

doi:10.3969/j.issn.2095-0411.2019.02.005

基于无人机影像的煤场工程量监测分析

李 健, 徐 旭

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213164)

摘要:针对目前煤场采挖量体积计算效率低下及精度较低的问题,提出了一种基于无人机影像序列的大型露天煤场采挖量计算方法。首先利用无人机获取煤场采挖前及采挖后的影像序列,采用多视图立体视觉重建算法对其进行三维重建,获取两个时期的煤堆三维点云信息。针对不同时期同一工程地点的点云数据,进行数据配准,然后对配准后数据中采挖区域进行精确定位和边界确定,并设计重建算法对采挖区域的点云进行网格重建,进而实现对采挖区域的分析、计算与监测。实验结果表明,该方法可准确定位采挖区域,精确计算不同区域采挖量,监测煤堆总体积变化。

关键词:无人机;煤场;三维重建;采挖量

中图分类号:O 359

文献标志码:A

文章编号:2095-0411(2019)02-0035-09

Monitoring and Analysis Method of Yard Construction Quantity Based on UAV Image

LI Jian, XU Xu

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Aiming at the problem of low efficiency and low accuracy in the volume calculation of coal yard excavation, a scheme for calculating the mining quantity of large open-pit coal yard based on UAV image sequence is proposed. First, the unmanned aerial vehicle is used to obtain the image sequences before and after mining the coal field, followed by the multi-view stereo vision reconstruction technique to reconstruct the three-dimensional point cloud of the two periods. Due to the point clouds acquired from the same engineering site in different periods, we can register the point clouds together and locate the mining area and the boundary precisely. Finally, the point cloud of the mining area can be reconstructed to a mesh model, so as to facilitate the analysis, calculation and monitoring of the mining area. The experimental results show that the presented scheme can accurately locate the mining area, calculate the mining volume, and monitor the overall volume change of coal stacking.

收稿日期:2018-12-09。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51501019)。

作者简介:李健(1963—),男,江苏常州人,硕士,副教授。E-mail:lj1231@cczu.edu.cn

引用本文:李健,徐旭. 基于无人机影像的煤场工程量监测分析[J].常州大学学报(自然科学版),2019,31(2):35-43.

Key words: unmanned aerial vehicle; coal yard; three dimensional reconstruction; mining amount

大型露天煤场存煤量计算是煤场日常生产管理的重要环节,煤堆采挖量是企业测量验收工作中的重要指标,直接关乎企业的经济和效益,因而精确、快速的计量煤场采挖量变得尤为重要。国内外目前主要采用土方计算原理,主要算法有:断面法^[1]、格网法^[2]、等高线法^[3]以及 DTM 三角网法^[3-4]。断面法是通过剖面分段化来计算采挖工程量。该方法操作繁琐、工作量大,主要适用于狭长地带。格网法通过设置格网间距和测量点位高程来计算采挖工程量。该方法工作量大,精度主要取决于地形环境,限制因素多。等高线法利用等高线所围面积与相邻等高线高差的乘积得到采挖工程量,但等高线必须是闭合曲线,有时需要与断面法相结合,比较适合坡度变化较多的场合。实际生产中,DTM 三角网法被广泛采用^[4]。该方法首先通过全站仪等设备测量煤场区三维点数据,再通过实际采挖量生成空间地面模型,最后计算所有斜三棱柱体积得到采挖工程量。该方法操作相对复杂,自动化程度不高。文中方法能够自动定位和计算目标区域,使数据处理更加方便、快捷。

本文提出了一种数据处理方法,两组点云数据配准之后,设计算法找到点云数据中被开挖的部分,并找到被开挖部分在整个点云中的开挖边界,之后对开挖部分点云数据进行体积计算。算法流程图如图 1 所示。

首先通过四旋翼无人机采集影像,通过多视图立体视觉重建算法对采集到的影像序列进行点云恢复^[5]。针对不同时期同一工程地点的点云数据,设计约束配准算法。基于配准结果,采用重建算法对不同点云进行网格重建,进而实现对不同采挖区域的精确分析、计算与监测^[6]。

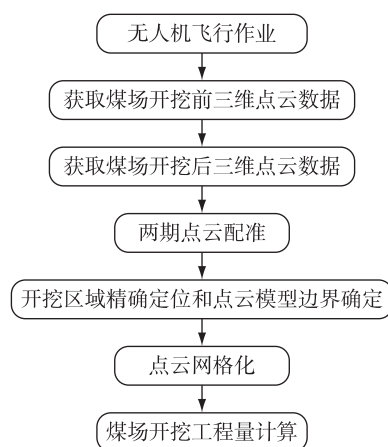


图 1 算法流程图

1 基于图像面片的多视图立体视觉重建

在三维场景重建领域中,Snaveely N 等^[7]提出从图像或者图像序列中获取三维信息,并重建出三维结构模型,即运动过程恢复结构(Structure From Motion, SFM)。然而,在重建时最终得到的是所有匹配的特征点的三维坐标,图像内容中的特征点信息不足、只能检测到部分的特征点等原因,导致恢复的三维场景点云信息较稀疏^[8]。因此,Furuksw A Y, Ponce J 等^[9]基于此,提出了通过输入一组影像序列和相关参数,获取场景致密的三维点云模型,即基于面元的多视图立体视觉(Patch-based Multiple View Stereopsis, PMVS)算法。该方法弥补了前面方法的不足,输出的是致密的三维点云,满足可视化要求。

在煤场工程量监测问题中,此处基于不同时期无人机采集的数据,恢复出不同时期煤场三维场景结构,实现场景表面重建。因此,基于运动恢复结构(SFM)^[7],首先对图像进行特征提取和匹配,再根据多视图几何约束关系,通过射影重建和度量重建,最后得到一个稀疏的三维结构模型。再通过多目立体视觉算法(PMVS)^[9]把稀疏的三维点云转为致密的三维点云,最后实现三维重建。具体方法如下:

1) 首先采用基于 SFM 的方法从原始影像序列中提取出特征点集,并进行特征点匹配,计算出模型的几何结构和相机的运动参数,最后重建出稀疏的点云三维结构^[10];

2) 影像数据经过结构和运动恢复之后,便得到了稀疏的三维点云,再采用多目立体视觉算法对稀疏点云进行表面重建。

具体地,算法首先进行特征点匹配^[11],对于任意一副图像为 I_i ,相机的光心是 $O(I_i)$,对于 I_i 上的特征点集合 F ,对于特征点 $f \in F$,通过在其他图像中找到对应的特征点 f' ,此时有特征点对 (f, f') ,并将这个三维空间点赋值给 $c(p)$,并得到与之相应的参数。

其次,进行面片扩展^[11],其目的是为了得到更多的面片,即更加致密的点云。对于每个面片 p ,在每个可视的图像中,进行四邻域扩展。当邻域网格集合 $N(p)$ 中某个网格已经有投影的面片,此时该网格就不需要扩展,即将其去除。

最后进行面片滤波^[11],此处通过 3 种滤波器进行滤波。首先进行可视一致性滤波,即

$$|V^*(p) \setminus (1 - g^*(p))| < \sum_{p_i \in U(p)} (1 - g^*(p_i)) \quad (1)$$

$U(p)$ 定义为与当前的面片 p 可见情况不一致的集合 p' , p 与 p' 不在同一个深度中,却投影到了同一个网格中。面片 p 如果发生异常,就会被滤掉。

第 2 个滤波器是在 $V^*(p)$ 的集合中,利用每个摄像机的位置进行深度测试,观察是否有面片被遮挡,计算没被遮挡的面片的数量,当小于规定阈值时,就将该面片删除。

最后进行几何一致性滤波,如面片 p ,当面片 p 的邻域的面片总和,与 $V(p)$ 中面片 p 所在的网格和四邻近所包含的面片比例小于某阈值时,就将该面片删除。

通过以上步骤,最终得到了致密的三维点云模型,并开始对这两期点云进行数字几何处理。

无人机获取的数据通过软件 VisualSFM 和软件 PMVS 进行三维重建,首先通过 sift 算法进行特征提取,匹配图像之间的特征点,并利用 SfM 算法对匹配结果进行光束平差,从而得到相机的姿态和稀疏点云,最终采用 PMVS 算法实现场景点云的密集重建,其中部分场景重建模型如图 2 所示。

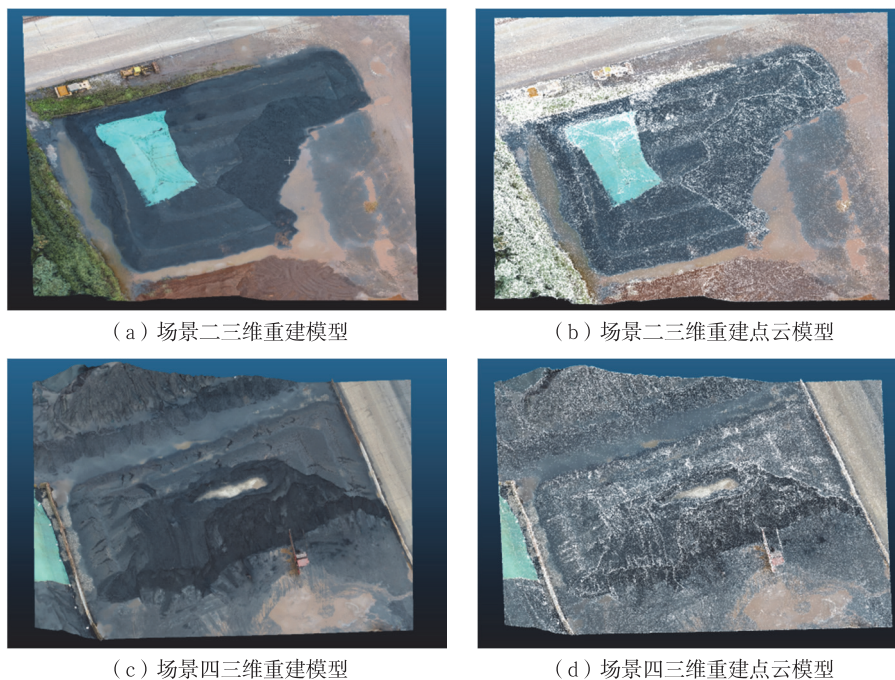


图 2 不同场景下的三维重建

2 不同时期煤场场景点云约束配准

2.1 特征点粗配准

为了精确计算煤场不同区域的采挖量,首先将 2 个不同时期计算的点云进行配准。基于影像重建

后得到的两期点云模型位于独立坐标系下,此时需要将点云转换到用户坐标系,此处以布设在地面的控制点进行坐标转换。

粗配准的目的在于缩小点云之间平移误差和旋转误差,为精配准做准备^[10]。此处采用基于特征点的粗配准方法,为计算采挖工程量,通过在地面周围均匀布设控制点来得到具体坐标信息,进行坐标转换以后期点云为基准,通过选取同名标识点将前期点云数据转换到统一坐标系下,实现点云粗配准。

2.2 点云精配准

在特征点粗配准之后,前后两期点云数据已经统一在同一个坐标系下,此时需要采用精配准进行最终处理,以提高配准精度。此处采用迭代最近点匹配算法(Iterative Closest Points, ICP)^[12]对两期点云进行精配准。同时,煤场开挖时,使得前后两期点云产生形变,文中采用许志华等^[10]提出的基于形态不变区的点云配准方法,对 ICP 算法进行相应调整以适用于本文场合。

ICP 算法是通过寻找 2 个点集的对应匹配关系,计算坐标转换参数,来完成匹配过程。通过利用确定对应关系点集并计算最优刚体变换的思路,使其满足收敛准则。并有关系式:

$$Q_i = R P_i + T \quad (2)$$

$$e = \sum_{i=1}^N \|q_i - (R p_i + T)\|^2 \quad (3)$$

式中: Q_i 和 P_i 为 2 个数据点集; R 为旋转矩阵; T 为平移向量; e 为最小值时满足收敛条件。

由于外界环境影响,在煤场采挖过程中,前后两期点云形态可能发生了变化,在全局点云配准时,可能出现局部最优,从而影响配准的精度。因此,利用在两期点云数据保持不变的区域作为基准点,通过 ICP 算法计算全局最优的转换参数,将这些转换参数对形态发生变化的区域进行刚性转换,从而实现点云精配准。

3 标区域精确定位和点云模型边界确定

煤场开挖过程中,同一个煤场存在多处作业的情况,对于整个煤场而言,采挖量的体积变化是指多个作业区域煤量变化的综合效应。故此处首先需要对煤场不同采挖区域进行精确定位,从而对不同区域进行体积计算。在配准之后得到的两期点云模型从根本上来说是两个面片,此处通过算法实现两期点云的边界确定^[13],为后续形成封闭网格做准备。通过点云精配准得到相对位置关系确定的两期点云,两期点云重合之外的部分所围成的封闭体积即为目标对象,为了精确得到目标对象的边界,算法流程如下,设前期点集为 A ,设 p 为点集 A 中的点, $p \in A$ 。后期点集为 B , q 为点集 B 中的点, $q \in B$ 。定义 q^* 为集合 B 中到点 p 距离最近的点。并有 $q^* = \operatorname{argmin} \|p - q\|$,并设定一个阈值,当 $\|p - q^*\| \geq \Delta d$ 时,把该点 p 存入点集 A' 中。同时,定义 p^* 为集合 A 中到点 q 距离最近的点。并有 $p^* = \operatorname{argmin} \|q - p\|$,当 $\|q - p^*\| \geq \Delta d$ 时,把该点 q 存入点集 B' 中。最终得到的点集 A', B' 即为目标点集。

算法在寻找目标点时,首先会根据阈值大小自动匹配到对应点集,由于目标点处于同一坐标系下,故能够实现不同采挖区域进行精确定位。点集 A' 即为与点集 B 中所有点的距离在阈值之外的点的集合。同理,点集 B' 即为与点集 A 中所有点的距离在阈值之外的点的集合。点云集合 A', B' 中,点云边界即为所要求的点云模型的边界。在得到目标点集 A', B' 之后,再将 2 个点云集进行合并,点云集合 A' 和 B' 中的点云距离在设定的距离阈值范围之内视为 A' 与 B' 的点云重合部分,该部分围成的区域即为模型的边界,边界确定之后就得到了一个完整的点云模型。具体的算法实现过程如下:

1) 建立点云集合 A, B, A', B' ,前期点云形成集合 A ,后期点云形成集合 B ,并建立 2 个新的点云集

合 A', B' 。

2) 计算点间最小距离: 在点集 B 中找到点 q^* , 使得点 q^* 满足 $q^* = \operatorname{argmin} \|p - q\|$ 。式中: p 为点集 A 中的点; q, q^* 为点集 B 中的点。

3) 寻找目标点集 A' : 在点集 A, B 中, 当满足 $\|p - q^*\| \geq \Delta d$ 时, 且 $q^* = \operatorname{argmin} \|p - q\|$, 则把该点 p 存入目标点集 A' 中。式中: Δd 为距离约束阈值。

4) 再次计算点间最小距离: 在点集 A 中找到点 p^* , 使得点 p^* 满足 $p^* = \operatorname{argmin} \|q - p\|$ 。

5) 寻找目标点集 B' : 在点集 A, B 中, 当满足 $\|q - p^*\| \geq \Delta d$ 时, 且 $p^* = \operatorname{argmin} \|q - p\|$, 则把该点 q 存入目标点集 B' 中。

6) 重复步骤 2), 3), 4), 5): 循环点集 A, B 中所有点。

7) 将得到的点集 A', B' 进行合并, 获取不同采挖区域的点云模型边界, 并得到最终点云集。

4 点云网格化

将点集 A', B' 合并之后, 此时对合并后的点集从点云到网格进行 Poisson 重建^[14], 得到精确的封闭网格模型。

泊松表面重建算法是通过隐式函数框架处理表面重建问题, 再把表面重建问题转化为泊松方程的解。算法通过计算一个三维的指示函数 χ , 之后提取合适的等值面, 最终获取三维重建表面^[15]。泊松表面重建的核心是模型表面采样的有向点集和模型的指示函数成积分关系, 并将计算指示函数的问题简化为梯度算子的反算。即对于通过样本定义的向量场 \mathbf{V} , 找到一个标量函数 χ , 使 $\|\nabla \chi - \mathbf{V}\|$ 取得最小值。泊松表面重建算法具体流程如下:

首先进行问题离散化, 此处通过使用自适应的八叉树来表示隐式函数^[16], 并用样本点的位置采用一颗八叉树 O , 之后给八叉树 O 中的每一个节点 $o \in O$ 附加一个函数 F_o 。然后, 定义一个基函数 $F: \mathbb{R}^3 \rightarrow \mathbb{R}$, 使该函数空间可进行距离平移和尺度缩放。对于每一个节点 $o \in O$, 定义函数 F_o 为节点中心 o , 以 o 的尺寸展开:

$$F_o(q) \equiv F\left(\frac{q - c}{w}\right) \quad (4)$$

式中: c 为节点 o 的中心; w 为节点 o 的宽度。

此处函数 F 定义为一个带通滤波器与它自身的 n 次卷积:

$$F(x, y, z) \equiv (B(x)B(y)B(z))^*{}^n \quad (5)$$

$$B(t) = \begin{cases} 1, & |t| < 0.5 \\ 0, & |t| \geq 0.5 \end{cases} \quad (6)$$

其次, 定义向量场, 为了满足子节点的精度要求, 采用三相线差值法把样本点分配到 8 个最临近节点。再进行泊松问题求解, 通过求解函数 χ , 使得相应方程达到最小值。最后进行等值面提取, 选择逼近输入的采样点位置来提取等值面, 由采样点的位置估计 χ , 之后使用平均值来提取等值面, 最终得到网格模型。

5 煤场工程量监测分析

通过对装置流域进行的数值模拟, 证实了装置内确实会发生空化现象, 同时对流域内的密度分布和空化发展过程有了初步了解, 并且进行了压力条件对空化的影响规律的讨论, 最后得出以下结论。在煤场不同时期网格模型得到之后, 基于这些网格模型进行分析计算。

在虚拟现实模拟语言 (Virtual Reality Modeling Language, VRML)^[17] 中, 网格是由一组顶点和多

形表示。在计算体积之前,需要对模型进行预处理并确保所有多边形都是三角形。此预处理方法通常被称为三角划分,通常被用来网格编码、网格信号处理和网格编辑。任意三角形的法线方向是通过顶点的顺序和右手定则来确定,如图 3 所示。对于 2 个邻近三角形,如果它们的公共边方向相反,则两个三角形的法线方向一致。其中,边 AB 是 $\triangle ACB$ 和 $\triangle ABD$ 的公共边,在 $\triangle ACB$ 中,边 AB 的方向是从 B 到 A ,在 $\triangle ABD$ 中,边 AB 的方向是从 A 到 B ,因此,法线 N_{ACB} 和法线 N_{ABD} 方向一致。

在三维场景下,基本的计算单元是四面体。对于每个三角形,把它们的顶点分别与原点相连接并形成一个四面体,如图 4 所示。

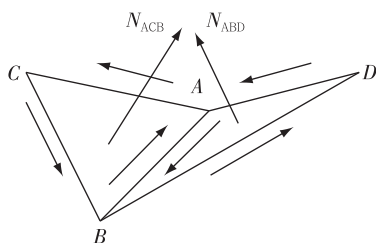


图 3 法线与顶点顺序

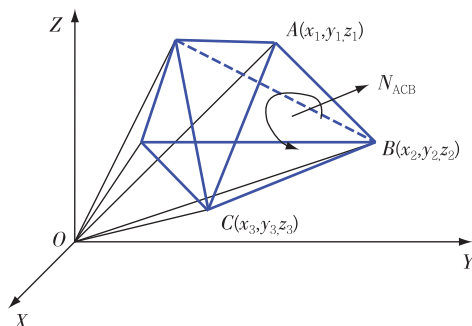


图 4 三维体积计算

在二维情况下,如下定义每个单元四面体的带符号体积:数值大小表示该四面体体积,符号是由原点是否在三角形法线方向的同一侧来决定的。如图 4 所示, $\triangle ACB$ 的法线为 N_{ACB} 。则四面体 $OACB$ 的体积为

$$|V_{OACB}| = \left| \frac{1}{6} (-x_3 y_2 z_1 + x_2 y_3 z_1 + x_3 y_1 z_2 - x_1 y_3 z_2 - x_2 y_1 z_3 + x_1 y_2 z_3) \right| \quad (7)$$

因为原点 O 与法线 N_{ACB} 方向相反,所以四面体符号是正的。同时,四面体符号也可以通过内积 $l_{OA} \times N_{ACB}$ 来判断。在实际应用中,只需要计算

$$V'_i = \frac{1}{6} (-x_{i3} y_{i2} z_{i1} + x_{i2} y_{i3} z_{i1} + x_{i3} y_{i1} z_{i2} - x_{i1} y_{i3} z_{i2} - x_{i2} y_{i1} z_{i3} + x_{i1} y_{i2} z_{i3}) \quad (8)$$

因此,煤场任一采挖区域的采挖量体积可表示为

$$V'_{\text{tot}} = \sum_i V'_i \quad (9)$$

式中: i 表示三角网格或者单元四面体的索引号; $(x_{i1} y_{i1} z_{i1})$, $(x_{i2} y_{i2} z_{i2})$ 和 $(x_{i3} y_{i3} z_{i3})$ 为三角网格 i 的顶点坐标,因为有序排列所以三角网格 i 的法线方向与其他保持一致。三维网格模型的体积总是正值。最终结果可通过取 V'_{tot} 的绝对值得到。

获取网格模型之后,通过上述方法,此处可以依次计算出不同采挖区域的网格模型体积,把不同采挖区域网格体积进行求和,最后得到总的网格体积,所求体积即为煤场的采挖量,进而实现煤场工程量的监测和计算。

无人机获取影像数据之后,采用多视图立体视觉重建算法对其进行三维重建,将影像数据导入到软件 VisualSFM 中,在得到稀疏三维点云之后,运行 PMVS 软件,从而得到致密的三维点云模型。获取三维点云模型之后,将煤场两期点云数据进行粗配准和精配准,然后对配准后数据中的采挖区域进行精确定位和边界确定,并通过自主设计算法来实现煤场点云的边界提取,这也是煤场监测中的最重要环节。再利用 Poisson 重建算法实现对采挖区域的点云进行网格重建,从而得到一个封闭的网格模型,并对封

闭网格进行体积计算,进而实现对采挖区域的分析、计算与监测。

6 实验分析

为验证算法的可行性,本实验选取地点为江苏省镇江市某港口码头,码头占地面积为 2 km^2 ,采用大疆精灵 4 pro 四旋翼无人机,搭载高清摄像头(有效像素 2 000 万),无人机航拍相对高度约为 40 m,进行照片采集,并获取到高重叠度和不同角度的影像数据(图 5),煤场开挖前和开挖后各采集一次。同时,为与本文方法进行对比,本实验同时采用了型号为 Leica ScanStation P20 三维激光扫描仪对煤场进行激光扫描,获取点云数据后对煤场体积进行计算,同时与论文^[10]中的方法进行比较。



图5 实验区及数据采集

无人机获得影像数据之后,通过算法重建出前后两期点云模型(图 6),然后对两期点云模型进行配准,使两期点云位于同一坐标系下并进行配准。本次实验选取了煤场中 4 个不同的场景,配准结果如图 7 所示。图 7 中,点云颜色由蓝色逐渐变为红色,表示煤场开挖前后两期点云点间的距离变化,其中红色区域表示开挖量最大。配准完之后再利用上文提出的算法对不同采挖区域精确定位和模型边界确定,这一步是模型重建的核心。

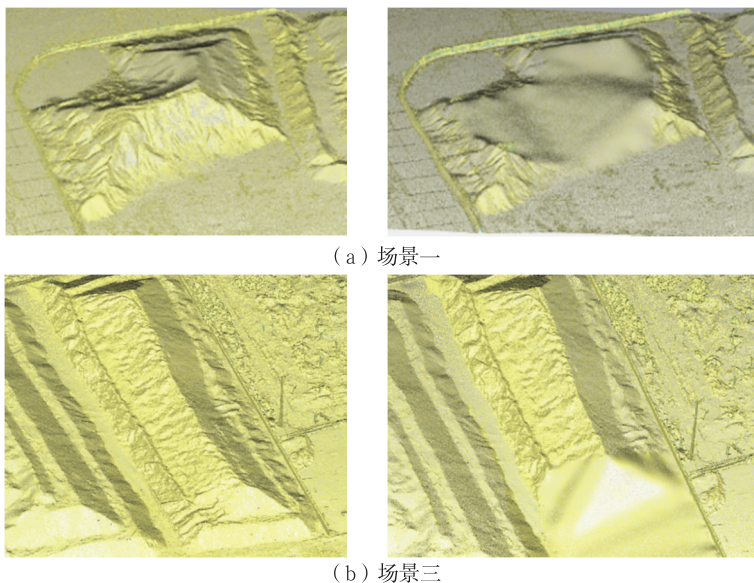


图6 煤场开挖前后三维重建点云模型

本次实验针对 2 种方法分别选取了 2 个场景进行实验,2 次实验数据采集时间间隔为 6 h 左右,并记录了 2 种方法的数据后处理所需时间。激光扫描仪获取到点云数据后,需要进行后续的数据拼接、去噪等步骤,故需要更长的数据后处理时间。实验结果见表 1,由表 1 可以看出,此处采用的方法精度约为 94%,结果表明该方法效果显著,满足现场要求。

在模型边界确定之后,此时进行泊松网格重建,以获取封闭的网格模型(图 8),进而可以求得网格体积,即采挖量。

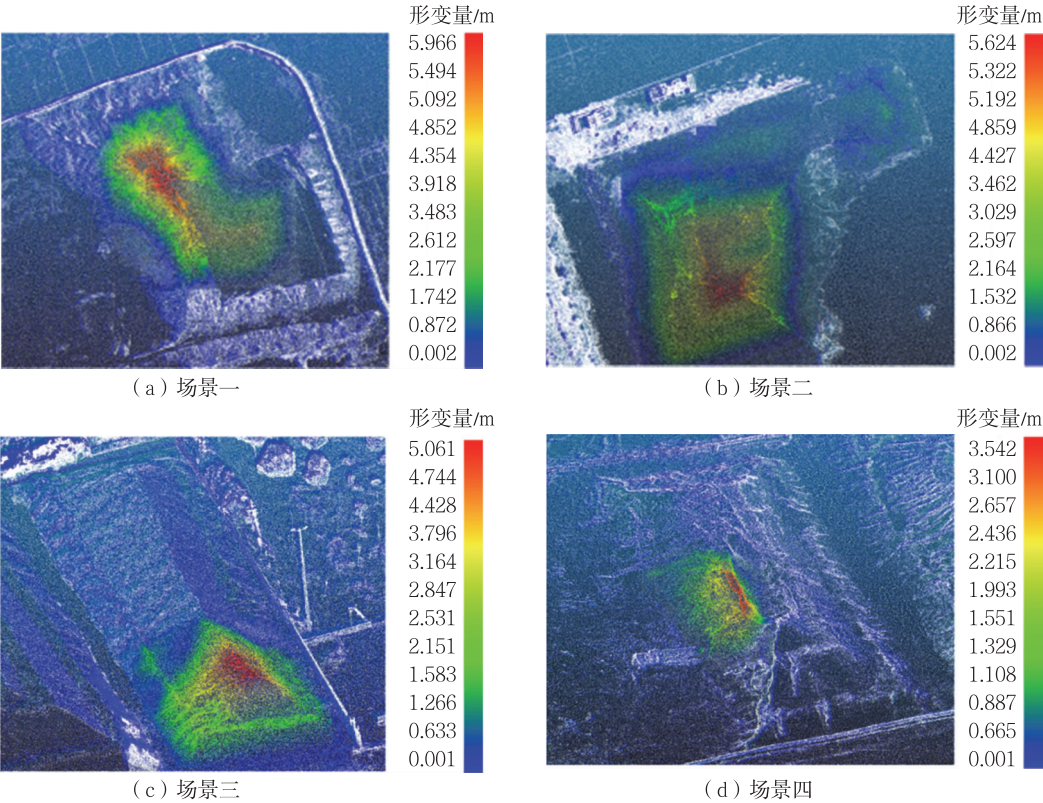


图 7 不同场景下点云配准结果

表 1 本文方法与激光扫描仪和文献[10]中的方法对比结果

实验方法	实验对象	时间间隔/h	数据处理	体积变化量	体积变化量	体积变化量检测	精度/%
			时间/h	参考值/m ³	检测值/m ³	绝对差值/m ³	
本文方法	场景一	6	0.5	1 105	1 033.6	71.4	93.5
本文方法	场景二	5.5	0.45	2 036.8	1 891.4	145.4	92.9
激光扫描仪	场景三	6	3	980	924.5	55.5	94.3
激光扫描仪	场景四	5.5	3.15	1 500	1 398	102	93.2
论文[10]方法	场景一	6	1	1 105	1 016.6	88.4	92.0
论文[10]方法	场景三	6	1	980	911.4	68.6	93.0

7 结 论

提出了一种新的利用无人机影像序列来获取煤场采挖量的计算方法。首先,无人机获取煤场影像,利用基于图像面片的多视图立体视觉重建技术获取不同时期煤场三维点云,并对不同时期点云进行配准。基于配准结果,设计算法对不同采挖区域进行精确定位,并找到所求点云模型的边界,进而得到完整的三维点云模型。最后,利用泊松重建将点云模型转化为封闭的三角网格模型,再对其进行体积计算,从而实现对煤场存煤量的监测、分析。通过与激光扫描技术进行对比,对比

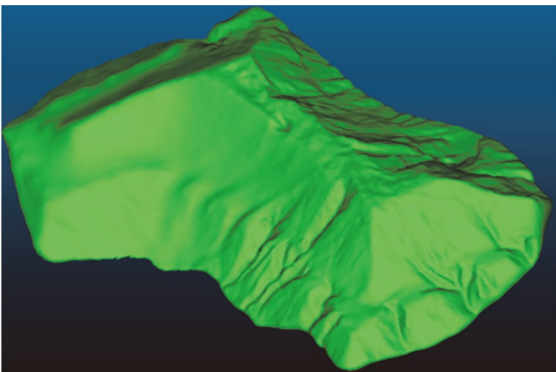


图 8 泊松重建之后得到的封闭网格模型

结果表明本文方法实用、稳定,操作方便,能够满足煤场的日常生产管理需要,精度高,提高了作业效率。

参考文献:

- [1]林文. 断面数据土方量计算方法研究[J]. 地矿测绘, 2010, 26(1):39-41.
- [2]陈爱梅, 吴昊, 吴北平, 等. 四种土方量计算方法的对比研究与应用[J]. 北京测绘, 2015(1):104-108.
- [3]张婷婷, 王铁良. 土方量计算方法研究[J]. 安徽农业科学, 2006, 34(22):6047-6050.
- [4]陈永锋, 吴晓茹, 原玉博. 基于DTM的露天矿采剥工程量计算方法研究[J]. 金属矿山, 2010, 39(12):15-17.
- [5]LIU X, CHEN P, TONG X, et al. UAV-based low-altitude aerial photogrammetric application in mine areas measurement[C]// Second International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications. [S.l.]:IEEE, 2012:240-242.
- [6]MCLEOD T, SAMSON C, LABRIE M, et al. Using video acquired from an unmanned aerial vehicle (uav) to measure fracture orientation in an open-pit mine[J]. Geomatica, 2013, 67(3):173-180.
- [7]SNAVELY N, SIMON I, GOESELE M, et al. Scene reconstruction and visualization from community photo collections[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 98(8):1370-1390.
- [8]周骏. 多视图图像三维重建若干关键技术研究[D]. 成都:电子科技大学, 2013.
- [9]FUMKAWA Y, PONCE J. Accurate, dense, and robust multi-view stereopsis[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2010, 32(8):1362-1376.
- [10]许志华, 吴立新, 陈绍杰, 等. 基于无人机影像的露天矿工程量监测分析方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(1):84-88.
- [11]闫世博. 基于图像的三维重建及网格化算法研究[D]. 上海:上海交通大学, 2013.
- [12]BESL P J, MCKAY N D. A method for registration of 3-D shapes[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2002, 14(2):239-256.
- [13]郑鹏飞, 邹培玲, 赵菊娣, 等. 点云曲面空间网格化加密求交算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(3):605-612.
- [14]KAZHDAN M, BOLITHO M, HOPPE H. Poisson surface reconstruction[C/OL]// Eurographics Symposium on Geometry Processing. Cagliari: [s.n.], 2006:61-70. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1281965>.
- [15]CURLESS B, LEVOY M. A volumetric method for building complex models from range images[C/OL]// Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New York: ACM, 1996:303-312. <https://graphics.stanford.edu/papers/volume-range/>.
- [16]KAZHDAN M. Reconstruction of solid models from oriented point sets[C/OL]// Vienna: Eurographics Symposium on Geometry Processing. Vienna: Eurographics Association, 2005: 73. <https://dl.acm.org/citation.cfm?id=1281931>.
- [17]ZHANG C, CHEN T. Efficient feature extraction for 2D/3D objects in mesh representation[C/OL]//International Conference on Image Processing. Thessaloniki: IEEE, 2016: 935-938. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/958278>.

(责任编辑:李艳)