

基于无人机航测数字技术的园林规划设计类课程教学探索

An Exploration of Teaching Landscape Planning and Design Courses Based on UAV Photogrammetry Technology

朱政洋 李相思 刘小冬*

ZHU Zhengyang, LI Xiangsi, LIU Xiaodong*

基金项目: 校级高等教育教学改革项目“OBE 理念下无人机航测数字技术在《乡村景观营造》课程教学中的应用”(编号: JG2024089)

摘要

随着数字中国建设的推进, 数字技术融入园林专业教学成为趋势。无人机航测技术凭借其高效、低成本等优势, 在园林规划设计中展现出广阔的应用前景。以广州市白云区马洞村航测实验为例, 论述无人机航测数字技术的发展现状、相关概念、应用优势、硬件设备和完整技术流程, 并分析无人机航测数字技术在园林规划设计教学中的积极作用: 开阔学生视野, 增强学生对场地空间尺度的感知能力, 提升设计效率及方案的科学性等。最后提出其在 14 门专业课程、5 项实习项目具有潜在应用场景, 并探讨未来可能的研究方向。

Abstract

With the advancement of Digital China, the integration of digital technologies into landscape architecture education has emerged as a significant trend. UAV photogrammetry, with its advantages of efficiency, low cost and so forth, shows great potential in landscape planning and design. This paper examines the UAV photogrammetry experiment conducted in Madong Village, Baiyun District, Guangzhou, as a case study, exploring the current state of development, relevant concepts, application benefits, hardware requirements, and the complete technical workflow of UAV photogrammetry. It further analyzes the positive impacts of this technology on landscape architecture teaching, including broadening students' perspectives, enhancing their spatial perception skills, improving design efficiency, and increasing the scientificity of design. The paper also proposes potential applications in 14 specialized courses and 5 internship projects, and concludes by outlining possible directions for future research.

文章亮点

- 1) 利用无人机航测数字技术进行场地空间数据采集; 2) 详述无人机航测数字技术的操作流程;
- 3) 探索并构思各类空间数据在园林规划设计类课程中的应用场景及其未来可能的运用方向。

关键词

风景园林; 无人机航测; 教学探索; 数字技术; 遥感

Keywords

Landscape architecture; UAV photogrammetry; Teaching exploration; Digital technologies; Remote sensing

2023 年 2 月, 中共中央、国务院颁布的《数字中国建设整体布局规划》明确指出, 建设数字中国是数字时代推进中国式现代化的重要引擎, 是构筑国家竞争新优势的有力支撑^[1]。为适应时代需求, 将数字技术融入风景园林专业教学实践已成为必然的趋势, 不仅推动教学模式更新, 还辅助风景园林研究从感觉到知觉、从定性到定量的转变^[2]。这一

变革既能够耦合教学内容和行业发展, 也是推动园林向智慧园林转型, 成为智慧城市和智慧中国重要组成部分的关键一步^[3]。

自 1917 年世界第一架无人机在英国诞生以来, 无人机技术不断发展, 无人机航测技术已在农林牧业、工业、服务业等多个领域展现出广阔的前景^[4]。如 Sanda Marioara

Naş 等^[5]以克卢日纳波卡市前砖厂 (Former Brick Factory, Cluj Napoca, Romania) 为例, 阐释了无人机航测技术在土地利用规划项目中的运用; 潘冬荣等^[6]阐述该技术在草原生态学研究中的作用; 孙长奎等^[7]则针对智慧城市建设, 论述了无人机遥感技术的应用方向; 冯增文等^[8]探讨了低空无人机的倾斜摄影测量技术在城市轨道交通建设中的实践; 汤明文等^[9]对无人机在电力线路巡视中的应用进行了分析。而无人机技术在风景园林领域的应用, 有杨阳等^[10]以南京市老门东为例说明无人机低空航测技术在传统聚落调查中的优势; 张志明等^[11]研究了无人机遥感技术在景观生态学中的作用; Azizi Zahra 等^[12]以法提花园 (Fateh Garden, Iran) 为例讨论利用航测点云数据对城市单株乔木进行高精度监测的可能性; 程文字等^[13]和韩炜杰等^[3]对无人机航测技术在风景园林规划设计中的应用进行详述; 陈荻等^[14]以南京林业大学校园为例, 利用无人机航摄影像计算三维绿量。

尽管无人机航测数字技术在风景园林领域的实践日益增多, 但其在规划设计教学中的应用仍然有限, 无法满足学生学习现代化技术的需求。本文以广州市白云区马洞村为例, 利用无人机航测技术获取场地数据, 阐述技术路线及优势, 分析该技术在风景园林规划设计教学中的积极作用和使用场景, 为场地调研提供一种低成本、高效率且更精准的方式; 并探讨该技术在实际应用中可能面临的限制与挑战, 为未来的研究方向提出建议, 以期为风景园林规划设计类课程教学的智慧化和创新提供有益的参考。

1 无人机航测数字技术

1.1 相关概念

无人机全称无人驾驶飞机 (Unmanned Air Vehicle, UAV), 是一种带动力的、通过无线电遥控设备操控, 或者自主飞行的、能够执行多种任务并能多次使用的无人驾驶飞行器^[15]。而无人机航测数字技术属于航空遥感技术中的一种, 在测绘专业中是获取地理信息数据的重要方法^[16]。其原理是通过无人机进行垂直摄影和倾斜摄影获取高分辨率的可见光影像和地形数据, 实现对规划场地全面、立体的测量和分析, 再借助专业数据处理软件如 Pix4Dmapper 和 DJI Terra 等, 快速生成数字正射影像 (Digital Orthophoto Map, DOM)、数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM) 和数字表面模型 (Digital Surface Model, DSM) 等数据。这些数据可作为风景园林专业前期分析场地和后期设计效果呈现的数字基础资料。

数字高程模型 DEM 是数字化的地表形态, 是一种以有序数值阵列的形式展示场地高程的模型, 也是生成数字正射影像和表面模型的基础^[3, 17]。

数字正射影像 DOM 是航天航空影像数据经过数字微分纠正和镶嵌, 按一定图幅范围裁剪生成的数字正射影像集。这种图像有坐标、方位及尺寸等信息, 具备地图几何精度和影像特征, 可直接用于测量场地距离和面积^[3, 17]。生成数字正射影像图的技术方法主要有 3 种: 一是利用已有控制资料 DEM, 对高分辨率卫星遥感影像进行数字微分纠正生

成^[17]; 二是基于搭载激光雷达的无人机采集的数据, 通过激光点云技术处理相关探测数据, 获得高精度 DOM^[18]; 三是基于航测影像, 使用 DSM 进行微分纠正、镶嵌和裁剪生成^[3]。

数字表面模型 DSM 是在 DEM 的基础上包含了地表建筑物、桥梁和植被等元素高清实景贴图的三维模型^[2]。

1.2 优势分析

无人机航测数字技术具有众多优势: 1) 时效性强, 通过实时拍摄获取的可见光影像数据构建的数字资料具有强时效性^[13, 19~21]; 2) 还原度高, 基于航测生成的数字正射影像和三维实景模型, 可清晰直观地反映场地的地形、建筑、水体及植被等现状情况, 模型细节丰富且效果逼真; 3) 可读性佳且展示便捷, 该技术支持三维模型的自由缩放、多角度旋转观察, 并可通过网页链接便捷地分享和展示; 4) 数据准确, 采用可见光空中三角测量点云数据构建的模型具有较高精度; 5) 无人机飞行灵活, 可适应各种地形, 抵达人工难以到达的位置进行航测; 6) 成本较低且数据丰富, 该技术数据采集速度快、人力投入少, 综合成本较低, 并且“一次飞行”即可获取 DEM、DOM、DSM 等多种测绘成果^[22]。

2 设备与技术流程

2.1 相关硬件设备的使用

本次实验过程中使用的航拍无人机是 DJI Mavic3, 属于多旋翼消费级民用无人机, 相较于行业级别的无人机, 具有价格更低、易于普及的优势, 但也存在操作更加复杂、精准性相对较差等劣势。

实验中使用 DJI Cellular 模块辅助无人机设备接入 4G 网络, 实现网络互连、网络 RTK、增强图传等多项功能。当原有图传信号受到干扰或遮挡时, 操控者仍然能够借助 4G 网络实现对无人机的控制, 防止因图传断联而产生的飞行安全事故。

实验还使用了中海达 V30 RTK 仪器。实时差分定位技术 RTK (Real-Time Kinematic) 是一种基于全球定位系统 (Global Positioning System, GPS) 的高精度定位技术, 通过在测量设备和参考站之间建立无线通信链路, 实时传输参考站的 GPS 观测数据, 并利用这些数据来计算测量设备位置的差分改正数。此测量设备可以在厘米级的精度范围内获取准确的坐标, 利用 RTK 技术可以获取用于控制航测精度的像控点坐标。

在航测任务的实施过程中, 各设备之间的协同作用是完成任务的关键要素 (图 1)。

2.2 技术流程

无人机采集的可见光影像数据需要借助专业软件进行处理。以马洞村村委附近区域的航测建模实验为例, 从航测前准备到数字成果生成的技术流程如图 2。实验使用无人机进行垂直和倾斜摄影获取高分辨率地物多视角影像数据, 再运用以摄影测量技术为核心的数据处理软件 DJI Terra 进行空

中三角测量解算、微分纠正和镶嵌等,生成DSM、DOM、DEM等多种数字资料。最后,将生成的模型导入DJI Modify软件,进行悬浮物删除、水面修复、表面压平等编辑和优化。具体步骤如下:

1) 首先查询航测区域是否属于禁飞区或限飞区,依照规程向有关部门递交航飞申请,获批后遵守相关飞行条例安全飞行。本次实验的航测区域为一块 $530\text{ m}\times 260\text{ m}$ 的矩形地块,包含建筑、植被、水体、农田、停车场和高架路等要素。

2) 接着开展航测前的准备工作,实验需对航测区域的飞行航线进行规划,设置航摄点位;布设像控点并使用RTK获得其坐标,包含纬度、经度和高程信息;设置飞行参数,本次航测实验设置的相对飞行高度为 $60\text{ m}\sim 80\text{ m}$,云台俯仰角度为 -90° 和 -45° ,拍摄每张照片的悬停时间约为 3 s ,实际飞行速度约为 15 m/s 。

3) 依照设计的航线获取航测场地的可见光影像数据。本次航测实验共采集可用影像718张,其中垂直摄影照片373张和倾斜摄影照片345张。

4) 对采集的数据进行处理。DJI Mavic3无人机本身质量较轻,在采集数据过程中易受到气流干扰,导致拍摄的影像模糊,这可能影响数据的处理。因此,首先需要对影像数据进行筛选,剔除质量较差的影像。接着将可见光影像数据导入DJI Terra,检查相机位置姿态等信息,进入空中三角测量环节。

5) 空中三角测量(以下简称“空三”)指摄影测量中利用影像与所摄目标之间的空间几何关系,通过影像点与所摄物体之间的对应关系计算出相机成像时刻相机位置姿态及所摄目标的稀疏点云的过程。二维正射影像和三维模型重建都必须先进行空三处理。

6) 完成空三处理后,导入像控点坐标文件,通过软件刺点的方式将拍摄到的照片与相应的像控点进行关联,从而优化模型精度。其中像控点分为控制点和检查点,控制点用于优化空三的精度和“鲁棒性”(robustness),并且能够实现地方坐标系或85高程系统的转换。检查点则用于对空三处理的精度进行评估。

7) 完成二维图像和三维模型重建的各参数设置后,输出数字正射影像(图3)、三维模型(图4)、点云模型(图5)以及高程模型(图6)。

8) 对生成的二维、三维数字成果进行精度检验,若出现缺失点或模糊点,可补采数据,并重复上述流程进行修复和重建,直至获得符合精度要求的正射影像和三维模型。

9) 将生成的模型导入DJI Modify,对模型中的悬浮物、破洞、水体和车辆等数据进行识别与优化处理。最后将最终的数字成果导出为指定文件格式,并通过链接的形式分享和展示模型。

此次航测建模实验对马洞村村委附近区域进行影像采集和建模,输出成果质量较高,全流程高效低耗且操

作便捷,为学生分析实验区域提供大量数据资料,能满足教学需求。

3 无人机航测数字技术于课程中的应用构思

3.1 传统教学现状认知方式的局限

在传统的风景园林规划设计课程教学和实践环节中,初期主要通过2种途径帮助学生掌握场地现状:一是组织学生进行现场勘查,二是利用卫星图像、现状照片及网络资料进行讲解分析。然而,这些方法存在局限性:

1) 调研成本高。组织大量学生进行现场调研不仅耗时,尤其是对于偏远乡村的规划设计场地,还将产生额外的交通和住宿费用。2) 现状数据获取不全面且碎片化。实地调研可能无法全面覆盖场地,且收集的数据可能分散在不同的媒介中,格式也不统一,这造成了数据碎片化,增加了学生后期

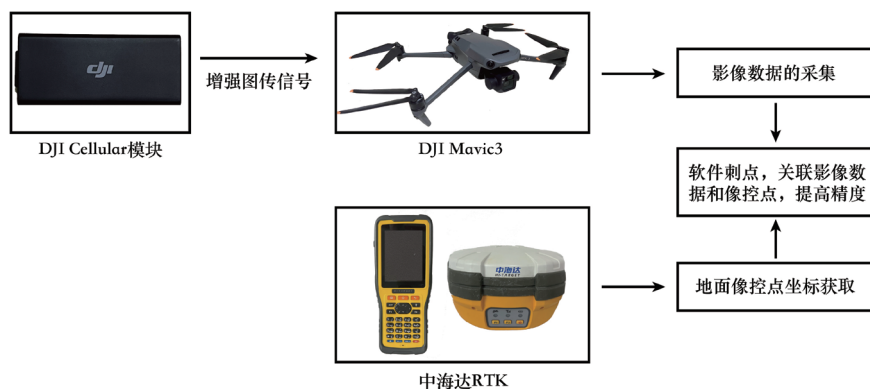


图1 各硬件设备间的联系

Fig.1 Connections between hardware equipment

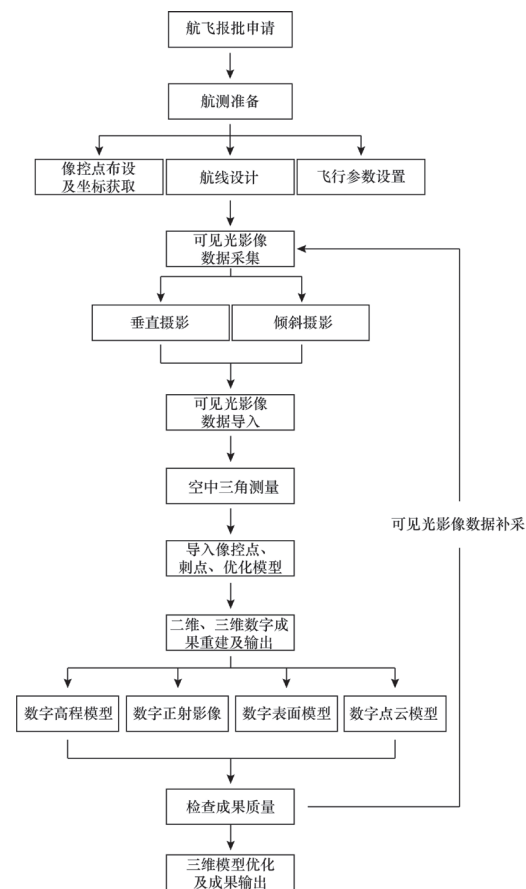


图2 技术流程

Fig.2 Technical flowchart

整合与理解的难度。3) 数据获取困难。某些区域可能存在安全风险,使得勘察人员难以接近,从而无法收集必要的场地数据。4) 主观性影响大。调研成果易受个人视角和经验的主观影响,这导致调研人员与其他团队成员在交流过程中出现认知偏差,最终可能使得团队设计成果与实际需求发生偏离。5) 时效性不足。网络搜集的卫星图像、现状照片等信息可能已过时,无法反映场地的最新情况。

3.2 无人机航测数字技术教学优势

从马洞村村委附近区域的航测建模实验成果来看,相较于传统园林教学的现状认知方式,无人机航测数字

技术的引入具有以下优势:

1) 增强学生对场地空间尺度的感知能力。在风景园林规划设计的初期学习中,学生往往难以准确把握场地的空间尺度、形状及各要素的比例关系。借助数字化的测控技术,学生可以轻松获取场地的现状信息,有助于其更深入地理解和感受场地的空间特征。

2) 提升设计方案的科学性。无人机航测数字技术的发展改变了数据收集的方式,极大地提升了调查研究的精准度。无人机航测技术不仅能提供更为全面、客观的数据资料,还能获取传统方法难以收集的环境信息,为设计评估和检验提供了更加客观有效

的途径。

3) 提升学生的设计效率和效果。无人机航测技术的应用缩短了学生前期调研时间,使他们能将更多精力集中于思考设计方案。同时,学生可将设计内容的模型叠加在现状模型上,以便其对设计尺度、效果以及方案和周边环境的关系进行反复推敲,直至确定最终的设计方案。

4) 开阔学生的视野。无人机航测数字技术作为测绘专业的关键技术,应用于风景园林专业教学领域,体现了学科之间的交叉和融合。这不仅能拓宽学生的视野,还能帮助他们了解风景园林学科的发展与创新趋势,激发其主动学习的兴趣。

3.3 无人机航测数字技术与风景园林专业课程结合

结合仲恺农业工程学院园林专业人才培养方案和课程大纲,分析无人机航测数字技术适用的课程和实习项目,并探索可能的应用场景(表1~2)。其中,可与无人机航测技术深度融合的课程有14门,实习项目5项,共计49.5学分,约占总学分的30%。

4 结论与展望

本研究利用 DJI Mavic3 消费级民用无人机对马洞村村委附近区域进行航测并生成多种数字资料,详细展示了完整的技术流程。从结果来看,该方法具有高效低耗和操作便捷等优势,最终产出的数字成果达到较高标准,能够满足园林规划设计类课程的教学需求。无人机航测数字技术的运用为学生提供了全新的场地认知方式,增强了他们对空间的感知能力,拓宽了其视野。该技术有效增强了学生的场地现状分析和问题解决能力,使学生在设计过程中能更深入地将设计与现状情况相结合。这不仅增强了学生的设计能力,还优化了课程教学效果。同时,无人机航测技术为远距离项目提供了新的调研方式。通过航测技术,仅需少量学生即可采集足够的现状数据,替代了以往组织大量学生前往现场调研的模式,从而降低了调研成本。最后研究结合仲恺农业工程学院园林专业2024年人才培养方案和教学大纲,



图3 正射影像
Fig.3 Digital orthophoto map



图4 三维模型
Fig.4 3D model



图5 点云模型
Fig.5 Point cloud model

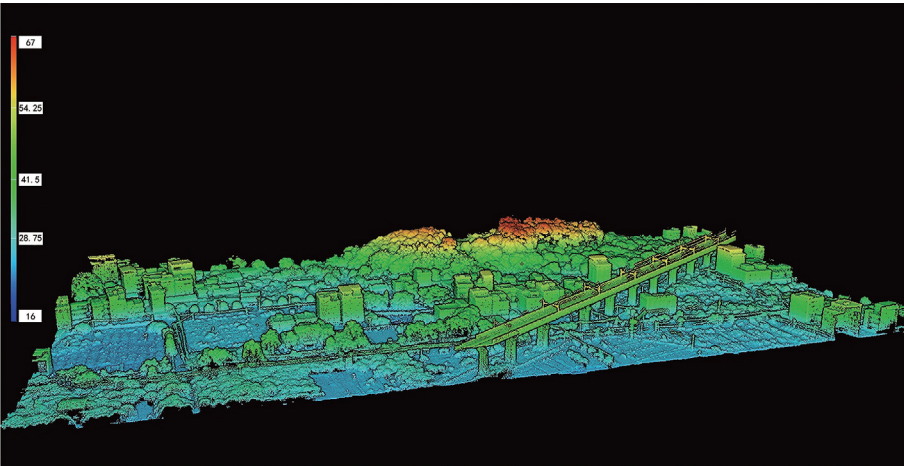


图 6 数字高程模型
Fig.6 Digital elevation model

构思了无人机航测数字技术在风景园林专业课程中的潜在应用场景。结果表明，约占总学分 30% 的课程能够与该技术结合，揭示了这项技术在风景园林专业教学中具有广阔的应用前景。

虽然无人机航测数字技术已在多个领域获得广泛应用，但其在实际应用中仍面临挑战和限制。相较于行业级无人机，本研究使用的消费级无人机虽价格更低，更易于普及，但在航线规划和像控点采集等方面存在局限。消费级无人机依赖第三方软件或手动操控航线规划，航测过程更加繁琐且稳定性不足，而使用外部 RTK 采集像控点坐标也会降低效率；受飞行高度

表 1 无人机航测数字技术在园林专业课程中可能的应用场景
Tab.1 Possible application scenarios of UAV photogrammetry in Landscape Architecture curricula

课程名称	开课学期	学时类型		学分	应用场景
		理论	实验		
园林设计原理	三	24	8	2	在校园绿地规划设计中，将航测数字资料用于场地现状讲解、前期分析及后期效果呈现
测量学 II	三	16	16	2	可将无人机航测数字技术融入测量学课程教学中，更新和丰富课程内容
城乡规划原理	四	24	8	2	课程包含历史保护与城市规划、城市设计和居住区规划设计三大专题，无人机航测数字技术在这些领域应用广泛，可与课程结合
园林建筑构造与结构	四	32	0	2	使用无人机航测数字技术对建筑建模，通过三维模型直观讲授园林建筑构造与结构细节
植物景观规划设计	四	28	12	2.5	在地产体验区植物规划设计中，将航测数字资料用于场地现状讲解、场地前期分析及后期效果呈现
计算机辅助设计 II	四	0	48	1.5	无人机航测模型与 SketchUp 和 Lumion 等软件搭配使用，丰富教学内容
园林设计 I	五	16	32	3	将航测数字资料用于场地现状讲解、实验课规划设计阶段的场地前期分析和后期效果呈现
生态景观规划设计	五	28	12	2.5	课程包含校园内景观格局分析，将校园航测数字资料用于教学和分析
城市绿地规划	六	32	16	3	使用无人机航测生成所需的城市绿地数字模型，应用于课堂教学和设计过程中
园林设计 II	六	16	32	3	课程包含公园实测和总体规划设计，结合航测数字技术进行测量和设计内容呈现
乡村景观营造与设计	六	20	20	2.5	课程研究乡村空间的数字重构，利用无人机航测建立现状模型库，帮助学生了解乡村状况及风貌，并将模型用于设计阶段场地前期分析及后期效果呈现
园林工程施工技术	六	20	4	1.5	课程包含竖向设计的内容，结合航测数字模型能够更加直观地理解空间变化
GIS 原理与规划应用	六	40	8	3	航测数字技术生成的数字资料能够应用于 ArcGIS 软件中
大数据与智慧园林	六	24	8	2	无人机航测数字技术也是大数据与智慧园林的重要方面

表 2 无人机航测数字技术在实习项目中可能的应用场景
Tab.2 Internship projects and possible application scenarios for UAV aerial survey digital technology

项目名称	课程类型	执行学期	学分	应用场景
测量学实习	教学实习	三	1	在测量学实习内容中融入航测数字技术的应用
园林设计实习	教学实习	六	1	每年选择不同的场地进行设计实践，可以对目标场地进行航测，并将成果资料用于教学和设计过程中
景观设计与模型制作	课程设计	七	2	设计后的模型与航测产出的三维模型叠加使用，展示设计效果和空间关系
园林实务	课程设计	七	3	园林实务是一门设计竞赛式课程，将航测数字资料融入竞赛过程，加深场地认识，便于设计的呈现
毕业论文（设计）	毕业论文（设计）	五 ~ 八	10	应用于毕业论文（设计）的数据采集和设计阶段

限制,影像画幅小,增加了外业数据采集和内业影像处理的工作量;续航能力有限且易受信号干扰;轻质无人机易受风力影响,可能降低影像质量,进而影响建模精度。此外,无人机数字航测技术虽能高效优质地提炼场地空间特征,但要深刻理解场地文化内涵,仍需结合传统调研手段,如文献分析、实地访谈和文化体验等,以全面认识空间的物质构成及其文化价值。同时,由于当前课程体系尚未加入无人机航测技术教学,受到设备数量的制约,学生在设计实践中往往囿于教师所提供的数字资料,难以针对实际场地进行航测与设计实践。综上,本研究仍存在不足,对无人机航测数字技术在课程中的应用也仍处于构思阶段,收到的学生反馈意见有限,需在更多课程中进一步实践以评估实效,优化无人机数字航测技术。

在数字化时代背景下,无人机航测数字技术以其直观、高效、准确的场地现状信息获取能力,为园林空间的数字化重构提供了技术保障。该技术输出的数字资料不仅是对空间实体真实状态的虚拟映射,其作为一种数字资产,还为后续研究提供大量的基础数据。展望该技术未来的研究方向,包括:1)通过重构的孪生数字空间实现对公园、景区等公共空间的智慧化管理,构建虚拟环境实现与物理世界的实时互动和反馈循环,并结合数字空间的智能技术来指导空间的规划和设计。譬如利用游客行为监测与智能预测分析,推导游线设计方案,从而优化实体道路布局;或通过模拟紧急情况,科学制定疏散点和疏散路径等^[23]。2)结合虚拟现实技术,利用Rhino、Enscape等三维建模和渲染软件以及VR设备,构建具有交互性、沉浸性和体验性的“建成世界”虚拟环境,支持学生漫游在设计空间中对方案进行评估和修正。3)借助CloudCompare、eCognition等软件进行三维点云处理和DSM智能识别,突破二维数据分析局限,实现对场地风貌要素的量化统计、复杂空间的量化剖析、景观风貌的时空演变趋势的推演,以及景观要素的分类和叠图比对,这不仅能排除干扰对单个要素进行解析,还能更加深入地理解各要素间的关联性^[24],提升学生对基地的认知水平,为设计方案的科学性提供有力支撑。

注:图片均由作者自绘自摄。

参考文献:

[1] 新华社. 中共中央 国务院印发《数字中国建设整体布局规划》[EB/OL]. (2023-02-27) [2024-08-06]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/27/content_5743484.htm.
[2] 成玉宁, 袁晓洋. 当代科学技术背景下的风景园林学[J]. 风景园林, 2015, 22 (7): 15-19.
[3] 韩炜杰, 王一岚, 郭巍. 无人机航测在风景园林中的应用研究[J]. 风景园林, 2019, 26 (5): 35-40.
[4] BANGKUI F, YUN L, RUIYU Z, et al. Review on the Technological Development and Application of UAV Systems[J]. Chinese Journal of Electronics, 2020, 29 (2): 199-207.
[5] NAŞ S M, BONDREA M V, RĂDULESCU V M, et al. The Use of UAVs for Land Use Planning of Brownfield Regeneration Projects-Case Study: Former Brick Factory, Cluj Napoca,

Romania[J]. Land, 2023, 12 (2): 315.
[6] 潘冬荣, 韩天虎, 孙斌, 等. 无人机遥感技术在草原生态学研究中的应用[J]. 中国草食动物科学, 2019, 39 (5): 57-59.
[7] 孙长奎, 刘善磊, 王圣尧, 等. 浅谈无人机遥感技术在智慧城市建设中的应用[J]. 国土资源遥感, 2018, 30 (4): 8-12.
[8] 冯增文, 李珂, 李梓豪, 等. 低空无人机的倾斜摄影测量技术在城市轨道交通建设中的应用[J]. 测绘通报, 2020 (9): 42-45.
[9] 汤明文, 戴礼豪, 林朝辉, 等. 无人机在电力线路巡视中的应用[J]. 中国电力, 2013, 46 (3): 35-38.
[10] 杨阳, 唐晓岚, 詹巧巧, 等. 基于无人机低空航拍航测技术的传统聚落调查及其应用前景——以南京市老门东为例[J]. 中国园林, 2021, 37 (3): 72-76.
[11] 张志明, 徐倩, 王彬, 等. 无人机遥感技术在景观生态学中的应用[J]. 生态学报, 2017, 37 (12): 4029-4036.
[12] AZIZI Z, MIRAKI M. Individual urban trees detection based on point clouds derived from UAV-RGB imagery and local maxima algorithm, a case study of Fateh Garden, Iran[J]. Environment, Development and Sustainability, 2024, 26 (1): 2331-2344.
[13] 程文字, 冯潇. 低空多旋翼无人机航测在风景园林规划设计前期现场观测中的应用[J]. 中国园林, 2018, 34 (11): 97-101.
[14] 陈荻, 李卫正, 孔文丽, 等. 基于低空高分辨影像的三维绿量计算方法——以南京林业大学校园为例[J]. 中国园林, 2015, 31 (9): 22-26.
[15] 吕厚谊. 无人机发展与无人机技术[J]. 世界科技研究与发展, 1998 (6): 113-116.
[16] 张东明. 测绘基础[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2013.
[17] 姚冲. 基于航空影像的1:2000彩色数字正射影像图(DOM)生产[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39 (4): 189-191.
[18] 王晨旭, 代赫男, 张涛. 覆盖1000 km 带状密林高山区的机载激光雷达点云数据及正射影像处理[J]. 测绘通报, 2023 (S1): 15-20.
[19] 蒋勇, 颜佳, 王玉萍, 等. 近十年来无人机摄影测量在风景园林规划与设计领域的应用研究[J]. 园林, 2024, 41 (1): 66-75.
[20] 罗振威, 李骁, 刘承承, 等. 利用倾斜摄影与激光扫描技术构建城市级实景三维模型[J]. 测绘通报, 2023 (12): 116-120.
[21] 黄婷, 孙思, 唐光大. 基于无人机影像的华南农业大学不同下垫面地表降温效益研究[J]. 广东园林, 2023, 45 (3): 52-55.
[22] 李莲, 郭忠磊, 张琼. 无人机倾斜摄影测量技术在城市基础测绘中的应用[J]. 测绘地理信息, 2020, 45 (6): 72-74.
[23] 康孟珍, 邱文忠, 陈自富, 等. 平行圆明园: 从数字孪生园林到元宇宙智慧遗址公园[J]. 智能科学与技术学报, 2022, 4 (3): 301-307.
[24] 王量量, 刘雅茹, 黄文灿, 等. 基于数字技术的传统村落景观风貌解析方法研究——以泉州肖厝村为例[J]. 中国园林, 2023, 39 (6): 13-19.

作者简介:

朱政洋/1995年生/男/福建莆田人/硕士/仲恺农业工程学院园艺园林学院(广州510225)/助教/研究方向为风景园林规划设计与遥感

李相思/1996年生/女/陕西西安人/澳门城市大学创新设计学院(澳门999078)/在读博士研究生/研究方向为城市生态系统服务功能模型模拟

(*通信作者) 刘小冬/1982年生/男/四川乐山人/硕士/仲恺农业工程学院园艺园林学院(广州510225)/副教授/研究方向为风景园林规划设计/Email: 908010241@qq.com