

三维激光扫描技术在故宫古建筑测绘中的应用研究

王 莫

内容提要 从2004年5月开始,故宫博物院“古建筑数字化测量技术研究项目组”应用三维激光扫描技术先后对太和殿、太和门、神武门、慈宁宫和寿康宫院落等重要古代建筑进行了完整的三维数据采集,并在大量实践基础上深入研究了处理三维数据的核心理论与方法。本文系统总结了使用三维激光扫描仪获取测量数据——点云,并将点云加工成三维模型、二维线条图和正射影像图,进而应用于古建筑整体变形监测、大木结构安全性分析、建筑构件尺寸测量和外观现状记录的方法与流程。

关键词 三维激光扫描 古建筑 点云 三维模型 二维线条图 正射影像图

一 研究背景

故宫是中国现存最大、最完整的古代宫殿建筑群,由于年代久远,加之观览人潮的不断涌入,建筑的残损程度与日俱增。自2002年起,故宫博物院开始对院内古建筑进行大规模的整体维修,这是近百年来规模最大的一次。大修工程以“不改变文物原状”为根本原则,因此在修缮前记录下古建筑原貌,为制定维修方案提供完整、准确的第一手资料就显得尤为重要。然而,通过传统手段根本无法获取古建筑原貌的所有测量数据,特别是像坡屋顶曲线弧度这种复杂的数值。

二十世纪九十年代,三维激光扫描技术的出现为空间三维信息的获取提供了全新的技术手段,它克服了传统测量技术的局限性,采用非接触、主动测量方式获取大量高精度三维坐标,能够对任意可见物体进行表面扫描,并且不受白天和黑夜的限制,可以快速将现实世界的空间信息转换成计算机便于处理的三维数据^{〔1〕}。

随着易操作性和抗干扰能力等各方面性能的提升及价格的逐步降低,如今,人们已将三维激光扫描仪广泛应用到各个领域当中。因为与古建筑沿用至今的徒手测量相比,三维激光扫描技术具有

〔1〕 朱光:《三维激光扫描测量技术探究及应用》,《模具工程》2009年第4期。

测量速度快、信息丰富、数据准确性高、有利于保护被测物体、节省资金、数据价值高等优点，所以近些年该技术在我国古建筑保护领域的应用备受关注，国内外许多专家、学者都已展开了相关的技术研究工作。

二 研究内容和条件

（一）研究内容

为了能深入研究三维激光扫描技术在故宫古建筑数字化测绘中的应用方法与流程，充分发挥该技术在中国古建筑中的认知和分析功能，故宫博物院决定与北京建筑工程学院合作开展“古建筑数字化测量技术研究”项目。其中，故宫博物院主要负责提出古建筑三维数据的采集标准、成果图的内容与表达形式等相关技术要求；北京建筑工程学院则承担技术流程设计、各种算法编写，以及数据采集和加工的具体实施工作。项目组的研究内容主要有：

1.应用三维激光扫描技术进行古建筑测量的数据采集方法与流程

研究了包括控制测量、三维激光扫描和数字影像拍摄在内的多种数据采集技术。

2.提高三维激光扫描所得点云数据精度和标靶精度的方法

3.点云数据的各项预处理方法

除点云数据的去噪与平滑算法和精简算法外，还针对点云逐站配准存在误差累积，使得点云模型精度降低的问题，研究了多站点云数据整体配准的方法。

4.利用点云数据构建物体三维模型的方法

重点研究了两种符合中国古建筑构件特点的三维模型构建方式。

5.三维模型在古建筑现状测绘中的应用方法

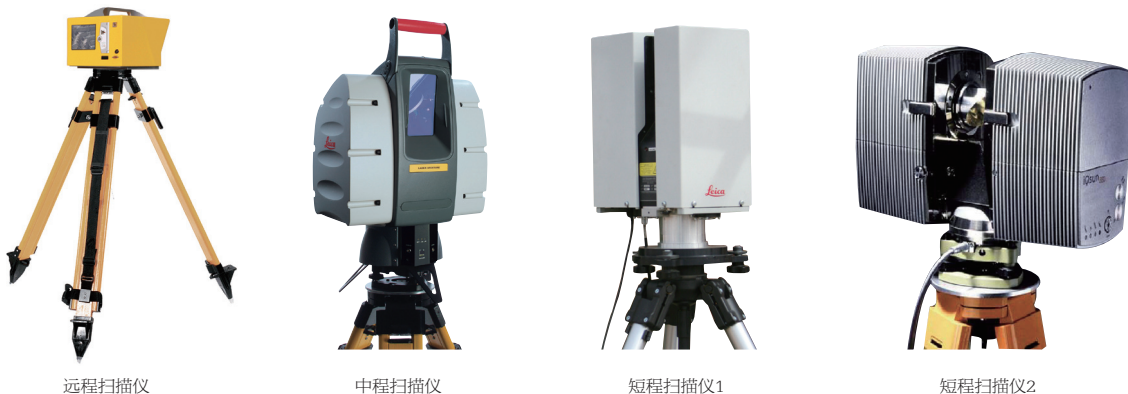
研究了三角网模型在古建筑整体变形监测中的具体用法；形成了一整套利用三维模型制作平面图、剖面图、柱子偏移分析图、立面及彩画正射影像图的技术方法与流程，满足了古建筑现状测绘的使用需求。

（二）研究条件

为了能完成不同测距和分辨率要求的古建筑三维数据采集工作，达到最佳的原始数据采集效果，项目组应用了多款不同测程的三维激光扫描仪，如〔图一〕所示，其中以瑞士徕卡公司的HDS3000中程激光扫描仪和HDS4500短程激光扫描仪为主。

此外，项目组还购置了最新型的电子水准仪、免棱镜全站仪、测量机器人和动态GPS等先进的测量设备，用以获取高精度的控制点坐标；并且使用具有较高分辨率的佳能5D数码相机和同步闪光灯一起进行数字影像的拍摄工作，有效地提高了成果图的画面质量。在点云数据的采集和加工过程

〔图一〕项目组应用的各种不同测程三维激光扫描仪



中，项目组所用计算机均是专业图形工作站，其主频、内存和显存等配置都能满足海量数据的处理需求。

三 研究过程及结果

从2004年5月开始，项目组已先后完成了太和殿、太和门、神武门、慈宁宫和寿康宫院落五处古建筑的三维数据采集、加工和整理存储工作。包括数据的采集方法、点云数据的预处理方法、数据在古建筑测绘中的利用方法等在内的各项研究工作也随之同步展开。

（一）数据的采集方法研究

原始数据采集工作大体分为控制网布设、三维激光扫描和数字影像拍摄三部分，采集的主要对象是高精度点云和彩色数码照片。

1. 控制网布设与统一坐标系

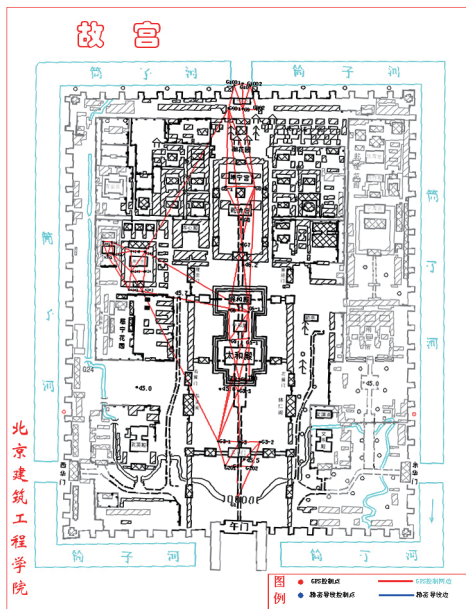
为了把故宫各单体建筑的测量数据连接起来，使之形成一个有机的整体，项目组在院内布设了如〔图二〕所示的首级控制网，将全部测量数据都纳入到了同一个坐标系统当中。这样做既能提高测量精度，又能方便数据对比，它给今后的古建信息管理工作奠定了坚实的基础。

以首级控制网为准，项目组还在单体建筑周围布设了加密控制网，如〔图三〕所示，太和殿外部五个和内部四个都是加密控制点，它们将坐标从室外传递至室内，使建筑内、外坐标系得到统一^{〔1〕}。

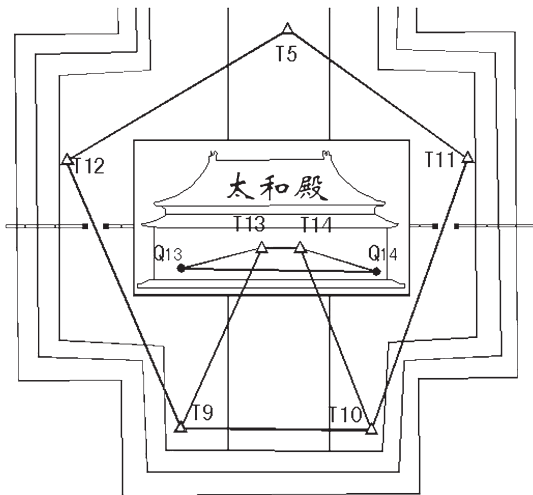
由于古建筑的大木梁架与地面之间多以天花隔开，无法从地面直接观测，因此在测量大木梁架时必须将仪器安置到建筑室内天花以上才行。古建筑室内天花上、下的坐标系统操作较为复杂，分为平面坐标传递和高程传递两个步骤。平面坐标传递采用在天花上架设全站仪，并做铅垂线确定位

〔1〕 陈秀忠、王晏民：《太和殿三维激光扫描精密控制网建立研究》，《测绘通报》2006年第10期。

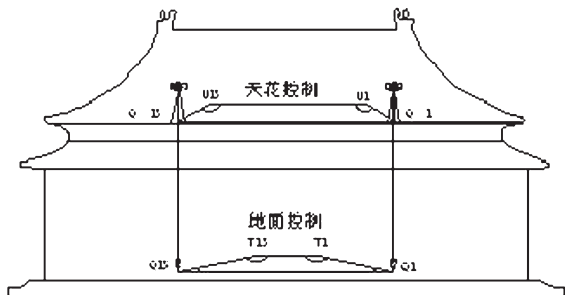
〔图二〕故宫首级控制网略图



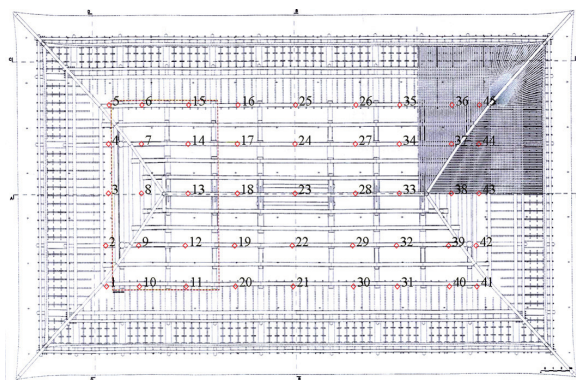
〔图三〕太和殿加密控制网略图



〔图四〕太和殿内天花上、下平面坐标传递示意图



〔图五〕太和殿天花以上扫描站点布设图



置的方法来实现，如〔图四〕所示。高程传递则是通过在天花上、下同时架设水准仪进行垂直钢尺观测的手段来实现。

2. 三维激光扫描

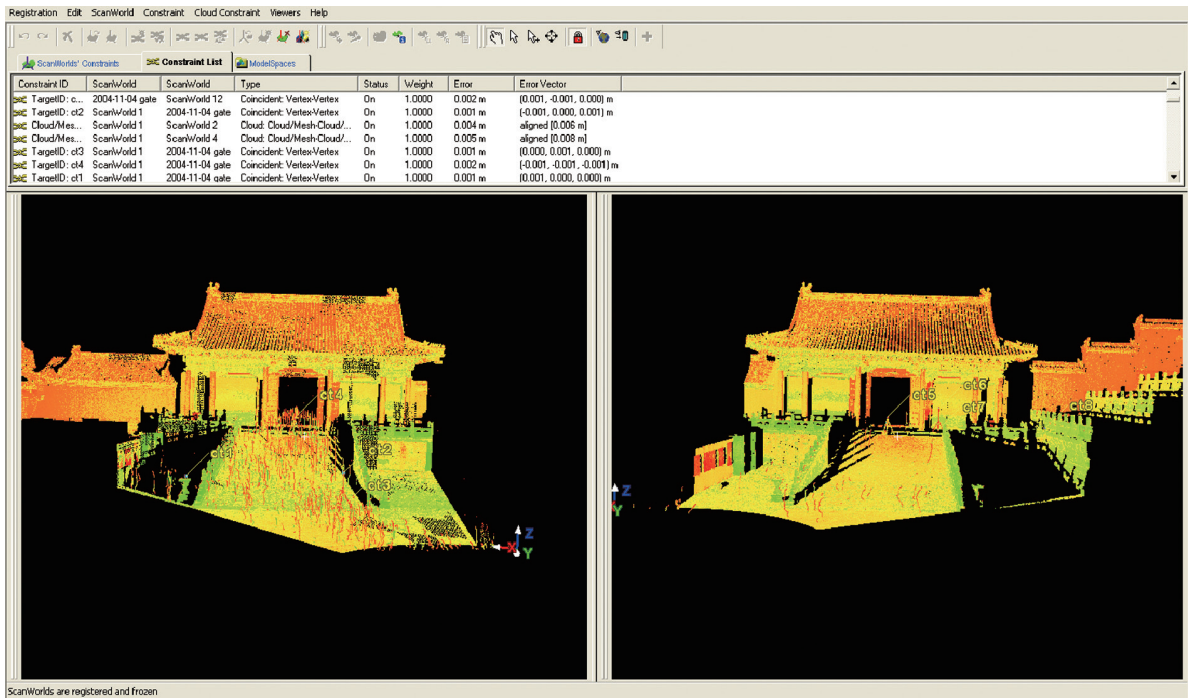
1) 扫描站点布设

根据三维激光扫描仪测距与速度的不同，项目组在建筑外部采用中程激光扫描仪，在内部则采用短程激光扫描仪。扫描站点布设需要考虑到各个站点之间的互补性，相邻站点的通视性，站点覆盖的全面性等多个方面。在〔图五〕中标出了太和殿天花以上扫描站点的具体位置。

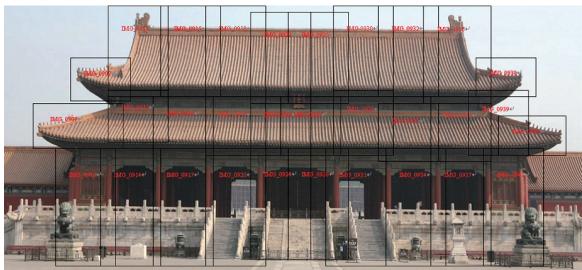
2) 标靶布设

多站点云数据的精确配准需要依靠标靶来实现，如〔图六〕所示。标靶布设应以均匀分布，并保证每站至少有四个同时可见为原则。标靶与控制点的连接方法是：在标靶中心粘贴测距反射片，令扫描仪和

〔图六〕利用标靶拼接(配准)两站点云数据



〔图七〕太和门南立面照片拍摄划分图



全站仪都能观测到同一个坐标点。

3. 数字影像获取

数字影像的获取研究主要包括拍摄角度、图幅大小以及图像分辨率等相关内容。

获取数字影像的根本原则是要尽量保证制作正射影像图所需原始像素的完整性，因此，数码相机的镜头应始终保持与建筑物立面平行。

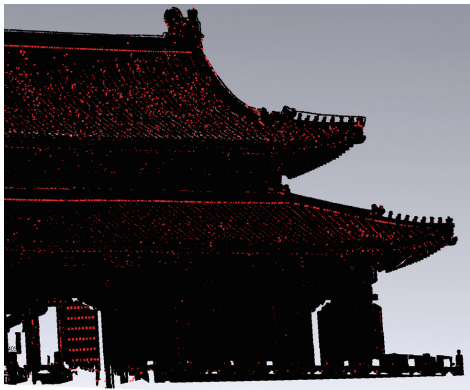
对于体量较大的建筑，项目组在现场采用了搭建脚手架等方法来提高拍摄视角。

为了制作一定比例尺下的正射影像图，需要按照这个比例尺预先计算出单张数码照片的分辨率。而单张数码照片的分辨率除与正射影像图的比例尺有关外，还与建筑物立面的划分方式有关，所以，在进行实地拍摄之前必须对建筑物立面做一个整体的划分，如〔图七〕所示，当中需特别注意两点：(1)相邻照片要有至少约五分之一的重叠部分；(2)对景深差异较大的地方，如屋顶要做单独划分。

（二）点云数据的预处理方法研究

项目组经实践发现，目前的数据处理软件在点云的平滑去噪、整体配准和精简等环节上都有不甚完善的地方，仍需通过研究不断改进。

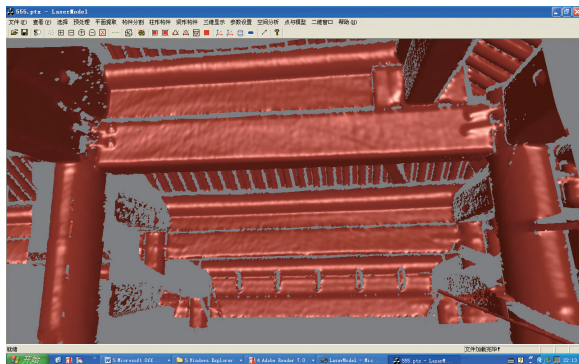
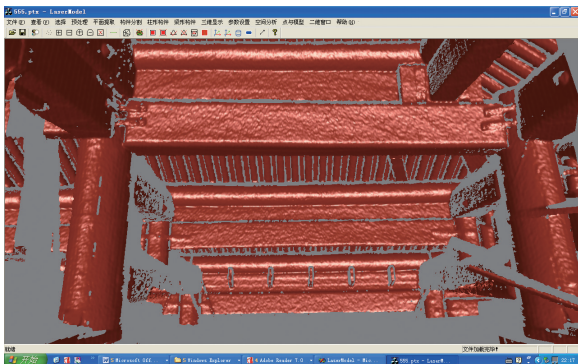
〔图八〕软件自动删除噪声点示意图



1. 点云数据的去噪与平滑

三维激光扫描仪在进行数据采集时, 所得点云会受到周围环境里诸多因素的影响而出现噪声点, 有时还可能产生不属于扫描物体本身的冗余数据。为了便于三维建模, 并提高模型精度, 我们必须对点云数据做去噪处理。如果完全采用人工手动删除的方法, 不但劳动强度大, 而且难免会有所遗漏, 因此项目组决定采用系统自动判别的方法进行操作。软件自动删除噪声点主要依据曲率法、弦高法和距离值法来实现, 其运算结果如〔图八〕所示, 红色部分为自动选出的噪声点, 黑色部分为

〔图九〕点云在经过带权张量的平滑算法处理前、后生成的三角网模型效果对比图



保留的点云, 将红色噪声点删除即为去噪后的点云数据。

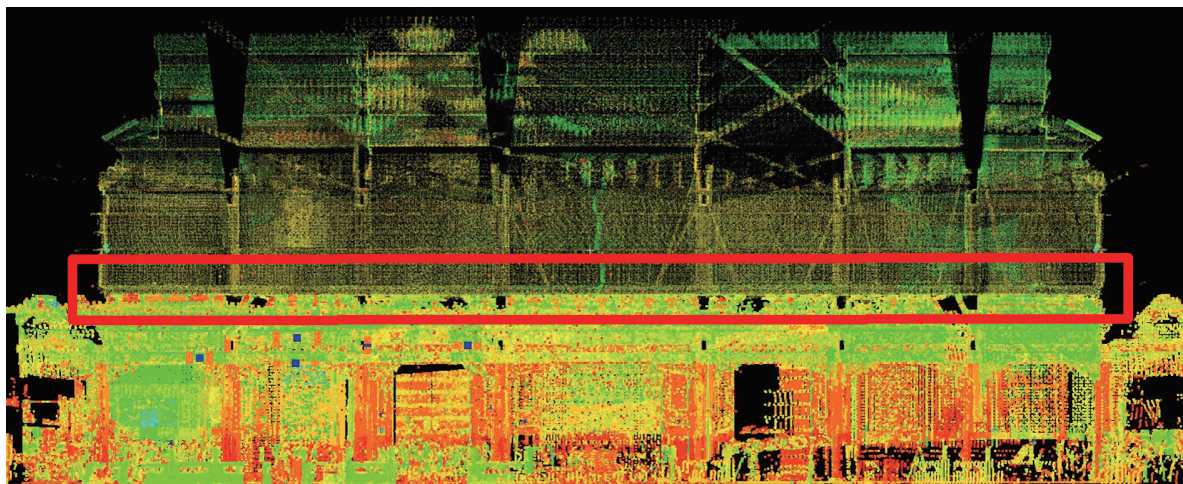
三维激光扫描仪在数据采集过程中会产生少量随机误差, 要对其进行平均才能得到光滑的点云。项目组通过研究提出了一种带权张量的平滑算法, 它在消除随机误差的同时能够较好地保护数据特征。如〔图九〕所示, 左侧为点云在平滑前生成的三角网模型效果图, 右侧则是平滑后生成的。

2. 点云数据的整体配准

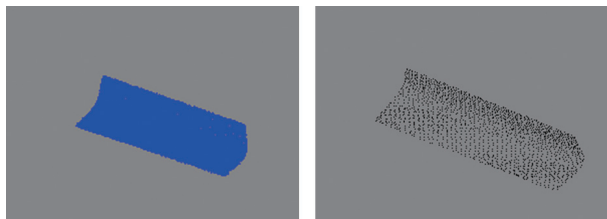
中国古建筑结构复杂, 且体量较大, 要从多个视角扫描才能获得完整的点云数据。经配准后形成的点云整体模型是后期进行加工与利用的基础数据, 点云的配准精度直接影响到后期成果的总体精度, 因此有必要对点云的配准方法做深入研究。

目前的数据处理软件尚不能解决多站配准的误差累积问题, 参与配准的站点越多, 点云模型整体尺度的误差也就越大。针对上述情况, 项目组经研究提出了点云数据的整体配准算法。多站点云整体配准以间接平差原理为理论基础, 具体方法是: 先把配准中的所有特征约束设为观测值, 将每站点云的空间转换参数及部分未知约束全部作为待定数值进行整体的间接平差; 当解算出空间转换参数和未知控制点平差值后, 利用求得的数值直接对各站原始点云进行空间转换, 即可实现整体配准。由于

〔图十〕太和门内部点云正视图(红框里是经整体配准后的连接部分)



〔图十一〕经过精简处理前、后的建筑物梁架点云对比图



多站整体平差技术的运用,点云数据的整体配准精度得以大幅提高。〔图十〕为太和门天花上、下连接部分的整体配准效果示意图。

3. 点云数据的精简

三维激光扫描具有测量精度高、速度快等优点,但也存在非连续覆盖(基于一定的

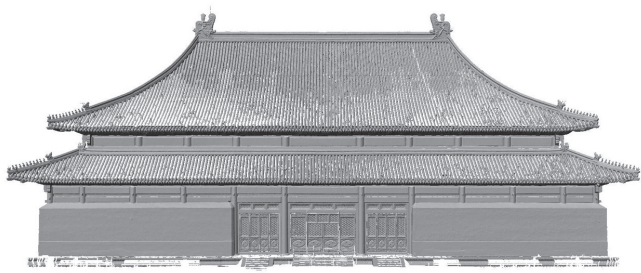
采样间距采样)和数据量大等缺点,尤其是它庞大的数据量,给后期的数据处理、传输和进一步应用都造成了极大障碍。具体说,点云数据的冗余性主要表现在以下两个方面:一是数据中包含较多的不必要信息,如在建立墙体的几何模型时,我们只需要提取墙面边缘的点云数据就足够用了,而并不需要墙面中间的;二是数据中含有多次扫描同一位置的重复信息,如多站配准会使同一面墙体的点云数据变得越来越多。所以,选择或编辑相应的算法对点云数据进行精简是十分必要的。

通过查找资料,项目组发现网格划分法对数据精简很有益处,并依此提出了一种新的算法,也就是利用改进的网格划分法来精简冗余数据。其基本思路是:先选取合适的步长将点云网格化,即把点云分属到不同的空间网格中;再计算网格内部数据之间的距离及角度偏差值,如果网格内点云数据较少,则不对其进行处理,如果网格内点云数据较多,且点云之间的距离值和角度值均超过了为满足精度所设的距离阈值和角度阈值,则删除该点云数据。这种精简算法的应用范围更广,它能较好地保持物体表面的原有特征。〔图十一〕是利用该算法进行数据精简的实例,左侧是原始点云图,右侧是精简后的点云图。

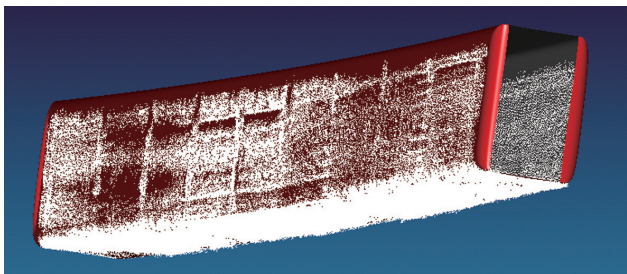
(三) 数据在古建筑测绘中的利用方法研究

除了作为原始信息留存,古建筑点云数据的主要作用就是给修缮工程的设计人员提供可靠的参

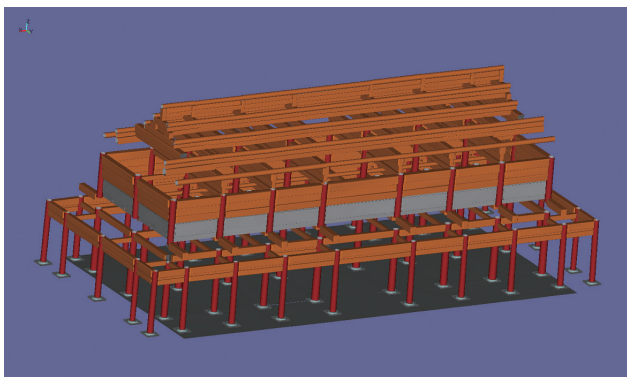
〔图十二〕太和殿北立面三角网模型



〔图十三〕根据点云建立枋子的NURBS曲面模型



〔图十四〕太和门大木构架整体模型



考资料。点云可以被加工成三维立体模型，直接应用于古建筑的整体变形分析；也可以被进一步制作成常用的二维线条图和正射影像图，应用于局部构件的变形分析、尺寸量取及建筑轮廓线的勾绘等。

1. 三维模型的建立

根据中国古建筑构件复杂多样的特点，项目组重点研究了三角网模型和NURBS曲面模型这两种三维模型的构建方式。

1) 三角网模型

以点云数据为基础，通过将设定距离值内每相邻三点构成一个平面的方式，软件能够自动建立起被测物体的三角网模型。〔图十二〕为太和殿北立面的三角网模型表现图。三角网模型可以精确表达不规则物体，但数据量较大。

2) NURBS曲面模型

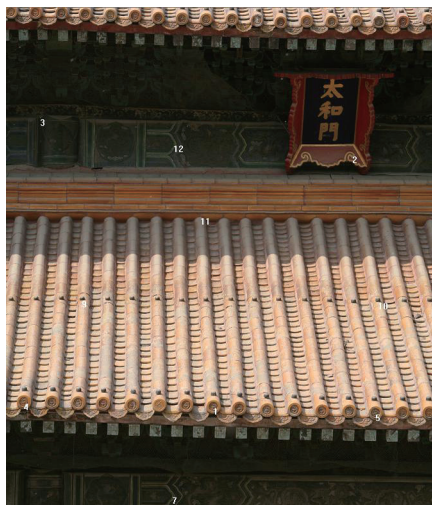
由于古建筑的大木构件并不是完全规则的几何形体，而是存在一定程度的扭曲变形，因此项目组决定选用NURBS曲面来建立大木构架部分的三维立体模型。NURBS是Non-Uniform Rational B-Splines的缩写，是非统一有理B样条的意思。与三角网相比，NURBS曲面不但数据量小，而且能够很好地控制模型表面的曲线度，人们只需对个别可控点进行操作就能完成曲面的局部调整工作了。因其构建并非由软件自动完成，所以人员工作量较大。

具体讲，NURBS曲面模型的构建过程采用分解组合方式，先将古建筑分解为柱、梁、枋等多种构件，按照每种构件的特点分别进行曲面建模(拟合误差均控制在5毫米以内)，再把各木构件的单体模型组合在一起，即可得到古建筑大木构架的整体模型。〔图十三〕为根据点云数据建立枋子曲面模型的过程示意图，〔图十四〕是太和门大木构架整体模型的表现图。

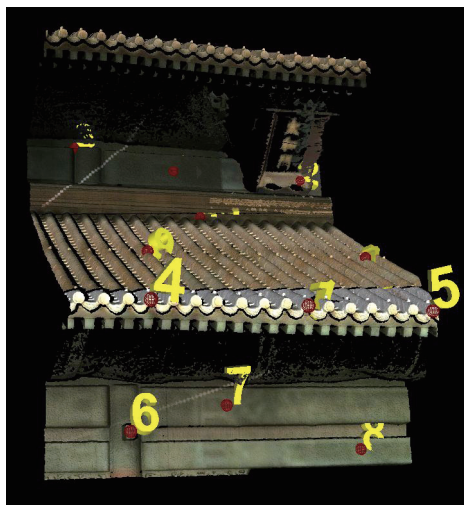
3) 三角网模型的纹理映射

纹理映射是指确定三维立体模型表面与二维纹理图像之间的对应关系，并按照一定算法将二维纹理图像映射到三维立体模型上的技术。纹理映射主要分为两种，即简单映射和严格按照摄影测量投影方式的映射。因为后者在数学上具有严密性，且符合真实投影原则，所以项目组采用了后一种纹理映射方法。

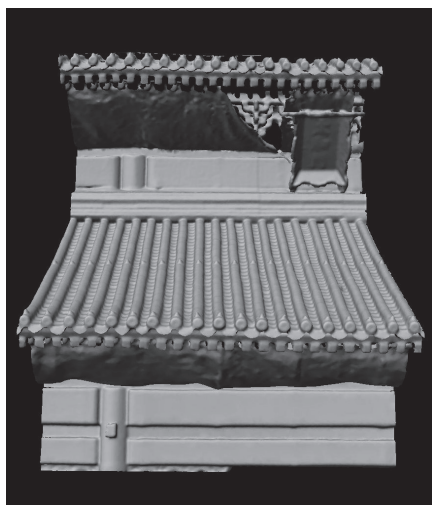
〔图十五〕三角网模型的纹理映射过程



〔图十五:1〕有选点标记的纹理图像



〔图十五:2〕用于选点的高分辨率彩色三角网模型



〔图十五:3〕用于贴图的低分辨率单色三角网模型



〔图十五:4〕结合纹理图像生成的彩色三角网模型

三角网的纹理映射过程需要用到两类模型：一类是不做平滑简化处理、具有灰度或彩色特征的高分辨率三角网模型，如〔图十五：2〕；另一类则是经过平滑简化处理的低分辨率单色三角网模型，如〔图十五：3〕。首先要在高分辨率模型和纹理图像上分别选取多对同名点，然后再把纹理图像映射到相应的低分辨率模型上，这样才能获得最终的彩色三角网模型，如〔图十五：4〕。

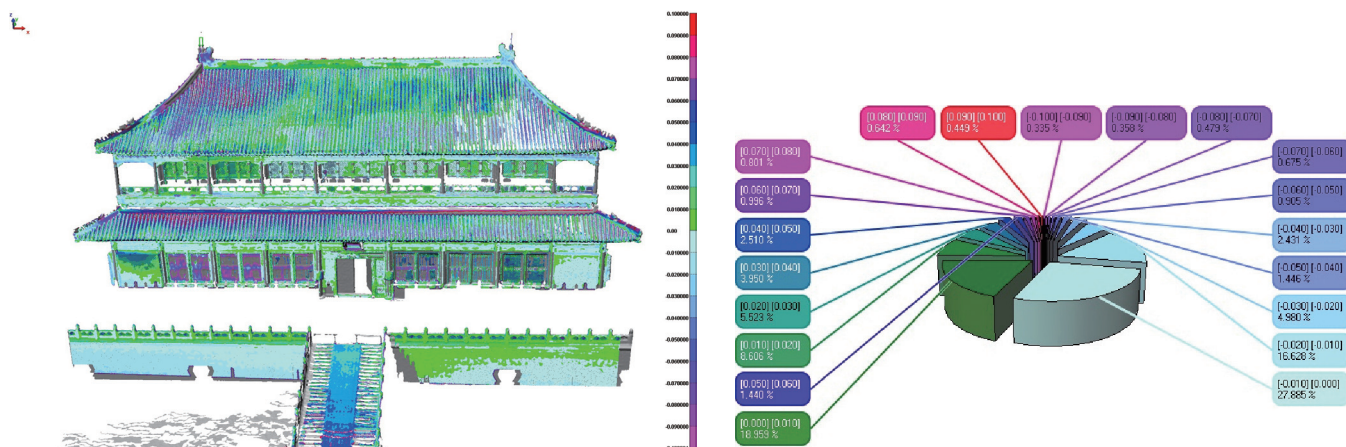
2. 三维模型的应用

1) 观测古建筑的整体变形情况——对比三角网模型

古建筑的整体变形情况是判断其结构安全性的重要依据，但它却是通过传统测量手段无法全面获取的，只能采用分析三维模型的方法进行精确观测。

如果以同名固定点将古建筑的两期三角网模型相叠加，并按照最近点差分原则进行对比分析，

〔图十六〕弘义阁修缮前后的模型对比分析图



如〔图十六〕所示，我们就能清楚、直观地看到该建筑在修缮前后的变化状况，如古建筑的原型制是否被改变，古建筑的问题是否被纠正等。

此项技术还可应用在古建筑整体变形的长期监测体系中。与以往使用全站仪的变形监测技术相比，这能有效避免基于变形监测点的数据分析结果所带有的局部性和片面性，即以点代面的分析方法的局限性^{〔1〕}。

2) 辅助绘制古建修缮工程的设计图纸——制作现状剖面图和平面图

准确、全面的现状数据是设计图纸的绘制基础，古建专业人员可以从剖切三维模型得到的现状剖面图和平面图上直接量取所需数值，并勾描建筑外形用于修缮工程的设计制图。

现状剖面图的具体制作方法是：剖切大木构架的NURBS曲面模型得到结构特征线，同时剖切建筑表面的三角网模型得到外围轮廓线，最后将两者合并生成完整的二维线条图，如〔图十七〕所示。

现状平面图的具体制作过程与剖面图相似，如〔图十八〕所示。

3) 协助分析古建筑大木构架的变形情况——制作柱子偏移分析图

对大木构件的详细分析可以为古建维修方案的制定提供可靠依据。柱子偏移分析图是采用在大木构架模型的柱头、柱脚位置分别进行剖切，合并后标明柱心偏移方向和数值的方法绘制而成的，如〔图十九〕所示。图中的实测数据准确反映了柱子的歪闪程度，土木工程师可据此进行相关力学计算，并对古建筑的结构安全性做出最终判断。

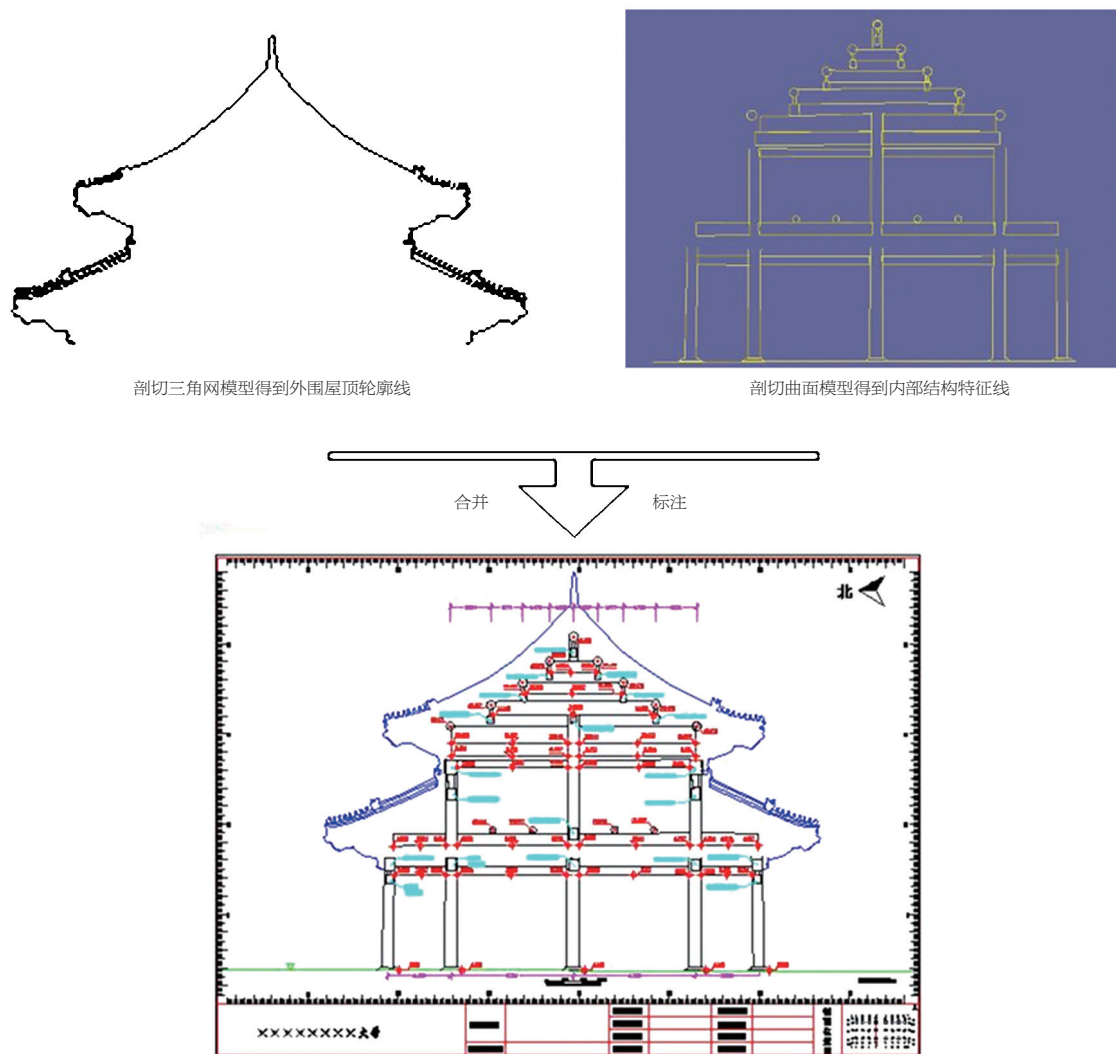
4) 记录古建筑彩画和立面的残损现状——制作正射影像图

正射影像图是利用三角网模型纠正了由诸多因素(特别是中心投影)引起的图像变形的照片，如〔图二十〕所示，其特点在于同时拥有准确的尺寸和精细的影像，能够忠实地展现出物体原貌^{〔2〕}。

〔1〕 罗德安、朱光、陆立、廖丽琼：《基于三维激光影像扫描技术的整体变形监测》，《测绘通报》2005年第7期。

〔2〕 王莫：《三维激光扫描技术在故宫古建修缮工程中的应用研究》，《世界建筑》2010年第9期。

〔图十七〕太和门剖面图的制作过程



工程设计人员可将其应用于标示构件尺寸和残损现状。

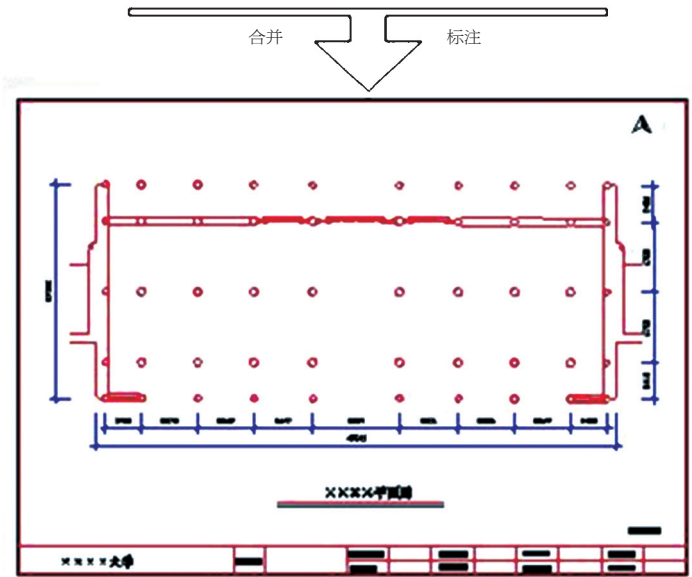
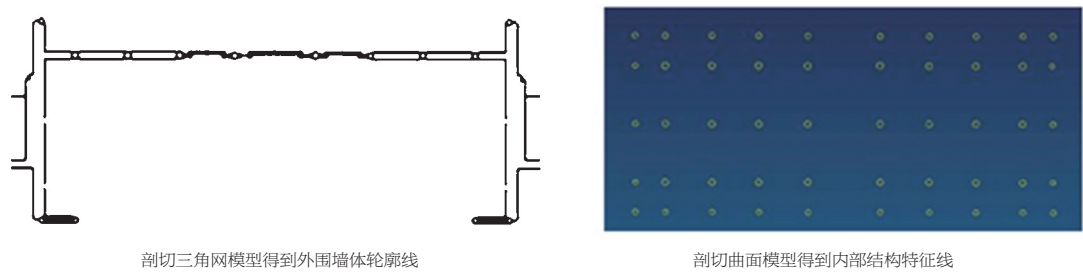
制作大型物体正射影像图的方法是先分块生成彩色三角网模型，再按以下两种情况处理。

情况一：在软、硬件的允许范围内，将各单块模型拼合到一起，然后调成正视角角度输出图像。输出的图像分辨率可以自由设定，但不能超过单块彩色三角网模型所使用的原数码照片分辨率。

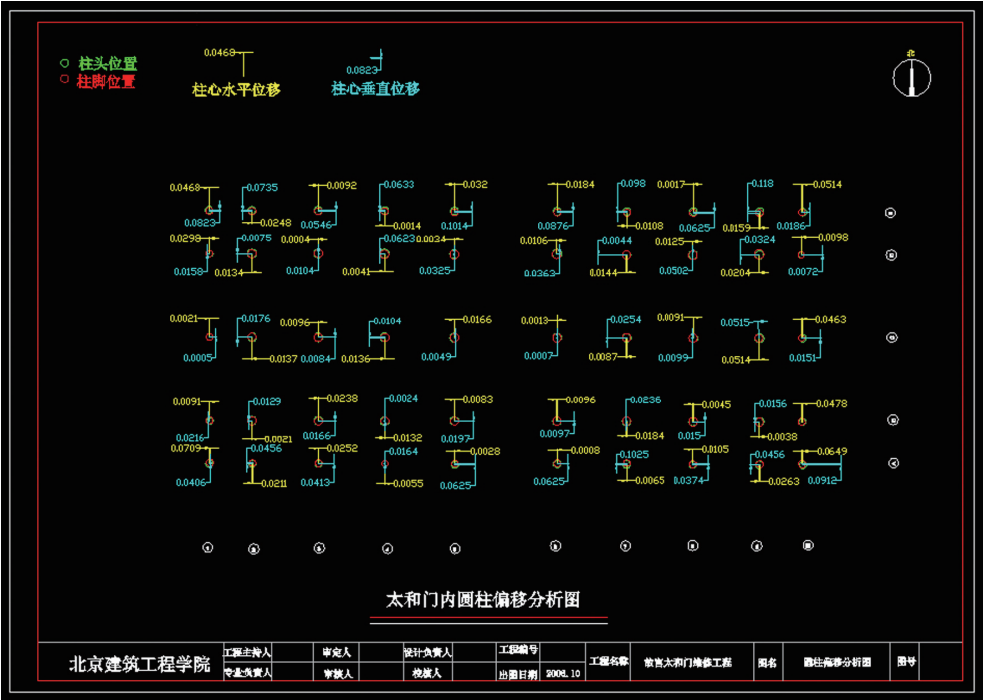
情况二：如果因物体过大导致软、硬件不支持模型拼合，则需分别输出各单块模型的正射影像图，而后再对图像进行整体拼接。在此过程中，为了统一各单幅图像的比例尺，可将各单块彩色三角网模型都以固定大小的立方体框架来显示、输出^{〔1〕}。

〔1〕 王晏民、郭明、王国利、赵有山、李玉敏、胡春梅：《利用激光雷达技术制作古建筑正射影像图》，《北京建筑工程学院学报》2006年12月第22卷第4期。

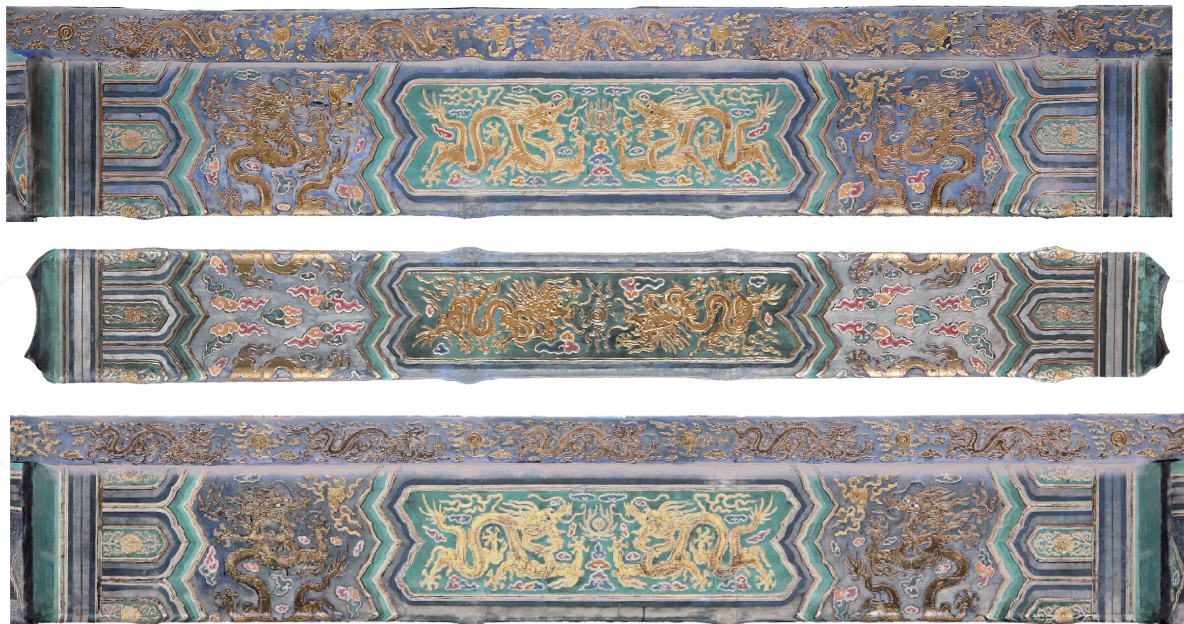
〔图十八〕太和门平面图的制作过程



〔图十九〕太和门柱子偏移分析图



〔图二十〕(梁枋)彩画正射影像图



〔图二十一〕太和殿南立面正射影像图

〔图二十一〕是拼接完成的太和殿南立面正射影像图，工程设计人员既可直接将其作为古建筑的现状立面图使用，也可在图像上快速描绘出常用的立面线条图。



四 项目总结

（一）研究成果

通过长期的实践，项目组最终形成了一整套应用三维激光扫描仪，进行测量数据采集并加工成图的技术方法与流程，特别是在三维建模与模型应用方面成果卓著。建立彩色三角网模型和大木构架NURBS曲面模型；对比分析三角网模型；剖切三维模型获得现状剖面图、平面图和柱子偏移分析图；制作彩画和立面的正射影像图等。这些方法的提出大幅提高了古建筑测绘的工作效率。2009年12月5日，本项目“三维激光扫描测量建模技术研究及在故宫古建筑测绘中的应用”荣获由中国测绘学会和国家测绘局联合评选的“测绘科技进步奖”一等奖〔图二十二〕。

本项目丰硕的科研成果在古建筑现状测绘与数字化存档、古建筑的虚拟重建和辅助修复等方面都具有非常重要的现实意义，它标志着我国的古建保护事业在现代化发展进程中又迈出了关键的一步。

〔图二十二〕项目获奖证书

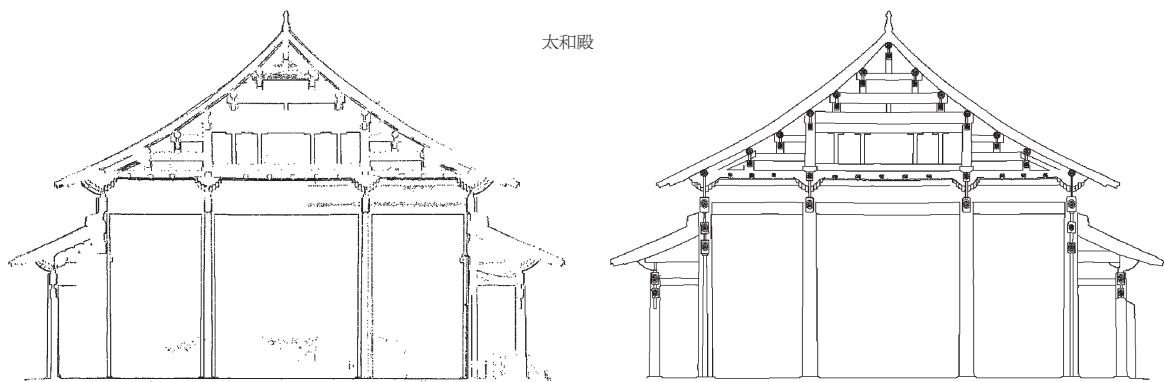


（二）研究方向

1. 建立三维数据库

三维测量数据包括有原始点云、控制点记录、原始影像、配准后的点云、三角网模型及纹理三角网模型、大木构架的NURBS曲面模型、线条图和正射影像图等多种类型，且数据量巨大。为了能够更加有效地管理和利用好全部数据，项目组计划下阶段将建立起“故宫博物院古代建筑三维数据库”，具体方法现正在研究过程中。

〔图二十三〕沿点云切片(左)拟合出现状剖面图(右)



2. 减少人工干预

因为中国古建筑结构复杂，利用三维激光扫描仪进行数据采集时，不可避免地存在测量“死角”，所以根据点云建立起的三维模型会有较多表面空洞。空洞需要靠人工手动修补，这就使剖切模型所得二维线条图的精度受到一定影响，因此项目组正考虑以最小人工干预为原则，直接使用点云切片制图，如〔图二十三〕所示。直接使用原始测量数据——点云，是工程设计人员获取准确信息的有效途径，同时这也是目前为古建专业人士所普遍认可的方法。

〔作者单位：故宫博物院古建部〕

（责任编辑：宋仁桃）

KEY WORDS: *Yongle Encyclopedia* (Yong Le Da Dian); the Institute of Three Classics of Rituals (San Li Guan); Lost Book Compilation; Classics of Rituals; library collections of the Imperial Palace

A Preliminary Study of the South-Song Lou Yue's Scholarly Attainments: Centering on *The Works by Gongkui* (Gong Kui Ji)

Lu Ying

ABSTRACT: The academic activities in the eastern region of Zhejiang province, also called Zhedong's scholarship, historically plays a significant part in Chinese academic history due to its prominent achievements. Unfortunately, a lot of researches have been focused on only a few schools and their representatives rather than the independent scholars like Lou Yue --- a talented learned official with noble character and high prestige. He was born in Siming of eastern Zhejiang province, grew up in a cultural flourishing epoch in the South Song Dynasty, was regarded as Ci Minister (ci, a type of classical Chinese poetry, originating in the Tang Dynasty and fully developed in the Song Dynasty). He compiled *Gongkui's Works* (Gong Kui Ji) which is a collection of his learning and scholarship with valuable materials for the study of the politics, characters and issues concerning academics in the South Song dynasty. This thesis centers on his academic accomplishments in respect of textual criticism, philology and historiography based on *Gongkui's Works* to present his solid scholarship with intent to upgrade the study of Zhedong learning.

KEY WORDS: Lou Yue; *Gongkui's Works* (Gong Kui Ji); Lou Yue's scholarly accomplishments; Zhedong learning

The article Chinese appears from page 131 to 142.

Three-D Laser Scanning Technology Applied in Measuring The Historical Architectures of The Palace Museum

Wang Mo

ABSTRACT: Since May, 2004 the research panel titled The Palace Museum Historical Architecture Digital Measurement Technology Research has started applying 3-D laser scanning technology to measure the historical buildings like Hall of Great Harmony (Tai He Dian), Gate of Great Harmony (Tai He Men), Gate of Martial Spirit (Shen Wu Men), Palace of Compassion and Tranquility (Ci Ning Gong) and the compound of Palace of Longevity and Well-Being (Shou Kang Gong). With the valuable data they gathered and practical experiment, the panel have made a more research of the central theories and methods of processing 3-d data. This paper systematically reviews the collected data --- *point cloud* which was proceeded into 3-D models, 2-D string diagram and orthophotograph, which will be used in monitoring the condition of the whole structure of the buildings, analyzing the security of the Timber Constructions, measuring the sizes of the architecture components and approaches and procedure recording the outer situation of the buildings.

KEY WORDS: T Three-D Laser Scanning Technology; historical architecture; point cloud; 3-D models; 2-D string diagram; orthophotograph

The article Chinese appears from page 143 to 156.