

# 某矿山地下空间三维激光扫描建模 技术及可视化研究

彭超<sup>1,2</sup>, 臧洪源<sup>3</sup>

- (1. 山东黄金集团有限公司深井开采实验室, 山东 烟台 261400;  
2. 山东省深海深地金属矿智能开采重点实验室, 山东 烟台 261400;  
3. 山东黄金矿业(莱州)有限公司焦家金矿, 山东 烟台 261400)

**摘要:** 针对传统采空区探测方法劳动强度大、费用高、精度差等问题, 采用三维激光扫描技术对某大理岩地下矿山采空区进行扫描, 并基于 VTK 数据处理软件和 ParaView 可视化平台进行大数据模型处理和可视化, 完成了三维实体模型的建立, 并在三维模型中实现了虚拟漫游。通过建立某大理岩矿山地下三维模型, 获取了采空区和巷道准确的三维形态、空间位置、实际边界, 并基于三维模型实体模型计算得到采空区的真实体积, 为后期国家矿山公园建设及采空区的开发治理提供依据。

**关键词:** 三维激光扫描; 采空区探测; 三维空间模型; 可视化

**中图分类号:** TD17 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-8550(2024)04-0088-05

**DOI:**10.16672/j.cnki.kygc.2024.04.009

## 0 引言

在地下矿产资源的开发过程中, 受到技术水平和装备条件限制, 常采用房柱采矿法、全面采矿法等空场采矿法, 加之开采规划不善及管理缺失, 出现民采、掠夺开采等现象, 形成大量地下采空区。由于采空区的隐蔽性和无序性, 导致很难获取准确的空间信息, 加大了采空区安全评估的难度, 对矿区周边的人、财、物带来了严重安全隐患。

经过多年的发展, 在采空区探测方面已形成了较为完善的方法体系和技术装备<sup>[1-3]</sup>, 如钻孔探测法、瞬变电磁法 (TEM)<sup>[4]</sup>、高密度电阻率法<sup>[5]</sup>、探地雷达 (GPR) 技术<sup>[6]</sup>、地震层析成像法 (CT)<sup>[7]</sup> 等。国内对采空区的探测是以钻探为主、结合物探的方法, 此类方法不但效率低、成本高、人力投入大, 而且得到的结果以单点或剖面形式呈现, 数据的离散程度高, 需要用差值的方法进行拟合才能得到采空区的完整信息。三维激光扫描技术是一种新型测绘技术, 又称实景复制技术, 利用激光测距的原

理对空间结构进行扫描, 记录三维边界的点云信息, 通过借助三维建模软件, 快速构建真实的三维模型, 具有测量结果连续、数据精度高、操作使用简便等优点<sup>[8-10]</sup>。近年来, 随着三维激光扫描技术的日益成熟和在空间探测领域的推广, 为采空区低成本、高精度探测提供了一种新的技术手段。

本文以深圳某地下大理岩矿山为研究背景, 利用三维激光扫描技术对矿山巷道及采空区进行扫描探测, 获取了海量的点云数据, 基于 VTK 和 Paraview 软件建立矿山地下三维空间模型, 得到了地下空区的三维形态、空间位置、实际边界等基础信息, 并实现了模型的可视化及虚拟漫游, 使井下空间的探测走向数字化和精密化, 从而为地下空间综合利用及采空区防治提供依据。

## 1 三维激光扫描系统

三维激光扫描系统由扫描仪、控制器、后处理系统 (电脑和响应软件) 及附属设备构成, 见图 1。现场探测时, 采用非接触高速激光扫描的方式, 获取空间边界和三维几何数据, 通过后期软件对影像和点云数据进行去噪、匹配、坐标转换等处理, 输出可用于建模的数据格式,

收稿日期: 2023-11-01

作者简介: 彭超 (1985-), 男 (汉族), 山东淄博人, 山东黄金集团有限公司深井开采实验室高级工程师。

形成满足三维空间建模需求的文件。

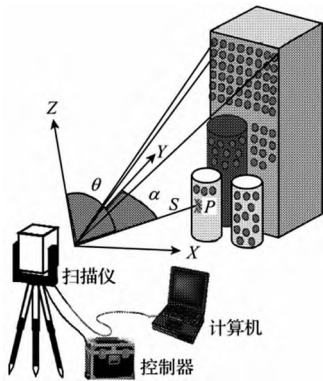


图1 三维激光扫描系统组成示意图

2 大数据模型的处理及可视化

基于三维激光扫描技术得到的数字模型具有精度高、生成速度快的优点，但由于模型文件过大，处理不便的问题，本文选择 VTK 数据处理软件和 Paraview 可视化平台，对三维激光扫描获得的点云数据进行处理，建立三维实体模型，并实现模型的可视化。

1) VTK 数据处理模式。VTK (The Visualization Toolkit) 又称视觉化工具函数库，是一个开源、跨平台的软件系统。通过内置的 C++ 类库和众多接口，将源对象 (原始数据) 转化为可处理的形式，利用图形子系统绘制功能，实现图像处理和可视化，如散点信息获取、三角化创建多边形、使用面绘制显示 mesh 面等，见图 2。

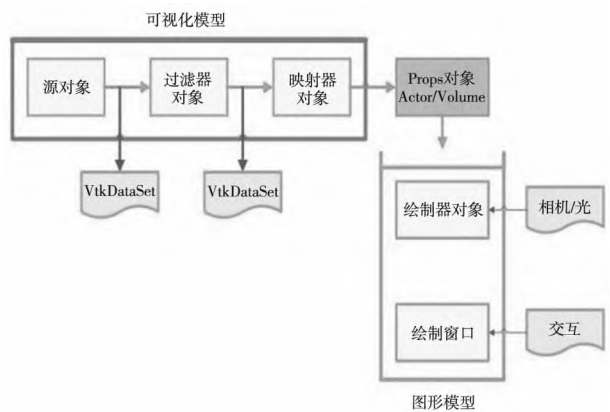


图2 VTK 处理数据方式

2) Paraview 可视化平台。Paraview 是一个开源、跨平台的数据分析及可视化程序，可通过批量处理、定性和定量分析手段，实现数据挖掘和分析，并以 3D 交互式或编程方式完成，

从而实现各种来源点云数据的处理和可视化，见图 3。此外，Paraview 文件的输入和输出格式兼容 VTK 软件系统，可同时使用这两种软件，利用各自优势，完成点云数据的处理、建模及可视化。

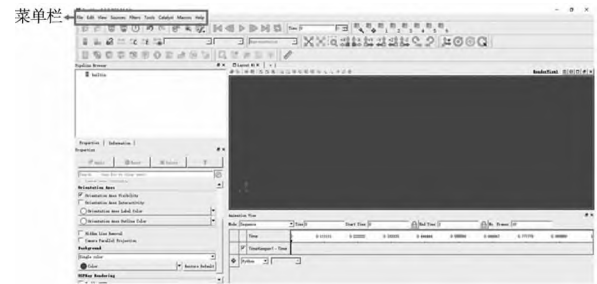


图3 Paraview 工作界面

3 地下矿山三维模型构建及可视化实例

3.1 研究区域现状

该地下大理岩矿山位于广东省深圳市，已于 2006 年全面停产，经过多年的地下开采，现形成 -40 m 和 -90 m 两个中段，由于矿山采用房柱法开采，大量的未充填采空区严重威胁矿区周边人员和财产安全。此外，该矿山被原国土资源部列为中国第一批国家矿山公园，可见开展以信息准确获取为基础的地下矿山三维模型构建，掌握采空区三维形态、空间位置、实际边界及体积大小，可为实施地表安全隐患评价提供重要数据支撑，更为后续国家矿山公园规划或采空区整治提供基础性依据。

3.2 巷道及采空区扫描探测

采用徕卡 ScanStation 三维激光扫描仪，在井下进行扫描，得到巷道和采空区的三维激光扫描数据，其中井下 -40 m 中段和 -90 m 中段点云数据为 949 046 280 个，单站的点云数据效果见图 4。



图4 单站点云数据效果图

### 3.3 采空区三维模型构建

#### 3.3.1 点云数据处理

在完成井下扫描后,获取了上亿的点云数据,先采用 VTK 软件系统对海量数据进行处理,主要包括数据噪点的去处、多站点数据配准、坐标系转换、数据分割和简化等,具体步骤如下:

1) 数据去噪。在对现场空间进行三维激光扫描时,由于周围物体和环境的影响,会产生大量噪点,为了消除测量误差和现场干扰,需要对点云数据进行去噪处理,以提高点云数据的质量。本文通过滤波算法和降低采样率的方法,对点云数据中的离散点进行提取、删除,使点云数据更加平滑和准确。

2) 多站点数据配准。对于来自不同采集仪、不同位置、不同视角和不同时间采集的点云数据,重叠区域可能有所差异,为此对于去噪后的点云数据,按照多站重叠区域绝对误差平方根标准误差为 5 mm 的标准进行配准,从而提高配准精度。

3) 点云数据坐标系转换。去噪和配准后的点云数据仅具备扫描仪坐标系下的坐标,不便于数据融合进行大型三维实体模型的建立,所以需要进行坐标系转换才能用于建模。本文根据现场监测时设置的控制点坐标和目标靶心坐标进行结算,通过旋转平移,实现原坐标系和大地坐标系的转化,同时对点云数据的配准精度进行检验。

4) 点云数据分块分割与简化压缩。经过去噪、配准和坐标转化后的点云数据,按照巷道和采空区分布,结合现场监测情况,使用点云数据处理软件人机交互对点云数据进行分割,便于分块管理和建模。本文使用重采样对点云数据进行抽稀,结合实际要求采用按点云距离重采样,从而提高点云建模质量。

#### 3.3.2 基于 ParaView 的建模及模型优化

经过上述处理后,点云数据可以用于三维建模,本次建模首先将三维激光扫描各部分数据文件转变为 Paraview 可识别的 OBJ、STL 格式,再使用不规则三角网格将点云数据网格化,网格化后的数据模型效果见图 5。



图5 网格化后的数据模型图

最终建立矿山地表、采空区和巷道三维模型,共计 89 144 022 个单元,267 432 116 个节点,图 6 为地下 -40 m 中段和 -90 m 中段的三维模型正视图。通过模型统计可知,采空区状较不规则,且空间上相互重叠,总体积约为 100 万  $\text{m}^3$ 。其中,地下 -40 m 水平的三维模型共计 74 725 924 个单元,224 177 822 个节点,俯视图见图 7; 地下 -90 m 水平三维模型共计 14 418 098 个单元,43 254 294 个节点,俯视图见图 8。选取局部的巷道及采空区模型展示,见图 9。

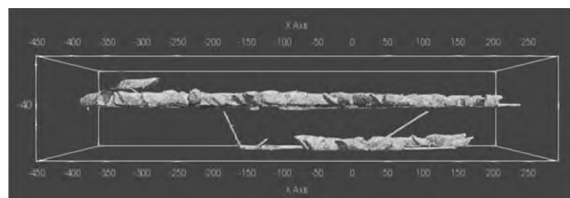


图6 地下三维模型正视图

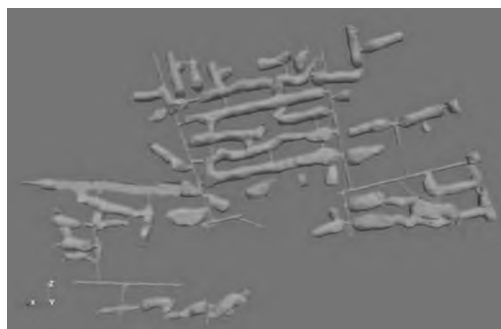


图7 地下-40 m中段三维模型俯视图

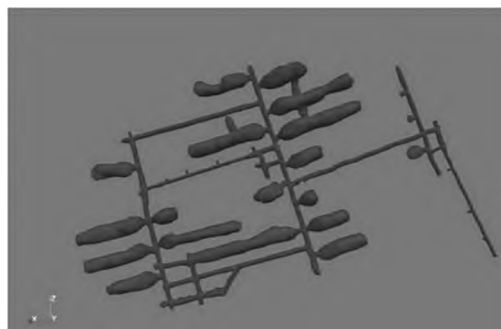


图8 地下-90 m中段三维模型俯视图



(a) -90m 中段代表性巷道



(b) -40m 中段代表性采空区

图 9 局部巷道及采空区模型展示图

3.4 基于 Paraview 的采空区虚拟漫游

在 Paraview 软件中，通过输入坐标点控制视角的位置及运动轨迹，并制作成动画，从而实现在三维模型中的虚拟漫游。如图 10 所示，为动画时间轴，在表格中显示漫游的轨迹为行，时间表示为从左到右递增。表中的第一行，简单地标记为时间，显示漫游可以覆盖的总时间跨度。当前显示的时间在顶部的 time 字段中显示，在表中有一条粗的、垂直的、可拖动的线。

在 Follow path 模式下，可通过输入坐标，指定视角的位置和焦点所走过的路径。通过默认情况下，路径设置为围绕选定对象运行，同时，也可编辑关键帧以更改路径，见图 11。

图 12 为地下 -40 m 中段三维模型虚拟漫游视频截图。漫游过程中，可通过左下角的三维模型俯视图中的红点，反映某一时刻视角所处模型中的位置。

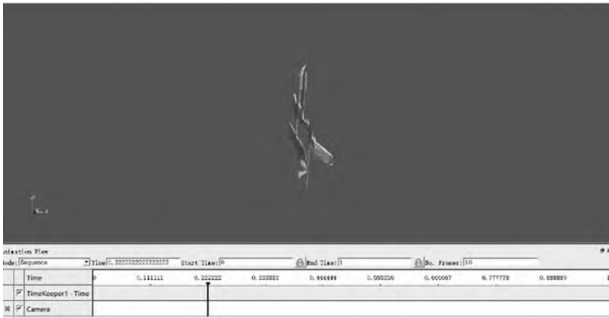


图 10 虚拟漫游制作主界面

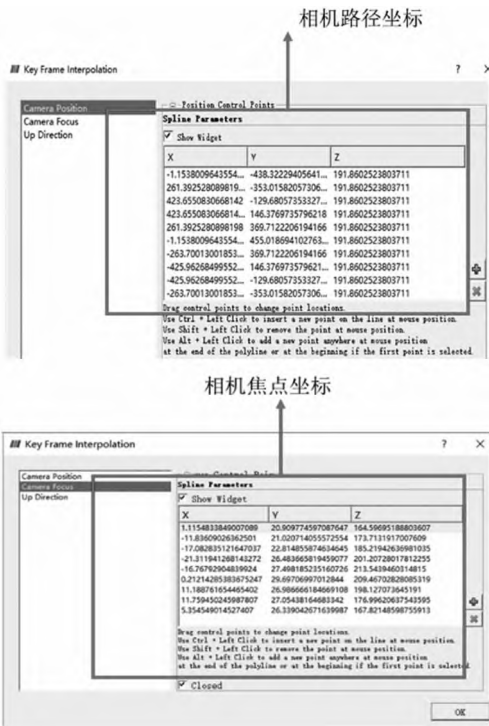


图 11 漫游路径及焦点坐标设置

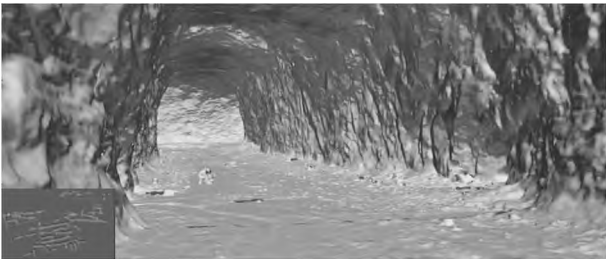


图 12 地下 -40m 水平三维模型虚拟漫游视频截图

4 结语

1) 以深圳某地下大理岩矿为工程实例，利用三维激光扫描技术，完成了矿山井下两个中段的扫描和建模，表明三维激光扫描技术具有快速、准确、低成本的优点，使井下空区的准确描绘、定量评价和科学治理成为可能。

2) 提出了一种基于 VTK 数据处理模式和 ParaView 可视化平台相结合的大数据模型处理和可视化方法。通过 VTK 数据处理软件进行数据去噪、简化压缩等处理，得到可直接用于三维建模的点云数据，借助 ParaView 可视化平台，完成三维实体模型的建立，并实现了在三维模型中的虚拟漫游。

3) 通过建立某大理岩矿山井下空区三维模型，获取了采空区和巷道准确空间信息，并基于三维实体模型，计算得到采矿区的真实体积，

为后期国家矿山公园建设或采空区的开发治理提供依据。

#### 参考文献:

- [1] 余乐文, 战凯, 张达. 地下采空区综合探测技术研究与应用 [J]. 矿冶, 2020, 29 (3): 1-4.
- [2] 朱卫平, 刘诗华, 朱宏伟, 等. 常用地球物理方法勘探深度研究 [J]. 地球物理学进展, 2017, 32 (6): 2608-2618.
- [3] 章林, 孙国权, 李同鹏, 等. 地下矿山采空区探测及综合治理研究与应用 [J]. 金属矿山, 2013 (11): 1-4+138.
- [4] 陈卫营, 薛国强. 瞬变电磁法多装置探测技术在煤矿采空区调查中的应用 [J]. 地球物理学进展, 2013, 28 (5): 2709-2717.
- [5] 祝卫东, 钱勇峰, 李建华. 高密度电阻率法在采空区及岩溶探测中的应用研究 [J]. 工程勘察, 2006 (4): 69-72.
- [6] 康清宣. 探地雷达技术在采空区探测中的运用 [J]. 矿业工程, 2017, 15 (1): 24-25.
- [7] 王启明, 车爱兰. 基于 CT 探测技术的不良地质构造三维网格模型重构方法 [J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38 (6): 1222-1232.
- [8] 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势 [J]. 测绘学报, 2017, 46 (10): 1509-1516.
- [9] 王运森, 李元辉, 徐帅. 巷道收敛监测三维动态可视化系统开发 [J]. 东北大学学报 (自然科学版), 2017, 38 (1): 116-120.
- [10] 彭超, 张洪岩, 王智强. 某大理岩矿山采空区稳定性评价与综合治理对策研究 [J]. 中国矿业, 2020, 29 (S2): 277-282.

## Research on Three - dimensional Laser Scanning , Modeling Technology and Visualization of Underground Space in a Mine

PENG Chao<sup>1,2</sup>, ZANG Hongyuan<sup>3</sup>

( 1. Deep Mining Laboratory of Shandong Gold Group Co. , Ltd. Yantai 261400, China;

2. Shandong Key Laboratory of Deep - sea and Deep - earth Metallic Mineral Intelligent Mining, Yantai 261400, China;

3. Jiaojia Gold Mine of Shandong Gold Mining ( Laizhou ) Co. , Ltd, Yantai 261400, China)

**Abstract:** Traditional goaf detection methods have problems such as high labor intensity, high cost, and poor accuracy. Therefore, 3D laser scanning technology is used to detect the goaf of an underground marble mine. And based on VTK data processing software and Paraview visualization platform, big data model processing is carried out. A three - dimensional model of the underground space is established and virtual roaming within the model is achieved. The 3D shape, accurate spatial position, boundaries of the goaf and roadway is obtained through the establishment of underground 3D model of a marble mine, and actual volumes of the mining area is calculated based on 3D solid model, providing a basis for the construction of the national mine park and the development and management of the goafs in later stage.

**Keywords:** 3D laser scanning; detection of goaf; 3D spatial model; visualization

( 上接第 87 页 )

## Analysis of Froth Grade in Iron Ore Flotation Based on Image Processing

HOU Weigang<sup>1</sup>, ZHANG Xiaomiao<sup>1</sup>, ZHU Li<sup>1</sup>, MAO Rui<sup>2</sup>, ZHAO Haobo<sup>2</sup>, ZHANG Xuefeng<sup>2</sup>

( 1. Ansteel Mining Engineering Corporation, Anshan 114014, China;

2. Liaoning Zhongxin Automation Control Group co. , LTD, Anshan 114001, China)

**Abstract:** The flotation process is a complex physical and chemical process that plays an important role in the extraction of mineral resources. However, traditional manual observation methods are subjective, inefficient, and often result in fluctuations in flotation performance and loss of resources. The use of image - based flotation process monitoring can improve production efficiency and automation levels. Currently, there are few studies in China on image analysis of froth. This paper aims to solve the problem of feature extraction and grade analysis of froth in flotation, and research on adaptive, low - complexity computation methods that can help improve the efficiency and automation level of mineral processing production.

**Keywords:** flotation; feature extraction; machine vision; neural network