

# 三维激光扫描技术在矿洞治理勘测中的应用探究

董凤彬<sup>1</sup> 王军宁<sup>2</sup> 刘奇政<sup>1</sup> 陈绪刚<sup>3</sup>

DONG Fengbin WANG Junning LIU Qizheng CHEN Xugang

## 摘要

基于三维激光扫描技术的矿洞测量是矿洞治理勘测工程测量的新方法。针对废弃矿洞存在的洞内环境差、光线暗、有随时坠石可能性、不利于传统测量技术作业等问题,采用天宝 X7 扫描系统与其域创新 L1 SLAM 移动扫描仪相结合在某废弃矿山进行三维扫描测绘作业,探讨了矿洞内三维点云数据采集与融合方案及数据处理方法,基于 X7 站式扫描数据检验 SLAM 移动扫描仪的数据成果是否满足矿山测量规范问题,以巷道数字化及溜井检测项目为例分析替代的可能性。三维激光扫描技术作为一种非接触式激光测量技术,可以快速真实地获取巷道的三维模型,而且对井下数据采集的安全性和效率有巨大的提升,为整治矿洞提供了精确、详尽的基础空间数据,从而为矿洞合理整治提供方案,在准确度、便捷性、数字化、作业效率及安全性方面均有明显的提高。

## 关键词

三维扫描; 点云; 矿洞测量; 天宝 X7; 其域创新 L1 SLAM

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.08.036

## 0 引言

随着矿产资源的不断开发利用,矿山环境问题日益突出。矿洞的安全性和环境保护成为矿山管理中的重要课题<sup>[1-2]</sup>。传统的矿洞勘测方法已无法满足现代化管理的需求,作业方法存在效率低、精度不足和安全隐患等问题。特别是在一些危险区域,传统勘测方法的局限性更加明显,迫切需要一种更为高效、安全和精确的勘测手段。

三维激光扫描技术作为一种非接触式测量手段,近年来在勘测领域逐渐崭露头角。该技术通过高速激光扫描,能够快速、全面地采集被测物体表面的空间三维信息,并生成高精度的实体三维网格模型。与传统测量方法相比,三维激光扫描技术具有显著的优势。首先,它能够在短时间内完成大面积的扫描任务,大大提高了工作效率。其次,该技术提供毫米级的测量精度,确保数据的准确性。再者,三维激光扫描技术能够全方位地获取矿洞内部的所有细节信息,无死角地展现矿洞的真实情况<sup>[3]</sup>。最重要的是,作为一种非接触式测量手段,三维激光扫描技术避免了人员进入矿洞内部的风险,极大地保障了工作人员的安全,尤其对于溜井作业面构造特殊,人员无法进入进行探查的情况,采用非接触式的三维激光扫描仪,可以更加快速采集溜井内部的点云数据,并

依据这些数据建立溜井的三维模型,在三维空间中分析溜井的内部情况,为溜井的治理和工程布置提供科学依据。

本研究使用了天宝公司生产的架站式三维激光扫描仪与其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统,对巷道与溜井两种运矿通道分别选取相同的区间和标段进行同时段数据采集,并统一利用天宝 TRW 等软件生成三维图像完成与原全站仪控制点数据进行比对,并依据《GB/T51178—2016 建材矿山工程测量规范》的要求完成精度分析与适用性判断<sup>[4]</sup>。

## 1 工作原理及技术方案

### 1.1 工作原理

传统全站仪测绘技术在矿洞中只能提供断面特征点、巷道中线和导线坐标数据,只能用于三维巷道仿真模型的建设,因此很难得到全面真实的巷道模型。针对矿洞井下环境复杂不确定因素多的特点,而且长期受爆破影响,存在大量不安全因素,如片帮、冒顶等,使得技术人员无法长时间在此环境下工作,本次研究选用了天宝耐特 X7 扫描系统和其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统。该系统的数据采样率高,激光扫描频率达到 50 万点/s,获取点位信息的能力不受作业时间与空间限制,可以对目标物进行高密度的三维数据采集与空间重建,从而达到实景复刻。

此外,基于 IMU(惯性测量单元)算法的自动配准技术应用在架站式三维激光扫描中<sup>[5]</sup>,设备集成的 IMU 算法(包括自动整平和自动校准)能够保障与提高扫描数据的精度和一致性。

自动配准技术的原理如下。

1. 武汉天宝耐特科技有限公司 湖北武汉 430000
2. 武汉海德斯路科技有限公司 湖北武汉 430000
3. 湖北海派海洋科技发展有限公司 湖北武汉 430000

设  $R$  为旋转矩阵,  $T$  为平移向量,  $p_i$  和  $q_i$  分别为两组对应点, 则配准公式为:

$$q_i = R p_i + T \quad (1)$$

点云配准成功的标准是配准后的  $p_i$  和  $q_i$  的欧式距离最小, 使用最小二乘算法得出点云之间平均欧式距离最小的判别方法为:

$$f(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - (R p_i + T))^2 = \min \quad (2)$$

该技术对作业面现场环境要求较高, 需稳定架设, 但在实际应用过程中往往很难具备该条件, 因此基于自动配准技术的高阶算法 SLAM 移动配准算法应运而生。手持式 SLAM 扫描系统正是基于此种算法应运而生的, 其算法原理如下<sup>[6]</sup>。

设两帧点云数据:

$$P = \{p_i, i=1, 2, 3, 4 \dots N\} \quad (3)$$

$$Q = \{q_j, j=1, 2, 3, 4 \dots N\} \quad (4)$$

分别为通过深度神经网络提取的特征表示:

$$F(P) = \{f(p_i), i=1, 2, 3, 4 \dots N\} = \vec{P} \quad (5)$$

$$F(Q) = \{g(q_j), j=1, 2, 3, 4 \dots N\} = \vec{Q} \quad (6)$$

通过计算特征向量之间的相似度 (如内积或欧氏距离), 找到对应点对  $(p_i, q_j)$ , 进行位姿估计, 设旋转矩阵为  $R$ , 平移向量为  $T$ , 通过最小化目标函数来估计位姿变化<sup>[7]</sup>:

$$f(R, T) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (q_i - (R p_i + T))^2 = \min \quad (7)$$

使用深度学习模型直接回归出旋转矩阵  $R$  和平移向量  $t$ 。设深度学习模型为  $M$ , 输入为特征对  $(f(p_i), f(q_j))$ , 输出为位姿变化:

$$(R, T) = M((f(p_i), g(q_j))) \quad (8)$$

根据估计出的位姿变化, 将点云  $P$  对齐到  $Q$ :

$$q_i = R p_i + T \quad (9)$$

深度学习的 SLAM 配准算法的核心技术即“深度神经网络 (DNNs) 的视差估算”<sup>[8]</sup>。视差估算 (也称为立体匹配) 是三维场景重建中机器人技术和自动驾驶中一个经典而重要的问题, 视差估算的精度决定着手持式 SLAM 扫描系统的精度与实用性。

为了解决视差估计的精度问题, 研究人员提出了 CVM-Conv3D 网络方法<sup>[9]</sup>, 来更好地应对捕捉立体图像特征要求, 从而提高算法估计精度。该方法的核心思想是通过在每一个视差级别上将左特征图与其对应的右特征图连接来生成成本量 (同名像对), 然后再通过三维卷积层自动提取成本体积的特征。但 DNNs 中的三维操作是计算密集型的, 即使使用当前强大的人工智能加速器且绘图处理器、基于 3D 卷积 DNN 最先进的差异估计子生成结果的依然延迟非常高。分析个中原因可知: 一方面, 它需要大量的内存

来卸载这个型号; 另一方面, 即使是在一个非常强大的英伟达特斯拉 V100 GPU 上, 使用 CVM-Conv3D 模型, 内存消耗和高计算量工作负载依然使 CVM-Conv3D 方法难以实现现实中部署。图 1 是使用 Tesla V100 和 Jetson AGX GPU 进行数据处理时, 对不同算法的延迟统计。

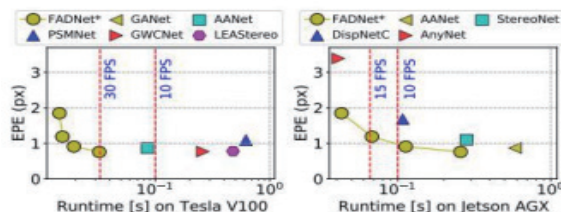


图 1 一个具有挑战性的样本的性能说明图

由图 2 可以看出, (a) 为左侧输入图像, (b) 为正确的输入图像。CRL [16] 的 (c) 结果, 它只运行 0.03 s, 但在外壳上产生错误的视差值。GANet [10] 的 (d) 结果, 产生接近地面的真实值, 但消耗 7.5 GB GPU 内存, 对一个立体图像对运行 2.29 s。本文的 FADNet++ 的 (c) 结果只消耗 2.3 GB GPU 内存, 运行 0.03 s 以产生相同的精确值。所有的数据都是在英伟达特斯拉 V100 GPU 上收集的。

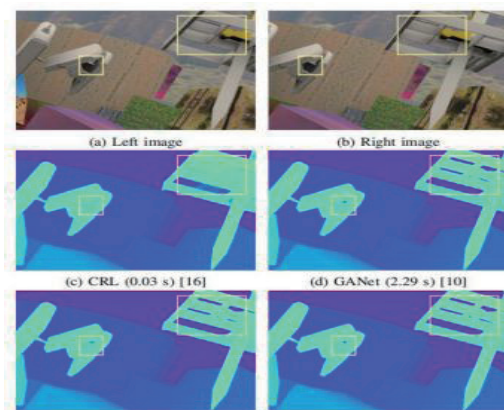


图 2 不同方法运行时, VS EPE

在一个 GPU Tesla V100 服务器上, 只有本文的 FADNet 可以达到 30 帧/s, 而 EPE 和那些 CVM-Conv3D 型号一样低。在移动 GPU Jetson AGX 上, 本文的 FADNet 不仅达到 15 帧/s, 而且比 AnyNet 产生的 EPE 要低。

为了方便工程师设计出高效的立体匹配网络结构, 最近的一些研究也利用了自动机器学习 (AutoML), 特别是神经结构搜索 (NAS) 技术, 来搜索最优的网络运营商及其之间的连接。然而, 即使是在服务器 GPU 上, 这些最先进的方法仍然远非实时推断, 因为它们仍然是基于复杂的网络堆叠或低效率的 3D 卷积操作。此外, 另一系列的研究主要集中在用于快速推理的轻量级网络结构上, 如立体网和 AnyNet。然而, 轻量级模型显著地牺牲了模型的准确性, 特别是在一些复杂的真实数据集上。

为了实现一个实用的立体匹配模型，联合香港浸会大学提出 FADNet++ 算法模型，它可以在可配置的网络下产生实时和准确的视差估计。FADNet++ 算法模型如图 3。

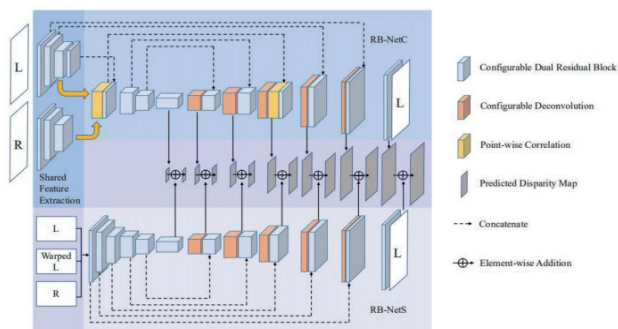


图 3 FADNet++ 的模型结构

“可配置”表示卷积 / 反褶积层的通道数可以通过可调比例来控制整体模型的大小。“L”表示左侧输入图像，“R”表示右侧输入图像。“翘曲 L”表示用 RB-NetC 的初始预测视差图扭曲右侧图像产生的对齐的左侧图像。不同的预测视差图的大小反映了它们在网络中的尺度。

## 1.2 技术方法

### 1.2.1 测量内容

使用天宝公司生产的架站式 X7 三维激光扫描仪与其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统，分别对某矿硐 K1+150 里程至 K3+150 里程位置（含巷道部分及溜井部分），同时进行扫描。扫描完成后，利用点云进行专题要素采集和模型体积计算，并提取特征点（检查点）与测量区间内预设高精度控制点进行精度复核<sup>[10]</sup>。

### 1.2.2 测量流程

测量流程主要包括控制测量、点云外业采集、预处理、内业成果编辑等工作流程，如图 4 所示。

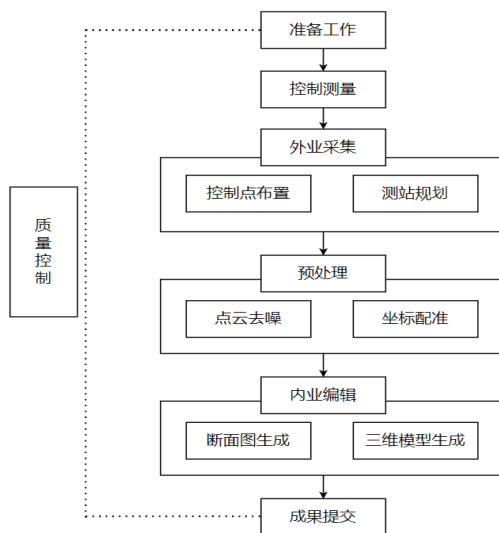


图 4 三维激光扫描技术测量流程

外业采集阶段：需要使用高精度全站仪测量设备进行控

制点布设，然后根据实地情况进行测站摆放位置和扫描距离的规划，并完成所有测区的点云采集及数据拼接<sup>[11]</sup>。预处理阶段：利用软件对点云进行空中噪点及多余点云的去噪、分割，以及点云的地理坐标转换操作。内业成果编辑阶段：利用点云后处理软件加载点云，生成各种专题成果。

### 1.2.3 关键技术方法

天宝耐特 X7 扫描系统扫描仪特点主要包括自动整平、自动校准、自动配准、地理坐标转换等。

（1）自动整平：在测绘领域中仪器是否整平十分重要，可提高点云扫描的精度，减少标靶的使用，X7 具有测绘等级的整平精度。

（2）自动校准：三维激光扫描仪属于高精度设备，X7 内置了精密温度校准系统，在每一站扫描任务开始前都会进行自动校准，避免数据有误。

（3）自动配准：X7 搭配平板作业，平板上的控制软件具有数据浏览、自动配准等功能。本站扫描结束后自动与上一站数据进行配准，并显示配准误差信息，最后一站完成时即可获取整体配准后的成果点云。

其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统的特点包括以下几方面。

（1）体积小，重量轻，易于携带和操作，不受固定架或支撑设备的限制，能够在运动状态下快速完成扫描工作，采集时间相较于架站式三维激光又有显著缩短。

（2）基于“FADNet++ 的模型结构”算法，扫描速度高达 32 万点/s 的同时避免了分层、漂移、歪斜，且数据可实时回传与预览。

## 2 应用实例

测量的矿硐里程为 K1+150 至 K3+150，矿硐内壁特征点较少，比较考验扫描仪的性能。

矿硐内，用全站仪以 150 m 间隔均匀布设了 13 个控制点，控制点绝对精度均在 2 mm 以内。测量人员按里程 K1+150 至 K3+150 里程方向，将控制点序号编为 01~13。

本次测量取序号 01、03、05、07、09、11、13 控制点作为扫描点云坐标转换的控制点，记点名为 K01、K03、K05、K07、K09、K11、K13；取序号为 02、04、06、08、10、12 控制点为检查点，用于与坐标转换后的点云进行精度核验，记点名为 J02、J04、J06、J08、J10、J12。

### 2.1 外业采集

首先，天宝耐特 X7 扫描系统外业数据采集。

（1）控制点布设测量。外业开始前需布设控制点，以便后期将相对坐标框架的点云转换为绝对坐标框架下的点云<sup>[4]</sup>。本项目共设置 7 个控制点和 6 个检查点，并利用天宝 S9HP 1 秒精度全站仪测量其绝对坐标框架下的坐标。

（2）测站规划。为保证矿硐数据完整性，本次采用“逐步推进”方法即逐步向前推进扫描作业，确保扫描无死角和



测站间点云数据一定的重叠度，共设 82 站，均匀分布于矿洞内硐顶及硐壁。

(3) 测站扫描。如图 5，将天宝耐特 X7 扫描系统架设在规划的测站位置进行扫描，每站扫描时间约为 2 min，整个测段采集时间为 2 h。



图 5 天宝耐特 X7 与其域创新 L1 扫描现场

其次，L1 手持式 SLAM 扫描系统外业数据采集。

其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统外业数据采集流程较为简单，主要分为以下步骤。

(1) 扫描初始化：长按设备电源键，等待激光头开始转动，控制软件界面出现实时轨迹、高程点云及实时拍摄的图像。

(2) 采集点云：手持设备沿着矿洞扫描测区，注意将测区完整地扫描下来，整个采集实际约 30 min。

2.2 数据预处理

首先，天宝耐特 X7 扫描系统数据预处理。

通过天宝 RealWorks 进行内业编辑，通过“1+2”“1+2+3”递进模式进行数据预拼接，形成一个整体数据，通过整体精化算法和控制点，将点云数据整体进行平差计算并配准到对应坐标系，然后使用刺点的方式进行“地理坐标转换”。经过点云滤波，多余点云剔除，抽稀。如图 6 所示，生成 LAS 数据格式。

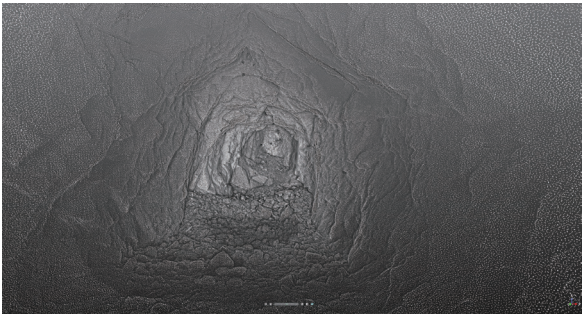


图 6 经预处理后的部分点云数据

其次，L1 手持式 SLAM 扫描系统数据预处理。

使用其域创新 Lixel Studio 软件进行 SLAM 点云数据处理流程如图 7，可实现导入外业采集的工程文件，在其域创新软件全局优化，可一键完成全自动的点云滤波、点云坐标转换、抽稀等工作。

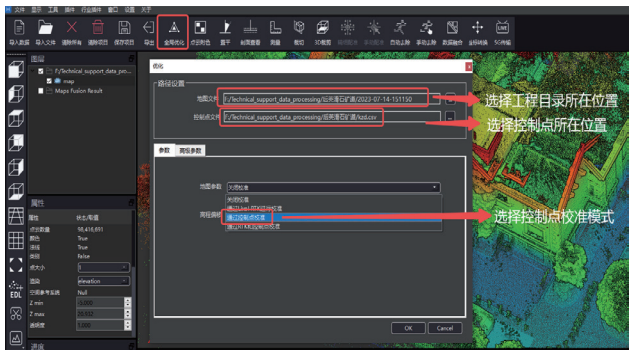


图 7 Lixel Studio 处理流程

2.3 内业成果编辑

(1) 专题要素采集。点云滤波完成后，使用天宝 RealWorks 软件断面工具进行断面图分析和创建。该软件能够自动生成断面图<sup>[12]</sup>，此外，通过三维点云数据生成的断面图能够快速导出并导入 DMine 及 CASS 软件，从而获得更加直观的数据信息<sup>[13]</sup>。

(2) 模型数据生成。将点云滤波完成后，通过天宝 RealWorks 软件进行无投影 Mesh 模型的构建，基于 Mesh 网格包络计算矿洞整体体积。

2.4 巷道部分精度验证与分析

本次实验，使用全站仪测得的高精度检查点坐标如表 1 所示。

表 1 检查点坐标

检查点	北坐标	东坐标	高程
J02	2 571 487.995	467 122.092	40.354
J04	2 571 784.383	467 083.896	37.539
J06	2 572 083.385	467 105.253	34.716
J08	2 572 372.007	467 185.748	31.897
J10	2 572 639.447	467 322.301	29.067
J12	2 572 873.588	467 508.167	27.499

将 X7 扫描并做坐标转换后的检查点坐标记 X7J02、X7J04、X7J06、X7J08、X7J10、X7J12，点云坐标如表 2 示。

表 2 X7 测得检查点坐标

检查点名	X7 扫描点云中检查点坐标与对应全站仪检查点坐标差值		
	Δ 北	Δ 东	Δ 高
X7J02	0.003	0.003	-0.003
X7J04	-0.003	0.005	0.005
X7J06	0.005	-0.004	-0.004
X7J08	-0.005	-0.005	0.007
X7J10	0.001	-0.003	-0.006
X7J12	-0.004	-0.007	0.007

将 L1 手持 SLAM 扫描并做坐标转换后的检查点坐标记

L1J02、L1J04、L1J06、L1J08、L1J10、L1J12，点云坐标如表 3 所示。

表 3 L1 测得检查点坐标

检查点名	L1 扫描点云中检查点坐标与对应全站仪检查点坐标差值		
	$\Delta$ 北	$\Delta$ 东	$\Delta$ 高
L1J02	0.050	0.074	-0.053
L1J04	-0.055	0.060	-0.058
L1J06	0.053	-0.052	-0.032
L1J08	0.065	0.048	-0.060
L1J10	0.046	-0.069	0.055
L1J12	0.058	-0.051	0.080

通过以上检查点分析，本项目中 X7 点云精度在 1 cm 以内，而灵光 L1 点云精度在 8 cm 以内。在矿洞测量中，X7 三维激光扫描仪精度明显优于其域创新 L1 手持式 SLAM 扫描系统。

2.5 特殊区域 - 溜井现状调查及数据分析

溜井即连接两个或几个阶段作为溜放矿岩的垂直或倾斜的井筒，现场由于经年使用已经发生部分区域坍塌，工作面存在随时坠石和再次坍塌的可能性，必须在最短时间内完成现状采集。同时，该区域根本不具备布设高精度控制点及检查的条件，遂决定仅采用站式 X7 扫描与 L1 手持式 SLAM 扫描系统完成预定工作。

2.5.1 外业测量工作

对溜井进行三维激光扫描的流程如图 8，需要注意以下几个要点：

- (1) 提前对施工环境勘察，完成风险评估。
- (2) 现场扫描：由于溜井结构特殊，扫描现场人员共分三组，一组负责 X7 三维激光设备下放，二组负责 L1 三维激光设备扫描，最后一组负责现场安全以及实时查看数据扫描情况，严格审核测量原始数据的准确性。

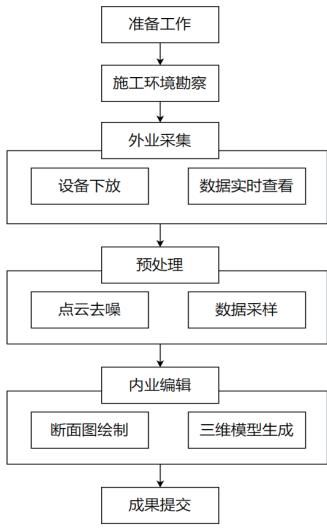


图 8 溜井三维激光扫描流程

2.5.2 数据处理编辑工作

(1) 数据预处理：数据预处理流程同本文 2.2.2 节。为确保数据精度，同样将数据导入天宝 RealWors 软件进行滤波、采样。根据项目要求，提交各项成果（溜井三维模型、各分段横断面图、特定方向剖面图）。

(2) 专题要素采集：通过天宝 RealWork 软件生产分段断面图，特定方向剖面图

(3) 模型数据生成：两种扫描系统基本获得溜井完整数据，通过数据预处理和内业编辑，最终模型生成后，利用软件自带的体积计算功能进行体积量算<sup>[14]</sup>。生成的点云模型如图 9、图 10。

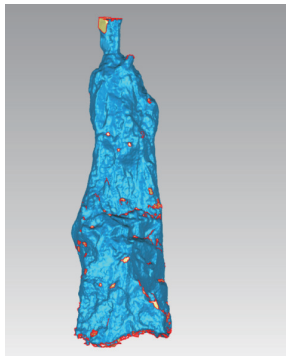


图 9 L1 模型

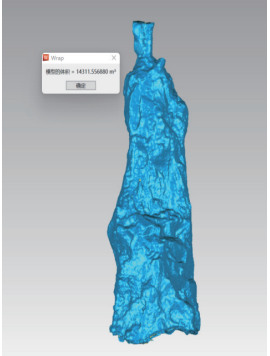


图 10 X7 模型

(4) 采集模型同名特征点点位坐标：利用天宝 Real-Work 软件的特征点集功能，可快速采集特征点坐标，并输出 txt 文本以供比对。

如表 4，对比两模型同名特征点，平面坐标差值小于 6 cm，高程坐标差值小于 8 cm。X7 三维激光扫描仪具有精度优势，L1 手持式三维激光扫描仪具备效率优势，实际工作过程中，可根据使用场景和需求选择不同的仪器。

表 4 两模型特征点坐标比对

检查点名	X7 与 L1 特征点坐标差值		
	$\Delta$ 北	$\Delta$ 东	$\Delta$ 高
T01	0.039	0.042	0.061
T02	0.045	0.024	0.058
T03	0.045	0.073	0.061
T04	0.049	0.052	0.062
T05	0.058	0.027	0.030

3 结语

根据以上的实际测量分析，从精度方面来看，相比于传统的全站仪测量方法，采用三维激光扫描技术获取的数据更加全面、直观、高效。其中在 2 km 矿洞测量中，高精度架站式三维激光扫描仪获取的成果精度可优于 1 cm，手持式

SLAM 三维激光扫描仪获取的成果可优于 10 cm; 基于 IMU (惯性测量单元) 算法与自动配准技术的架站式三维激光扫描产品已经成熟, 适用于地下空间 / 狭窄隧道环境。

效率方面, 在本项目中的外业测量时间显著缩短, 测量仅需约 2 h (SLAM 仅需 30 min), 而传统方法则需要 10 至 12 h, 不难看出 L1 SLAM 手持式三维移动扫描系统有着巨大的效率优势。

由此得出, 通过三维激光扫描技术进行矿洞整治测量, 实现了外业数据采集、内页数据处理的自动化, 减轻了劳动强度并提高了工作效率。同时, 获得了丰富的三维数据成果, 特别是在断面图生产、三维建模、超欠挖分析、净空测量、安全检测、渗水病害识别、地质表面素描等方面, 相较于传统测量方法具有明显优势。尤其在人员难以到达的溜井等特殊场所, 三维扫描技术能够有效弥补不足, 且精度满足相关规范的要求, 因而可以作为替代传统测量的一种有效测绘手段。

基于“FADNet++ 算法模型”技术的 L1 SLAM 手持式三维移动扫描系统, 单人即可完成采集操作且相同作业区间耗时最短, 从效率上看基于 FADNet++ 的 SLAM 产品有着巨大的潜力和价值, 具有良好的推广应用价值。而  $\pm 5$  cm 的实测精度暂无法满足矿山工程测量规范, 期待能够进一步完成算法研究与迭代工作。

#### 参考文献:

- [1] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER I, HINTON G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. NeurIPS, 2012, 25: 1097-1105.
- [2] European Commission. Regulation (EU) 2016/679 of the European Parliament and of the Council of 27 April 2016 on the protection of natural persons with regard to the processing of personal data and on the free movement of such data, and repealing Directive 95/46/EC (General Data Protection Regulation) (Text with EEA relevance)[EB/OL]. [2024-01-26]. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex-%3A32016R0679>.
- [3] SHI S, TANG Z, CHU X. A quantitative survey of communication optimizations in distributed deep learning[J/OL]. IEEE network.[2024-02-12]. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.13247>.
- [4] 曲相屹, 王伟, 孙晓东, 等. 三维激光扫描技术在矿山测绘中的应用[J]. 山东工业技术, 2016(22):99.
- [5] 张运波, 雷明锋, 肖勇卓, 等. 隧道掌子面节理卷积神经网络

智能识别方法[J]. 中国公路学报, 2024,37(7): 35-45.

- [6] FEDELE G, FERRISE A. Biased sinusoidal disturbance compensation with unknown frequency[J]. IEEE transactions on automatic control, 2013,58(12): 3207-3212.
- [7] 白继坤, 岳如友. 三维激光扫描技术在矿山中的应用探讨[J]. 矿山测量, 2019(8):200-201.
- [8] SHI S, WANG Q, ZHAO K, et al. A distributed synchronous SGD algorithm with global top-k sparsification for low bandwidth networks[C]// 2019 IEEE 39th International Conference on Distributed Computing Systems. Piscataway: IEEE, 2019:2238-2247.
- [9] 王群. 三维激光扫描技术在矿山测量中的应用与研究[J]. 世界有色金属, 2021(24):30-32.
- [10] 何中伟. 三维激光扫描技术在矿山测量中的应用[J]. 中国金属通报, 2021(1): 21-24+25.
- [11] 中华人民共和国住房和城乡建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 建材矿山工程测量技术规范 GB/T51178—2016[S]. 2016.
- [12] 刘树亚, 徐剑敏, 鲁德宁. 基于实测点云数据的隧道分割及形变检测方法[J]. 隧道建设(中英文), 2021,41(4):531-536.
- [13] 杨洪权, 何妍, 许明. 基于激光扫描的隧道限界超限检测研究[J]. 铁道工程学报, 2019,36(7):58-63.
- [14] 彭海驹, 严科文, 林松, 等. 融合 kmeans 聚类与 Hausdorff 距离的点云精简算法改进[J]. 地理空间信息, 2022, 20(8):59-63.
- [15] 李俊宝, 陈良良. 三维激光扫描技术在危岩体形变监测中的应用[J]. 测绘与空间地理信息, 2020,43(7):216-224.

#### 【作者简介】

董凤彬(1982—), 男, 河北唐山人, 本科, 工程师, 研究方向: 测量 GNSS、三维激光扫描技术应用及信息技术开发与数据处理。

王军宁(1995—), 男, 甘肃天水人, 本科, 工程师, 研究方向: 三维点云、BIM 与数字孪生技术的应用。

陈绪刚(1986—), 男, 湖北黄石人, 本科, 工程师, 研究方向: 测量 GNSS、GNSS 惯导系统、声纳技术应用、数据开发与处理。

刘奇政(1996—), 男, 江西赣州人, 本科, 技术经理, 研究方向: GNSS 数据处理。

(收稿日期: 2024-05-20)