

# 不可移动文物保护数字化及虚拟展示

——以敦煌莫高窟 96 窟为例

李克恭<sup>1</sup>, 汪万福<sup>2</sup>

(1. 甘肃省测绘工程院, 兰州 730000; 2. 敦煌研究院, 甘肃 敦煌 736200)

**摘要:** 文物数字化不仅可抢救性记录文物现状, 而且还可实现文物资源由物质资源向数字资源的转化, 为数字时代不可移动文物及其承载的文化信息走向公众, 参与教育和价值观建构、走向世界参与文明互鉴奠定基础, 通过对三维激光扫描和虚拟现实技术在不可移动文物保护数字化及虚拟展示方面的应用进行研究, 并以敦煌莫高窟 96 窟为例, 对形成的技术路线和方法的科学性、合理性, 以及可操作性进行了验证。结果表明, 研究成果可为其他不可移动文物保护数字化及虚拟展示提供参考和借鉴。

**关键词:** 不可移动文物; 保护数字化; 虚拟展示

**中图分类号:** TU198; P225 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)06-0215-05

不可移动文物是指古文化遗址、古墓葬、古建筑、石窟寺、石刻、壁画、近代现代重要史迹和代表性建筑等, 是针对可移动文物而言的, 不可移动文物是人类在社会活动中遗留下来的具有历史、艺术、科学价值的遗物和遗迹<sup>[1]</sup>, 由于时代久远, 受自然环境侵蚀、极端气候和城市化进程的加快等因素影响, 其保护面临着严峻考验, 通过文物数字化不仅可抢救性记录文物现状, 而且还可实现文物资源由物质资源向数字资源的转化, 为数字时代不可移动文物及其承载的文化信息走向公众, 参与教育和价值观建构、走向世界参与文明互鉴奠定基础<sup>[2]</sup>。本文通过对三维激光扫描和虚拟现实技术在不可移动文物保护数字化及虚拟展示方面的应用进行研究, 并以敦煌莫高窟 96 窟为例, 对形成的技术路线和方法的科学性、合理性, 以及可操作性进行验证, 该成果可为其他不可移动文物保护数字化及虚拟展示提供参考和借鉴。

## 1 敦煌莫高窟 96 窟介绍

敦煌莫高窟 96 窟(简称“96 窟”)位于莫高窟上寺石窟群的正中, 窟外的红色木构窟檐高达 45 m, 依靠山崖而建, 气势恢宏, 从远处观看, 是一座雄伟壮观的九层楼阁, 俗称九层楼(图 1 左图), 它是莫高

窟最大的建筑物, 也是莫高窟的标志性建筑。窟内有一尊依山崖而塑的巨型弥勒佛像, 高 35.5 m, 是敦煌石窟中最大的塑像, 在唐代时已称为“北大像”(图 1 右图)。96 窟的营造和建成, 是莫高窟历史上的伟大创举, 也是唐代前期国家强盛、社会稳定和经济繁荣的象征。

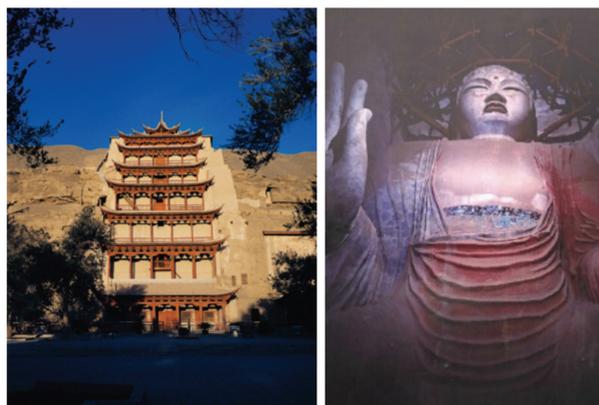


图 1 窟外九层楼和窟内大佛照片

## 2 96 窟数字化思路与方法

### 2.1 总体技术思路

扫描前收集 96 窟相关资料, 了解石窟周边环境、建筑的结构和大佛营造基本情况等信息, 接着

**收稿日期:** 2023-12-22

**基金项目:** 甘肃省自然资源厅领军人才培养项目(202211)

**作者简介:** 李克恭(1971—), 男, 甘肃甘谷人, 副院长, 正高级工程师, 研究方向为自然资源监测、多源遥感数据应用、新型基础测绘和技术管理; 汪万福(1966—), 男, 甘肃甘谷人, 博士, 副部长, 研究员, 研究方向为干旱区环境与文物保护科技及文物保护修复等。

实地察看现场情况,结合所采用的扫描仪性能和参数指标,制定具体的扫描实施方案,合理规划设站点和标靶位置。外业开始扫描前,首先完成仪器的架设,并进行参数的设置,确定扫描范围,扫描结束后,在内业对点云数据预处理,包括点云数据的拼接、合并、消噪等工作<sup>[3]</sup>,为三维立体模型重构和纹理映射,提供精确可靠的点云模型,这样也可以加快立体模型重构的速度、降低立体模型重构的难度,提高重构后立体模型的准确度,接着开展点云数据的重采样、修补、模型简化和纹理映射等工作,建立三维立体模型。同时,对拍摄的照片饱和度、亮度、纹理细节、遮挡杂色等进行处理,为后期模型纹理映射做准备<sup>[4]</sup>。

## 2.2 技术路线流程

96窟数字化技术路线流程分为前期准备、数据获取和数据处理三个阶段,如图2所示。

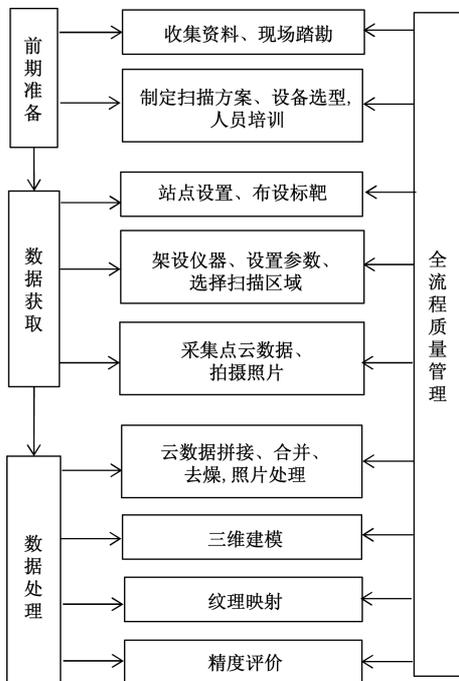


图2 数字化技术路线流程

## 2.3 数据采集

### 2.3.1 扫描仪选择

96窟数字化扫描采用了美国 Faro focus 3DX 130 三维激光扫描仪,扫描距离 0.5~130 m。扫描速度最大 976 000 点/s,精度为 0.6 mm(10 m 处 90%反射率),系统测距误差±2 mm,角度分辨率为 0.009°,集成了具有自动 7 000 万像素无颜色叠加特性的摄像头。该仪器具有操作简单、速度快、精度高、适用范围大等诸多优点,属于无接触式的测

量,可以避免手工测量对文物造成的损害。

### 2.3.2 站点和标靶设置

站点的设置要考虑扫描最佳范围、站点间重叠度、扫描盲区、扫描倾角等影响采集精度的因素。为了保证拼接时的点云精度,两个测站间要 3 个标靶,标靶不能放在一条直线上,在对同一个目标进行扫描时,每个公共标靶应尽可能多地和多个测站点保持通视,减少标靶点的移动次数,96窟共布设了 201 站。图3为一站点扫描现场场景。



图3 扫描现场场景

### 2.3.3 实地扫描

激光扫描仪所采用的工作方式是脉冲激光测距的方法,采用无接触式高速激光测量,以点云的形式获取扫描物体表面阵列式几何图形的三维数据,光斑大小是直接扫描精度的重要因素,激光具有发散性,距离仪器越近,激光光斑越小,所以实际扫描过程中要求扫描仪与目标的距离不能太远,96窟扫描时绝大多数站点都是设置在搭建的脚手架踏板上进行的,距离不超过 10 m。扫描分辨率也是影响扫描精度的重要因素,扫描分辨率决定扫描仪的激光点间距,如果间距太大,就会损失一些空间信息,96窟扫描分辨率设置为 2 mm 为宜。采用内置相机获取影像数据,尽可能保留三维空间信息,建立点云数据和所采集影像在空间上的对应关系,利于后期纹理映射。扫描过程中要尽量减少被扫描目标的材质、表面颜色及粗糙度、扫描入射角等造成的精度影响<sup>[5-6]</sup>。

### 2.3.4 实地拍照

由于后期的建模工作需要很多局部细节的影像,使用佳能 G1X 相机对佛像、立柱、屋檐、兽脊、地砖、雕纹等进行了拍照,作为仪器内置相机拍摄影像的补充,共补充拍影像约 1 200 张,采用的相机分辨率为 4 352×3 264 dpi。拍摄时尽量水平方向拍摄,也要避免逆光拍摄,窟内光线要充足,以获取正射影像数据。

## 2.4 数据预处理

基于标靶位置,实现扫描测站所处坐标系间的转换,完成不同测站的点云数据拼接后合并为一整体,然后进行点云数据中扫描到非目标物产生的多余数据去除、初始点云中的错误点和误差点数据剔除工作,以便于后续的模式重构<sup>[7]</sup>。数据预处理采用 Faro Scene 软件,对数据进行拼接、去噪、抽稀处理,经过统计分析,拼接的最大误差为 $\pm 12$  mm,平均误差为 $\pm 5$  mm。对拍摄影像的饱和度、亮度、纹理细节、遮挡杂色等进行处理,满足正射的要求。

## 2.5 三维建模

三维模型的构建过程分为点阶段、多边形阶段和曲面阶段共三个阶段。采用 Geomagic 软件进行处理,点阶段主要进行着色点、删除体外孤点、删除非链接项、补洞、曲率采样、减少噪声、删除冗余点和封装生成多边形模型等工作,多边形阶段主要进行填充孔、去除特征、光滑打磨、简化多边形、多边形修复、编辑边界等工作,曲面阶段主要进行生成轮廓线、构造曲面片、轮廓线处理、曲面生成等工作,得到光滑逼真的表面模型<sup>[8]</sup>。

## 2.6 纹理映射

采用 Geomagic 软件,将佛像点云数据导入软件,经去噪、抽稀、封装、生成三角网等过程进行三维建模,采用基于 3D Max 平台的 M-cloud 软件进行九层楼结构化的建模<sup>[6]</sup>,采用 Photoshop 软件将拍摄的原始影像转换为正射影像。对九层楼和大佛采用人工交互的方法,基于 3D Max 平台,进行逐面精细映射,最后整体渲染生成三维立体模型,构建的 96 窟九层楼和大佛三维立体模型如图 4 所示。



图 4 96 窟九层楼和大佛立体模型

## 2.7 精度评价

本次扫描精度检测采用比较法,通过实地量测两点距离,以此评价处理完的点云数据精度,本次精度检测共抽查 15 处位置,其中 10 处位置的精度误差在 1 mm 以内,占比为 66.7%,4 处位置的精度误差在 1~2 mm,占比为 26.7%,1 处位置的精度误差在 3 mm,占比为 6.6%,检测点情况分析如表 1 所示。

表 1 检测点情况分析

序号	图片	钢尺量测/mm	点云量测/mm	误差/mm
1	L01	2 686	2 687	-1
2	L02	2 647	2 648	-1
3	L03	1 001	999	2
4	L04	1 043	1 044	-1
5	L05	1 734	1 732	2
6	L06	2 221	2 222	-1
7	L07	1 400	1 399	1
8	L08	2 525	2 522	3
9	L09	2 980	2 981	-1
10	L10	2 345	2 344	1
11	L11	1 330	1 328	2
12	L12	980	980	0
13	L13	1 986	1 985	1
14	L14	1 844	1 845	-1
15	L15	2 940	2 938	2

经过检查对比,处理后的点云数据精度较高,完全满足测量要求,符合预期不超过 $\pm 3$  mm 的要求,达到了 96 窟数字化存档的要求。对于数据处理过程出现的误差,可以通过改善计算精度、降低点转换误差,以及优化模型重构精度等措施,减少精度损失。

## 3 图件制作方法

采用 Geomagic 软件,对点云数据通过平面投影处理,从而得到投影后的平面点云数据,将平面点云数据导入基于 AutoCAD 平台的 Pointcloud 软件,然后绘制二维线图<sup>[7]</sup>,同时将生成的正射影像图导入 CAD 软件作为背景,结合点云数据进行立面图的绘制,弥补点云空缺处。该方法应用提高了图件绘制的可靠性和灵活性<sup>[9]</sup>。图 5 和图 6 展示了绘制的部分图件。

## 4 虚拟展示系统研制

为进一步探索三维扫描数字化成果的社会化应用和共享服务模式和方法,在 96 窟三维扫描数据基础上,采用基于静态图像的虚拟现实技术,实现 96 窟的虚拟展示系统研发,该技术以三维全景概念为核心,通过对三维模型数据加工处理,制作成三

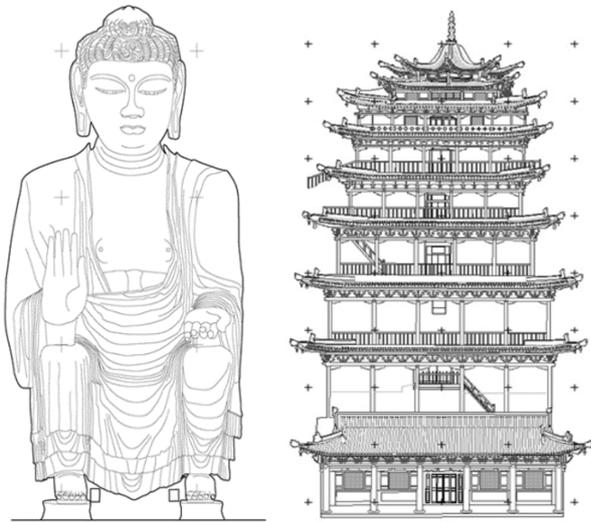


图 5 96 窟九层楼和大佛正立面

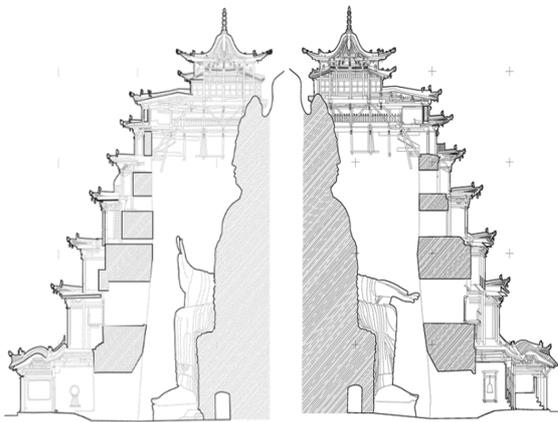


图 6 96 窟九层楼左、右剖面中线

维全景图,再通过虚拟展示系统,实现对 96 窟的 360°浏览,基于鼠标或键盘随意转动图景,或随意改变视角,以此来获得立体空间感觉。该技术手段能够全面、生动、逼真地展示 96 窟,使其脱离地域限制,有效地实现资源共享<sup>[10-11]</sup>。

#### 4.1 技术路线

首先根据前期已经完成的三维模型通过渲染后,导出全景图像,再导入研制的虚拟展示系统平台,基于系统平台嵌入视觉效果、背景解说、Flash、视频等多媒体元素,实现 96 窟的虚拟化展示和信息共享。展示效果如图 7 所示。

#### 4.2 系统功能设计

通过对虚拟化技术特点和展示需求分析,设计系统功能,主要包括 96 窟概览、视图漫游、导航地图、虚拟导游和互动交流等功能。

- (1)96 窟概览:96 窟基本情况介绍。
- (2)视图漫游:通过键盘、鼠标或平台界面功能



图 7 虚拟展示平台效果

按钮,进行视图放大缩小、平移,旋转等功能操作,进行场景浏览。

(3)导航地图:提供地图导示功能,通过点击地图上兴趣点标志,跳转到需要浏览的场景,进行浏览。

(4)虚拟导游:根据虚拟解说员语音引导,漫游到感兴趣位置进行浏览。

(5)互动交流:提供不同文物点信息展示功能,提供点击视图中不同位置热点,显示相关的文字、图片、音频、视频等信息。

#### 4.3 系统功能实现

基于漫游大师软件进行二次开发,实现 96 窟概览、视图漫游、导航地图、虚拟导游和互动交流等功能,系统功能界面及浏览效果场景如图 8~图 10 所示。



图 8 场景切换导图和功能按钮



图 9 九层楼浏览效果场景



图 10 大佛浏览效果场景

## 5 结论

通过 96 窟数字化及虚拟展示应用研究得到以下结论。

(1)验证了三维激光扫描和虚拟现实技术在不可移动文物保护方面应用的前景、应用的可行性。研究认为目前的三维激光扫描技术在精度上,完全能够满足不可移动文物数字化的精度要求,本次扫描整体空间精度优于 $\pm 3$  mm,模型拼接精度优于 $\pm 5$  mm。

(2)对不可移动文物保护实施三维激光扫描数字化,不仅可以真实地留取文物现状信息,建立数字化档案,为将来实施具体的保护工作提供必要的数据库;也可以基于模型数据进行虚拟修复,为修复提供行之有效的建议,也可以通过 3D 打印虚拟修复结果,直接服务于修复,同时记录不同修复阶段重要的文物修复信息数据,为以后再次修复或者同类修复提供科学的参考。

(3)虚拟展示系统的研制不仅从不同方位、角度有效展示不可移动文物全貌,丰富了不可移动文物的展示途径,给人带来身临其境的体验。同时也验证了虚拟现实技术在不可移动文物保护展示、宣传和共享方面的优势,说明该技术具有广泛的应用前景。

## 参考文献

- [1] 牛娜. 三维激光扫描测绘技术在不可移动文物保护中的应用[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2023(17): 32-35.
- [2] 蒋超, 雷桐, 俞琳, 等. 西安韩森寨元代墓室壁画数字化修复方法[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(31): 12922-12926.
- [3] 张玉涛, 孙保燕, 莫春华, 等. 无人机与三维激光扫描融合的拱桥三维重建[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(6): 2274-2281.
- [4] 李勇兵, 高成明, 马盈盈, 等. 三维激光扫描技术在隧道变形监测及检测中的应用[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(12): 5111-5117.
- [5] 朱宇华, 徐睦, 乜小珂. 基于三维激光扫描技术的古代城台及城楼的结构变形监测与分析方法研究[J]. 北京建筑大学学报, 2022(2): 68-73.
- [6] 陈超. 三维激光扫描技术在古建筑测绘建档与结构变形分析中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2022, 45(5): 87-90.
- [7] 王莉, 周佳薇, 王泓森, 等. 基于三维激光扫描技术的古塔变形监测[J]. 测绘通报, 2020(7): 120-124.
- [8] 胡玉祥, 范珊珊, 孙晓丽, 等. 基于三维激光点云的古建筑 BIM 建模方法研究[J]. 城市勘测, 2020(3): 98-102.
- [9] 张丽霞, 郇琛依, 阮成成, 等. 三维激光扫描技术在建筑物立面图测绘中的应用研究[J]. 城市勘测, 2023, 38(2): 144-147.
- [10] 王绚. 基于虚拟现实技术的乡村振兴数字展馆设计与实现[J]. 数字技术与应用, 2023, 41(6): 204-206.
- [11] 刘欣. 博物馆陈列展览数字化中应用 VR 全景技术的实践研究[J]. 文物鉴定与鉴赏, 2021(11): 139-141.

## Digital and Virtual Display of Immovable Cultural Relics Protection: Taking Cave 96 at Dunhuang Mogao Grottoes as an Example

LI Kegong<sup>1</sup>, WANG Wanfu<sup>2</sup>

(1. Survey and Mapping Engineering Institute of Gansu Province, Lanzhou 730030, China;

2. Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, Gansu, China)

**Abstract:** The digitalization of cultural relics can not only record the status quo of cultural relics in a salvageable manner, but also realize the transformation of cultural relics resources from material resources to digital resources, laying a foundation for immovable cultural relics and the cultural information they carry to the public in the digital era, to participate in education and value construction, and to participate in the mutual learning of civilizations in the world. By studying the application of 3D laser scanning and virtual reality technology in the digitalization and virtual display of immovable cultural relics protection, and taking Cave 96 of Mogao Grottoes in Dunhuang as an example, the scientific nature, rationality and operability of the technical routes and methods formed were verified. The results prove that the results can provide reference for other immovable cultural relics protection digitization and virtual display.

**Keywords:** immovable cultural relics; preservation digitization; virtual display