

基于海量点云数据的大雁塔三维重建

蔺小虎¹, 姚顽强¹, 马润霞², 马飞¹, 张昆巍³

(1. 西安科技大学测绘科学与技术学院, 陕西西安 710054; 2. 国家测绘地理信息局大地测量数据处理中心, 陕西西安 710054; 3. 北京则泰盛业科技发展有限公司, 北京 100107)

摘要: 古建筑三维重建已成为历史遗迹保护与修复的重要内容。为了探讨三维激光扫描数据的获取流程、数据处理方法, 以三维激光扫描获取的大雁塔海量点云数据为例, 研究了古建筑三维重建中点云数据获取与处理的详细过程。联合 Cyclone、AutoCAD 和 3D-Max 软件的优点构建了大雁塔真实的横面、剖面、立面模型, 其中重点研究了海量点云数据在 Cyclone 软件中分块建模的方法。结果表明: 将拼接好的大雁塔海量点云数据分块建模, 不仅加快了数据处理的速度, 而且符合精度要求。在点云数据拼接时采用标靶拼接和同名点拼接相结合及测站间两两拼接之后再整体拟合平差的方法, 减少了拼接中的误差, 使每站拼接误差都不超过 3cm。在建模过程中的墙体拟合是上万个点云经过平差计算得到, 精度高达 2mm。最后在 3D-Max 软件中组合、渲染和贴图, 真实地构建了大雁塔三维立体模型。为古建筑数字化存档和后期的修缮工作提供了重要的依据。

关键词: 大雁塔; 三维重建; 三维激光点云; 海量数据; 古建筑数字化

中图分类号: K878 **文献标识码:** A

0 引言

随着经济的发展, 古建筑也越来越受到人们的关注和重视, 同时, 人们也认识到了采取一定的措施来维护和修复古建筑的紧迫性与必要性, 如何更好地应用新技术在不损害文物的前提下获取文物保存的现状资料和让人类瑰宝长期保存已成为全球性的课题^[1-2]。大雁塔位于陕西省西安市大慈恩寺内。唐永徽三年, 玄奘为保存由天竺带回长安的经卷佛像主持修建了大雁塔。经过数次变更, 最后固定为今天所看到的七层塔身, 是现存最早、规模最大的唐代四方楼阁式砖塔, 也是佛塔这种古印度佛寺的建筑形式随佛教传入中原地区, 并融入华夏文化的典型物证, 是凝聚了汉族劳动人民智慧结晶的标志性建筑。

三维激光扫描技术通过“面测量”的方式, 精确高效地获取地物的三维信息, 拓宽了人们对测绘的理解, 为建筑物三维建模提供了一种革命性的新途径^[3-5]。随着数字地球和数字城市的提出, 数字化文物档案也日益被推上日程^[6-8]。M Levoy 等利用激光扫描仪的三角原理和高分辨率的彩色图像重建了 Michelangelo 的主要雕塑品, 开创了三维激光扫

描技术用于古建筑和文物保护的先河^[9]; EI-Halkim 利用激光扫描仪和 CCD 相机实现了三维数据采集和配准系统, 并创建了一个室内三维建模系统^[10]。我国三维激光扫描技术起步较晚, 但在一些领域也取得了很大的成就。1995 年敦煌莫高窟“数字化虚拟洞窟”项目开启了国内文物数字化保护的先河^[11]; 此后, 王田磊等根据获取的建筑物点云数据, 探讨了点云处理和建模的关键技术, 并提出了建筑物三维模型快速重建方法^[12]; 李必军等人利用车载激光扫描数据进行了建筑物特征提取研究, 提出了一套基于建筑物几何特征的信息挖掘方案, 可以直接从激光扫描数据提取建筑物的轮廓信息^[13]; 范劲松等利用非接触式光学三维扫描设备和 HDR 技术对陶瓷作品进行了三维扫描和形态整合, 得到了完整的陶瓷作品数字化模型^[14]; 随后的数字化故宫、乐山大佛项目、兵马俑 2 号坑等众多高精度考古项目的成功实施, 将三维激光扫描技术在文物保护和数字化测绘中的应用推上了一个新台阶^[15-18]。

本研究以徕卡 ScanStation C10 扫描仪获取的大雁塔海量点云数据为例, 探讨了三维激光扫描数据的获取流程、数据处理方法。联合 Cyclone、Auto-

CAD 和 3D - Max 平台各自的优点,对大雁塔进行了三维模型重建,并对不同平台建模的精度和效果进行了对比分析。文章的新意在于采用三维激光扫描技术在不接触、无损害的前提下,快速高效地构建了大雁塔真实的横面、剖面、立面模型,为古建筑三维重建及后期的修复提供了重要的数据基础,开创了大雁塔数字化存档和科学化管理的新途径。为古建筑漫游展示和数字化测绘提供了一定的参考,对加强古建筑保护及实现测绘成果的数字化存档、科学化管理具有重要意义。

1 点云数据的获取与处理

三维激光扫描测量一般需要经过数据获取与数据处理两个阶段。流程图如图 1 所示。

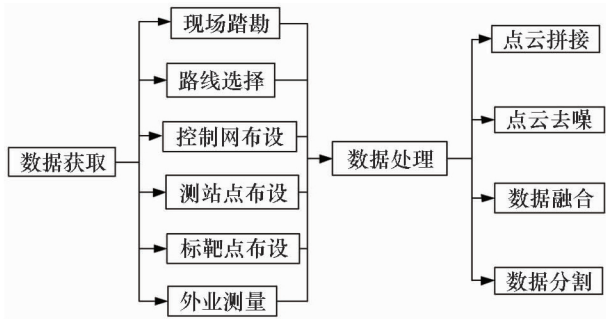


图 1 数据获取与处理流程

Fig. 1 Data acquisition and processing flow

1.1 数据获取

经过仔细踏勘与查阅相关资料:大雁塔由塔基、塔身、塔刹组成,塔的周围有呈四方形的基座平台,边缘有护栏;塔身呈四方形,现通高为 64.5m,塔基高 4.2m,南北约 48.7m,东西 45.7m;塔基塔体呈方锥形,平面呈正方形,底边长为 25.5m,塔刹高 4.9m,如图 2 所示。

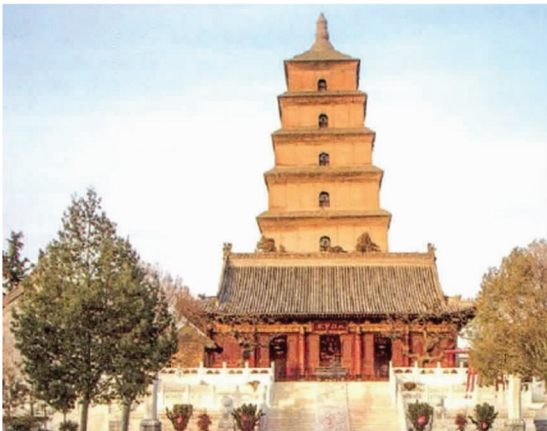


图 2 大雁塔外观

Fig. 2 The appearance of wild goose pagoda

根据扫描的目的与精度要求,结合大雁塔周围的环境,考虑到徕卡 ScanStationC10 扫描仪获取数据的功能,拟采用全站仪导线方式对塔进行多站扫描。扫描路线布设成闭合导线,导线点分布在塔的四周,离塔的距离分远、近两个档次。近距离的导线点共 8 站,离塔大约 20m,主要是获取塔的中下部点云数据;远距离的导线点共 4 站,离塔 80m 左右,主要是获取塔的顶部点云数据。扫描仪架设在导线点上,闭合导线的布设情况如图 3 所示,图中红色的三角表示测站的位置。

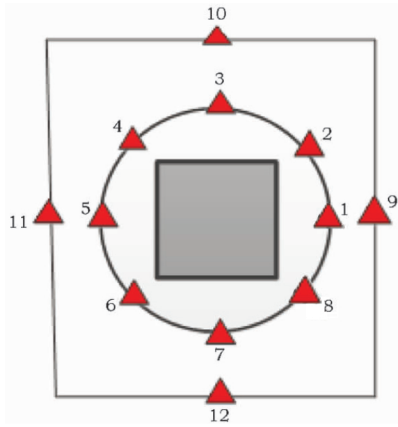


图 3 闭合导线布设方案设计

Fig. 3 Design of closed traverse layout scheme

1.2 数据处理

由于建筑物是由多站扫描得到,每站点云数据都是基于仪器内部独立的坐标系,为了得到完整的扫描对象,外业扫描得到的点云数据在导入软件后,首先要进行数据拼接,即把多站扫描的点云数据转化到同一坐标系中,形成一个整体。常用的拼接方法有:标靶拼接、同名点拼接、视图拼接、标靶与同名点的混合拼接和已知控制点的拼接。在不出错的情况下上述方法中基于标靶的拼接精度最高,主要是通过扫描标靶拟合成标靶球,然后取球心点坐标作为标靶点进行拼接。基于同名点的拼接精度受激光扫描点密度的影响,密度越大,精度越高。实验采用高分辨率(点位精度:6mm@50m)进行扫描,选取同名点时,由于相邻两站扫描视角不同,难免存在误差,所以尽量选择相同区域的邻近点,然后在 Cyclone 软件中进行拟合拼接。前者拼接精度达 2~3mm,后者拼接精度为 3cm 左右。通常选取 3 个以上的标靶点或同名点对点云数据进行拼接。为了减少误差的传播,选用两两测站进行拼接,然后再把拼接好的结果进行拼接^[19]。本研究采用标

靶和同名点的混合拼接,以其中的一次拼接为例,拼接误差如表1所示,拼接前后的大雁塔点云数据如图4所示。

表1 标靶与同名点拼接误差

Table 1 Target and corresponding point splicing error (mm)

拼接方法	点号			
	A1	A2	A3	A4
标靶拼接	2	2	4	3
同名点拼接	13	1	7	6

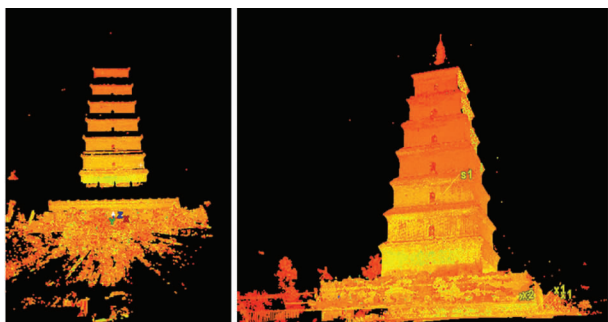


图4 拼接前后的点云数据

Fig. 4 Point cloud data before and after stitching

扫描过程中受到各种因素的影响,难免会在研究对象中参杂一些噪声点。噪声点的存在不仅会影响数据量和建模的速度,还会影响建模的精度。因此,数据处理中必须把这些噪声点去除。去噪后点云数据效果如图5所示。

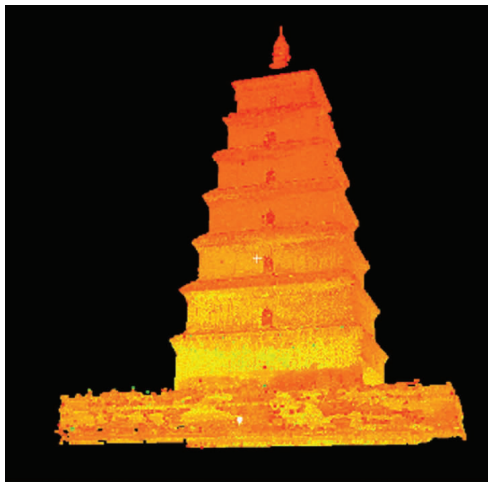


图5 噪声处理后的点云数据效果图

Fig. 5 Point cloud data after noise processing

若将去噪后的数据直接导出所占内存就会比较大,在建模软件中运行速度很慢,甚至不能运行。所以,要对处理后的点云数据进行融合。依据导出数据量的大小,多次调整参数设置,选择最合适的平均采样间距进行数据融合。

融合后的点云数据量仍然比较大,整个拼接好的大雁塔点云工程大小为11.8GB,点云数据量达3.35亿。若直接进行建模,Cyclone软件容易崩溃,为了减少独立处理部分的数据量,减少建模干扰,以便在建模软件中能够快速处理,将融合后的整体点云分割成块,然后分别进行建模。分割数据之前要先对数据进行备份。根据大雁塔的结构共分割成8部分如图6所示。

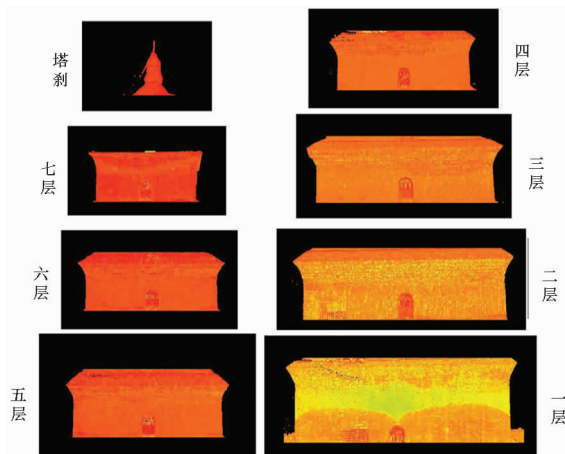


图6 分割后的大雁塔点云模型

Fig. 6 The great wild goose pagoda model after point cloud segmentation

2 三维模型重建

联合不同平台各自的优点,先在Cyclone软件中进行点云数据处理和分块建模,然后在AutoCAD软件中提取线划模型,最后在3D-Max软件中进行渲染和纹理映射。真实地再现大雁塔形态和外观,为古建筑数字化存档提供数据支撑。

2.1 Cyclone 建模

在保证各块完整性和相邻块重叠度的基础上,对大雁塔进行分块建模。相比于其他建模软件,Cyclone软件拥有一个三维模型组件库,主要是利用分割技术,把建筑物分为不同的墙体,采用区域增长法进行面的拟合。建模是在Cyclone软件的ModelSpace模块下完成,主要有以下步骤:①建立坐标系;②定义参考面;③绘图;④图形转面;⑤抠出门洞部分;⑥延长厚度。对于规则的几何体,如塔身和管径等,采用点云匹配算法进行自动拟合建模^[20],简捷快速,具有一定的优势;对于不规则的几何体曲面,如塔檐和塔刹,则通过提取特征线生成特征面,然后挤压或旋转成不规则几何体。图7为分块建模与合并后的大雁塔外部轮廓模型。

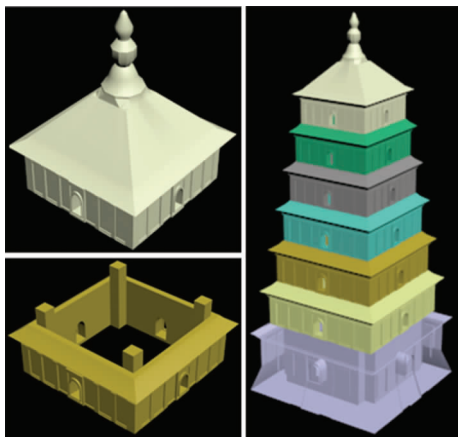


图 7 大雁塔分块与合并后的三维立体模型

Fig. 7 The block and merged 3D model of wild goose pagoda

2.2 AutoCAD 特征提取

通常是借助 CloudWorx 插件把点云数据导入 AutoCAD 软件中通过点云切片来提取建筑物的边界点、特征线等信息,然后画出建筑物的轮廓特征。提取线划模型时按照从底部到顶部的顺序,依次对塔身、门洞、塔檐和塔刹进行特征提取,对称模型可以使用镜像功能,以提高线划模型提取效率。该软件下可以绘制横面、剖面、立面图,用于建筑施工,精度较高,但是工作量大,所建模型只是一些简单的线划图,不能进行纹理映射。大雁塔的主视图和俯视图如图 8 所示。

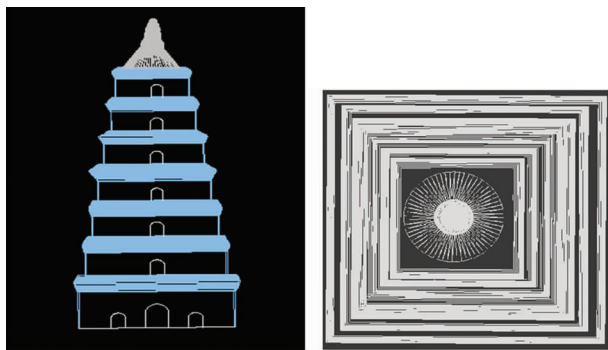


图 8 大雁塔主视图与俯视图

Fig. 8 The main and top view of the great wild goose pagoda

2.3 3D - Max 渲染与纹理映射

点云数据也可在 3D - Max 软件中建模,有两种方法,一种是通过插件 CloudWorx 将点云数据导入 3D - Max 软件中进行建模,与 Cyclone 软件中建模相似;另一种是通过点云测量大雁塔不同部件的尺寸,然后通过一系列拉伸、挤压、自由变形和布尔运算等,绘出大雁塔的塔身、塔刹和门洞模型,最后将各部件模型组合成一个整体。纹理映射可以提高模型的真实感,对生成真实感图像具有重要意义,对优

化后的模型做 uvw 展开和 uvw 贴图处理^[21]。为了防止纹理映射导致的模型变形,照片需要经 PhotoShop 进行正射影像处理后才能作为材质,在 3D - Max 软件中进行渲染和纹理映射。纹理映射完成后的大雁塔三维立体模型如图 9 所示。



图 9 大雁塔三维立体模型

Fig. 9 The 3D model of the great wild goose pagoda

通过多平台联合建模得出:Cyclone 软件在建立一些规则模型时,自动化程度较高,精度也能达到要求;AutoCAD 软件在建立高精度线划模型时有很大的优势,但是工作量较大;3D - Max 软件虽然建模精度不高,但是效率和工作量相对适中,模型渲染和纹理映射方面效果突出。因此,建模时可联合不同平台各自的优点,对于精度要求不高的三维漫游展示可以在 Cyclone、3D - Max 软件中建模,然后在 3D - Max 软件中渲染和纹理映射;而对精度要求较高的文物保护存档,在上述建模之后,采用 AutoCAD 绘制线划模型和设计方案。

3 结 论

本研究通过对三维激光扫描获得的大雁塔海量点云数据进行三维重建,得出如下结论:

1) 联合 Cyclone 和 AutoCAD 软件各自的优点构建了大雁塔横面、剖面、立面图,并在 3D - Max 软件中进行了渲染和贴图,真实的构建了大雁塔三维立体模型。

2) 对比分析了不同建模软件的优缺点,得出:扫描仪自带的软件 Cyclone 在建立一些规则墙体时有一定的优势,但在建立不规则墙体时需要构建三角网来逼近,误差较大;AutoCAD 软件便于提取建

筑物边界点、特征线、绘制横纵断面图等,但是不能进行纹理的映射,而且工作量较大;3D - Max 软件操作比较复杂,但是所建模型尺寸精确,纹理映射后模型更逼真,可用于古建筑数字化存档和三维漫游展示。

3) 对建模中存在的误差进行了分析:为了减少建模中的误差,在点云数据拼接时采用标靶拼接和同名点拼接相结合的方法,使每站拼接误差都不超过3cm。为了减少误差传播,站间两两拼接之后再拼接。在建模过程中的墙体拟合是上万个点云经过平差计算得到,精度高达2mm。

三维激光扫描技术在不接触、无损害的前提下,快速高效的记录古建筑的位置、几何、颜色、纹理等信息,为古建筑三维重建提供了重要的数据基础,对于实现不同区域文物资源的共享、传播及保护具有重要的现实意义。

参考文献:

- [1] 郑书民,夏国芳,胡春梅,等. 地面激光雷达技术在石窟寺立面精细测绘中的应用研究[J]. 激光杂志, 2016, **37**(1): 5-8.
ZHENG Shu-min, XIA Guo-fang, HU Chun-mei, et al. Application research of terrestrial LiDAR technology in Grotto Temple elevation precise survey and mapping[J]. Laser J, 2016, **37**(1): 5-8.
- [2] 杜 侃. 馆藏文物保护中数字建模技术应用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2011, **23**(1): 62-66.
DU Kan. Research on the application of digital modeling technology in the conversation of cultural relics in museums[J]. Sci Conserv Archaeol, 2011, **23**(1): 62-66.
- [3] 彭维吉,李孝雁,黄 飒. 基于地面三维激光扫描技术的快速地形图测绘[J]. 测绘通报, 2013(3): 70-72.
PENG Wei-ji, LI Xiao-yan, HUANG Sa. Rapid topographic mapping using terrain 3D laser scanning technique[J]. Bull Surv Map, 2013(3): 70-72.
- [4] 樊 琦,姚顽强,陈 鹏. 基于 Cyclone 的三维建模研究[J]. 测绘通报, 2015(5): 76-79.
FAN Qi, YAO Wan-qiang, CHEN Peng. Research on 3D Modeling Based on Cyclone[J]. Bull Surv Map, 2015(5): 76-79.
- [5] 张会霞,朱文博. 三维激光扫描数据处理理论与应用[M]. 北京:电子工业出版社, 2012: 89-90.
ZHANG Hui-xia, ZHU Wen-bo. Data processing theory and application of 3D laser scanning[M]. Beijing: Publishing House Of Electronics Industry, 2012: 89-90.
- [6] 李清泉,杨必胜,史文中,等. 三维空间数据的实时获取、建模与可视化[M]. 武汉:武汉大学出版社, 2003.
LI Qing-quan, YANG Bi-sheng, SHI Wen-zhong, et al. Real time acquisition, modeling and visualization of three dimensional spatial data[M]. Wuhan: Wuhan university press, 2003.
- [7] 张启福,孙现申. 三维激光扫描仪测量方法与前景展望[J]. 北京测绘, 2011(1): 39-42.
ZHANG Qi-fu, SUN Xian-shen. The method and prospect of Three dimensional laser scanner measurement [J]. Beijing Surv Map, 2011(1): 39-42.
- [8] 李永强,刘会云,冯 梅,等. 大型古建筑文物三维数字化保护研究[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2012, **31**(2): 186-190.
LI Yong-qiang, LIU Hui-yun, FENG Mei, et al. Research method on fine three-dimensional reconstruction of large antique building[J]. J Henan Polytech Univ (Nat Sci), 2012, **31**(2): 186-190.
- [9] Curless B, Levoy M. A volumetric method for building complex models from rangeimages [C]//Proceedings of SIGGRAPH, 1996: 303-312.
- [10] EI-Hakim S. F., Brenner C., Roth G. A multi-sensor approach to creating accurate virtual environments[J]. J Photogramm Remote Sensing, 1998, **53**: 379-391.
- [11] 卢小平,王玉鹏,卢 遥,等. 齐云塔三维激光点云三维重建[J]. 测绘通报, 2011(9): 11-14.
LU Xiao-ping, WANG Yu-peng, LU Yao, et al. Qiyun pagoda 3D model reconstruction based on laser cloud data[J]. Bull Surv Map, 2011(9): 11-14.
- [12] 王田磊,袁进军,王建锋. 三维激光扫描技术在建筑物三维建模可视化中的应用[J]. 测绘通报, 2012(9): 44-47.
WANG Tian-lei, YUAN Jin-jun, WANG Jian-feng. The application of TLS technology in the 3D visualization modeling[J]. Bull Surv Map, 2012(9): 44-47.
- [13] 李必军,方志祥,任 娟. 从三维激光扫描数据中进行建筑物特征提取的研究[J]. 武汉大学:信息科学版, 2003, **28**(1): 65-70.
LI Bi-jun, FANG Zhi-xiang, REN Juan. Extraction of building's feature from laser scanning data[J]. Geomatics Inf Sci Wuhan Univ, 2003, **28**(1): 65-70.
- [14] 范劲松,安 军. 佛山石湾陶瓷艺术的数字化保护及利用研究[J]. 文物保护与考古科学, 2016, **28**(3): 102-108.
FAN Jin-song, AN Jun. Digital preservation and content utilization of Foshan Shiwan ceramic art [J]. Sci Conserv Archaeol, 2016, **28**(3): 102-108.
- [15] 魏 薇,浅 伟. 三维激光扫描在文物考古中应用评价[J]. 文物保护与考古科学, 2013, **25**(1): 96-107.
WEI Wei, QIAN Wei. Review on the application of 3D laser scanning in conservation and archaeology[J]. Sci Conserv Archaeol, 2013, **25**(1): 96-107.
- [16] 黄慧敏,王宴民,胡春梅,等. 地面激光雷达技术在故宫保和殿数字化测绘中的应用[J]. 北京建筑工程学院学报, 2012, **28**(3): 33-38.
HUANG Hui-min, WANG Ye-min, HU Chun-mei, et al. Application of terrestrial Lidar technology in digital surveying and mapping of the hall of preserving harmony of forbidden city[J]. J Beijing Univ Civil Eng Archit, 2012, **28**(3): 33-38.
- [17] 王 婷. 文物真三维数字建模技术在秦始皇兵马俑博物馆中的应用——以一号坑陶俑为例[J]. 文物保护与考古科学, 2012, **24**(4): 103-107.
WANG Ting. Application of 3D digital modeling technology to cultural relics in the museum of the Terra-Cotta Warriors Horses of

- Qin Shihuang—Case study on terra – cotta warriors in Pit No. 1 [J]. *Sci Conserv Archaeol*, 2012, **24**(4): 103 – 107.
- [18] 王 莫. 三维激光扫描技术在故宫古建筑测绘中的应用研究 [J]. *故宫博物院院刊*, 2011(6): 156 – 163.
- WANG Mo. Research on application of three dimensional laser scanning technology in the surveying and mapping of the Imperial Palace ancient buildings [J]. *Palace Museum J*, 2011(6): 156 – 163.
- [19] 盛业华, 张 卡, 张 凯, 等. 地面三维激光扫描点多站数据无缝拼接 [J]. *中国矿业大学学报*, 2010, **39**(2): 233 – 237.
- SHENG Ye – hua, ZHANG Ka, ZHANG Kai, *et al.* Seamless Multi Station Merging of Terrestrial Laser Scanned 3D Point Clouds [J]. *J China Univ Mining Technol*, 2010, **39**(2): 233 – 237.
- [20] 谢宏全, 谷风云, 李 勇, 等. 基于激光点云数据的三维建模应用实践 [M]. 武汉大学出版社, 2014: 17 – 26.
- XIE Hong – quan, GU Feng – yun, LI Yong, *et al.* Application of 3D modeling based on laser point cloud data [M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2014: 17 – 26.
- [21] 何 勇. 大型高浮雕石质文物的数字化探索——以云冈石窟为例 [J]. *中国文化遗产*, 2016(2): 30 – 33.
- HE Yong. Digital exploration of large high relief stone relics—Case study on Yungang Grottoes [J]. *China Cult Herit*, 2016(2): 30 – 33.

Three dimensional reconstruction of the Great Wild Goose Pagoda based on massive point cloud data

LIN Xiao – hu¹, YAO Wan – qiang¹, MA Run – xia², MA Fei¹, ZHANG Kun – wei³

(1. *College of Geomatics, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;*

2. *National Survey Service Geodetic Survey Data Processing Center, Xi'an 710054, China;*

3. *Beijing Zetaishengye Industry Science and Technology Development Co., Ltd., Beijing 100107, China)*

Abstract: 3D reconstruction of ancient buildings has become an important aspect of the protection and restoration of historic sites. Three – dimensional laser scanning data of the Great Wild Goose Pagoda was taken as an example in order to study in detail the process of obtaining and processing point cloud data for the 3D reconstruction of ancient buildings. The advantages of Cyclone, AutoCAD and 3D – Max software to build a real horizontal, profile and vertical section model of the Great Wild Goose Pagoda were combined. The method of block modeling of massive point cloud data in Cyclone was briefly studied. This study showed that block modeling of spliced mass point cloud data for the Great Wild Goose Pagoda not only accelerated the speed of data processing, but also met accuracy requirements. The methods of target splicing and corresponding point joining together and the method of each stand splicing between the stations were combined, and then whole fitting adjustment to reduce the error was made. In the end, each station splicing error is no more than 3cm. In the process of modeling, the wall fitting is calculated, after adjustment of thousands of points, bringing the precision to 2mm. Finally, rendered and textured the model in the 3D – Max software was combined, and a 3D model of the Great Wild Goose Pagoda was constructed. This work provides an important reference for the repair and digital archiving of the ancient architecture.

Key words: Great Wild Goose Pagoda; 3D reconstruction; 3D laser scanning point cloud; Massive data; Digital ancient architecture

(责任编辑 潘小伦)