

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

The Application of Drone Photogrammetry in Landscape and Architecture in the Past Ten Years

蒋 勇* 颜 佳 王玉萍 董一凡
JIANG Yong* YAN Jia WANG Yuping DONG Yifan

(深圳奥雅设计股份有限公司, 深圳 518000)
(Shenzhen L&A Design Holding Limited, Shenzhen, Guangdong, China, 518000)

文章编号: 1000-0283(2024)01-0066-10
DOI: 10. 12193/j. laing. 2024. 01. 0066. 008
中图分类号: TU986
文献标志码: A
收稿日期: 2023-10-08
修回日期: 2023-12-06

摘 要

随着轻型旋翼无人机的商业化普及, 摄影测量以高效率、灵活快捷、作业成本低等优点在三维实景重建和工程测量中得到广泛应用。借助CiteSpace文献计量工具, 系统梳理了2010-2022年期间国内外摄影测量技术在风景园林规划与设计领域中的研究及应用热点, 并结合近1万hm²的三维实景重建与应用经验, 详细阐述其基本操作原理、全流程软件的使用及应用场景。研究发现, 无人机摄影测量研究的前沿热点可概括为测量技术研究与应用场景开发两个方面。无人机摄影测量生成的“4D”数字化产品主要包括数字表面模型(DSM)、数字高程模型(DEM)、数字正射影像图(DOM)与数字线划地图(DLG), 其应用主要集中在5个方面, 分别是高精度地理空间数据测量、三维空间数据分析及可视化、风景遗产资源保护与利用、林业及生态资源量化研究以及工程系统信息模型构建。未来, 随着以人工智能为代表的一批新兴信息技术的发展, 无人机摄影测量将会支持以量化研究为基础的应用拓展、支持集成化的风景园林规划设计 workflow、支持虚实融合的风景园林空间体验, 并进一步促进行业数字化转型发展。

关键词

风景园林; 无人机; 摄影测量; 三维实景模型; CiteSpace; 应用研究

Abstract

With the commercialization and popularization of light rotor UAVs, photogrammetry has been widely used in the field of 3D real scene reconstruction and engineering measurement due to its high efficiency, flexibility, and low operating costs. This paper first uses CiteSpace to comb through the research and application hotspots of photogrammetry technology in landscape planning and design at home and abroad from 2010 to 2022. Then, combined with the author's nearly 10 000 hm² of experience in 3D real scene reconstruction, this paper elaborates on the basic operating principles of drone photogrammetry, the use of full-process software, and application scenarios. The result shows that the forefront hotspots of drone photogrammetry research can be summarized as measurement technology research and application scenario development. The “4D” digital products generated by UAV photogrammetry mainly include Digital Surface Model, Digital Elevation Model, Digital Orthophoto Map and Digital Line Grid Map, and their applications mainly focus on five aspects: high-precision geospatial data measurement, 3D spatial data analysis and visualization, landscape heritage resource protection and utilization, quantitative research on forestry and ecological resources, and construction of engineering system information model. In the future, with the development of emerging information technologies such as artificial intelligence, UAV photogrammetry is expected to support application expansion based on quantitative research, facilitate integrated and efficient workflow in landscape planning and design, contribute to the integration of virtual and real experiences in landscape spatial design, and further promote the digital transformation and development of the industry.

Keywords

landscape architecture; drones; photogrammetry; 3D real-world modeling; CiteSpace; applied research

蒋 勇

1994年生/男/湖北武汉人/硕士/工程师/
研究方向为风景园林规划与设计、城市空间
量化分析、数字化城市设计

颜 佳

1986年生/女/湖南长沙人/博士/工程师/
研究方向为建筑设计理论与、风景园林规划
与设计、数字化城市设计

王玉萍

1996年生/女/湖南邵阳人/硕士/工程师/
研究方向为风景园林规划与技术、知识产权
保护、数字化城市设计

*通信作者 (Author for correspondence)
E-mail: 384437340@qq.com

在设计工作初期的调研阶段,调查者大多使用拍照标记、经纬度记录等传统勘察方式,使用这些方法所收集到的图片、文字等资料往往会存在碎片化、难以整理、可读性不强、时效性低等方面的弊端。目前,风景园林规划与设计工作面临的空间系统日趋复杂,设计师通常需要获取更高颗粒度的地理数据进行空间分析及数据表达^[1],从而让项目场地信息更加直观、高效地被设计参与者理解与感知^[2]。因此,获取更加精准、高时效的空间物理环境信息(纹理、色彩及结构)数据^[3],是设计流程中所亟需的。除此之外,面对建成环境空间的复杂性问题,精准的数据分析是提高规划与设计科学性的基础。有学者提出了数据增强设计^[4]、计算性城市设计^[5]等概念,这为规划与设计过程提供了分析及评价的量化方法与思路,而空间量化分析是基于高精度、可分类识别的物理空间数据。在风景园林技术科学研究领域,刘颂等^[6]学者于第14届“国际数字景观”大会中总结强调了无人机摄影测量技术的发展可以为项目提供高精度的地理信息数据,且其具有低成本、高时效、高精度的特点,这为风景园林行业的“数字化转型”带来了新的发展机遇^[7-8]。此外,有研究统计了近10年发表的数字景观相关文献,发现在“数据与工具”研究领域,无人机遥感测绘、数据可视化以及地理信息系统等研究应用的发展趋势正在日益突显^[9]。

新型科技企业向传统测绘行业的跨界推进了测绘“平民化”市场的发展,如大疆公司先后推出的精灵4RTK、DJI Terra、DJI M300RTK^[10]等无人机机型,使无人机测绘在工程勘探设计领域实现了快速发展。在测绘科学领域,摄影测量是传统测绘学下的一个分支学科,其研究内容主要是测制地形图并

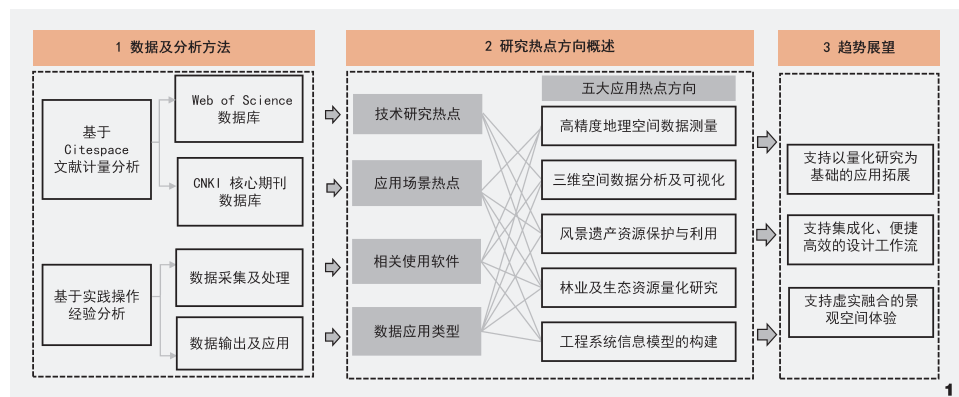


图1 研究技术线路
Fig. 1 Technical lines

建立地理信息数据库,为工程应用提供基础测绘数据^[11],基本原理是对倾斜影像进行分析和整理,输出相应成果^[12]。而无人机摄影测量系统(UAV Remote Sensing System, UAVRSS),是以UAV为平台在高空获取遥感影像、视频等数据的航空遥感与摄影测量系统^[13]。轻便型无人机发展使获取更高精度、更高时效性的立体三维地理数据变得更加便捷^[14]。有研究人员探索了无人机测量的技术方法、数据处理流程及在景观规划与设计实践的全过程^[15],随着“数字景观”快速推广,无人机摄影测量技术在风景园林规划与设计领域的应用场景迅速拓展至城市公共空间设计、市政公园绿地规划与设计、城市更新与古城修复等领域。综上所述,为了进一步探索其热门应用场景及未来发展趋势,文章通过文献计量分析与实践经验总结的方法,对该技术及其应用场景展开研究。

1 研究方法及数据来源

无人机摄影测量涉及的技术领域繁多,应用场景广泛。首先,为了更加充分地探索该技术在空间数字化领域的应用,采用知识图谱分析法对摄影测量技术的发展进行了分

析。其次,在结合大量的无人机摄影测量实践经验的前提下,本文使用归纳总结法对无人机摄影测量技术的实现流程及应用场景进行了系统地梳理与拓展。

本文进行知识图谱分析所使用的软件是CiteSpace,它是一款能够进行研究合作网络、共现、被引和文献耦合等分析的知识图谱计算软件,可处理的数据源包括Web of Science(WoS)、SCOPUS、CNKI、RCI和KCI等^[16]。本文主要使用CiteSpace软件进行了关键词聚类分析、关键词时间线分析及关键词突变分析。关键词聚类分析能够利用文本中出现的关键词对文本进行分类和聚类,从而揭示在大量文本中潜藏的模式和规律;关键词时间线分析主要是在聚类的基础上反映出各聚类出现的时间;关键词突变分析则是能够反映各关键词出现的起止时间与持续时长。本文的整体研究框架如图1。

2 无人机摄影测量研究热点

2.1 基于CiteSpace文献计量分析

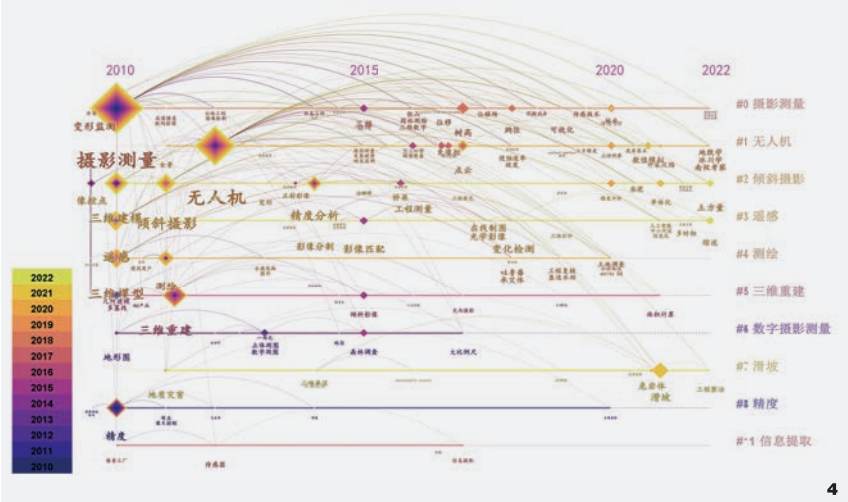
将CNKI核心数据库、WoS核心数据库作为数据源,将发表时间设置为2010-2022年,提取能够表达文献核心内容的关键词并统计



2



3



4

图2 CNKI核心期刊发表时间
Fig. 2 Publication timeline of CNKI core journals

图4 CNKI核心期刊关键词时间线图
Fig. 4 Timeline of keywords for CNKI core journals

图3 CNKI核心期刊关键词聚类图
Fig. 3 Clustering diagram of keywords for CNKI core journals

其频次的高低分布，以此来分析无人机摄影测量相关研究的热点和趋势。

2.1.1 CNKI 数据库

基于CNKI检索核心期刊数据，以“摄影测量技术应用”为主题，选取关键词为“摄影测量” and “城市” or “景观” or “风景园林” or “生态” or “林业” or “植物” or “建筑” or “遗产资源” or “施工” or “工程” 方向的应用，筛选期刊来源为CSSCI、北大中文核心期刊以及CSCD的核心期刊，共得到2010-2022年期间发表的文献882条（图2）。

将CiteSpace计算节点设置为“keywords”，分别针对关键词的聚类、时间线及突变三个方面进行了分析。据关键词聚类图（图3）可知，所选文献共聚类出8大聚类，集中体现在“数字摄影测量”“精度控制”与“信息提取”。该结果反映出在摄影测量应用中，已有的研究对测图精度控制及地理信息提取这两个领域有较多的关注。时间线图（图4）显示，2010年之前的研究聚焦于摄影测量、三维建模以及遥感相关技术，多是测绘行业本身的技术发展；2013年，随着轻型无人机技术的出现，学界逐渐出现了无人机摄影测量及遥感系统相关的研究；2015年后，又逐渐产生了摄影测量技术在工程测量、森林调查、古建筑绘图等相关方向的应用，这体现了技术与应用研究的相互促进关系。

据关键词突变图（图5）可知，2010-2015年期间，无人机摄影测量技术的相关研究主要聚焦在测图精度控制与像控点等方面，其具体的应用则主要集中在工程施工领域，例如滑坡处理、结构面测量、岩体工程等。2017年以后的摄影测量技术研究大多聚焦于精度分析、像控点布控、模型单体化、点云数据、结构面处理等领域。这一时期，得益于无人机飞行系统与软件技术的快速发展及更新迭代，无人机摄影测量技术在工程相关行业迎来了应用热潮，应用场景逐步拓展至景观测绘、工程测量、森林调查、建筑测绘、绘制地形图、滑坡处理、变形监测、岩土工程等相关领域。



图5 CNKI核心期刊关键词突变图
Fig. 5 Diagram of keywords mutations for CNKI core journals



图6 WoS核心期刊发表时间
Fig. 6 Publication timeline of core journals in WoS

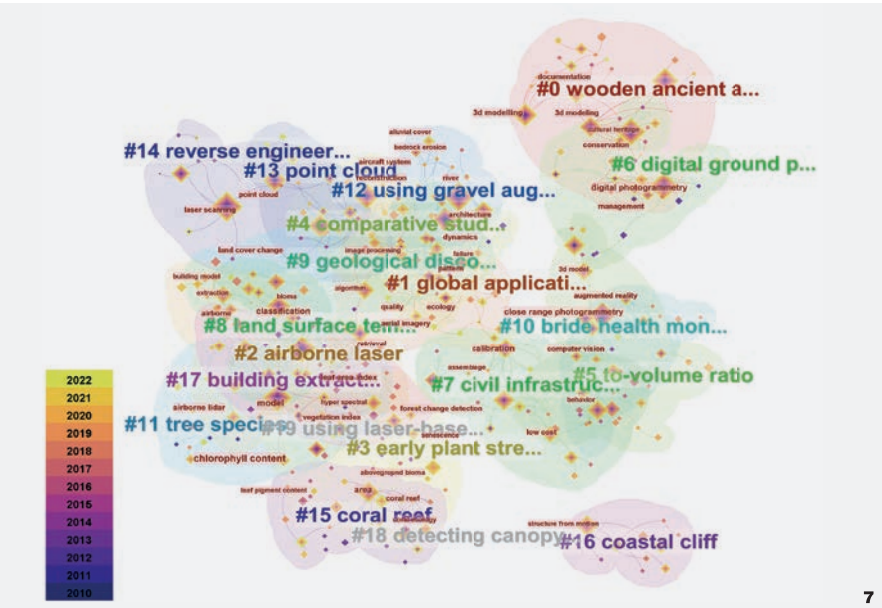


图7 WoS核心期刊关键词聚类图
Fig. 7 Clustering diagram of keywords for WoS core journals

2.1.2 Web of Science数据库

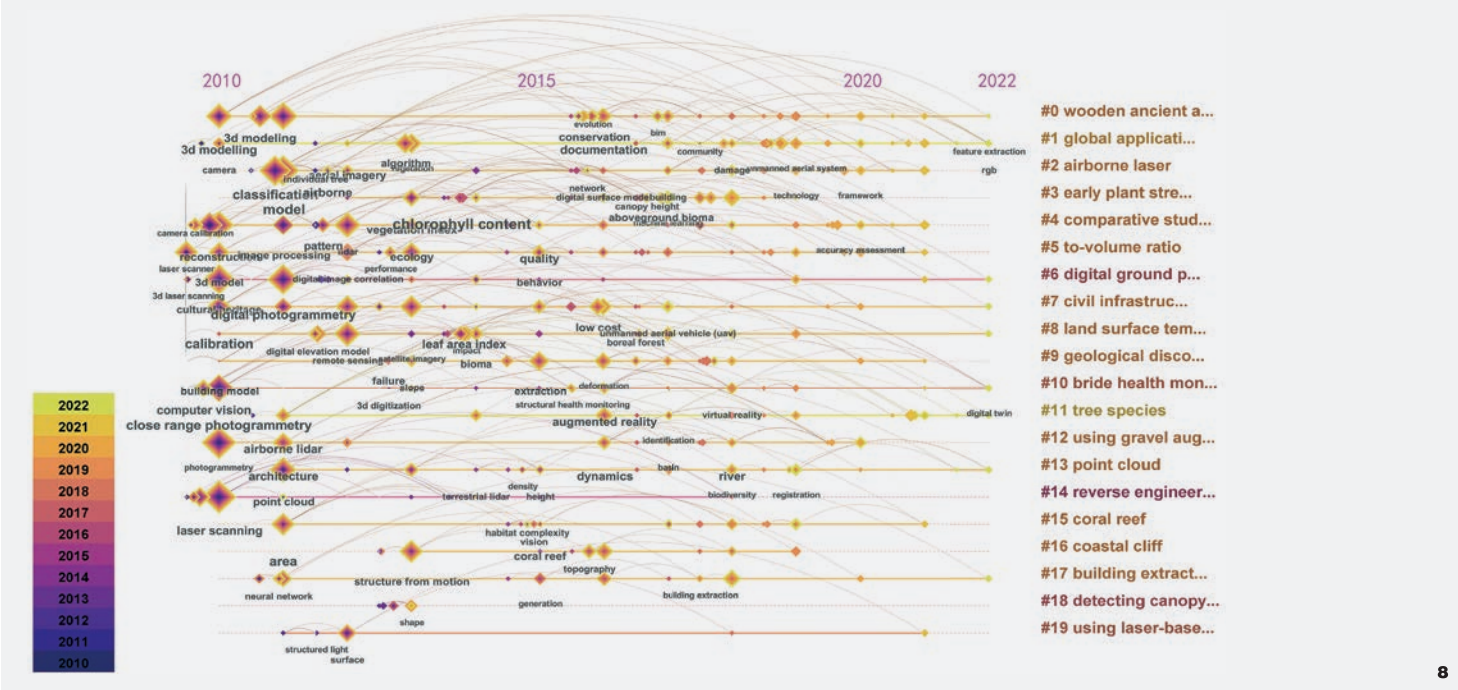
英文文献计量研究的数据来源主要是WoS核心合集数据库Science Citation Index Expanded(SCIE)与Social Sciences Citation Index(SSCI)。以“Photogrammetry in landscape architecture”为主题,检索式定位为TS=(*photogrammetry AND *landscape architecture or *plant or *design or *engineering or *city),剔除无效文章后,总共检索结果有1 924篇(图6)。

将CiteSpace计算节点设置为“keywords”,同样针对关键词的聚类、时间线及突变三

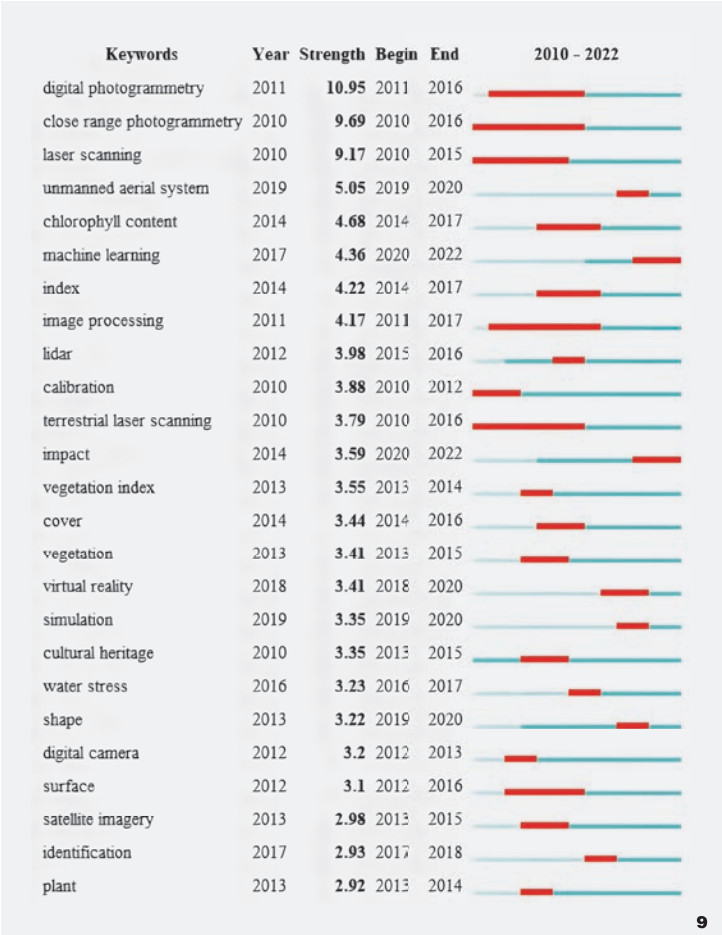
个方面进行了分析。据关键词聚类图(图7)可知,所选文献共聚类出了19个聚类,如“global application、airborne laser、plant responses、comparative study、civil infrastructure”等,因此,其研究的集中度相较只有8个聚类的中文CNKI数据库来说更加分散。观察时间线图(图8)可以看出,诸如“camera calibration”“caser scanner”“computer vision”“close range photogrammetry”等与摄影测量技术相关的研究主要出现在2010年左右,该类研究更多地聚焦于摄影测量系统、激光扫描、数据结构等领域。同时,结

合计算机视觉、卷积神经网络,图像分割等深度学习算法与技术,摄影测量技术在这一时期得到了快速发展。2015年后,摄影测量相关的研究大多聚焦于“BIM (Building Information Modeling)”“virtual reality”“augmented reality”等新兴应用领域,此时期的摄影测量在新兴技术的加持下形成了新的生产 workflow。

在关键词突变分析(图9)中共出现了“digital photogrammetry”“close range photogrammetry”“machine learning”“terrestrial laser scanning”“vegetation index”等25个关键词。由图9可知,2010-2015



8



9

图8 WoS核心期刊时间线图
Fig. 8 Timeline of keywords for WoS core journals

图9 WoS核心期刊关键词突变图
Fig. 9 Diagram of keywords mutations for WoS core journals

年，摄影测量相关的研究主要关注的是基础技术领域。随着计算机图形相关技术的发展，该时期的研究中逐渐出现了“机器学习”“无人机系统”“机载LIDAR”“虚拟现实”“数字摄影”“城市建模”“3D打印”等与新兴技术相关的关键词。这些新技术拓宽了摄影测量技术的边界，使其应用场景也相应地拓展至了植被测算、逆向工程、遗产保护、河流监测、岩土工程、实景地图、生物多样性等多个方面。

2.2 基于实践操作的经验概述

实践研究是不断创新思想、理论、方法和技术的必由途径^[17]。本文还将项目实践与文献计量分析相结合，总结了近30余个实践项目、超过1万hm²的三维实景模型重建的实践经验以及在多种类型规划设计项目中的应用场景的探索经验，进一步归纳且介绍了无人机摄影测量技术在数据采集处理以及数据输出与应用这两个阶段的操作流程、软件使用与数据处理方法。

2.2.1 数据采集及处理

在数据采集的过程中，无人机的飞行路径、飞行高度与成图比

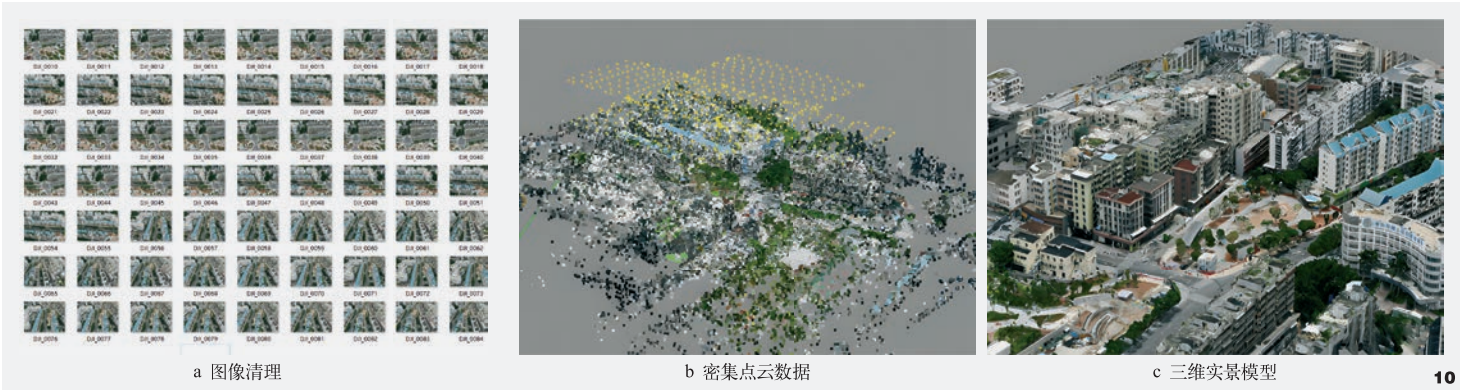


图10 三维重建工作流程
Fig. 10 3D reconstruction workflow

例往往决定了测量成果的精度。飞行路径规划一般使用Pix4D、DJI GS pro、Rockycapture、Waypoint Master等航线规划软件，可选的飞行规则一般包括“U”字形、五向飞行、仿地飞行及环绕飞行等。根据实践经验，国外的Pix4D与国内的DJI GS pro这两个软件较为便捷，在航线规划可靠性及自动化航测方面具备优势。同时，不同测绘图纸比例需要与之匹配相应的飞行高度(表1)，此外，还可以使用载波相位差分技术(Real-Time Kinematic, RTK)进一步提高测图精度，其理论精度可达到 ± 5 cm。

在数据处理阶段，常用的国外的摄影测量三维重建软件有Bently ContextCapture、Metashape Photoscan、Pix4Dmapper、StreetFactory、Skyline Globe PhotoMesh、Reality capture^[18]，常用的国产软件有DJI-Terra以及DP-Model-er等。相对来说，国产软件的操作界面相对更便利，

但在三维建模核心算法方面，国外的Bently ContextCapture与Metashape Photoscan这两个软件相对更为成熟，此外，Reality capture软件的模型渲染质量最高。以Bently ContextCapture为例，在深圳某城市更新项目中，三维重建的工作流程主要包括图像拍摄及清理(图10-a)、密集点云数据处理(图10-b)以及三维实景模型重建(图10-c)三个步骤，最终实现了该项目高精度数字三维模型的建立，且该模型数据支持浏览、矢量数据提取、设计效果呈现等。随着计算机视觉技术、AI技术与云计算的发展，以往存在的扫描测量精度不高、模型破洞、清晰度较低、生成时间长等问题得到了明显的改善，2022年6月大疆智图推出的行业应用级无人机测量系统，已经可以实现“智能实时”的空间地理信息采集生成流程。

2.2.2 数据输出及应用

无人机摄影测量一般可输出“4D”数字化产品，即数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)、数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)、数字正射影像图(Digital Orthophoto Map, DOM)与数字线划地图(Digital Line Graphic, DLG)。图11展示了深圳某城市更新项目中生成的“4D”数字化产品。在规划设计领域中，DSM数据的应用场景主要是在经过Rhino、Sketchup、3DMax、DP-modeler、Modelfun、MeshMixer等三维建模软件的处理后，实现三维网格模型修饰及单体化的呈现^[19]；目前，Rhino在处理大量的三维网格模型的切片、统计分类、渲染呈现方面较有优势。此外，在经过Lumion、Twinmotion、Unreal、Unity等软件的渲染后，DSM数据还可结合VR或MR设备实现沉浸式的虚拟体验。而DEM数据的应用场景主要是运用ArcGIS、Globalmapper、Rhino+Grasshopper等软件进行地理空间数据分析；DOM数据则既可以作为视觉数据用于提取场地特征，也可以为DLG数据的提取提供参考；DLG数据作为地籍测绘的交付成果，多用于所测绘区域的存档、房地一体化、设计及改造工程的数据参考依据等。以上4D数据还可结合更多相关软件进一步生成其他格

表1 航测精度与飞行高度对照表
Tab. 1 Mapping table between aerial survey accuracy and flight altitude

成图比例 Mapping scale	飞行高度/m Flight altitude	地面影像分辨率/cm Ground sampling distance	误差/cm Error
1 : 500	30	0.88	± 5
1 : 1 000	80	1.7	± 8
1 : 2 000	200	3.5	± 15

注：内容源自《GB 15967-1995 1 : 500 1 : 1000 1 : 2000 地形图航空摄影测量数字化测图规范》。

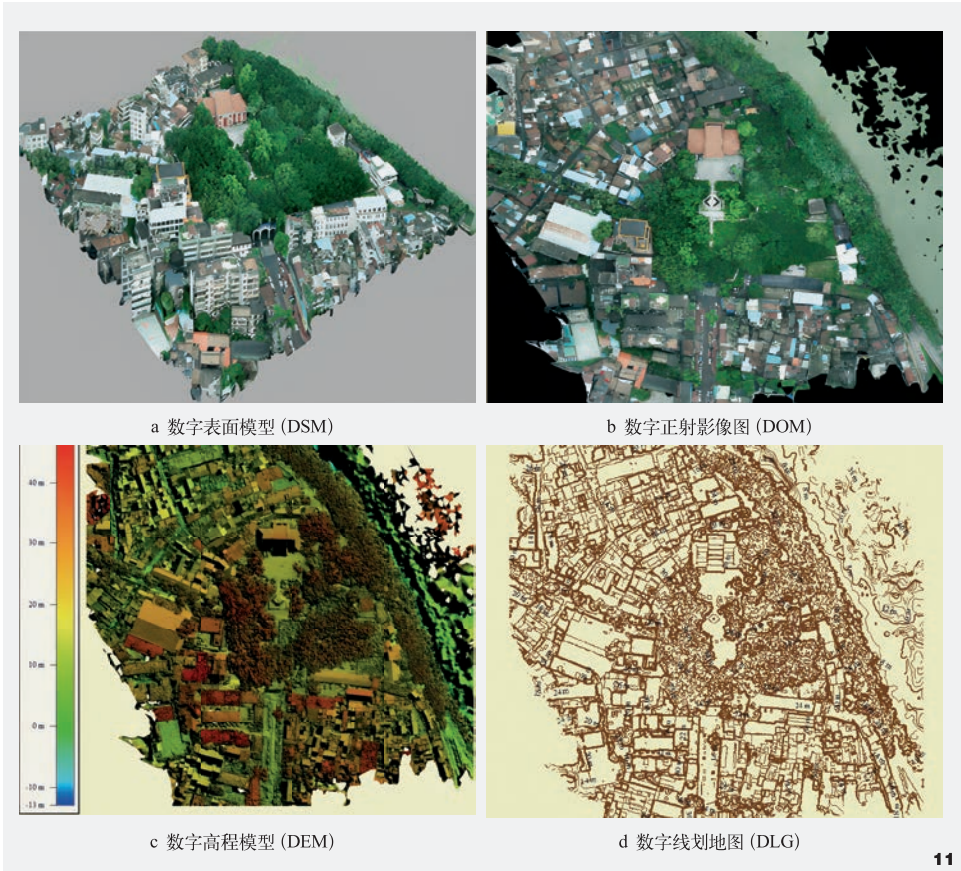


图11 摄影测量生成的4D数字化产品
Fig. 11 4D digital products generated by photogrammetry

式的文件，从而满足不同场景的使用需求。

3 无人机摄影测量在风景园林规划与设计领域的应用概述

通过对CNKI及WoS核心数据库的检索发现，在技术领域中，无人机摄影测量的研究热点多集中在模型精度控制、点云数据处理技术、模型单体优化、计算机视觉、虚拟现实技术、数据结构等；应用场景方面的热点包括景观测绘、工程测量、森林调查、植被测算、生物多样性、单体测绘、地形图、滑坡处理、变形监测、岩土工程、3D打印、BIM (Building Information Modeling)、CIM (City Information Modeling) 等等 (表2)。除此之外，在总结了

实践过程中数据采集处理以及数据输出及应用的相关经验后，本文进一步结合风景园林规划与设计的工作内容，将应用研究热点归纳为5个重要方向：(1) 高精度地理空间数据测量；(2) 三维空间数据分析及可视化；(3) 风景遗产资源保护与利用；(4) 林业及生态资源量化研究；(5) 系统信息模型的构建。

3.1 高精度地理空间数据测量

风景园林规划与设计项目常位于城市偏远或乡村地区，而由于地方测绘部门的测绘周期的影响，在项目开展前期经常缺乏可靠、高时效的测绘图纸，进而影响设计工作的顺利开展。无人机摄影测量形成的三维模型可

绘制成数字线划地图 (DLG)^[20]，设计师直接通过三维实景模型进行矢量化处理，如EPS信息工作站、DP-Modeler、Idata 3D^[21]，可提供1：500、1：1 000不同精度的测图成果。无人机摄影测量打破了传统地理信息数据的供给壁垒，为规划设计行业提供低成本、低门槛获取地理数据的机会，例如通过数字线划图辅助规划审批、竣工核实、规划监察^[22]、界定违章建筑^[23]，作为地形观测^[24]、土壤结构分析^[25]、土壤粗糙度测量^[26]、山体结构面勘测^[27]的重要数据。相比传统测绘图纸，三维实景模型与二维图纸的结合可让项目参与者更充分地理解场地空间^[28]，其真正射影像 (TDOM) 可规避地图畸变且具有更高精度^[29]。因此，无人机摄影测量依靠其高效率、低成本的技术解决方案，推动了地理信息数据获取的平民化，不仅可以及时弥补项目测绘数据缺失及场地勘察问题，同时也开发出大量全新的应用场景。

3.2 三维空间数据分析及可视化

仿真渲染与可视化表达是充分展示设计信息的关键工作。传统的场地分析普遍是基于主观感性的图面表达，往往缺乏较理性、直观的数据呈现。相较之下，无人机摄影测量系统在设计工作全流程中可提供图像、视频、实景模型文件等大量的客观数据支撑，能够极大地提高信息传达效率。在项目前期，项目管理人员可通过云服务器将大体量的三维实景模型分发至多个PC端、客户端，将场地现状实时地同步给不同地区的项目参与者、作为沟通信息的重要载体。同时，配合使用Acute 3D Viewer、DasViewer等浏览工具，设计师可精确测量模型中任意要素的坐标、尺度、挖填方数据等等。在场地分析阶段，设计师可以使用Rhino+Grasshopper、Sketchup等常

表2 研究热点方向概述
Tab. 2 Overview of research hotspots

数据来源及分析 Data sources and analysis	研究热点方向阐述 Elaboration on research hotspot directions
CiteSpace文献计量分析	技术研究：精度分析、像控点布控、模型单体化、点云数据、结构面处理；机器学习、立体测图、无人机系统、机载 LiDAR、虚拟现实、数字摄影、城市建模、BIM、CIM、3D打印、机器学习等
	应用场景：景观测绘、工程测量、森林调查、建筑测绘、绘制地形图、滑坡处理、变形监测、岩土工程、植被测算、逆向工程、遗产保护、河流监测、实景地图、生物多样性等
实践经验总结 (近30余个时间项目, 超过1万hm ² 的三维实景重建及应用经验)	航线规划: Pix4D、DJI GS pro、Rockycapture、Waypoint Master
	三维建模: Bently ContextCapture、Metashape Photoscan、Pix4Dmapper、StreetFactory、Skyline、Globe PhotoMesh、Reality capture
	“4D”数据产品: 数字表面模型 (DSM)、数字高程模型 (DEM)、数字正射影像图 (DOM)、数字线划地图 (DLG)
	“4D”数据处理软件: Sketchup、3DMax、DP-modeler、Modelfun、MeshMixer、Arcgis、Globalmapper、Rhino+Grasshopper

用的建模分析软件，依据场地的DEM数据绘制地形地貌或对场地剖面进行高程分析，还可以将三维实景模型结合 GlobalMapper、ArcGIS 等地理信息平台，进行三维模型与地理信息相结合的可视化分析。在项目表达阶段，设计师可以使用 Lumion、Unity、Twinmotion 等软件将设计模型与三维实景模型 (OBJ、DAE 格式) 叠加渲染，借助 PICO (AR)^[30]、Hololens (MR)^[31] 等可视化设备，实现虚拟现实表达及体验。该解决方案可进一步用于设计过程中的公共参与、设计绩效量化研究等方面。

3.3 风景遗产资源保护与利用

传统的风景遗产资源的保护工作，往往通过图像、手稿绘图等方式进行信息的整理与汇编，而常用的三维激光扫描仪（如 Trimble X80）往往成本高且操作复杂。相比之下，民用级无人机的使用能够使风景文化遗产的数据采集、处理、储存和信息管理变得更加灵活便捷^[32]。风景遗产资源涉及的数据颗粒度较高，可根据遗产资源形态规划无人机航线，如山体空间采用仿地飞行、塔型建筑宜采用环绕飞行等实现更高精度测量^[33]，也可

通过手持无人机进行贴近扫描。有研究通过无人机摄影测量生成的点云数据（Point loud data）实现对古城风景遗产的实景扫描，并将生成的模型应用于规划古城旅游、古城虚拟导航、研学教育等场景^[34]。利用无人机航摄获取古城墙遗址实景模型^[35]、数字高程图、数字地表模型^[36]可以作为遗址保护存档数据。点云数据还可以作为遗址墙体裂缝分析、结构分析的数据^[37]，并对遗产要素的类型实现量化分析^[38]。综上所述，无人机摄影测量系统所具备的低成本、高效率灵活特点，为尚未得到相关部门认证且具备保护价值的风景遗产资源的保护与维护提供机遇。

3.4 林业及生态资源量化研究

为了获取较高精度的生态资源数据，从事林业调查、森林研究的工作人员通常需要大量的时间与精力进行现场踏勘。无人机摄影测量在区域性的林业及生态研究方面提供了有效的解决方案。有研究利用 CloudCompare 软件，对场地的点云数据进行分类处理，例如识别植被^[39]、水域监测^[40]等，Urech 等^[41]将点云数据用于树叶密度与热能吸收的迭代优

化机制研究。王彬等^[42]将林地的 DSM 和 DTM 数据叠加相减得到树木高度变化模型（Canopy Height Model，CHM），Martins 等^[43]使用深度学习、分析点云数据进行植物类型识别。通过搭载多光谱镜头，应用于农作物植株高度测定和生物量估测^[44]、三维绿量计算^[45]等。除此之外，无人机摄影测量技术在高空植物识别、植物实景建模方面仍然具备进步空间，苏黎世联邦理工学院、MIT 实验室借助语义分割将三维点云数据进行修改与分类，可以精准地获取场地的植物群落的结构化数据^[46-47]。林业及生态资源识别涉及的样本数量大、数据颗粒度高，而随着计算机视觉技术与人工智能技术的发展，这方面的分析也会在数据准确度、分析智能化方面将有较大的提升。

3.5 系统信息模型基座的构建

系统信息模型常用来帮助人们更好地理解系统内部事物之间的关联。2002 年 BIM^[48]概念及技术在建筑领域得到快速推广，2007 年城市建设领域提出了城市信息模型 CIM^[49]，2008 年 Irving 教授提出风景园林信息模型 LIM（Landscape Information Modeling）^[50]，系统信息模型理念进入了风景园林研究领域。风景园林信息模型涉及了不同类型、格式、维度的数据均需要进行数字化，其物理空间是由建筑、构筑物、植物、地形及水体等要素组成，通常使用矢量、栅格、网格、点云等数据描述^[51]，而无人机摄影测量可实现多种颗粒度的数字孪生（digital twin）模型构建，包括宏观维度的地理信息模型，微观视角的植物信息模型、建筑信息模型、构筑物信息模型等。有研究通过无人机摄影测量快速创建城市区域信息模型 CIM^[52]，构建数字孪生可视化平台，作为城市管理系统^[53]、建筑工程管理系统^[54]、桥梁信息系统^[55]、工程信息系统构建^[56]等。目

前，无论是城市区域还是建筑景观等领域，无人机摄影测量均可实现不同尺度的三维实景建模工作，支持系统信息模型的物理实体的数字孪生。

4 讨论及展望

无人机摄影测量的解决方案具有机动灵活、高效快速、精细准确、作业成本低、适用范围广、生产周期短等特征，为风景园林空间场景数字化提供更多可能性。同时也存在一些亟需解决的技术难题。其一是数据采集问题。无人机飞行需要专业执照，操作人员需要熟练掌握无人机性能，在环境复杂、信号不稳定的城市空间中，需要保证数据的精准采集与飞行安全。其二是模型处理问题。三维实景模型网格面多、文件体量大并难以直接开展基于网格面的设计工作，前期需要大量人工进行矢量化、轻量化与结构化处理，同时也涉及编程与数据格式转换等技术问题。最后是地理信息安全问题。实景模型完全复刻了地表信息，而项目开展常涉及到历史文物、建筑与城市的重要空间，在交付与传输的过程中需要相应的保护措施防止地理数据被非法使用。但是，随着新型测绘技术、人工智能等技术的发展，无人机摄影测量将在简化测绘流程、智能化测绘与自动化数据处理等层面实现不断革新，风景园林空间海量、高颗粒度的结构化数据收集与监测变得更加容易。在行业数字化转型背景下，近些年无人机摄影测量无论是在学术研究还是设计实践中，均有大量的研究与应用，为探索该解决方案的全新应用场景及发展趋势，遂提出无人机摄影测量在未来应用的三个重要方向。

(1) 以量化研究为基础的应用拓展。无人机摄影测量支持LM系统构建的空间量化基础数据。在高质量发展、碳中和、可持续

发展目标的背景下，量化研究进一步成为学科研的新趋势。通过无人机摄影测量对植物、生态空间的量化数据，可实现例如碳核算、SITE评级等工作，对建成环境的量化研究及评估工作带来更多可能。随着AIGC及计算机视觉技术的发展应用，依托无人机低空遥感输出的图像数据、三维点云数据进行语义分割、目标识别，可推演未来空间演化规律。

(2) 集成化、便捷高效的设计 workflow。构建不同部门之间的协同 workflow，是规划与设计行业数字化转型的关键步骤。完整的数字化 workflow 包括环境数据采集与分析，设计与建模、渲染表现与模拟、建造与施工、景观绩效评价以及运维管理全生命周期。有研究人员将摄影测量技术与参数化、虚拟现实技术相结合，形成了详细的数字化技术 workflow^[67]。目前市场已有相关软件产品的研发，如AsuniCAD公司设计插件Lands Design，支持地图、地形数据导入与处理，但缺乏对实景模型的导入及处理能力；Vectorworks landmark景观版，支持单体项目从概念设计到施工图纸的流程；而Bentley公司开发的Infrastructure Digital Twins系统，多用于市政基础设施工程的信息集成管理。未来，以摄影测量建立的三维实景模型作为协同工作平台，在平台上开发在线设计、数据处理等工具，可实现基于三维实景的设计 workflow，包括前期项目信息浏览、多方沟通交流、地形处理、设计建模、植物种植、成果渲染展现等功能，工作流的集成化可进一步提升设计工作的效率与科学性。

(3) 虚实融合的风景园林空间体验。随着虚拟体验场景的应用需求，虚拟空间设计也成了风景园林行业重要的拓展领域。通过无人机摄影测量构建风景园林场地模型，并进行轻量化、语义化处理，将建成后的三维场景与虚拟场景进行优化处理与再创作，将

物理世界转变为“全真”的虚拟世界系统，结合MR、VR、云渲染等技术的三维实景呈现，可实现虚拟与实景空间相结合的景观体验。除此之外，通过游戏平台的二次开发，如Decentraland、Sandbox等虚拟游戏平台，创建个人身份、形象，在线上空间进行社交与娱乐体验。另外可构建创作者经济，设计师可以在虚拟空间建造城市、建筑、景观空间等各种数字资产，将创意设计成果转化为NFT数字资产库，在虚拟世界、虚拟游戏中拓展风景园林规划与设计工作范畴。

注：文中图表均由作者绘制。

参考文献

- [1] 张兵, 杨晓梅, 高连如, 等. 遥感大数据智能解译的地理学认知模型与方法[J]. 测绘学报, 2022, 51(07): 1398-1415.
- [2] 李慧希. 基于地图术 (Mapping) 的景观建筑学理论研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- [3] LIU X, SONG Y, WU K, et al. Understanding Urban China with Open Data[J]. Cities, 2015, 47: 53-61.
- [4] 侯静轩, 张思嘉, 龙瀛. 多尺度城市空间网络研究进展与展望[J]. 国际城市规划, 2021, 36(04): 17-24.
- [5] 孙澄, 袁烽, 陈自明, 等. 计算性设计赋能人居环境营造[J]. 当代建筑, 2022(06): 6-13.
- [6] 刘颂, 章舒雯. 数字景观技术研究进展——国际数字景观大会发展概述[J]. 中国园林, 2015, 31(02): 45-50.
- [7] 李欣, 何子琦, 张炜. 从第21届国际数字景观大会展望数字风景园林技术研究热点和前沿[C] // 中国风景园林学会. 中国风景园林学会2020年论文集(下册). 北京: 中国建筑工业出版社, 2020.
- [8] 成实, 张潇涵, 成玉宁. 数字景观技术在中国风景园林领域的运用前瞻[J]. 风景园林, 2021, 28(01): 46-52.
- [9] 刘文平, 陈倩, 黄子秋. 21世纪以来风景园林国际研究热点与未来挑战[J]. 风景园林, 2020, 27(11): 75-81.
- [10] 公海燕. 大疆行业应用拓疆——访深圳市大疆创新科技有限公司测绘行业负责人魏坤岭[J]. 中国测绘, 2021(01): 60-63.
- [11] 张剑清, 潘励, 王树根. 摄影测量学[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2003.
- [12] 杨国东, 王民水. 倾斜摄影测量技术应用及展望[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(01): 13-15.

- [13] 李德仁, 李明. 无人机遥感系统的研究进展与应用前景[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2014, 39(05): 505-513.
- [14] KLEPÁRNÍK R, SEDLÁČEK J. UAV Photogrammetry, Lidar or WebGL? A Comparison of Spatial Data Sources for Landscape Architecture[J]. *Journal of Digital Landscape Architecture*, 2021: 220-229.
- [15] FU L, HEXING C, YINYU W, et al. UAV Measurement in Landscape Architecture Research and Practice[J]. *Landscape Architecture Frontiers*, 2019, 7(2): 38-55.
- [16] 冉玲于, 周燕. 基于CiteSpace知识图谱分析的城市内涝问题研究述评[J]. *景观设计学*, 2019, 7(06): 66-87.
- [17] 俞孔坚. 实践研究: 创新知识和方法的范式[J]. *景观设计学*, 2020, 8(04): 5-9.
- [18] KINGSLAND K. Comparative Analysis of Digital Photogrammetry Software for Cultural Heritage[J]. *Digital Applications in Archaeology and Cultural Heritage*, 2020, 18: e157.
- [19] 杨彦梅, 王莹, 施磊, 等. 基于DP-Modeler的精细化三维模型构建[J]. *测绘通报*, 2021(05): 106-110.
- [20] 王东旭. EPS地理信息工作站基础平台在数字测图中的应用[J]. *北京测绘*, 2014(02): 128-133.
- [21] 马旭文, 徐柳华. 基于倾斜摄影三维模型的大比例尺地形图测图软件比较与分析[J]. *测绘与空间地理信息*, 2020, 43(02): 57-59.
- [22] 王蒙, 庞光辉, 李凯. 倾斜摄影测量在城市规划中的应用探索[C] // 中国城市规划学会, 沈阳市人民政府. 规划60年: 成就与挑战——2016中国城市规划年会论文集(04城市规划新技术应用). 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [23] 杨荣帮. 无人机倾斜摄影测量在城市更新中的应用[J]. *测绘与空间地理信息*, 2021, 44(07): 217-220.
- [24] MILLIGAN B. Making Terrains: Surveying, Drones and Media Ecology[J]. *Journal of Landscape Architecture*, 2019, 14(2): 20-35.
- [25] NOCERINO E, MENNA F, REMONDINO F. Multi-Temporal Analysis of Landscapes and Urban Areas[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2012, 39: 85-90.
- [26] 柳婷, 陈小松, 张伟. 无人机倾斜摄影辅助BIM+GIS技术在城市轨道交通规划选线中的应用[J]. *测绘通报*, 2017(S1): 197-200.
- [27] 刘通, 黎展荣. 基于无人机三维重建现状模型的风景园林设计研究与教学探索[J]. *风景园林*, 2018, 25(06): 130-134.
- [28] CIANCI M G, MOLINARI M. Information Modeling and Landscape: Intervention Methodology for Reading Complex Systems[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 42: 269-276.
- [29] 程文宇, 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.
- [30] 叶宇, 张塔, 韩赞. 基于多源数据与具身循证技术的建成环境审计——以上海临港新城滴水湖站点广场为例[J]. *风景园林*, 2022, 29(09): 55-61.
- [31] CARBONELL-CARRERA C, SAORIN J L, MELIÁN DÍAZ D. User VR Experience and Motivation Study in an Immersive 3D Geovisualization Environment Using a Game Engine for Landscape Design Teaching[J]. *Land*, 2021, 10(5): 492.
- [32] 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(05): 9-16.
- [33] LIANG H, LI W, LAI S, et al. The Integration of Terrestrial Laser Scanning and Terrestrial and Unmanned Aerial Vehicle Digital Photogrammetry for the Documentation of Chinese Classical Gardens—A Case Study of Huanxiu Shanzhuang, Suzhou, China[J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2018, 33: 222-230.
- [34] KERSTEN T, PARDO C A, LINDSTAEDT M. 3D Acquisition, Modelling and Visualization of North German Castles by Digital Architectural Photogrammetry[C] // XXth ISPRS Congress, 2004.
- [35] 李加忠, 程兴勇, 郭湧, 等. 三维实景模型在景观设计中的应用探索——以金塔公园为例[J]. *中国园林*, 2017, 33(10): 24-28.
- [36] 杨阳, 唐晓岚, 唐巧巧, 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(03): 72-76.
- [37] YANG C, HAN F, SHUTTER L, et al. Capturing Spatial Patterns of Rural Landscapes with Point Cloud[J]. *Geographical Research*, 2020, 58(1): 77-93.
- [38] MURTIYOSO A, PELLIS E, GRUSSENMEYER P, et al. Towards Semantic Photogrammetry: Generating Semantically Rich Point Clouds from Architectural Close-Range Photogrammetry[J]. *Sensors*, 2022, 22(3): 966.
- [39] KUMAZAKI R, KUNII Y. Drawing and Landscape Simulation for Japanese Garden by Using Terrestrial Laser Scanner[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, 40: 233-238.
- [40] PALESTINI C, BASSO A. 3D Detection and Reconstruction Experiments in River Basins[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2019, 42: 543-550.
- [41] ZHU Y, DENG X, NEWSAM S. Fine-grained Land Use Classification at the City Scale Using Ground-Level Images[J]. *IEEE Transactions on Multimedia*, 2019, 21(7): 1825-1838.
- [42] 王彬, 孙虎, 徐倩, 等. 基于无人3D摄影技术的雪松(Cedrus deodara)群落高度测定[J]. *生态学报*, 2018, 38(10): 3524-3533.
- [43] CORREA MARTINS J A, MARCATO JUNIOR J, PÄTZIG M, et al. Identifying Plant Species in Kettle Holes Using UAV Images and Deep Learning Techniques[J]. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 2023, 9(1): 1-16.
- [44] 刘家橘, 刘家橙, 王晓燕, 等. 倾斜摄影三维建模在矿山恢复调查中的应用[J]. *地理空间信息*, 2020, 18(07): 48-50.
- [45] 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(05): 35-40.
- [46] RICHARD A, VOGEL C, BLAHA M, et al. Semantic 3D Reconstruction with Finite Element Bases[C] // British Machine Vision Conference, 2017.
- [47] GIROT C. Landscape Topology: Digital Landscape Design and Analysis Based on Pointcloud Modelling Technology[EB/OL]. [2023-11-05]. <https://girot.arch.ethz.ch/research/digital-landscape-design-and-analysis>
- [48] 孙鹏, 李雄. BIM在风景园林设计中应用的必要性[J]. *中国园林*, 2012, 28(06): 106-109.
- [49] 许镇, 吴莹莹, 郝新田, 等. CIM研究综述[J]. *土木建筑工程信息技术*, 2020, 12(03): 1-7.
- [50] 赖文波, 蒋璐. 基于景观信息模型(LIM)的大学校园雨水花园建造[J]. *南方建筑*, 2017(01): 124-128.
- [51] AHELEROFF S, XU X, ZHONG R Y, et al. Digital Twin as a Service (DTaaS) in Industry 4.0: An Architecture Reference Model[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2021, 47: 101225.
- [52] 罗瑶, 莫文波, 颜紫科. 倾斜摄影测量与BIM三维建模集成技术的研究与应用[J]. *测绘地理信息*, 2020, 45(04): 40-45.
- [53] QU T, ZANG W, PENG Z, et al. Construction Site Monitoring Using UAV Oblique Photogrammetry and BIM Technologies[C] // the 22nd CAADRIA Conference, 2017.
- [54] FALTÝNOVÁ M, MATOUŠKOVÁ E, ŠEDINA J, et al. Building Facade Documentation Using Laser Scanning and Photogrammetry and Data Implementation into BIM[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2016, 41: 215-220.
- [55] MOHAMMADI M, RASHIDI M, MOUSAVI V, et al. Quality Evaluation of Digital Twins Generated Based on UAV Photogrammetry and TLS: Bridge Case Study[J]. *Remote Sensing*, 2021, 13(17): 3499.
- [56] 李博, 徐敬海. 无人机倾斜摄影测量土方计算及精度评定[J]. *测绘通报*, 2020(02): 102-106.
- [57] 王子尧, 张诗阳, 王向荣, 等. 耦合多元数字技术的采石场景观设计路径——以第十二届中国(南宁)国际园林博览会园博园采石场花园为例[J]. *风景园林*, 2022, 29(04): 107-113.