

地基LiDAR技术在活动断层三维场景建模中的关键技术与应用*

谭毅滢^{1,2}, 魏拾其^{1,2}, 宋健洪^{1,2}, 张冬丽^{1,2}, 郑文俊^{1,2}

1. 中山大学地球科学与工程学院/广东省地球动力作用与地质灾害重点实验室, 广东 珠海 519082
2. 南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海), 广东 珠海 519082

摘要: 激光雷达扫描系统(Light detection and ranging, LiDAR)是一种快速、简便、高精度、高分辨率的三维测量技术。根据不同的搭载平台, LiDAR可以分为星载、机载和地基等几类。地基LiDAR是最常用于地学三维建模中一种高精度设备, 具有空间分辨率高和能够穿透植被直接获取地面信息的优势和特点, 获取的数据能够为三维模型的建立提供更大量、准确、全面的数据支持, 在高精度地形地貌数据获取和工程测量领域应用潜力较大。本文选取了活动断层断错地貌以及活动断层与工程交汇两种场景作为扫描对象, 从两个不同的方面对地基LiDAR点云的处理方法和流程进行了梳理, 并针对不同扫描对象进行三维模型的建立, 更清晰精确地显示扫描区域场景, 可为断层断错地貌的定量研究和工程抗断错设防提供清晰的三维场景信息。

关键词: 地基LiDAR; 点云处理; DEM; 三维场景构建; 活动断层

中图分类号: P315 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2021)03-0078-10

Key technology and application of terrestrial LiDAR in 3D active fault model

TAN Yiyi^{1,2}, WEI Shiqi^{1,2}, SONG Jianhong^{1,2}, ZHANG Dongli^{1,2}, ZHENG Wenjun^{1,2}

1. School of Earth Sciences and Engineering / Guangdong Provincial Key Laboratory of Geodynamics and Geohazards, Sun Yat-sen University, Zhuhai 519082, China
2. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Zhuhai 519082, China

Abstract: Light detection and ranging (LiDAR) is a 3D measurement technology with convenience, high precision and high resolution. Depending on the platform on which it is mounted, LiDAR can be divided into spaceborne, airborne, and terrestrial systems. Terrestrial LiDAR is most commonly used as a high-precision device in 3D geoscience modeling. It has the advantages and characteristics of high spatial resolution and being able to directly obtain ground information through vegetation, which makes it be able to provide a greater number of accurate and comprehensive data for building 3D models and implies its great application potential in the acquisition of high-precision topographic data and engineering survey. In this paper, two scenes, including active fault topography and the intersection of active fault and engineering are selected as examples to demonstrate the processing methods and workflows of terrestrial LiDAR point clouds from two different aspects. Moreover, the 3D model of each scanning object is

* 收稿日期: 2020-02-24

录用日期: 2020-03-30

网络首发日期: 2021-01-15

基金项目: 国家重点研发计划专项(2017YFC1500104); 国家自然科学基金项目(41774049, 41674051)

作者简介: 谭毅滢(1998年生), 女; 研究方向: 活动构造与地震灾害; E-mail: tanyy9@mail2.sysu.edu.cn

通信作者: 张冬丽(1974年生), 女; 研究方向: 工程地震与地震灾害机理; E-mail: zhangdongli@mail.sysu.edu.cn

established in order to display the scanning area more clearly and accurately, which can provide clear three-dimensional information for quantitative research of active fault topography and engineering anti-dislocation fortification.

Key words: terrestrial LiDAR; point clouds processing; DEM; 3D scene building; active fault

激光雷达扫描系统 (Light detection and ranging, LiDAR) 是一种新兴的三维测量技术, 具有快速、简便、高精度、高分辨率的特点, 系统工作的原理是通过内部集成的测时测角系统记录激光脉冲来回物体表面的时间与角度, 依据激光测距原理得到物体表面各点的三维坐标^[1], 其技术目前已经应用于不同行业领域, 近年来也逐渐应用于地学高精度研究的三维模型建立和信息获取^[1-4]。

根据扫描目标大小、获取信息目的、扫描区工作条件及对空间分辨率要求, LiDAR可以搭载在不同的平台上工作, 如星载、机载、地基、车载、手持等^[1-2]。空间技术和航空技术的快速发展为LiDAR技术的发展提供了高效的搭载平台, 目前国内外对星载和机载LiDAR的应用已经十分广泛, 但星载和机载LiDAR由于搭载平台、成本等的限制, 在对具体工程场地或局部区域数据的获取中不能很好地发挥作用, 而地基LiDAR平台虽然对场地通视条件等有更高的要求, 但对具体场地的建模和数据获取有其独到的优势, 可以做到无死角、低成本等。近年来地基LiDAR技术在活动构造^[3-4]、建筑物提取、农作物评估^[5]、森林调查^[6]等方向的应用表明其可以在具体场景建设中发挥潜力。如在活动构造领域中, 高精度地形地貌数据的获取是定量研究的基础, 以前多使用经纬仪、全站仪、差分GPS等对地形进行测绘, 不仅费时费力、效率较低, 而且易出现人为误差, 不能做到地形地貌的全覆盖。近年来发展的摄影测量方法虽然能够高效获取地表数据, 但其数据质量受到作业时的大气条件和光照条件等因素影响较大^[7-8], 另外, 利用合成孔径雷达干涉测量(InSAR)技术也能获取高精度的地形地貌数据, 但其数据处理技术暂未成熟, 而且测量成本较高^[8]。而地基LiDAR具有空间分辨率高和能够穿透植被直接获取地面信息等的优势和特点, 能够高效地获取真实的高精度地面三维信息。此外, 在工程测量领域, 地基LiDAR也能简便、快速地获取工程的三维信息, 为工程的后续计算与分析提供准确的数据, 与地形地貌测量相结合, 还能工程的地质灾害风险评估提供基础数据和依据。

本文首先利用地基LiDAR技术方法, 在获取不同场地三维点云数据信息的基础上, 从现场控制、数据处理及三维建模等方面介绍了地基LiDAR数据应用过程中关键技术方法和流程, 并以所选取的不同断层发育场地点位的特殊条件为基础, 建立了断错地貌模型、工程场地与活动断层交汇三维模型, 展示了地基LiDAR技术的优势和应用潜力。

1 地基LiDAR数据处理概述

地基LiDAR是一种主动探测手段, 主要工作原理为激光测距原理^[2]。在扫描过程中, 仪器通过测量从发射激光束到物体表面后被反射回来的时间, 计算出物体表面的激光反射点到仪器的距离, 再根据测角结果得到反射点在仪器坐标系下的三维坐标数据^[2-3]。由于激光束有一定的强度, 对植被有一定的穿透力, 因此在扫描植被覆盖区时, 一束激光束会在经过植被时形成多次反射, 在回波中形成多个反射波峰, 据此可以去除部分植被并得到真实地面信息(图1)。本文中使用的是奥地利RIEGL公司的3D Terrestrial Laser Scanner VZ-2000i进行数据获取, 其分辨率达到1 mm (100 m处), 精度达到3 mm (100 m处), 使用配套的RISCAN PRO进行点云数据的处理, 使用3Dreshaper进行三维模型的建立, 使用ArcGIS进行数字高程模型(DEM)的建立。

1.1 点云的初步处理

由于在野外扫描的过程中, 激光不仅在到达地面、植被或建筑时会被反射, 空气中的悬浮尘埃颗粒等也会反射激光, 形成一个或一团悬浮点。因此, 原始的LiDAR点云包括了直接从地面、被测物体上等反射回的一次反射点, 也有从植被反射回的多次反射点, 另外还有因随机误差产生的噪声点和从空气尘埃反射回的悬浮点或称离群点^[9]。为了获得从地面或被测物体上反射回的点云信息, 需要把尘埃、植被等反射形成的悬浮点去除, 这可以通过点云的去噪和滤波操作完成。另外, 为了获得物体三维全方位的信息, 往往需要围绕扫描区布设多个站点, 每个站点获取与相邻站点有重叠部分的点云数据, 因此, 把多站点

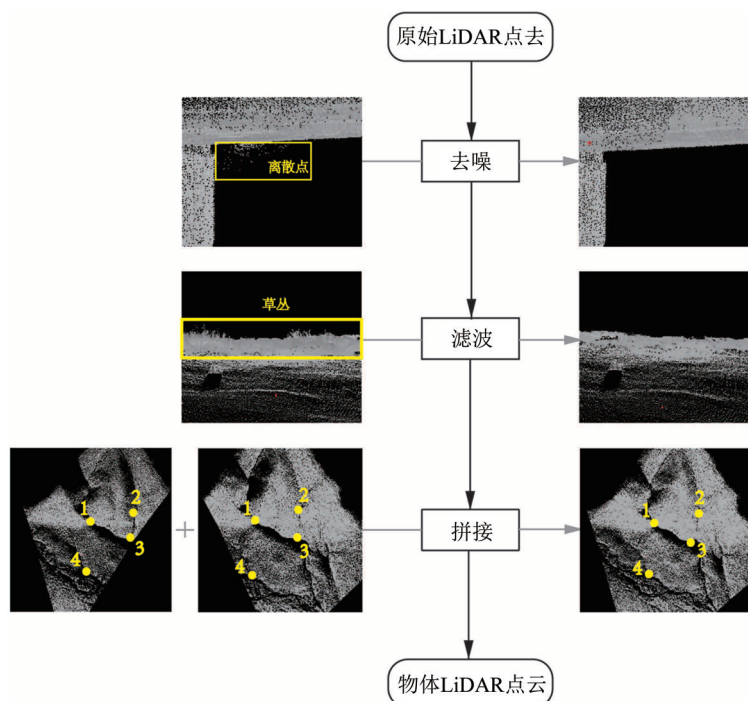


图1 地基LiDAR点云处理流程图

Fig. 1 Terrestrial LiDAR point clouds' processing workflow

的点云数据拼接起来也是点云处理的重要部分。

点云去噪的目的是去除噪声点和离群点^[10]。去除悬浮点云的方法有很多。对于扫描面积较小、视野空旷开阔的点云数据,可以采用手动去除的方法;对于扫描面积较大或点云结构复杂的数据,则可采用如直通滤波、半径滤波等多种算法对点云进行去噪处理。滤波过后,还需要进行检查,以保证无噪声点和离群点去除的遗漏。

点云滤波的目的是获取地面点,即分离地面、植被和建筑物等。由于植被能够形成多次反射点,因此保留最后一个反射点的操作能够初步分离地面点与植被点,但完全把植被、建筑和地面分离,需要更加精细的处理。有关点云滤波的算法研究很多,如移动曲面滤波算法^[11]、迭代最小二乘滤波算法^[12]、渐进加密的三角网滤波算法^[13]等。在本次实验和数据处理过程中,将使用渐进加密的三角网滤波方法来分离植被与地面。渐进加密的三角网滤波方法的原理是植被与建筑等常高于地面,其点云与地面点云往往存在一定的高度差,并且在剖面上其高程值从地面点到植被、建筑点存在突变的过程。因而此方法在平面上均匀提取点云的较低点作为种子点来建立不规则三角网(Triangulated Irregular Network, TIN),即初设地面,通过比较非种子点到临近三角网格的距离和

非种子点到种子点的角度判断该点是否属于地面点,并据此不断更新、扩大种子点数来加密TIN以逼近真实地面,最终使得所有地面点作为种子点参与TIN,而植被、建筑点则仍是非种子点,二者得以区分(图2)。

渐进加密的三角网滤波方法已经发展较为成熟,集成于多种点云处理软件中。它通过迭代加密TIN得到地面点,对曲面不连续性较为敏感^[12]。应用时,通过调整判别参数可以对需要滤去的地物点或植被的大小进行控制,进而应用于其他环境中。

点云拼接是把不同站点的扫描数据在同一坐标系下拼接起来,点云拼接的方法很多,主要分为基于标靶的拼接、几何特征的拼接、控制点三维坐标的拼接和临近迭代配准(Iterative Closest Points, ICP)算法的拼接^[2, 14]。本实验采用基于几何特征的拼接与改进ICP算法相结合的拼接方法,有效地提高了拼接精度。基于几何特征的拼接方法是通过点云中目视容易辨认的几何特征来确定点云重叠部分中的同名点,然后再基于同名点计算点云的变换矩阵进行拼接,其误差常因人为原因而较大。而ICP算法则是在于参考点云与目标点云上取得一定数量同名点的基础上,不断调整变换矩阵直至两点云的同名点间的距离平方之

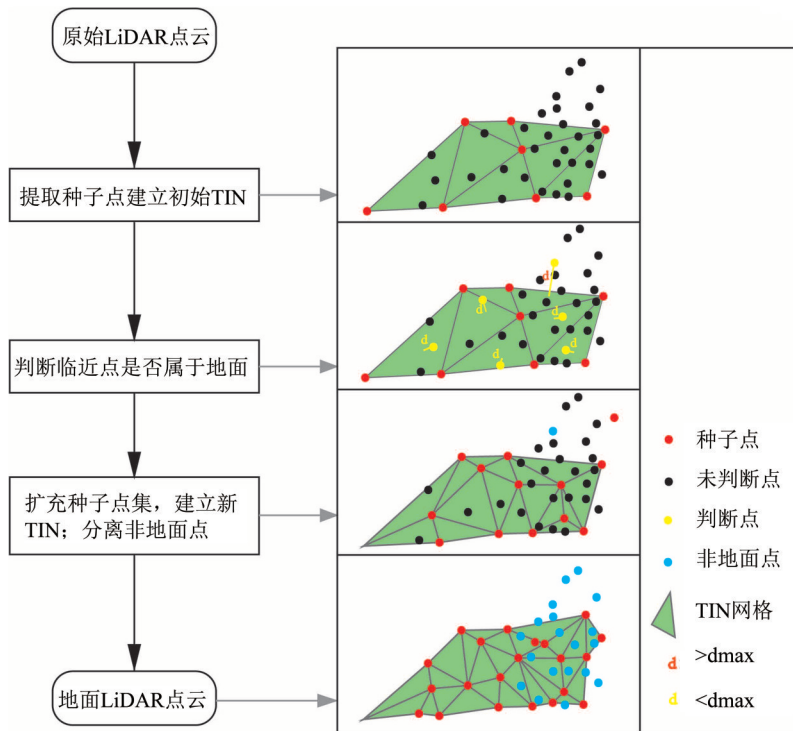


图2 渐进加密的三角网滤波方法原理

Fig. 2 The principle of progressive encryption triangulation method

和达到规定阈值之下来进行拼接^[15-16], 其误差相对较小(图3), 许多改进ICP算法着眼于正确的同名点的提取。本实验所采用的改进ICP算法通过计算一定大小立方体内所有点的最佳拟合平面的重心与法向量, 以此作为参考量, 提取相似的最佳拟合平面对作为同名点。由于法向量能够更好地保留点云表面的细微几何特征, 因此一般对应点正确率较高^[16]。

另外, 采用几何特征与改进ICP算法的拼接相结合的拼接方法, 能够人机交互地对拼接的准确度进行控制, 有效地提高了匹配的精度, 尤其适用于表面崎岖不平的三维实体。

1.2 三维模型重建方法

经过处理的三维点云虽然也可以展示物体的三维形态, 但仍不是真实世界中的三维显示效果, 而且其离散的数据组织形式对后续分析和计算带来很大的不便, 因此需要利用三维点云建立三维模型, 获得连续的数据结构以及更直观、准确的可视化效果^[17-18]。

对不规则的三维实体如地质体、地貌面等建立三维模型的典型方法有三维规则网格法、TIN不规则三角网法和四面体法等^[17-18]。由于地基LiDAR获得的点云都是三维实体的表面点, 不包含实体的内部点, 因此多利用TIN不规则三角网法对点云

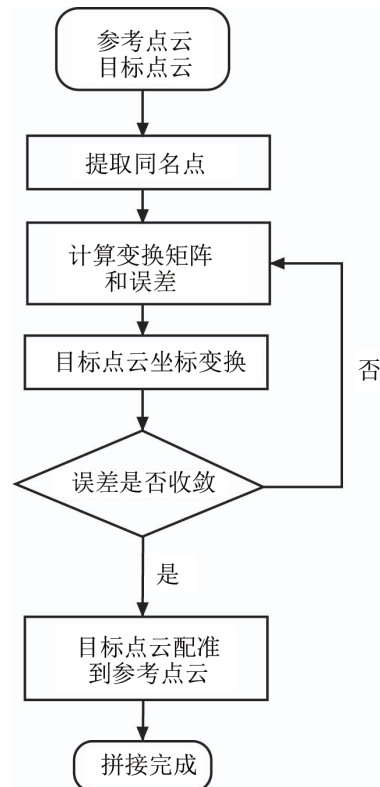


图3 ICP算法流程图(修改自文献^[15])

Fig. 3 Model of ICP algorithm

数据进行处理并建立三维模型^[18-20], TIN 不规则三角网法通过点云中各个点为节点建立三角形以形成表面模型。TIN 多使用 Delaunay 三角划分算法, 所生成的 Delaunay 三角网具有唯一性, 且各线段不相交, 能够很好地描述三维点云所代表的表面。另外, 由于三维点云可能有因扫描缺失和扫描不到而形成空洞的地方, 因此需要利用空洞周围的点云对空洞进行插值填补以后再进行 TIN 网的建立。空洞的插值方法有很多, 需要根据空洞的可能形态进行选择。

对规则的三维实体如建筑、桥梁等, 可以在计算相应的尺寸后使用规则曲面来描述。如对桥梁的圆柱形桥墩, 可以通过点云上不共线的三个点拟合圆柱的直径以及长轴, 建立规则圆柱面; 对建筑外墙平面, 可以通过点云上不共线的三个点拟合平面的倾向和倾角, 建立平面等。规则曲面的建立能够减少数据量, 更精确地填补点云空洞, 但规则曲面间以及规则曲面和不规则曲面间的拓扑关系需要仔细识别及建立。

活动断层作为一种重要的地质构造类型, 对构造运动研究、地震发生机理探讨和工程安全评价等都有重要的意义, 因此活动断层模型构建对工程的安全风险分析有很大的帮助。断层是面状地质体, 在局部地区可以用一个平面近似表示, 其产状可以在现场实测得到, 也可以通过点云性质进行测量获得。使用点云性质进行断层产状测量的原理是断层会造成岩层的错位, 表现为断层面上岩层反射率的突变, 在反射率突变的地方随机选择 3 个点, 使用最小二乘法拟合出最优平面, 即可作为断层面。这两种方法也可以相互验证, 得到更加准确的断层产状。注意断层面的延伸深度不可过大, 且断层面与其两侧地貌面的拓扑关系也需仔细识别及建立。

2 地基 LiDAR 数据的 DEM 重建方法

地基 LiDAR 获取的原始点云经处理后得到的地面点具有 X、Y 坐标和高程数据, 是高密度的离散高程点, 能够为构建高精度高分辨率的 DEM 提供足够的约束。但地基 LiDAR 受到布设位置和通视条件的限制, 在包括河沟的扫描区里, 对弯曲河沟沟谷的扫描效果较差, 易形成沟谷处的数据空区。因此, 地基 LiDAR 可以与扫描区的其他机载 LiDAR 数据相拼接, 弥补沟谷处的数据空区, 提高地面的点云密度。

地面点云数据本质上为离散点数据。以离散点为数据源的规则格网 DEM 建立有不规则三角网法 (TIN) 和直接插值两类。不规则三角网法 (TIN) 是基于离散点建立的不规则三角网模型进行磨光内插得到规则格网 DEM 的方法^[21]。直接插值是通过已知的格网点高程, 计算未知的格网点高程。直接插值有多种方法, 如基于地统计学的克里金插值法、反距离权重插值法、径向基函数插值法、自然邻域插值法、线性插值法、加权平均法等等^[22-23]。前人对各种插值方法及其精度进行了评定, 认为不同的地区对不同插值方法的适用性不同, 需要针对具体地区进行分析, 但总体而言, 基于地统计学的克里金插值法精度最高^[10, 23-24]。

3 复杂地形条件下活动断层断错地貌数据获取与模型建立

本实验所用的地形点云数据扫描于甘肃省白银市景泰县小红山地区。当地为干旱气候, 存在多条季节性冲沟, 形成了广阔的冲积扇, 植被低矮稀疏。扫描区面积约 2.5 万 m², 地处冲沟出山口, 最大高差 50 m。冲沟深度 1~2 m, 向冲积扇方向逐渐变浅; 冲沟较为平直, 仅出山口处具左旋位错, 指示断层位置。山前有陡坎, 垂直高约 2 m。野外扫描时, 共设置扫描站 5 个, 其位置如图 4。

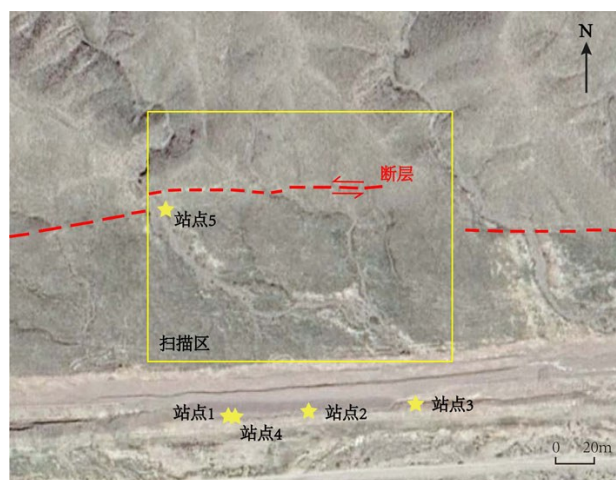


图 4 断错地貌扫描站点位置

黄星代表站点位置, 红色虚线为推测断层位置;

卫星图来自谷歌地图 2020 CNES/Airbus

Fig. 4 Location of scan positions in fault topography

The yellow stars stand for the position of station,

the red dotted line stands for the fault;

The satellite image comes from Google Earth 2020 CNES/Airbus)

扫描获得的原始点云如图5a所示。由于扫描区视野开阔, 因此手动搜索离群点并删除。去除植被时, 首先进行回波滤波, 仅保留每束激光的最后一个反射点; 再使用渐进加密的三角网滤波方法, 考虑扫描区的植被低矮且分散的特征设置判别参数后, 得到地面点。点云拼接操作中, 以第一站为基准, 先把其他四站以及当地机载LiDAR数据通过特征点初步与第一站相拼接; 再使用改进的ICP算法进行调整, 共使用最佳拟合平面2 110对, 拼接误差达到0.013 6, 拼接结果如图

5b, 拼接点云平均点云密度为 80 m^{-2} , 点云密度分布如图5c。使用ArcGIS软件导入点云, 在3D Analyst Tools模块中使用普通克里金方法建立DEM(图5d), 分辨率为 0.2 m 。

使用高精度点云建立高分辨率的DEM, 可以清晰地显示断层形态, 有利于断层三维形态的显示, 同时可以通过对断层陡坎、河沟错断等构造地貌进行高精度的测量, 获得关于断层水平运动、垂直运动等的定量数据。

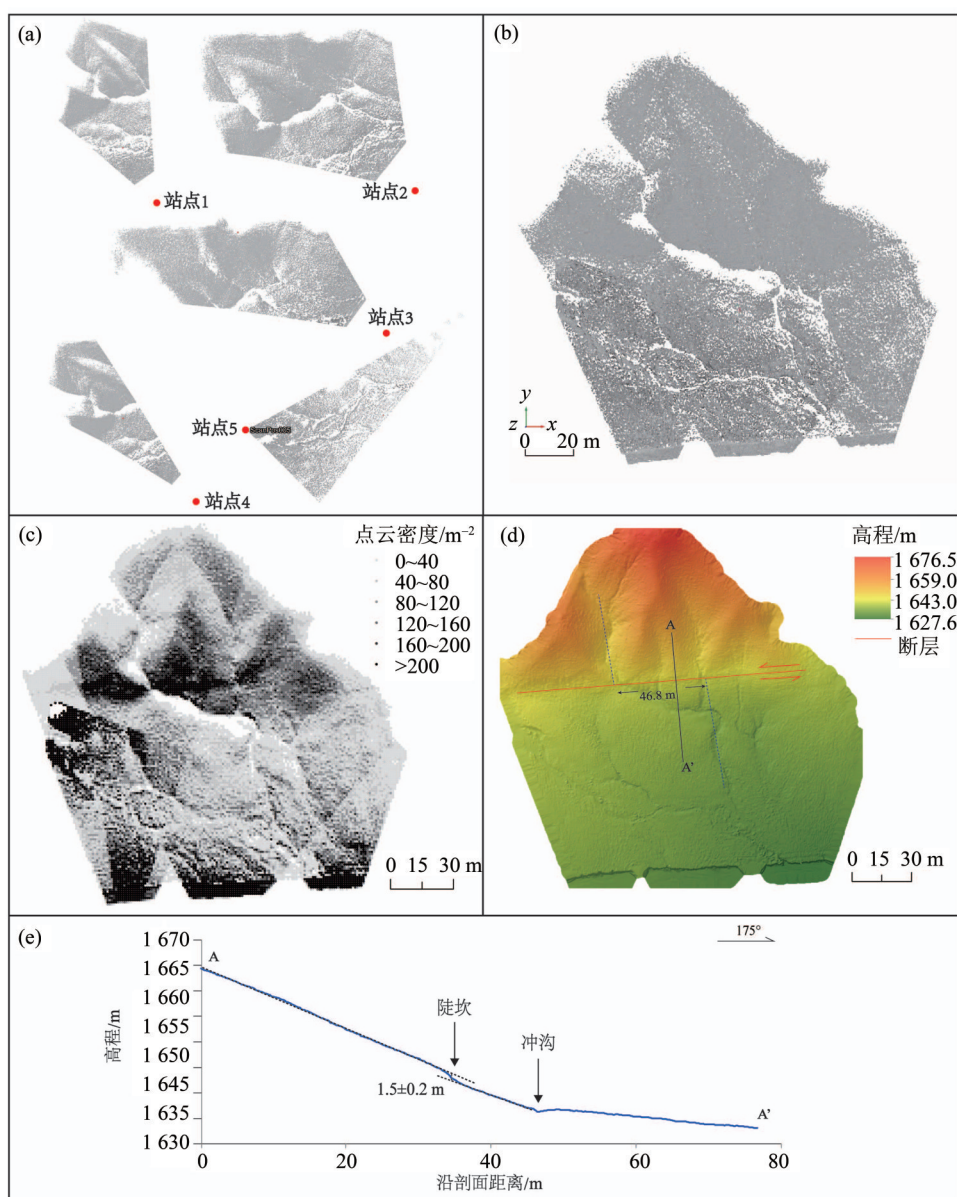


图5 断错地貌三维点云处理过程

(a) 各站点原始点云图像; (b) 点云拼接结果; (c) 扫描区点云密度; (d) DEM; (e) 地形测量剖面

Fig. 5 Processing of 3D point from fault topography

(a) image of primary point clouds from each scan position; (b) image of point clouds registration;

(c) point density of scan area; (d) DEM; (e) topography measurement profile

4 工程场地与活动断层交汇三维场景再现

实验所用的数据扫描于宁夏省中卫市定武高速一桥梁与香山一天景山断裂交汇的位置。扫描区包括有少量植被覆盖的山体以及桥梁, 面积约为 $9\ 000\ \text{m}^2$, 断层出露于山体两种不同颜色岩石接触处, 实测断层走向为 300° 左右, 倾角为 41° 左右, 断层斜穿高速公路桥梁, 桥梁走向北东 86° 左右。野外扫描时, 共设置扫描站 8 个, 其位置如图 6。

扫描获得的原始点云如图 7(a) 所示。由于扫描区视野开阔, 因此手动搜索离群点并删除。分离地面点时, 首先进行回波滤波, 仅保留每束激光的最后一个反射点; 其次使用渐进加密的三角网滤波方法, 把植被集中处分割成相对平坦的几块分别进行滤波。点云拼接时, 共使用最佳拟合平面 $740\ 558$ 对, 拼接误差达到 $0.028\ 2$, 拼接结果如图 7(b)。最后把地面与桥梁分离, 分类结果如图 7(c)。

使用 3Dreshaper 软件导入地面点云并建立 TIN 网, 平滑后使用 “Filling hole” 工具对空洞进行插值填补; 导入桥梁点云并建立 TIN 网, 平滑后, 对



图 6 工程场地与断裂交汇处扫描站点位置
黄星代表站点位置, 红色虚线为推测断层位置;
卫星图来自谷歌地图 2020 Maxar Technologies

Fig. 6 Location of scan positions in the intersection
of active fault and engineering

The yellow stars stand for the position of station, the red dotted line stands for the fault; The satellite image comes from Google Earth 2020 Maxar Technologies

较小的空洞使用 “Filling hole” 工具进行插值填补, 对较大的空洞如未扫描到的桥墩部分, 使用 “Construct” 工具栏中的 “Best Cylinder” 工具根据扫描到的桥墩部分进行拟合并拼接。根据在点云

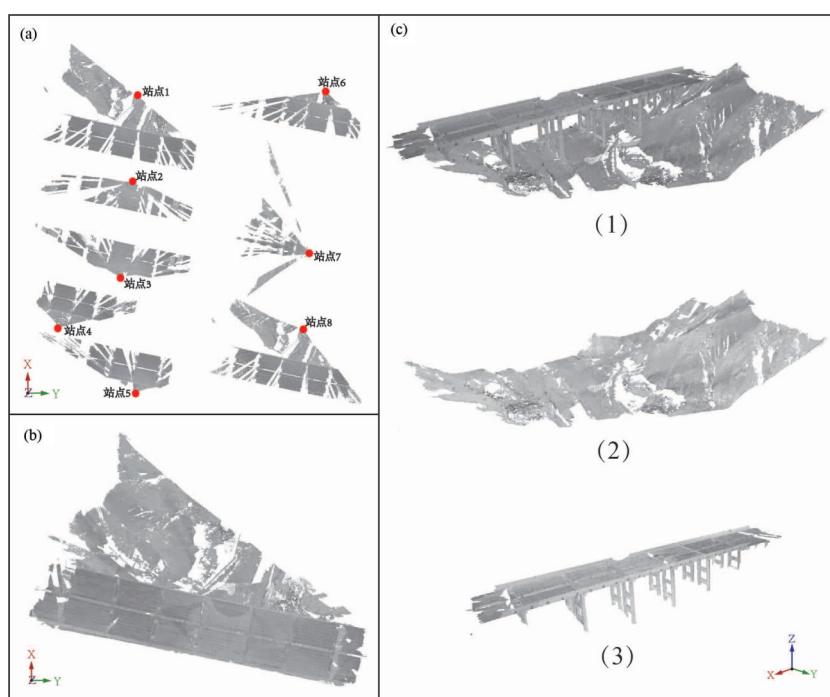


图 7 工程场地与断裂交汇点云处理过程

(a) 各站点原始点云; (b) 点云拼接结果; (c): (1) 扫描区整体点云, (2) 扫描区地面点, (3) 扫描区工程点

Fig. 7 Processing of point clouds from the intersection of active fault and engineering

(a) image of primary point clouds from each scan position; (b) image of point clouds registration;

(c): (1) entire point clouds of scan area, (2) ground points, (3) engineering points

数据中观察到的不同反射率的岩石的接触部位以及现场实测的断层产状, 在相应位置上建立相同产状的平面作为断层面。最终建模结果如图8, 断层产状为 $212^{\circ}/41^{\circ}$, 与桥梁成 36° 斜交关系。

工程场地和活动断裂交汇处的三维显示能使

得工程与地面、断层面的关系更加直观, 清晰地展示出工程所面临的安全隐患。另外, 通过定量测量模型中的断层产状、断层与工程的相对位置以及工程本身的模型数据等, 可以为模拟断层活动时工程的安全风险提供更全面和准确的依据。

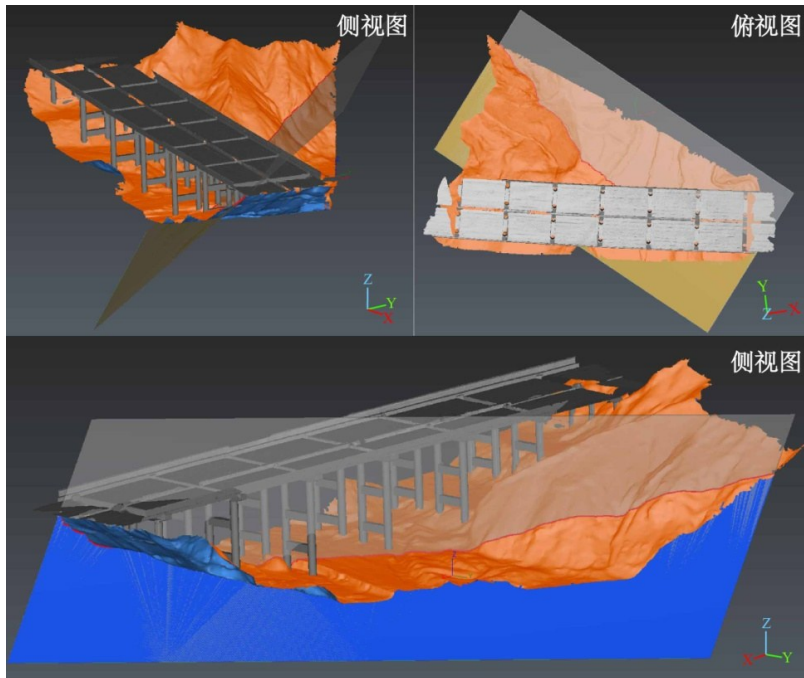


图8 工程场地与断裂交汇三维模型多角度图

长方形平面为断层面位置, 红色线为断层在地表迹线, 橙红色曲面为地形面, 灰黑色为桥梁

Fig. 8 Image of the intersection of active fault and engineering from multi-angle

Rectangular plane stands for fault plane, red line stands for the intersection of fault plane and terrain, orange curved surface stands for terrain, grey object stands for bridge

5 结论与展望

地基LiDAR点云数据的处理过程虽然繁琐, 但总体思路清晰, 主要分为点云的去噪、滤波、分类和配准等4个步骤。目前已经发展出大量的处理算法, 应针对不同特征的扫描区, 有机地结合各类处理算法, 才能获得更为准确、真实的三维点云。

不同的场景建模过程中, 要结合实际选择合适的数据处理方法。本文实验所选择的两种场地类型中: 活动断层断错微地貌建模中, 多使用TIN不规则三角网法; 对于规则形态工程建筑建模, 则应结合工程本身的几何特性, 结合使用TIN不规则三角网法和规则曲面拟合; 而对于对地形以及工程影响重大的断层, 可以在提前测量其产状的基础上, 使用平面作为断层面以建立模型。

实验测试结果显示, 地基LiDAR比较适合应用于活动构造领域中断裂区地形地貌的测绘, 为断裂区精细地貌填图、微地貌识别和构造地貌定量研究带来更准确和丰富的数据。另外, 还能使用地基LiDAR对工程以及周围地形进行测量和三维建模, 提供准确的数据对工程自身的安全性、稳定性等进行评估, 对工程的地质灾害风险计算提供更加详实、准确的交互资料。总之, 地基LiDAR能够为活动构造研究和工程测量提供高精度、高分辨率的三维数据, 是一种简便快速的数据获取手段, 其应用潜力十分巨大。

致谢 中山大学地球科学与工程学院蔡火灿, 罗朝升, 郭泽铭, 黄坚森, 蔡鸿耿和李子龙等参加了现场数据采集; 数据处理过程得到了中国地震局地质研究所毕海芸副研究员的指导; 论文修改过程中, 编辑和审稿专家提出了建设性的意见和建议, 在此表示衷心的感谢。

参考文献:

- [1] 陈涛. 机载激光雷达技术在构造地貌量化研究中的应用[D]. 北京: 中国地震局地质研究所, 2014.
CHEN T. Application of airborne LiDAR (Light Detection and Ranging) for quantitative tectonic geomorphology [D]. Beijing: Institute of Geology China Earthquake Administration, 2014.
- [2] 李平. 地面三维激光点云数据处理及模型构建[D]. 四川: 成都理工大学, 2017.
LI P. 3D terrestrial laser scanning data processing and model reconstruction [D]. Sichuan: Chengdu University of Technology, 2017.
- [3] 郑文俊, 雷启云, 杜鹏, 等. 激光雷达(LiDAR): 获取高精度古地震探槽信息的一种新技术[J]. 地震地质, 2015, 37(1): 232-241.
ZHENG W J, LEI Q Y, DU P, et al. 3-D laser scanner (LiDAR): a new technology for acquiring high precision palaeoearthquake trench information [J]. Seismology and Geology, 2015, 37(1): 232-241.
- [4] 康帅, 张景发, 崔效峰, 等. 基于高精度地基LiDAR技术的活动断层错断地貌研究——以冷龙岭活动断裂带为例[J]. 地震, 2017, 37(3): 61-71.
KANG S, ZHANG J F, CUI X F, et al. Offset landform caused by active fault based on high precision terrestrial LiDAR data: a case study of the Lenglongling active fault zone [J]. Earthquake, 2017, 37(3): 61-71.
- [5] 邱小雷, 方圆, 郭泰, 等. 基于地基LiDAR高度指标的小麦生物量监测研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 159-166.
QIU X L, FANG Y, GUO T, et al. Monitoring of wheat biomass based on terrestrial-LiDAR height metric [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 159-166.
- [6] 晏颖杰, 范少辉, 官凤英. 地基激光雷达技术在森林调查中的应用研究进展[J]. 世界林业研究, 2018, 31(4): 42-47.
YAN Y J, FAN S H, GUAN F Y. Research progress in TLS technology in forest investigation [J]. World Forestry Research, 2018, 31(4): 42-47.
- [7] 魏占玉, RAMON A S, 何宏林, 等. 基于SfM方法的高密度点云数据生成及精度分析[J]. 地震地质, 2015, 37(2): 636-648.
WEI Z Y, RAMON A S, HE H L, et al. Accuracy analysis of terrain point cloud acquired by "Structure From Motion" using aerial photos [J]. Seismology and Geology, 2015, 37(2): 636-648.
- [8] 毕海芸, 郑文俊, 曾江源, 等. SfM摄影测量方法在活动构造定量研究中的应用[J]. 地震地质, 2017, 39(4): 656-674.
BI H Y, ZHENG W J, ZENG J Y, et al. application of SfM photogrammetry method to the quantitative study of active tectonics [J]. Seismology and Geology, 2017, 39(4): 656-674.
- [9] 郭浩. 点云库PCL从入门到精通[M]. 北京: 机械工业出版社, 2019.
- [10] 于彩霞, 董箭, 李改肖, 等. 基于LiDAR点云的高精度DEM构建方法[J]. 地理空间信息, 2015, 13(3): 22-24+8.
YU C X, DONG J, LI G X, et al. Research on high precision DEM construction method based on LiDAR [J]. Geospatial Information, 2015, 13(3): 22-24+8.
- [11] 张小红. 机载激光雷达测量技术理论与方法[M]. 湖北: 武汉大学出版社, 2007.
- [12] KRAUS K, PFEIFER N. Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, 1998, 53(4): 193-203.
- [13] AXELSSON P. DEM generation from laser scanner data using adaptive TIN models [J]. IAPRS, 2000, 33(B4): 110-117.
- [14] BESL P J, McKAY N D. A method for registration of 3-D shapes [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992, 14(2): 239-256.
- [15] 戴静兰, 陈志杨, 叶修梓. ICP算法在点云配准中的应用[J]. 中国图象图形学报, 2007, 12(3): 517-521.
DAI J L, CHEN Z Y, YE X Z. The application of ICP algorithm in point cloud alignment [J]. Journal of Image and Graphics, 2007, 12(3): 517-521.
- [16] 解则晓, 徐尚. 三维点云数据拼接中ICP及其改进算法综述[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),

- 2010, 40(1): 99-103.
- XIE Z X, XU S. A survey on the ICP algorithm and its variants in registration of 3D point clouds[J]. Periodical of Ocean University of China, 2010,40(1):99-103.
- [17] 王李管,何昌盛,贾明涛. 三维地质体实体建模技术及其在工程中的应用[J]. 金属矿山, 2006(2): 58-62.
- WANG L G, HE C S, JIA M T. 3D geological solid modeling technology and its Application in engineering [J]. Metal Mine, 2006(2): 58-62.
- [18] 曹代勇,李青元,朱小弟,等. 地质构造三维可视化模型探讨[J]. 地质与勘探, 2001, 37(4): 60-62.
- CAO D Y, LI Q Y, ZHU X D, et al. Study on the 3D visual model of geological structure [J]. Geology and Prospecting, 2001, 37(4): 60-62.
- [19] 王晨旭,胡引翠,王崇倡,等. 基于TIN的露天矿区地形精细模型构建研究[J]. 金属矿山, 2019(9): 147-153.
- WANG C X, HU Y C, WANG C C, et al. Study on the construction of fine open-pit mine terrain model based on Tin[J]. Metal Mine, 2019(9):147-153.
- [20] 赵义来,刘亮明,胡荣国. 基于地质体产状特征及建模数据特点的三维地质建模方法探讨——以安徽月山矿田为例[J]. 桂林理工大学学报, 2018, 38(4): 752-760.
- ZHAO Y L, LIU L M, HU R G. 3D geological modeling based on the occurrence of geological bodies and data characteristics: a case study from Yueshan ore field, Anhui[J]. Journal of Guilin University of Technology, 2018, 38(4): 752-760.
- [21] 王家耀,崔铁军,苗国强. 数字高程模型及其数据结构[J]. 海洋测绘, 2004, 24(3): 1-4.
- WANG J Y, CUI T J, MIAO G Q. Digital elevation model and data structure [J]. Hydrographic Surveying and Charting, 2004, 24(3): 1-4.
- [22] 杨秋丽,魏建新,郑江华,等. 离散点云构建数字高程模型的插值方法研究[J]. 测绘科学, 2019, 44(7): 16-23.
- YANG Q L, WEI J X, ZHENG J H, et al. Comparison of interpolation methods of digital elevation model using discrete point cloud data [J]. Science of Surveying and Mapping, 2019, 44(7): 16-23.
- [23] 周兴华,姚艺强,赵吉先. DEM内插方法与精度评定[J]. 测绘科学, 2005, 30(5): 86-88.
- ZHOU X H, YAO Y Q, ZHAO J X. Research on interpolation and accuracy assessment of DEM [J]. Science of Surveying and Mapping, 2005, 30(5): 86-88.
- [24] 张锦明,游雄,万刚. DEM插值参数优选的试验研究[J]. 测绘学报, 2014, 43(2): 178-185+192.
- ZHANG J M, YOU X, WAN G. Experimental research on optimization of DEM interpolation parameters [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2014, 43(2): 178-185+192.

(责任编辑 秦社彩)