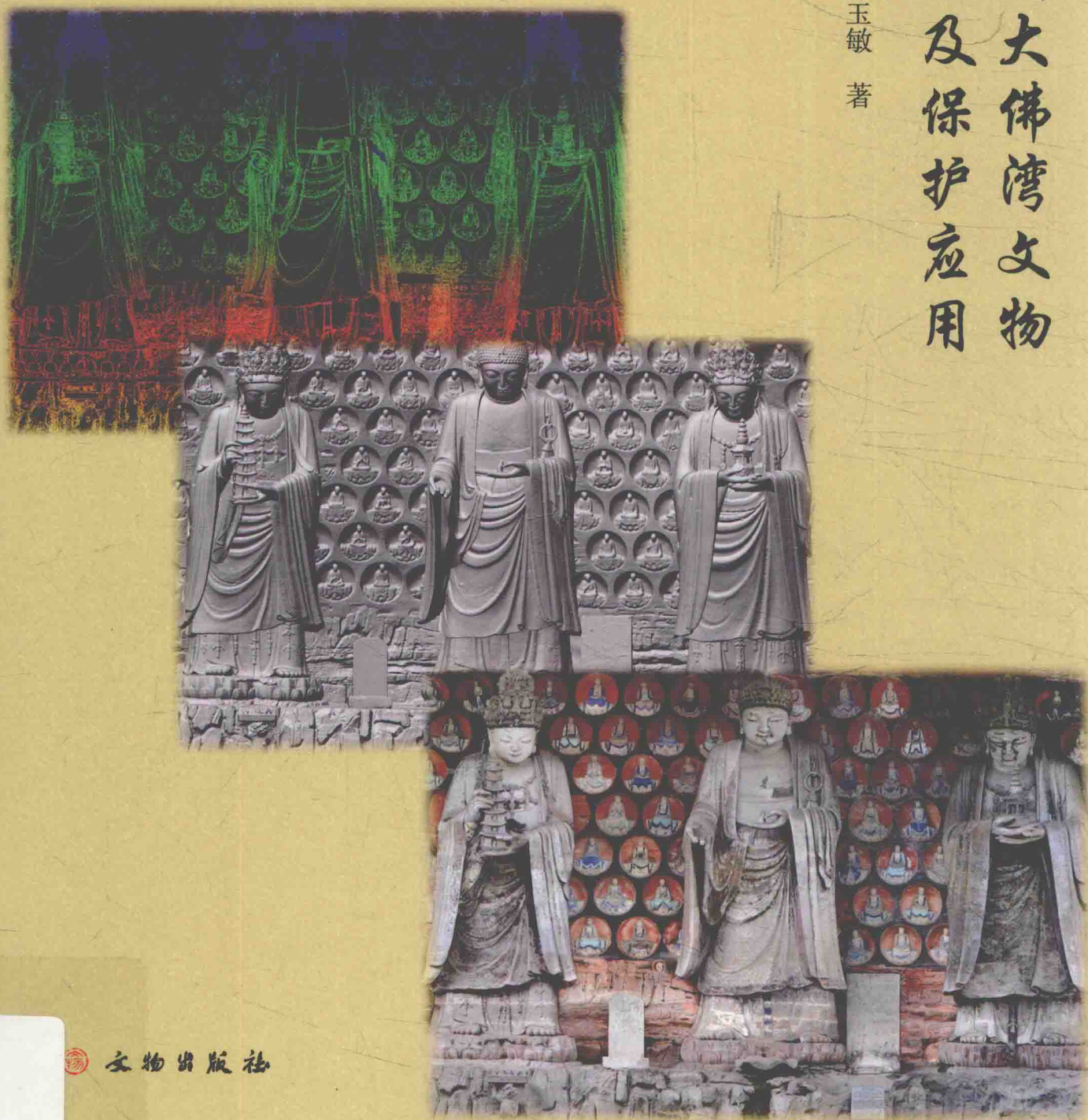


大足石刻大佛湾文物 三维扫描及保护应用

吴育华 胡云岗 张玉敏 著



大足石刻大佛湾文物三维扫描 及保护应用

吴育华 胡云岗 张玉敏 著



 文物出版社

北京·2017

图书在版编目 (CIP) 数据

大足石刻大佛湾文物三维扫描及保护应用 / 吴育华, 胡云岗, 张玉敏著. —北京: 文物出版社, 2017. 5

ISBN 978 - 7 - 5010 - 4305 - 7

I. ①大… II. ①吴… ②胡… ③张… III. ①大足石窟 - 石刻 - 文物保护 - 研究 IV. ①K879. 274

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 114986 号

大足石刻大佛湾文物三维扫描及保护应用

著 者: 吴育华 胡云岗 张玉敏

责任编辑: 窦旭耀

封面设计: 吴育华

责任印制: 陈 杰

出版发行: 文物出版社

社 址: 北京市东直门内北小街 2 号楼

邮 编: 100007

网 址: <http://www.wenwu.com>

邮 箱: web@wenwu.com

经 销: 新华书店

印 刷: 北京京都六环印刷厂

开 本: 889mm × 1194mm 1/16

印 张: 13 插页: 3

版 次: 2017 年 5 月第 1 版

印 次: 2017 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 978 - 7 - 5010 - 4305 - 7

定 价: 190.00 元

本书版权独家所有, 非经授权, 不得复制翻印

序

大足石刻是川渝地区唐宋石窟艺术的杰出代表，造像集中国佛教、道教、儒教“三教”造像艺术的精华于一身，具有鲜明的民族化和生活化特色，在中国石窟艺术中独树一帜，1999年被联合国教科文组织列入《世界遗产名录》。由于历史原因、环境变化及人为活动影响，石刻造像直接暴露于室外，遭受水害、风化等病害威胁，急需进行科学保护。

文物三维空间信息是建立文物本体基础档案应该具备的基础数据。在获取数据的各种技术手段中，激光扫描测量技术既得到广泛应用，也备受争议：一方面，激光扫描测量技术优势明显，除了将以往很难获取的文物空间信息记录下来，还因为数据精度高、安全性高和效率高等特点而被普遍认同；但由于存在数据合成过程中人工干预度高，相关规范欠缺，以及数据利用度不够等问题，也往往被人诟病。建立文物的三维空间信息档案，从长远看是必须的；而采用激光扫描测量技术则是双刃剑，用得好，事半功倍，反之则易造成人财物的浪费。这其中既需要文物保护工作者提升对文物三维空间数据利用的认识深度，也需要数据采集人员（三维激光技术人员）更加切实地了解文物保护工作的具体需求。只有更加明晰实践中的文物保护工作的真实需求，文物三维空间信息的采集技术才会有更大的发展，采集的数据才会真正有用。解决这个问题，需要双方的共同努力，也需要多一些在两个领域穿线搭桥的“通才”。

中国文化遗产研究院作为国家的文化遗产保护科学技术研究机构，开展文化遗产保护技术应用研究并推广先进成果是其主要职责。近年，院内涌现出一批有志青年开展了各种新技术的应用研究，吴育华博士正是其中之一。他的基础专业是测绘，致力于开展测绘信息技术在文物保护中的应用研究已近十年，常年沉浸在文物保护的实践当中，对来自一线的、活生生的文物保护需求有较深的理解。虽然还不是前文提到的“通才”，但是正反两方面的经验教训也积累了不少，可算机遇难得。本书正是他的工作心得。书中介绍了他在大足石刻大佛湾如何以文物特点及保护需求为根本出发点，利用三维激光扫描技术开展数据采集、数据处理直至保护应用所形成的一套较为成熟的工作流程与操作规范。或许，这些成果可以为文物三维空间数据的获取和利用提供重要范例。

我衷心希望吴博士再接再厉，扬长避短，努力发挥好测绘信息领域与文物保护领域之间的“桥梁”作用，为文物的科技保护与修复继续贡献力量。

是为序。

刘曙光

2015年5月

内容摘要

位于重庆大足宝顶山的大佛湾石刻造像群是世界文化遗产大足石刻的重要组成部分，始凿于南宋年间，历时七十余年而成，由号称“第六代祖师传密印”的僧人赵智凤总体构思并组织开凿，集释（佛教）、儒（儒教）、道（道教）“三教”造像于一体，为大足石刻之精华。大佛湾石刻雕凿于一“U”字形山湾的东、南、北三面崖壁之上，崖面长约500米，高约8~25米，通编31号，其中有著名的千手观音、华严三圣、释迦涅槃圣迹图、六道轮回、九龙浴太子、圆觉洞、牧牛图等。全部造像图文并茂，无一龕重复。龕窟间既有教义上的内在联系，又有形式上的相互衔接，形成一个有机的整体。造像不仅在内容和表现手法上都力求生活化，而且在布局、采光、装饰、排水、透视、支撑等方面均十分注重形式美和意境美。

历经沧桑，由于自然与人为因素影响，在室外条件保存下的大佛湾石刻不可避免地存在一定的风险与病害，需要进行科学的保护，目前正在开展数项文物保护工程，如被列为国家文物局一号石质文物保护工程的千手观音保护修复、大佛湾渗水病害治理、大佛湾窟檐保护加固、遗产监测、考古研究等。另一方面，作为世界遗产，理应为人类所共享，需要在坚持保护为主的前提下进行合理利用，如数字展示等。上述工作的开展均需要大佛湾相关图件与数据的支持，然而由于大佛湾石刻造像本身雕凿结构及所处环境的异常复杂性，常规手段难以采集获取其真实的现状信息，从而不能提供所需的基础图件和精准数据。

三维激光扫描技术为实现文物的精细化测绘提供了契机，作为继GPS技术之后测绘与信息领域里程碑式的革新技术，在文化遗产保护中得到广泛应用，如文物信息记录与存档、考古制图、虚拟修复、保护工程设计、数字展示、遗产监测等。它在文物保护中体现出独特优势：（1）安全性高，属于文物非接触式无损测量技术，符合文物保护“最小干预”原则；（2）精密度高，最高精密度均可达几十微米，能实现复杂异型结构文物的精细化数据采集；（3）效率高，每秒可测几千至数百万个点，大大提高了野外的工作效率，特别适合于文物的抢救性保护工程；（4）应用前景宽广，点云的应用可谓仅受想象力的限制，可满足文物保护的多样性需求。然而，目前三维激光扫描技术在文化遗产保护中的应用还是存在不少问题，其主要问题还是在于技术本身优势与文物保护需求的结合性，特别是由于文物自身的复杂多样性及保护需求的差异性，导致目前出现三维激光扫描数据利用率不高、图件不规范、成果不实用等典型问题。

石窟寺及石刻类文物的相关三维激光扫描实践表明，由于石窟造像形态的复杂性及石质材料本身的特点，三维激光扫描技术具有极强的适应性，但是目前在三维数据采集及保护应用模式上均缺乏系统的研究与规范。为此，在国家文物局的重视和支持下，中国文化遗产研究院牵头开展

大足石刻三维测绘与数字化试点项目，重点结合大佛湾石刻保护工程相关需求，探索三维激光扫描技术在石窟寺及石刻类文物保护工程应用中的科学模式。本书主要介绍该项目的一些重点成果。

本书共分六章，第一章绪论主要介绍大足石刻等石窟寺及石刻类文物的基本特点、保护概况与文物信息采集需求。第二章系统介绍了三维激光扫描技术的原理、设备与数据处理软件，以及它在文物保护中的应用优势、方向和典型案例。第三章主要介绍大足石刻大佛湾文物外业数据采集工作，主要包括石刻造像特点分析、数据采集方案总体设计、整体一般精度扫描、局部精细化扫描及纹理数据采集等。第四章主要介绍了大足石刻大佛湾文物内业数据处理工作，主要包括数据处理方案设计、点云数据处理、三维建模、纹理贴图、正射影像图及特征部位图制作等。第五章结合大足大佛湾石刻文物保护相关需求，重点介绍了三维激光扫描数据成果的应用，主要包括现状病害调查、保护工程设计、虚拟修复研究、考古研究、数字展示与监测等。第六章主要针对石窟寺及石刻文物三维激光扫描数据的多源性、海量性等特点，介绍了文件与数据库相结合的管理方法与系统实现。

Abstract

The main cluster of carvings at the Dafo Bay of Dazu Baoding Mountain, Chongqing, is an important part of the Dazu Stone Carvings, a World Cultural Heritage Site. It was first made in the Southern Song Dynasty and completed with more than 70 years of effort. The cluster was created under the overall conception and organization of Zhao Zhifeng, a monk purportedly “receiving the seal from the Sixth Patriarch”. As the essential part of Dazu Carvings, it contains the sculptures of Buddhism, Confucianism and Taoism. The stone carvings were created on the eastern, southern and northern cliffs of the U – shaped bay. The cliff panel measures about 500m long and 8 – 25m tall. Numbered the 31st, this site is home to some renowned sculptures such as Thousand – hand Kwan – yin, Trinity Buddha of Vairocana, Samantabhadra Bodhisattva and Manjusri Bodhisattva, Shakyamuni Nirvana Site, the Six Realms of Existence (Samsara), Nine Dragons Bathing Prince Siddhartha, Yuanjue Cave and Cattle Herding. Without any repeated content from niche to niche, all sculptures constitute an organic whole with internal relations on the doctrine and consistency in form. The cluster not only adopted the life – based content and technique of expression, but also emphasized formal beauty and artistic conception on the layout, lighting, decoration, drainage, perspective, support and other aspects.

Impacted by the natural and human factors, the stone carvings unavoidably suffered from some risks and diseases under the outdoors conditions. Scientific protection measures have been taken, for example the No. 1 stone – built cultural heritage conservation project of the State Administration of Cultural Heritage (SACH) for the restoration of the Thousand – hand Kwan – yin, water control at the Dafo Bay, reinforcement of Dafo Bay grotto eaves, heritage monitoring and archaeological research. On the other hand, the world heritage site shall be shared by all humankind and reasonably used on the precondition of well conservation, such as digital presentation. The above – mentioned work needs relevant drawings and supporting data on Dafo Bay. However, given the structure of the stone sculptures and high complexity of the ambient environment, the real data of the current situation cannot be obtained with the conventional ways, and thus, there is no basic drawings or precise data.

The 3D laser scanning technology brings an opportunity for the precise mapping of cultural heritage and has been widely applied in the cultural heritage conservation as an innovative landmark technology in the mapping and information field following GPS technology, e. g., cultural heritage information recording and documentation, archaeological survey and mapping, virtual restoration, conservation engineering design,

digital presentation and heritage monitoring. This technology has showed unique advantages in the cultural heritage conservation: (1) high degree of safety. The non-contact non-destructive measuring technique meets the principle of "minimum intervention" of the cultural heritage conservation; (2) high precision. It can realize precise data collection of the complicated, special-shaped cultural heritage; (3) high efficiency. It can measure several thousand even millions of points within a second, significantly improving the field working efficiency, and especially suitable for the salvage conservation project of cultural heritage; (4) broad application prospect. The application of point cloud is only limited by the imagination of users. Thus, it can meet various requirements of cultural heritage conservation. However, there are many problems in the application of the current 3D laser scan technology in the cultural heritage conservation. The main challenge lies in the integration of the technology with the cultural heritage conservation requirements, especially the complicated diversity of the cultural heritage and differences in the conservation requirements which cause low utilization rate, non-standard drawings and non-practical results of the 3D data and other outstanding problems.

The relevant 3D laser scanning practice of the grotto temples and stone carvings shows that the 3D laser scanning technology is highly adaptive given the complexity of the stone sculptures and characteristics of the stone materials of the cave sculptures. However, there is a lack of systematic research and standardization on the 3D data collection and conservation application modes. To address such problems, Chinese Academy of Cultural Heritage led the 3D mapping and digitalization pilot of Dazu stone carvings with support from the SACH and explored the scientific application modes of 3D laser scanning technology in the grotto temples and stone carvings in light of the relevant requirements of Dafo Bay stone carving protection program. This book mainly introduces some achievements of the program.

This book consists of six chapters. The first chapter mainly introduces the basic characteristics, conservation of Dazu Stone Carvings and other grottoes and stone carvings and cultural heritage information collection requirements. The second chapter systematically introduces the theories of 3D laser scan technology, equipment and data processing software, and application advantages, direction and typical cases of the technology in the cultural heritage conservation. The third chapter mainly introduces the field operation and data collection of Dafo Bay Stone Carvings, mainly including the characteristics analysis, general design of the data collection plan, general scanning of the overall, regional refined scanning and texture data collection, etc. Chapter IV mainly introduces the indoor data processing of Dazu Stone Carvings, including the data processing plan design, point cloud data processing, 3D modeling, texture mapping, orthophoto and featured site drawings production, etc. Chapter V introduces the application of 3D scan data results in light of the relevant requirements of protection of Dazu Stone Carvings, including current situation and disease investigation, protection engineering design, virtual restoration research, archaeological research, digital presentation and heritage monitoring. Chapter VI introduces the management methods and system realization in combination with the document and database according to the characteristics of multiple sources and mass data of the 3D scan data of grotto temples and stone carvings.

目录 | Contents

第1章 绪论	1
1.1 中国石窟寺及石刻概况	1
1.2 石窟寺及石刻文物保护	2
1.2.1 文物保护法规体系	2
1.2.2 文物保护工作基本特点	3
1.2.3 石窟寺及石刻文物的主要病害	3
1.2.4 石窟寺及石刻保护工作	4
1.3 大足石刻及保护概况	5
1.3.1 大足石刻简介	5
1.3.2 大足石刻文物保护工作概况	6
1.3.3 大足石刻文物数字化保护概况	7
1.4 文物信息记录	8
1.4.1 文物信息类型	8
1.4.2 传统文物信息采集方法	8
1.4.3 精细化数据采集需求与问题	9
第2章 三维激光扫描与文物保护应用	12
2.1 三维激光扫描技术	12
2.1.1 三维激光扫描技术原理	13
2.1.2 三维激光扫描设备	15
2.2 三维激光扫描数据处理	20
2.2.1 三维激光扫描数据特点	20
2.2.2 三维激光扫描数据处理流程	20
2.2.3 三维数据处理常用软件	26
2.3 三维激光扫描技术在文物保护中的应用	28

2.3.1	主要优势	28
2.3.2	应用方向	29
2.3.3	工作程序	30
2.3.4	相关案例	30
第3章	大足石刻大佛湾文物数据采集	46
3.1	大佛湾石刻造像	46
3.2	数据采集方案设计	65
3.2.1	总体思路	65
3.2.2	实施方案	65
3.2.3	精密度确定与仪器选择	66
3.3	大佛湾整体三维扫描	67
3.3.1	采集要求	68
3.3.2	设备准备与人员组织	69
3.3.3	点云数据采集	70
3.3.4	点云数据采集主要成果	71
3.4	圆觉洞石窟精细三维扫描	72
3.4.1	采集要求	73
3.4.2	设备准备与人员组织	73
3.4.3	点云数据采集	74
3.4.4	精细点云数据采集主要成果	78
3.5	纹理数据采集	80
3.5.1	采集要求	80
3.5.2	设备准备与人员组织	82
3.5.3	纹理拍摄	83
3.5.4	纹理数据采集主要成果	83
第4章	大足石刻大佛湾文物三维重建	85
4.1	三维数据处理方案设计	85
4.1.1	目标内容	85
4.1.2	实施方案制定	85
4.2	点云数据处理	85
4.2.1	点云预处理	86
4.2.2	点云拼接	87
4.2.3	点云除冗	89
4.3	三维建模	91

4.3.1	整体三维建模	92
4.3.2	精细三维建模	94
4.4	三维彩色模型构建	98
4.4.1	纹理贴图原理	98
4.4.2	纹理贴图流程	99
4.4.3	贴图颜色处理	100
4.4.4	精度要求及控制	100
4.4.5	纹理贴图成果	100
4.5	正射影像图	101
4.6	特征部位图	102
4.6.1	剖面图	102
4.6.2	线划图	103
第5章	大佛湾文物保护应用	106
5.1	现状病害调查	106
5.1.1	病害调查需求	106
5.1.2	千手观音病害调查	106
5.2	保护工程设计	112
5.2.1	文物保护工程设计需求	112
5.2.2	工程设计图	113
5.2.3	工程量相关统计分析	113
5.2.4	大佛湾窟檐保护工程设计	113
5.3	虚拟修复研究	117
5.3.1	文物修复需求	117
5.3.2	千手观音虚拟修复	117
5.4	考古研究	123
5.4.1	考古测绘需求	123
5.4.2	考古测绘图	124
5.4.3	圆觉洞考古测绘图	124
5.5	数字展示	125
5.5.1	文物数字展示需求	125
5.5.2	基于真三维数据的数字展示关键技术	126
5.5.3	圆觉洞数字展示	129
5.6	监测	130
5.6.1	文物监测概况	130
5.6.2	精细监测需求	131

5.6.3 大佛湾监测	132
第6章 数据管理	136
6.1 石窟寺文物数据的特点	136
6.1.1 石窟寺文物数据的多源性	136
6.1.2 石窟寺文物数据的海量性	136
6.1.3 石窟寺文物数据使用者的多层次性	136
6.2 石窟寺文物数据管理的现状分析	137
6.3 石窟寺文物数据的文件与数据库混合管理	138
6.3.1 文件与数据库管理的总体思路	138
6.3.2 点云与模型数据的文件存储	139
6.3.3 数据库管理概念模型	140
6.3.4 数据库管理逻辑模型	141
6.4 石窟寺文物数据库管理系统	142
图 版	145
后 记	187

插图目录 | Contents of Illustrations

图 2-1 三维激光扫描技术测量原理图	13
图 2-2 三维激光扫描设备分类	15
图 2-3 Leica HDS6000 三维激光扫描仪	16
图 2-4 Faro Focus ^{3D} 三维激光扫描仪	17
图 2-5 Romer 便携式关节臂	18
图 2-6 EXAscan 3D 三维扫描设备	19
图 2-7 点云预处理流程	20
图 2-8 三维建模流程	23
图 2-9 点云降噪效果示意图	24
图 2-10 三角网模型	24
图 2-11 孔洞修补方法比较	25
图 2-12 文物三维激光扫描工作程序	31
图 2-13 千手观音原始点云	32
图 2-14 千手观音主尊三维打印	32
图 2-15 千手观音主尊精确量算	33
图 2-16 千手观音整龕修复尺寸数据量算	33
图 2-17 单只手虚拟修复	34
图 2-18 单只手虚拟修复尺寸图	34
图 2-19 潼南大佛点云模型与三维模型	35
图 2-20 潼南大佛修复前后正射影像图	35
图 2-21 潼南大佛病害面积统计	36
图 2-22 发髻虚拟修复效果图	37
图 2-23 索菲亚教堂三维点云模型	37
图 2-24 索菲亚教堂三维模型	37
图 2-25 索菲亚教堂正射影像图	38
图 2-26 索菲亚教堂线划图	38

图 2-27 力学分析模型	38
图 2-28 科伦巴尔古塔三维扫描点云模型	39
图 2-29 科伦巴尔古塔正射影像图	39
图 2-30 科伦巴尔古塔线划图	40
图 2-31 科伦巴尔古塔正射影像大样图	40
图 2-32 南朝陵墓石刻三维模型	41
图 2-33 基于三维扫描的萧融西南辟邪病害图	42
图 2-34 二道井子三维扫描模型	42
图 2-35 应县木塔局部结构层三维扫描成果	43
图 3-1 大佛湾全景图	46
图 3-2 大佛湾龛窟平面示意图	47
图 3-3 猛虎下山龛照片	47
图 3-4 护法神像龛照片	48
图 3-5 六道轮回图龛照片	49
图 3-6 广大宝楼阁龛照片	49
图 3-7 华严三圣龛照片	49
图 3-8 舍利宝塔照片	50
图 3-9 毗卢庵照片	50
图 3-10 千手观音照片	51
图 3-11 舍利塔龛照片	51
图 3-12 人天毕会龛照片	52
图 3-13 释迦牟尼涅槃圣迹图龛照片	52
图 3-14 九龙浴太子图龛照片	53
图 3-15 孔雀明王经变相龛照片	53
图 3-16 毗卢道场照片	54
图 3-17 父母恩重变相龛照片	54
图 3-18 雷音图龛照片	55
图 3-19 大方便佛报恩经变相龛照片	55
图 3-20 观无量寿佛经变相龛照片	56
图 3-21 缚心缘锁六耗图龛照片	56
图 3-22 地狱变相龛照片	57
图 3-23 十大明王龛照片	57
图 3-24 三清龛及赵公明夫妇龛照片	58
图 3-25 柳本尊行化事迹图龛照片	58
图 3-26 道祖山君龛照片	59
图 3-27 玉皇王母龛照片	59

图 3-28	鲁班仓龕照片	60
图 3-29	柳本尊成正觉像龕照片	60
图 3-30	石狮像龕照片	61
图 3-31	圆觉洞照片	62
图 3-32	圆觉洞佛像	62
图 3-33	圆觉洞香案局部	63
图 3-34	牧牛图照片	64
图 3-35	栗咕婆子图照片	64
图 3-36	实施方案制定	65
图 3-37	圆觉洞佛像头部照片	66
图 3-38	不同设备扫描效果对比图	66
图 3-39	精细扫描效果对比	67
图 3-40	整体扫描效果图	68
图 3-41	移动脚手架及升降平台	69
图 3-42	测站点布设示意图	70
图 3-43	Leica 整体扫描测站布设图 (局部)	71
图 3-44	Faro 补充扫描测站布设图 (局部)	71
图 3-45	大方便佛 Leica HDS6000 点云数据	72
图 3-46	父母恩 Faro Focus ^{3D} 点云数据	72
图 3-47	扫描点云与实物参照对比	73
图 3-48	精细三维激光扫描作业流程	74
图 3-49	工作现场脚手架平台	75
图 3-50	圆觉洞脚手架现场搭设位置图	76
图 3-51	外业数据采集	77
图 3-52	分层严重点云检查	77
图 3-53	点云分层现象专业检查	77
图 3-54	数据完整性检查	78
图 3-55	圆觉洞整体精细点云图 (透视效果)	79
图 3-56	圆觉洞部分造像精细点云图	79
图 3-57	多角度拍摄	82
图 3-58	相邻两张照片重叠度	82
图 3-59	纹理数据获取流程	83
图 4-1	三维数据处理基本流程	86
图 4-2	点云数据检核	87
图 4-3	粗差剔除	88
图 4-4	单站点云模型	88

图 4-5 基于标靶的点云拼接	89
图 4-6 基于控制点的点云数据拼接	89
图 4-7 点云评价精度成果图	90
图 4-8 基于特征的点云拼接	90
图 4-9 大佛湾整体点云数据	91
图 4-10 整体三维建模	92
图 4-11 华严三圣建模区域划分	92
图 4-12 三角网模型	93
图 4-13 模型补洞示意图	94
图 4-14 华严三圣龕整体三维模型	94
图 4-15 精细三维建模流程图	95
图 4-16 点云数据分块	95
图 4-17 点云降噪	96
图 4-18 精细建模局部	96
图 4-19 精细三维模型	97
图 4-20 纹理贴图示意图	99
图 4-21 纹理贴图流程	99
图 4-22 纹理贴图模型分区示意图	100
图 4-23 圆觉洞普贤菩萨三维彩色模型	100
图 4-24 圆觉洞东侧三维彩色模型	101
图 4-25 文物正射影像图制作流程图	102
图 4-26 普贤菩萨正射影像图	102
图 4-27 圆觉洞剖面图	103
图 4-28 圆觉洞西侧佛像线划图	104
图 4-29 圆觉洞横剖南视图	105
图 4-30 圆觉洞观音菩萨等值线图	105
图 5-1 千手观音照片	107
图 5-2 千手观音线划图	108
图 5-3 千手观音石质病害图	111
图 5-4 大佛湾窟檐局部	114
图 5-5 大佛湾窟檐局部三维扫描成果图	114
图 5-6 大佛湾窟檐局部病害图	115
图 5-7 窟檐病害面积统计图	116
图 5-8 窟檐整体稳定性计算模型	116
图 5-9 华严三圣龕段窟檐稳定性计算图	117
图 5-10 残损手指虚拟修复技术路线图	118

图 5-11	手印图谱确认	119
图 5-12	手指长度确定示意图	120
图 5-13	千手观音残损手形态虚拟修复效果	121
图 5-14	千手观音纹理色彩虚拟修复效果	121
图 5-15	千手观音区域虚拟修复效果	122
图 5-16	千手观音主尊头部形态虚拟修复图	123
图 5-17	千手观音主尊整体色彩虚拟修复	123
图 5-18	圆觉洞释迦牟尼佛考古测绘图	124
图 5-19	圆觉洞考古测绘图 (透视图)	125
图 5-20	圆觉洞考古测绘图 (透视线划图)	125
图 5-21	射线相交法原理	126
图 5-22	边折叠简化算法原理	127
图 5-23	多分辨率模型构建	127
图 5-24	轨迹球旋转原理	128
图 5-25	基于 Unity3D 的数字展示技术流程	128
图 5-26	大佛湾全景展示	129
图 5-27	圆觉洞三维数字展示模型	130
图 5-28	文物精细监测应用示意图	131
图 5-29	监测点位置示意图	132
图 5-30	监测基准点	133
图 5-31	裂隙探测流程图	133
图 5-32	裂隙彩色影像图	134
图 5-33	裂隙轨迹提取	134
图 6-1	石窟寺文物数字化数据管理的总体思路	139
图 6-2	点云与模型数据存储的文件目录层次结构示意图	140
图 6-3	大足石刻大佛湾石刻数据文件目录层次结构示意图	140
图 6-4	数据类型实体关系模型	141
图 6-5	数据库设计 E-R 图	142
图 6-6	数据库管理系统界面设计	143
图 6-7	数据库管理系统入库界面设计	143
图 6-8	数据库管理系统查询界面设计	144