

DOI: 10.7672/sgjs2024050001

三维激光扫描技术在工程建设中的应用研究

包 胜,方玄略,卜航栋

(浙江大学建筑工程学院,浙江 杭州 310058)

[摘要] 阐述地面三维激光扫描技术原理,介绍三维点云数据采集和处理的关键进展,梳理三维扫描技术在地下空间开发利用、结构健康监测、室内工程施工、质量检测与评估、文化遗产保护传承、智慧城市应用、已有工程改造、施工进度跟踪等领域的应用现状。分析该技术应用于不同领域的优缺点及改进方向,指出三维点云数据存储管理、计算分析面临的挑战,并展望三维激光扫描与点云处理在工程中的发展趋势。

[关键词] 工程测量;三维激光扫描;三维点云;建筑信息模型;发展前景

[中图分类号] TU17

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2024)05-0001-10

Application Research of 3D Laser Scanning Technology in Engineering Construction

BAO Sheng, FANG Xuanlue, BU Hangdong

(College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310058, China)

Abstract: The principle of ground 3D laser scanning technology is described, and the key progress of 3D point cloud data acquisition and processing is introduced, the applications status of 3D scanning technology in underground space development and utilization, structural health monitoring, indoor engineering construction, quality testing and evaluation, cultural heritage protection and inheritance, smart city application, existing engineering renovation, construction progress tracking and other fields is sorted. The advantages and disadvantages of the technology in different fields are analyzed, and the challenges to 3D point cloud data storage management and computing analysis are pointed out, finally, the development trend of 3D laser scanning and point cloud processing is forecasted.

Keywords: measurement; 3D laser scanning; 3D point cloud; building information modeling (BIM); development prospects

1 三维激光扫描原理

三维激光扫描直接对地球表面进行三维密集采样,通过快速激光扫描,短时间内生成周围物体的三维点云结果,包含三维坐标和反射强度等属性。运用专业点云处理软件,从三维点云数据中快速提取被测物体的三维模型及线、面、体、空间等制图数据。

三维激光扫描技术基本原理是快速发射并接收激光^[1],二极管产生并发射激光脉冲,脉冲传播至环境或物体表面发生反射后被接收透镜接收,通过发射-接收时差与光速即可计算出实际距离。激光脉冲空间方向由仪器内部角度测量棱镜测得,通

过距离、水平角度和竖直角度即可计算被测物体三维坐标。

2 点云数据采集和处理

获得三维点云数据后,需正确采集和处理点云数据,以确保三维激光扫描技术有效应用于预期建筑工程项目。通过三维激光扫描仪获取的原始数据具有数据量大、高冗余、非结构化、质量差异大、采样分布严重不均和不完整等特点,必须经过后期处理才能使用。人工处理点云数据难以满足目前的应用需求,实现点云数据智能化处理,能够为科学研究和工程应用提供关键支撑。

目前点云数据智能化处理的主要研究进展包括点云数据模型整合、数据质量改善、数据特征描述与提取(配准、分类)、数据模型重建,点云数据采集和处理如图 1 所示。

[作者简介] 包 胜,副教授,博士生导师,E-mail: longtubao@zju.edu.cn

[收稿日期] 2023-08-14

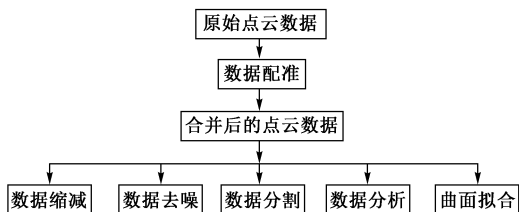


图 1 点云数据处理过程

Fig. 1 Processing of point cloud data

2.1 点云数据采集

在实践中,点云数据通常根据工程师经验获取,可能导致数据质量低或冗余的问题。因此,有必要在采集数据前指定所需的点云数据质量,使收集的数据满足指定要求且没有冗余。张亚等^[2]围绕建筑物点云数据采集与配准精度问题,分别采用基于标靶、基于形状匹配和基于测站后视的模式采集与配准处理建筑物表面点云数据,对比分析配准精度、特征点与特征边情况。结果表明,在精度上基于形状匹配的模式效果欠佳,而基于测站后视的模式具有最高的数据采集与配准效率。欧斌^[3]从工程经验出发,研究地面三维激光扫描技术的外业数据采集方法,总结每种方法的优缺点和对应应用范围。李元达^[4]针对地铁隧道项目,论述隧道点云数据采集和数据处理技术,并应用于南京地铁中,得到高质量点云。李佳等^[5]将三维激光扫描技术应用于文化遗址中,探索遗址建筑的快速激光扫描方法,并快速扫描国立西南联合大学遗址,为历史文物遗址存档和数字化工作提供参考。

2.2 点云数据处理

由于测量原理不同,三维激光扫描在采集速度与采样频率上明显优于传统测量方式,但这导致点云数据成果具有高冗余、误差分布非线性、不完整等特点,极大增加了三维点云智能化处理难度。近年来,国内外已有较多学者对点云处理理论与数据质量改善^[6-9]、自动化整合配准^[10]、点云分类和目标提取^[11-15]、数据模型重建^[16-21]等方面进行研究。如鲁冬冬等^[22]对统计滤波和半径滤波常用点云去噪方法进行研究,利用试验点云比较 2 种滤波算法,对比分析 2 种典型滤波器在去噪性能上的优劣。李刘轶等^[23]基于 PCL 库研究常见的点云滤波算法,包括统计滤波和半径滤波算法,在最优滤波效果下分析算法参数设置,并筛选出最优滤波算法,提出结合高斯滤波的混合滤波算法。李云帆等^[24]针对复杂建筑物点云数据分割方法效率低、抗噪性差、分割精度低等问题,重点研究建筑楼房屋顶结构,从经典 RANSAC 算法出发,创新改进 RANSAC 分割算

法,通过采集真实建筑物点云数据进行对比,大幅提升该方法效率。张冬冬等^[25]研究基于点云的三维目标检测,从点云数据特性出发,总结由点云稀疏性、离散性、无序性和旋转平移不变性等导致的点云目标检测难点,并对比分析基于图像视锥、数据降维、原始点云的三维目标检测方法的优劣势,最后展望三维目标检测的研究方向。徐福斌等^[26]将三维激光扫描技术应用于钢结构模型重建领域,建立根据 LIDAR 三维点云数据生成复杂钢结构的模型重建方法。试验结果表明,基于该方法得到的模型精度较高,与实际尺寸差值均 $<1\text{cm}$,为复杂钢结构三维模型重建提供有效解决方案。

3 科学研究与工程应用

3.1 地下空间开发利用

在城市化进程不断加快、建筑用地日趋紧张的背景下,为节约土地面积,各地越来越重视对城市地下空间的开发利用。在地下空间测量^[27-29]、可视化分析^[30]与信息化开发利用^[31-33]方面,随着智慧城市建设推进和城市信息化水平提高,对地下空间三维信息采集与处理方式提出更高要求。作为高效率、高精度的新型测量技术,三维激光扫描的非接触性、数字化、自动化特点使其适用于地下空间三维数据采集中,是未来城市地下空间信息化和三维建模的研究热点之一。

地下空间开发涉及基坑工程,基坑工程建设难度大、风险性较高、对安全与稳定性要求严格,对基坑监测提出较高要求。由于三维扫描采集空间信息原理是激光测距,相比传统手段更具优势,结合三维激光扫描技术与基坑监测,将有望弥补传统监测手段存在的缺陷,为基坑工程质量与施工安全提供保障。谈珂威^[34]在理论分析基础上,以南京市某地下车库深基坑工程为案例,进一步验算三维扫描监测精度。同时,长期监测施工期间的地表沉降、支护结构位移与周边建筑物变形,随后汇总分析监测数据,明确基坑及周边环境安全状态。此外,本文结合数值模拟与现场实测,对基坑开挖全过程中的基坑、周边土体与邻近建筑物进行有限元模拟分析,总结三者在施工过程中的变形规律,研究基坑施工对周边环境的影响。许新海^[35]分析激光扫描技术原理及精度影响因素,通过工程实例,说明具体的扫描工作流程,并对比分析监测结果与全站仪数据。陈奕才等^[36]在深圳机场卫星厅及其配套项目中,对行李系统、屋盖钢结构、大体积土方、主体结构质量等方面展开 BIM+三维扫描技术应用,对项目结构、地形进行非接触、高精度、可逆向的数据

采集分析,用于结构尺寸复核、钢结构屋盖变形观测、大体积土方测量,指导现场施工,取得良好的应用效果。张健^[37]在2022年卡塔尔世界杯主场馆卢塞尔体育场钢结构卸载方案及3D扫描仪功能特点研究中指出高精度3D扫描与BIM技术相结合,可用于大型体育场卸载监测,并在实际运用中验证其科学性与可靠性。研究表明,3D扫描技术可完全满足钢结构卸载监测各项要求,且监测精度和监测效率大大优于传统监测手段。杨兆龙等^[38]依据点位误差公式和扫描仪测距测角精度,采用实地试验方法,按照试验方案扫描角度、距离、材质不同的反射体,以强度平均值研究其对仪器扫描强度的影响。结果显示,位移点平面和高程精度基本满足监测目的,效果良好。葛纪坤等^[39]利用三维激光扫描获取大量基坑围护墙体的点云数据,经点云处理与建模后,采用软件对点云模型进行变形分析,得到基坑围护墙体的三维整体变形和二维局部变形情况,并分析2种监测技术在变形量与监测精度中存在的偏差。目前三维扫描基坑监测在范围、效率上具有优势,但在精度、受干扰程度方面逊色于传统监测手段,导致监测结果存在差异。在基坑工程监测方面,三维激光扫描技术目前无法代替传统监测手段,但可在监测数据补充、监测情况参照方面发挥作用。结合三维激光扫描技术与基坑监测,将有望弥补传统监测手段存在的缺陷,为基坑工程质量与施工安全提供保障。

在隧道施工监测方面,部分学者开展三维激光扫描技术结合隧道监测^[40-47]的研究。宋云记等^[48]综合研究地面式扫描仪与移动式扫描仪的隧道监测应用,以对比研究两类扫描仪在地铁隧道施工阶段、运营阶段的病害检测效果,总结三维扫描技术在隧道超欠挖分析、二衬厚度分析,以及运营阶段隧道脱落、裂缝、渗水、错台等病害检测分析中的适用性与可行性,为三维激光扫描技术在地铁隧道中的应用提供借鉴。师海^[49]针对岩溶隧道特点,将三维激光扫描技术应用于沪昆客运专线湖南段雪峰山隧道,通过扫描获取隧道三维信息,并结合传统地质勘察监测手段,研究隧道掌子面的岩体稳定性,为隧道施工安全提供保障。研究表明,相比传统监测方法,通过三维扫描技术获取的隧道等地下工程空间信息更加真实可靠、快速高效,此技术将更广泛地应用于地下工程。赵亚波等^[50]将三维激光扫描技术应用于隧道管片错台分析中。错台是地铁隧道的主要病害之一,通常由盾构机施工控制不良或隧道荷载改变导致。在青岛地铁2号线项目

中,根据扫描成果逆向重建隧道三维模型,基于该模型辨别隧道安全状态,并根据正射影像与反射率,有效检测渗水、裂缝、错台等隧道病害。Li等^[51]探索三维激光扫描技术在地下车站中的应用,以京张铁路八达岭隧道长城地下站为例,利用三维激光扫描技术获得隧道超限和欠限分布及一次支护的断面面积,并对比全站仪测量结果。研究表明,由三维激光扫描测量的数据与由全站仪测量数据差值<3mm,证明三维激光扫描应用于地下车站的有效性和可靠性。Zhao等^[52]探索三维激光扫描技术在新奥法隧道变形测量中的应用。由于围岩中的原位应力,山区隧道经常发生变形,变形检测可为施工和维护提供关键信息。通过移动平均法缩小扫描点云大小,利用迭代最近点算法获得2个时空点云间的对应关系,然后获得每个配对点间的变形量,计算隧道衬砌的全空间变形场。在南山隧道项目中,由三维激光扫描与全站仪测量获得的数据具有良好一致性。

3.2 结构健康(变形)监测

(超)大型工程多为特异形建筑,建筑本体结构与内部空间相当复杂,往往体量庞大、施工难度大、精度要求高,且一旦出现事故,安全责任重大、社会影响广泛。其建筑施工、设备安装、运维监测过程难度更大,对(超)大型工程测量技术提出更高要求。随着特异形建筑工程日益增加,以全站仪等仪器为代表的传统测量手段存在劳动强度大、效率低、便捷性差等问题,因此部分学者研究先进的施工监测技术及信息管理方法,以有效监测管理工程质量^[53-54]、结构变形^[55-61]。刘欢佳等^[62]依托场馆建设大跨度异形双曲率穹顶结构,获取异形模板三维扫描点云,处理数据后进行精度分析。结合Geomagic中的3D对比分析功能,采用点云与模型拟合技术,计算模板安装精度,实现异形结构表面测量,全面提升测量方便性、精确性及自动化程度。杨雪姣等^[63]通过异形构件安装与混凝土表面检测实例,探讨三维激光点云的不同处理技术,阐述三维扫描技术在特异形结构施工中的应用。在攻克点位提取与非规则形状处理技术后,提出三维扫描技术应用于施工检测的方法和复杂空间双曲面混凝土面竣工测量方法。李占东等^[64]基于国家速滑馆及其附属设施工程,阐述BIM结合三维扫描技术在施工质量监管中的应用。进行工程质量监管时,首先预处理结构实体点云模型,而后与BIM模型进行对比,检查工程结构实体存在的质量偏差并分析偏差程度。基于BIM的三维扫描技术能够有效提

升工程质量监管效率和水平。Chan 等^[65]通过整合 BIM 和传感技术,提出概念性框架,以提高桥梁资产管理效率。并以澳大利亚皮尔蒙特大桥与中国永新水闸泵站项目为例,验证三维激光扫描技术的有效性。Lu 等^[66]以商丘文化艺术中心大剧院建设中的钢结构检测与幕墙消隐为例,探索基于三维激光扫描的 BIM 技术在大型钢结构工程中的应用。利用三维激光扫描仪采集钢结构内外详细点云数据,对比 BIM 设计模型,完成结构设计和检测。数据表明,该方法可有效检测钢结构,且可根据测量到的点云数据更新 BIM 模型,为幕墙材料选择与安装提供数据参考。但点云处理过程中存在很多人工干预环节,效率较低且处理结果与技术人员经验密切相关。基于点云的 BIM 模型创建主要依赖建模软件,自动化程度较低,需探索全自动建模方式。另外由于温室气体增加,后续研究应以减少碳排放和温室气体排放为重点,促进建筑产业绿色化。Wang 等^[67]以海南某幼儿园为例,将三维激光扫描应用于幕墙建造中,对地面激光扫描技术在幕墙设计和安装中应用的基本概念、工作流程及实际表现进行介绍。主要分为两个阶段:①第 1 阶段 审查结构施工条件,以检测幕墙施工基础偏差和精度;②第 2 阶段 复核安装后的幕墙龙骨,为幕墙板安装奠定基础。此外还指出三维激光扫描技术对实际应用的说明、限制与建议,以及未来的研究方向与挑战。

3.3 室内工程施工

传统施工工艺在复杂空间施工中一直存在测量难度大、施工质量无保障等问题,因此更多技术人员尝试将三维扫描技术应用于室内工程^[68-74]。利用三维激光扫描仪扫描复杂空间,生成坐标点云模型后进行比对分析,能够解决施工偏差,有效提高工效和施工质量。赵泳^[75]在某纪念馆机电精细化施工现场管理中,结合 BIM 深化设计模型与三维扫描技术,提高现场作业效率,减少返工,有效提升机电施工质量。阚浩钟等^[76]将三维扫描技术与 BIM 技术引入大小井特大桥钢管拱肋拼装过程中,应用三维激光扫描技术后,明显提高钢管混凝土拱桥施工精度和工作效率,同时避免传统测量方式基于点云数据分析的片面性。包胜等^[77]将三维激光扫描技术引入管道安装偏差分析中,研究基于三维扫描的管道数据采集处理、管道逆向建模与管道偏差分析应用。以某学校地下室泵房为研究对象,采用三维激光扫描技术获取现场数据,进行逆向建模。同时对比逆向建模成果与设计模型,分析实际施工中的管道偏差情况,为施工质量评估和管道检

修管理提供数据保障。周永波等^[78]在某石化厂区密集架空管线数字化过程中引入三维激光扫描技术,实施外业管道扫描、内业点云处理、数据模型建立和管线数据库建立等措施,实现厂区架空管线数字化成果,为厂区总图建设和管理提供基础数据保障。实践证明,三维激光扫描技术改变传统测量模式,为密集架空管线数字化测量提供助力。

3.4 质量检测与评估

BIM 在实际应用过程中往往只能提供设计或深化设计模型,反映设计意图并指导施工,常与实际建造与检测工作脱节。因此,不少学者尝试结合三维激光扫描技术与 BIM 技术,探索新型智能化施工质量检测方法^[79-86]与新型评估手段。赵馨怡等^[87]利用三维激光扫描检测施工质量,通过对比实际施工项目扫描点云模型与 BIM 设计模型,得到施工几何偏差,从而指导工程建设和深化设计方案。实践表明,该方法具备可行性,且偏差分析结果可靠,能够直观反映当前施工质量。王二民等^[88]利用地面三维激光扫描仪立体扫描某建筑物,采集目标建筑物表面三维空间信息,提出根据点云提取建筑物中心轴线的方法,采用随机采样一致性算法(RANSAC)拟合直线,并采用整体最小二乘法拟合平面。通过分析拟合平面及拟合直线几何特征检测建筑物平整度和垂直度,根据实测数据分析结果,表明三维激光扫描技术在建筑物立面平整度及垂直度检测中具有较高的可行性和适用性。包胜等^[89]使用三维激光扫描技术对墙面平整度进行评估,通过计算墙面轮廓线曲率,分析曲率特征与平整度的关系,采用最小二乘法对墙面点云进行平面拟合,基于 Matlab 从墙面点云中提取表面轮廓线,计算得到曲率特征 W 值。通过分析不同墙面轮廓线 W 值分布,提出采用点估计和区间估计度量墙面平整度 W 值的方法,可有效区分不同墙面平整度,具有推广应用价值。

3.5 文化遗产保护传承

目前,许多建筑文化遗产面临古建筑保护的严峻考验。相比传统单点测量方式,三维扫描技术以高精度、高密度和非接触式的测量方式广泛应用于古建筑结构安全检测^[90-91]与古建筑数据收集建档^[92-97]中,可在不损坏文物的前提下,快速绘制古建筑结构图及精细的三维模型。高溪溪等^[98]结合三维扫描与 BIM 技术,对青岛市广兴里院从获取点云数据到特征线提取再到创建三维模型全过程进行研究,为损坏的古建筑进行恢复、再现和重建提供技术支持。孔令惠等^[99]利用三维激光扫描技术

替代传统式单点立面测绘技术,对宁波市历史古塔与西洋楼房进行测绘建档,通过现场采集、预处理、点云去噪与精细化处理后,得到历史建筑完整的三维点云数据,通过立面点云模型快速成图,明显提高立面测量工作效率和数据精度。王军^[100]在兰州市五泉山古代厢房测绘及地面三维激光扫描应用中,研究三维激光扫描仪的测距、水平角精度,分析不同距离对水平角、测距精度的影响,并绘制古建筑平面图与立面图。对古建筑内部塑像进行三角网建模,对其外部复杂结构进行 3D Max 精细化建模,并分别进行精度分析。索俊锋等^[101]结合三维激光扫描技术、现代测量技术及本体思维,进行室内外一体化三维建模。采用非接触式激光扫描技术,对点云数据配准拼接、去噪简化、提取轮廓线、三维几何建模和纹理贴图等步骤进行详细论述,为西北民族大学蝴蝶厅古建筑文化遗产开发、维修、重建等提供高精度的数据基准。钱正伟等^[102]以常州市历史建筑群为例,论述常州历史建筑三维点云采集、处理、模型建立等关键技术,该激光点云成果精度符合历史建筑测绘要求,为历史建筑保护和修缮提供数据支撑。

3.6 其他应用

1)智慧城市建设 黄杰云^[103]研究三维激光扫描法在城市建设测量中的实际应用情况,并结合实际案例验证该技术应用于智慧城市建设中的可行性。

2)工程改造 张世伟等^[104]以北京奕斯伟既改项目为例,结合 BIM 与三维激光扫描技术,加快施工进度。

3)施工进度跟踪 杨红军等^[105]以某老旧纺织厂为例,在三维激光扫描测绘实践中引入无人机倾斜摄影测量技术,解决站式扫描仪点云数据缺漏技术问题,经数据融合得到厂房完整的三维点云数据,有效辅助厂房改造实施。Wang 等^[106]总结地面三维激光扫描技术在交通基础设施测绘、建筑信息建模、公共设施测绘、植被清查和自动驾驶等方面的应用。

4 结语

随着传感器、芯片、物联网、运载平台等不断发展,点云数据获取效率与质量得到进一步提升,数据采集成本下降,从而实现更加经济、高效的物理世界三维数字化采集。未来,三维激光扫描技术在数据容量方面将以指数级增加,点云大数据存储管理、计算分析等面临更大挑战。

综上,三维激光扫描与点云智能化处理将顺应

数字现实时代需求,向以下方面发展:①三维激光扫描设备轻量化、智能化、搭载平台多元化;②应建立面向点云三维信息提取与建模的国家和行业标准,为各行业技术应用提供便利;③综合人工智能、深度学习等技术,解决点云数据处理核心难题,使点云处理向自动化、智能化方向快速发展;④开拓虚拟现实与增强现实、互联网与物联网+等技术与三维激光扫描有效结合,实现三维激光扫描产品大众化、消费级应用,扩大三维激光扫描产品市场。

参考文献:

[1] 李天兰. 三维点云数据的处理与应用[D]. 昆明:昆明理工大学,2011.
LI T L. Processing and application of 3D point cloud data[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2011.

[2] 张亚,山锋,王涛. 三维激光扫描技术点云数据采集与配准研究[J]. 地理空间信息,2021,19(3):24-27,6.
ZHANG Y, SHAN F, WANG T. Study on point cloud data acquisition and registration by 3D laser scanning technology[J]. Geospatial information,2021,19(3):24-27, 6.

[3] 欧斌. 地面三维激光扫描技术外业数据采集方法研究[J]. 测绘与空间地理信息,2014,37(1):106-108,112.
OU B. Research on field data acquisition method of ground 3D laser scanning technology[J]. Geomatics & spatial information technology, 2014,37(1):106-108,112.

[4] 李元达. 地铁隧道点云数据采集与预处理[J]. 北京测绘, 2019,33(9):1047-1050.
LI Y D. Subway tunnel point cloud data acquisition and preprocessing[J]. Beijing surveying and mapping, 2019, 33(9):1047-1050.

[5] 李佳,段平,张驰,等. 国立西南联合大学遗址的点云数据采集与建模[J]. 云南大学学报(自然科学版),2018,40(3):502-507.
LI J, DUAN P, ZHANG C, et al. Point cloud data acquisition and modeling at the site of National Southwestern Associated University[J]. Journal of Yunnan University(natural sciences edition), 2018,40(3):502-507.

[6] 谭凯,程效军,张吉星. TLS 强度数据的人射角及距离效应改正方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2017,42(2):223-228.
TAN K, CHENG X J, ZHANG J X. Method for correction of incidence angle and distance effect of TLS intensity data[J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2017, 42(2):223-228.

[7] 隋立春,张熠斌,张硕,等. 基于渐进三角网的机载 LiDAR 点云数据滤波[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2011,36(10):1159-1163.
SUI L C, ZHANG Y B, ZHANG S, et al. Airborne LiDAR point cloud data filtering based on progressive triangulation network [J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2011,36(10):1159-1163.

[8] 史皓良. 三维点云数据的去噪和特征提取算法研究[D]. 南昌:南昌大学,2017.

- SHI H L. Research on denoising and feature extraction algorithms of 3D point cloud data [D]. Nanchang: Nanchang University, 2017.
- [9] 杨倩,李沛鸿,吴玉泉. 三维激光点云降噪的优化方法[J]. 江西测绘, 2018(2): 35-37, 48.
- YANG Q, LI P H, WU Y Q. Optimization method of 3D laser point cloud noise reduction[J]. Jiangxi ceihui, 2018(2): 35-37, 48.
- [10] 黄国清,陈君,梁飞,等. 三维激光扫描点云配准算法与精度研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(2): 16-17, 27, 10.
- HUANG G Q, CHEN J, LIANG F, et al. Research on registration algorithm and accuracy of three-dimensional laser scanning point cloud[J]. Geospatial information, 2018, 16(2): 16-17, 27, 10.
- [11] 陈良良,隋立春,蒋涛,等. 地面三维激光扫描数据配准方法[J]. 测绘通报, 2014(5): 80-82.
- CHEN L L, SUI L C, JIANG T, et al. Registration method of ground 3D laser scanning data[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2014(5): 80-82.
- [12] 陈驰,麦晓明,宋爽,等. 机载激光点云数据中电力线自动提取方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(12): 1600-1605.
- CHEN C, MAI X M, SONG S, et al. Automatic power line extraction from airborne laser point cloud data[J]. Geomatics and information science of Wuhan University, 2015, 40(12): 1600-1605.
- [13] 赵珂劼,田筱,周游,等. 基于无人机倾斜摄影的桥梁实景三维建模应用[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(14): 99-103, 109.
- ZHAO K J, TIAN X, ZHOU Y, et al. Bridge 3D modeling based on UAV tilt photography[J]. Construction technology, 2023, 52(14): 99-103, 109.
- [14] 肖冬娜,周忠发,尹林江,等. 融合颜色指数与空间结构的喀斯特山地火龙果单株识别[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(10): 489-503.
- XIAO D N, ZHOU Z F, YIN L J, et al. Single plant identification of dragon fruit in karst mountain by integrating color index and spatial structure[J]. Laser & optoelectronics progress, 2022, 59(10): 489-503.
- [15] 吴嘉琪. 针对三维点云数据的语义分割网络设计与实现[D]. 大连:大连理工大学, 2020.
- WU J Q. Design and implementation of semantic segmentation network for 3D point cloud data[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2020.
- [16] 季元吉,赵荣欣,郑昊. 基于VR全景摄影的检测设计协同作业与数字化交付技术[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(9): 22-26, 101.
- JI Y J, ZHAO R X, ZHENG H. Detection design collaborative work and digital delivery technology based on VR panoramic photography[J]. Construction technology, 2023, 52(9): 22-26, 101.
- [17] 曹琳. 基于无人机倾斜摄影测量技术的三维建模及其精度分析[D]. 西安:西安科技大学, 2016.
- CAO L. 3D modeling and accuracy analysis based on tilt photogrammetry technology of UAV [D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2016.
- [18] 刘春,杨伟. 三维激光扫描对构筑物的采集和空间建模[J]. 工程勘察, 2006(4): 49-53.
- LIU C, YANG W. Acquisition and spatial modeling of structures by 3D laser scanning [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2006(4): 49-53.
- [19] 季元吉. VR全景摄影技术在既有建筑勘察中的应用研究[J]. 施工技术(中英文), 2023, 52(3): 31-34, 43.
- JI Y J. Research on the application of VR panoramic photography technology in investigation of existing buildings[J]. Construction technology, 2023, 52(3): 31-34, 43.
- [20] 刘洋. 无人机倾斜摄影测量影像处理与三维建模的研究[D]. 抚州:东华理工大学, 2016.
- LIU Y. Research on image processing and 3D modeling of UAV tilt photogrammetry [D]. Fuzhou: East China University of Technology, 2016.
- [21] 倪小磊,刁璇. 装配式建筑三维激光扫描重建技术[J]. 激光杂志, 2022, 43(9): 178-182.
- NI X L, DIAO X. 3D laser scanning reconstruction technology for prefabricated buildings [J]. Laser journal, 2022, 43(9): 178-182.
- [22] 鲁冬冬,邹进贵. 三维激光点云的降噪算法对比研究[J]. 测绘通报, 2019(S2): 102-105.
- LU D D, ZOU J G. Comparative study of noise reduction algorithms for 3D laser point cloud[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(S2): 102-105.
- [23] 李刘铁,朱煜峰. 基于混合滤波的点云数据降噪算法研究[J]. 江西科学, 2021, 39(3): 525-529, 533.
- LI L Y, ZHU Y F. Research on noise reduction algorithm of point cloud data based on hybrid filter [J]. Jiangxi science, 2021, 39(3): 525-529, 533.
- [24] 李云帆,谭德宝,刘瑞,等. 顾及建筑物屋顶结构的改进RANSAC点云分割算法[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(4): 20-25.
- LI Y F, TAN D B, LIU R, et al. Improved RANSAC point cloud segmentation algorithm considering building roof structure [J]. Remote sensing for natural resources, 2017, 29(4): 20-25.
- [25] 张冬冬,郭杰,陈阳. 基于深度学习的三维目标检测方法研究综述[J]. 机电工程技术, 2022, 51(4): 5-11.
- ZHANG D D, GUO J, CHEN Y. A review of 3D object detection methods based on deep learning [J]. Mechanical & electrical engineering technology, 2022, 51(4): 5-11.
- [26] 徐福斌,曲相屹,王健,等. 基于LiDAR点云的复杂钢结构模型重建[J]. 测绘通报, 2022(5): 170-173.
- XU F B, QU X Y, WANG J, et al. Complex steel structure model reconstruction based on LiDAR point cloud[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(5): 170-173.
- [27] 储立新,陶钧. 三维激光扫描技术在城市地下空间测量中的应用[J]. 测绘通报, 2018(5): 159-162.
- CHU L X, TAO J. Application of 3D laser scanning technology in urban underground space survey [J]. Bulletin of surveying and

mapping, 2018(5):159-162.

[28] 王仲锋,王渝,陈雷. 三维激光扫描技术在城市地下空间测量中的应用研究[J]. 测绘与空间地理信息,2017,40(5):1-4.
WANG Z F, WANG Y, CHEN L. Application of 3D laser scanning technology in urban underground space surveyp [J]. Geomatics & spatial information technology, 2017,40(5):1-4.

[29] 朱艳军,张国峰,张海峰. 三维扫描仪协同 GNSS-RTK 在复杂地形测量中的应用研究 [J]. 北京测绘, 2020, 34 (5): 718-723.
ZHU Y J, ZHANG G F, ZHANG H F. Application research of 3D scanner and GNSS-RTK in complex terrain survey [J]. Beijing surveying and mapping, 2020,34(5):718-723.

[30] 高绍伟,李长青,郑阔,等. 基于三维激光扫描技术的地下空间可视化分析 [J]. 北京工业职业技术学院学报,2018,17(4):1-5.
GAO S W, LI C Q, ZHENG K, et al. Visualization analysis of underground space based on 3D laser scanning technology [J]. Journal of Beijing Polytechnic College, 2018,17(4):1-5.

[31] 何江龙,李照永,侯至群,等. 便携式三维激光扫描技术在城市地下空间信息化中的应用研究[J]. 电子测量技术,2020,43(14):136-142.
HE J L, LI Z Y, HOU Z Q, et al. Research on application of portable 3D laser scanning technology in urban underground space informatization [J]. Electronic measurement technology, 2020,43(14):136-142.

[32] 苗亚哲,李胜波,邓安仲,等. 三维激光点云数据在既有地下人防工程 BIM 模型重建中的应用[J]. 测绘通报,2019(6):100-104.
MIAO Y Z, LI S B, DENG A Z, et al. Application of 3D laser point cloud data in BIM model reconstruction of existing underground civil air defense engineering [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(6):100-104.

[33] 王凯时,胡正伟,赵富燕. 三维激光扫描技术在地下空间三维建模中的应用[J]. 测绘地理信息,2020,45(3):78-80.
WANG K S, HU Z W, ZHAO F Y. Application of 3D laser scanning technology in 3D modeling of underground space [J]. Journal of geomatics, 2020,45(3):78-80.

[34] 谈珂威. 三维激光扫描技术在深基坑监测的应用研究[D]. 南京:东南大学,2018.
TAN K W. Application of 3D laser scanning technology in deep foundation pit monitoring [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[35] 许新海. 三维激光扫描技术在深基坑监测中的应用[J]. 城市勘测,2017(6):87-89.
XU X H. Application of 3D laser scanning technology in deep foundation pit monitoring [J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2017(6):87-89.

[36] 陈奕才,蔡庆军,蔡文浩,等. BIM+三维扫描技术在大型机场施工监测中的应用[J]. 施工技术(中英文),2022,51(17):45-47.
CHEN Y C, CAI Q J, CAI W H, et al. Application of BIM+ 3D scanning technology in construction monitoring of large airports [J]. Construction technology, 2022,51(17):45-47.

[37] 张健. 卢塞尔体育场 3D 扫描卸载监测方法研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(7):136-141.
ZHANG J. Research on 3D scanning unloading monitoring method of Lussel Stadium [J]. Construction technology, 2023,52(7):136-141.

[38] 杨兆龙,陈杰晖,郭简之. 三维激光扫描仪在基坑变形监测中的应用试验[J]. 现代测绘,2020,43(2):37-42.
YANG Z L, CHEN J H, GUO J Z. Application test of 3D laser scanner in deformation monitoring of foundation excavation [J]. Modern surveying and mapping, 2020,43(2):37-42.

[39] 葛纪坤,王升阳. 三维激光扫描监测基坑变形分析[J]. 测绘科学,2014,39(7):62-66.
GE J K, WANG S Y. Deformation analysis of foundation pit monitored by 3D laser scanning [J]. Science of surveying and mapping, 2014,39(7):62-66.

[40] 陆华庭. 基于三维激光扫描的隧道施工渗漏水监测系统[J]. 西部交通科技,2022(7):122-125.
LU H T. Water leakage monitoring system for tunnel construction based on 3D laser scanning [J]. Western China communications science & technology, 2022(7):122-125.

[41] 夏金周. 移动式三维激光扫描技术在地铁隧道变形监测中的应用研究[D]. 南京:东南大学,2019.
XIA J Z. Application of mobile 3D laser scanning technology in deformation monitoring of subway tunnel [D]. Nanjing:Southeast University, 2019.

[42] 程子聪. 三维激光扫描技术在矩形隧道管片变形监测中的应用[J]. 建筑施工,2017,39(9):1409-1411.
CHENG Z C. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of rectangular tunnel segments [J]. Building construction, 2017,39(9):1409-1411.

[43] 段清超,刘涛. 软岩隧道三维扫描变形监测技术的试验研究 [J]. 隧道建设(中英文),2019,39(S1):180-187.
DUAN Q C, LIU T. Experimental study on 3D scanning deformation monitoring technology of soft rock tunnel [J]. Tunnel construction, 2019,39(S1):180-187.

[44] 王令文,程效军,万程辉. 基于三维激光扫描技术的隧道检测技术研究[J]. 工程勘察,2013,41(7):53-57.
WANG L W, CHENG X J, WAN C H. Research on tunnel detection technology based on 3D laser scanning technology [J]. Geotechnical investigation & surveying,2013,41(7):53-57.

[45] 尹恒,封全宏,廖紫骅,等. 基于三维激光扫描技术的病害隧道监测[J]. 地下空间与工程学报,2014,10(4):895-901.
YIN H, FENG Q H, LIAO Z H, et al. Disease tunnel monitoring based on 3D laser scanning technology [J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2014,10(4):895-901.

[46] 刘燕萍,程效军,贾东峰. 基于三维激光扫描的隧道收敛分析 [J]. 工程勘察,2013,41(3):74-77.
LIU Y P, CHENG X J, JIA D F. Tunnel convergence analysis based on 3D laser scanning [J]. Geotechnical investigation & surveying, 2013,41(3):74-77.

[47] 关为民. 三维激光扫描技术在隧道施工应用中的新进展[J]. 铁道建筑技术,2021(8):111-115.

- GUAN W M. New progress of 3D laser scanning technology in tunnel construction[J]. Railway construction technology, 2021(8):111-115.
- [48] 宋云记,王智. 利用三维激光扫描技术进行地铁隧道施工质量管控及病害检测[J]. 测绘通报, 2020(5):150-154.
- SONG Y J, WANG Z. Quality control and disease detection of subway tunnel construction carried out by using 3D laser scanning technology[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020(5):150-154.
- [49] 师海. 三维激光扫描技术在施工隧道监测中的应用研究[D]. 北京:北京交通大学,2013.
- SHI H. Application of 3D laser scanning technology in tunnel monitoring under construction[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.
- [50] 赵亚波,王智. 基于移动三维扫描技术的隧道管片错台分析及应用[J]. 测绘通报, 2020(8):160-163.
- ZHAO Y B, WANG Z. Analysis and application of tunnel segment misalignment based on moving 3D scanning technology[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020(8):160-163.
- [51] LI P P, QIU W G, CHENG Y J, et al. Application of 3D laser scanning in underground station cavity clusters[J]. Advances in civil engineering, 2021:8896363.
- [52] ZHAO Y, ZHU Z, LIU W, et al. Application of 3D laser scanning on NATM tunnel deformation measurement during construction[J]. Acta geotechnica, 2023, 18(1):483-494.
- [53] 周志桦. 地面三维激光扫描技术在某变电站现状调查应用[J]. 福建建设科技, 2022(5):62-65.
- ZHOU Z H. Application of ground 3D laser scanning technology in investigation of a substation[J]. Fujian construction science & technology, 2022(5):62-65.
- [54] 陆华庭. 基于三维激光扫描的隧道施工渗漏水监测系统[J]. 西部交通科技, 2022(7):122-125.
- LU H T. Water leakage monitoring system for tunnel construction based on 3D laser scanning[J]. Western China communications science & technology, 2022(7):122-125.
- [55] 田云峰,祝连波. 基于三维激光扫描和 BIM 模型在桥梁施工阶段质量管理中的研究[J]. 建筑设计管理, 2014, 31(8):87-90.
- TIAN Y F, ZHU L B. Research on quality management of bridge construction phase based on 3D laser scanning and BIM model[J]. Architectural design management, 2014, 31(8):87-90.
- [56] 田鹏艳. 基于三维激光扫描技术的变形测量关键技术研究[D]. 淄博:山东理工大学,2018.
- TIAN P Y. Research on the key techniques of deformation measurement based on 3D laser scanning technology[D]. Zibo: Shandong University of Technology, 2018.
- [57] 李旭. 三维激光扫描技术在地铁隧道竣工测量中的应用[J]. 测绘通报, 2022(6):166-169.
- LI X. Application of three dimensional laser scanning technology in subway tunnel completion measurement[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(6):166-169.
- [58] 汪贵鹏. 三维激光扫描技术在公路隧道测量中的应用[J]. 技术与市场, 2022, 29(11):44-47, 51.
- WANG G P. Application of 3D laser scanning technology in highway tunnel survey[J]. Technology and market, 2022, 29(11):44-47, 51.
- [59] 王志明,刘天雪,宋萍萍,等. 三维激光扫描技术在基坑阶段实测量中的应用分析[J]. 建筑技术开发, 2022, 49(17):100-102.
- WANG Z M, LIU T X, SONG P P, et al. Application analysis of 3D laser scanning technology in the actual measurement of foundation pit[J]. Building technology development, 2022, 49(17):100-102.
- [60] 杨林. 三维激光扫描技术在建筑工程施工变形监测中的应用研究[D]. 天津:天津大学,2016.
- YANG L. Application of 3D laser scanning technology in deformation monitoring of construction engineering[J]. Tianjin: Tianjin University, 2016.
- [61] 廖维张,于欣洋,王彬,等. 纵肋叠合剪力墙三维激光扫描精度检测[J]. 土木工程与管理学报, 2022, 39(5):18-27.
- LIAO W Z, YU X Y, WANG B, et al. Three-dimensional laser scanning accuracy detection of longitudinal ribbed superimposed shear wall[J]. Journal of civil engineering and management, 2022, 39(5):18-27.
- [62] 刘欢佳,袁俭,钟易达. 三维激光扫描曲面结构点云安装复核技术在异形混凝土结构施工中的应用[J]. 城市建筑空间, 2022, 29(10):242-243.
- LIU H J, YUAN J, ZHONG Y D. Application of three-dimensional laser scanning point cloud installation review technology in construction of special-shaped concrete structures[J]. Urban architecture space, 2022, 29(10):242-243.
- [63] 杨雪皎,叶华,王章朋,等. 三维激光扫描技术的特异性建筑施工检测应用[J]. 测绘科学, 2020, 45(10):71-76, 91.
- YANG X J, YE H, WANG Z P, et al. Application of 3D laser scanning technology in specific construction inspection[J]. Science of surveying and mapping, 2020, 45(10):71-76, 91.
- [64] 李占东,张勤,叶旭,等. BIM 技术结合三维扫描在国家速滑馆工程质量管理中的应用[J]. 施工技术(中英文), 2022, 51(5):19-22, 28.
- LI Z D, ZHANG M, YE X, et al. Application of BIM technology combined with 3D scanning in engineering quality management of National Speed Skating Hall[J]. Construction technology, 2022, 51(5):19-22, 28.
- [65] CHAN B, GUAN H, HOU L, et al. Defining a conceptual framework for the integration of modelling and advanced imaging for improving the reliability and efficiency of bridge assessments[J]. Journal of civil structural health monitoring, 2016, 6(4):703-714.
- [66] LU C T, WANG L, YANG Z, et al. The application of laser-scanning-based BIM technology in large steel structure engineering for environmental protection[J]. Mathematical problems in engineering, 2022:4665141.
- [67] WANG J H, YI T Q, LIANG X, et al. Application of 3D laser scanning technology using laser radar system to error analysis in the curtain wall construction[J]. Remote sensing, 2022, 15(1):64-67.

[68]

刘卫,张立,郭洁,等. BIM 技术在机电综合管线安装工程中的应用[J]. 建筑节能(中英文),2021,49(1):145-150.
LIU W, ZHANG L, GUO J, et al. Application of BIM technology in electromechanical integrated pipeline installation project[J]. Building energy efficiency, 2021,49(1):145-150.

[69]

王代兵,杨红岩,邢亚飞,等. BIM 与三维激光扫描技术在天津周大福金融中心幕墙工程逆向施工中的应用[J]. 施工技术,2017,46(23):10-13.
WANG D B, YANG H Y, XING Y F, et al. Application of BIM and 3D laser scanning technology in reverse construction of curtain wall project of CTF Financial Center in Tianjin[J]. Construction technology, 2017,46(23):10-13.

[70]

朱思雨. 基于三维点云的室内工程施工进度跟踪研究[D]. 武汉:华中科技大学,2020.
ZHU S Y. Research on construction progress tracking of indoor engineering based on three-dimensional point cloud [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.

[71]

曹盈,余芳强,仇春华,等. 基于数字测绘的广州泰和肿瘤医院质子区高质量施工[J]. 中国医院建筑与装备,2021,22(11):68-73.
CAO Y, YU F Q, QIU C H, et al. High quality construction of proton area of Guangzhou Taihe Cancer Hospital based on digital mapping[J]. Chinese hospital architecture & equipment, 2021, 22(11):68-73.

[72]

倪明,罗会健,管磊,等. 三维激光扫描技术在大型足球场工程中的应用[J]. 钢结构(中英文),2022,37(12):24-30.
NI M, LUO H J, GUAN L, et al. Application of 3D laser scanning technology in large-scale football field engineering[J]. Steel construction(Chinese & English), 2022,37(12):24-30.

[73]

马彬,王有为. 三维扫描技术在复杂空间施工中的应用[J]. 居舍,2021(26):51-52.
MA B, WANG Y W. Application of 3D scanning technology in complex space construction[J]. Dwelling, 2021(26):51-52.

[74]

施俊杰. 装配化施工技术在机场空调机房中的应用[J]. 安装,2021(4):66-69.
SHI J J. Application of assembly construction technology in airport air conditioning room[J]. Installation, 2021(4):66-69.

[75]

赵泳. 基于 BIM 技术的某纪念馆机电精细化施工技术与管理方法[J]. 上海建设科技,2021(3):62-65.
ZHAO Y. Mechanical and electrical fine construction technology and management method of a memorial hall based on BIM technology [J]. Shanghai construction science & technology, 2021(3):62-65.

[76]

阚浩钟,闫振海,李湛,等. 基于 BIM 和三维激光扫描的钢管拱肋拼装检测技术[J]. 施工技术,2019,48(6):20-24.
KAN H Z, YAN Z H, LI Z, et al. Steel pipe arch rib assembly detection technology based on BIM and 3D laser scanning[J]. Construction technology, 2019,48(6):20-24.

[77]

包胜,叶翔,杨成,等. 基于三维激光扫描技术的管道安装偏差分析[J]. 施工技术(中英文),2022,51(20):118-122.
BAO S, YE X, YANG C, et al. Deviation analysis of pipeline installation based on 3D laser scanning technology [J]. Construction technology, 2022,51(20):118-122.

[78]

周永波,李秀海. 三维激光扫描技术在厂区密集架空管线数字化中的应用[J]. 测绘工程,2020,29(1):51-55.
ZHOU Y B, LI X H. Application of 3D laser scanning technology in digitization of dense overhead pipeline in factory [J]. Engineering of surveying and mapping, 2020,29(1):51-55.

[79]

刘辉,赵荣欣,龚治国. 地面三维激光扫描技术在既有空间网架结构测绘中的应用[J]. 施工技术(中英文),2021,50(21):28-31,126.
LIU H, ZHAO R X, GONG Z G. Application of ground 3D laser scanning technology in surveying and mapping of existing space grid structure[J]. Construction technology, 2021,50(21):28-31,126.

[80]

郑金锋,冯兰芳,吴阳,等. 基于三维激光扫描技术的建筑施工检测技术[J]. 机械研究与应用,2017,30(1):130-132.
ZHENG J F, FENG L F, WU Y, et al. Construction inspection technology based on 3D laser scanning technology [J]. Mechanical research & application, 2017,30(1):130-132.

[81]

王雯,阮磊雷. 基于三维激光扫描技术的焦炉炭化室炉墙平整度检测及应用[J]. 化工管理,2022(27):153-155.
WANG W, RUAN L L. Flatness test and application of coke oven charring chamber wall based on 3D laser scanning technology[J]. Chemical engineering management, 2022(27):153-155.

[82]

王俊瑶. 基于三维扫描和 BIM 技术的混凝土构件尺寸检测技术研究[D]. 重庆:重庆大学,2021.
WANG J Y. Research on dimension detection technology of concrete component based on 3D scanning and BIM technology [D]. Chongqing: Chongqing University, 2021.

[83]

徐科,徐旭. 结构复杂的体育馆施工测量控制技术[J]. 建筑施工,2017,39(10):1526-1527,1530.
XU K, XU X. Construction measurement and control technology of stadium with complex structure [J]. Building construction, 2017,39(10):1526-1527,1530.

[84]

徐炳前. 地面三维激光扫描在验收测量中的应用分析[J]. 城市勘测,2016(5):120-122,125.
XU B Q. Application analysis of ground 3D laser scanning in acceptance measurement[J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2016(5):120-122,125.

[85]

汪贵鹏. 三维激光扫描技术在公路隧道测量中的应用[J]. 技术与市场,2022,29(11):44-47,51.
WANG G P. Application of 3D laser scanning technology in highway tunnel survey [J]. Technology and market, 2022, 29(11):44-47,51.

[86]

钟伟华. 三维激光扫描技术在异型建筑验收测量中的应用[J]. 测绘地理信息,2022,47(5):62-65.
ZHONG W H. Application of 3D laser scanning technology in acceptance survey of special-shaped buildings [J]. Journal of geomatics, 2022,47(5):62-65.

[87]

赵馨怡,郭晓. 基于 BIM 和三维激光扫描技术的建设工程质量检测方法研究[J]. 土木建筑工程信息技术,2020,12(5):131-134.
ZHAO X Y, GUO X. Research on construction engineering quality inspection method based on BIM and 3D laser scanning

- technology [J]. Journal of information technology in civil engineering and architecture, 2020,12(5):131-134.
- [88] 王二民,郭际明,杨飞,等. 利用三维激光扫描技术检测建筑物平整度及垂直度[J]. 测绘通报,2019(6):85-88.
- WANG E M, GUO J M, YANG F, et al. Three-dimensional laser scanning technology to detect flatness and verticality of buildings[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(6):85-88.
- [89] 包胜,谢为时,叶翔,等. 基于三维激光扫描技术的墙面平整度评估方法[J]. 施工技术(中英文),2022,51(11):27-31.
- BAO S, XIE W S, YE X, et al. Evaluation method of wall roughness based on 3D laser scanning technology [J]. Construction technology, 2022,51(11):27-31.
- [90] 张训虎. 三维激光扫描在古建筑安全检测中的应用[J]. 测绘通报,2020(S1):155-158.
- ZHANG X H. Application of 3D laser scanning in safety inspection of ancient buildings[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2020(S1):155-158.
- [91] 王婷婷. 基于三维激光扫描技术的地表变形监测[D]. 青岛:山东科技大学,2011.
- WANG T T. Surface deformation monitoring based on 3D laser scanning technology [D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2011.
- [92] 乔学良,乔广宇,李明科,等. BIM+三维扫描技术在古建筑及文物复原方面的工程应用[J]. 四川建筑科学研究,2022,48(3):20-24.
- QIAO X L, QIAO G Y, LI M K, et al. BIM + 3D scanning technology in restoration of ancient buildings and cultural relics engineering application[J]. Sichuan building science, 2022,48(3):20-24.
- [93] 张维强. 地面三维激光扫描技术及其在古建筑测绘中的应用研究[D]. 西安:长安大学,2014.
- ZHANG W Q. Research on 3D ground laser scanning technology and its application in surveying and mapping of ancient buildings [D]. Xi'an: Changan University, 2014.
- [94] 韩东升. 古建筑三维重建与虚拟展示应用研究[D]. 鞍山:辽宁科技大学,2021.
- HAN D S. Research on application of three-dimensional reconstruction and virtual display of ancient buildings [D]. Anshan: University of Science and Technology Liaoning, 2021.
- [95] 李楠,方余铮,府伟娟,等. 基于三维激光扫描的历史建筑测绘应用研究[J]. 地理空间信息,2022,20(8):55-58,63.
- LI N, FANG Y Z, FU W J, et al. Application research of historical building surveying and mapping based on 3D laser scanning[J]. Geospatial information, 2022,20(8):55-58,63.
- [96] 何原荣,陈平,苏铮,等. 基于三维激光扫描与无人机倾斜摄影技术的古建筑重建[J]. 遥感技术与应用,2019,34(6):1343-1352.
- HE Y R, CHEN P, SU Z, et al. Reconstruction of ancient buildings based on 3D laser scanning and UAV oblique photography technology [J]. Remote sensing technology and application, 2019,34(6):1343-1352.
- [97] 曾维强,潘峰,石雨恒. 基于三维扫描的历史保护建筑模型快速重构技术[J]. 绿色建筑,2020,12(6):55-57.
- ZENG W Q, PAN F, SHI Y H. Rapid reconstruction technology of historical preservation building model based on 3D scanning [J]. Green building, 2020,12(6):55-57.
- [98] 高溪溪,周东明,崔维久. 三维激光扫描结合 BIM 技术的古建筑三维建模应用[J]. 测绘通报,2019(5):158-162.
- GAO X X, ZHOU D M, CUI W J. Application of 3D laser scanning combined with BIM technology in 3D modeling of ancient buildings[J]. Bulletin of surveying and mapping, 2019(5):158-162.
- [99] 孔令惠,陆德中,叶飞. 三维激光扫描技术在历史建筑立面测绘中的应用[J]. 测绘通报,2022(8):165-168,172.
- KONG L H, LU D Z, YE F. Application of 3D laser scanning technology in surveying and mapping of historical building facades [J]. Bulletin of surveying and mapping, 2022(8):165-168,172.
- [100] 王军. 地面三维激光扫描技术在古建筑测绘中的应用研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2018.
- WANG J. Application of ground 3D laser scanning technology in surveying and mapping of ancient buildings [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2018.
- [101] 索俊峰,刘勇,蒋志勇,等. 基于三维激光扫描点云数据的古建筑建模[J]. 测绘科学,2017,42(3):179-185.
- SUO J F, LIU Y, JIANG Z Y, et al. Modeling of ancient architecture based on 3D laser scanning point cloud data[J]. Science of surveying and mapping, 2017,42(3):179-185.
- [102] 钱正伟,孙雪梅,杨留方. 基于多种三维激光点云获取技术的历史建筑测绘研究[J]. 城市勘测,2021(5):130-133.
- QIAN Z W, SUN X M, YANG L F. Research on surveying and mapping of historical buildings based on multiple 3D laser point cloud acquisition techniques [J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2021(5):130-133.
- [103] 黄杰云. 关于在城市测量中三维激光扫描技术的实践研究[J]. 测绘与空间地理信息,2020,43(2):85-87.
- HUANG J Y. A practical study of 3D laser scanning technology in urban surveying [J]. Geomatics & spatial information technology, 2020,43(2):85-87.
- [104] 张世伟,王慧,姜楠,等. 三维激光扫描结合 BIM 技术在北京奕斯伟装修改造施工中的实践与应用[J]. 建设科技,2021(9):53-55,60.
- ZHANG S W, WANG H, JIANG N, et al. Practice and application of 3D laser scanning combined with BIM technology in renovation and renovation of Beijing Yiswei[J]. Construction science and technology, 2021(9):53-55,60.
- [105] 杨红军,郭威,孙进冬,等. 无人机倾斜摄影辅助三维激光扫描技术在厂房改造中的应用研究[J]. 城市勘测,2022(1):122-126.
- YANG H J, GUO W, SUN J D, et al. Research on application of 3D laser scanning technology assisted by UAV oblique photography in factory building renovation [J]. Urban geotechnical investigation & surveying, 2022(1):122-126.
- [106] 王Y, 陈Q, 朱Q, et al. A survey of mobile laser scanning applications and key techniques over urban areas[J]. Remote sensing, 2019(11):1540.