

植物表面特征对三维激光点云的影响

徐文兵^{1,2}, 程效军^{1*}

¹ 同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

² 浙江农林大学环境与资源学院, 浙江 杭州 311300

摘要 利用 Leica C05 三维激光扫描仪和南方全站仪以多种特征的植物表面为观测目标, 获取点云数据和距离参考值, 研究不同植物表面的颜色、粗糙度和测站距离对点云的测距精度和激光回波强度的影响。实验结果表明: 测站距离小于 100 m 时, 扫描仪测距误差为 1~5 mm, 超过 90 m 时, 测站距离每增加 10 m, 激光点云测距误差约增加 1 mm; 颜色、粗糙度和测站距离对三维激光扫描仪的激光回波强度和测距精度有影响; 颜色对激光回波强度的影响较大, 白色的激光回波强度最强, 黑色最低, 测距精度与激光回波强度有较强的相关性; 植物表面粗糙度对激光回波强度的影响较低, 没有明显的相关性; 植物和非植物的颜色对激光回波强度的影响基本类似。

关键词 遥感; 三维激光扫描仪; 点云数据; 激光回波强度; 测距精度; 粗糙度

中图分类号 P232 文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.242802

Impact of Plant Surface Features on 3D Laser Point Cloud

Xu Wenbing^{1,2}, Cheng Xiaojun^{1*}

¹ College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

² School of Environmental & Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou, Zhejiang 311300, China

Abstract This study aims to investigate the impacts of plant color, surface roughness, and ranging distance on LiDAR data intensity and ranging accuracy. The multi-featured plant surface was measured using a Leica C05 laser scanner and South Total Station. The results demonstrate that the ranging error is 1–5 mm when measuring targets within 100 m. When the distance exceeds 90 m, the ranging error of the laser point cloud increases approximately 1 mm with each increase of 10 m in station distance. Color, surface roughness, and ranging distance affected the LiDAR data intensity and ranging accuracy. The white color laser had the highest intensity. There was a strong relationship between LiDAR data intensity and ranging accuracy, but no obvious relationship between surface roughness and LiDAR data intensity. The influences of plant and non-plant color on LiDAR data intensity were similar.

Key words remote sensing; 3D laser scanner; point cloud data; laser reflection strength; ranging accuracy; roughness

OCIS codes 280.3640; 240.5770; 140.3460; 120.6660; 110.3200

1 引言

三维激光扫描技术是资源监测中的一门新兴技术, 也是测绘领域中的又一项新技术^[1], 发展迅速, 现已运用于变形监测、工程测量、地形测量、古建筑和文物保护等领域, 具有不需要合作目标、高精度、高密度、高效率、全数字等优点^[2]。地面三维激光扫

描仪以激光为载体, 利用激光束的高速发射与接收提供扫描目标高密度点云的三维坐标信息, 利用激光接收机记录目标的后向散射回波强度^[3]。针对三维激光扫描点云测距精度的影响因素, 张永彬等^[4]研究了距离的影响, 测量距离超过一定范围后精度明显下降; 高祥伟等^[5]研究了室内目标颜色和粗糙度的影响, 发现颜色的影响较大而粗糙度的影响较

收稿日期: 2020-02-20; 修回日期: 2020-02-28; 录用日期: 2020-03-12

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)、浙江省公益技术研究项目(LGN18C160004)

* E-mail: cxj@tongji.edu.cn

小;蔡越等^[6]认为目标物距离对点云数量的影响较大,目标物颜色对点云回波强度的影响较大,而粗糙度对两者的影响不明显;李海泉等^[7]研究了包括控制网、标靶测量精度、点云拼接精度、扫描距离及扫描物回光强度等的影响因素及其控制方法;徐源强等^[8]针对点云序列配准中产生的误差采用分配误差闭合差的方法来提高点云精度;曹先革等^[9]研究了扫描距离、物体表面材质、控制网、标靶测量精度、光斑大小以及环境因素对三维激光扫描精度的影响。

随着精准林业的发展,三维激光扫描仪被逐步引入林业测量中,蔡越等^[10]通过构建不同年龄竹秆节间与激光强度的模型,准确判别出毛竹年龄。另有诸多学者利用点云数据构建树木生长模型。本研究利用 Leica C05 三维激光扫描仪,以多种植物的局部表面为目标,研究不同测站距离、不同植物表面特征(颜色、粗糙度)对点云测距精度和回波强度的影响,为三维激光扫描仪在林业测绘中的应用提供参考。

2 仪器设备

2.1 Leica C05 三维激光扫描仪及点云数据测量

试验采用的 Leica C05 三维激光扫描仪是瑞士 Leica 公司的一体化高效扫描仪^[11],性能特点为紧凑型、脉冲式、绿色激光,中心波长为 532 nm,扫描速率为 50000 dot·s⁻¹,点位单次测量精度为 6 mm,单点测距精度为 4 mm。

Leica C05 三维激光扫描仪采用的是飞行时间(TOF)脉冲测距法^[12-13],即激光脉冲由激光发射器发射后,由伺服马达带动的反射棱镜引导至物体,经物体反射后回到仪器的接收器中,记录发射激光到接收反射激光的时间,用于计算距离 S ,再根据控制编码器获得激光横向、纵向的扫描角度,记为 α 与 θ 。三维激光扫描测量一般使用仪器内部坐标系, X 轴和 Y 轴在横向扫描面内相互垂直, Z 轴与横向扫描面垂直。由此可得三维激光脚点 P 的点云三维坐标 (x_p, y_p, z_p) ,其中 $x_p = S \cdot \cos \theta \cdot \cos \alpha$ 、 $y_p = S \cdot \cos \theta \cdot \sin \alpha$ 、 $z_p = S \cdot \sin \theta$ 。根据扫描点的激

光回波强度,给扫描点匹配颜色,并将其绘制在显示器上,形成密集的点云。

2.2 NTS 全站仪

南方测绘仪器有限公司 NTS-342R 型全站仪^[14],采用电子测角、光电测距、微处理器、机载软件的组合,属于智能光电测量仪器组合,具备新型激光测距头、双轴液体光电式电子自动补偿器、温度气压自动补偿器。无棱镜时,最大测程为 500 m,测距精度为 $(5 + 2 \times 10^{-6})$ mm,测角精度为 2''。

3 数据采集

3.1 观测目标

在野外,选取不同颜色、不同粗糙度、不同测站距离的植物叶片或树皮(柳树叶 *Salix babylonica* L., 大叶垂榆叶 *Ulmus pumilavar pendula*, 红叶石楠嫩叶 *Photinia serrulata*, 红叶李树皮 *Prunus cerasifera* Ehrh, 翠云草 *Selaginella uncinata*, 含笑树皮 *Michelia chapensis* Dandy, 山核桃树皮 *Carya*, 白玉兰花 *Michelia alba* DC., 银杏树皮 *Ginkgo biloba* L., 毛竹竹竿 *Phyllostachys edulis*, 毛竹笋)作为目标物(见表 1)。颜色有绿色、黑色、红色、蓝色和白色,基本涵盖了植物表面的主要颜色,其中在试验区内没有找到蓝色粗糙表面的植物,为了对比分析,增选蓝色涂料墙面为观测目标。粗糙度根据手感,定性地分为粗糙和光滑两种。仪器到目标的距离不同,控制在 150 m(扫描仪测程)以内。本文从三个方面研究了不同因子对植物表面点云回波强度和测距精度的影响。由于激光点云的离散性,为了限定观测目标的点云范围,方便测定参考数据,将白色 A4 复印纸剪成若干小纸片,并将小纸片中间 2 cm×2 cm 的正方形区域裁掉,正方形内部区域作为目标标记区域。每个观测目标使用 10 个镂空的小纸片进行标记,小纸片粘贴在相应植物表面的不同位置。数据分析时,在约束其他因子相同的情况下,计算分析某个因子的影响程度。

表 1 植物观测目标及其特征

Table 1 Plant objects observed and its features

Observed object	Color	Roughness	Observed object	Color	Roughness
<i>Salix babylonica</i> L.	Green	Smooth	<i>Ulmus pumilavar pendula</i>	Green	Rough
<i>Photinia serrulata</i>	Red	Smooth	<i>Prunus cerasifera</i> Ehrh	Red	Rough
<i>Selaginella uncinata</i>	Blue	Smooth	Blue wall	Blue	Rough
<i>Michelia chapensis</i> Dandy	Black	Smooth	<i>Carya</i>	Black	Rough
<i>Michelia alba</i> DC.	White	Smooth	<i>Ginkgo biloba</i> L.	Black	Rough
<i>Phyllostachys edulis</i>	Green	Smooth	Moso bamboo shoot	Brown	Rough

为了对比植物表面颜色对激光回波强度的影响,在室内选择5种颜色(白、黑、红、蓝和绿)的纸质墙面作为非植物观测目标,测站距离为30 m,材质较光滑。

3.2 试验数据采集

为了消除高度角对激光回波强度的影响,在蓝色墙面上将10个镂空的白色小纸片按不同高度分别粘贴在墙上,设置3个不同距离的测站,用于解算激光回波强度的改正模型^[10] $I_s = I + \sum_{i=1}^n K_i \times (P_s^i - P^i)$ 的系数 $[K_0, K_1, K_2, \dots, K_n]^T$,经过多项式模型改正后的激光回波强度值只与扫描植物表面特性有关。以山核桃树干为观测目标,在8~130 m范围内选定13个测站点,在选定的测站点上,架设Leica三维激光扫描仪,使其按设置的分辨率扫描,研究距离对激光测距精度的影响。

为了减少试验期间室外温度、湿度和光照等外界环境因子的变化和光源等对激光的干扰,试验时间选择天气晴朗的傍晚,提前布设好测站点标记和观测目标标记,点云数据采集在较短时间内一次性完成,以高分辨率和低分辨率各扫描一次。

3.3 参考数据采集

利用2"级全站仪以无棱镜模式测定目标物正方形标记中心点的三维坐标值。在和三维激光扫描仪同样的测站点上安置全站仪后,采用与扫描仪相同的假定坐标系,分别多次测量观测目标标记中心点的三维坐标,取其均值作为参考值。多次测量粗糙目标表面时,有意地在标记框中心四周的较小范围内,通过微动螺旋改变视准轴十字丝中心瞄准的位置,以消除因目标表面的凹凸不平引起的距离和坐标测量误差。

4 数据处理

4.1 点云数据去噪

室外试验中,激光点云受仪器本身、扫描环境、目标物体表面介质等因素的影响,数据中含有大量噪声点。本研究采用平滑去噪算法对有序点云^[15] 进行去噪,即通过计算某一点的邻域内所有点到局部拟合面的距离均值,来替代该点到局部拟合面的距离,进而达到去除噪声点的目的。平滑去噪的算法思路^[16] 如下:

1) 设置邻域大小 N , 距离阈值为 D , 有效点个数为 m ;

2) 选择目标区域中近似中心的一点 $P(X, Y, Z)$, 计算邻域内任一点 $I(x, y, z)$ 到点 P 的距离 d , 计算公式为

$$d = \sqrt{(X-x)^2 + (Y-y)^2 + (Z-z)^2}; \quad (1)$$

3) 比较距离 d 与距离阈值 D , 若 $d < D$, 则将有效点个数 m 增加1; 反之, 则判断下一个邻域点;

4) 遍历所有邻域点后, 得到点 P 对应的有效点个数 m 值, 计算所有有效邻域点的坐标之和并取均值, 将该平均坐标值赋给点 P , 计算公式为

$$X = \frac{\sum_{i=1}^m x_i}{m}, Y = \frac{\sum_{i=1}^m y_i}{m}, Z = \frac{\sum_{i=1}^m z_i}{m}; \quad (2)$$

5) 遍历点云数据中所有点 P , 重复1)~4)操作, 完成平滑去噪处理。

4.2 点云数据计算

在Cyclone软件中打开去噪后的点云数据, 采用Fence功能剪切小纸片镂空部位(正方形区域)的点云, 复制到新的modelspace中, 点击tools-info-modelsapce info可看点云数量, 以标准格式(.PTS格式)导出; 将点云数据的坐标值导入Excel软件, 求出坐标和距离的平均值, 与全站仪测定的参考值进行比较。

扫描结果表明, 低分辨率模式时点云密度较低, 部分标记框中激光点较少甚至没有, 故采用高分辨率模式的点云数据。利用Fence工具抠出标记框里的点云, 并复制到新的modelspace中, 将其以TXT格式导出。如果目标标记框中激光点数量较多, 为了提高数据处理效率, 在每个标记框中心部位框选9个点的数据, 以标准格式导出, 最后用Excel计算各点激光回波强度平均值。

5 结果与分析

5.1 测站距离对三维激光扫描仪测距精度的影响

以山核桃树干为观测目标, 在相同站点上基于全站仪多次测定标记框中心的斜距均值作为参考值, 多次测距时, 要瞄准标记框中心附近的不同位置, 以消除山核桃树干表面的凹凸不平引起的测距误差。三维激光扫描仪测量的斜距是取标记框中心附近的9个点的斜距均值。共设计了13个测站, 测站到树干的距离(即测站距离)范围为8~130 m。计算三维激光扫描仪和全站仪测定的各站点平均斜距的差值, 如图1所示。

由图1可知: 1) 测站距离与三维激光扫描仪测距误差成正比, 总体上斜率随着测站距离增加

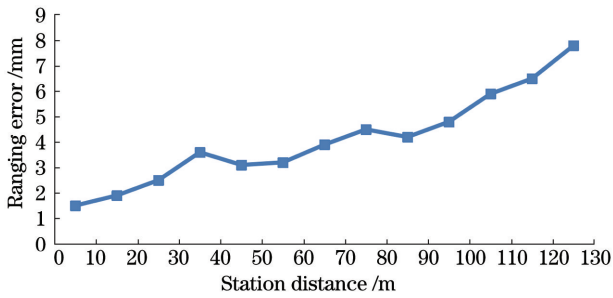


图1 测站距离对扫描仪测距精度的影响

Fig. 1 Influence of station distance on ranging accuracy of 3D laser scanner

而增大;2)测站距离在40 m以内时,点云斜距误差在4 mm以内;3)测站距离为40~100 m时,点云斜距误差为3~5 mm,变化缓慢;4)测站距离为90~130 m时,测站距离每增加10 m,点云斜距误差约增加1 mm。测距精度直接关系到点云的三维坐标精度。由于林业测量相对粗放,树冠之

表2 某激光点的坐标值及其误差

Table 2 Coordinate and spatial error of the sampled laser point

unit: mm

No.	X	Y	Z
1	3799.353	-8587.839	1528.367
2	3797.462	-8578.270	1527.036
3	3796.244	-8568.979	1527.605
4	3796.741	-8587.714	1519.758
5	3799.593	-8578.700	1518.189
6	3799.745	-8569.913	1518.526
7	3799.684	-8587.584	1509.643
8	3799.356	-8578.469	1509.250
9	3798.167	-8569.251	1509.496
Mean value	3798.483	-8578.524	1518.652
Reference value	3796.700	-8578.000	1512.000
Difference value	1.783	-0.524	6.652

5.3 颜色和粗糙度对激光回波强度值的影响

根据导出的各观测目标上正方形标记框内激光点的激光回波强度值,利用基于多项式的激光强度改正模型^[3,10]对扫描距离和扫描入射角效应进行改正,统计各观测植物表面改正后的激光回波强度平均值,如表3所示。在此基础上,因Leica C05三维激光扫描仪采用的是绿色激光,分别以绿色的大叶垂榆页面和柳叶叶面为参照物,计算了其他植物表面的激光回波强度平均值与它们的差值,以及同一颜色植物粗糙与光滑表面的激光回波强度的差异。为了更直观地呈现不同表面特征植物的激光回波强度差异,将数据绘制成柱状图(图2)和变化曲线(图3、图4),其中,对于同颜色同粗糙度不同植物的激光回波强度,取其均值。

间相互遮挡,因此在林业测绘中精度要求较高时,三维激光扫描仪的测站距离应尽量控制在100 m以内。

5.2 不同植物表面的坐标测量精度

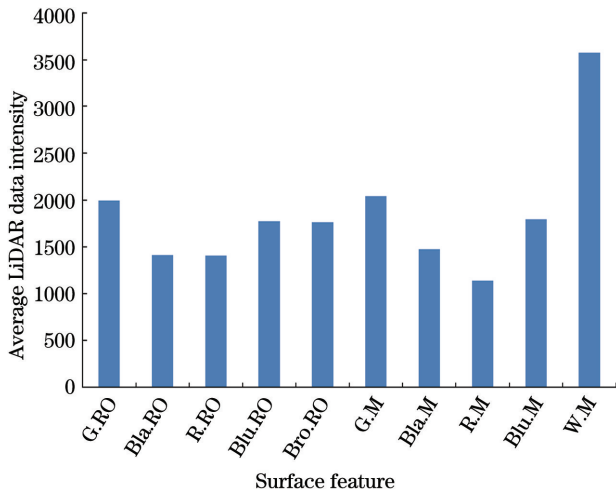
表2为某一测站上其中一个正方形标记框中截取的9个激光点的三维坐标值。全站仪测定该标记框中心点的三维坐标均值为(3796.7, -8578.0, 1512.0),单位:mm。

计算框选面积内9个点的三维坐标算术平均值,如表2所示,为(3798.483, -8578.524, 1518.652),单位:mm,与全站仪测定坐标的差值为(1.783, -0.524, 6.652),单位:mm。由表2可知,平面坐标误差值在2 mm以内,高程差值略大,其原因或许与钢卷尺量取仪的高度测量误差有关。其他点情况类似,可见激光扫描仪在测程内坐标测量精度与2"级全站仪相当。

表3 不同颜色和粗糙度的激光回波强度

Table 3 LiDAR data intensity of plants with different colors and roughnesses

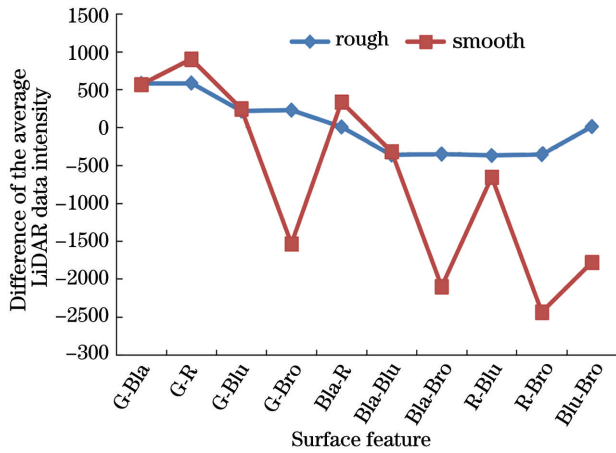
Observed plant	Surface feature	Average intensity
<i>Ulmus pumilavar pendula</i>	Green+rough	1994
<i>Salix babylonica L.</i>	Green+smooth	1964
<i>Carya</i>	Black+rough	1383
<i>Michelia chapensis Dandy</i>	Black+smooth	1475
<i>Prunus cerasifera Ehrh</i>	Red+rough	1408
<i>Photinia serrulata</i>	Red+smooth	1139
Blue wall	Blue+rough	1777
<i>Selaginella uncinata</i>	Blue+smooth	1795
<i>Ginkgo biloba L.</i>	Black+rough	1445
<i>Michelia alba DC.</i>	White+smooth	3577
Moso bamboo shoot	Brown+rough	1766
<i>Phyllostachys edulis</i>	Green+smooth	2118



G: green; Blu: blue; Bla: black; R: red;
Bro: brown; W: white; RO: rough; M: smooth

图 2 不同颜色和粗糙度的激光回波强度平均值

Fig. 2 Average LiDAR data intensity of plants with different colors and roughnesses



G: green; Blu: blue; Bla: black; R: red;
Bro: brown; W: white

图 3 不同颜色植物的激光回波强度平均差值

Fig. 3 Difference of the average LiDAR data intensity of plants with different colors

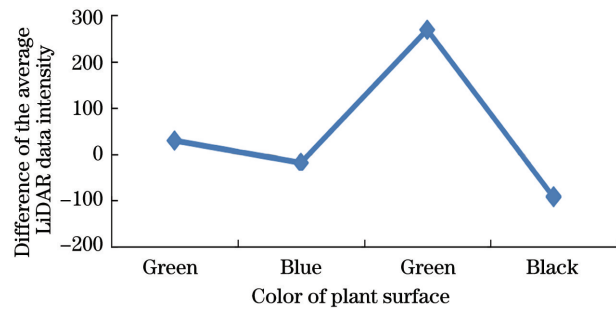


图 4 不同粗糙度的激光回波强度平均差值

Fig. 4 Difference of the average LiDAR data intensity with different roughnesses

由表 3 可知,根据每种植物表面的激光回波强度平均值,分析颜色和粗糙度对点云激光回波强度的影响,发现影响程度不一。同时结合表 2 中的 9 个点的激光回波强度值(1215, 1475, 1689, 1475, 1475, 1532, 1475, 1464, 1475),可大致得到激光回波强度值越高,激光点的坐标值精度也越高。

由表 3、图 2 和图 3 可知:1)粗糙的植物表面中,绿色的激光回波强度平均值最高,红色的最低。2)粗糙的植物表面中,与绿色相比,其他颜色的激光回波强度平均差值在 217~611 之间,其中黑色最大;而光滑的植物表面中,与绿色相比,其他颜色的激光回波强度平均差值为 154~1613 之间,其中白色最大,差异显著;粗糙表面的激光回波强度平均差值曲线波动较小,而光滑的波动显著,这主要是受白玉兰花回波强度的影响;同一种颜色、不同植物的激光回波强度存在差异性,总体上表面光滑的,回波强度值偏大。因此,颜色对激光点回波强度的影响较大,且在不同粗糙度条件下,不同颜色的激光回波强度平均值变化情况大致一致,除了白色比较突出外,绿色较强,黑色最弱。

表 3、图 3、图 4 表明:同种颜色、不同粗糙程度下激光回波强度平均值在不同颜色上的变化方向不一致,激光回波强度在粗糙与光滑表面两者之间忽高忽低,其中因为没有白色粗糙表面的植物,故白玉兰花不参与比较。黑色粗糙表面比光滑的激光回波强度低,而红色与绿色的情况相反。可见粗糙度对三维激光扫描仪激光回波强度的影响比较小,未显示出明显的相关性,总体上光滑的激光回波强度偏大。

5.4 颜色对植物和非植物激光回波强度值的影响

利用 Leica 配套的 Cyclone 软件处理纸质墙面的点云数据,在 Cyclone 中打开扫描图像,如图 5 所示,图 5(a)~(e)表示不同颜色墙面的点云图像。

根据 3.2 节中的数据处理方法,统计各墙面的激光回波强度均值,并与相同颜色下具有光滑表面的植物的激光回波强度相比较,如表 4 所示。由表 4 可知,墙面颜色对激光回波强度的影响具有一致性,白色最高,黑色最低;同样颜色下墙面的激光回波强度比植物的激光回波强度高,差异性最大的为白色,最小的为黑色。

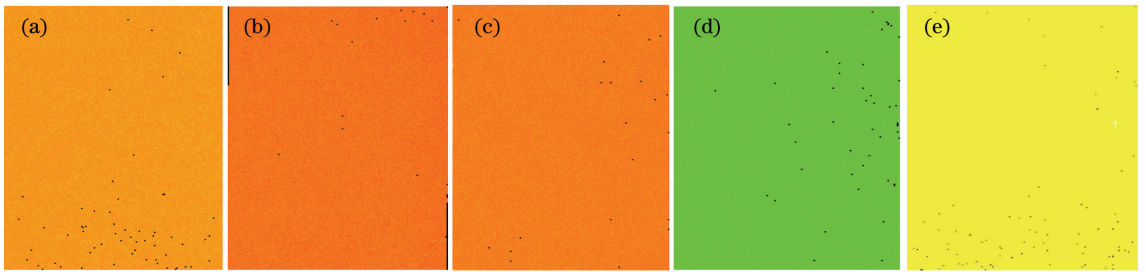


图5 不同颜色墙面点云图像。(a)蓝色;(b)黑色;(c)红色;(d)白色;(e)绿色

Fig. 5 Images of walls point clouds with different colors. (a) Blue; (b) black; (c) red; (d) white; (e) green

表4 颜色对植物和墙面激光回波强度影响的比较

Table 4 Comparison of the color influence on LiDAR data intensity of plant and wall

Observed object	Colors of surface	Average intensity	Intensity difference
<i>Selaginella uncinata</i>	Blue	1795	-336
Blue wall	Blue	2131	
<i>Michelia chapensis Dandy</i>	Black	1475	-239
Black wall	Black	1714	
<i>Photinia serrulata</i>	Red	1139	-695
Red wall	Red	1834	
<i>Michelia alba DC.</i>	White	3577	-1298
White wall	White	4875	
<i>Salix babylonica L.</i>	Green	1964	-1001
Green wall	Green	2965	

6 结 论

机载或地基三维激光扫描仪在林业测量中发挥着重要作用,林业测绘中激光的直接观测目标是各种植物表面,因此研究植物表面特征对距离测量精度和激光回波强度的影响,可为拓宽三维激光扫描仪在林业测量中的应用提供参考。

本实验选择 11 种代表性的植物表面特征,从颜色、粗糙度和距离等因子检测了激光的回波强度和测距精度。根据实验结果,可知:1)测站距离与三维激光扫描仪激光测距误差成正比,测站距离小于 100 m 时,扫描仪测距误差为 1~5 mm,超过 90 m 时,测站距离每增加 10 m,激光点云测距误差约增加 1 mm。坐标测量精度与 2''级全站仪相当。2)激光回波强度越大,测距精度越高,有相关性。3)不同植物表面颜色对激光点的回波强度平均值影响差异明显,尤其是白色和各颜色之间存在较大的差值。总体上,白色最高,绿色次之,黑色最低。4)植物表

面粗糙度对三维激光扫描仪激光回波强度的影响,没有明显的相关性。5)同一种颜色、不同植物的激光回波强度存在差异性,表面光滑的植物,回波强度值偏大。6)植物和非植物的颜色对激光回波强度的影响相似,白色最大,绿色次之,黑色最小。

本实验观测的目标样本以南方常见的植物为主,样本量不是很多,代表性尚且不足,其中以蓝色墙面代替蓝色粗糙的植物表面,白色植物只有一种。不同植物表面的材质差异性考虑较少,实验结果带有区域性特点,有待于更全面、更深入地研究丰富的实验结果,从而发挥更好的参考价值。野外三维激光扫描仪开展林业测绘时,应尽量选取无风的条件,以减少树木摇摆对测量的影响,同时要控制好测站的距离。

参 考 文 献

- [1] Wang F, Lin H, Li C H. Application of terrestrial 3D laser scanning technology in urban surveying[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2012(5): 47-49. 王峰, 林鸿, 李长辉. 地面三维激光扫描技术在城市测绘中的应用[J]. 测绘通报, 2012(5): 47-49.
- [2] Li B J, Fang Z X, Ren J. Extraction of building's feature from laser scanning data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2003, 28(1): 65-70. 李必军, 方志祥, 任娟. 从激光扫描数据中进行建筑物特征提取研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2003, 28(1): 65-70.
- [3] Tan K, Cheng X J. TLS laser intensity correction based on polynomial model[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(3): 0314002. 谭凯, 程效军. 基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正[J]. 中国激光, 2015, 42(3): 0314002.
- [4] Zhang Y B, Gao X W, Xie H Q, et al. Testresearch of distance measurement accuracy of terrestrial 3D laser scanner[J]. Bulletin of Surveying and Mapping,

- 2014(12): 16-19.
张永彬, 高祥伟, 谢宏全, 等. 地面三维激光扫描仪距离测量精度试验研究[J]. 测绘通报, 2014(12): 16-19.
- [5] Gao X W, Sun L, Xie H Q. Research on accuracy impact of target color and roughness to 3D laser scanning point cloud[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2013(11): 84-86.
高祥伟, 孙乐, 谢宏全. 目标颜色和粗糙度对三维激光扫描点云精度影响研究[J]. 测绘通报, 2013(11): 84-86.
- [6] Cai Y, Xu W B, Liang D, et al. Impacts of different factors on accuracy of point cloud obtained from terrestrial three-dimensional laser scanning[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(9): 092801.
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 不同因素对地面三维激光扫描点云精度的影响[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(9): 092801.
- [7] Li H Q, Yang X F, Zhao Y G. Precision factors and their control method for terrestrial 3D laser scanning survey[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2011, 27(1): 29-31.
李海泉, 杨晓锋, 赵彦刚. 地面三维激光扫描测量精度的影响因素和控制方法[J]. 测绘标准化, 2011, 27(1): 29-31.
- [8] Xu Y Q, Gao J X, Zhang L, et al. Research on point cloud registration error of terrestrial laser scanning[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(2): 129-132.
徐源强, 高井祥, 张丽, 等. 地面三维激光扫描的点云配准误差研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(2): 129-132.
- [9] Cao X G, Zhang S J, Si H Y, et al. The influence factors and control measures on point cloud data precision of ground three-dimensional laser scanning[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2014, 23(12): 5-7, 11.
曹先革, 张随甲, 司海燕, 等. 地面三维激光扫描点云数据精度影响因素及控制措施[J]. 测绘工程, 2014, 23(12): 5-7, 11.
- [10] Cai Y, Xu W B, Liang D, et al. Distinguishing phyllostachys edulis age based on laser scanning intensity[J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0110003.
蔡越, 徐文兵, 梁丹, 等. 基于激光回波强度判别毛竹年龄[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0110003.
- [11] Zhou H W. Data processing and model construction of terrestrial 3D laser scanning point cloud[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011.
周华伟. 地面三维激光扫描点云数据处理与模型构建[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.
- [12] Zheng D H, Shen Y Z, Liu C. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error[J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2005, 14(2): 32-34, 56.
郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2005, 14(2): 32-34, 56.
- [13] Xu Y Q, Gao J X, Wang J. 3d laser scanning technology[J]. Journal of Geomatics, 2010, 35(4): 5-6.
徐源强, 高井祥, 王坚. 三维激光扫描技术[J]. 测绘信息与工程, 2010, 35(4): 5-6.
- [14] Liu G Y, Zhang G L, Tan M. Application of NTS-342R Total Station in landscaping[J]. Protection Forest Science and Technology, 2015(11): 85-86.
刘国艳, 张桂玲, 谭梦. 南方 NTS-342R 全站仪在园林绿化中的应用[J]. 防护林科技, 2015(11): 85-86.
- [15] Cheng X J, Jia D F, Cheng X L. Theory and technology of massive point cloud data processing[M]. Shanghai: Tongji University Press, 2014.
程效军, 贾东峰, 程小龙. 海量点云数据处理理论与技术[M]. 上海: 同济大学出版社, 2014.
- [16] Zhang J H, Wu S, Hu B G, et al. Research on point cloud data denoising based on the terrestrial laser scanner[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2016, 39(3): 76-78.
张金花, 吴思, 胡本刚, 等. 基于地面三维激光扫描仪点云数据的去噪算法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2016, 39(3): 76-78.