

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201702021



宋代古船的三维激光扫描技术重建 与模型 3D 打印

何原荣^{1,2,3}, 潘火平¹, 陈鉴知⁴, 郑渊茂¹

(1. 厦门理工学院 计算机与信息工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 中国科学院 城市环境与健康重点实验室, 福建 厦门 361024;

3. 中国科学院 城市环境研究所, 福建 厦门 361024;

4. 贵州财经大学 管理科学学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 针对古文物的完整有效保存, 文物研究、修复, 以及其可能造成的毁损, 提出采用三维激光扫描技术对文物进行数字化重建, 构建文物真实三维模型, 并通过 3D 打印技术制作文物的高精度实体复原模型。以宋代古船实体模型重建为例, 对所提出的方法进行验证, 研究结果表明: 三维激光扫描技术和 3D 打印技术可以提高文物历史信息的保存和修复效率, 避免接触式测量文物造成的表面损坏, 提高研究人员对文物分析研究的参与度。但是, 对于表面纹理比较复杂的文物, 这项技术依然存在精度上的缺陷。

关键词: 三维激光扫描技术; 文物保护; 3D 打印技术; 点云数据; 宋代古船

中图分类号: P 234.4; G 264

文献标志码: A

文章编号: 1000-5013(2017)02-0245-06

Reconstruction of Song Dynasty Ancient Ship Based on 3D Laser Scanning Technology and Model 3D Printing

HE Yuanrong^{1,2,3}, PAN Huoping¹,
CHEN Jianzhi⁴, ZHENG Yuanmao¹

(1. School of Computer and Information Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;

2. Key Laboratory of Urban Environment and Health, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361024, China;

3. Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361024, China;

4. School of Management Science, Guizhou University of Finance and Economics, Guiyang 550025, China)

Abstract: In view of the present archaeological research in cultural relics information storage and replication is not accurate rapid aspects, this paper puts forward the relics replication using 3D laser scanning technology, then establishing the 3D model, and producing solid model by 3D printing technology. The Song Dynasty ancient ship entity model is reconstructed as an example, to validate the effectiveness of the technology. The results show that the 3D laser scanning technology and 3D printing technology can improve the efficiency of storage and replication of historical relics, reduce the damage to the surface of the cultural relics due to the touching detection, and enhance researcher's participation in cultural studies. But in view of the complex surface texture artifacts, this technology still has some defects in accuracy.

Keywords: 3D laser scanning technology; cultural relics conservation; point cloud; 3D printing technology; point cloud data; Song Dynasty ancient ship

收稿日期: 2017-02-14

通信作者: 何原荣(1977-), 男, 副教授, 博士后, 主要从事地图制图学与地理信息工程的研究。E-mail: heyuanrong@126.com.

基金项目: 福建省自然科学基金面上资助项目(2016J01199); 福建省测绘地理信息科技创新项目(2015J14)

文物是古人生活的一个缩影,蕴含着丰富的历史文化信息,是研究古人生活和社会发展进程的重要资料^[1]. 尽可能地保护好古文物上面存有的历史信息,同时,使得古文物上的历史信息可以更好地服务于现代社会,成了现在考古学亟待解决的一个问题. 三维激光扫描系统是一种集成了多种高新技术的三维坐标测量仪器,采用非接触式高速激光测量方式,以点云形式快速获取被测对象表面的阵列式几何图形的单位数据. 它可以将珍贵古文物的几何、颜色、纹理等信息记录下来,构建虚拟的三维模型,大大降低数据采集、建模的时间成本和人工成本,为古代文物的保护提供革命性的新途径^[2]. 国内外很多学者已经把三维激光技术应用到文物保护中,刘旭春等^[3]把三维激光技术运用到古建筑的建模中. 白成军等^[4]把三维激光技术和传统测绘技术相结合,对古建筑进行测绘. 曹力等^[5]把机载、地面三维激光技术与高分辨数码影像相结合,建立了山海关长城的三维模型. 虽然目前三维激光技术在考古学中已经应用得相当广泛,但是利用三维激光技术建立三维模型,并制作实体模型的研究还是相对较少^[6-7]. 本文应用三维激光扫描技术建立宋代古船的虚拟数字化三维模型,并用 3D 打印技术制作了古船的实体模型.

1 外业数据采集

数据采集流程主要包括控制测量、扫描站布测、标靶布测、设站扫描、纹理图像采集、外业数据检查、数据导出备份,如图 1 所示. 控制测量主要应用于需要精确确定目标地理坐标,文中研究不需要绝对地理坐标,故忽略此步骤.

1.1 古船典型特征

1974 年 8 月,在中国的首次大型海湾考古发掘工程中,在福建泉州港发现了一艘宋代的古船,如图 2 所示. 古船一经发现,便引起了海内外考古界的轰动,被誉为“世界考古珍闻”. 该古船残长为 24.4 m,残宽为 9.15 m,排水量近 400 t,载量 200 t,是一艘首部尖、尾部宽、高尾尖底“福船”类型的海船. 这艘古船采取水密隔舱技术,即用隔舱板将古船舱体分成 13 个独立舱区. 当沉船被打捞上岸后,该船令在场所有的专家都叹为观止. 重新面世时,这艘船满载着珍贵的历史文物. 这批文物共计 14 类 69 项,包括香料药物、陶瓷器、铜铁器等,泉州湾发掘的古船具有重要的研究价值和历史意义. 因此,对该文物的研究和保护提出了新的课题. 传统上利用相机获取文物的照片,进行保存,但是利用照片无法精确地获取到文物的几何纹理等信息,更无法捕获周围的信息,在文物细节还原方面更是没有可行性. 所以,传统的测量方式无法对古船的全部信息进行高精度提取,阻碍了人们对古船的研究进度,也阻碍对古船进行数字化保护^[3]. 鉴于古船不允许上船架设仪器设备进行测量,文中以宋代古船为研究对象,利用三维激光扫描技术对船体进行了扫描,然后使用了 FAROScene 和 Geomagic 等专业软件对扫描点云进行数据处理,并进行三维建模.

1.2 扫描现场踏勘

在对目标进行扫描之前,需要对目标进行现场踏勘. 观察目标的地理位置和扫描环境,从而制定扫描计划确保扫描工作顺利进行. 扫描的古船位于泉州市开元寺内的古船博物馆中,船身使用铁架架起,高度在 2.5 m 左右. 场馆共有两层,从二楼可以扫描到船体内部. 初步预计扫描站数为 9 站,一层布设 5 站,二层布设 4 站,如图 3 所示. 具体的扫描站数可能会增加或者减少,在一些细节的获取方面需要更多

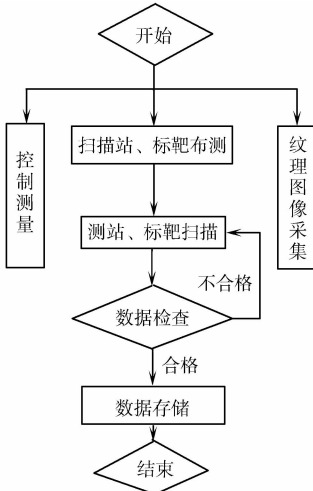


图 1 数据采集流程
Fig. 1 Data acquisition scheme



图 2 宋代古船实体
Fig. 2 Song Dynasty ancient ship entity

的点云数据。

1.3 外业扫描

外业扫描主要分为测站与标靶布设、设站扫描。Farofocus 3D 地面三维激光扫描仪对标靶(靶球)的精确识别距离约为 15 m,所以在布设时要注意靶球和测站之间的距离。标靶布设应符合如下 3 点要求:1) 标靶应在扫描范围内均匀布置且高低错落;2) 每一扫描站的标靶个数不少于 4 个,相邻两扫描站的公共标靶个数不少于 3 个;3) 明显特征点可作为标靶使用。

合理布设靶球后,即可进行设站扫描。扫描站的布设应符合如下 4 点要求:1) 扫描站应设置在视野开阔、地面稳定的安全区域;2) 扫描站扫描范围应覆盖整个扫描目标物,均匀布设,尽量减少设站数目;3) 目标物结构复杂、通视困难或线路有拐角的情况应适当增加扫描站;4) 需要搭建平台时,应保证平台稳定和仪器、人身安全。

点云数据采集时,要将仪器放置在观测环境中 30 min 以上,再开始作业。扫描站点布设要满足相邻站间有效点云重叠度不低于 30%,困难区域不低于 15%的要求。设有标靶的测站应进行标靶的识别与精确扫描,确保点云数据精确拼接。扫描作业结束后,应将扫描数据导入电脑,检查点云数据覆盖范围完整性、标靶数据完整性和可用性。对缺失和异常数据,应及时补扫。

纹理图像采集可根据应用需要选取,采集时应注意以下 5 点要求:1) 图像的拍摄角度应保持镜头正对目标面,无法正面拍摄全景时,先拍摄部分全景,再逐个正对拍摄,后期再合成;2) 宜选择光线较为柔和、均匀的天气进行拍摄,避免逆光拍摄,能见度过低或光线过暗时不宜拍摄;3) 相邻图像之间应保证有不小于 30%的重叠区域;4) 采集图像时,应绘制图像采集分布图;5) 纹理颜色有特殊要求时可使用色卡配合拍摄。

2 点云数据预处理

数据预处理流程包括点云数据配准、坐标系转换、降噪与抽稀、图像数据处理、彩色点云制作等。经过外业扫描,得到了古船的点云数据。但是,这些点云数据还不能用于建模,还要对点云数据进行进一步处理。即需要经过靶球识别、点云配准和降噪抽稀等步骤之后,才能得到古船的点云模型,如图 4 所示。

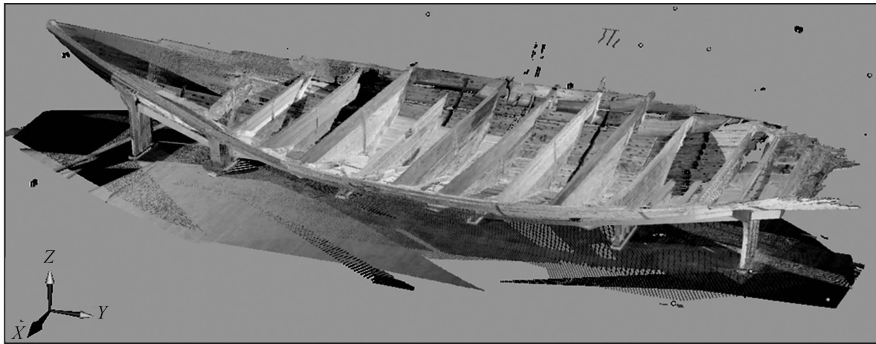


图 4 宋代古船的点云模型

Fig. 4 Point cloud model of Song Dynasty ancient ship

3 古船三维建模

古船完整的点云数据经预处理后,接下来进行古船三维建模。该古船船体不规则,需采用 Geomagic

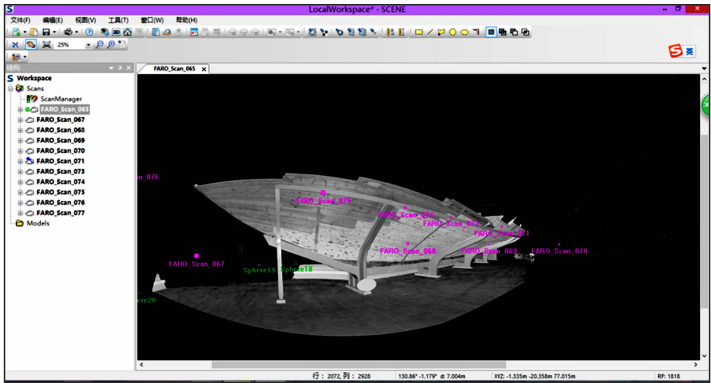


图 3 宋代古船扫描站布设现场

Fig. 3 Scanning station distribution of Song Dynasty ancient ship

软件辅助建模. 将拼接去噪的点云数据再进行一次点云数据优化^[8], 即通过统一采样、减少噪音等操作对点云数据再次细化去噪, 处理后的点云进行封装、建模. 因为是根据点云数据进行自动建模, 所以在曲面复杂而点云稀少或缺失的地方构建的模型会出现错误或者实体面缺失, 此时, 需要对模型进行人工修复.

首先, 调整模型法向. 由于点云数据的缺失会导致封装后的模型有些地方会内外相反, 在模型修复阶段, 法向相反的两部分进行搭桥时会出现拟合三角面扭曲的现象, 导致无法进行漏洞填补, 会让模型的修复工作开展困难. 因此, 要对法向相反的地方进行法向的旋转. 在旋转之前将要进行法向旋转的部分与整体进行分割, 否则, 会导致整体法向也随之旋转^[9].

其次, 对模型的烂面或重叠面现象, 通过三角形删除、曲面光滑、孔填充和边修补技术等进行人工修复. 在修复时要顺着模型本身的纹理和纹路去修复, 以免人为破坏模型, 导致模型失真. 在修补缺口较大的漏洞时要遵循由大到小的原则, 利用填补功能中的搭桥操作将大缺口隔离成为一个个小型缺口, 然后再进行全部填补的操作.

最后, 使用网格医生功能对整个填补完的模型进行全面的修复^[10], 该功能会对一些自相交的三角面和未填补的微小漏洞进行修复, 在修复完成后就可以得到所需要的最终成果, 如图 5 所示. 模型在建完之后, 可以通过软件将模型导出, GEOMagic 支持多种的三维格式输出, 输出后可用于 3D 打印和贴图展示等.

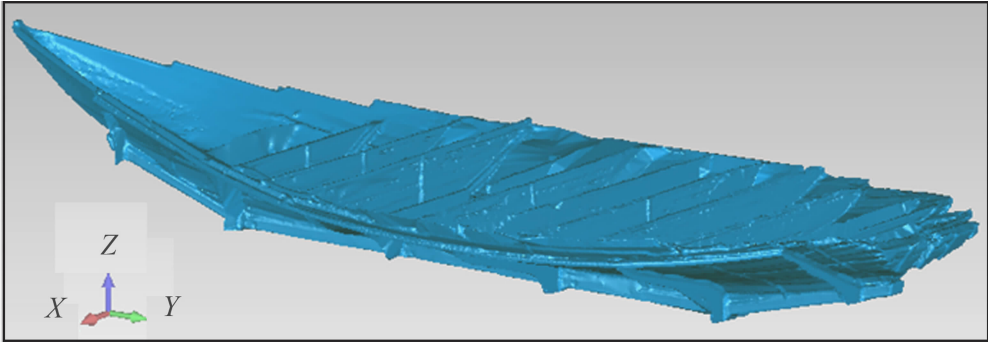


图 5 宋代古船的三维重建模型
Fig. 5 3D reconstruction model of Song Dynasty ancient ship

4 古船模型 3D 打印

3D 打印技术是快速成型技术的一种, 它是一种以数字模型文件为基础, 运用粉末状金属或塑料等可粘合材料, 通过逐层打印的方式来构造物体的技术. 在模型应用方面, 3D 打印技术使模型有了更加广泛的用途.

为文物安全性和永久保存考虑, 可以利用 3D 打印技术, 通过工业级 3D 打印机将文物按 1 : 1 比例打印文物的 3D 模型进行展览. 展品色彩、模型体积与实物高度吻合, 达到逼真效果. 文物爱好者也可以通过 3D 打印技术打印成品, 购置回家欣赏.

4.1 模型完整性检查

在打印之前首先要对模型的完整性进行检查. 不完整的模型打印机是无法进行工作的. 打印前模型有必备的如下 4 个条件. 1) 数据模型必须是由封闭的几何体构成. 2) 将模型调到原点坐标 (0, 0, 0). 3) 将模型缩放到打印输出尺寸. 4) 将单位修改为英寸或者毫米.

模型完整性检查可以借助软件, 也可以进行人工操作. 随着 3D 打印技术的发展, 出现了许多可以对模型进行检查的软件, 如 Mini Magics 可以帮助检查模型是否符合打印标准. 在软件中, 不符合规范的地方会以红色提示. 发现问题所在后, 可以在 Geomagic 软件中对模型出现红色的地方进行再修复.

4.2 模型曲面化操作

在打印大型的 3D 展品时, 需要对模型进行曲面化操作^[11]. 大型 3D 打印机所匹配的软件为 SolidWorks 软件. 逆向工程软件 Geomagic Studio 与 CAD 软件、SolidWorks 之间的数据转换和共享也需要

对模型进行处理.

SolidWorks 软件较好地支持和匹配的格式为 stp 和 igs 模型. 当模型是由曲面片组成的时候才能保存为这两种格式, 所以要在 Geomagic 软件中对模型进行曲面处理. 首先, 对整个对象进行“探测速率”操作, 如果细节要求较高, 则可考虑将敏感性参数设为“0”, 然后进入曲面片编辑过程.

在曲面片编辑过程中, 应结合“构造网格”命令进行检查. 对于检查出来的相交区域或相交路径^[12], 可使用“编辑曲面片”、“移动面板”及“绘制曲面片布局图”命令来解决. 如果经检查后没有相交区域, 就可以进入“网格阶段”命令. 一般情况下, 通过曲面片编辑处理后, 网格阶段不必进行修整即可直接进入“拟合曲面”命令. 在拟合曲面过程中, 建议使用“常数”选项. 该选项允许修改拟合后的曲面, 为了追求最好的细节, 可将表面张力调到最小, 控制点数目调到最大. 在进行完上述步骤后, 即可将模型保存为 stp 或 igs 格式.

4.3 模型 3D 打印

将模型输入到 3D 打印机之后就可以开始打印, 打印大概分为 3 个步骤: 设置打印参数、清理原来的打印材料和执行打印任务^[13].

打印时间取决于模型大小、打印质量及模型复杂度等参数. 打印过程中要确保电源接通, 如果出现断电或者机器故障使得打印停止, 那么打印任务失败. 在打印过程中, 仍然可以操作控制屏幕查看参数, 但是最好不要修改参数, 否则, 容易出现打印故障; 如果要停止本次打印, 可以回主菜单选择打印暂停 (打印进度会被保存, 重新开始打印后, 可以接上原来的进度, 但是会在暂停处形成一个熔化点, 接着打印下去, 模型衔接不上, 可能会成为废品) 或停止打印 (此时, 正在打印的数据会清零, 下一次开始打印的时候, 上一次打印的进度不会被保存), 所以无论停止打印或者是暂停打印效果是一样的. 正确设置打印参数和打印材料后, 最后得到了古船的模型, 如图 6 所示.



图 6 古船 3D 打印成品
Fig. 6 3D printing product of ancient ship

5 结论

通过对古船的扫描、建模和 3D 打印, 可以清楚地看到三维激光扫描技术和 3D 打印技术在文物保护和考古工作方面的优势^[14], 不仅可以迅速地存储文物蕴藏的历史信息, 还可以使该历史信息反复利用, 并减少文物表面的破坏. 相关的工作人员不但可以利用这两项技术对古文物进行快速的复制和相关信息的存储^[15], 更可以将该手段运用到古文物的复原和仿真中. 尽管这两项技术在各方面的应用已经日趋成熟和广泛, 但在文物保护和考古工作中依然存在着一定的局限性, 表现在以下 4 点结论.

1) 单独的三维激光扫描只能提供精确的物体空间几何信息, 对于文物表面细微纹理和色彩信息的提取仍有所欠缺^[16]. 虽然现在部分扫描仪已可以提取扫描对象表面的色彩信息, 但其精度还达不到要求, 对于表面图案纹理要求较高的工作来说, 还是需要和其他的测绘技术和信息采集手段相结合.

2) 三维激光扫描因其射线不具有穿透性, 扫描对象表面反射率将会严重影响扫描的效果. 比如在古船复原工作中, 由于船上有多个仓, 而每个仓的内部又有许多凹凸以及细小纹理, 因此, 必然会出现阴影和遮挡等. 这些现象给后期数据处理工作带来了一定困难.

3) 扫描数据处理过程专业化程度较高, 虽然现在相关数据处理软件的自动化程度较高, 但只能针对普遍常见的问题进行处理. 面对昂贵的仪器和软件, 以及庞大复杂的点云数据, 依然需要专门的数据处理人员来完成相关的工作. 由于模型制作人员和数据处理人员知识背景的差异, 使得数据在双方之间

的传递产生脱节,造成误差,也因此增大了工作的难度.

4) 3D 打印成本现阶段还较高,3D 打印材料的市场价格还较贵,即使是打印一个较小的模型都需要几千元的费用,而小的模型无论是仿真效果、研究价值还是信息的存储价值都要比等比例的模型效果差. 其次,目前大型 3D 打印机在市场上并不多见,无论购置还是租用该设备都存在一定的难度. 该技术成本上的劣势,也使得该项技术在考古学中的广泛应用受到了一定限制.

传统的测绘方法不能迅速地精确地复制还原文物真实三维信息,也会不可避免地损坏文物本身. 尽管目前三维激光扫描技术和 3D 打印技术在考古学中的推广还存在一定的难度,但随着三维激光扫描技术和 3D 打印技术的进一步发展和成熟,这两项技术在考古和文物保护方面的运用也越来越普遍,这些技术将会突破考古和文物保护方面的瓶颈. 文中提出利用三维激光扫描技术对文物的三维几何信息进行数字化采集、存储,并进行建模,大大减少了文物信息采集存储的时间,用 3D 打印技术把构建的三维模型打印出来,使得文物的历史信息可以反复利用. 利用三维激光扫描技术和 3D 打印技术非接触、主动性和快速性等优势,可以永久性地保存文物的数字信息,对恢复和传承其文化和艺术价值在世界范围内的应用和研究都具有重要意义. 在实际工作中,这两项技术在文物保护方面的应用还存在一定的缺陷,要完全普及还需要在技术和成本等方面的创新.

参考文献:

[1] 魏薇,潜伟. 三维激光扫描在文物考古中应用述评[J]. 文物保护与考古科学,2013,25(1):96-105.

[2] 何原荣,潘火平,郑渊茂,等. 地面三维激光扫描仪在溶洞建模与测量中的应用[J]. 激光杂志,2016,37(2):91-93.

[3] 刘旭春,丁延辉. 三维激光扫描技术在古建筑保护中的应用[J]. 测绘工程,15(1):48-49.

[4] 白成军. 三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应用及相关问题研究[D]. 天津:天津大学,2007:10-15.

[5] 曹力. 多重三维激光扫描技术在山海关长城测绘中的应用[J]. 测绘通报,2008(3):31-33.

[6] 孙树芳,方源敏. 三维激光扫描技术的数据处理及误差分析[J]. 科技创新导报,2008(30):1-2.

[7] 杜志强,李德仁,朱宣萱,等. 基于 3D GIS 的木构建筑群三维重建与可视化[J]. 系统仿真学报,2006,18(7):1884-1889.

[8] 李华伟. 三维激光扫描技术在木雕展品建模中的应用[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2015,36(5):532-534.

[9] 薛耀红,赵建平,蒋振刚,等. 点云数据配准及曲面细分技术[M]. 北京:国防工业出版社,2011:1884-1889.

[10] 杨俊志,尹建忠,吴星亮. 地面激光扫描仪的测量原理及其检定[M]. 北京:测绘出版社,2012:16-20.

[11] 尤红建. 激光三维遥感数据处理及建筑物重建[M]. 北京:测绘出版社,2006:32-36.

[12] 张会霞,朱文博. 三维激光扫描数据处理理论及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2014:41-47.

[13] 路兴昌. 基于激光扫描数据的三维场景仿真[J]. 系统仿真学报,2006,18(增刊 1):176-179.

[14] 翟瑞芳,张剑清. 基于激光扫描仪的点云模型的自动拼接[J]. 地理空间信息,2004,2(6):37-39.

[15] 罗先波,钟约先,李仁举. 三维扫描系统中的数据配准技术[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(8):97-99.

[16] 张瑞菊,王晏民,李德仁. 快速处理大数据量三维激光扫描数据的技术研究[J]. 测绘科学,2007,31(5):93-94.

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)