

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2005348

基于激光点云数据的地形地貌测量研究

田方

(西安航空职业技术学院 西安 710089)

摘要: 针对在实际测量地形地貌时激光数据过滤误差较大的问题,设计了基于激光点云数据的地形地貌测量及处理方法。采集激光点云数据,结合公共靶法与最小二乘法补全点云数据且自动过滤非地面数据,对激光点云数据的平面坐标与高程实施转换,生成待测区域的地形地貌等高线,实现该区域的地形地貌测量。通过实验验证设计方法性能,结果表明,该方法可实现分散站点激光点云数据的拼接与过滤处理,过滤性能稳定且过滤误差较低,平均为2.1%,可精准测量实验地区的地形地貌,坐标值误差平均为0.187,满足实际应用中的地形地貌高精度测量需求。

关键词: 激光点云数据;地形地貌;激光扫描仪;最小二乘法;过滤处理

中图分类号: TP217 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 140.3055

Topographic and geomorphic measurement based on laser point cloud data

Tian Fang

(Xi'an Aeronautical Polytechnic Institute, Xi'an 710089, China)

Abstract: Aiming at the problem of large filtering error of laser data when actually measuring topography, a topographic survey and processing method based on laser electric cloud data is designed. Collecting laser point cloud data, combining public target method and least square method to complete the point cloud data and automatically filter non-ground data, transforming the plane coordinates and elevation of laser point cloud data, generating topography contour lines of the area to be measured, and realizing topography measurement of the area. The performance of the design method is verified by experiments. The results show that the method can realize the splicing and filtering processing of laser point cloud data at scattered stations, and the filtering performance is stable and the filtering error is low, with an average of 2.1%. It can accurately measure the topography of the experimental area, with an average coordinate error of 0.187, which meets the needs of high-precision measurement of topography in practical applications.

Keywords: laser point cloud data; topographical features; laser scanner; least square method; filtering treatment

0 引言

地形地貌测量在地质勘查与岩体稳定性评估等领域内具有非常关键的作用,精准的地形地貌测量结果对于地质勘查与岩体稳定性评估结果具有较高的保障作用^[1]。尤其是对于地形地貌较为复杂的地区,精确的测量结果可提升此类地区的评估准确性,为地形修复治理及实时监测等奠定科学基础^[2-3]。

基于无人机航摄的地形测量方法是运用低空无人机倾斜摄影技术,并结合三维实景建模软件与逆向工程的点云数据处理功能,绘制复杂地形图,对复杂地形实施测量,该方法可实现复杂地形的测量,但其测量精度不够理想^[4];GNSS双天线结合AHRS的地形测量方法是通过将GNSS

双天线与姿态航向参考系统AHRS相结合,对所采集到的地形位置信息实施预处理后,获得最终地形测量结果,此方法的过滤处理结果较为准确,但最终测量结果精度不够稳^[5]。

激光点云数据是通过三维激光扫描技术获取到的目标点数据,可有效规避以往单点测量方法的缺陷,能够实现高速高分辨率地将待测目标的表面三维坐标数据获取到^[6-8]。为此,本文提出了基于激光点云数据的地形地貌测量方法,通过运用三维激光扫描仪对待测地区实施扫描,将此地区的激光点云数据采集到,对此数量实施预处理后,经坐标转换生成等高线,完成待测地区的地形地貌测量,将本文方法的测量结果用于实际地质勘查与岩体稳定性评估等领域中,为获取精准评估结果提供科学依据。

收稿日期:2020-11-12

• 15 •

1 基于激光点云数据的地形地貌测量方法

1.1 激光点云数据的采集

选取三维激光扫描仪实施所需测量地形地貌的激光点云数据采集。在现实采集过程中,需对三维激光扫描仪的扫描工作路径与扫描站点实施选取,并对其扫描参数实施相应设置^[9]。激光点云数据采集过程如图 1 所示。

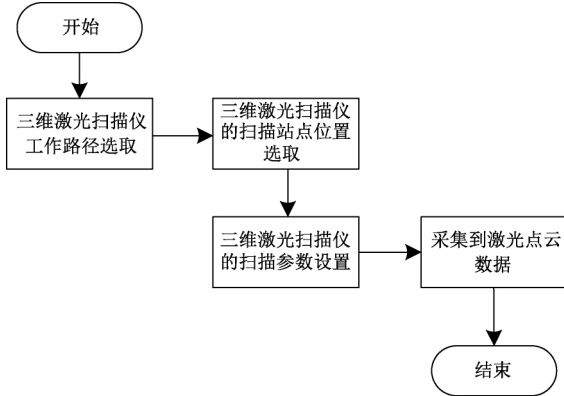


图 1 激光点云数据采集过程

具体过程描述如下:

1)选取三维激光扫描仪的工作路径:一般而言通过三维激光扫描仪无法一次性实现作业场景的扫描,应因地制宜选取相应的扫描路径,并对扫描站数实施设置,将布置站点的扫描区间选取出。在现实操作中,应以所应用的三维激光扫描仪的最高扫描距离与最高扫描区间为依据,对相对的站点数目与扫描区间实施设置。

2)选取三维激光扫描仪的扫描站点位置:在确准三维激光扫描仪的扫描站点数目与扫描工作区间的基础上,实地选取各个扫描站点每次扫描的最优位置^[10]。对最优扫描站点位置的选取,不仅能保证在有效的区间内各个站点将更多的三维激光点云数据采集到,而且能够对相邻两次扫描数据间具备充足的激光点云数据重叠予以保证,确保在实施配准时数幅三维激光点云具有较好的配准起算数据。

3)设置三维激光扫描仪的扫描参数:以地形地貌的表面信息为依据,对三维激光扫描仪的扫描间隔与扫描区间实施设置。以现实中的扫描对象与扫描设备为依据,设置合理恰当的三维激光点云扫描间隔精度,满足不同三维激光点云场景的扫描需要,将三维激光扫描仪的工作效率提升。

1.2 激光点云数据的处理

1)激光点云数据的拼接处理

在三维激光扫描仪的现实扫描过程中,因存在光线与障碍物等遮挡问题,故为将待扫描地区的地形地貌完整数据获取到,扫描中需具备数个扫描站点实施多角度扫描。将通过数个扫描站点所采集到的激光点云数据实施整合即

为激光点云数据拼接处理,也就是向同一坐标系内统一不同视点下的激光点云数据坐标,在此选用基于公共标靶的方式实施激光点云数据拼接处理^[11]。

2)激光点云数据的过滤处理

在完成激光点云数据拼接处理之后,针对拼接处理后的大量激光点云数据,怎样快速地将地形地貌的精准地面点数据获取到,是实施地形地貌测量的关键点之一。在此选用最小二乘法对地面的激光点云数据中非地面点实施快速过滤,获取到精准的地面点云数据^[12]。激光点云数据的过滤处理过程如图 2 所示。将完成拼接处理后的大量激光点云数据实施分块,并采用动态二叉树方法将分块的空间索引关系创建,通过最小二乘法自动过滤非地面点云数据。其中在实施过滤处理时,需对存在点的网格实施运算,通过索引方式动态储存运算结果,并将此运算结果作为下一次迭代运算的基础数据。

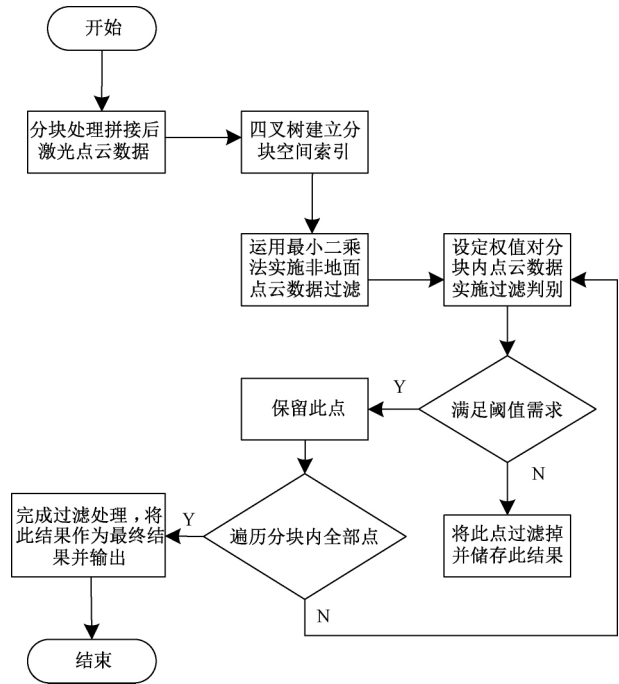


图 2 激光点云数据的过滤处理过程

1.3 地形地貌测量

运用过滤处理后的激光点云数据通过 Geomagic 与 cass 软件绘制待测量区域的地形地貌图等高线,完成该区域的地形地貌测量。

1)坐标转换

因通过三维激光扫描仪所采集到的激光点云数据平面坐标与高程属于基于三维激光扫描仪坐标系统的,但地形地貌图绘制时所运用的为独立工程测量坐标系,故在通过激光点云数据实施地形地貌图绘制之前,应先对激光点云数据的平面坐标与高程实施转换,向独立工程测量坐标系内转换基于三维激光扫描仪的激光点云数据坐标系^[13-14]。

(1)平面坐标转换。将基于三维激光扫描仪的平面坐标系与基于工程测量的坐标系建立,分别以 $O-X_1Y_1$ 和 $O-X_2Y_2$ 表示,二者之间的关系如图 3 所示。

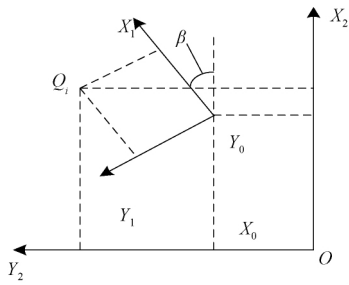


图 3 两种坐标系的关系

运用四参数模型转换平面坐标,包含平移参数、旋转参数及尺度变化参数,其中平移参数以 X_0 和 Y_0 表示,旋转参数与尺度变化参数分别以 β 与 ω 表示。设在两个坐标系内任意一点 Q_i 的坐标依次以 (X_1, Y_1) 与 (X_2, Y_2) 表示,二者之间所存在的关系为:

$$\begin{bmatrix} X_2 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \end{bmatrix} + (1 + \omega)\mathbf{R}(\beta) \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{R}(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}$ 。为了将式(1)内的平移参数、旋转参数及尺度变化参数求出,最少应具备两个已知平面点,当已知平面点高于两个时,可运用最小二乘法拟合求解。网格分块的最小二乘法拟合函数为:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \alpha_i(x) p_i(x) = \mathbf{p}^T(x) \boldsymbol{\alpha}(x) \quad (2)$$

式中:所分块的编号以 i 表示;待求系数以 $\boldsymbol{\alpha}(x) = [a_1(x), a_2(x), \dots, a_n(x)]$ 表示,属于坐标 x 的函数;基函数以 $\mathbf{p}(x) = [p_1(x), p_2(x), \dots, p_n(x)]$ 表示,属于一个 k 阶完备的多项式;基函数的项数以 n 表示。

m 维基函数 $\mathbf{p}(x)$ 的形函数 $\boldsymbol{\phi}^m(x)$ 为:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\phi}^m(x) = [\phi_1^m, \phi_2^m, \dots, \phi_n^m] = \mathbf{p}^T(x) \mathbf{A}^{-1}(x) \mathbf{B}(x) \\ \mathbf{A}(x) = \sum_{i=1}^n w(x - x_i) \mathbf{p}(x_i) \mathbf{p}^T(x_i) \\ \mathbf{B}(x) = [w(x - x_1) p_1(x), w(x - x_2) p_2(x), \dots, w(x - x_n) p_n(x)] \end{cases} \quad (3)$$

将式(3)代入式(2),即可将移动最小二乘拟合函数获取到:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \varphi_i^m(x) y_i = \boldsymbol{\phi}^m(x) \mathbf{y} \quad (4)$$

式中:基函数的阶数以 m 表示; $\mathbf{y}^T = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 。对于高于两个已知平面点的拟合求解,可运用移动最小二乘拟合函数实现。

运用最小二乘法通过已知点平面坐标值将转换参数求解出,将全部点云基于三维激光扫描仪平面坐标值向基于

工程测量坐标系内转入,实现坐标转换。

(2)高程转换。设以三维激光扫描仪系统为起算面的激光点云数据高程值为 H_e ,假定的水准面为经全站仪得到的控制点高程值的起算面,可在小范围内将其看作平面,将此种高程值设为 H_z 。二者的关系式为:

$$H_z = H_e + M \quad (5)$$

式中:任意点云的高程差值以 M 表示。

运用平面拟合法对任意点云的高程差值 M 实施求解。设任意点云的高程差值 M 和此点的平面坐标 $F(x, y)$ 之间的关系式为:

$$M = F(x, y) = cx + dy + a \quad (6)$$

式中: c, d, a 均表示模型参数。为了将 c, d, a 模型参数求出,最少需具备 3 个已知的公共高程点。

将 3 个已知的公共高程点的高程值代入式(6),将各个模型参数求解出,转换各点云数据的高程值为基于假定水准面的高程值。

2)生成等高线

(1)激光点云数据采样。因激光点云数据量较为庞大,若直接向 *cass* 软件内导入全部激光点云数据,对于运用坐标数据生成等高线不利,故应对激光点云数据实施采样^[15]。通过 *Geomagic* 软件内的曲率采样方法实施激光点云数据采样,先设定某个百分比值,依据最小二乘法对某个曲面上的曲率实施运算;然后同理将全部的曲率运算出,根据曲率高低划分区间精简删除激光点云数据,将所设定的百分比与激光点云数据数值乘积的点值获取到。基于激光点云数据生成等高线的过程如图 4 所示。

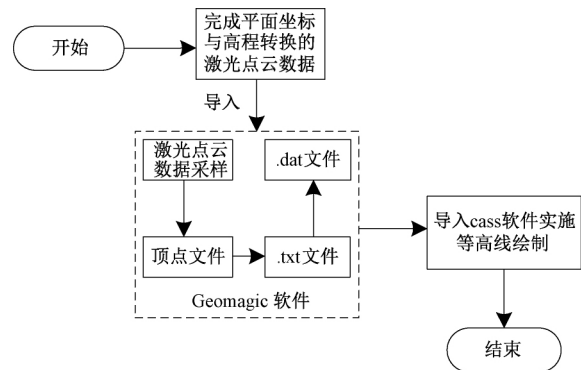


图 4 等高线生成过程

(2)绘制等高线。向 *cass* 软件内导入采样后的激光点云数据,创建数字地面模型(digital terrain models, DTM)并设置等高距,由 *cass* 软件将待测区域的等高线自动生成,实现待测区域的地形地貌测量。

2 实际应用结果分析

以某山地区域为实验对象,该区域的总面积约为 7.5 km²,海拔大概为 560 m,区域内包含植被、丘陵与山地等,具有较大起伏且坡度陡峭,沟谷幽深,呈脉状分布。选

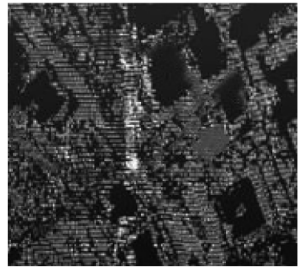
取文献[4-5]方法作为对比方法,分别运用 3 种方法对实验区域的地形地貌实施测量,通过对比 3 种方法的测量结果,检验本文方法的实际应用效果与性能。

2.1 拼接与过滤效果呈现

通过本文方法对所采集到的实验区域 28 万个激光点云数据实施拼接与过滤处理,检验本文方法的处理效果。拼接处理效果图与过滤掉非地面点后的激光点云效果如图 5 所示。



(a) 拼接处理后实验区域激光点云图



(b) 过滤掉非地面点后的激光点云图

图 5 本文方法拼接与过滤处理效果

通过图 5 能够看出,本文方法可将由 10 个扫描站点所采集到的 28 万个分散激光点云数据实施融合拼接,并可将拼接后的激光点云数据中的非地面点过滤掉,获取到仅有地面点的实验区域激光点云数据。

2.2 过滤精度对比

为进一步检验本文方法的过滤性能,现将本文方法的过滤误差与其他两种对比方法实施对比,通过分析对比结果检验本文方法的过滤精度。将拼接后的实验区域激光点云数据均等划分为 8 块,依次采用 3 种方法对 8 块激光点云数据实施过滤处理,对比各方法的过滤误差,对比结果如图 6 所示。分析图 6 可得知,本文方法对 8 块激光点云数据的过滤结果中,整体过滤误差波动较小,且平均误差为 2.1%,远低于其他两种方法,说明本文方法具有更优越的过滤性能,过滤精度更高。

2.3 测量精度对比分析

运用全站仪将实验区域内 10 个扫描站点的平面坐标与高程获取到,作为实际坐标值与 3 种方法测量所得的坐标值实施对比,检验各方法的测量精度。对比结果如表 1 所示。由表 1 中对比结果可得出,与实际坐标值相比,本文方法测量所得的实验区域各扫描站点的坐标值与实际坐标

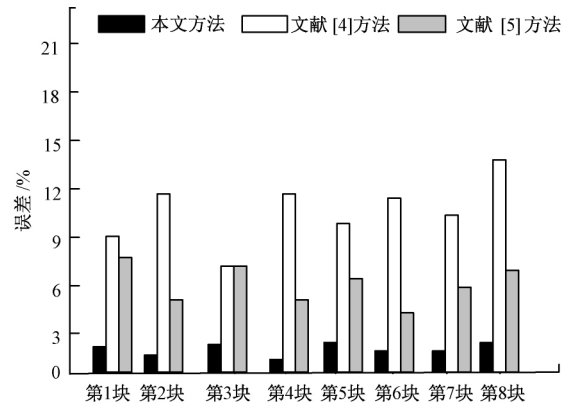


图 6 各方法过滤误差对比结果

值最为接近,平均误差值为 0.187,而文献[4]方法平均误差值为 0.339,文献[5]方法平均误差值为 0.715。表明各扫描站点的坐标值平均误差最低,相比之下文献[5]方法的平均误差最高。由此可见,本文方法的测量精度更高,具有更加优越的测量性能,可满足实际地形地貌的测量需求。

表 1 各方法测量结果对比

扫描站点	实际坐标值	本文方法测量值	文献[4]方法测量值	文献[5]方法测量值
1	X	1 068.918	1 068.906	1 068.895
	Y	1 003.570	1 003.581	1 003.592
2	X	1 072.394	1 072.385	1 072.378
	Y	986.500	986.492	986.481
3	X	1 087.730	1 087.715	1 087.710
	Y	997.685	997.675	997.664
4	X	904.258	904.246	904.235
	Y	1 022.347	1 022.332	1 022.323
5	X	1 051.300	1 051.283	1 051.275
	Y	1 027.387	1 027.376	1 027.363
6	X	1 044.692	1 044.683	1 044.671
	Y	1 012.590	1 012.582	1 012.570
7	X	1 049.985	1 049.972	1 049.968
	Y	997.875	997.861	997.853
8	X	1 065.580	1 065.569	1 065.560
	Y	978.146	978.130	978.121
9	X	1 036.475	1 036.462	1 036.450
	Y	987.523	987.513	987.507
10	X	1 042.594	1 042.588	1 042.577
	Y	1 003.423	1 003.434	1 003.445

3 结 论

本文提出了基于激光点云数据的地形地貌测量方法,

选取三维激光扫描仪的扫描路径、扫描站点位置并设置扫描参数,对待测区域实施完整扫描后,将该区域的激光点云数据获取到,运用公共靶法拼接各个扫描站点所采集到的分散激光点云数据后,对拼接后激光点云数据实施分块,采用最小二乘法逐块实施非地面点过滤处理;将完成过滤处理之后的激光点云数据的平面坐标与高程转换到独立工程测量坐标系中后,向 Geomagic 软件导入此点云数据,运用此软件对该点云数据实施采样后导入 cass 软件内,将数字地面模型构建出并设置等高距,在此基础上,将待测区域的地形地貌等高线生成,完成待测区域的地形地面测量,经实验检验了本文方法具有较高的过滤精度与测量精度,实际应用性能较高。

参考文献

- [1] 谢小芳,万勇,严可馨,等. 地下洞库三维激光扫描点云区域分割和容积计算[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(9):80-86.
- [2] 魏伟,周云轩,田波,等. 基于地面激光扫描的典型海岸带盐沼滩地形反演[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2018, 48(6):283-291.
- [3] 陈超,李肖敏,董恩增,等. 基于梯度分块的自适应点云滤波方法[J]. 电子测量技术, 2018, 41(19):79-83.
- [4] 王明,李丽慧,廖小辉,等. 基于无人机航摄的高陡/直立边坡快速地形测量及三维数值建模方法[J]. 工程地质学报, 2019, 27(5):999-1008.
- [5] 景云鹏,刘刚,金志坤. GNSS 双天线结合 AHRS 测量农田地形[J]. 农业工程学报, 2019, 35(21):166-174.
- [6] 杜盼晓,李攀. 基于三维激光扫描技术的暗挖隧道变形分析[J]. 施工技术, 2018, 47(4):1305-1308.
- [7] 朱建军,付海强,汪长城. InSAR 林下地形测绘方法与研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2018, 43(12):2030-2038.
- [8] 于方磊,赵硕,程坤,等. 基于单光子探测的 LiDAR 三维点云数据处理方法设计[J]. 国外电子测量技术, 2019, 38(2):10-14.
- [9] 杨玉泽,林文树. 基于激光点云数据的树木枝叶分割和三维重建[J]. 西北林学院学报, 2020, 163(3):177-182.
- [10] 周志宇,陈斌,郑光,等. 基于地基激光雷达点云的植被表型特征测量[J]. 生态学杂志, 2020, 39(1):308-314.
- [11] 张霄,罗博仁,明洋. 基于车载激光扫描与卫星图像测量协同的公路改扩建勘测设计方法研究[J]. 中外公路, 2018, 38(2):6-9.
- [12] 许艺腾,李国元,邱春霞,等. 基于地形相关和最小二乘曲线拟合的单光子激光数据处理技术[J]. 红外与激光工程, 2019, 302(12):148-157.
- [13] 朱笑笑,王成,习晓环,等. 多级移动曲面拟合的自适应阈值点云滤波方法[J]. 测绘学报, 2018, 47(2):153-160.
- [14] 王畅,舒勤,杨赞秀,等. 利用结构特征的点云快速配准算法[J]. 光学学报, 2018, 38(9):175-182.
- [15] 王建军,徐立军,李小路,等. 姿态角扰动对机载激光雷达点云数据的影响[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(8):1810-1817.

作者简介

田方,硕士,讲师,主要研究方向为无人机航空摄影测量学、激光雷达点云数据处理。
E-mail: polk1009@163.com