

故宫院藏文物的三维数据采集与应用

欧阳宏

(故宫博物院资料信息部, 北京 100009)

摘要: 为更好地发挥文化遗产保护、学术研究和文化传播教育的职能, 十多年来, 故宫博物院使用三维数字技术, 采集、加工大量的古建筑和藏品文物高精文物三维数据。利用数字呈现技术立体再现文化遗产的原貌, 能够更好地促进对文化遗产的研究和展示, 探索新的表现形式和展示方式, 全方位推进数字技术在故宫博物院的综合应用, 满足了故宫各个时期在文物保护、研究以及文化传播展示的工作需求。

关键词: 故宫; 文化遗产; 多视角三维重建; 三维扫描

中图分类号: TU-092

DOI: 10.3772/j.issn.1673-2286.2019.07.007

为响应习近平总书记“让收藏在禁宫里的文物、陈列在广阔大地上的遗产、书写在古籍里的文字都活起来”的精神, 文化遗产的数字化研究成为数字博物馆^[1]、数字图书馆^[2]研究领域的一个热点问题, 服务公众传播优秀民族传统文化不再受时空和地域的限制。文化遗产的采集与加工是数字化工作的前提和基础, 这也是数据长期保存与广泛利用的重要保证, 文物、遗产与古籍在形体上不同, 但数字化建设方式与原则基本相同, 可以相互借鉴, 相互促进。

故宫博物院文化资产数字化应用研究所(以下简称“数研所”)成立于2003年10月, 旨在应用先进的数字化技术, 保护、研究和展示故宫博物院(以下简称“故宫”)珍贵的人类文化遗产。苦于无先例可循, 加上故宫的特殊性与敏感性, 近20年来, 数研所一直采用探索性稳步发展的策略慢慢扩大采集数量, 积蓄力量, 建设和发展数字化队伍。结合故宫不同时期对文物藏品的三维数字化工作需要, 故宫资料信息部先后利用人工建模技术、三维激光扫描技术、多视角影像三维重建(又称摄影测量)技术相互结合的方法, 采集、加工、存储大量的古建筑和藏品文物数据, 致力于建立故宫古建筑和文物的三维数据库。利用三维数字呈现技术立体再现文化遗产的原貌, 能够更好地促进对文化遗产的研究和展示, 探索新的表现形式和展示方式, 全方

位推进数字技术在故宫博物院的综合应用。

1 需求与策略

文物三维数字化的目的是更好地推进文物存留和利用, 以更好地发挥故宫文化遗产的保护、学术研究和文化传播教育的职能。衍生工作包括以数字化的形式辅助对文物的保护、研究和传播展示, 如存档、研究、修复、鉴定、仿真复制、公众教育、展示和文化产品开发等。

1.1 需求分析

面向不同应用方向的数据所需精度不同, 必须调查统计对数据的需求, 具体分析如下。

(1) 面向存档、研究、修复、鉴定、仿真复制等方面, 必须遵循真实、客观的原则; 对于数据的准确性、真实性、完整性、精度等方面要求的等级最高。

(2) 面向公众教育、展示等方面, 应用的特点是并不需要过高精度的数据, 但必须为观众提供优良的视觉观感和充足的文化信息含量。

(3) 面向文化产品开发等方面, 三维数据用作参考, 从中提取设计元素, 对数据要求完整全面。

1.2 制约因素

同许多博物馆一样,作为非营利性机构,故宫面临资金、设备、信息化技术专业人才缺乏与数字化保护需求增加的矛盾。

(1) 采集与加工。文物安全、采集工时效率、采集环境以及采集设备都会影响数据的质量;加工环节受到加工软件技术、人员素质、工期成本等方面的影响。

(2) 设备硬件与软件。将数据展示给用户需要一个可视化呈现环境,电脑配置(CPU、显卡、内存)、显示设备(4K或8K)、三维软件等都会对最终展示效果产生影响。

(3) 数据的管理与应用。数据的使用者不仅包括院内外的专家学者,还包括远在千里之外的观众,故宫需要构建一个强大的集成索引检索、远程三维数据读取、人工智能大数据分析等高新技术的院内研究工作平台系统或远程数字博物馆系统,对此故宫正在探索。

技术的提高总是滞后于应用的发展,资源的增加永远满足不了需求的增长,故宫的三维数字化要结合实际情况量力而行。

1.3 构建策略

故宫拥有17万平方米壮美恢弘的文物建筑群、25

大类186万件(套)精美绝伦的院藏品^[3]。以目前的技术条件要采集完所有的文物是一项艰巨的工程,不是一代故宫人能完成的任务。当前要做的就是坚定故宫数字化理念和准则,制订周详的工作计划。一是要提高工作效率。工作效率是限制数字化工作扩大的最大问题,故宫正在通过有计划地选择和采集文物尽量减少重复性工作,同时寻找新技术测试新方法来提高采集加工的效率。二是要制定工作的优先级。与故宫数量巨大的文物藏品相比,资金的数量是有限的,首先要满足院研究和展示工作需求,构建产学研相结合;其次,选择不同材质、形状类型的文物进行探索,测试技术在故宫的适用度。三是注重数据质量,追求稳步发展。三维数据可以从高精度降低,却不能从低精度提高,为了保证5~10年不再重复采集,要随着技术发展不断提高要求,最大限度发挥设备性能,最大量地采集、加工数据。四是规范数据采集和加工作业流程。建立标准化、精细化流程以及数据审查验收标准体系,一切工作按照标准规范执行。五是按需分级处理数据。故宫要求采集加工的三维数据,要同时满足保存、研究、展示工作的实际需求,在制约因素的限制下,采集的原始数据理应是精度最高的,在此基础上根据不同的需求优化数据分级处理。数据存留研究、数据可视化利用和网上发布级别见表1。

表1 可移动文物数据加工等级标准与应用(2018年)

加工级别	模型和贴图加工精度描述	表示符号	模型量(三角面)	贴图精度(像素/平方分米)	利用目的
展示	模型的结构完整,贴图表现细节完整	B	10万左右	1024×1024	移动终端与网上展示
应用	模型主要凹凸细节完整,贴图表现细节完整准确	A	100万左右	2048×2048	辅助研究、数字修复、高清展示
储存	完整、真实、精细和准确地记录所有凹凸细节的模型纹理和贴图纹理	特A	直接生成的最高数据	4096×4096以上	存留、研究、修复、鉴定、仿真复制

2 文物三维数据的采集、加工

数据的采集是一切数字化工作的基础,是文物数字化工作的起点。故宫的文物信息采集包括位置信息、几何信息、色彩信息、构造与结构和病害残损信息等,而三维数据只需要真实完整地记录文物的色彩纹理和几何模型信息数据。

2.1 技术路线

十余年来,故宫使用的基础数据获取方法包括3种。①人工测量。组织人力现场采集测量,积累了大量的文物测绘图纸和文档资料。②利用数码摄影技术记录文物的色彩纹理信息和影像,相机的像素越大数据的精度越高。③三维扫描。对文物进行非接触式三维扫描来获取文物的三维点云数据^[4],记录几何模型信息。这3种基础数据获取方法衍生出3种三维建模技术

和方法。

(1) 依靠文物测绘图纸和二维影像数据进行手工三维建模。该方法无法提供精确真实的几何模型信息和色彩纹理信息,获取的三维数据经常应用于文化传播相关的文物展示,无法全面满足研究学者需求。

(2) 使用三维扫描仪进行三维扫描建模。该方法能够精准地获取文物的三维形状,通过高清数码相机辅助拍摄进行手动贴图映射,可以呈现出逼真的带有纹理信息的三维模型^[5]。该方法的缺点是获取的数据三角面片数量巨大,而且布线杂乱,后期数据处理耗时长,适合局部特殊需求使用,不建议大规模将该技术使用在文物三维建模上。

(3) 利用摄影测量技术全方位采集二维影像数据,通过专业软件计算生成三维重建数据。该方法可以清晰、准确、完整地获取文物的几何空间特征和色彩纹理特征,在文物色彩纹理还原上表现最好^[6]。

故宫结合馆藏文物的特点,通过考察评估目前主流的几种文物三维重建方法与技术,发现摄影测量为主、三维激光扫描辅助的技术方案在解决色彩纹理和几何模型重现的问题上具备优势,能满足故宫三维数字化的工作需求。三维数据采集、加工技术流程如图1所示。

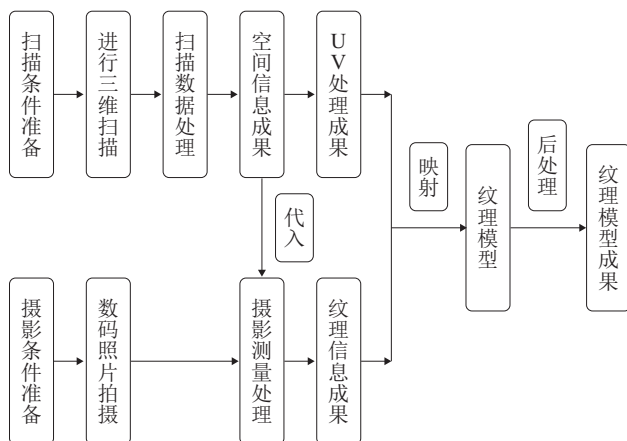


图1 三维数据采集、加工技术流程

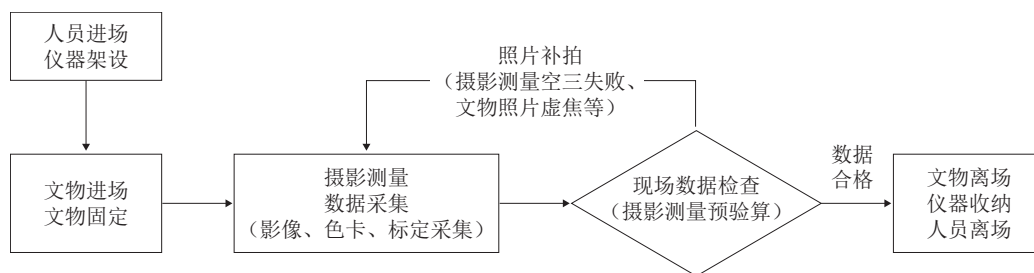


图2 数据采集作业流程

2.2 前期工作

保证文物安全是故宫一切工作的前提,进行数据采集时需注意以下4点:①保证文物提取运输过程,以及作业环境的设备、用电和人员活动的安全;②原状陈设室内采集安全;③作业人员不直接接触文物;④严格按照采集和加工作业流程规范进行作业,认真填写文物现场采集记录表。

根据文物的器物大小、采集环境来制定三维重建目标,有针对性地选择采集设备。如2015年故宫进行了23件青铜器的三维重建工作,采集选用的设备见表2。

表2 2015年青铜器采集工作使用设备情况

技 术	说 明
三维 激光扫描	MetraScan 3D激光扫描仪:点精度 ≤ 0.05 毫米,体积精度 ≤ 0.1 毫米,分辨率 ≤ 0.05 毫米;具有自动跟踪功能,扫描点云自动拼接;适应高光、高暗扫描对象
摄影测量	2430万像素相机,6000 $\times$ 4000分辨率,50毫米标准镜头、100毫米微距镜头。爱色丽色卡和校色仪,标准光源、柔光装置、固定摄影灯组和手持摄影灯组,人工辅助支架

2.3 三维激光扫描

首先,获取文物完整的1:1空间点云数据,将空间信息成果代入摄影测量数据处理,为其提供基础或参考数据;其次,通过三维激光扫描使得文物真实、完整、长久地保存,保存测量原始数据,便于以后的利用、分析和修复。

2.4 摄影测量数据采集

通过摄影测量技术可以清晰、准确和完整地获取文物表面的几何空间信息和纹理色彩信息,为文物三维数据加工提供可靠的依据。采集作业实施步骤如图2所示。

(1) 影像数据采集。使用摄影测量技术进行文物的三维数据重建的关键在于影像基础数据采集。除基础数据是否精准和完整以外,色彩还原程度、影像数据和采集数据在纹理精度和照片色彩上的差异,也直接关系到三维重建的数据质量。

故宫通过制定精细的数据采集方案,提供光线均匀采集环境,针对文物造型差异制定专用的方法采集影像数据,确保获取到高质量的影像数据。

(2) 色彩管理。博物馆影像采集工作,要求所得到的影像必须能够真实准确地还原藏品的自身信息,在各项指标参数控制中,藏品的色彩信息还原是首要问题^[7]。要在文物的采集、加工、整理、利用过程中保持其色彩信息与视觉感官上的一致性,必须在各个环节都进行色彩管理,才能准确地进行色彩还原。

故宫使用多种标准色卡、白平衡卡进行对比管理,

准确调整光照均匀和色温的设定,在拍摄时尽可能真实地还原摄影场景的颜色,为后期图像处理时有标准的颜色依据提供参考。一切依据故宫制定的摄影测量数据采集标准规范进行作业。

(3) 色彩纹理精度。色彩纹理图像的分辨率和影射匹配度是故宫评判数据准确度的重要指标。表3为一份三维重建的文物数据成果评价报告,其中“空间平均分辨率(毫米)”是一种评判纹理贴图数据大小精度的重要指标,“投影误差”是评判影射匹配度的重要指标。从表3数据来看,提交入库的数据在色彩纹理图像的分辨率和影射匹配度上能达到故宫贴图精度标准。实际应用中1毫米内的误差都能满足现在博物馆的研究需求,该数据远高于目前实际需求,可以满足故宫未来5~10年的三维数字化工作要求。

表3 青铜器簋成果评价报告的摄影测量部分

统计项	照片数量	空间平均分辨率(毫米)	像控点数量	平均投影误差(毫米)	投影误差均方根(毫米)	连接点数量	平均投影误差(毫米)	投影误差均方根(毫米)
外部	244	0.034 0	4	0.002 7	0.002 7	49 668	0.018 0	0.024 5
内部	249	0.049 0	4	0.013 2	0.017 6	12 057	0.025 0	0.033 3
底部	183	0.034 0	4	0.003 4	0.004 1	55 813	0.015 3	0.020 7
整体	676	0.039 0	12	0.006 5	0.008 1	117 538	0.019 4	0.026 2

注:空间平均分辨率(毫米),指像素所代表的表面范围的大小,即器物表面能分辨的最小单位。文中代表一个区域范围内每1像素等于多少毫米

(4) 几何精度控制。摄影测量生成的三维数据没有真实的空间关系信息,采用非量测数码相机进行大面积且高精度的多视角三维模型重建,必须要解决立体高精度量测的问题,来获取文物的精准坐标与空间信息,在此基础上生成1:1的高精度文物三维模型数据,才能满足文物三维数字化的需要。中国社会科学院考古所的刘建国^[8]通过设立控制标点的方法可以将误差控制在0.1毫米左右,很好地解决了高精度量测问题。但是该方法不适用于故宫的情况,出于文物安全考虑,作业时不允许除文物保管人员以外的人直接触碰文物,也不允许在文物上随意贴标点。为了解决测量问题,最初故宫尝试在激光扫描文物数据上抽像控制标点,数据验证后效果尚可。为提高工作效率,后来根据激光扫描标靶球相同的原理,制作二维码方块进行尺寸标定控制,解决了数据量测的问题。经过大量的文物数据验证,使用该方法获取数据都能达到0.1毫米左右的精度。

(5) 三维重建处理。目前摄影测量的处理软件较

多,主流软件包括Agisoft Photoscan和smart3D两款,该两款软件在计算方法和工作流程上基本相同,包括对齐照片、建立密集点云、生成网格、生成纹理4个步骤,整体过程主要由计算机对大规模影像数据进行计算,基本不需要人工干预,自动化程度较高。为了获取真实、可靠、准确的数据,故宫在4个主要步骤的基础上,增加了照片色彩还原、扫描数据代入、模型UV分展、纹理映射等人工干预环节来控制数据的质量,使得采集加工完成的数据在几何模型信息和色彩纹理信息上都能达到故宫对精度的高标准要求。

2.5 技术探索

不管是三维扫描技术还是摄影测量技术都是利用光学的原理,视觉目标观察不到的未知区域可称为被遮挡区域,被遮挡区域内的未知表面包括两个部分,一是视觉目标的一部分背面;二是视觉目标上被遮挡表面^[9],

被遮挡区域无法获取到模型数据。所以,对于一些器型复杂、瓶口狭小,难以获取到完整数据的文物,主流做法是基于三维扫描数据和照片数据等载体,通过严谨分析与推断进行手工虚拟修补,该方法基本能满足故宫三维数字化工作的要求。邓阳全等^[10]利用高精度计算机断层扫描系统进行三维重建获取了文物几何模型信息,却无法获取色彩纹理信息。故宫也在尝试利用微型摄像设备采集基础数据,从测试结果来看,当文物镂空结构狭小到1厘米左右就很难获取到内部被遮挡区域的数据了。

3 数据的应用

文物三维数据的发展与应用以数字化留取、病害检测、虚拟修复、变形监测、三维展示及三维力学分析等应用为主^[11]。故宫文物三维数据的使用对象主要包括进行古建筑和文物藏品研究的专业人员,故宫古建筑文化及文物藏品爱好者,以及由于各种原因不能亲身到故宫参观的人员。

3.1 学术研究利用

通过建设文物数字化、可视化信息综合管理平台,实现精细化科学管理,文物的三维数字化为留存、研究、监测、修复等学术活动提供了更加丰富的手段,提高故宫文物保护能力。

(1) 在考古遗址上的应用。故宫在隆宗门西开放区域进行消防管道更换施工,发现元明清时期建筑遗址^[12],开展了抢救性考古发掘,必须抢在遗迹进行保护性回填前进行数字化保护记录,重建具有真实纹理的遗址三维模型。故宫运用轨道航带拍摄与手持拍摄多视角影像的技术,由三维激光扫描辅助控制测量的技术方案,成功获取了分辨率高、色彩还原度好、可量测的高精度三维模型数据,真实、完整地对待考古遗址进行了数字化保护记录,通过生成正射影像图与量算尺寸,大幅提高了考古基础性工作的效率。

(2) 古建筑数字监测记录。故宫古建部和资料信息部多次利用三维数字技术对故宫午门、养心殿、宁寿宫花园(乾隆花园)等古建筑院落进行大规模研究保护性数字记录,为故宫古建筑的监测、维修等研究提供定性与定量分析的数据支持。

在故宫养心殿古建保护和修复研究工程中,通过多视角影像数据采集和处理,对养心殿西暖阁、东暖

阁、正殿、后殿、体顺堂、燕喜堂和东围房等区域的45间房屋进行了三维重建工作,获取了较为完整的高精细度原状实景三维模型,用以保留文物的历史形态及其布局,并利用三维模型进行量测应用研发,探索了一种针对古建筑保护、修复的三维数据应用的方法。另外,当前从三维拍摄到其信息留存,再到数字三维保护应用,探索一套切实可行的研究方法和标准对故宫古建数字化记录、研究意义重大。

(3) 藏品文物数字记录。在充分考虑故宫藏品文物种类多、造型奇巧、材质亮丽、纹饰华美等特点,在对文物高反光材质、复杂形状、精美纹饰等数字化工作重点进行总体分析的基础上,采用高保真无损数字化技术,对院藏文物进行三维数字化采集加工工作,获得藏品文物的多维度数字化信息。文物三维数据作为数字故宫的一个要素,以后将会整合入数字故宫的大数据库,用于建设数字化信息综合管理平台(见图3),实现文物数字化资源、文物藏品信息的可视化管理,为文物的数字化保护、数字化传播、数字化教育、数字化服务提供基础数据和信息资源。

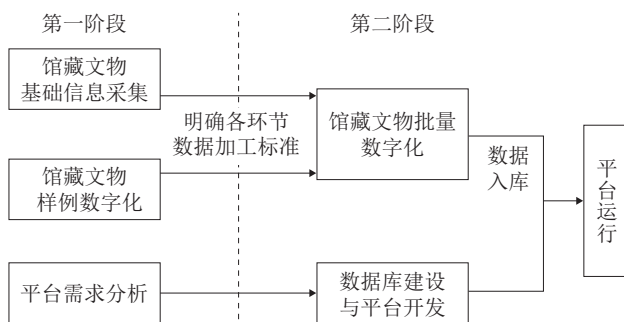


图3 文物可视化管理平台建设规划

截至2019年7月,故宫完成包括青铜器、陶瓷、珐琅、漆器、雕塑、金银器、玉石器、玺印、玻璃器、家具、文房用品、宗教器物12种类型200余件器物的高精度数据,获得了大量的点云数据、数字影像、三维模型、三维纹理模型、正射影像、矢量线画图,大大丰富了可移动文物三维数据库,为故宫宫廷生活、宗教文化、传统手工艺的研究工作提供了精准的数据支持。

3.2 文化传播利用

打造数字故宫,需要在三维数据的基础上构建更多面向社会的信息化应用体系,做到PC端和移动端全覆盖,实现数字展示网络化与网络展示移动化的有机

结合,包括虚拟博物馆、掌上博物馆等。如数字养心殿、数字倦勤斋、数字御花园、数字角楼以及数字多宝阁等数字产品的推出,通过线上、线下的方式将故宫之美传播到世界各地,打破地域和时空的限制。故宫致力于展示传播中华优秀传统文化,为更多观众提供传统文化视听新体验,实现足不出户就能领略传统文化之美。最大限度地扩展故宫博物院的服务功能,满足社会大众对于文化多层次、多方位的需求,为社会主义文化事业大发展大繁荣作出贡献。

4 结语

面对故宫17万平方米壮美恢宏的文物建筑群、186万件(套)精美绝伦的院藏品,故宫网站2019年公布了数字文物库52 558件(套)文物影像数据和数字多宝格180余件器物的三维数据。数字故宫刚起步,扩大文物数字化工作迫在眉睫,工作效率是限制数字化工作扩大的最大绊脚石,加大数字化人才队伍建设,兼容高精度、快速度及性价比高的数据采集设备研制,对促进文物三维数据的广泛应用意义重大。

故宫在新技术与新方法探索的道路上,每一次都在数据精准度与色彩还原度上取得了突破性的成果,都需要大量的后续工作来验证,验证该技术方法在故宫院藏文物三维数字化工作中应用的可行性。再利用成熟的技术对故宫古建筑、遗址与器物等物质文化遗产进行较大规模基础性数据采集,获取高精度三维模型数据,在此基础上进行再开发应用,以获取丰硕的数字化成果,满足故宫各个时期在文物保护、研究以及文化传播展示的工作需求,摸索出故宫文物的三维数据采集、加工与应用的模式。数字故宫建设与实践可以为图书馆古籍的整合与服务提供借鉴与参考。

参考文献

- [1] 张磊. 文化遗产的数字化保护关键技术[J]. 中华建设, 2016(12): 120-121.
- [2] 王江, 屈红军, 于瑛. 图书馆古籍资源数字化建设及利用研究[J]. 出版广角, 2018(2): 35-37.
- [3] 故宫博物院. 故宫·藏品[EB/OL]. [2019-07-29]. <https://www.dpm.org.cn/Home.html>.
- [4] 王茹. 古建筑数字化及三维建模关键技术研究[D]. 西安: 西北大学, 2010.
- [5] 吴玉涵, 周明全. 三维扫描技术在文物保护中的应用[J]. 计算机技术与发展, 2009(9): 173-176.
- [6] 王志, 孙升, 唐仲明, 等. 基于倾斜摄影测量技术的明中都城午门遗址三维重建[J]. 安徽建筑大学学报, 2017(2): 34-37.
- [7] 余宁川. 数字影像的色彩质量控制[C]//融合·创新·发展——数字博物馆推动文化强国建设——2013年北京数字博物馆研讨会论文集. 北京数字科普协会. 北京: 中国传媒大学出版社, 2014.
- [8] 刘建国. 可移动文物的多视角影像三维重建[J]. 考古, 2016(12): 97-103.
- [9] 张世辉, 刘建新, 孔令富. 基于深度图像利用遮挡信息确定下一最佳观测方位[J]. 计算机学报, 2015(12): 2450-2463.
- [10] 邓阳全, 唐宴东, 魏艳艳, 等. 利用高精度计算机断层扫描系统重建文物香薰的三维模型[J]. 文物保护与考古学, 2014(1): 88-92.
- [11] 侯妙乐, 姜利利, 胡云岗. 文物三维模型研究及其在应用中面临的问题[J]. 遗产与保护研究, 2017(1): 82-88.
- [12] 故宫博物院考古研究所. 故宫隆宗门西元明清时期建筑遗址2015—2016年考古发掘简报[J]. 故宫博物院院刊, 2017(5): 93-110.

作者简介

欧阳宏, 男, 1980年生, 高级工程师, 研究方向: 故宫文化遗产的数字化应用, E-mail: 22379189@qq.com。

Cultural Relics' 3D Data Acquisition and Application in The Palace Museum

OUYANG Hong

(Information Department, The Palace Museum, Beijing 10009, China)

Abstract: In order to play the role of cultural heritage protection, academic research and cultural dissemination, the Palace Museum has used 3D digital technology to collect and process a large number of high-quality 3D data of ancient buildings and cultural relics. Original appearance of cultural heritage can be showed by digital technology to promote the research and display of cultural heritage, explore new forms of expression and display methods, and propel the comprehensive application of digital technology in the Palace Museum, satisfying the various requirements of cultural heritage conservation, research, and dissemination.

Keywords: The Palace Museum; Cultural Heritage; Multi-View 3D Reconstruction; 3D Scanning

(收稿日期: 2019-07-02)