

基于实景三维技术的宁寿宫花园数字化构建

Digital Construction of the Garden in the Palace of Tranquil Longevity Based on 3D Real-Scene Technology

梁斯佳

LIANG Sijia

摘要

宁寿宫花园作为乾隆皇帝的私人园林, 是中国古代皇家园林的精华, 展现了独特的园林艺术风格。传统的测绘技术在对这类古典园林进行数据采集时存在局限性。运用高精度激光扫描和近景摄影测量等技术对宁寿宫花园进行了精确测量与数字化重建, 突破了传统测绘方法的局限, 实现了对宁寿宫花园空间要素的记录和数字化精准还原, 为花园的保护和修复提供了数据支持, 也为类似古典园林的数字化工作提供了新的思路和方法。

Abstract

As a private garden of Emperor Qianlong, the Garden in the Palace of Tranquil Longevity is the essence of ancient royal gardens in China, exhibiting a unique style of classical landscape architecture. Traditional surveying and mapping techniques have limitations regarding such classical gardens. This research has overcome the limitations of traditional measuring and mapping methods by using high-precision laser scanning and close-range photogrammetry techniques to accurately survey and digitally reconstruct the garden in the Palace of Tranquil Longevity. It has achieved a comprehensive recording and precise digital restoration of the spatial elements of the garden, providing support for its protection and restoration, as well as offering new ideas and methods for the digitization of similar classical gardens.

文章亮点

1) 利用实景三维技术实现中国古典园林数字化记录; 2) 探索了三维激光扫描技术及摄影测量技术的融合路径。

关键词

宁寿宫花园; 实景三维技术; 古典园林数字化

Keywords

The Garden in the Palace of Tranquil Longevity; 3D Real-scene Technology; Classical garden digitalization

收稿日期: 2024-03-31

修回日期: 2024-06-18

宁寿宫花园坐落于故宫宁寿宫区西北隅, 建设历程可追溯到乾隆三十六年(1771年)至四十一年(1776年)。宁寿宫是乾隆皇帝为自己退位后颐养天年而精心设计并主持建造的宫殿, 也是中国现存唯一的太上皇宫。宁寿宫花园因其独特性和历史意义, 亦被誉为“乾隆花园”。其不仅体现了乾隆时期高超的园林艺术水平, 更承载了丰富的皇家象征意义^[1], 体现了儒、道、释、帝的平衡统一, 展现了乾隆皇帝作为一代圣王对功德圆满的追求。

宁寿宫花园南北纵深 160 m, 东西宽 37 m, 占地面积近 6 000 m² (图 1)。其布局精巧, 参照了江南私家园林的造园手法, 将园林划分为 4 个院落, 并通过建筑、游廊和山石等元素巧妙地分隔空间, 在弥补地形过于狭长的缺陷的同时, 将私家园林的妩媚秀丽与皇宫的庄重氛围相结合, 展现了中国古代皇家园林的独特魅力和历史韵味, 是晚清中国古典园林的代表, 更是世界文化遗产的重要组成部分。

清华大学建筑学院与故宫博物院共同完成了《宁寿宫花

园保护修复方案》，并对宁寿宫花园的保护修缮提出了明确要求。然而，不同于其他的文物或历史文化遗产，古典园林的空间尺度丰富，构园要素多样，其表现形态通常包含丰富细节和大量非规则对象（图2）。如何全面系统地保留古典园林的现状和历史信息，对园林中的不规则要素如掇山、花木和铺装进行准确测绘、表达、重建和再现，以实现文化遗产全面、真实的记录和展示，是保护修复宁寿宫花园需要面对和解决的现实问题。

若对宁寿宫花园中假山石进行精准测绘和数字化复现，除可帮助判断假山石的来源、堆叠风格及其所属时代外，还能为后世假山石的修复工作提供准确的三维模型信息；对花园中现存树木信息进行全面收集及数字化，并在数字三维空间中跟踪记录其种类、分布及生长状况，对于理解宁寿宫花园的造园意匠和景观特色亦具有重要意义。

1 传统测量技术的局限

传统的测量技术虽然可以忠实高效地记录空间实体的点线面坐标信息，但对于被测物的质感、材质肌理、色彩以及现存状态等方面的记录却存在不足，而这些信息恰恰是园林遗产价值的重要表现形式。园林实体通常会随着植物的生长和岁月的变迁而产生变化，特别是在面对雨雪的侵蚀和外

力的破坏时，而传统的测量技术无法有效地记录变化后的园林与其原尺寸的差异。常规的手工测量和计算机绘图很难全面地控制植物、山石等园林要素数据记录的精度，且其生产过程会受到人为活动因素的干扰，其生产效率也不能满足获取大量数据的需求。宁寿宫花园中园林要素的组合搭配灵活多变，而传统的测绘方法并不支持在复杂几何形体交叉错落的空间关系中开展作业，同时传统数据的保存和读取方式也不利于古典园林数据的判读与应用^[2]。

2 基于三维实景技术的宁寿宫花园数字化路径

在过去的20年间，数字测绘技术的生产成本不断下降，并在多学科领域逐步普及。以数字三维形式进行空间实体的原真性记录，逐渐成为文化遗产保护研究方面的重要技术手段。摄影测量技术可以从影像中获取被测物的三维信息，激光扫描技术则通过激光测距扫描被测物体，形成被测物表面点云模型，以记录空间坐标等信息。2种技术都具有非接触性的特点。

面对宁寿宫花园这一文物保护单位特殊性和工作复杂性，研究综合运用了近景摄影测量、三维激光扫描等多种技术，以实现宁寿宫花园的精确测量，并利用测绘成果，对宁寿宫花园进行数字化重建。

2.1 数字测量技术

2.2.1 近景摄影测量技术

近景摄影测量技术能够快速高效地获取测量目标的纹理信息。其通过从多个角度对被测物进行拍摄，获取一组照片，然后利用光线沿直线传播的原理，反求出光线在三维空间的近似交点，从而获取被测物体的形状、大小、状态和空间几何位置等信息。这种非接触测量方法不仅避免了对文物的直接接触和潜在损害，还能提供高精度的测量数据^[3]。

相较于传统测绘和拍照记录的方式，近景摄影测量技术可大大降低生产时间成本，有效提高工作效率^[4]。通过近景摄影测量获取的数据，能够在数字模型中还原出园林要素的精确纹理，使模型更加真实可信。然而，近景摄影测量也存在一些局限性，其作业过程受环境光影响程度大，设备在进行外业拍摄时容易受到天气、时间等因素的影响，因光线方向、亮度的变化而发生图像质量不稳定、测量精度降低的情况。

2.2.2 三维激光扫描技术

三维激光扫描技术是另一种重要的数字化重建手段。作为一种高精度、快速获取物体三维几何数据的新颖技术，三维激光扫描技术通过发射激光并接收其反射回来的信号，自动计算得出被测点的相对三维坐标。该技术为数字模型的构建提供坚实的基础^[5]。

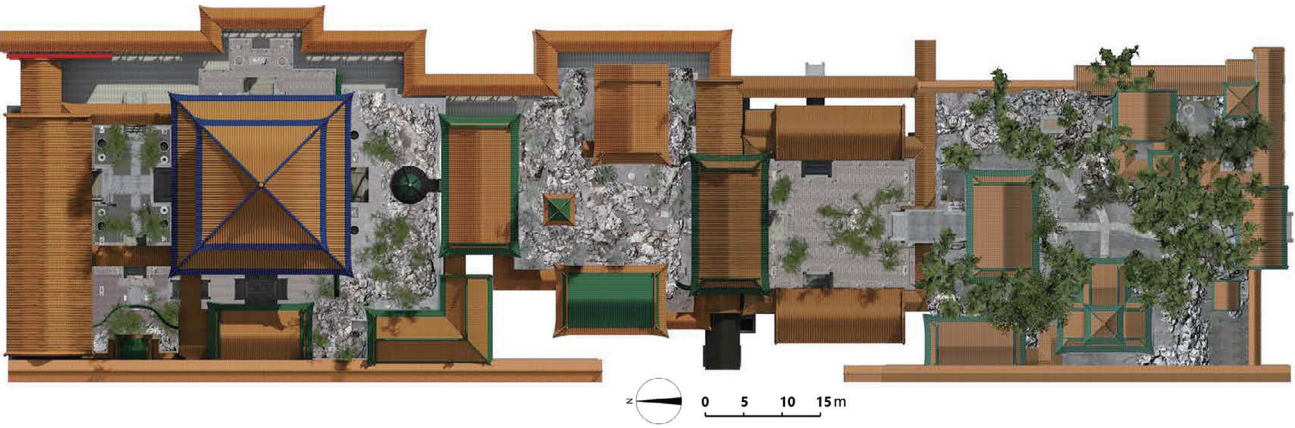


图1 宁寿宫花园平面图

Fig.1 Masterplan of the Garden in the Palace of Tranquil Longevity

值得注意的是，虽然三维激光扫描技术能够提供高精度的几何数据，但其获取的模型往往缺少纹理信息。因此，在实际应用中需要结合近景摄影测量技术来获取园林要素的纹理信息，并将其映射到三维模型上，以实现模型的完整性和真实性。

2.2 园林要素的数字化路径设定

在进行三维数字化重建时，为确保模型具备几何准确性、照片级真实感以及场景的完整性，数字模型必须在形状、位置和色彩等方面与原始物体保持高度一致，并达到高精度的要求^[6]。而宁寿宫花园内部包含了建筑、假山、摆件、铺装和植物等多种要素（图 2~3），在其数字化重建过程中需要针对这些要素的不同特征，设定相应的数字化目标。因此，选择合适的测绘技术和制定科学的采集方案显得尤为重要。

通过对被测物的测绘需求以及不同测绘设备的技术优势进行对比分析，研究最终选择使用全站仪完成对于假山关键控制点、植物定植点、铺装范围控制点的记录，形成了宁寿宫花园平面图的修测；使用三维激光扫描技术完成假山、摆件和植物材料主干的数据采集及建模；使用近景摄影测量技术完成假山及摆件的模型建设及铺装平面的测绘，补充完善了全园平面的实景信息（图 4）。系统技术的应用不仅实现了对古典园林几何形体数据的精确留存，还全方位记录了园林各要素的现存状态、质感、纹理和色彩等信息。各要素的具体数字化路径设定如下：

1) 建筑

建筑是宁寿宫花园的主要构成要素，花园自正门“衍祺门”起，四进院落中亭台楼阁错落布置。除了具有重要的使用功能外，建筑也是重要的构园骨架。以故宫博物院提供的宁寿宫花园建筑图纸为基础，结合现场勘测，借助三维建模工具，即可实现宁寿宫花园内所有建筑的三维模型重建工作。在三维模型建立过程中，为了确保模型中的每一个细节都与实际建筑保持一致，精准地呈现建筑的轮廓、

结构及装饰元素，需对现场进行全覆盖拍摄，利用现场拍摄的照片对模型进行纹理贴图，使模型表面的纹理和色彩更加接近真实情况，从而进一步

提高模型的逼真度。

2) 假山

宁寿宫花园内分布着 10 余处大小各异的假山，假山山体的叠石体积巨



图 2 古华轩庭院屏山
Fig.2 Rockery of the courtyard of Pavilion of Ancient Glory



图 3 符望阁院落俯瞰
Fig.3 Overlook of the courtyard of Tower of Elusive Dreams

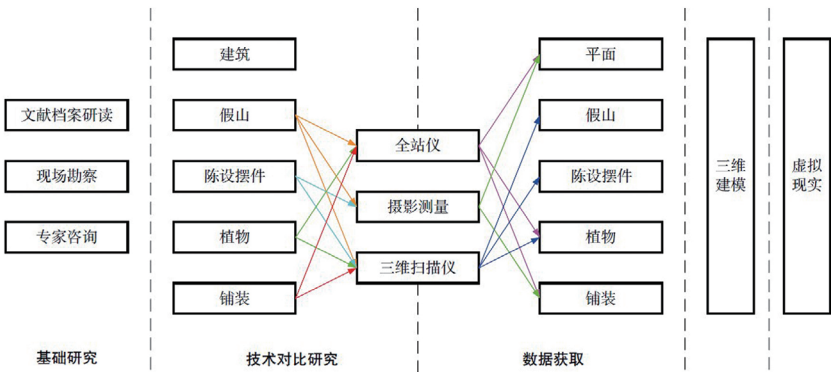


图 4 宁寿宫花园数字化测绘工作流程
Fig.4 Digitization mapping workflow of the Garden in the Palace of Tranquil Longevity

大、形状不规则,形态变化丰富。同时,各院落中还散落着许多形态独特、大小不一的单体峰石。这些峰石不仅体量差异巨大,而且形态极尽不规则,虽然使得整个园林景致更显自然与生动^[6],但也导致假山石结构异常复杂,空间遮挡问题严重,极大地限制了可供测量的工作界面,从而增加了数据采集工作的难度。因此,对假山石进行多角度、中距离的三维激光扫描,可以准确记录其几何形态和位置关系;再对模型进行纹理映射,确保模型的准确度和真实度。

3) 植物

宁寿宫花园中的植物高大茂密,且其本身具有纹理独特和形态多变的特点,增加了全园的层次感、立体感。在数字化过程中,除了记录植物的空间位置和形态外,还需考虑如何最大程度保留其生物特征,以区分不同种类和姿态,记录演变过程。为此,研究运用近景摄影测量技术和图像处理技术,提取植物的纹理和形态信息。

4) 摆件

摆件是彰显宁寿宫花园的人文气质和品位的重要载体^[7]。花园中现存的繁复摆件虽多数变形或破损,但其表面纹理丰富。为实现摆件的精细纹理的数字化,研究利用高分辨率的摄影设备进行纹理采集,并结合三维建模软件进行精细化处理。

5) 铺装

花园的地面铺装设计精巧细致,涵盖道路铺设、建筑散水以及院落铺墁等多个方面。其采用的铺装材料同样丰富多样,既有普通的砖铺地,也有五色石铺地等。然而,花园中各院落的地面铺装因历经岁月洗礼,普遍存在着不同程度的残损问题,不均匀沉降、磨损、风化和剥落等现象屡见不鲜。为了对这些地面铺装进行精确测绘和完整记录,采用数字近景摄影测量技术,对宁寿宫花园4个院落的地面铺装进行详尽测量。这一举措不仅有助于深入了解宁寿宫花园地面铺装的现状,更能为后续的修复和保护工作提供宝贵的数据支持。

3 宁寿宫花园数字化重建成果

研究通过综合运用多种数字测量技术,成功地实现了宁寿宫花园园林要素的高精度、高真实感的数字化重建,为后续的文物保护、修复和研究工作提供了有力支持。

其中,近景摄影测量与三维激光扫描技术发挥了重要作用。研究利用近景摄影测量技术实现了对地面铺装的精确测绘(图5),不仅提高了测绘的精度和效率,还为后续的模式重建和纹理贴图提供了重要的数据支持。在利用三维激光扫描技术对假山、植物和摆件进行扫描测绘时,通过设置合理的扫描仪站点和保证点云数据之间的重叠度,成功获取了完整且精确的点云数据(图6)。基于这些数据点,利用专业的建模软件对花园进行了三维重建,并通过纹理贴图技术为模型添加了真实的色彩和纹理信息。在对这部分信息进行场景分割数据重建的过程中,研究进一步采用了去除噪声、

提取主要扫描对象、点云数据分组分割等一系列技术手段,确保了重建模型的准确性和完整性。

此外,为了实现宁寿宫花园的虚拟漫游,研究将建筑、假山石、植物、摆件和铺装的三维模型进行了“渲染烘焙”,并导入到基于GIS平台的虚拟环境中。如此不仅实现了对宁寿宫花园的虚拟重现,还通过二维信息与三维场景的融合,实现了二三维一体化的可视分析功能(图7)。同时,研究对模型数据进行了二次精简和分组,以适应后续三维编辑软件对处理数据量的要求。

4 结语

随着数字化技术的突破和不断成熟,传统测绘技术的局限被逐渐打破,这为中国古典园林从矢量化到数字化的实现创造了契机^[8]。研究综合运用了多种技术手段对晚清中国古典园林代表宁寿宫花园进行了全面调研与测绘,通过绘制平面图、三维建模等工作,形成了宁寿宫花园的三维数字底座建设。这一数据基础不仅详细记录了宁寿宫花园的园林要素特征,还对其构园要素进行了数字化分类和存档,为宁寿宫花园后续的进一步数字化应用提供了有力的数据支撑。

在测绘技术研究与建模工作中,通过对比包括摄影测量、激光扫描在内的多种测绘技术的可操作性和软硬件平台的适

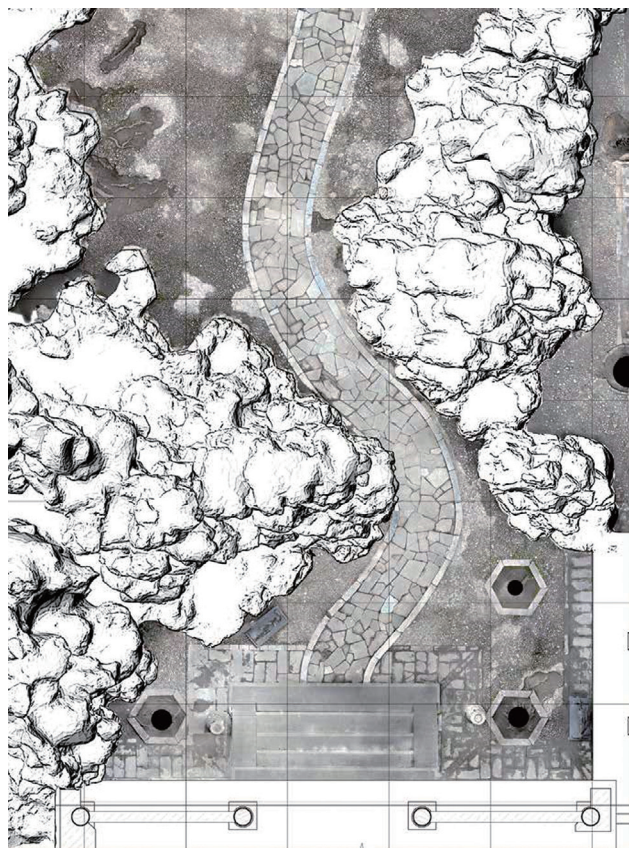


图5 花园铺装近景摄影测量及模型重建

Fig.5 Close-range photogrammetry and model reconstruction of garden paving

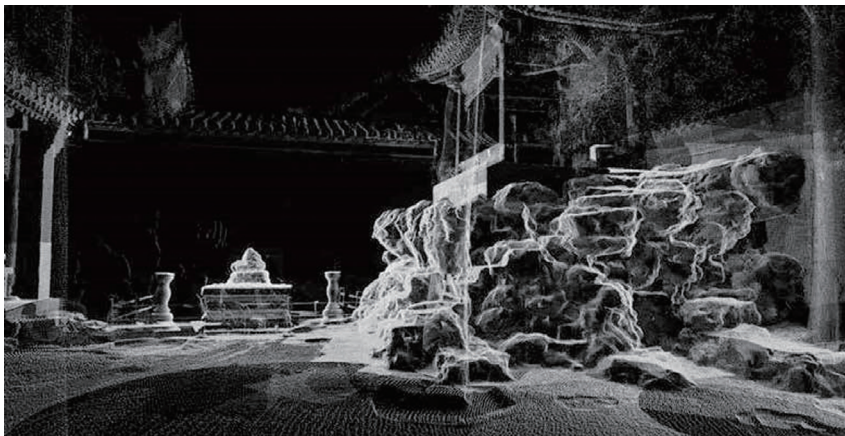


图6 抑斋局部三维激光点云模型

Fig.6 Localised 3D laser point cloud model of Yizhai

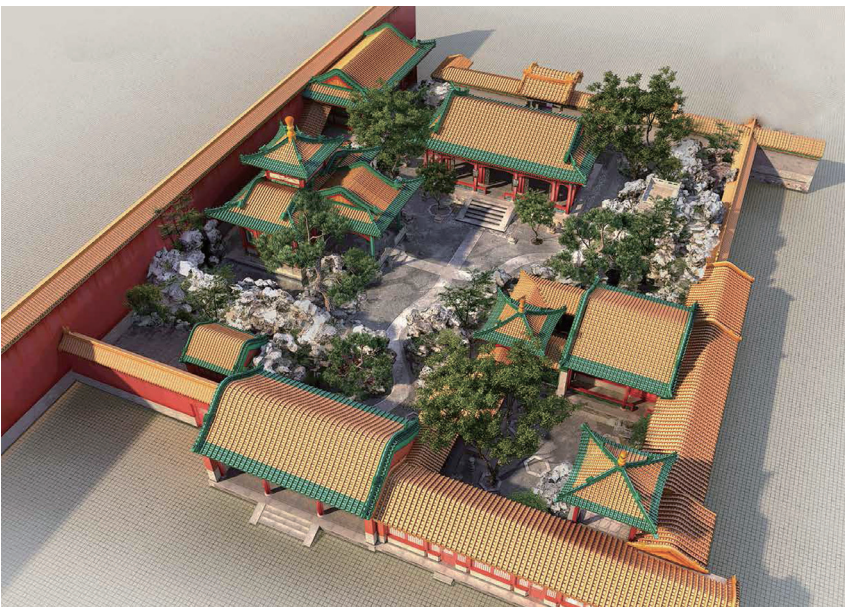


图7 古华轩院落模型

Fig.7 Model of Pavilion of Ancient Glory

应性，确定了使用全站仪完成平面图修测，使用三维激光扫描技术完成假山和摆件的数据采集及建模，使用近景摄影测量技术辅助完成摆件、植物及铺装平面测绘。这些技术的综合应用实现了对宁寿宫花园的无损精确测量，并成功完成了全景的数字化重建工作，为类似的古典园林数字化工作探索了方法路径^[9]。

研究成果不仅实现了宁寿宫花园各项园林要素的精准测绘与数字化重建，同时还为以数字化方式探索古典园林的造园艺术和历史文化内涵提供了经验。这些成果将为古典园林的保

护与传承工作提供新的思路和方法。

致谢：该项目研究始于2009年，前后历经约九年，清华同衡规划院多个团队及个人均参与了大量技术研究工作。感谢故宫博物院王时伟老师对项目组的信任和支持；感谢胡洁老师、安友丰老师对项目及研究的坚持和指导；感谢王劲韬老师对史论研究的部分的指导；感谢所有参与项目工作的团队成员。

注：图片均由北京清华同衡规划设计研究院有限公司提供。

参考文献：

[1] 张淑娴. 建福宫花园建筑历史沿革考[J]. 故宫博物院院刊, 2005 (5) : 157-171,

371-372.

[2] 张青萍, 梁慧琳, 李卫正, 等. 数字化测绘技术在私家园林中的应用研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42 (1): 1-6.

[3] 丁少闻, 张小虎, 于起峰, 等. 非接触式三维重建测量方法综述[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54 (7) : 27-41.

[4] 李迎松. 摄影测量影像快速立体匹配关键技术研究[D]. 湖北: 武汉大学, 2018.

[5] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势[J]. 测绘学报, 2017, 46 (10) : 1509-1516.

[6] 王时伟, 刘畅. 金界楼台思训画碧城鸾鹤义山诗如诗如画的乾隆花园[J]. 紫禁城, 2014 (6) : 33-59.

[7] 王时伟, 刘畅, 伍子兴, 等. 乾隆花园: 亲历精品修缮[J]. 美成在久, 2016 (1) : 84-93.

[8] 梁慧琳, 张青萍. 园林文化遗产三维数字化测绘与信息管理研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2020, 44 (5): 9-16.

[9] 王时伟, 胡洁. 数字化视野下的乾隆花园[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2018: 425.

作者简介：

梁斯佳/1985年生/男/北京人/硕士/北京清华同衡规划设计研究院有限公司(北京100085)/高级工程师、注册城乡规划师/专业方向为风景园林公司与项目管理、风景园林规划设计与数字化