

改进 ICP 算法在无人机煤堆体积测量的应用研究

彭 蹦, 杨耀权, 江鹏宇

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

摘要:为提高无人机倾斜摄影技术在煤堆体积测量应用中的精度,提出了一种基于正态分布变换的改进迭代最近点(ICP)算法配准,将全站仪三维扫描点云融入无人机倾斜摄影煤堆三维点云中。试验对比发现,该方法能显著增强图像的有效配准度,提高模型点云密度,自主修复无人机倾斜摄影技术的煤堆三维模型空洞。对某电厂煤堆进行无人机倾斜摄影和全站仪三维测点扫描相结合的数据处理试验,得出了改进ICP技术融合能有效提升煤堆三维模型体积精度的可行性结论。

关键词:煤堆体积测量;无人机;倾斜摄影;ICP配准融合;三维模型;测点扫描

中图分类号:TP751.1;V279.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9944(2019)07-0048-06

Application Research of Improved ICP Algorithm in Coal Pile Volume Measurement by UAV

PENG Beng, YANG Yao-quan, JIANG Peng-yu

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of UAV tilt photography in coal volume measurement applications, an improved iterative closest point (ICP) algorithm based on normal distribution transformation is proposed to integrate the total station 3D scanning point cloud into the 3D point cloud of the UAV tilting photography coal pile. Experiments show that this method can significantly enhance the effective matching ratio of the images, improving the point cloud density of the model, and independently repair the three-dimensional model cavity of the coal pile of the UAV oblique photography technology. Through the data processing experiment of the UAV tilting photography and the total station three-dimensional measuring point scanning of coal pile in a power plant, the feasibility conclusion of improving the ICP technology fusion can effectively improve the volumetric accuracy of the three-dimensional model of the coal pile.

Key words: coal volume measurement; unmanned aerial vehicle (UAV); tilt photography; iterative closest point (ICP) registration fusion; three-dimensional model; point scanning

现代火力发电厂中,煤场的储煤量与发电煤耗量息息相关,目前最主要的煤场储量获取方式为体积密度折算法^[1]。因此,煤场煤堆体积的盘算往往需保持在厘米级精度,以精确核算电厂发电效益。

随着三维测量技术的高速发展,许多专家学者在不同领域进行了相关的应用和研究。高精度三维

测量取决于更高比例尺(1:2000 或 1:1000)的数字高程模型 DEM(digital elevation model^[2])。其中,无人机倾斜摄影和激光测点扫描作为 2 种三维模型测量新技术,在煤堆体积测绘过程中已被人们广泛使用。

无人机倾斜摄影和激光扫描技术针对不同场景的三维测量已日趋成熟,前者可实现多角度影像

收稿日期:2019-04-16;修订日期:2019-06-03

作者简介:彭蹦(1995—),男,硕士,研究方向为数字图像处理、三维建模、点云配准等;杨耀权(1962—),男,博士,教授,硕士生导师,研究方向为智能测试技术、数字图像处理、激光盘煤等。

采集,保证三维模型精度,提升建模测量效率,但数据冗长、自主匹配速度慢、空洞修补具有主观性;后者使用简单,操作安全,可精细化三维模型^[3],但后期处理软件效率低,人为误差影响大。综合分析无人机倾斜摄影和地面三维激光测点扫描技术各自的优缺点,在此研究了倾斜摄影与全站仪三维扫描技术在煤堆体积测量中的融合应用,取长补短,研发适用于电厂煤堆工程测量的新技术,最大限度提升煤堆体积测量的效率和精度。

1 基于点云数据的煤堆三维测量

1.1 无人机倾斜摄影技术

无人机倾斜摄影技术采用搭载高清摄影头的小型飞行器,在低空环境下对煤场煤堆进行固定云台角度拍摄,得到一组具备一定航向重叠度和旁向重叠度的煤堆图像,随后利用软件处理获取实景三维模型成果,完成煤堆业内数据分析。该技术广泛应用于军工、测绘、数字城市等领域。

基于无人机倾斜摄影技术的煤堆体积测量流程如图1所示。

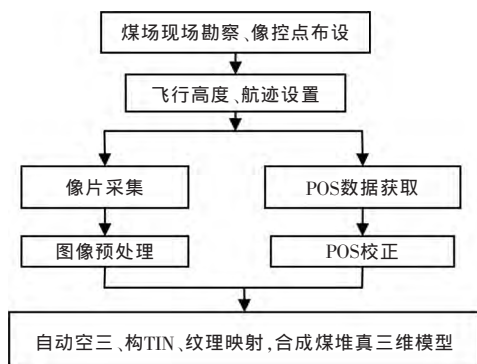


图1 基于倾斜摄影的无人机煤堆体积测量技术

Fig.1 Coal pile volume measurement technology based on tilt photography of drone

无人机倾斜摄影测量技术是目前电厂煤堆体积测量的一种新型技术,它能够多角度、大面积采集煤场影像数据,保证煤堆测量精度,提升测量效率,但基于无人机倾斜摄影获取煤场煤堆三维数据存在一些尚未克服的技术性问题,如:影像数据自主匹配速度慢、地形地貌复杂情况下无GPS信号时,无人机不可控等。

1.2 三维测点扫描技术

三维扫描技术又称实景复制技术,它利用激光测距的原理,通过漫反射收集被测目标表面的三维

几何、纹理数据等信息^[4]。此类技术广泛应用于历史文物保护、医学工业测量等精密程度高的领域。

全站仪三维测点技术的核心为脉冲激光打点测距,通过对激光的发射和接收、延时估算得到脉冲波来回时间间隔,通过式(1)求解出激光发射基站和标靶之间的距离。即:

$$\Delta d = c \Delta t / 2 \quad (1)$$

式中: c 为光速; Δt 为脉冲波来回时间间隔; Δd 为激光发射基站和标靶之间的距离。

利用毫米级精度全站仪采集像控点三维坐标的操作步骤如图2所示。

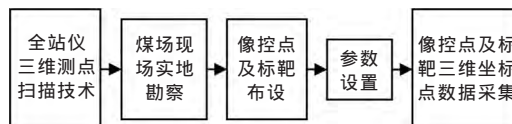


图2 像控点三维坐标采集流程

Fig.2 3D coordinate acquisition process of image control points

为保证煤场每个像控测点所获三维坐标数据准确可靠,外业数据采集过程中应采用正直扫描以减小扫描方向与被扫描堆夹角过大带来的误差^[5]。全站仪扫描基站采用实时动态RTK(real time kinematic)载波相位差分技术,求差解算平面坐标,通过水准测量技术获得高程数据坐标^[6]。

该技术操作简单,不受GPS信号影响,获取的三维RTK数据能达到毫米级精度。

1.3 ICP算法及改进

点云配准的最终目的是通过一定的旋转和平移变换将不同坐标系下的2组或者多组点云数据统一到同一参考坐标系下,获得被测物体的完整几何信息。在数据配准算法中,研究者使用最多的也是最为经典的是ICP算法。

在建模过程中,有些物体是完全一样的,只是空间位置发生变化^[7],这就为无人机倾斜摄影和全站仪三维测点技术的ICP算法配准融合提供可行性理论依据。

ICP算法的基本原理是:分别在待匹配的目标点云 P 和源点云 Q 中,按照一定的约束条件,找到最近邻点 (p_i, q_i) ,然后计算出最优匹配参数 R 和 t ,使得误差函数最小。误差函数 $E(R, t)$ 为

$$E(R, t) = \min \left\{ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \| q_i - (R \cdot p_i + t) \|^2 \right\} \quad (2)$$

式中: n 为最邻近点对的个数; p_i 为目标点云 P 中的

一点; q_i 为原点云 Q 中与 p_i 对应的最近点; R 为旋转矩阵; t 为平移向量。

ICP算法能保证源点云和目标点云的精准匹配,但是配准速度较慢。故在此采用基于NDT(normal distributions transform)的ICP点云配准算法^[8-9],即在ICP算法配准之前,先通过NDT算法对点云距离及姿态进行粗调整,有效提升配准速度。

在基于NDT的ICP算法背景下,无人机倾斜摄影与全站仪三维测点技术点云融合的基本步骤如下:

步骤1 利用无人机倾斜摄影技术获取目标点云 P ,并在其中取若干点集 $p_i \in P$;

步骤2 均匀划分目标点云 P 的三维模型空间,形成若干格子,每个格子最少包含6个点;

步骤3 计算每个格子的中值向量 l_n 和协方差矩阵 C_n ;

$$l_n = \frac{1}{m} \sum_{h=1}^m x_h \quad (3)$$

$$C_n = \frac{1}{m-1} \sum_{h=1}^m (x_h - l_n)(x_h - l_n)^T \quad (4)$$

式中: x_h 为每个格子的点集; m 为每个格子中点的个数。

步骤4 利用格子中的每一个数据点 x_h 的概率密度函数 $\rho(x_h)$,通过正态分布变换得到正态分布模型 $N(l_n, C_n)$,形成分段光滑区间表示形式:

$$\rho(x_h) = \frac{1}{\sqrt{2\pi|C_n|}} \exp\left(-\frac{(x_h - l_n)^T C_n^{-1} (x_h - l_n)}{2}\right) \quad (5)$$

步骤5 在目标点云 P 中,将待配准点集 p_i 每一个点按照最优转移矩阵 G 进行变换,完成目标点云距离及姿态粗调整。其中,最优转移矩阵由最优值分数值 $G(p)$ 计算得到:

$$T = \begin{bmatrix} R & t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G(p) = \prod_{h=1}^m p(T(x_h)) \quad (7)$$

步骤6 利用全站仪三维扫描测点技术获取像控点三维坐标,像控点集构建源点云 Q ;

步骤7 找出源点云 Q 中对应点集 $q_i \in P$,使得 $\|q_i - p_i\|$ 为最小值;

步骤8 计算 R 和 t ,使得误差函数最小;

步骤9 利用步骤8求得的 R 和 t ,对 p_i 使用四元数算法进行旋转和平移变换,得到新的对应点云数集为

$$p_i' = \{p_i' \mid p_i' = R \cdot p_i + t, p_i \in P\} \quad (8)$$

步骤10 计算 p_i' 与对应点集 q_i 的平均欧式距离:

$$d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \|q_i - (R \cdot p_i' + t)\|^2 \quad (9)$$

步骤11 若 d 小于某一给定的阈值或者大于预设的最大迭代次数,则停止迭代运算;否则返回步骤7,直至满足收敛条件为止。

1.4 技术融合应用

针对煤场测区特点,试验采用无人机倾斜摄影技术大范围采集煤场点云数据,合理布设像控点位置,然后将全站仪像控测点坐标融入无人机倾斜摄影点云模型中,根据新模型三维数据完成对煤场煤堆的体积测量。其中,ICP技术数据融合的流程如图3所示。

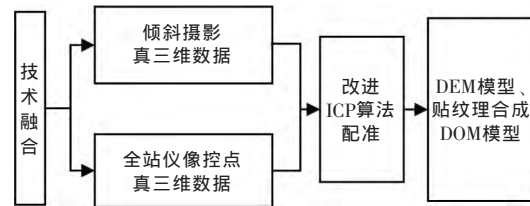


图3 ICP算法点云融合流程

Fig.3 ICP algorithm point cloud fusion process

2 煤堆建模测量应用

2.1 测区概况

煤场试验区位于贵州省贵阳市某电厂3号煤场,长约160 m,宽约76 m,测区呈长方形,其核心区域均由煤堆构成。周边区域均为挡煤围墙,还包括有路灯、楼房、铲煤车等地物。试验现场如图4所示。



(a)前视影像



(b)左视影像



(c)右视影像

图 4 不同角度下的测区工程现场

Fig.4 Survey site at different angles

2.2 数据获取及分析处理

(1)测量条件与数据获取

试验采用 DJI 大疆精灵 Phantom 4 RTK 无人机飞行器,建模精度满足厘米级要求。该无人机飞行器主要技术指标和性能参数见表 1。

表 1 无人机飞行器主要性能参数

Tab.1 Main performance parameters of UAV aircraft

设备	参数	技术指标
机身	最大上升速度	5 m/s
	最大水平飞行速度	50 km/h(定位 P 模式)
	最大飞行海拔高度	6000 m
	最大可倾斜角度	俯仰-90°~30°
定位模块	悬停精度	启用 RTK 时,垂直±0.1 m; 水平±0.1 m
	定位精度	垂直 1.5 cm(RMS) 水平 1.0 cm(RMS)
相机	照片分辨率	4:3 宽高比,4864×3648 16:9 宽高比,5472×3078
	有效像素	2000 万

设置飞行高度 50 m,航线重叠度 50%,旁向重叠度 45%,云台角度 60°。依据以上参数设置,此次试验针对 3 号煤场煤堆区域,飞行时间约 25 min,获取原始煤堆图像 324 张。大疆无人机航摄过程自主采集 POS 数据,获取影像外方位元素。再将 324 张煤堆图像进行有效像片筛选,剔除无煤堆目标影像,最终获得 301 张有效像片。

将煤堆图像进行畸变校正,使用运动模糊算子 motion filter,利用维纳滤波法复原模糊图像,完成去抖动化处理^[10],处理前后对比结果如图 5 所示。



(a)原图像



(b)复原后图像

图 5 维纳滤波法处理前后的对比

Fig.5 Wiener filtering method before and after comparison

(2)扫描试验

全站仪针对 3 号煤场煤堆进行像控测点扫描试验。因考虑到煤场煤堆的特殊情况,为保证一定的精准度,中间凹陷段及煤堆斜坡区域需集中铺设多个像控点。其中,像控点设定共计 14 个,采集到的像控点三维坐标数据见表 2。试验过程中,记录仪自动换算像控点相对三维坐标数据。

表 2 像控点相对三维坐标

Tab.2 Image control point relative 3D coordinates

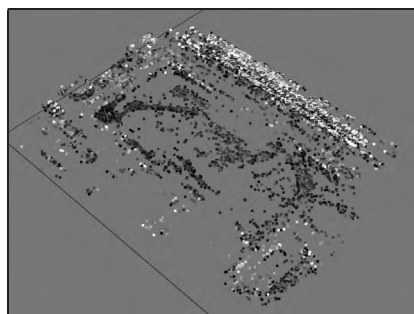
编号	X 轴/m	Y 轴/m	Z 轴/m	编号	X 轴/m	Y 轴/m	Z 轴/m
C1	0.000	0.000	1.200	C8	35.811	53.605	8.450
C2	156.960	0.017	1.222	C9	149.717	20.970	4.671
C3	156.963	39.550	1.231	C10	141.420	57.328	9.526
C4	156.971	75.370	1.210	C11	75.980	10.851	4.920
C5	0.051	75.374	1.271	C12	79.104	62.746	7.929
C6	0.032	39.550	1.209	C13	124.980	27.490	9.010
C7	11.550	12.913	3.460	C14	79.168	36.374	8.843

(3)煤堆建模

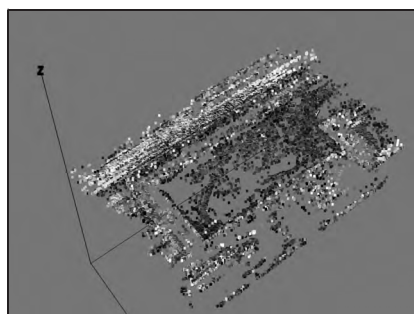
综合上述数据,通过无人机倾斜摄影技术得到的煤堆 POS 数据,使用光束法整体平差煤堆影像区域,空三建立不规则三角网格 TIN,形成白模区域后得到煤堆 DEM 模型^[11]。

结合全站仪扫描得到的像控点三维 RTK 数据,在 open CV 平台上采用基于 NDT 的改进 ICP 算法,将全站仪像控点三维坐标数据融入无人机倾斜摄影煤堆 DEM 模型中,提升配比准确度,图像无效化程度得以抑制,最终得到更加精细的煤堆 DEM 合成模型,并以 USGS 格式保存。

ICP 算法技术融合前后的煤堆点云密度分布如图 6 所示。



(a)无人机倾斜摄影



(b)改进 ICP 融合技术

图 6 煤堆点云数据密度

Fig.6 Coal pile point cloud data density

改进 ICP 算法技术融合后的点云密度显著增加,煤堆 RTK 三维数据得到的模型真实性效果较好,白模区域无明显空洞,如图 7 所示。

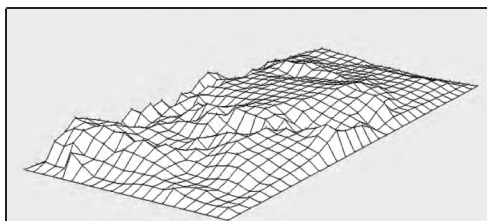


图 7 煤堆白模区域效果

Fig.7 Coal pile white mode area effect

利用 Pix4D mapper 软件纹理贴图,获取煤场区域煤堆数字正射影像图 DOM (digital orthophoto map),最终形成真实煤堆数字地表模型 DSM(digital surface model),建模效果对比如图 8 所示。



(a)无人机倾斜摄影技术



(b)改进 ICP 融合技术

图 8 煤堆三维重建模型

Fig.8 3D reconstruction model of coal pile

可知,传统无人机倾斜摄影技术下煤堆数据配比错误致使图像无效化严重,引起模型空洞多,建模效果不理想。而通过 ICP 算法合成的煤堆 DSM 模型,可以发现,ICP 算法能有效地将像控点三维数据点融入无人机倾斜摄影煤堆 DEM 模型中,提高空洞自主修补能力,提升图像有效配比,点云密度增加,从而模型的精细化程度及纹理特征得以大大改善。

(4)精度对比分析

为确保试验结论的准确性,在煤场试验区,可取编号为 C7—C14 等 8 个像控点作为核准点进行精度校验,分别对比实测全站仪 RTK 三维坐标、无人机倾斜摄影 DOM 模型点坐标以及 ICP 技术合成的 DOM 模型点坐标,得出 ICP 技术合成前后核准点处的平面误差和高程误差。无人机倾斜摄影和 ICP 技术融合下的煤堆三维模型在核准校验点处的平面误差 $\Delta X, \Delta Y$ 及高程误差 ΔZ 见表 3。

表3 模型误差精度对比

Tab.3 Model error precision comparison

编号	平面误差/cm				高程误差/cm	
	ΔX_1	ΔX_2	ΔY_1	ΔY_2	ΔZ_1	ΔZ_2
c7	12.1	-2.4	-8.3	-1.1	24.8	1.7
c8	-5.8	1.0	-12.1	-0.8	17.4	5.2
c9	9.3	2.1	13.6	1.6	-15.6	-3.9
c10	9.1	1.5	-8.6	3.8	16.5	-1.7
c11	10.6	-2.3	11.7	4.3	-13.0	-5.1
c12	14.0	-1.4	-17.5	-3.6	15.3	6.3
c13	-12.2	-0.7	9.9	1.2	-18.2	3.2
c14	8.0	-3.8	9.1	1.5	16.7	-4.4
均值	5.64	-0.75	-0.28	0.86	5.49	0.16
方差	88.04	4.44	156.8	6.86	315.1	20.45

表中,平面误差 ΔX_1 和 ΔY_1 ,以及高程误差 ΔZ_1 为无人机倾斜摄影技术下的模型误差;平面误差 ΔX_2 和 ΔY_2 ,以及高程误差 ΔZ_2 为 ICP 融合技术下的模型误差。

ICP 融合技术下的煤堆 DOM 模型最大平面误差为 43 mm,最大高程误差为 63 mm,与传统无人机倾斜摄影技术相比,加入本文算法的 ICP 融合技术相对误差减小 80%以上,满足煤堆体积测量 1:1000 精度比例尺要求。同时,在 ICP 算法的配准融合下,模型的数据点均差与方差均大幅度减小。为了更加直观的表现,分别绘制 2 种技术下的精度对比曲线,如图 9 所示。

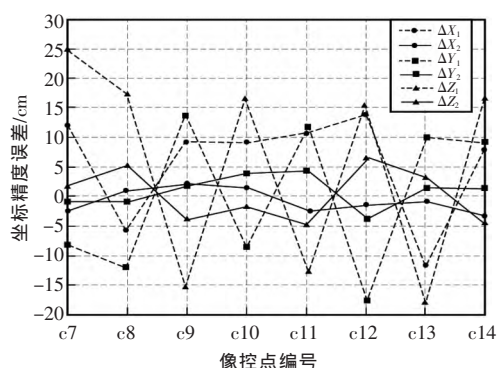


图9 误差精度对比曲线

Fig.9 Error accuracy comparison curve

通过仿真试验结果的分析可知,无人机倾斜摄影和全站仪三维测点扫描技术在改进 ICP 算法的融合应用下,能显著改善煤堆的模型平滑度及真实感,修补模型空洞,提高煤堆体积的计算精度,为火力发电厂的运行、调度及效益核算等提供技术支撑。

3 结语

以上详细叙述了无人机倾斜摄影技术和地面全站仪三维测点扫描技术的基本理论及步骤;提出了基于 2 类技术的改进 ICP 点云融合方法,有效增加了煤堆点云密度,自主修补传统无人机倾斜摄影技术的煤堆模型空洞,提升建模效率,提高煤堆三维模型的分辨率及精度。然而,在建模速度上并不理想,还需要从区域层次 ICP 算法的角度再加以改进,从而得到速度更快、适配性更强的融合配准方法,保证三维模型的高效化建立。此外,倾斜摄影和测点扫描技术在无人机煤堆体积测量领域中的融合应用,或许能够克服某些建筑物对目标区域的限制和遮挡,实现煤堆无死角化数据采集及分析,这将是煤堆体积测量领域内又一个全新的研究方向。对于三维重建领域,尚存在比较大的进步空间,在广阔的商业价值背景下,着重加强三维建模的相关研究,不仅有助于模式识别、视觉图像处理等技术的发展,而且必将推动人工智能技术迈向新纪元。

参考文献:

- [1] 杨德山,董丽丽,梁倩倩,等.手提激光盘煤仪点云去噪[J].激光杂志,2017,38(5):54-57.
- [2] 许一帆,郭杰.基于激光点云和倾斜影像的三维建模方法研究[J].电脑知识与技术,2018,14(28):282-285.
- [3] 贾小凤,吕栋,姜传苓,等.基于激光点云数据的室内精细三维模型建立[J].北京测绘,2018,32(11):1281-1284.
- [4] 储立新,陶钧.三维激光扫描技术在城市地下空间测量中的应用[J].测绘通报,2018,56(5):159-162.
- [5] 王智,薛慧艳.三维激光扫描技术在异形建筑竣工测量中的应用[J].测绘通报,2018,56(7):149-152.
- [6] Jiang C H, Yang J H, Zhang L J, et al. Information extraction and three-dimensional reconstruction for a small laser scanning detector[C]//Optoelectronics and Microelectronics (ICOM), 2012.
- [7] 王元媛,张承学.基于虚拟现实的输电线舞动三维场景的开发[J].电力科学与工程,2010,26(5):17-21.
- [8] 杨飏,李三宝,王力.基于正态分布变换与迭代最近点的快速点云配准算法[J].科学技术与工程,2017,17(15):91-95.
- [9] 付怡然.集成 ICP 和 NDT 的地面激光扫描点云渐进配准方法[D].成都:西南交通大学,2018.
- [10] 郑恩,成耀天,林靖宇.采用去抖动模糊算法的稠密三维重建[J].计算机工程与应用,2018,54(1):217-223.
- [11] 贾雪,刘超,徐炜,等.海量点云数据的建筑物三维模型重建[J].测绘科学,2019,43(4):124-129,174.