

杨凡,温超,范志伟,等. 2024. 四川芦山地区农村典型民居 LiDAR 点云背景值分析[J]. 地震研究, 47(4): 579–587, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0044.

Yang F, Wen C, Fan Z W, et al. 2024. Analysis of the LiDAR point cloud background values of the typical, rural, residential houses in Lushan, Sichuan Province [J]. *Journal of Seismological Research*, 47(4): 579–587, doi: 10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0044.

# 四川芦山地区农村典型民居 LiDAR 点云背景值分析\*

杨凡<sup>1,2,3</sup>, 温超<sup>2</sup>, 范志伟<sup>2</sup>, 刘晓丹<sup>2</sup>, 李晓丽<sup>4</sup>, 李志强<sup>4</sup>, 王晓山<sup>1,2,4</sup>

(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:** 使用地基三维激光扫描仪, 采集了 2013 年四川芦山 7.0 级地震灾区农村典型民居基本完好砌体建筑物 140 个独立墙面的高精度 LiDAR 点云数据。根据标准差原理, 采用统计回归分析方法, 对 LiDAR 数据进行了处理, 分析和验证 LiDAR 点云数据背景值区间。结果表明: 芦山地区农村典型民居砌体结构建筑物墙面的 LiDAR 点云数据背景值区间为 0~0.45 cm, 并证实其合理性。

**关键词:** LiDAR; 点云; 背景值; 典型民居; 砌体建筑; 芦山 7.0 级地震

**中图分类号:** P315.94

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000–0666(2024)04–0579–09

doi:10. 20015/j. cnki. ISSN1000–0666. 2024. 0044

## 0 引言

激光雷达或激光测距仪 (Light Detection and Ranging, 简称 LiDAR), 是近年快速发展的一种主动测量技术。地基激光雷达 (Terrestrial Laser Scanning, 简称 TLS) 作为一种地面 LiDAR 技术, 结合了扫描机制、激光测距系统和记录系统来重构地物三维结构。近年来, 地面 LiDAR 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领域得到广泛应用 (李瑞雪, 2019; 李悦等, 2023)。TLS 可实现对象目标物的快速扫描, 能够探测到建 (构) 筑物更多细节信息, 主要包括建筑物结构的变形和损伤, 建筑物墙体的剪切开裂、墙面脱落及承重构件的损伤, 还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测量数据 (Yang et al, 2021)。TLS 高精度数据的获取为提取偏差较小、肉眼无法识别的建筑物破坏特征及严重破坏不易近距离测量的建筑物提供了技术帮助。尤其是在地震后使用 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 (Liu et al, 2013)。

地面摄影测量是一种准确的地震损害快速评估方法 (Vasilakos et al, 2018)。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 (赵传等, 2017; 杜治国等, 2023), 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, 尤其适用于地震现场建筑物震害调查过程中对基本完好、轻微破坏建筑物的识

\* 收稿日期: 2023–02–09.

基金项目: 河北省地震科技星火计划项目 (DZ2021120300001, DZ2024112400011).

第一作者简介: 杨凡 (1986–), 高级工程师, 博士, 主要从事地震应急、遥感应用、地震灾害等工作.

E-mail: yangfan1182@126.com.

通信作者简介: 王晓山 (1980–), 高级工程师, 博士, 主要从事地震定位、震源参数反演、构造应力场反演和活动断层探测等工作. E-mail: 409982349@qq.com.

别和判定以及震后建筑物的安全性评价。

在土木工程领域的应用中, Li 等 (2020) 将用 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; Makuch 和 Gawronek (2020) 基于三维激光扫描仪数据, 利用主成分分析和区域增长算法进行自动检测, 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; Jiang 等 (2017) 和 Jiao 等 (2019) 提出了基于地基 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问题; Jiang 等 (2018) 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震后建筑物墙体裂缝相关信息。为了提高建筑物震害信息提取精度和破坏程度判定的准确性, 该技术逐渐被应用到地震灾后现场工作中。

2008 年汶川 8.0 级地震后, 地基三维激光扫描仪首次被应用于震后建筑物的震害信息识别提取中。地基三维激光扫描仪采集的高精度 LiDAR 数据, 能够解决地震现场工作对基本完好、轻微破坏、中等破坏建筑物识别判定模糊的问题, 但需要首先确定建筑物震害信息提取背景值区间。针对墙面 LiDAR 点云趋于平面的背景区间值, 本文采集了 2013 年四川芦山 7.0 级地震后经现场调查判定为基本完好的砌体建筑物的 LiDAR 点云数据, 分析和验证 LiDAR 点云数据背景值区间。

## 1 数据和方法

### 1.1 数据采集

芦山 7.0 级地震是继汶川 8.0 级地震后, 龙门山断裂带发生的又一次强烈的破坏性地震。此次地震共造成四川省 21 个区县受灾, 等震线长轴呈 NE 向分布, 灾区最高烈度为 IX 度, VI 度及以上烈度区总面积为 18 682 km<sup>2</sup>。其中: IX 度区东北自芦山县太平镇、宝盛乡以北, 西南至芦阳镇向阳村; VIII 度区东北自芦山县宝盛乡漆树坪村, 西南

至天全县兴业乡, 西北自宝兴县灵关镇, 东南至名山区; VII 度区东北自芦山县大川镇, 西南至荥经县龙苍沟镇岗上村, 西北自天全县紫石乡, 东南至洪雅县汉王乡, VI 度区东北自大邑县新场镇李家山村, 西南至甘洛县两河乡, 西北自泸定县岚安乡, 东南至丹棱县杨场镇 (李志强等, 2013) (图 1)。

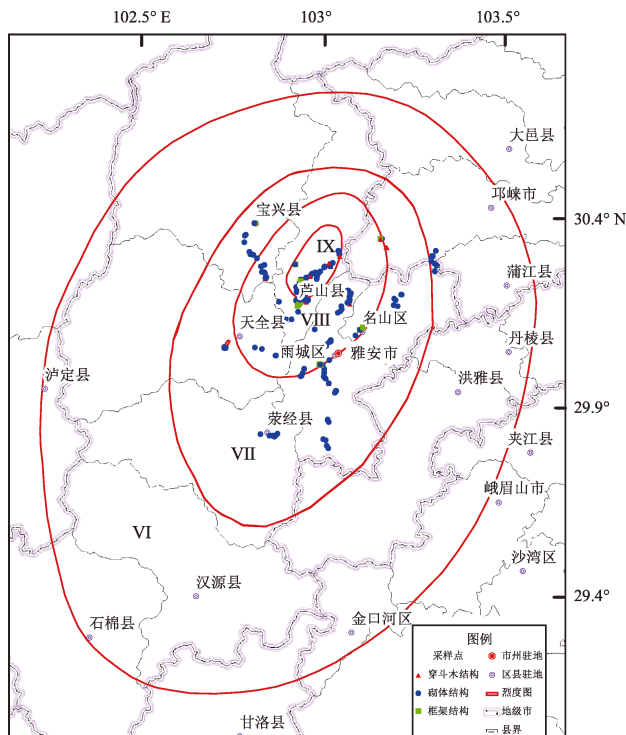


图 1 2013 年芦山 7.0 级地震烈度及调查点分布图

Fig. 1 Distribution of survey points and seismic intensity of the Lushan  $M_s7.0$  earthquake in 2013

2013 年 8 月, 中国地震局地质研究所地震与地质灾害风险研究室工作人员进入芦山地震灾区, 使用 Trimble GX200 三维激光扫描仪在 VI、VII、VIII、IX 度区进行震后建筑物 LiDAR 数据采集, 采样点要分布于芦山县、宝兴县、天全县、荥经县、雅安市、名山县等。采样点中基本完好建筑共采集 91 站 (表 1)。在数据采集过程中, 为提高工作效率, 每个建筑物采用夹角式扫描, 即同时采集建筑物的正面和侧面; 为降低坐标误差, 采用相对坐标的形式, 即三维激光扫描仪所在点为控制点坐标。采集到的砌体建筑物原始三维点云数据如图 2 所示。

表 1  芦山地震灾区不同结构建筑物采样级目

Tab. 1  Building sampling number of different structures in Lushan  $M_s7.0$  earthquake area

烈度	采样站数目		
	穿斗木结构	砌体结构	框架结构
Ⅵ	—	8	—
Ⅶ	—	28	1
Ⅷ	2	19	8
Ⅸ	4	20	1
合计	6	75	10

本文采集震后基本完好砌体结构建筑物共 75 个站点，提取到 140 个外独立墙面，主要包括：①砖木结构，其建筑特点是：砖墙砌体，没有采取抗震设防措施，屋顶为平屋顶或人字屋顶的木梁和瓦片；②砖混结构（非设防），其建筑特点是：建筑成本低廉，不具备抗震设防构造，承重墙为砖砌体，没有钢筋水泥混凝土柱和梁，屋顶为预制板；③砖混结构（设防），其建筑特点是：有抗震设防构造，在墙角有构造柱与墙面共同承重，构造柱的厚度与墙体厚度相同，一楼、二楼屋顶为钢筋水泥浇筑，同时配有承重梁和地圈梁，开间较大（张令心等，2019）。由于采集到的木结构



图 2  建筑物原始点云数据三维图

Fig. 2  3D view of the original point cloud data of the building

建筑和框架结构建筑 LiDAR 点云数据较少，因此未开展点云背景值研究。

在站点 1 采集到的砌体建筑物墙面的原始数据中， $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  为点云数据三维坐标空间位置信息，在数据采集过程中使用的是仪器相对坐标，单位为 mm；Scalar 为信号反射强度；Red、Green、Blue 为点云数据颜色信息； $N_x$ 、 $N_y$ 、 $N_z$  为点云数据法线信息（表 2）。

表 2  站点 1 砌体建筑物墙面原始 LiDAR 数据

Tab. 2  Raw LiDAR data of the building's walls acquired at Site 1

$X/mm$	$Y/mm$	$Z/mm$	Scalar	Red	Green	Blue	$N_x$	$N_y$	$N_z$
988 532. 62	517 064. 86	103 767. 65	21	151	145	163	-0. 56	-0. 78	-0. 28
988 529. 56	517 069. 48	103 748. 04	20	229	238	253	-0. 17	-0. 99	0. 04
988 532. 61	517 065	103 726. 82	17	255	255	255	-0. 17	-0. 99	0. 04
988 533. 78	517 063. 32	103 706. 75	18	248	249	255	-0. 17	-0. 99	0. 01
988 533. 77	517 063. 38	103 686. 16	15	248	249	255	-0. 17	-0. 99	-0. 01
988 533. 81	517 063. 39	103 665. 95	19	244	245	254	-0. 17	-0. 99	0. 01
988 531. 52	5170 66. 86	103 645. 97	14	250	248	255	-0. 2	-0. 98	0. 01
988 533. 29	517 064. 28	103 625. 43	14	249	250	255	-0. 2	-0. 98	0. 01
988 532. 61	517 065. 35	103 604. 61	15	244	244	255	-0. 2	-0. 98	0. 01
988 534. 19	517 063. 07	103 584. 5	17	242	248	255	-0. 17	-0. 99	-0. 01
988 534. 11	517 063. 25	103 564. 33	11	249	250	255	-0. 17	-0. 99	0. 01
988 535. 12	517 061. 8	103 543. 58	16	249	250	255	-0. 17	-0. 99	0. 01
988 533. 67	517 064. 02	103 523. 67	18	249	250	255	-0. 17	-0. 99	0. 01
988 533. 85	517 063. 81	103 503. 46	15	248	251	255	-0. 2	-0. 98	-0. 01
988 533. 79	517 063. 97	103 482. 93	16	247	249	255	-0. 2	-0. 98	-0. 01
988 529. 87	517 069. 85	103 463. 67	15	248	249	255	-0. 2	-0. 98	-0. 01
988 532. 86	517 065. 46	103 442. 97	16	255	255	255	-0. 19	-0. 98	0. 04
988 534. 42	517 063. 2	103 422. 54	18	248	249	255	-0. 22	-0. 97	0. 04
988 537. 21	517 059. 11	103 401. 53	15	255	255	255	-0. 22	-0. 97	0. 01
988 532. 87	517 065. 64	103 382. 12	15	254	246	255	-0. 2	-0. 98	-0. 01

从采集到的点云数据及可视化图像（图 2）可以看出，三维激光扫描仪的点云数据具有以下特点：点云密度高、点云数据量大、包含目标物光学特征信息及反射强度信息、仪器原始扫描数据能够自动计算生成法线信息。

1.2 计算方法

采集过程中，受外界环境及仪器设备自身的干扰影响，如水汽、光折射、障碍物以及目标物本身，点云数据会产生异常值，会增加数据量的冗余。异常值类型包括漂移点、孤立点、冗余点、混杂点。为了提高点云数据后期分析的精准性，需要进行滤波去噪、分割、提取、坐标系转换处理，以达到分

析需求的格式要求（杨凡，2022；王斌等，2023）。

在数据处理过程中，最关键的是坐标转换。数据在采集过程中使用的是仪器相对坐标，在震害信息提取过程中会产生误差，不能够呈现出数据的真实性，同时掩盖了震害特征信息。本次数据采集通过仪器自带的 realworks 软件提供的基本功能进行点云去噪、滤波处理、坐标转换等，将原始数据提取为独立墙面，定义墙体点云数据的左下角为原点坐标  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  的起点  $(0, 0, 0)$ ，对处理后的数据按照单位为  $m$  的规范进行转存。对原始 LiDAR 点云数据进行坐标转换后的结果见表 3，其中  $X$  为横坐标， $Y$  为纵坐标， $Z$  为变形值。

表 3 原始点云数据经坐标转换后的数据  
Tab. 3 Converted data of original point cloud data by coordinates transformation

$X/n$	$Y/n$	$Z/n$	Scalar	Red	Green	Blue	$N_x$	$N_y$	$N_z$
-0.066 588	-0.016 044	3.657 689	21	151	145	163	-0.41	-0.86	-0.28
-0.070 478	-0.011 992	3.638 101	20	229	238	253	0.01	-1.00	0.04
-0.066 784	-0.01 585	3.616 868	17	255	255	255	0.01	-1.00	0.04
-0.065 418	-0.017 278	3.596 783	18	248	249	255	0.01	-1.00	0.01
-0.065 515	-0.017 182	3.576 198	15	248	249	255	0.01	-1.00	-0.02
-0.065 561	-0.017 138	3.555 983	19	244	245	254	0.01	-1.00	0.01
-0.068 492	-0.014 088	3.536 027	14	250	248	255	-0.02	-1.00	0.01
-0.066 379	-0.016 294	3.515 472	14	249	250	255	-0.02	-1.00	0.01
-0.067 311	-0.015 327	3.49 466	15	244	244	255	-0.02	-1.00	0.01
-0.065 444	-0.017 279	3.474 535	17	242	248	255	0.01	-1.00	-0.02
-0.065 635	-0.017 083	3.454 364	11	249	250	255	0.01	-1.00	0.01
-0.064 461	-0.018 311	3.433 614	16	249	250	255	0.01	-1.00	0.01
-0.066 353	-0.016 344	3.413 711	18	249	250	255	0.01	-1.00	0.01
-0.066 214	-0.016 493	3.393 502	15	248	251	255	-0.02	-1.00	-0.02
-0.066 389	-0.016 314	3.372 969	16	247	249	255	-0.02	-1.00	-0.02
-0.071 332	-0.011 166	3.353 734	15	248	249	255	-0.02	-1.00	-0.02
-0.06 771	-0.014 947	3.333 018	16	255	255	255	-0.02	-1.00	0.04
-0.065 861	-0.016 879	3.312 575	18	248	249	255	-0.05	-1.00	0.04
-0.062 491	-0.020 396	3.291 548	15	255	255	255	-0.05	-1.00	0.01
-0.06 797	-0.014 688	3.27 217	15	254	246	255	-0.02	-1.00	-0.02

利用 Matlab 代码读取加载砌体建筑物墙面的 LiDAR 数据，获取墙面 LiDAR 点云数据的三维坐标值  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 。其中  $X$  为墙面的长度， $Y$  为墙面的高度， $Z$  为垂直于墙面的起伏变形量。若  $Z$  值为正，则该点为垂直于墙面向内凸出；若  $Z$  值为负，则该点为垂直于墙面向外凸出（图 3）。 $Z$  值的起伏变化，代表了墙面平整度， $Z$  值趋于平面的起伏变化区间值的计算方法如下：

（1）提取墙面 LiDAR 点云数据坐标  $Z$  值，求得  $Z$  值的平均值  $\delta$  为：

$$\delta = \frac{\sum_{i=1}^n Z}{n}$$

(1)

式中： $Z$  为墙面变形值； $\delta$  为平均值； $n$  为点云个数； $Z_i$  为第  $i$  个点的  $Z$  值。



(2) 计算墙面 LiDAR 点云每个点坐标  $Z$  值与平均值  $\delta$  距离  $Z'_i$  的平方  $\sigma^2$ , 然后求平均值:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i'^2}{n} \quad (2)$$

(3) 对步骤 2 的方差值求平方根, 得到墙面 LiDAR 点云数据坐标  $Z$  值的标准差  $\sigma$  为:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Z_i'^2}{n}} \quad (3)$$

(4) 根据上述计算求得的  $\sigma$ , 得到墙面 LiDAR 点云坐标  $Z$  值趋于平面的起伏变化区间。

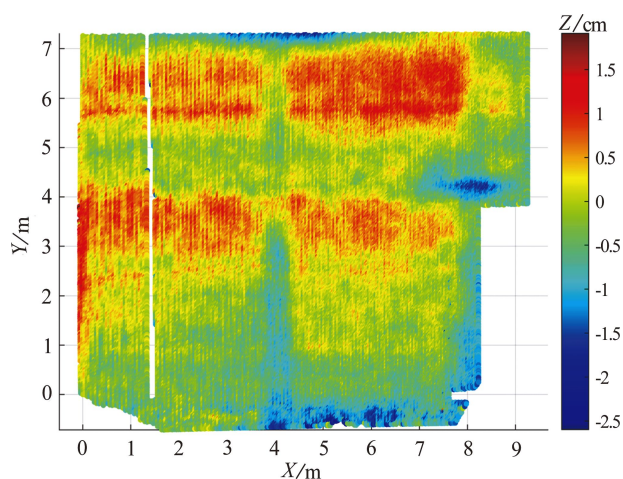
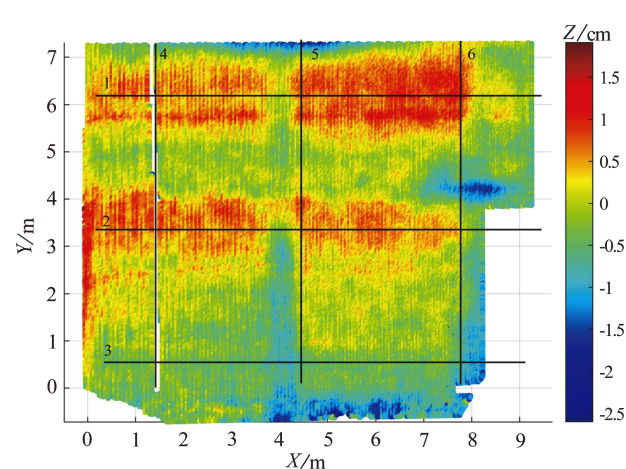
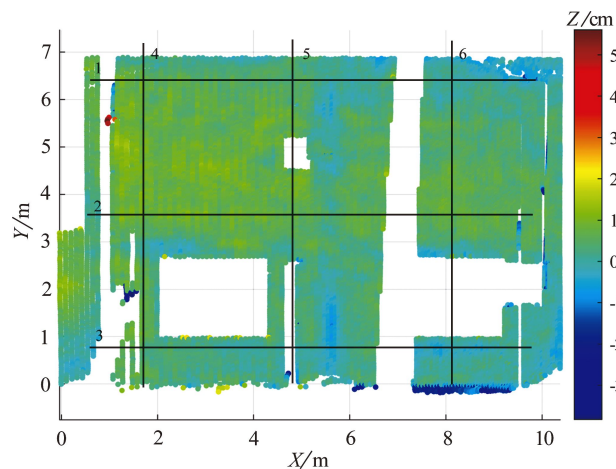


图3 砌体建筑墙面 LiDAR 点云变形量分布

Fig.3 Distribution of the LiDAR point cloud deformation on the wall



(a) 无门窗洞口单墙面



(b) 有门窗洞口单墙面

图4 LiDAR 点云数据剖面图

Fig.4 Profile of the LiDAR point cloud data

## 2 计算结果

受居民自建房屋门窗洞口位置的随意性、抹灰不均匀性及点云边缘效应等影响, 一些噪点会增加墙面点云背景值的误差。为了降低点云噪点对墙面点云背景值表征参数分析的影响, 本文测试了 2 种方法。方法 1: 在对独立墙面 LiDAR 点云数据滤波去噪处理时, 提高门窗洞口及墙面边缘点云的裁减范围, 只保留属于墙面的点云数据, 该方法可实现数据的快速批处理, 不足之处是容易将涵盖震害信息的点云剔除, 不利于后期震害信息数据的提取分析。方法 2: 在保留墙面 LiDAR 点云数据完整性的基础上, 利用剖面分析的方法提取计算墙面点云数据的标准差, 将所有剖面提取的点云数据标准差取平均值, 即为该墙面 LiDAR 点云数据的背景值, 剖面数量越多分布越均匀, 计算的墙面点云背景值越精确。

本文利用上述 2 种方法对无门窗洞口墙面 (图 4a) 和有门窗洞口墙面 (图 4b) 的 LiDAR 点云数据进行剖面提取分析, 对墙面采用 6 条均匀分布剖面网格 (表 4)。经过对比分析得出, 受点云边缘噪点的影响, 方法 1 得到的墙面背景值偏大, 方法 2 能够有效避免自建房屋门窗洞口及墙面的边缘噪点产生的误差, 计算得到的墙面点云背景值更准确, 因此采用该方法进行计算分析。

表 4 两种方法对墙面标准差的计算结果对比

Tab. 4 Comparison of the results from the two methods

方法		无门窗洞口墙面 标准差/cm	门窗洞口墙面 标准差/cm
方法 1		0. 518 9	0. 449 13
方法 2	剖面 1	0. 325 8	0. 291 3
	剖面 2	0. 320 6	0. 178 5
	剖面 3	0. 233 9	0. 274 3
	剖面 4	0. 375 3	0. 316 6
	剖面 5	0. 452 9	0. 321 9
	剖面 6	0. 413 8	0. 226 5
	平均值	0. 353 7	0. 268 2

使用方法 2 对 140 个独立墙面数据进行剖面分析,利用式 (3) 计算每个独立墙面上 6 条剖面的标准差 (表 5)。在此基础上,统计回归分析得出

建筑物 140 个独立墙面 LiDAR 点云背景值正态分布图 (图 5)。得到四川芦山地区农村民居砌体结构建筑物的地基 LiDAR 点云数据背景区间值为 0 ~ 0.45 cm。当垂直于墙面的起伏变形量在 0 ~ 0.45 cm 时,建筑物墙面即可判断为无震害信息;若起伏变形量大于 0.45 cm 时,则该点为垂直于墙面向内或向外凸出。

四川芦山地区农村典型民居砌体结构建筑物多数为两层建筑,少数为一层和三层建筑。为了保留地基 LiDAR 数据建筑物震害信息的完整性,参照《砌体结构工程施工质量验收规范》(GB 50203—2011) 中墙面垂直度每层允许偏差 5 mm 的标准,结合本文背景值相关研究,证实了用地基 LiDAR 数据确定农村典型民居砌体结构建筑物背景区间值的合理性。

表 5 每个独立墙面上 6 条剖面的标准差

Tab. 5 Standard deviation of 6 profiles on each independent wall surface

单位: cm

序号	剖面 1 标准差	剖面 2 标准差	剖面 3 标准差	剖面 4 标准差	剖面 5 标准差	剖面 6 标准差	平均值	序号	剖面 1 标准差	剖面 2 标准差	剖面 3 标准差	剖面 4 标准差	剖面 5 标准差	剖面 6 标准差	平均值
1	0.217 2	0.379 8	0.279 1	0.481 9	0.824 2	0.803 9	0.497 7	23	0.311 9	0.635 3	0.733 9	0.821 4	0.785 9	0.572 2	0.643 4
2	0.294 3	0.195 1	0.116 9	0.242 6	0.201 3	0.181 6	0.205 3	24	0.420 2	0.464 8	0.420 5	0.304 8	0.373 7	0.363 5	0.391 2
3	0.212 1	0.732 7	0.199 3	0.425 7	0.334 8	0.462 2	0.394 5	25	0.648 5	0.381 1	0.278 6	0.563 8	0.227 5	0.249 2	0.391 5
4	0.458 2	0.422 7	0.364 6	0.260 6	0.347 8	0.231 6	0.347 6	26	0.457 1	0.487 5	0.285 0	0.461 8	0.393 7	0.350 6	0.406 0
5	0.262 7	0.229 7	0.233 3	0.394 3	0.346 9	0.533 9	0.333 5	27	0.740 7	0.558 0	0.220 0	0.289 4	0.201 3	0.721 8	0.455 2
6	0.689 7	0.312 2	0.202 5	0.278 1	0.163 8	0.190 2	0.306 1	28	0.259 0	0.260 9	0.532 8	0.555 7	0.423 0	0.395 1	0.404 4
7	0.252 0	0.206 3	0.183 3	0.186 3	0.202 9	0.276 2	0.217 8	29	0.646 4	0.731 5	0.488 2	0.759 7	0.246 1	0.345 8	0.536 3
8	0.606 3	0.546 7	0.493 6	0.286 9	0.632 3	0.360 9	0.487 8	30	0.600 0	0.346 9	0.391 7	0.196 3	0.213 0	0.161 3	0.318 2
9	0.530 9	0.351 9	0.207 9	0.424 2	0.596 7	0.661 9	0.462 3	31	0.118 5	0.303 7	0.431 2	0.240 8	0.363 7	0.201 2	0.276 5
10	0.437 6	0.350 7	0.516 0	0.366 7	0.208 4	0.558 4	0.406 3	32	1.063 9	0.432 0	0.465 0	0.315 4	0.865 0	0.485 7	0.604 5
11	0.329 6	0.325 3	0.475 9	0.626 8	0.637 0	0.605 6	0.500 0	33	0.708 4	1.181 7	0.908 3	0.566 0	0.554 6	0.903 4	0.803 7
12	0.786 4	0.505 2	0.426 7	0.252 5	0.744 8	0.670 3	0.564 3	34	0.671 2	0.503 4	0.371 4	0.892 7	0.455 5	0.541 9	0.572 7
13	0.721 5	0.467 5	0.755 0	0.423 3	0.663 9	0.601 6	0.605 5	35	0.585 6	0.545 0	0.631 3	0.548 5	0.564 5	0.531 3	0.567 7
14	0.500 4	0.309 6	0.230 5	0.673 8	0.928 3	1.153 0	0.632 6	36	0.586 8	0.983 9	0.463 2	1.073 4	0.677 9	0.601 4	0.731 1
15	0.161 8	0.250 4	0.336 2	0.653 6	0.426 1	0.522 1	0.391 7	37	0.598 5	0.314 7	0.517 1	0.503 4	0.618 7	0.322 6	0.479 1
16	0.952 9	0.430 6	0.316 7	0.419 1	0.652 6	0.999 4	0.628 5	38	0.736 5	0.549 3	0.477 4	1.065 8	1.214 3	0.730 0	0.795 6
17	0.650 3	0.345 7	0.380 0	0.349 8	0.424 4	0.414 7	0.427 5	39	0.284 4	0.394 0	0.396 3	0.309 0	0.562 6	0.310 9	0.376 2
18	0.743 0	1.066 1	0.216 0	0.574 3	0.239 4	0.575 2	0.569 0	40	0.370 0	0.194 6	0.378 3	0.181 2	0.270 0	0.263 5	0.276 3
19	0.245 8	0.246 7	0.199 5	0.301 4	0.281 4	0.214 3	0.248 2	41	0.716 3	0.722 1	0.729 0	0.248 1	0.259 2	0.329 9	0.500 7
20	0.190 4	0.169 8	0.169 2	0.324 6	0.404 4	0.244 4	0.250 5	42	0.880 8	0.187 9	0.262 5	0.364 5	0.277 8	0.291 3	0.377 5
21	0.300 4	0.555 1	0.241 5	0.381 9	0.428 4	0.590 7	0.416 3	43	1.518 5	0.956 3	0.598 7	0.119 1	0.556 2	0.284 4	0.672 2
22	0.285 1	0.138 9	0.161 7	0.157 2	0.052 8	0.195 6	0.165 2	44	0.202 6	0.302 2	0.486 7	0.208 7	0.377 3	0.514 4	0.348 6

续表 5															
序号	剖面1 标准差	剖面2 标准差	剖面3 标准差	剖面4 标准差	剖面5 标准差	剖面6 标准差	平均值	序号	剖面1 标准差	剖面2 标准差	剖面3 标准差	剖面4 标准差	剖面5 标准差	剖面6 标准差	平均值
45	0.517 2	0.324 9	0.336 2	0.499 4	0.220 5	0.661 0	0.426 5	82	0.165 9	0.456 7	0.658 6	0.193 4	0.138 6	0.581 4	0.365 7
46	0.400 5	0.277 3	0.824 6	0.405 1	0.578 7	0.341 3	0.471 2	83	0.576 1	0.979 4	0.865 5	0.391 5	0.644 7	0.839 6	0.716 1
47	0.716 8	0.611 6	0.632 5	0.562 9	0.413 9	0.985 1	0.653 8	84	0.451 6	0.270 6	0.700 6	0.604 8	0.455 6	0.771 4	0.542 4
48	0.525 5	0.481 8	0.252 4	0.513 8	0.532 0	0.794 6	0.516 7	85	0.508 3	0.215 8	0.178 8	0.288 3	0.414 3	0.163 0	0.294 7
49	0.172 6	0.223 5	0.246 9	0.534 9	0.809 4	0.815 8	0.467 2	86	0.486 4	0.278 2	0.200 5	0.202 0	0.358 0	0.565 7	0.348 5
50	0.324 6	0.144 4	0.151 2	0.160 3	0.116 0	0.143 7	0.173 4	87	0.222 3	0.678 6	0.726 2	0.463 3	0.768 8	0.758 5	0.602 9
51	1.289 9	0.972 5	0.208 4	0.299 9	0.576 4	1.459 1	0.801 0	88	0.366 1	0.686 9	0.930 6	0.431 1	0.428 6	0.627 6	0.578 5
52	0.139 9	0.159 2	0.131 5	0.218 7	0.206 6	0.183 3	0.173 2	89	0.532 7	0.282 0	0.321 2	0.669 1	0.302 8	0.363 1	0.411 8
53	0.188 3	0.252 3	0.238 6	0.192 2	0.205 9	0.187 8	0.210 9	90	0.796 1	0.725 7	0.861 9	0.337 6	0.441 8	0.168 0	0.555 2
54	0.997 8	0.443 9	0.596 2	0.308 6	0.496 0	0.475 4	0.553 0	91	0.307 2	0.341 7	0.577 8	0.441 1	1.193 5	0.696 4	0.592 9
55	0.611 2	0.700 3	0.911 6	0.206 5	0.277 9	0.132 7	0.473 4	92	0.590 2	0.566 1	0.419 4	0.301 5	0.280 6	0.416 0	0.429 0
56	0.660 4	0.649 4	0.522 6	0.437 2	0.198 8	0.316 0	0.464 1	93	0.675 7	0.563 0	0.422 4	0.148 2	0.198 0	0.210 9	0.369 7
57	0.420 3	0.151 8	0.257 9	0.252 9	0.296 2	0.267 5	0.274 4	94	0.471 7	0.530 2	0.270 1	0.486 8	0.606 7	0.662 6	0.504 7
58	0.311 7	0.340 5	0.666 1	0.575 7	0.306 0	0.609 4	0.468 2	95	0.371 2	0.435 7	0.425 6	0.329 1	0.318 6	0.288 9	0.361 5
59	0.796 0	1.103 0	0.809 9	0.734 5	0.519 2	0.850 8	0.802 2	96	0.175 7	0.206 4	0.174 7	0.169 1	0.614 9	0.637 6	0.329 7
60	0.323 0	0.284 8	0.166 1	0.458 2	0.540 8	0.690 3	0.410 5	97	0.306 8	0.325 4	0.434 9	0.279 4	0.242 0	0.303 8	0.315 4
61	0.481 0	0.366 1	0.388 9	0.294 1	0.277 5	0.182 3	0.331 6	98	0.367 0	0.313 2	0.296 8	0.294 0	0.288 3	0.330 8	0.315 0
62	0.807 6	0.934 3	0.402 4	0.741 6	0.271 5	0.257 8	0.569 2	99	0.362 0	0.308 5	0.285 4	0.298 7	0.270 0	0.235 2	0.293 3
63	0.379 6	0.184 5	0.233 6	0.323 4	0.411 9	0.483 7	0.336 1	100	0.211 3	0.292 7	0.146 5	0.334 9	0.757 3	0.500 1	0.373 8
64	0.322 8	0.430 7	0.565 2	0.600 8	0.368 4	0.249 0	0.422 8	101	0.178 8	0.215 6	0.336 8	0.208 9	0.222 6	0.207 0	0.228 3
65	0.605 0	0.449 8	0.484 6	0.349 2	0.340 3	0.267 4	0.416 0	102	0.293 0	0.314 8	0.230 5	0.434 4	0.292 4	0.370 0	0.322 5
66	0.344 4	0.852 7	1.147 3	0.523 5	0.609 8	1.070 3	0.758 0	103	0.765 5	0.211 8	0.329 8	0.507 0	0.462 0	0.407 3	0.447 2
67	0.393 2	1.619 1	1.305 3	0.992 5	0.738 7	1.253 8	1.050 4	104	0.315 0	0.361 3	0.320 3	0.354 2	0.184 3	0.470 0	0.334 2
68	0.472 5	0.514 5	0.376 7	0.392 2	0.480 9	0.492 5	0.454 9	105	0.422 3	0.335 5	0.286 6	0.337 6	0.238 5	0.360 1	0.330 1
69	0.529 8	0.195 1	0.506 2	0.500 7	0.617 5	0.416 1	0.460 9	106	0.705 3	0.329 0	0.534 0	0.853 7	0.591 4	0.728 9	0.623 7
70	0.368 7	0.143 0	0.256 6	0.173 8	0.219 7	0.195 4	0.226 2	107	0.513 2	0.819 0	1.700 6	0.291 1	1.945 9	1.883 5	1.192 2
71	0.287 4	0.203 1	0.232 2	0.374 2	0.231 4	0.161 1	0.248 2	108	0.448 9	0.375 9	0.352 3	0.342 6	0.514 0	0.728 1	0.460 3
72	0.508 9	0.279 3	0.491 8	0.317 8	0.453 6	0.891 0	0.490 4	109	0.807 8	0.654 4	0.293 1	0.171 5	0.526 0	0.754 1	0.534 5
73	0.423 0	0.294 8	0.294 7	0.208 7	0.341 9	0.254 1	0.302 9	110	0.403 7	0.403 7	0.370 6	0.233 8	0.418 9	1.213 6	0.507 4
74	0.733 3	0.635 1	0.561 1	0.287 9	0.270 7	0.407 4	0.482 6	111	0.294 6	0.200 8	0.230 4	0.195 9	0.284 9	0.475 3	0.280 3
75	0.665 3	0.418 1	0.201 7	0.554 3	0.647 4	0.975 7	0.577 1	112	0.328 8	0.405 1	0.151 6	0.334 4	0.399 7	0.459 8	0.346 6
76	0.240 5	0.320 6	0.521 5	0.593 7	0.675 9	0.217 9	0.428 3	113	0.342 5	0.362 9	0.396 7	0.287 7	0.315 6	0.607 1	0.385 4
77	0.727 0	0.299 6	0.302 6	0.307 7	0.270 0	0.388 9	0.382 6	114	0.381 6	0.427 8	0.237 9	0.279 7	0.328 6	0.353 9	0.334 9
78	0.280 9	0.239 3	0.255 6	0.267 8	0.291 7	0.194 2	0.254 9	115	0.432 5	0.321 1	0.503 3	0.322 2	0.433 3	0.469 4	0.413 6
79	0.523 3	0.425 3	0.338 5	0.894 8	0.724 6	0.595 5	0.583 7	116	0.355 0	0.400 7	0.275 9	0.155 3	0.187 1	0.188 3	0.260 4
80	0.574 6	0.323 4	0.319 7	0.301 6	0.646 9	0.731 5	0.483 0	117	0.302 0	0.320 4	0.635 2	0.362 0	0.293 7	0.333 4	0.374 5
81	0.333 1	0.197 1	0.197 7	0.253 8	0.246 2	0.268 3	0.249 4	118	0.361 9	0.150 0	0.176 7	0.231 1	0.539 2	0.431 8	0.315 1

续表 5

序号	剖面 1 标准差	剖面 2 标准差	剖面 3 标准差	剖面 4 标准差	剖面 5 标准差	剖面 6 标准差	平均值	序号	剖面 1 标准差	剖面 2 标准差	剖面 3 标准差	剖面 4 标准差	剖面 5 标准差	剖面 6 标准差	平均值
119	0.301 1	0.464 6	0.221 0	0.389 0	0.261 6	0.312 8	0.325 0	130	0.490 7	0.376 9	0.481 0	0.391 5	0.611 3	0.609 0	0.493 4
120	0.830 3	0.411 8	0.370 0	0.222 7	0.308 5	0.507 3	0.441 8	131	0.541 9	0.434 3	0.283 2	0.577 7	0.477 7	0.647 2	0.493 7
121	0.346 5	0.268 1	0.310 3	0.464 8	0.319 1	0.443 6	0.358 7	132	0.313 9	0.312 1	0.351 0	0.242 3	0.427 7	0.516 6	0.360 6
122	1.370 3	0.939 3	0.447 5	0.505 2	0.357 8	0.494 9	0.685 8	133	0.123 4	0.138 2	0.137 3	0.142 7	0.183 6	0.236 6	0.160 3
123	0.288 3	0.400 4	0.446 2	0.567 1	0.659 7	0.371 6	0.455 6	134	0.302 4	0.330 6	0.390 0	0.329 9	0.223 7	0.201 8	0.296 4
124	0.321 4	1.112 8	0.289 3	0.406 6	0.381 0	0.298 3	0.468 2	135	0.472 8	0.465 1	0.634 8	0.239 2	0.176 8	0.276 9	0.377 6
125	0.645 1	0.427 8	0.299 9	0.705 7	0.529 9	0.373 6	0.497 0	136	0.145 2	0.184 9	0.160 9	0.197 4	0.219 4	0.129 4	0.172 9
126	0.391 9	0.479 8	0.503 9	0.326 2	0.422 5	0.351 7	0.412 7	137	0.441 7	0.401 0	0.302 7	0.435 8	0.361 3	0.584 6	0.421 2
127	1.025 5	1.042 9	0.976 9	0.468 3	0.289 7	0.462 7	0.711 0	138	0.370 4	0.626 8	0.331 2	0.394 3	0.417 7	0.563 8	0.450 7
128	0.341 3	0.413 4	0.592 4	0.239 2	0.379 0	0.687 0	0.442 1	139	0.508 1	0.428 0	0.412 2	0.259 1	0.348 9	0.280 5	0.372 8
129	0.300 3	0.230 8	0.693 5	0.234 3	0.330 6	0.186 8	0.329 4	140	0.587 2	0.573 0	0.466 9	0.647 0	0.457 9	0.477 2	0.534 9

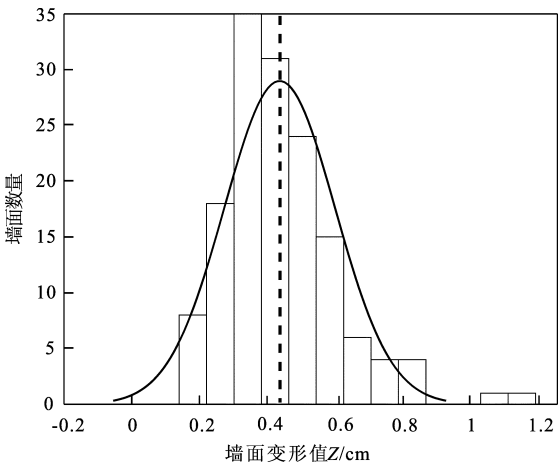


图 5 建筑物 LiDAR 点云背景值正态分布

Fig.5 Normal distribution of the background values of the LiDAR point cloud of buildings

3 结论

本文依据标准差原理，采用统计回归分析方法，对在 2013 年芦山 7.0 级地震灾区采集到的基本完好砌体建筑的 140 个独立墙面的地基 LiDAR 数据进行了计算分析，结合《砌体结构工程施工质量验收规范》，对基于高精度地基 LiDAR 数据提取的农村典型民居砌体结构建筑物背景值进行评价，得到四川芦山地区农村典型民居砌体结构建筑物的背景值区间为 0~0.45 cm。

宁夏回族自治区地震局李自芮等参与采集震区数据，中国地震局地质研究所最高众研究员在数据分析方面提出了宝贵意见，中国地震局地质研究所魏占玉研究员在点云数据处理方面提供了帮助和支持，在此一并表示衷心感谢。

参考文献：

杜浩国,林旭川,卢永坤,等. 2023. 基于遥感影像的震后避难空间快速提取模型研究——以 2021 年云南漾濞  $M_s6.4$  地震为例[J]. 地震研究,46(1):116–127.

Du H G,Lin X C,Lu Y K,*et al.* 2023. Study on the rapid extraction model of post – earthquake shelter sites based on remote sensing images: A case study of the Yangbi  $M_s6.4$  earthquake[J]. Journal of Seismological Research,46(1):116–127. (in Chinese)

李瑞雪. 2019. 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.

Li R X. 2019. Research on building facade recognition and extraction based on terrestrial LiDAR data[D]. Ganzhou:Jiangxi University of Science and Technology. (in Chinese)

李悦,晁会霞,辛永辉,等. 2023. 三种河流相对高程模型生成方法对比[J]. 华南地震,43(1):111–120.

Li Yue,Chao H X,Xin Y H,*et al.* 2023. Comparison of three methods for generating relative elevation models of river[J]. South China Journal of Seismology,43(1):111–120. (in Chinese)

李志强,侯建盛,李洋,等. 2013. 2013 年 4 月 20 日四川芦山 7.0 地震灾害特点分析[J]. 地震地质,35(2):398–410.

Li Z Q,Hou J S,Li Y,*et al.* 2013. Analysis on the characteristics of the  $M_s7.0$  Lushan, Sichuan Province, earthquake hazard on April 20, 2013[J]. Seismology and Geology,35(2):398–410. (in Chinese)

王斌,周立鹏,李琴. 2023. 顾及 InSAR 形变特征的斜坡灾害隐患早



- 期识别遥感方法[J]. 华南地震, 43(1):105–110.
- Wang B, Zhou L P, Li Q. 2023. Remote sensing method for early identification of slope hazards considering InSAR deformation characteristics [J]. South China Journal of Seismology, 43(1):105–110. (in Chinese)
- 赵传, 张保明, 郭海涛, 等. 2017. 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, 34(4):393–398.
- Zhao C, Zhang B M, Guo H T, *et al.* 2017. Roof extraction using LiAAR point clouds based on normal vector density-based clustering[J]. Journal of Geomatics Science and Technology, 34(4):393–398. (in Chinese)
- 杨凡. 2022. 基于地基 LiDAR 数据建筑物震害信息定量分析研究[D]. 北京: 中国地震局地质研究所.
- Yang F. 2022. Quantitative analysis of earthquake building damage Information based on ground-based LiDAR data[D]. Beijing: Institute of Geology, China Earthquake Administration. (in Chinese)
- 张令心, 朱柏洁, 陶正如, 等. 2019. 九寨沟 7.0 级地震房屋震害现场调查及其破坏特征[J]. 地震工程学报, 41(4):1053–1059.
- Zhang L X, Zhu B J, Tao Z R, *et al.* 2019. Field investigation and failure characteristics of buildings damaged by the 7.0-magnitude earthquake in Jiuzhaigou [J]. China Earthquake Engineering Journal, 41(4):1053–1059. (in Chinese)
- GB 50203—2011, 砌体结构工程施工质量验收规范[S].
- GB 50203—2011, Code for acceptance of constructional quality of masonry structures[S]. (in Chinese)
- Jiang H B, Li Q, Jiao Q S, *et al.* 2017. Quantitative extraction of wall cracks information of earthquake damaged buildings based on ground based lidar[C]//IEEE. IEEE IGRASS. Fort Worth:1712–1715.
- Jiang H B, Li Q, Jiao Q S, *et al.* 2018. Extraction of wall cracks on earthquake-damaged buildings based on TLS point clouds[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 11(9):3088–3096.
- Jiao Q S, Jiang H B, Li Q. 2019. Building earthquake damage analysis using terrestrial laser scanning data[J]. Advances in Civil Engineering, (11):1–12.
- Li D S, Liu J P, Feng L, *et al.* 2020. Terrestrial laser scanning assisted flatness quality assessment for two different types of concrete surfaces[J]. Measurement, 154:107436.
- Liu W, Dong P L, Liu J B, *et al.* 2013. Evaluation of three-dimensional shape signatures for automated assessment of post-earthquake building damage[J]. Earthquake Spectra, 29(3):897–910.
- Makuch M, Gawronek P. 2020. 3D point cloud analysis for damage detection on hyperboloid cooling tower shells[J]. Remote Sensing, 12(10):1542–1565.
- Vasilakos C, Chatzistamatis S, Roussou O, *et al.* 2018. Terrestrial photogrammetry vs laser scanning for rapid earthquake damage assessment [C]//ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII – 3/W4:527–33. Istanbul, Turkey.
- Yang F, Wen X T, Wang X S, *et al.* 2021. A model study of building seismic damage information extraction and analysis on ground-based LiDAR data[J]. Advances in Civil Engineering, (5):1–14.

## Analysis of the LiDAR Point Cloud Background Values of the Typical, Rural, Residential Houses in Lushan, Sichuan Province

YANG Fan<sup>1,2,3</sup>, WEN Chao<sup>2</sup>, FAN Zhiwei<sup>2</sup>, LIU Xiaodan<sup>2</sup>, LI Xiaoli<sup>4</sup>, LI Zhiqiang<sup>4</sup>, WANG Xiaoshan<sup>1,2</sup>

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

(2. Hebei Earthquake Agency, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

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

(4. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

### Abstract

Using a terrestrial laser scanner, we collect the high-precision LiDAR point cloud data of the independent walls of the barely damaged masonry structures of the typical residential houses in rural areas hit by the 2013 Lushan, Sichuan  $M_s7.0$  earthquake. Then, on the basis of the standard deviation principle, and using statistical regression method, we process the obtained LiDAR data. We find that the interval of background values of the LiDAR point cloud data is 0–0.45 cm.

**Keywords:** LiDAR; point cloud; background value; typical rural houses; masonry structure; the Lushan  $M_s7.0$  earthquake