

地面三维激光扫描仪在建（构）筑物测量分析中的应用综述

杨凡, 范志伟, 温超, 李晓丽, 李志强, 齐文华

A review of application of terrestrial laser scanning in building seismic damage analysis

Yang Fan, Fan Zhiwei, Wen Chao, Li Xiaoli, Li Zhiqiang, and Qi Wenhua

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19987/j.dzqxjz.2022-167>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于机载LiDAR数据的建筑物震害识别特征参数研究

Study on earthquake damage identification feature parameters of buildings based on airborne LiDAR data

地震科学进展. 2019(4): 42-44

西藏米林 $M_s6.9$ 地震震害分析

Seismic hazard analysis of building structures for the Millin $M_s6.9$ earthquake, Tibet

地震科学进展. 2018(12): 2-9

安徽铜陵农村民居抗震性能普查与研究

Investigation on seismic performance of rural residential buildings in Tongling, Anhui

地震科学进展. 2020(1): 20-26

基于无人机影像的皮山地震极灾区烈度评估

Assessment of seismic intensity in the Pishan earthquake extreme disaster area based on UAV images

地震科学进展. 2020(3): 20-24

地震台站基础信息完善及应用分析

Analysis on the perfect and application of basic information of seismic stations

地震科学进展. 2021(9): 413-420

唐山古冶5.1级地震北京地区建筑结构地震反应观测记录初步分析

Preliminary analysis of the structural seismic response observation data in Beijing recorded in Guye earthquake with magnitude 5.1

地震科学进展. 2020(7): 20-25



关注微信公众号，获得更多资讯信息

杨凡, 范志伟, 温超, 等. 地面三维激光扫描仪在建(构)筑物测量分析中的应用综述 [J]. 地震科学进展, 2023, 53(7): 289-295. doi:10.19987/j.dzcxjz.2022-167

Yang F, Fan Z W, Wen C, et al. A review of application of terrestrial laser scanning in building seismic damage analysis[J]. Progress in Earthquake Sciences, 2023, 53(7): 289-295. doi:10.19987/j.dzcxjz.2022-167

综述与评述

地面三维激光扫描仪在建(构)筑物 测量分析中的应用综述*

杨 凡^{1,2,3)*} 范志伟^{1,2)} 温 超^{1,2)} 李晓丽⁴⁾ 李志强⁴⁾ 齐文华³⁾

1) 河北红山巨厚沉积与地震灾害国家野外科学观测研究站, 河北邢台 055350

2) 河北省地震局, 河北石家庄 050021

3) 中国地震局地质研究所, 北京 100029

4) 中国地震台网中心, 北京 100045

摘要 地面三维激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanning, TLS)作为新兴的一门技术,逐渐被应用到测量等各个领域,是获取地物目标LiDAR(Light Detection and Ranging)高精度数据的主要途径。TLS能够探测到建(构)筑物更多细节方面的信息,主要包括建筑物结构的变形和损伤(包括建筑物墙体的剪切开裂、墙面脱落及承重构件的损伤),同时可以获得诸如墙体倾斜、裂缝空间分布、体积和位置变化计算等更多的测量数据。TLS高精度数据的获取为提取变形较小、肉眼无法识别的破坏特征提供了技术帮助。本研究回顾总结了TLS在建筑物变形监测、三维建模、数据分析方法和建筑物震害损失分析方面的研究。在文献回顾和深入讨论后,提出了TLS在建筑物震害分析中未来的研究方向。

关键词 地面三维激光扫描仪; LiDAR; 建筑物; 地震震害

中图分类号: P225.2; TU198 文献标识码: A 文章编号: 2096-7780(2023)07-0289-07

doi: 10.19987/j.dzcxjz.2022-167

A review of application of terrestrial laser scanning in building seismic damage analysis

Yang Fan^{1,2,3)*}, Fan Zhiwei^{1,2)}, Wen Chao^{1,2)}, Li Xiaoli⁴⁾, Li Zhiqiang⁴⁾, Qi Wenhua³⁾

1) Hebei Hongshan National Observatory on Thick Sediments and Seismic Hazards, Hebei Xingtai 055350, China

2) Hebei Earthquake Agency, Hebei Shijiazhuang 050021, China

3) Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China

4) China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China

* 收稿日期: 2022-11-17; 采用日期: 2022-12-26。

基金项目: 河北省地震科技星火计划项目(DZ2021120300001)和国家自然科学基金(41907397)联合资助。

* 通信作者: 杨凡(1986-), 男, 高级工程师, 主要从事地震应急、遥感应用、地震灾害等方面研究。E-mail: yangfan1182@126.com。



Abstract Terrestrial Laser Scanning (TLS), as an emerging technology, is gradually being applied to various fields such as surveying, and it is the main way to obtain LiDAR high-precision data for ground-based targets. TLS can detect more detailed information about the building, mainly including deformation and damage of the building structure (including shear cracking of the building walls, wall shedding and damage of load-bearing elements), and it can obtain more measurement data such as wall tilt, spatial distribution of cracks, volume and position change calculation, etc. The acquisition of TLS high-precision data provides technical assistance for extracting damage features that are less deformed and cannot be identified by the naked eye. This study reviews and summarizes the research of TLS in building deformation monitoring, 3D modeling, data analysis methods and building ballast loss analysis. After the literature review and in-depth discussion, future research directions of TLS in seismic analysis of buildings are proposed.

Keywords TLS; LiDAR; building; seismic damage

引言

LiDAR(Light Detection and Ranging)又称为激光雷达或激光测距仪,该技术的兴起开始于20世纪70年代后期,是近几十年来快速发展的一种新型测量技术,它可直接获取目标物的三维坐标,从而实现对目标物信息的提取和三维场景的建模,已经广泛应用到各个行业,其具有的分辨率高、抗干扰能力强、低空探测性能好等优点,为其广泛的应用前景提供了保障。LiDAR基于搭载平台的不同,激光雷达可分为星载激光雷达、机载激光雷达、车载激光雷达和地面激光雷达^[1]。

随着科学技术的发展,激光雷达(LiDAR)技术在20世纪80年代快速发展(图1),地面三维激光扫描仪(Terrestrial Laser Scanning, TLS)作为新兴的一门技术,逐渐被应用到测量等各个领域,是获取地物

目标LiDAR高精度数据的主要途径。TLS是一种利用激光反射信号进行量测的新型传感技术,它可以通过发射和接收激光光束测量目标与扫描仪之间的距离,并通过激光光束发射时扫描仪的姿态角计算目标表面所有采样点的三维坐标。与传统的遥感技术相比,三维激光扫描技术具有准确、快速、实时获取目标地物表面真实形状数据的能力。由于其基于主动式的测量方式,不依赖于可见光,具有更加灵活的作业方式^[2-3]。与机载LiDAR相比,TLS能够探测到建(构)筑物更多细节方面的信息,主要包括建筑物结构的变形和损伤(包括建筑物墙体的剪切开裂、墙面脱落及承重构件的损伤),同时可以获得诸如墙体倾斜、裂缝空间分布、体积和位置变化计算等更多的测量数据。TLS高精度数据的获取为提取偏差较小、肉眼无法识别的破坏特征提供了技术帮助^[4]。

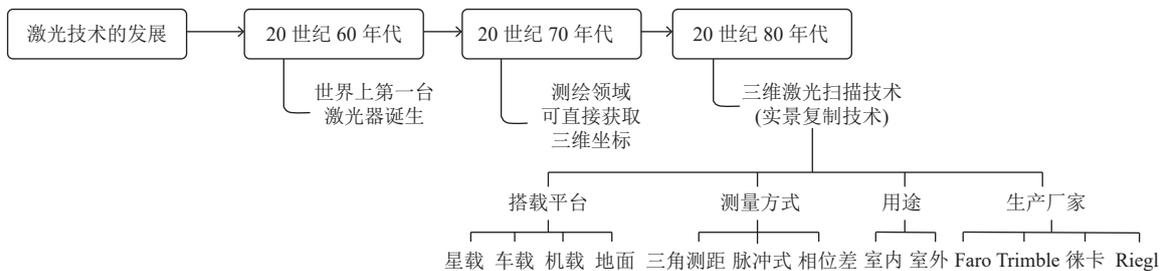


图1 激光技术发展

Fig. 1 Development of laser technology

近些年来,地面激光扫描技术在三维建模、文物保护、变形监测、森林结构调查、建筑物几何质量评估等不同领域得到广泛应用^[5]。地面摄影测量被证明是一种准确的地震损害快速评估方法^[6],利用TLS扫描震后建筑物获取三维点云数据,快速提取建筑物震害信息能够为震后的应急救援和损失评估提供技术支撑和科学保障。该应用的一个重要扩展功能

是在地震后使用TLS扫描看似安全的建筑物,以确保不存在视觉上可能无法检测到的重大变形^[7]。利用三维激光扫描仪对建(构)筑物进行扫描,不仅可以获得建(构)筑物高精度平面数据信息,同时还能获取建(构)筑物垂直于平面的变形信息,为震后建(构)筑物的震害等级定量分析提供了高精度数据支撑,提高了建(构)筑物中肉眼难辨的倾斜和变形识

别认知度及震害信息的判别精度,尤其是地震现场科考过程中对基本完好、轻微破坏建筑物识别判定模糊的问题和震后建筑物的安全隐患问题^[8]。

1 地面三维激光扫描仪的应用

1.1 在 LiDAR 点云数据信息提取方法方面

沈蔚等^[9]和王大莹等^[10]将“Alpha Shapes 算法”应用于建筑物 LiDAR 数据轮廓线提取与规则化,实践证明了该算法在 LiDAR 点云数据提取建筑轮廓线方面的精准性。Makuch 和 Gawronek^[2]提出了基于三维激光扫描仪数据利用 PCA 分析和区域增长算法进行自动检测的方案,提高了建筑物外立面测量的精度和工作效率,为局部表面修复的几何特征分析提供参考依据。孟涛等^[11]提出了基于曲线内插法对点云空洞修补的方法。朱滨等^[12]基于 PCA 算法计算分析点云数据的法向量,实现建筑物点云里面边界的提取。周强等^[13]基于全局平面拟合结果,使用边缘系数方法提取古陶瓷片的边缘轮廓。廖中等^[14]提出了调节滚动圆半径的 Alpha-Shapes 平面点云边界提取算法。Nasrollahi 等^[15]基于 LiDAR 数据的深度神经网络分析三维点集,用于检测混凝土表面缺陷。Mohammadi 等^[16]利用深度学习的方法结合三维点云数据的几何、颜色等特点定量评估目标物在飓风破坏后的灾损情况。卢凌雯和梁栋栋^[17]针对不同尺度三维点云数据,提出了一种基于 PCL 不同尺度下最优顺序组合的点云滤波去噪方法。陈茂霖^[18]通过对地面 LiDAR 原始点云数据的索引、拼接及建筑物提取分析,实现建筑物平面分割与重构。Saraf 等^[19]基于地面 LiDAR 数据构建建筑物数字表面模型(DSM),并对模型中提取的建筑物进行准确性评价。为了解决 LiDAR 点云提取复杂建筑物屋顶面不完整和阈值设置的问题,赵传等^[20]建立了结合点云空间分布的法向量密度聚类提取屋顶面点云的研究方法。针对地面 LiDAR 点云冗余数据影响,陈朋等^[21]提出建筑物点云特征线提取方法,用于点云数据特征信息的提取。为了解决多视点立体和密集匹配算法的局限性,Shao 等^[22]提出了一种基于低空遥感影像的新型多视角密集点云生成算法。

1.2 在建筑物几何质量评估和变形监测方面

利用 TLS 对建筑物结构构件损坏的持续监测与分析实验,证明了它在结构建模和分析应用方面的有效性^[23-24]。利用 TLS 获取的高精度数据结合最小二乘法应用于建筑物平面规整度的质量评价^[25]。刘

兴奇^[26]基于地面三维激光扫描技术进行逆向建模,对墙体垂直度和整体倾斜度进行检测。赵兴友^[27]通过三维激光扫描仪在建筑物立面测绘精度实例分析,验证了三维激光扫描仪在建筑物立面检测中的可行性。罗奎等^[28]采用 Leica P40 地面三维激光扫描仪对塔式建筑物分期采集,对两期数据进行模型拟合和点位差异分析,实现对塔式建筑物的变形监测。《混凝土结构工程施工质量验收规范》(GB 50204—2015)为混凝土结构工程施工质量验收提供了统一的技术要求和技术指标^[29]。《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011)为砌体结构工程施工质量验收提供了统一的技术要求和技术指标^[30]。Kim 等^[31]利用三维激光扫描仪收集预制混凝土构建数据,开展目标物几何质量检测研究,并证明了其可行性。Sun 等^[32]为了解决三维激光扫描仪在变形监测领域缺乏适用的分析方法,提出了一种基于点云法向量提取基准特征和分析变形的的方法。Tang 等^[33]回顾了从激光扫描的点云数据自动重建已建 BIM 模型的相关技术。Pătrăucean 等^[34]回顾了关于已建 BIM 模型重建的最先进的研究工作,特别是侧重于从点云数据对建筑元素的几何形状进行建模。Lu 和 Lee^[35]回顾了基于图像的 BIM 模型重建的方法。Son 等^[36]回顾了点云数据在两个具体应用中的使用,包括生产监控和民用基础设施的自动布局。Ma 和 Liu^[37]介绍了土木工程中的三维重建技术及其应用。Ray 和 Teizer^[38]获得了建筑设备的点云数据,以计算建筑设备的盲点图,并进一步设计更安全的建筑设备。Cheng 和 Teizer^[39]根据点云数据生成了施工现场资源的三维模型,并在 VR 环境下基于模型进行了安全隐患模拟。Fang 等^[40]提出了一个框架,利用从点云数据生成的建筑工地三维模型来协助基于 VR 的移动起重机吊装作业。

1.3 在三维建模和文物保护方面

利用 TLS 对古建筑扫描评估和三维建模,为古建筑的保护和维修提出了有效解决方案^[41]。基于三维建模的三维形状特征测量方法,评估震后建筑物破坏程度^[7]。基于三角网不规则模型,利用 LiDAR 数据和 GIS 对建筑物进行三维建模,实现震后建筑物损失评估和灾难场景构建^[42]。Xu 等^[43]基于地面三维激光扫描仪点云数据的高精度 B-Spline 优化模型,结合有限元分析对拱形建筑进行裂缝区域预测。Antón 等^[44]利用地面激光扫描数据对考古群进行三维建模,并通过有限元方法对结构破坏区域进行静

态和模态分析。Russhakim等^[45]通过对比分析地面三维激光扫描仪和手持移动激光扫描仪(MLS)的数据精度,证明了地面三维激光扫描仪的数据精度高于MLS。Antón等^[46]利用点云数据和BIM工具对创建历史建筑物信息模型(HBIM)的三维建模精度进行了分析。Yang等^[47]利用TLS获取的混凝土复合结构高精度数据,对拱形结构建筑物进行测量,介绍了原始和优化点云提取方法的不同。为了解决历史建筑物三维重建的精度高和部件信息数量多的问题,李敏珍等^[48]提出TLS高精度数据精细化模型重建的方法,实现模型的部件化管理。

1.4 在震后建筑物的损失分析方面

地震发生后建筑物震害分布图有助于救援人员更好的开展救援行动,为了从LiDAR数据中快速提取建筑物震害数据,判定建筑物的震害等级,有必要了解LiDAR数据特征和分类器的有效性。Jiao等^[49]和Jiang等^[50]提出了基于地面LiDAR数据的建筑物形状分析模型,有效解决了建筑物等高多边形序列提取、形状离散参数提取、不规则建筑物区块分割与震害分析等问题。在震后建筑物墙体裂缝提取方面,Jiang等^[50]采用平面三角剖分建模方法构建三角形不规则网络数据集,基于裂缝宽度的反距离加权点云光栅化方法生成栅格曲面,根据裂缝的形状特征提取相关信息。崔驿宁等^[51]通过3D点云深度学习的方法建立单体建筑物震害分类识别和震后点云场景分割模型,进行建筑物震害信息提取。Zhang等^[52]提出了基于扩张卷积的全卷积网络用于混凝土裂缝检测。Liao等^[53]基于地面激光雷达扫描数据结合有限元模型分析预测建筑物的抗震性能。Vasilakos等^[6]将地面摄影测量数据与激光扫描仪的点云数据进行对比分析,验证了地面摄影测量在震后快速损失评估中的可行性。Turkan等^[54]提出了一种基于自适应小波神经网络的方法将TLS数据压缩成低分辨率和高分辨率的组合,实现自动检测混凝土裂缝和其他形式的损坏。Rastiveis等^[55]提出一种基于对象的方法,利用LiDAR数据绘制地震后的破坏性建筑。Puente等^[56]提出了一种基于拟合平面与点云距离的方法,用于监测建筑物LiDAR数据的渐进式破坏。Yang等^[8]利用地面LiDAR数据的高精度特点,结合Alpha shapes算法创建了三角网矢量模型(TIN-shape modle),解决了震后建筑物破坏特征提取偏差较小、肉眼无法识别的问题。Janalipour和Mohammadzadeh^[57]研究了基于LiDAR数据的3种纹理提取方法和3种

模糊系统用于建立建筑物破坏图。为解决震后机载LiDAR数据对建筑物结构破坏的判定,He等^[58]提出单个屋顶的三维形状描述法,通过识别完整屋顶的紧凑和规则的轮廓以及受损屋顶的锯齿状和不规则的轮廓的空间模式来检测有表面损伤的屋顶和表现出结构损伤的屋顶。Pellegrinelli等^[59]利用TLS和水准仪两种方法对意大利震后历史建筑斜塔进行监测对比,证明了两种方法在建筑物变形中应用的可行性。

2 对未来研究的建议

地面三维激光扫描仪在城镇建筑物震害损失评估应用方面,通过持续采集震前震后建筑物数据进行三维建模对比分析,实现建筑物震害信息的快速提取和震害等级判定,但是在数据采集方面存在一定的局限性。基于地面LiDAR数据高精度特点,对建筑物震害信息的提取与分析,解决了倾斜、鼓包、外闪等特征在震害等级轻微破坏和中等破坏判定模糊的问题。

在中国农村,居民自建房屋结构类型、几何形状、建筑材料的随机性和自定义性较强,震后损坏建筑物震害信息提取变得更加复杂,这是影响建筑物震害等级定量分析方法在地震应急中实用化推广的最根本原因。探讨不同结构类型建筑物不同承重构件的震害特征和信息检测提取方法,将是未来地震现场工作建(构)筑物震害等级划分和安全鉴定的一个研究内容。

低成本地面LiDAR数据采集设备的面世投产为后期推广应用奠定了基础,但其采集数据精度是否满足建筑物震害信息定量分析要求,有待进一步验证。

目前数据采集设备多样化,红外设备也具有建筑物数据采集的功能,该设备采集的建筑物震害信息数据与地面LiDAR点云数据之间存在怎样的对应关系,是否满足建筑物震害信息定量分析的要求,有待进一步研究。

3 结论

本文回顾了地面三维激光扫描仪在建筑物变形监测、震害信息提取等方面的研究,从广泛认可的期刊收集整理了相关研究论文,并对论文的研究内容进行了分类和总结,包括LiDAR数据提取方法、分析方法、模型构建等。为研究基于地面三维激光扫描仪在建筑物震害信息提取分析的相关人员提供了重要参考。

本研究总结了 TLS 在建(构)筑物变形监测、数据分析方法、震害信息提取等方面的先进算法和技术,但仍然存在局限性。在研究文献收集整理过程中未对建筑物结构类型进行细化分类。需要在后期研究中对不同结构类型建筑物的安全鉴定进行有针对性研究。

参考文献

- [1] 窦爱霞. 基于机载 LiDAR 数据的建筑物震害识别特征参数研究 [D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2018
Dou A X. Study on earthquake damage identification feature parameters of building based on airborne LiDAR data[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration, 2018
- [2] Makuch M, Gawronek P. 3D point cloud analysis for damage detection on hyperboloid cooling tower shells[J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1542
- [3] Markiewicz J, Lapiński L, Kot P, et al. The quality assessment of different geolocalisation methods for a sensor system to monitor structural health of monumental objects[J]. Sensors, 2020, 20(10): 2915
- [4] Yang F, Fan Z W, Wen C, et al. Three-dimensional point cloud analysis for building seismic damage information[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2022, 88(2): 103-111
- [5] 李瑞雪. 基于地面 LiDAR 数据的建筑物立面识别及提取研究 [D]. 赣州: 江西理工大学, 2019
Li R X. Research on building facade recognition and extraction based research on terrestrial LiDAR data[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2019
- [6] Vasilakos C, Chatzistamatis S, Roussou O, et al. Terrestrial photogrammetry vs laser scanning for rapid earthquake damage assessment[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-3/W4: 527-533
- [7] Liu W, Dong P L, Liu J B, et al. Evaluation of three-dimensional shape signatures for automated assessment of post-earthquake building damage[J]. Earthquake Spectra, 2013, 29(3): 897-910
- [8] Yang F, Wen X T, Wang X S, et al. A model study of building seismic damage information extraction and analysis on ground-based LiDAR data[J]. Advances in Civil Engineering, 2021(5): 1-14
- [9] 沈蔚, 李京, 陈云浩, 等. 基于 LIDAR 数据的建筑轮廓线提取及规则化算法研究 [J]. 遥感学报, 2008, 12(5): 692-698
Shen W, Li J, Chen Y H, et al. Algorithms study of building boundary extraction and normalization based on LIDAR data[J]. Journal of Remote Sensing, 2008, 12(5): 692-698
- [10] 王大莹, 程新文, 郑艳丽, 等. 在 Matlab 平台下基于形态学方法对 LIDAR 数据进行建筑物边缘提取 [J]. 测绘科学, 2010, 35(1): 172-173, 92
Wang D Y, Cheng X W, Zheng Y L, et al. Mathematic morphology-based building edge detection under Matlab platform[J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(1): 172-173, 92
- [11] 孟涛, 王轲, 任峰, 等. 基于曲线内插法的点云空洞修补应用研究 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(11): 173-175
Meng T, Wang K, Ren F, et al. Research on the application of point-cloud holes' repair algorithm based on curve interpolation method[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(11): 173-175
- [12] 朱滨, 程小龙, 刘绍龙, 等. 基于 PCA 法估计的建筑点云立面边界提取 [J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 38-40
Zhu B, Cheng X L, Liu S L, et al. Building point cloud elevation boundary extraction based on PCA normal vector estimation[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 38-40
- [13] 周强, 张敏, 李巍, 等. 基于点云数据的古陶瓷碎片边缘轮廓提取技术 [J]. 陕西科技大学学报, 2021, 39(6): 174-181
Zhou Q, Zhang M, Li W, et al. Edge contour extraction of ancient ceramic fragments based on point cloud data[J]. Journal of Shaanxi University of Science & Technology, 2021, 39(6): 174-181
- [14] 廖中平, 陈立, 白慧鹏, 等. 自适应 α -shapes 平面点云边界提取方法 [J]. 长沙理工大学学报(自然科学版), 2019, 16(2): 15-21
Liao Z P, Chen L, Bai H P, et al. Adaptive Alpha shapes plane point cloud boundary extraction method[J]. Journal of Changsha University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 16(2): 15-21
- [15] Nasrollahi M, Bolourian N, Hammad A. Concrete surface defect detection using deep neural network based on LiDAR scanning[C]// (CSCE 2019) 7th International Construction Conference jointly with the construction research congress (CRC 2019). Laval, QC: CSCE Annual Conference, 2019: CON032
- [16] Mohammadi M E, Watson D, Wood R. Deep learning-based damage detection from aerial SfM point clouds[J]. Drones, 2019,

- 3(3): 68
- [17] 卢凌雯, 梁栋栋. 点云数据多种滤波方式组合优化研究[J]. 安徽师范大学学报(自然科学版), 2018, 41(1): 50-54
Lu L W, Liang D D. Research on combining optimization of various filtering methods for point cloud data[J]. Journal of Anhui Normal University (Natural Science), 2018, 41(1): 50-54
- [18] 陈茂霖. 面向多测站地面三维激光扫描数据的建筑物提取与几何重构[D]. 武汉: 武汉大学, 2018
Chen M L. Building extraction and 3D reconstruction of multi-scan terrestrial laser scanning data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018
- [19] Saraf N, Hamid J, Halim M, et al. Accuracy assessment of 3-dimensional LiDAR building extraction[C]//2018 IEEE 14th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA). Penang, Malaysia: IEEE, 2018: 261-266
- [20] 赵传, 张保明, 郭海涛, 等. 基于法向量密度聚类的LiDAR点云屋顶面提取[J]. 测绘科学技术学报, 2017, 34(4): 393-398
Zhao C, Zhang B M, Guo H T, et al. Roof extraction using LiDAR point clouds based on normal vector density-based clustering[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 2017, 34(4): 393-398
- [21] 陈朋, 谭晔汶, 李亮. 地面三维激光扫描建筑物点云特征线提取[J]. 激光杂志, 2016, 37(3): 9-11
Chen P, Tan Y W, Li L. Extraction of building's feature lines based on 3-D terrestrial laser scanning[J]. Laser Journal, 2016, 37(3): 9-11
- [22] Shao Z F, Yang N, Xiao X W, et al. A multi-view dense point cloud generation algorithm based on low-altitude remote sensing images[J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 381
- [23] Olsen M J, Kuester F, Chang B, et al. Terrestrial laser scanning-based structural damage assessment[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2010, 24(3): 264-272
- [24] Ziółkowski P. Remote sensing in laboratory diagnostics of reinforced concrete elements-current development and vision for the future[C]//The IRES 8th International Conference on Engineering and Natural Science, 30th Aug. 2015, London, United Kingdom, 2015: 978-93-85465-83-3
- [25] Li D S, Liu J P, Feng L, et al. Terrestrial laser scanning assisted flatness quality assessment for two different types of concrete surfaces[J]. Measurement, 2020, 154(3): 107436
- [26] 刘兴奇. 地面三维激光扫描仪在建筑物检测中的应用研究[D]. 北京: 北京建筑大学, 2021
Liu X Q. Application of ground 3D laser scanner in building inspection[D]. Beijing: Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2021
- [27] 赵兴友. 三维激光扫描仪在建筑立面测绘中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(增刊1): 206-212
Zhao X Y. Application of 3D laser scanner in building elevation surveying and mapping[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(S1): 206-212
- [28] 罗奎, 王云川, 段平, 等. 基于地面三维激光扫描仪的塔式建筑物变形监测研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2021, 44(6): 76-78, 83
Luo K, Wang Y C, Duan P, et al. Research on deformation monitoring of tower building based on ground 3D laser scanner[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2021, 44(6): 76-78, 83
- [29] 中国建筑科学研究院. 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015
China Academy of Building Research. Code for acceptance of constructional quality of concrete structures: GB 50204—2015[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015
- [30] 陕西省住房和城乡建设厅. 砌体结构工程施工质量验收规范: GB 50203—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011
Shaanxi Department of Housing and Urban-Rural Development. Code for acceptance of constructional quality of masonry structures: GB 50203—2011[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011
- [31] Kim M, Wang Q, Yoon S, et al. A mirror-aided laser scanning system for geometric quality inspection of side surfaces of precast concrete elements[J]. Measurement, 2019, 141: 420-428
- [32] Sun W, Wang J, Jin F, et al. Datum feature extraction and deformation analysis method based on normal vector of point cloud[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2018, XLII-3: 1601-1606
- [33] Tang P, Huber D, Akinci B, et al. Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques[J]. Automation in Construction, 2010, 19(7): 829-843
- [34] Pătrăucean V, Armeni I, Nahangi M, et al. State of research in automatic as-built modelling[J]. Advanced Engineering Informatics, 2015, 29(2): 162-171
- [35] Lu Q, Lee S. Image-based technologies for constructing as-is building information models for existing buildings[J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(4): 04017005
- [36] Son H, Bosché F, Kim C. As-built data acquisition and its use in production monitoring and automated layout of civil infrastructure:

- A survey[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2015, 29(2): 172-183
- [37] Ma Z, Liu S. A review of 3D reconstruction techniques in civil engineering and their applications[J]. *Advanced Engineering Informatics*, 2018, 37: 163-174
- [38] Ray S J, Teizer J. Computing 3D blind spots of construction equipment: Implementation and evaluation of an automated measurement and visualization method utilizing range point cloud data[J]. *Automation in Construction*, 2013, 36: 95-107
- [39] Cheng T, Teizer J. Real-time resource location data collection and visualization technology for construction safety and activity monitoring applications[J]. *Automation in Construction*, 2013, 34: 3-15
- [40] Fang Y, Cho Y K, Chen J. A framework for real-time pro-active safety assistance for mobile crane lifting operations[J]. *Automation in Construction*, 2016, 72: 367-379
- [41] Nowak R, Orłowicz R, Rutkowski R. Use of tfs (LiDAR) for building diagnostics with the example of a historic building in karlino[J]. *Buildings*, 2020, 10(2): 24
- [42] Dong P L, Guo H D. A framework for automated assessment of post-earthquake building damage using geospatial data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2012, 33(1): 81-100
- [43] Xu W, Xu X Y, Yang H, et al. Optimized finite element analysis model based on terrestrial laser scanning data[J]. *Composite Structures*, 2019, 207: 62-71
- [44] Antón D, Pineda P, Medjdoub B, et al. As-built 3D heritage city modelling to support numerical structural analysis: Application to the assessment of an archaeological remain[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11: 1276
- [45] Russhakim N A S, Ariff M F M, Darwin N, et al. The suitability of terrestrial laser scanning for strata building[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-4/W9: 67-76
- [46] Antón D, Medjdoub B, Shrahily R, et al. Accuracy evaluation of the semi-automatic 3D modeling for historical building information models[J]. *International Journal of Architectural Heritage*, 2018, 12(5): 790-805
- [47] Yang H, Omidalizarandi M, Xu X Y, et al. Terrestrial laser scanning technology for deformation monitoring and surface modeling of arch structures[J]. *Composite Structures*, 2016, 169(5): 173-179
- [48] 李敏珍, 刘春, 周源. 激光扫描历史建筑精细化重建与部件化管理[J]. *遥感信息*, 2015, 30(6): 18-23
Li M Z, Liu C, Zhou Y. Historical accurate 3D reconstruction and hierarchical componentize management using terrestrial laser scanning[J]. *Remote Sensing Information*, 2015, 30(6): 18-23
- [49] Jiao Q S, Jiang H B, Li Q. Building earthquake damage analysis using terrestrial laser scanning data[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2019: 8308104
- [50] Jiang H B, Li Q, Jiao Q S, et al. Extraction of wall cracks on earthquake-damaged buildings based on tfs point clouds[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2018, 11(9): 3088-3096
- [51] 崔驿宁. 基于3D深度学习的LiDAR建筑物震害信息提取[D]. 北京: 中国地震局地震预测研究所, 2021
Cui Y N. Seismic damage information extraction of LiDAR building based on 3D deep learning[D]. Beijing: Institute of Earthquake Forecasting, China Earthquake Administration, 2021
- [52] Zhang J M, Lu C Q, Wang J, et al. Concrete cracks detection based on fcn with dilated convolution[J]. *Applied Sciences*, 2019, 9(13): 2686
- [53] Liao Y J, Wood R, Mohammadi M E, et al. Damage assessment of a sixteen story building following the 2017 central mexico earthquake[J]. *Civil Engineering Faculty Publications*, 2019: 157
- [54] Turkan Y, Hong J, Laflamme S, et al. Adaptive wavelet neural network for terrestrial laser scanner-based crack detection[J]. *Automation in Construction*, 2018, 94: 191-202
- [55] Rastiveis H, Khodaverdi N, Jouybari A. Object-oriented classification of lidar data for post-earthquake damage detection[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-3/W4: 421-427
- [56] Puente I, Lindenbergh R, Van Natijne A, et al. Monitoring of progressive damage in buildings using laser scan data[J]. *ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2018, XLII-2: 923-929
- [57] Janalipour M, Mohammadzadeh A. Evaluation of effectiveness of three fuzzy systems and three texture extraction methods for building damage detection from post-event LiDAR data[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2018, 11(12): 1241-1268
- [58] He M Z, Zhu Q, Du Z Q, et al. A 3D shape descriptor based on contour clusters for damaged roof detection using airborne LiDAR point clouds[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 189
- [59] Pellegrinelli A, Furini A, Russo P. Earthquakes and ancient leaning towers: Geodetic monitoring of the bell tower of San Benedetto Church in Ferrara (Italy) [J]. *Journal of Cultural Heritage*, 2014, 15(6): 687-691