

# 基于三维激光扫描技术的矿山地质建模与应用

邱俊玲<sup>1,2</sup>, 夏庆霖<sup>1,3\*</sup>, 姚凌青<sup>3</sup>, 袁兆宪<sup>1</sup>, 史超<sup>1</sup>

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 河南省煤层气开发利用有限公司, 河南郑州 450000

3. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

**摘要:** 激光扫描技术(light detection and ranging technology)作为一门新兴的测绘技术, 目前已应用于诸多领域, 然而对于海量测站数据的拼接、大地坐标的定位等方面还存在一些不足. 针对这2个问题, 提出分部式拼接方法以解决大数据量难处理的问题, 并利用罗德里格矩阵算法, 编程实现对地物的绝对坐标定位, 完成矿山的地质建模, 是对矿山地质建模新方法的探讨. 通过与已知坐标数据的对比, 表明该方法的误差在矿山建模的允许值范围内, 具有较好的适用性. 并以内蒙古白音诺尔铅锌矿地质建模为例, 可为覆盖区矿产综合预测提供3D矿床模型及预测要素空间形态特征等方面的参考.

**关键词:** 三维激光扫描技术; 地质建模; 绝对坐标定位; 数学模型; 矿床.

中图分类号: P627

文章编号: 1000-2383(2012)06-1209-08

收稿日期: 2012-07-19

## Mine Geological Modeling and Application Based on the Three-Dimensional Laser Scanner Technology

QIU Jun-ling<sup>1,2</sup>, XIA Qing-lin<sup>1,3\*</sup>, YAO Ling-qing<sup>3</sup>, YUAN Zhao-xian<sup>1</sup>, SHI Chao<sup>1</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. Henan Provincial Coal Seam Gas Development and Utilization Co. Ltd., Zhengzhou 450000, China

3. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

**Abstract:** As a new mapping technology, light detection and ranging has been applied in many areas so far. However, for many aspects, such as the alignment of mass data, the location of geographic coordinates and so on, it still suffers some shortages. This paper, focusing on these two issues, puts forward the method of aligning by division parts to solve the problem of the large amounts of data, and to establish the geology modeling by using Rodrigo matrix algorithm to complete the absolute coordinates for the mine, which is a new method of the geological modeling. By comparison with the coordinate data, it indicates that the error of the method is within the allowed value range for mine modeling, with good applicability. Taking the modeling of Baiyinnuo'er Pb-Zn mine area for example, it can facilitate comprehensive mineral resources prediction for the coverage area, especially in perspectives of the 3D deposit modeling and prediction factor spatial characteristics.

**Key words:** laser scanner technology; geological modeling; absolute coordinate positioning; mathematical model; ore deposits.

三维激光扫描技术(又称为“实景复制技术”), 是一种通过位置、角度、距离等属性设置直接获取目标物体表面的三维坐标(欧阳俊华, 2006; 张凯, 2008), 完整并高精度地重建扫描实物原貌, 并能快速地获取原始的测量数据, 以实现直接从实物中进行快速的逆向三维数据采集及模型重构的技术. Li-

DAR技术以其精度高、速度快、真实度高等特点, 广泛应用于汽车制造、模具制造、玩具设计、地形测量与数字化再现、人体器官重构、历史古建筑物的恢复和保存、滑坡等的变形监测、城市三维可视化模型的构建以及军事、防洪、林业等领域(刘春和杨伟, 2006).

**基金项目:** 国家“863”计划课题(No. 2009AA06Z110); 国家地调局工作项目(No. 1212011085466).

**作者简介:** 邱俊玲(1987-), 女, 硕士研究生, 地球探测与信息技术专业.

\* **通讯作者:** 夏庆霖, E-mail: qlxia@cug.edu.cn

三维地质模型以其形象、真实等特点成为地质人员研究的热点,目前,国内外激光扫描技术在地质、矿山测量等都有某方面较为成熟的发展(Feng *et al.*, 2003; Fardin *et al.*, 2004; 姚吉利等, 2011; 李健等, 2012),但在整体矿山建模与应用方面还没有形成完整的体系,首先要解决的是在数据精简前的多站点拼接和真实大地坐标定位的问题,这也是笔者后续研究的前提和保障,是地质三维模型重构的一个重要组成。近年来,研究人员也提出了一系列的方法,实现扫描仪相对坐标系与真实的大地坐标系之间转换。如 Soler *et al.* (2012)提出基于给定的GPS坐标及协方差矩阵的最小二乘算法来确定大地坐标的方法;董秀军和黄润秋(2006)提出在使用扫描仪的同时配合地质罗盘的方法进行简单快速的定位;原玉磊等(2009)提出利用全站仪导线测量时坐标间计算的思想,在扫描仪中引入旋转平台和平台坐标系,通过平台坐标系与扫描坐标系的标定及平台坐标系的定向,来确定扫描坐标系与大地坐标系间的转换关系;何秉顺等(2007)在激光扫描仪应用于计算岩石结构面的倾向、倾角时,提出计算相对坐标系中Y轴与正北向的夹角以转换坐标系的方法。

对于大型目标物点云数据精简的算法有很多,各后处理软件中也有很多类似的功能,然而现有的应用多是集中在逆向工程应用或对某个实物的直接重建,是在数据预处理时就对数据进行压缩精简,而且对扫描物的大地坐标配准算法也相对繁杂、成本较高。本文尝试将矿山海量的激光扫描点云数据应用于地质研究,解决了如何拼接海量测站数据,以及如何进行绝对坐标定位的综合应用问题。

## 1 三维激光扫描技术的关键问题

### 1.1 测站拼接

在三维激光扫描技术的应用中,扫描仪每次测量的数据称为一站,目标物建立在以扫描仪的位置为原点的相对坐标系中。实际野外测量时,由于目标物过大或形状、表面过于复杂等,测量时往往不能一次测到所有的数据,需要从不同位置、不同角度、不同精度进行多次测量,才能完整地覆盖整个工作区。这就导致不同测站点云数据的坐标系是独立的,即使是目标物上的同一个点,其坐标系也可能不是同一个,因此,笔者首先需要解决的问题就是大数据量的测站拼接,即将所有站点数据在不能精简的情况

下统一在同一相对坐标系下。

一般而言,为了满足后期处理的需要,扫描前会在扫描区域内放置标志物。传统意义上是使用定标球,定标球的表面由特殊材质制成,并且底座上带有磁铁,可以方便地吸到任意带金属的位置上,但价格昂贵。由于矿山实际条件的限制,本文选择使用有特殊图案的纸质标靶(图1),也可以选择特殊形状的装有自来水的瓶子等。

测站拼接的方法主要包括共轭面转换法、磁性觇标法、测站后视棱镜法、曲面匹配法等(曾义星和史美元, 2002),也有人总结为配对方式、全局方式和绝对方式3种(张远智和胡广洋, 2004)。其实质决定于标志点(标靶)或公共面的设定方式。本文在测量之初,设定好标靶,主要以3个以上公共标靶为标志点进行测站拼接,完成相对坐标定位。

对于一般目标物而言,可以直接对精简的数据利用后处理软件实现测站拼接的目的。然而对于大型矿山而言,海量的数据是对计算机软硬件设备极大的挑战,为了拼接的需求,并不能在预处理时精简数据。在此提出分部拼接的方法,将所有站点数据以第一参考站点为准,两两拼接,相继传递在同一相对坐标系下,达到对大型矿山点云数据测站拼接的目的。

### 1.2 绝对坐标定位

笔者通过对比,根据地质点云数据的特征,结合联合奇异值分解SVD(singular value decomposition)算法和邻近点迭代ICP(iterative closest point)算法在坐标变换和模型配准方面的优势(杨磊等, 2008),采用罗德里格矩阵变换方法,将坐标转

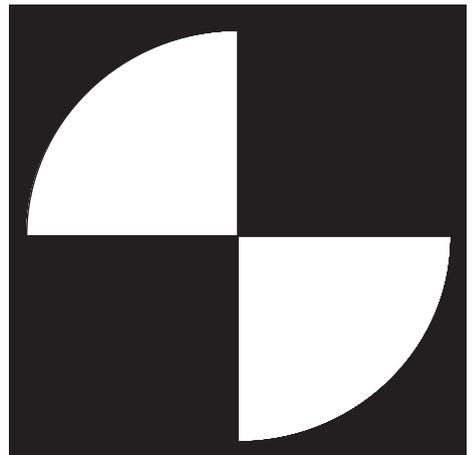


图1 标靶示意

Fig. 1 Sketch of target

换的非线性问题转化为线性的纯矩阵转换的问题,最后得出的结果是平移和旋转 2 个矩阵(Fletcher and Kershaw, 2002; 韩晓东等, 2002; 张卡等, 2008),而不再需要进行三角函数的计算和迭代运算.此方法算法简单、实用性强.

**1.2.1 绝对坐标定位的原理** 绝对坐标定位的过程实际上就是对数据坐标的匹配计算过程,其实现方法主要分为 2 种:一种是利用运动的平台装置对测量中的移动量和旋转角度直接记录,很容易就可以得到局部坐标系间的转换关系,但是这种通过专用测量装备直接对齐的技术价格昂贵,并没有很广泛的应用性;另一种是三点法,即利用相邻 2 个子域的 3 个(也可以更多)标记点实现拼接(张钧等, 1998).对于同一个点来说,这个过程相当于从一个坐标系转换到另一坐标系下的过程,也是本文所用到的方法.

理论上,点云的拼接需要来自两幅点云图像  $P$  和  $Q$  中的同一点的点对  $(p_i, q_i)$  满足下面转换矩阵  $T$  的方程:

$$\forall p_i \in P, \exists q_i \in Q, \|Tp_i - q_i = 0\|.$$

但事实上,直接求解这个方程是非常困难的,它需要解决两大问题:点对的查找和变换矩阵的求解.对齐点云的实质是计算满足如下条件的平移和旋转矩阵  $T, R$ :

$$f(R, T) = \min \sum [R \times p_i + T - q_i]^2,$$

式中:  $p_i, q_i$  就是要对齐的点云.

算法的基本思路是:

首先设有 2 个空间坐标系  $O-XYZ$  和  $O'-X'Y'Z'$ (图 2),其坐标系原点不一致,需要通过转换将其原点重合.

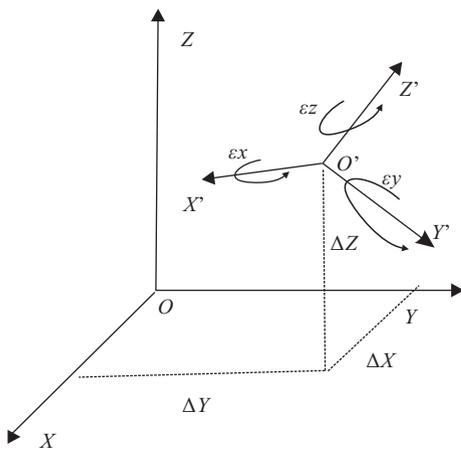


图 2 坐标转换简单示意(据金涛等, 2003)  
Fig. 2 Sketch of coordinate transformation

坐标间的转换关系如下:

$$(X, Y, Z)^T = R(X', Y', Z')^T + (\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T, \quad (1)$$

式中,  $(X, Y, Z)^T$  相当于大地坐标值,  $(X', Y', Z')^T$  为相对坐标,  $R$  为待求的旋转矩阵,  $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)^T$  为待求的平移矩阵.

然后将坐标标准化,计算出 2 个坐标系的重心坐标:  $(X_g, Y_g, Z_g)$  和  $(X'_g, Y'_g, Z'_g)$ ; 以及公共点以重心为原点的重心化坐标:  $(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z})$  和  $(\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}')$ .

$$\begin{cases} X_g = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}, Y_g = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, Z_g = \frac{\sum_{i=1}^n Z_i}{n}, \\ X'_g = \frac{\sum_{i=1}^n X'_i}{n}, Y'_g = \frac{\sum_{i=1}^n Y'_i}{n}, Z'_g = \frac{\sum_{i=1}^n Z'_i}{n}, \\ \bar{X}_i = X_i - X_g, \bar{Y}_i = Y_i - Y_g, \bar{Z}_i = Z_i - Z_g, \\ \bar{X}'_i = X'_i - X'_g, \bar{Y}'_i = Y'_i - Y'_g, \bar{Z}'_i = Z'_i - Z'_g, \end{cases} \quad (2)$$

将公式(2)代入公式(1)可得:

$$(\bar{X}, \bar{Y}, \bar{Z}) = R(\bar{X}', \bar{Y}', \bar{Z}'), \quad (3)$$

根据罗德里格矩阵算法的思想,可设:

$$R = (I - S)^{-1}(I + S), \quad (4)$$

式中:  $I$  为单位矩阵,  $S$  为反对称矩阵.

可设为:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & -c & b \\ c & 0 & -a \\ -b & a & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

将公式(4), (5)代入公式(3),即可求得旋转坐标  $R$ .

最后代入公式(1)即可求得平移矩阵  $(\Delta X, \Delta Y,$

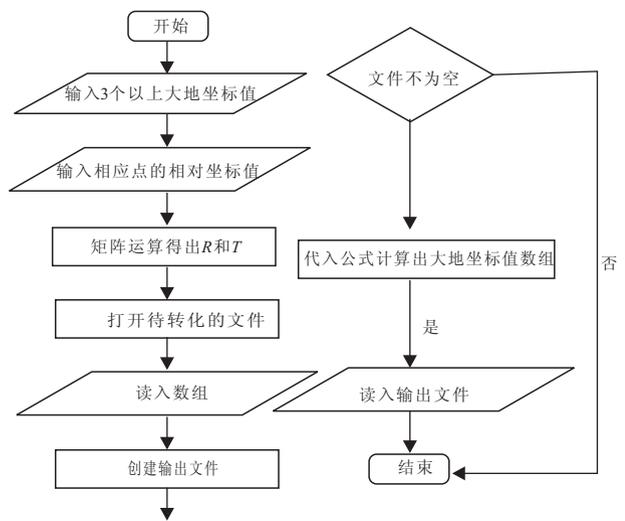


图 3 坐标转换程序算法  
Fig. 3 The algorithm to transform coordinate

$\Delta Z)^T$ , 即  $T$ .

**1.2.2 绝对坐标定位的程序设计流程** 选择 IDL 这一完全面向矩阵运算的程序设计语言,它具有快速分析超大规模数据的能力,亦可以读取和输出任意格式或者无格式的数据类型,而且界面友好、方便适用.

程序设计流程图如图 3.

## 2 应用举例

激光扫描数据的处理过程主要包括:数据采集、数据预处理、数据分割、模型重建等.其中数据处理是重要的技术环节,它决定了模型质量(金涛等,2003),关系到后续工作能否顺利进行.

### 2.1 数据采集

本文涉及到的内蒙古白音诺尔铅锌矿的测量数据是采用加拿大 Optech 公司的 ILRIS 非接触式三维激光扫描仪实地采集到的.其获取目标点坐标的基本原理是:根据精密时钟控制编码器,保证其同时获取发射出去的激光光束的水平方向角度  $\alpha$  和垂直方向角度  $\beta$ ,由脉冲激光发射到返回所用的时间计算得到距离观测值  $S$ ,从获取扫描反射接收的激光强度,与经过校正的彩色相片相结合,得到对扫描点颜色灰度的匹配.对激光扫描仪而言,采样时是一般使用仪器自定义的坐标系:即  $X$  轴在横向扫描面内, $Y$  轴在横向扫描面内与  $X$  轴垂直, $Z$  轴与横向扫描面垂直(刘春和杨伟,2006;刘春等,2010).由此可得到目标点  $P$  的坐标:

$(X_s, Y_s, Z_s)$  的求解公式为:

$$\begin{cases} X_s = S \cos \theta \cos \alpha, \\ Y_s = S \cos \theta \sin \alpha, \\ Z_s = S \sin \theta, \end{cases} \quad (6)$$

式中: $S$  为距离观测值, $\alpha$  为水平方向夹角, $\theta$  垂直方向夹角(图 4).

基于以上原理和流程,一般在测量时会放置由特殊材料制成的平面标靶或球面标靶来识别目标地物,由于研究区实际地形、经费等现实条件的限制以及对数据精度的要求,采用在剖面上张贴纸质标靶(图 5)的方法,以区分明显岩性分界和标记多站式数据的拼接,经实验分析,此标靶可以在后处理软件中清晰地找到中点,以利于后续工作.

### 2.2 数据处理

数字化测量得到的数据不可避免出现数据误差及数据量大的问题,为了保证后续模型重建的质量,

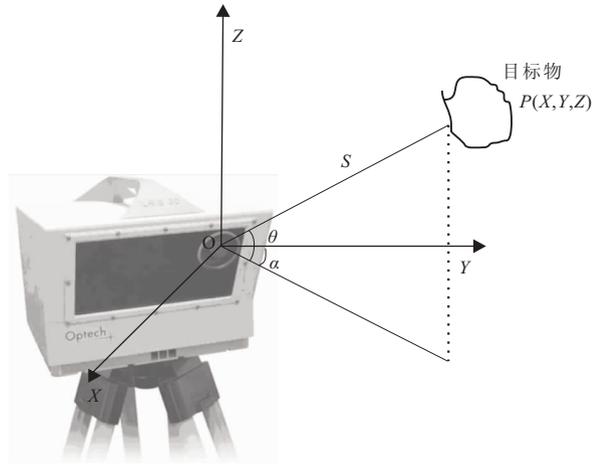


图 4 扫描仪工作示意图

Fig. 4 Sketch map showing how to work by laser scanner

需要首先对数据进行预处理(罗大兵等,2005;赵艳平等,2005).其过程主要包括噪声去除、多视拼接、数据精简等操作.

**2.2.1 噪声去除** 对于大量的点云数据,首先是对各个站点数据进行初步的数据精简,在此主要是对明显的非矿山内部有用数据的噪声去除,利用 Polyworks 对采集到的数据手动去噪处理,将明显的外围散乱点剔除(图 6),也是数据处理的第一步.

**2.2.2 相对坐标定位** 文中采用 Polyworks/Modeler 中的 IMAlign 模块可用来高速度、高精度的对齐分块数据.对齐方式有 1 点对齐和  $n$  点对齐.1 点对齐是针对公共特征非常明显的分块数据,其速度快、操作简单. $n$  点对齐需在两幅点云图中选取公共部分在不同位置的  $n$  个点(至少 3 个)进行粗略对齐,通常是事前已经人为的放置了标记点,以便对齐时的准确识别.然后在 best-fit alignment & comparison 里进行精确对齐.与此同时可以实时监测到对齐的参数及效果,也可以随时停止迭代运算.拼接的部分图如图 7 所示.

**2.2.3 数据精简** 激光扫描仪测量每分钟产生成千上万个数据点,但并不是所有的数据对模型的重建都有用,而且在扫描时为了保证标记点的识别,精度可能设得很高,这就导致了拼接完成后会产生大量冗余数据,因此,有必要在保证一定精度的前提下,减少数据量.

Polyworks 自身有减少数据重叠的功能,由于拼接后的数据在统一的坐标系统中,标记点的任务已经完成,可根据需要对点云数据减少重叠,以达到减少一定数据量的目的.

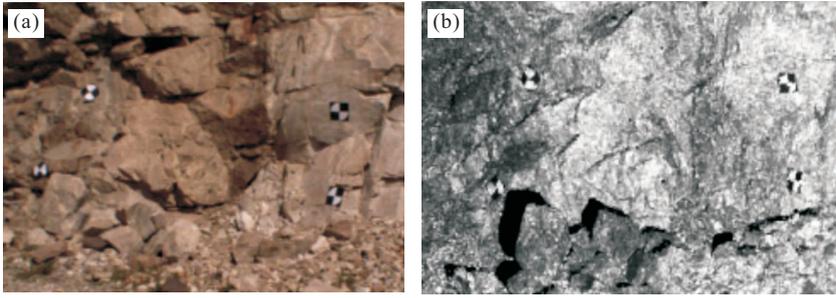


图 5 实地纹理标靶(a)与点云模型(b)对比

Fig. 5 Photo of texture map for target (a) and points cloud for target (b)

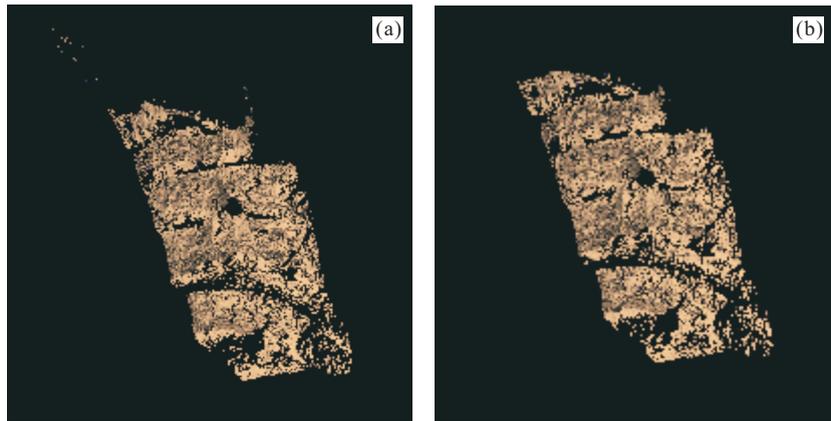


图 6 噪声去除前(a)后(b)对比图

Fig. 6 Comparison of noise reduction originally (a) and finally (b)

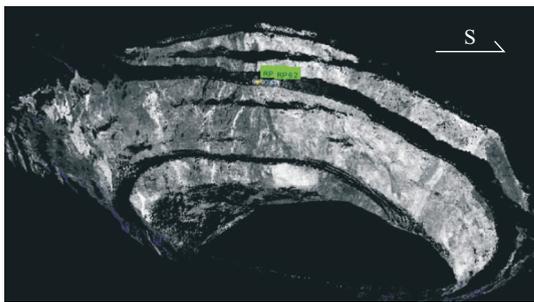


图 7 Polyworks 中白音诺尔铅锌矿床东剖面的拼接图  
Fig. 7 Align map for points cloud on east section of Baiyinnuo'er Pb-Zn mine in Polyworks

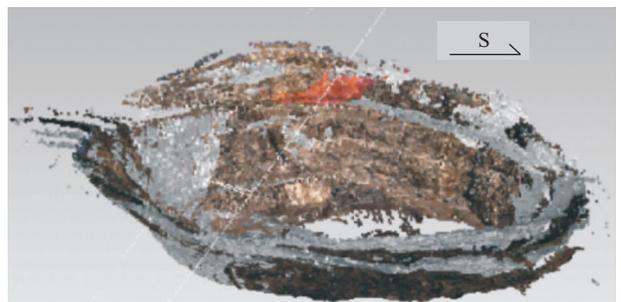


图 8 Geomagic 中的矿山全景点云图  
Fig. 8 Points cloud for the whole mine in geomagic

而后处理软件 Geomagic 对数据的简化方法有 4 种:(1)根据曲率简化,删除相对平坦地区的点,保留高曲率部分点;(2)根据网格简化,将保留每个空间划分好立方体栅格中离中心点最近的点;(3)统一简化,在平坦处等距采样,在曲率高处的点云密度降低到设定好的某一密度下,是一种比较常用的简化方法;(4)随机简化,按点云密度对其简化(王霄, 2004). 经 Polyworks 简化后的数据,仍存在一定的冗余,需类型转换后导入 Geomagic 进行进一步的

简化处理. 根据矿山的特点,在此利用统一采样的方法简化 3 部分模型,并在软件中进行第 2 次拼接工作,建立整体矿山模型(图 8).

**2.2.4 绝对坐标定位** 在野外测量之初,首先在入口处设置了 3 个纸质标靶作为坐标转换的依据,结合全站仪准确地获得其大地坐标信息,为室内工作打下基础. 由于之前已完成了相对坐标系的转换,在此,利用绝对坐标定位的程序将全部点云坐标文件进行相对坐标系与大地坐标系的转换,构建整体地

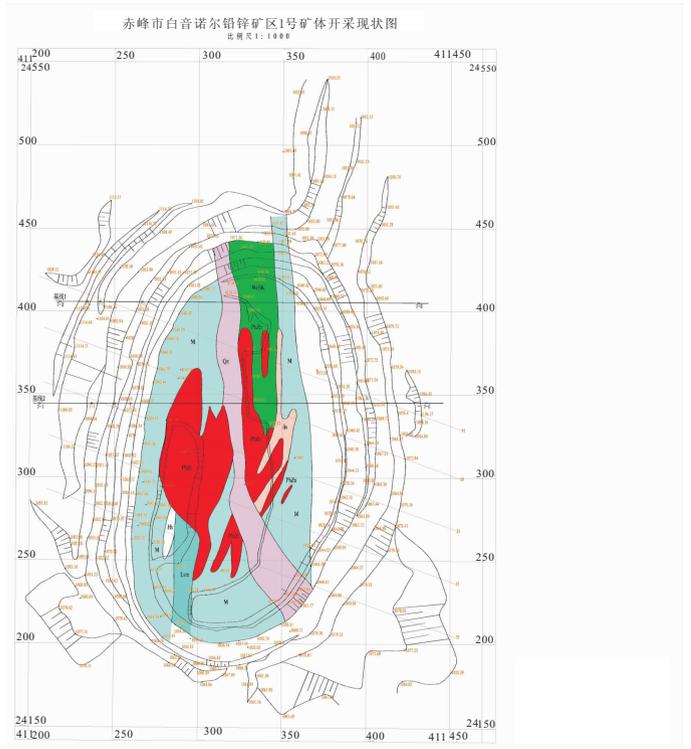
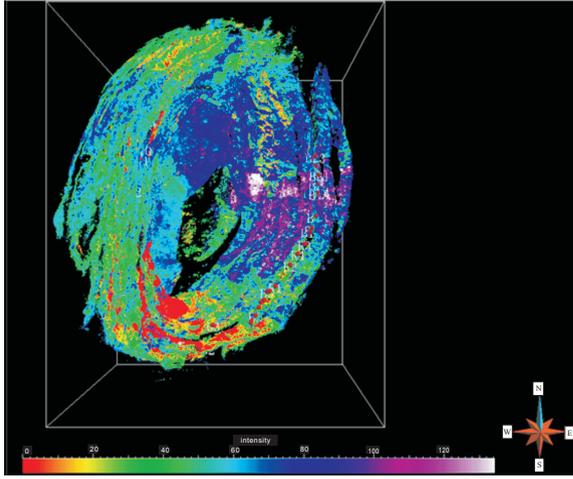


图 9 绝对定位后整体图与纸质地质图对比

Fig. 9 Comparison of the whole points map being by absolute coordinates location and the geologic map

表 1 标记点坐标系转换对比表

Table 1 Comparison of the coordinate transformation for the target

坐标系	公共点	$x(m)$	$y(m)$	$z(m)$
待转换坐标系	1	8.07	7.36	-2.02
	2	12.60	-1.01	-0.09
	3	31.13	11.01	-3.97
	4	0.01	0.32	0.02
大地坐标实际值	1	4 924 182.128	40 411 323.45	1 061.246
	2	4 924 179.535	40 411 332.36	1 063.063
	3	4 924 201.057	40 411 336.90	1 058.897
	4	4 924 175.492	40 411 318.38	1 062.206
大地坐标理论值	1	4 924 181.935	40 411 323.50	1 060.457
	2	4 924 179.685	40 411 332.33	1 063.787
	3	4 924 201.099	40 411 336.89	1 058.962
	4	4 924 171.467	40 411 322.71	1 063.369
平均误差		$\leq 1.006$	$\leq 1.100$	$\leq 0.290$

质模型(图 9)。

**2.2.5 坐标转换程序的结果分析** 本次转换过程中,由于所有站点数据原点都已经在拼接过程中统一在同一坐标系下,并且是以有参考点的站点为原点的,利用上述程序,将转换的文件统一在大地坐标系下,完成坐标转换,并可将转换后的文件导入处理软件中查看及对比坐标误差。

表 1 中选定的公共点坐标是在野外测量之初,

首先在入口处设置了 3 个纸质标靶(即参考点)作为坐标转换的依据,结合全站仪准确获得的大地坐标信息(即大地坐标实际值),并结合 Polyworks 软件的坐标定位功能找到其相对坐标(即待转换坐标系坐标)得到的,经过坐标转换程序,获取参考点的大地坐标(即大地坐标理论值)。从表 1 中可以看到通过编程实现绝对坐标定位的大地坐标理论值和实际值之间虽有一定的误差,但最大误差不到 1.5 m,基

本满足对大型矿山三维地质建模的精度要求。

### 3 结论

三维激光扫描测量技术可高精度、高效率地获取原始测绘数据,数据完整而丰富,为研究提供了尽可能多的信息,同时也带来了数据处理方面的不便。本文通过分部式处理多站点数据所构建的矿山三维地质模型,及全站仪测得的标记点大地坐标与理论坐标的对比,验证了绝对坐标定位程序的实用性,为研究人员将激光扫描技术应用于大型矿山提供了参考。利用三维激光扫描技术及后期处理工作建立的模型可真实地反映地质情况,且坐标误差在允许范围内,这是对新技术、新应用的一个探索。但由于经验的问题,测量及转换过程中还存在一定的不足,比如标记点设定的时候过于集中,导致成图后有一定的偏差等。

### References

Dong, X. J., Huang, R. Q., 2006. Application of 3D laser scanning technology to geologic survey of high and steep slope. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 25 (Suppl. 2): 3629—3635 (in Chinese with English abstract).

Fardin, N., Feng, Q., Stephansson, O., 2004. Application of a new in situ 3D laser scanner to study the scale effect on the rock joint surface roughness. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41(2): 329—335. doi: 10. 1016/S1365—1609(03)00111—4

Feng, Q., Fradin, N., Jing, L., et al., 2003. A new method for in-situ non-contact roughness measurement of large rock fracture surface. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 36(1): 3—25. doi: 10. 1007/s00603—002—0033—1

Fletcher, F. K., Kershaw, D. J., 2002. Performance analysis of unbiased and classical measurement conversion technique. *IEEE Trans. on AES*, 38(4): 1441—1444. doi: 10. 1109/TAES. 2002. 1145770

Han, X. D., Tao, H. X., Dong, J., 2002. Nonlinear coordination conversion model for spatial right-angle coordination system. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 175(5): 27—30 (in Chinese with English abstract).

He, B. S., Ding, L. Q., Sun, P., 2007. The application of 3D laser scanning technology in rock joint sets identification. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 5(1): 43—48 (in Chinese

with English abstract).

Jin, T., Tong, S. G., et al., 2003. Reverse engineering technology. China Machine Press, Beijing (in Chinese).

Li, J., Hu, S. Q., Deng, Z. B., 2012. Application of open-pit mine slope mapping with 3D laser scanning technique based on comprehensive improved ICP algorithm. *Coal Geology & Exploration*, 40(1): 51—54 (in Chinese with English abstract).

Liu, C., Chen, H. Y., Wu, H. B., 2010. Three-dimensional laser remote sensing data processing and feature extraction. Science Press, Beijing (in Chinese).

Liu, C., Yang, W., 2006. Collection and modeling for the three dimensional laser scanning data. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, (4): 49—53 (in Chinese with English abstract).

Luo, D. B., Gao, M., Wang, P. J., 2005. Digital measurement and point clouds data processing of reverse engineering. *Machinery Design & Manufacture*, (9): 56—58 (in Chinese with English abstract).

Ouyang, J. H., 2006. Techniques of close-range 3D laser scanning. *Infrared*, 27(3): 1—7 (in Chinese with English abstract).

Sloer, T., Han, J. Y., Weston, N. D., 2012. Alternative transformation from cartesian to geodetic coordinates by least squares for GPS georeferencing application. *Computer & Geosciences*, 42: 100—109. doi: 10. 1016/j. cageo. 2011. 10. 026

Wang, X., 2004. Reverse engineering technology and application. Chemistry Industry Press, Beijing, 41—44 (in Chinese).

Yang, L., Leng, Y. B., Zhang, Q. M., et al., 2008. Application of three-dimensional laser scanning data acquisition technology to model Yellow-River digital river bed test. *Journal of China Three Gorges Univ. (Natural Sciences)*, 30(6): 48—51 (in Chinese with English abstract).

Yao, J. L., Liu, K. L., Zhang, L., et al., 2011. Method for metal mine surveying based on 3D laser scanning technique. *Metal Mine*, (7): 114—117 (in Chinese with English abstract).

Yuan, Y. L., Jiang, L. X., Zhang, K. S., et al., 2009. A totalizing technique of 3D laser scanner. *Journal of Geomatics Science and Technology*, 25(3): 232—234 (in Chinese with English abstract).

Zeng, Y. X., Shi, G. Y., 2002. 3D laser scanning and its applications in engineering surveying. *Journal of National Cheng Kung University*, 3 (in Chinese).

Zhang, J., Liu, J., Liu, X. M., 1998. Three-dimensional abso-

lute orientation model using the Roderick matrix. *Infrared and Laser Engineering*, 27(4): 30–32 (in Chinese with English abstract).

Zhang, K., 2008. Research on spatial registration for three-dimensional laser scanning data (Dissertation). Nanjing Normal University, Nanjing (in Chinese with English abstract).

Zhang, K., Zhang, D. J., Sheng, Y. H., et al., 2008. Research on two methods of three dimensional coordinate transformation and their comparison. *Mathematics in Practice and Theory*, 38(23): 121–128 (in Chinese with English abstract).

Zhang, Y. Z., Hu, G. Y., 2004. Capture of urban detailed special 3D data by laser scanning system. *Journal of Qing Hua University*, (2): 1–7 (in Chinese with English abstract).

Zhao, Y. P., Gao, M., Luo, D. B., 2005. Data management based on Polyworks in reverse engineering. *Computer Application Technology*, (10): 38–40 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献

董秀军, 黄润秋, 2006. 三维激光扫描技术在高陡边坡地质调查中的应用. *岩石力学与工程学报*, 25(增刊 2): 3629–3635.

韩晓东, 陶华学, 董军, 2002. 空间直角坐标系非线性坐标转换模型. *工程勘察*, 175(5): 27–30.

何秉顺, 丁留谦, 孙平, 2007. 三维激光扫描系统在岩体结构面识别中的应用. *中国水利水电科学研究院学报*, 5(1): 43–48.

金涛, 童水光, 等, 2003. 逆向工程技术. 北京: 机械工业出版社.

李健, 胡书桥, 邓增兵, 2012. 基于综合改进 ICP 算法的三维

激光扫描技术在露天矿边坡测绘中的应用. *煤田地质与勘探*, 40(1): 51–54.

刘春, 陈华云, 吴航彬, 2010. 激光三维遥感的数据分析与特征提取. 北京: 科学出版社.

刘春, 杨伟, 2006. 三维激光扫描对构筑物的采集和空间建模. *工程勘察*, (4): 49–53.

罗大兵, 高明, 王培俊, 2005. 逆向工程中数字化测量与点云数据处理. *机械设计与制造*, (9): 56–58.

欧阳俊华, 2006. 近距离三维激光扫描技术. *红外*, 27(3): 1–7.

王霄, 2004. 逆向工程技术及其应用. 北京: 化学工业出版社, 41–44.

杨磊, 冷元宝, 张清明, 等, 2008. 基于激光三维扫描的数据采集技术在模型黄河数字化河床试验中的应用. *三峡大学学报(自然科学版)*, 30(6): 48–51.

姚吉利, 刘科利, 张磊, 等, 2011. 基于 3D 激光扫描的金属矿测量方法研究. *金属矿山*, (7): 113–117.

原玉磊, 蒋理兴, 张珂殊, 等, 2009. 3 维激光扫描仪的全站化实现方法. *测绘科学技术学报*, 26(3): 232–234.

曾义星, 史关元, 2002. 三维辐射扫描技术及其在工程测量上之应用. *台湾成功大学学报*, 3.

张钧, 柳健, 刘小茂, 1998. 利用罗德里格矩阵确定三维表面重建中的绝对定向模型. *红外与激光工程*, 27(4): 30–32.

张凯, 2008. 三维激光扫描数据的空间配准研究(硕士学位论文), 南京: 南京师范大学.

张卡, 张道俊, 盛业华, 等, 2008. 三维坐标转换的两种方法及其比较研究. *数学的实践与认识*, 38(23): 121–128.

张远智, 胡广洋, 2004. 用激光扫描获取城市空间精细三维数据. *清华大学学报*, (2): 1–7.

赵艳平, 高明, 罗大兵, 2005. 基于 PolyWorks 的逆向工程数据处理. *计算机应用技术*, (10): 38–40.