

# 激光扫描与3D打印在文物保护中的应用

张勇<sup>1,2</sup> 王长科<sup>1,2</sup> 原瑞红<sup>1,2</sup>

(1. 中国兵器工业北方勘察设计研究院有限公司, 河北石家庄 050011;

2. 河北省地下空间工程岩土技术创新中心, 河北石家庄 050011)

**【摘要】** 利用三维激光扫描和3D打印技术相结合可助力文物保护及修复。激光扫描具有非接触快速获取海量目标表面点云数据的先天优势,可弥补常规文物数字化方法的局限性。以赵州桥为例,详细阐述利用激光扫描加3D打印技术在文物保护中的基本工艺流程,解决传统文物数字化信息留存及精准复原的难题,以研究三维激光扫描在文物保护中的特殊应用。

**【关键词】** 激光扫描;3D打印;文物保护;数字化

**【中图分类号】** P 225. 2

**【文献标识码】** A

doi: 10. 3969/j. issn. 1007-2993. 2020. 05. 003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Application of Laser Scanning Combined with 3D Printing in the Protection and Restoration of Cultural Relics

Zhang Yong<sup>1,2</sup> Wang Changke<sup>1,2</sup> Yuan Ruihong<sup>1,2</sup>

(1. China North Industries Norengo Co., Ltd., Shijiazhuang 050011, Hebei, China;

2. Hebei Underground Space Engineering Technology Research Center, Shijiazhuang 050011, Hebei, China)

**【Abstract】** Laser scanning and 3D printing could be used in the protection and restoration of cultural relics. Considering the limitations of the traditional digital methods of cultural relics, the non-contact and rapid acquisition of massive target surface data by laser scanning has outstanding advantages. Taking the Zhaozhou Bridge as an example, the basic technological process of using laser scanning and 3D printing technology in cultural relics preservation is elaborated, and the problem of digital information retention and accurate restoration of traditional cultural relics is solved. The special application of laser scanning and 3D printing in cultural relics preservation is studied.

**【Key words】** laser scanning; 3D printing; cultural relics protection; digitization

### 0 引言

文物是国家宝贵的历史财富,对历史研究、科学指导等方面具有十分重要的意义。然而随着时间的推移,文物的损坏往往不可避免,其中既包括文物本身的自然风化,也包括意外损毁。2019年4月,法国巴黎圣母院遭遇到有史以来最严重的火灾,教堂顶部的木质结构被全部摧毁,只留下石质的残垣断壁,损失巨大。值得庆幸的是,在被损毁之前,巴黎圣母院的数字化三维点云模型已经被电子存档,为巴黎圣母院损毁部分的重建提供充足且精准的数据支撑,依据现有数据,可逐一对被损毁部分进行修复还原。激光扫描及数字化三维存档模型可助力文物

保护及修复,并保证修复还原的真实度和精度。吴育华等<sup>[1]</sup>、马宏毓等<sup>[2]</sup>从技术发展、工作原理和成果等方面总结了三维激光扫描仪在我国文物保护领域的应用。张晓青等从三维激光扫描和建模的相关技术等方面研究了3D打印在文物重建中的应用<sup>[3]</sup>。本文从三维激光扫描和3D打印两种技术结合的角度来阐述文物保护数字化基本工艺流程,以解决传统文物数字化信息留存及精准复原的难题。

### 1 工作原理

激光扫描采用非接触扫描的方式,可以快速获取目标表面的海量数据,在文物保护工作方面具有突出优势。三维激光扫描主要通过高速激光扫描测量的

**基金项目:** 石家庄市重点研发计划项目(191130501A)

**作者简介:** 张勇,男,1989年生,汉族,河北石家庄人,工学硕士,工程师,注册测绘师,主要从事测绘与地理信息、三维激光扫描、3D打印方面的科研工作。E-mail:1158373292@qq.com

方法,以点云形式获取物体表面的阵列式几何图像数据。由传统测量获取的数据最终都是二维形式,通过图纸呈现。不同于传统测量,由三维激光扫描最终获取三维形式的数据,不仅包含平面位置和高程的信息,也同时包含 RGB 颜色以及被测对象的反射率信息。因此,三维激光扫描所获取的信息非常全面。

三维激光扫描仪利用激光作为发射光源,对物体依照一定的水平和竖直扫描分辨率来测量,采用非接触方式来获取被测量物体的表面数据。空间点位坐标计算的原理如图 1 所示,利用激光获取被测物体至扫描中心的距离  $S$ ,然后利用内置在设备内部的精密时钟控制编码器同步测量每个激光脉冲横向扫描角度观测值  $\alpha$  和纵向扫描角度观测值  $\beta$ ,被测点的空间三维坐标则可以通过空间三维几何关系利用一个线元素和两个角元素来计算空间点位的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标。通过三维激光扫描获取的数据通常采用设备内的独立坐标系, $X$  轴在横向扫描面内, $Y$  轴在纵向扫描面内与  $X$  轴垂直, $Z$  轴与横向扫描面垂直。

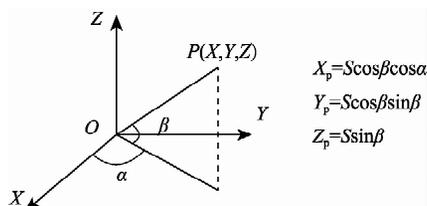


图 1 空间点位坐标计算原理图

3D 打印技术就是打印三维物体,利用切片后重建还原轨迹的方式,高温熔化原材料跟随轨迹堆积的原理来复原数字化模型。3D 打印技术出现在 20 世纪 90 年代中期,实际上是利用光固化和纸层叠等技术的最新快速成型装置<sup>[4]</sup>。它与普通打印工作原理基本相同,打印机利用金属、陶瓷、塑料、砂等不同材质的原材料,与计算机连接后,通过计算机控制切片轨迹,把原材料逐层按轨迹自下而上叠置,最终把计算机上的扫描数字化三维电子模型变成实物。

## 2 技术优势分析

三维激光扫描具有速度快(每秒近 100 万个点)、不需接触目标(非接触测量)、数据量大、精度高等特点。其中,非接触测量可以获取被测物体表面海量数据,有效地避免了文物数字化过程中对文物造成接触式损害。同时,无论被测目标结构多么复杂,都可以按照原貌进行采集。三维激光扫描的测量精度可达毫米级甚至亚毫米级,可以精准记录文物原貌并获取高精度的三维数字化模型进行存档。利用 3D 打印技术,可以对扫描后已经存档的高精

度数字化文物进行适当调整与修改,利用 3D 打印机将模型打印,再对模型进行抛光、着色等后期处理,获得文物的副本。3D 打印技术的优势在于成模速度快,模型还原精度高,可以和激光扫描无缝对接<sup>[5]</sup>。因此,将三维激光扫描和 3D 打印技术相结合应用于文物的数字化及还原具有独特的优势。

## 3 基本工艺流程

利用三维激光扫描和 3D 打印相结合的方式助力文物数字化及复原领域是目前主流的发展趋势。被测目标具有距离短、精度需求高等特点,应用于文物保护的三维激光扫描通常选取手持式或者站式且以相位差原理获取目标的仪器设备。基本工艺主要包括标靶布设、数据获取、模型拼接、模型处理、模型切片、3D 打印等多个环节,如图 2 所示。以赵州桥为例,阐述不同阶段相关工艺流程。



图 2 基本工艺流程图

### 3.1 标靶布设

在桥体周围均匀布设球形标靶,每相邻两测站之间布设不少于 3 对。3 对球形标靶位于高低不同的位置,错落有致,避免安置到同一条直线上,以避免后期找不到相邻数据同名点配准依据。

### 3.2 数据获取

选取合适角度,架设站式三维激光扫描仪,在设备上设置好扫描的分辨率以及相机拍摄的方式,控制扫描时间,对目标进行 360°无定向扫描。目标扫描完成,查看标靶球扫描的精度,确认是否满足利用表面点云拟合出球心坐标的条件,如若精度不够,需要对球形标靶进行高分辨率定向扫描。反复查看,直到满足拟合球心条件为止。

### 3.3 模型拼接

根据激光扫描工作原理,相邻测站获取的数据都处于不同的独立坐标系下。需要利用 ICP 等相关算法原理进行多站数据的坐标统一,即通过计算出相邻测站点云数据之间的旋转矩阵来完成模型配准,得到完整的桥体点云模型。

### 3.4 模型处理

对配准后得到的桥体点云模型进行去噪、精简、分割、特征提取处理后,对表面数据进行模型重建<sup>[6-7]</sup>,对曲面类文物而言,模型重建通常采取利用点云构建格网的方式。该方法精度高,曲面贴合性好,自动化程度高。对重建后的桥体格网模型进行磨皮、

补洞、网格修复、平滑、锐化、纹理映射等处理,得到桥体的数字化三维电子模型并进行存档,保存到数据库中。

### 3.5 模型切片及3D打印

利用3D打印技术,将已存档的高精度数字化电子文物模型进行适当调整与修改,利用计算机进行模型切片,计算打印还原轨迹,生成G代码。根

据文物的材质类型选取相应的3D打印机和原材料,将G代码输入到3D打印机中,打印机利用喷头高温熔化原材料跟随轨迹进行逐层堆积的原理将数字化模型复原为实物。该实物可以用于真实文物损坏部分的修复,也可以代替真实文物用于参观展览。

赵州桥分阶段工艺成果如图3所示。

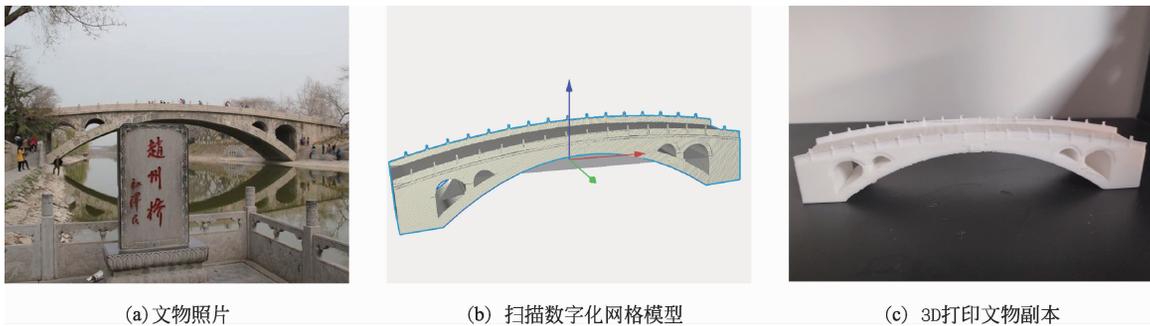


图3 基本工艺分阶段成果图

### 3.6 数据补充修复

在利用站载式三维激光扫描仪进行扫描时,难免会产生数据漏洞,而数据的缺失会对数字化模型的建立及3D打印带来困难。可通过两种手段解决此类问题。一种是除了单一使用站载式扫描之外,配合手持三维激光扫描同步进行,扫描角度问题造成的数据漏洞可通过手持式扫描仪来补充,灵活方便。另一种是在数据处理过程中,对缺失的数据进行补充修复,包括网格优化、孔洞填充、平滑锐化等手段。其中,孔洞填充最为关键,包括曲率、切线、平面、内部孔、边界孔、搭桥等多种方法。

与传统的修复方法相比,通过三维激光扫描获取高精度的数据,可以建立更加逼真的数字三维模型,利用软件进行虚拟修复,提供多种修复效果比选,以此为依据来完善真实修复方案。虚拟修复主要包含文物材料体补缺、彩绘修复、纹理复原等。

经过修复,模型变得平滑光滑且轮廓清晰(见图4、图5)。

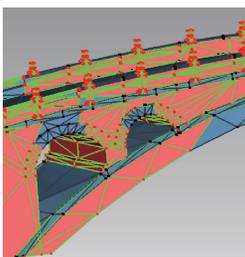


图4 赵州桥三维模型数据修复前



图5 赵州桥三维模型数据修复后

## 4 结论与展望

### 4.1 结论

通过三维激光扫描与3D打印技术相结合,阐述了文物保护及修复的现状、工作原理、基本工艺及其优势。三维激光扫描修复文物不仅复原的精度高,而且能在文物数字化过程中有效避免对文物造成二次伤害。该工艺在文物保护及修复领域具有独特优势,可以解决传统文物数字化信息留存及精准复原的难题。目前,敦煌莫高窟雕塑相继利用激光扫描以及3D打印技术实现了文物的数字化存档及文物再现,技术正在逐步成熟,工艺的多样化正在逐步完善。

### 4.2 展望

目前需要进一步解决的问题是3D打印原材料的多样化、3D打印机的喷头数量以及3D打印的体量,进一步提高3D打印的效率和实用性。与此同时,可以在激光扫描结合3D打印技术的基础上融入高光技术,将激光扫描得到的高精度模型和近景摄影测量获得的高精度纹理相融合,可以实现文物模型及色彩的高精度双重还原及修复,这对文物保护及修复具有十分重要的实践意义。经过扫描数字化存档的电子点云文物模型可以存储到数据库中,通过互联网及云存储技术,结合虚拟现实VR技术,构建网上数字博物馆,使游客足不出户即可实现网上参观浏览。3D打印后的文物副品,也可以用于实际展览及相关行业的主题教育。该技术的推广应用具有十分重要的意义。

(下转第267页)

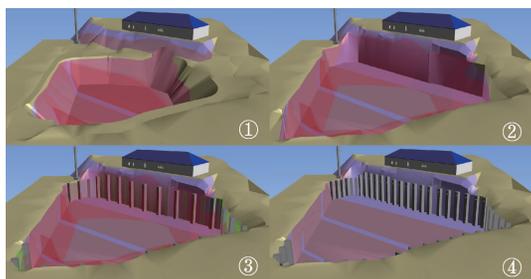


图 10 基坑工程施工模拟图

## 7 结论

(1) 基于 BIM 技术建立三维可视化基坑工程模型, 对基坑支护结构及其所处的地质条件有更精细的表达和更直观的展示; 在城建密集区完成相邻建筑基础的碰撞检查, 有效保障施工安全; 实现了二维出图、三维展示和精确算量, 在岩土分布不均、边坡支挡结构多样、建设环境复杂、施工工序繁杂、工期紧张的山地基坑工程中有较高的应用价值。

(2) 基于 BIM 技术建立的基坑工程三维地质-设计耦合模型, 可实现一次建模、多次出图、一处修改、联动更新, 避免了在传统二维设计中出现的各图件、算量的修改不统一、不对应, 对设计施工产生误导的情况, 大大提高了工程管理效率。

(3) 基于 Navisworks 时间轴功能, 完成了基坑分期开挖、分段支护的施工全过程模拟, 为施工决策提供了技术支撑。

(4) 本次完成了基于 BIM 技术的山地基坑工程三维可视化应用, 下一步将进行与岩土计算分析结

合的研究, 进一步完善 BIM 技术在建筑全生命周期的应用。

## 参 考 文 献

- [1] 王 珺. 基于 BIM 理念及 BIM 软件在建设项目中的应用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [2] 何清华, 钱丽丽, 段运峰, 等. BIM 在国内外应用的现状及障碍研究[J]. 工程管理学报, 2012, 26(1): 12-16.
- [3] 吴清平, 时 伟, 戚铎钟, 等. 超大深基坑 BIM 施工全过程模拟与分析研究[J]. 工程建设: 2013, 45(5): 20-24.
- [4] 慕冬冬, 付晶晶, 胡正欢, 等. BIM 技术在深基坑工程设计中的应用[J]. 施工技术, 2015(SI): 773-776.
- [5] 刘 续, 刘志浩, 雷志娟. BIM 在岩土工程中应用探索—以武汉亚洲医院基坑工程为例[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(2): 85-88.
- [6] 谭 佩, 陈立朝, 周龙翔. BIM 技术在深基坑施工中的应用[J]. 广州大学学报: 自然科学版, 2016, 15(1): 64-68.
- [7] 杨 敏, 赵 军. BIM 技术在深基坑工程中的应用探讨[J]. 工程地质学报, 2014, 22(SI): 407-412.
- [8] 戴一鸣, 任 彧. 探讨 BIM 在工程勘察应用的可行性[J]. 岩土工程技术, 2016, 30(1): 6-11.
- [9] 刘 莉, 李国杰, 乔伟刚. 基于 Civil 3D 的三维地质建模方法及应用[J]. 水运工程, 2018(8): 140-144.

收稿日期: 2019-12-12

(上接第 262 页)

## 参 考 文 献

- [1] 吴育华, 王晏民, 胡云岗, 等. 大足石刻千手观音三维测绘与信息留取[C]//大足石刻国际学术讨论会论文集保护篇, 2009: 84-91.
- [2] 马宏毓, 赵 新. 三维激光扫描技术及 BIM 技术在建筑保护测绘中的应用[J]. 岩土工程技术, 2019, 33(4): 222-225.
- [3] 张晓青. 3D 打印技术应用于文物复制的可行性研究[D]. 北京: 北京印刷学院, 2015.
- [4] 林 楠. 3D 打印的前世与今生[J]. 设计, 2018(18): 94-95.
- [5] 韩文泉, 胡伍生, 陈 昕, 等. 地下空间激光扫描点云精度对比分析[J]. 测绘通报, 2017(12): 72-76.
- [6] 宗立成. 文物三维数字化设计及其实验方法研究[J]. 文物保护与考古科学, 2018, 30(3): 127-132.
- [7] 宋德闻, 赵培洲, 沈耀成, 等. 在文物考古部门开展的近景摄影测量工程[J]. 测绘通报, 1986(6): 24-28.

收稿日期: 2020-03-05