

基于激光雷达的露天采场 DEM 构建方法与应用

赵彦利¹ 郭育昇²

1 泰瑞数创科技(北京)股份有限公司 2 北京国遥新天地信息技术股份有限公司

DOI:10.12238/gmsm.v5i5.1434

[摘要] 数字高程模型(DEM)是露天开采生产中的重要基础数据,对矿山生产规划、边坡设计、路网规划等具有应用价值。本文针对矿区复杂场景,采用架站式地面激光雷达进行点云数据采集,研究了点云配准、滤波和DEM构建的关键技术流程,并以辽宁省某露天采场为例进行了应用试验,形成了地面激光雷达在大型露天采场DEM高效精准生产的技术方法。

[关键词] 数字高程模型; 地面激光雷达; 点云配准; 点云滤波

中图分类号: TN958.98 **文献标识码:** A

Construction Method and Application of DEM in Open Pit Based on Lidar

Yanli Zhao¹ Yusheng Guo²

1 Terui Digital Innovation Technology (Beijing) Co., Ltd

2 Beijing Guoyao Xintianti Information Technology Co., Ltd

[Abstract] Digital elevation model (DEM) is an important basic data in open-pit mining production, which has application value for mine production planning, slope design, road network planning, etc. In this paper, based on the complex scene of mining area, point cloud data acquisition is carried out with the ground lidar, and the key technical process of point cloud registration, filtering and DEM construction is studied. The application test is carried out by taking an open-pit in Liaoning Province as an example, and the technical method of DEM efficient and accurate production in large-scale open-pit is formed by ground lidar.

[Key words] digital elevation model; ground lidar; point cloud registration; point cloud filtering

引言

数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)是一种非常重要的地形数据产品,DEM能够给实际地形提供多尺度、多粒度、多视角的细节描述^[1]。构建DEM的方法有多种,常见的有直接从地面测量,例如使用GPS、全站仪、野外测量等;还可根据航空或航空影像,通过摄影测量途径获取。近年来,随着激光雷达技术的快速发展,具有采集数据快、精度高、点云密度大、对稀疏植被具有穿透性等优点,成为DEM数据采集的重要技术,并在矿区、山区、林地等场景得到广泛应用。基于地面采集数据,通常采用构建不规则三角网的方式构建DEM。岳天祥在21世纪初提出了HASM(high accuracy surface modeling)模型,采用微分几何曲面论的曲面建模新方法^[2],近年来被广泛拓展应用到DEM构建中,得到广泛研究^[3]。对此,宋敦江等提出了一种由等高线建立DEM的新方法HASM-OC,该方法可保证地形曲面的整体光滑性^[4]。本文在此基础上,围绕大型露天矿山DEM构建需求,详细设计了基于远距离地面激光雷达的露天矿区DEM构建技术路线,并重点研究了多站点云配准、点云滤波和DEM曲面拟合等方法和实验效果。

1 研究概述

1.1 研究区

本文研究区为露天石灰矿,位于辽宁省灯塔市,矿区水文地质条件简单,地形坡度较大,适于山坡形露天开采。矿区采场面积为0.3km²,沟壑纵横,最大深度为190m,矿区内人员活动较少,以矿车运输为主,矿区内地表出露,实验区无植被覆盖。

1.2 数据获取

采用远程地面激光扫描仪Rigel VZ-4000进行点云数据采集,扫描仪的各项参数见表1。数据采集时间为2021年4月,共进行了三次扫描,获取三站点云数据,平均点密度为0.16m。扫描过程中将GNSS接收器安置在扫描仪上,采用差分RTK技术同步测量设站点坐标,以便后期将数据转换到矿区坐标系下。

2 数据处理与结果分析

受矿区环境遮挡,单站扫描无法采集露天采场的完备点云,需进行多站扫描。由此,各站点云所用的坐标系统存在差异,需进行多站点云配准。此外,受矿区粉尘、作业车辆等因素干扰,原始点云中包含大量的非地形点,对DEM构建产生干扰,需进行点云滤波,剔除非地面点。

表1 Rigel VZ4000参数

项目	技术规格
测量范围	5-3100m
最大激光发射频率	300kHz
测量精度	15mm
重复精度	10mm
激光波长	近红外
激光发散度	0.15mrad
精度/重复精度	15mm/10mm

2.1多站点云配准

本文中采用由粗到精的策略进行点云配准,其中,粗配准阶段采用4PCS(4-Points Congruent Sets)算法,其核心思想是利用刚体变换中的几何不变性,根据刚性变换后交点所占线段比例不变以及点之间的欧几里得距离不变的特性,在多站点云间寻找近似全等的共面四点基,从而利用最小二乘法计算得到变换矩阵^[5,6],基本原理如图1所示。

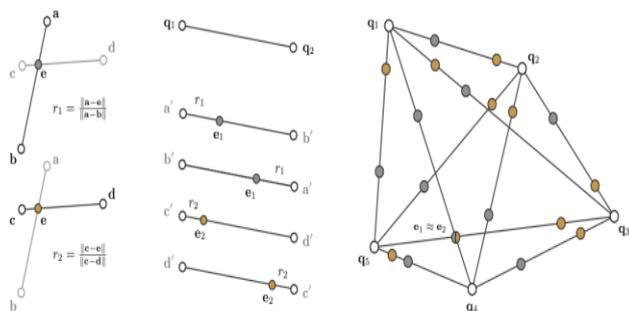


图1 4PCS算法空间拓扑结构构建与匹配原理图

(1)首先在基准点云P中寻找满足要求的长基线共面四点基 $B=\{a, b, c, d\}$,按式(1)计算计算四点基间的比例因子 r_1, r_2 。两个比例因子具有仿射不变性。

$$\begin{cases} r_1 = \|a - e\| / \|a - b\| \\ r_2 = \|c - e\| / \|c - d\| \end{cases} \quad (1)$$

(2)对于待配准点云Q中的每对点 $q_1, q_2 \in Q$,按式(2)计算两个中间点,将任意两对中间点 e_1, e_2 在允许范围内重合的点,都可看作P中基础点对可能的仿射对应点,在Q中找到符合 $B=\{a, b, c, d\} \in P$ 的全等四点基集。

$$\begin{cases} e_1 = q_1 + r_1(q_2 - q_1) \\ e_2 = q_1 + r_2(q_2 - q_1) \end{cases} \quad (2)$$

(3)使用LCP策略寻找最优全等四点匹配,寻找全局配准中包含最大的一致区域匹配即为最优匹配,以此计算多站点云间的配准参数,完成点云粗配准。

精配准阶段,采用ICP(迭代最近点)算法进行精配准,该算法重复进行选择对应关系点对,以此精化刚体配准参数,直到满足正确配准的收敛精度要求^[7]。

ICP算法的实现步骤如下:

- (1)对点集A中每一个点 P_{ai} 施加初始变换 T_0 ,得到;
- (2)从点集B中寻找距离点最近的点 P_{bi} ,形成对应的点对;
- (3)按式(3)求解最优变换 ΔT ;

$$\Delta T = \arg \min_{R, t} \sum_{i=1}^n \|P_{bi} - (Rp_{ai} + t)\|_2^2 \quad (4)$$

(4)根据前后两次的迭代误差以及迭代次数等条件判断是否收敛。如果收敛,则输出最终结果: $T = \Delta T * T_0$,否则

$$T_0 = \Delta T * T_0, \text{重复步骤(1)}$$

图2-a为激光雷达采集得到的三站点云,图2-b为经过4PCS算法完成粗配准后的结果,图2-c为对图2-b结果利用ICP算法完成精配准后的结果,图2-d为手动配准结果。结果表明,4PCS可以初步完成多站点云配准,但配准结果中局部精度有待提高;采用ICP后,配准精度明显提升,反映了4PCS算法对点云的粗配准精度较好,未出现配准局部最优的问题。表2为多站点云配准局部重叠区域配准误差,结果表明,ICP算法将4PCS的点云粗配准RMSE由4.061m降低至0.224m。

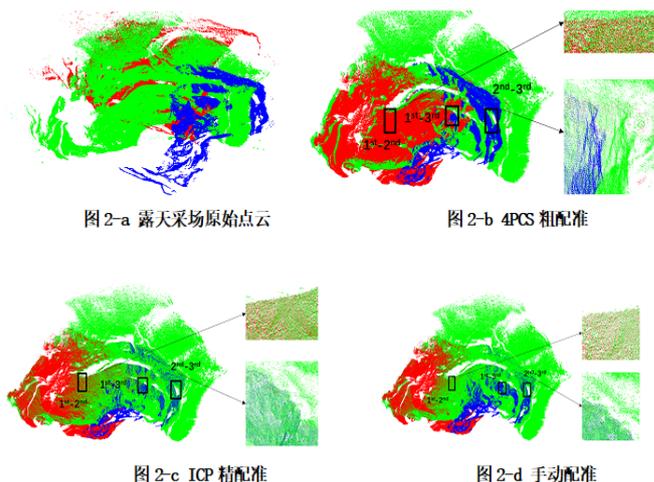


表2 多站点云配准RMSE

配准阶段	算法	重叠扫描之间的 RMSE(m)			
		$1^{st}-2^{nd}$	$1^{st}-3^{rd}$	$2^{nd}-3^{rd}$	平均
粗配准	4PCS	3.439	2.406	6.338	4.061
精配准	ICP	0.227	0.269	0.177	0.224

2.2点云滤波

本文采用基于坡度的滤波算法剔除非地面点,基本原理为:把点云按照一定大小的格网进行划分,每个格网具有一定的坡度阈值,每个格网的点高程值减去格网中最低的高程值,然后除以它与最低点的距离得到坡度值。判断依据为:当坡度值超过阈值时,被认定为非地面点,低于阈值则被认定为地面点^[8,9]。

3 DEM曲面拟合

点云滤波后,保留地面点,采用反距离权重法插值生成露天采场的DEM,基本原理为:计算一个格网结点时给予一个特定数

据点的权值与指定方次的从结点到观测点的该结点被赋予距离倒数成比例^[10]。

反距离权重法插值流程如下:

(1)按式(4)计算未知点到所有点的距离

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (4)$$

(2)按式(5)计算权重

$$w_i = \frac{1/d_i}{\sum_{i=1}^n 1/d_i} \quad (5)$$

(3)按式(6)计算插值点的值

$$Z_0 = \sum_{i=1}^{i=n} w_i * Z(X_i, Y_i) \quad (6)$$

图3为采用反距离权重法插值法生成DEM栅格影像。

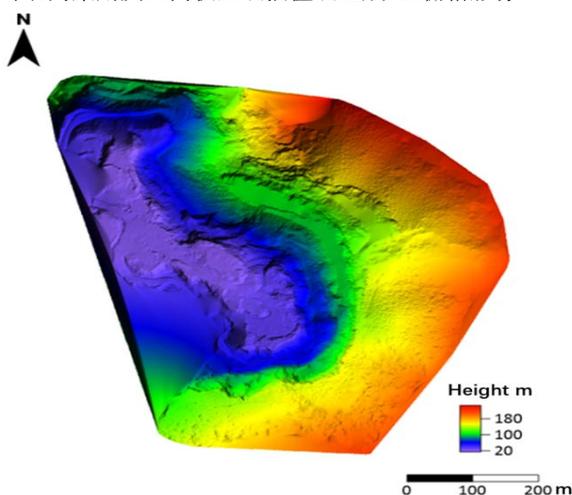


图3 研究区DEM

4 结论

本文针对大型露天采场DEM构建需求,探索了一套基于远距离地面激光雷达扫描的露天采场DEM构建方法,重点阐述了矿区点云数据、多站点云配准、点云滤波、及地形曲面拟合的基本原理和实现方法。选取辽宁省某露天采场为研究区进行了方法验证,实验结果表明远距离地面激光雷达对于构建大型露天采

场DEM具有良好的适用性,未来可将机载激光雷达、车载移动激光雷达等技术与远距离地面激光雷达结合,提升对复杂大场景三维信息采集的能力,有望进一步提高该类场景DEM构建效率,服务于地形分析、变化监测、生产规划等应用需求。

【参考文献】

[1]汤国安.我国数字高程模型与数字地形分析研究进展[J].地理学报,2014,69(09):1305-1325.

[2]YUE Tianxiang, Du Zhengping, SONG Dunjiang, A new method of surface modeling and its application to DEM construction, Geomorphology, 2007, 91(12), 161-172.

[3]Yue Tian-xiang, Song Dun-jiang, Du Zheng-ping, et al. High-accuracy surface modelling and its application to DEM generation[J].International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(8):2205-2226.

[4]宋敦江,岳天祥,杜正平.一种由等高线构建DEM的新方法[J].武汉大学学报(信息科学版),2012,37(04):472-476.

[5]Aiger, D.; Mitra, N. J.; Cohen-Or, D. 4-points congruent sets for robust pairwise surface registration. ACM Transactions on Graphics 2008, 27, 1-10.

[6]刘世光,王海荣,刘锦.快速四点一致性点云粗配准算法[J].山东大学学报(工学版),2019,49(02):1-7.

[7]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.

[8]Vosselman G. Slope based filtering of laser altimetry data [J]. International Archives of Photogrammetry Remote Sensing, 2000, 33:935-942.

[9]丁少鹏,刘如飞,蔡永宁,等.一种顾及地形的点云自适应坡度滤波方法[J].遥感信息,2019,34(04):108-113.

[10]刘光孟,汪云甲,王允.反距离权重插值因子对插值误差影响分析[J].中国科技论文在线,2010,5(11):879-884.

作者简介:

赵彦利(1982--),女,汉族,河北省衡水市人,硕士,中国地质大学(北京),工程师,研究方向:测绘地理信息系统。