

建筑遗产数字化高保真信息采集与处理关键问题研究

——以五台山龙泉寺石牌楼为例

王晓芬¹, 苑鹏军², 马 兰¹, 张宜春³

(1. 石家庄铁道大学 建筑艺术学院, 河北 石家庄 050043;

2. 石家庄千典科技有限公司, 河北 石家庄 050043;

3. 中国艺术科技研究所, 北京 100000)

摘 要:建筑遗产数字化对中华优秀传统文化的保护与传承具有重要意义。三维高保真信息采集与仿真建模是对其数字化保护的重要前提和基础,但在实践过程中,特别是对大体量复杂建筑遗产全方位数据的采集和处理仍存在一系列技术难题。五台山龙泉寺石牌楼是一座体型庞大、造型复杂、多层镂空雕刻的复杂古建筑,数据采集难度之大是多年困扰此类建筑遗产数字化的行业难题。本文针对其特点量身制定了数据采集、处理、仿真建模、压缩优化等技术方案,提出了大体量、复杂、多层镂空雕刻古建筑数字化采集与处理的理论、方法、关键技术与标准规范,为此类大型复杂建筑遗产数字化提供有益借鉴和技术支撑。

关键词:文化遗产数字化;五台山建筑遗产;三维高保真信息采集;三维仿真建模

中图分类号:J525.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.13319/j.cnki.sjztdxbskb.2020.02.16

一、引言

建筑是石头的史书,具有丰富的历史文化内涵,是研究历史的实物例证。历经几千年的沧桑,中华大地上众多的古建筑在战火、风霜雨雪的洗涤中,被损坏、破坏甚至倒塌、毁灭,作为历史遗留,一旦破坏,再难恢复,建筑物本身及其所承载的文化信息都将损毁。在数字化革命、信息化社会的语境下,传统的记录建档工作升级为以数字化为基础的遗产信息采集、传递、处理和利用等活动^[1]。古建筑本体及其构件三维数据获取目前多采用激光三维扫描技术和基于照片建模技术,激

光三维扫描技术能精准获取古建对象三维信息,被国内外文博机构、科研院所普遍采用,但其缺点在于信息数量巨大,后期处理时耗长^[2],随着三维激光扫描设备的不断改进,扫描技术的不断提高,其应用也越来越广泛,但在实际应用中还有很多技术难题亟待解决,对这一技术领域的难题突破与研究,是文博领域、文化科技领域专家学者一直探索和努力的目标。

二、龙泉寺石牌楼数字化保护目的与意义

纵观人类的文明发展历程,文化遗产可以称

收稿日期:2020-03-25

基金项目:河北重点研发计划项目“文物数字化保护与传承的关键技术研究与应用”(19275801D)

作者简介:王晓芬(1976-),女,教授,研究方向:文化遗产数字化。河北省省管优秀专家,河北省社会科学优秀青年专家,河北省高校百名优秀创新人才,河北省三三三人才二层次人选,河北文化建设专业委员会委员,河北博物馆数字化专委会副主任委员。

本文信息:王晓芬,苑鹏军,马兰,等.建筑遗产数字化高保真信息采集与处理关键问题研究——以五台山龙泉寺石牌楼为例[J].石家庄铁道大学学报:社会科学版,2020,14(2):105-110,137.

得上是人类文明的见证和智慧的结晶。而在这其中,作为文化遗产中重要类型之一的建筑遗产,更是有着不可替代的历史与社会价值^[3]。牌楼是一种独特形式的古建筑,是中国传统文化、建筑技术与建筑艺术的综合体现。牌楼根据材料的不同可分为木牌楼、石牌楼、琉璃牌楼等多种,其中石牌楼是较为常见的一种。

作为全国重点文物保护单位,五台山龙泉寺始建于唐代,明嘉靖年曾修葺,清末民国初期重建。五台山龙泉寺石牌楼(1)被誉为“华北第一雕”,石牌楼为仿木结构,采用多重镂空雕刻,玲珑剔透。牌楼通体镂空雕刻有大小 89 条龙,是不可多得的艺术珍品。龙泉寺石雕建筑规模庞大,种类繁多,工艺超群,堪为稀世瑰宝。但由于年久失修,牌楼损毁严重,基体出现酥碱,又多年遭受雷击,使楼体遭受严重损坏,成为Ⅳ类建筑^[4]。为保护这一珍贵的文物,相关部门多次对其实施修复加固、病害防护等工程,牌楼本体信息三维数据采集是古建筑类文物保护的重要组成部分,是数字时代文化遗产保护与传承切实可行且行之有效的重点方略与途径^[5],本文以五台山龙泉寺石牌楼为例,详细阐述了融合多种精密测绘与三维数据采集技术的复杂古建筑三维数据高保真信息获取与处理方法,包括外业数据采集和内业数据处理,希望本文的成果能对相关研究提供有益借鉴和补充。



图 1 龙泉寺石牌楼

三、总体思路与技术路线

如果要归纳大体量复杂石质文物数字化建设的根本性技术要求,以及多层镂空雕刻石质文物数字化资源保护传承与开发利用的根本性要求,高保真成为当仁不让的第一要素^[6]。五台山龙泉寺石牌楼具有复杂的建筑结构,尤其是一些多重镂空的建筑构件表现出相当丰富的空间结构形态,而这些显著的空间特性恰恰是数字化保护工作中需要准确记录的重点数据。同时,本石牌楼不管从哪个视角扫描都存在严重的遮挡,导致不同的扫描方案对数据质量的影响很大,而且数字化保护对牌楼不同部位均有高精度、高保真的要求,因此,在开展三维数据扫描与采集之前,根据现场踏勘结果,课题组针对其体量庞大、多重镂空、仿木结构、雕刻精美等特性,制定了三套方案,即分别采用远距离、手持和微距三种扫描仪加航拍的实施方案,使用大、中、小三种扫描仪互为补充、互相配合完成高保真数据采集与获取。主要技术路线如图 2 所示。

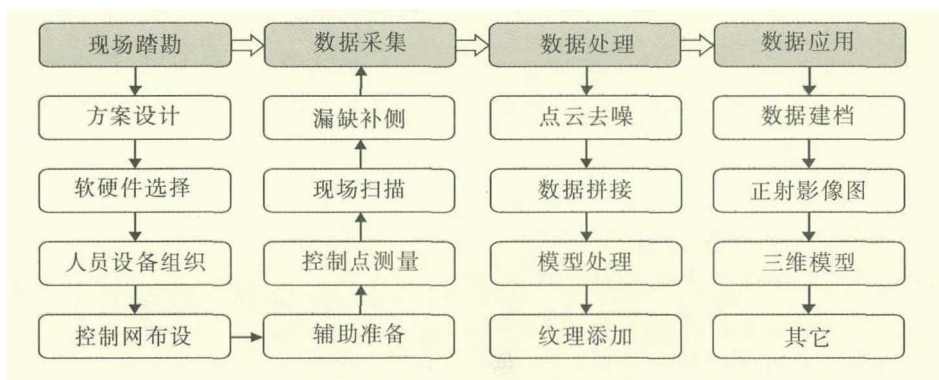


图 2 技术路线图

四、数据采集与处理的技术难点与解决方案

《威尼斯宪章》规定,对古遗址、古遗迹、古建筑等进行保护、修复和发掘之前及过程中,都应有翔实的记录^[7]。五台山龙泉寺石牌楼作为一座大

型石质建筑遗产,在进行数字化过程中需要采集海量、翔实的三维与二维数据,同时,这些海量的采集数据还需要科学精准的处理成为高保真数据才能作为今后建档存储、保护修缮、研究利用的基础。在这一工作过程中,着重探索和解决了以下技术难题。

(一)大型扫描仪与小型扫描仪数据如何无缝结合

利用大型三维激光扫描仪获取牌楼的整体三维点云信息,为拼接依据,小型扫描仪获取石雕局部三维模型,最终通过后期处理,获取石牌坊整体三维模型,既能实现石雕模型细节的精确展现,又能保证较高的整体模型真实度、准确度与精度。

(二)小型扫描仪扫描大型建筑误差问题如何消除

小型扫描仪扫描模型精度可达 0.1 mm,对于扫描大物体,每增加 100 cm 会有 0.03% 的累计误差,如果整个牌楼都用小型扫描仪,扫描整体模型精度难以保证,可能会使整个模型的形状发生变化。

(三)大体量多层镂空雕刻复杂文物扫描盲点如何解决

扫描复杂物体重中之重是保证模型数据完整性问题,对于雕刻繁复,镂空且多层叠加镂空的复杂文物,扫描时容易出现盲点,无法保证模型数据的完整性,为了解决这一问题,要秉承多角度扫描,密集度和多重叠加扫描,最大程度多层次获取数据的原则。并且沿 X、Y 轴密集拍摄多角度高清照片,以备二次精雕和补洞参考。多重镂空拱券如图 3 所示。



图3 多重镂空拱券

(四)浅色大理石三维扫描强反光问题

自然风化以及人为破坏会使大理石材出现颜色退化甚至是浅层的透明问题,对三维数据采集造成困难。通过实际扫描发现,浅色的大理石数据获取难以完全。针对此类问题,需要借助高清相机对模型细节进行图片采集,同时利用第三方软件对模型进行补洞,修补的模型与扫描出的

模型会有所差异,因此需要借助模型雕刻软件,以采集的细节图片为依据,对模型进行雕刻,最大限度地使模型得到还原。

由于石牌坊为浅色汉白玉质地,石材中的规则晶体受环境光影响极大,在白天日光下晶体反射强烈,扫描仪数据采集不完整。针对这一问题,通过反复测试,选择了晚上没有环境光情况下扫描,后期对模型重新附纹理材质的方案,获得完整模型。

五、外业高保真信息采集与处理

科学合理的外业高保真信息采集技术是完成任务的重要前提与基础,为了得到龙泉寺石牌坊高保真数字化数据,按照以上技术路线和实施策略,项目组选取了三类数据采集设备相互补充与相互协调的技术路线与实施方案。

(一)利用大型三维激光扫描仪获取整体点云数据

1. 大型三维激光扫描仪的选用

三维激光扫描技术突破了传统点式数据采集的局限,能够实现对被测物体进行快速的面式数据采集^[8]。大型三维激光扫描技术具有高分辨率、高精度、高密度、非接触、远距离、数据采样精准等特点,而且可以与内(外)置数码相机配合使用,可以主动、实时、动态地获取文物点云与贴图信息,另外大型三维扫描仪还具有扩展性强、对环境适应性强等优点,根据龙泉寺石牌坊大型复杂镂空雕刻类古建筑数据三维信息采集的需要,项目组选用 Faro330 三维激光扫描仪来获取石牌坊的整体三维点云信息。

2. 整体形态三维空间数据采集与获取

龙泉寺石牌坊高 8.5 m,宽 9.4 m,厚 2.8 m。镂空雕刻、透雕等雕刻工艺复杂,遮挡严重,南面 108 阶台阶直抵牌坊近前,左右新建平台距离牌坊较远且高度较低,扫描站点布设难度大;而二龙戏珠等石雕构件空间结构复杂,对仪器精度要求较高。根据现场踏勘结果,项目组制订了扫描的具体方案。

采用 FARO 远距离、高精度三维激光扫描仪作为主要仪器,扫描站点设置以能尽量全面获取完整三维空间数据为原则,主要在牌坊东西北三面设置采集站点,架设可移动脚手架,东西两侧尽量前伸,兼顾扫描牌坊南侧数据。相邻两个扫描

站点间具有 20%~30% 的数据重合。运用球形靶标作为数据拼接靶标点,为保证数据精度,每站设置 4~5 个靶标点。根据精度要求来设置扫描仪的采样密度,而采样密度的大小会直接影响最终三角网构建的精度。对于牌楼受阻挡部分加密扫描,拐角部分采取增设扫描站点的方法处理,共扫描 180 站。扫描方式采用先全景概略扫描,后选择精细扫描,并在整个扫描过程中采用扫描靶的数据拼接方式,两个扫描站之间至少保证有 4 个共同靶标。

3. 三维点云数据配准

激光三维扫描技术的应用,使得“点云”成为建筑遗产测绘以及其他数字化工作中不可或缺的中间型数据成果^[9]。激光扫描获取的每站数据均处于各自的仪器坐标系下,因此需要将不同视点获取的激光点云数据统一到某个固定的坐标系中,如统一的工程坐标系(PRCS)或全局坐标系(GLCS)。点云数据配准是利用点云数据中的变换信息(相邻测区公共靶标的信息),对三维数据进行配准计算。点云配准通常是在相邻的 2 个测站公共区域安置 4 个或 4 个以上靶标进行扫描,并按照摄影测量影像匹配的原理,对相邻区域中的同一靶标组成的同名点对计算点云配准参数,以完成相邻点云的配准,项目中利用公共靶标进行点云配准的标准偏差均小于 2 mm,以保证三维点云配置的精度和准度。

(二) 利用小型三维扫描仪采集局部细节精确数据

1. 小型三维扫描仪局部信息采集

石牌楼扫描过程使用了 Artec Eva(分辨率 0.5 mm,精度 0.1 mm)两台,Artec Space Spider(分辨率 0.15 mm,精度 0.03~0.05 mm)一台两款小型扫描仪。

Artec 小型扫描仪与普通扫描仪最大的优点就在于它能在数据获取的同时建立三维网格模型,并且保证 0.1 mm 或更高精度的三维数据,复杂的扫描环境对它几乎没有影响。虽然 Artec 小型扫描仪模型精度达到 0.1 mm,但是对于扫描大物体,每增加 100 cm 会有 0.03% 的累计误差,如果整个牌楼都用小型扫描仪,整体模型精度难以保证,可能使模型的形状发生变化。因此,借助 Faro 大空间扫描仪获取的牌楼整体点云数据对整个牌楼进行精度控制,其误差范围在 2 mm 之

内,保证大物体模型的准确效果。模型整体精度以大空间扫描仪的三维点云数据为准,避免了累计误差的多次放大。

2. 微距扫描仪细节及遮挡面信息采集

根据石牌楼特点,制定了分阶段实施的方案,微距扫描仪数据采集共分两个阶段进行,同时根据具体镂空精度选择设备。并首先搭设脚手架,脚手架根据底部采集和上部采集需要,分两步搭设。

脚手架搭设完成即可开始数据采集,采用自下而上的扫描顺序,从下部第一层平台开始,依次向上,直至到达顶部完成扫描;在每层平台上使用两台 Artec Eva 分区扫描,Artec Space Spider 扫描雕刻最复杂,精度更高。扫描同时兼顾上下部位,这既有效地解决了遮挡的影响,保证了数据采集的完整性,又便于使用特征点匹配进行点云的拼接。

(三) 贴图与纹理数据高清获取

为了准确生动地将扫描对象的纹理信息与精细模型匹配起来,需要进行数字影像的采集。项目中使用单反相机进行影像的高清采集。数字影像获取的原则跟点云数据获取的原则相一致,也是要求完整。数字影像在获取时设备的镜头应尽可能保持与扫描对象的立面平行,只有这样才能尽可能地保证各个位置的像素与原始影像的像素一致。

六、内业数据拼接处理与精雕优化

(一) 多类型扫描数据相互补充与拼接处理

利用远距离、高精度三维激光扫描仪获取牌楼的整体三维点云信息为拼接依据,与小型扫描仪获取石雕细节模型相结合,最终获取牌楼的整体三维模型与点云数据,既能实现石雕模型细节的精确展现,又能保证较高的整体模型精度,同时获取石牌楼正射影像图。

(二) 小微扫描数据优化降噪与补洞

首先是数据去噪与优化。根据扫描获得的点云数据,行列方向上有恒定密度进行排列的有序点,以及不定的密度的无序点。这些点有的是杂点,是扫描错误的点(不是噪声);有的是噪声点,

因为扫描设备与测量方法的缘故,扫描数据存在系统误差和随机误差,其中有一些扫描点的误差比较大,超出允许范围;数据处理和扫描中还会因为拼合或者扫描角度等问题产生重叠的多余点、冗余点。对这些数据进行滤波,可采用手工和滤波器,通过剔除、拼合、将特征与特征对齐处理等,得到优化后的点云数据,如图4、图5所示。



图4 原始数据

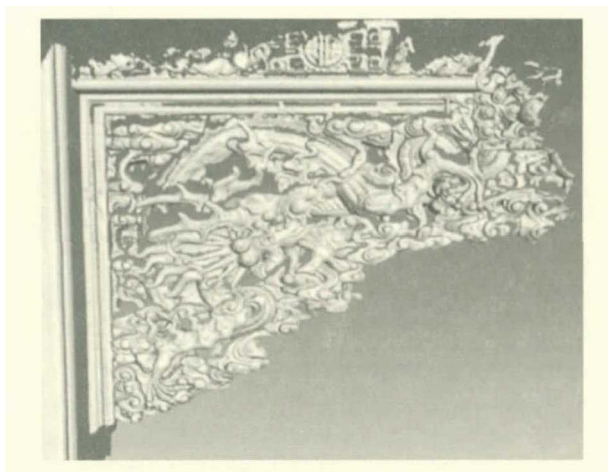


图5 去噪优化数据

其次是多边形处理与特征处理。由于扫描的问题或者是点处理过程中所造成的数据的缺失,在图上留下的缺口部分,缺口构造多边形,对孔洞多边形特征面进行确定,通过对上述特征平面多边形的修补,把图像完整化。

第三是特征处理。特征处理就是去除不需要的特征,比如突出与凹陷等,通过特征处理,把扫

描图像中不需要凹凸的区域进行处理,然后再把该区域做光滑处理,如采用标准的高斯滤波器,高斯滤波器在指定域内的权重为高斯分布,其平均效果较小,故在滤波的同时能较好地保持原数据的形貌,这样使得图像更加完整。

(三)精细三角网格模型构建

微型三维扫描仪获取的海量点云数据通过匹配集成相机采集的纹理数据能够真实地再现扫描本体,但离散点并不能有效地表达实物的表面,因此需要构建立体模型。几何模型的制作主要包括点云数据预处理和三角网模型构建这两部分。数据预处理是在不影响模型构建精度的前提下,减少冗余点云数据并优化整体点云,其目的是降低三角网模型构建的复杂程度及错误。石牌楼构造复杂、细节多,使用常规的建模手段将无精度可言且很难达到效果。基于扫描点云数据,利用扫描处理软件构建不规则精细三角网模型,可以非常逼真地再现石牌楼面貌。模型构建的过程通常包括三角网模型的建立、模型残缺数据的修复、错误拓扑关系的改正、模型平滑和模型简化等。如图6、图7所示。

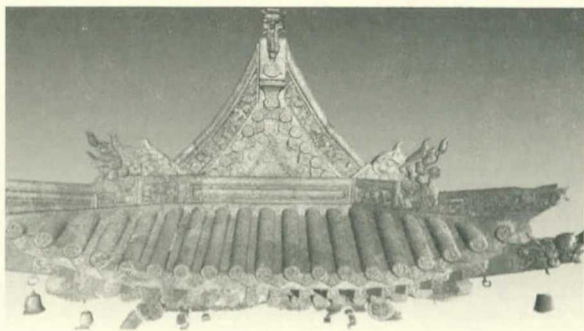


图6 拼接后三角网模型

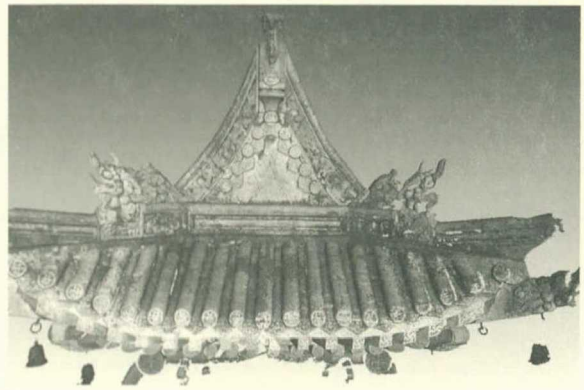


图7 优化后三角网模型

(四)局部细节精准雕刻与处理

小型扫描仪采集数据精度高,但仍有不足之处。第一,模型边缘锐利程度降低是一个不可避免的问题,这样造成石雕牌楼的石材质感、硬度不够,感觉软绵绵没有石材雕刻的棱角锐度。第二,石刻镂空雕层次繁密,遮挡非常严重,手持扫描仪不能采集到被遮挡部位,造成模型数据不完整或与实物有出入。第三,石牌楼雕刻精细度太高,扫描仪不能完整采集到局部微小的细节,如微雕人物的五官,花朵的花蕊等,造成细节的缺失。

基于以上原因,需要对小型扫描仪获得的石牌楼模型(粗模)参照高清照片进行二次精细雕刻,如同对石雕粗胚进行深入雕刻,完成最终精细成品,最大程度保持建筑本体的原真性与高保真性。

(五)高清纹理映射

根据构建的三角网模型,加上获取的高分辨率影像就可以进行从影像到模型的纹理映射,得到单块的彩色三角网模型,将多个具有邻接关系的单块彩色模型合并在一起可得到完整的彩色模

型。具体的操作方法是在三角网模型和影像上选定同名点,从而计算照片的内外方位元素和系统误差改正数。根据使用软件的不同,选取的最少同名点的数目也不相同,但最少不能少于4对,多选一般可以提高映射的质量。是石牌楼的局部纹理映射。

七、结语

随着社会生活节奏的不断加快以及外来文化的强烈冲击,许多优秀的文化遗产正处在濒临灭绝的边缘。于是拯救、修复、保护和传承这一文化瑰宝成为文化从业者迫在眉睫的任务^[10]。古建筑遗产数字化保护与传承作为一种文化科技现象,其本身是复杂的、多层面的,既有文化观念层面的影响,又有实践层面的影响^[11]。在建筑遗产数字化保护的实践与实验中,技术的迭代更新和发展至关重要,本项目针对五台山龙泉寺石牌楼大体量、复杂、多重镂空雕刻的特点,经多次论证,制定了综合多种焦距扫描、航拍、微拍等相结合的高保真数据采集与处理方案,对大体量复杂建筑遗产的高保真数据采集与处理关键问题与关键技术进行了富有创见性的探索与实践,为该领域的研究与实践提供了有益的借鉴与参考。

参考文献:

- [1]吴葱,李珂,李舒静,等.信息技术在建筑遗产领域的应用刍议[J].中国文化遗产,2019(2):18-24.
- [2]温天蓉,吴宁,童磊.基于新型数字化技术的江南古建筑构件保护模式研究[J].建筑与文化,2016(5):138-139.
- [3]黄庭晚.建国以来我国建筑遗产展示模式的发展研究——以北京地区为例[D].北京:北京建筑大学,2015.
- [4]李永强,刘会云,冯梅,等.大型古建筑三维数字化保护研究[J].河南理工大学学报,2012,31(02):186-190.
- [5]王晓芬,苑鹏军,王艳贞.河北民间剪纸艺术保护与传承的数字化建设探索[J].山花,2009(10):164-167.
- [6]刁常宇,李志荣.石质文物高保真数字化技术与应用[J].中国文化遗产,2018(4):61-67.
- [7]王其亨,吴葱,白成军.古建筑测绘[M].北京:中国建筑工业出版社,2006:25.
- [8]周辉.建筑遗产调查记录方法研究[D].重庆:重庆大学,2018:121.
- [9]李严,李哲.点云新源——从千佛崖测绘看建筑遗产数字化技术的持续演进[J].工业建筑,2012,42(增刊):30-33.
- [10]王晓芬,王艳贞.文化遗产数字化与虚拟互动展示传播[M].北京:科技出版社,2017:3.
- [11]陈曦.建筑遗产保护思想的演变[M].上海:同济大学出版社,2016:21.

(下转第137页)

On Methods of Integrating Railway Corps Spirit into Ideological and Political Theory Course in Colleges and Universities: A Case Study of “Outline of Modern Chinese History”

Diao Chenglin, Qiu Tiexin

(School of Marxism, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: The railway corps spirit formed in the liberation war and socialist construction has rich connotations. It can be summarized as “the patriotic spirit of sacrifice and devotion”, “the enterprising spirit of hard work and ambition in all areas”, “the struggling spirit of overcoming difficulties and meeting difficulties”, and “the pioneering spirit of keeping pace with times and engage in exploitation and innovation”. This spirit is the precious spiritual wealth of the Chinese nation, and it’s a good material for ideological and political education of college students. Through methods such as story teaching, multimedia teaching, participatory teaching and practical teaching, the railway corps spirit is integrated into the “Outline of Modern Chinese History” course, which will be of great significance to cultivate the patriotism, selfless dedication and perseverance of contemporary college students.

Key words: railway corps spirit; ideological and political education; integration methods

~~~~~  
(上接第 110 页)

## Research on the Collection and Processing of Digital High Fidelity Information of Complex Architectural Heritage: A Case Study of the Stone Archway of Longquan Temple in Mount Wutai

Wang Xiaofen<sup>1</sup>, Yuan Pengjun<sup>2</sup>, Ma Lan<sup>1</sup>, Zhang Yichun<sup>3</sup>

(1. School of Architecture and Art, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China;

2. Shijiazhuang Qidian Technology Co. Ltd., Shijiazhuang 050043, China;

3. China Institute of Arts and Technology, Beijing 100000, China)

**Abstract:** The digitalization of architectural heritage is of great significance to the protection and inheritance of Chinese excellent traditional culture. 3D high fidelity information collection and simulation modeling are the important premise and foundation for its digitalization protection. However, in the process of practice, there are still a series of technical problems in the collection and processing of all-round data of complex architectural heritage. The stone archway of Longquan Temple in Mount Wutai is a complex ancient building with large size, complex shape and multi-layer openwork carving. The difficulty of data collection is the industry problem that has puzzled the digitization of this kind of architectural heritage for many years. According to its characteristics, this project has developed the technical scheme of data collection, processing, simulation modeling, compression optimization, etc., and proposed the complex and multi-layer openwork carving ancient building digital The theory, method, key technology and standard of data acquisition and processing provide useful reference and technical support for the digitization of such large and complex architectural heritage.

**Key words:** cultural heritage digitization; Mount Wutai architectural heritage; 3D high fidelity information collection; 3D simulation modeling