速准确地获取文物的三维坐标信息,通过对扫描数据的处理重建文物的三维模型。结合青铜牛尊文物数字化设计实验,构建了完整的文物数字化设计流程和实验方法,相比基于图像和测量的文物三维数字化方式,基于三维扫描和计算机辅助文物三维数字化实验路线可以更精确和快速地获取文物的三维信息,构建文物三维数字化模型。研究中构建了二维图像标记的三维网格纹理映射方法。但该方法在二维图像标记与三维网格映射之间配准性需要提高,工作量很大。下一步的研究重点主要解决大尺度文物数据获取与处理和纹理映射标记配准问题。

参考文献:

[1] 魏利伟,李文武. 国内外文物数字化保护标准现状及趋势研究 [J]. 中国标准化,2016(6):91-96.
WEI Li - wei, LI Wen - wu. Research on current situation and trend of digital culture heritage preservation standards in China and abroad [J]. China Standardization, 2016(6):91-96.

[2] 赵 东. 数字化生存下的历史文化资源保护与开发研究——以陕西为中心 [D]. 山东:山东大学,2014.
ZHAO Dong. Research on the digital protection and development of historical cultural resources - with Shaanxi as the center [D].

- Shandong: Shandong University, 2014.
- [3] 谭必勇. 中外非物质文化遗产数字化保护研究[J]. 图书与情报, 2011(4): 7-11.
TAN Bi-yong. A comparative study of sino-foreign digital protection of intangible cultural heritage[J]. Library and Information, 2011(4): 7-11.
- [4] 黄永林, 谈国新. 中国非物质文化遗产数字化保护与开发研究[J]. 华中师范大学学报(社科版), 2012, 51(2): 49-55.
HUANG Yong-ling. Research on digital protection and development of intangible cultural heritage in China[J]. Journal of Huazhong Normal University (Social Science), 2012, 51(2): 49-55.
- [5] 代俊波, 单桂花. 基于Web的满族非物质文化遗产数字化保护平台的设计与实现[J]. 图书馆学研究, 2010(9): 32-34.
DAI Jun-bo, SHAN Gui-hua. Design and implementation of digital protection platform for Manchu intangible cultural heritage based on web[J]. Researches in Library Science, 2010(9): 32-34.
- [6] Debevec P E, Taylor C J, Malik J. Modeling and rendering architecture from photographs: a hybrid geometry and image based approach[C]//Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM, 1996: 11-20.
- [7] Levoy M, Pulli K, Curless B, et al. The digital michelangelo project: 3D scanning of large statues[C]//Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., 2000: 131-144.
- [8] Zueblin M, Fischer L, Eisenbeiss H, et al. Combining photogrammetry and laser scanning for the recording and modeling of the Late Intermediate period site of Pinchango Alto, Palpa, Peru[J]. Journal of Archaeological Science, 2010, 34(10): 1702-1712.
- [9] Liarakapis F, Petridis P, Lister P, et al. Multimedia augmented reality interface for E-learning (MARIE)[J]. World Transactions on Engineering and Technology Education, 2002, 1(2): 173-176.
- [10] 彭冬梅. 面向剪纸艺术的非物质文化遗产数字化保护技术研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
HAN Dong-mei. Research on digital-protection technology of non-material cultural heritage based on Chinese-paper-cut[D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2008.
- [11] 王 茹. 古建筑数字化及三维建模关键技术研究[D]. 陕西: 西北大学, 2010.
WANG Ru. Research on key technologies of digital and three-dimensional modeling of ancient buildings[D]. Shaanxi: Northwest University, 2010.
- [12] 朱晓冬, 周明全, 耿国华. 西北大学考古数字博物馆的设计与建立[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2004, 34(5): 522-526.
ZHU Xiao-dong, ZHOU Ming-quan, GENG Guo-hua. Design and implementation of digital archaeology museum of Northwest University[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2004, 34(5): 522-526.

Three-dimensional digital design of cultural relics and its experimental method

ZONG Li-cheng

(Northwest University, School of Arts, Xi'an 710069, China)

Abstract: The digital design of cultural heritage relics provides a new method for their conservation, preservation and utilization. Based on digital design theories and methods used for making cultural heritage objects, we reviewed key technologies for the three-dimensional digital design for cultural heritage objects, developed a computer-aided, three-dimensional digital reconstruction method, and proposed the idea of three-dimensional mesh texture mapping using two-dimensional image calibrations. We tested this method by doing three-dimensional digitization of an unearthed bronze bovine object of the late Shang dynasty and constructing a complete design framework, thus verifying our theories and methods.

Key words: Cultural heritage; Relics; Digitization; Three-dimensional scanning

(责任编辑 谢 燕)