

不同因素对地面三维激光扫描点云精度的影响

蔡越¹, 徐文兵^{1,2}, 梁丹¹, 李翀^{1,3}, 陈佐¹

¹浙江农林大学省部共建亚热带森林培育国家重点实验室, 浙江 临安 311300;

²同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092; ³北京林业大学林学院, 北京 100083

摘要 影响地面三维激光扫描点云精度的因素有很多,它们共同存在且交互影响,研究各因素及其交互作用对点云数量、点云反射强度和点云标准偏差的影响有利于有效地提高地面点云精度。选择目标物的颜色、粗糙度、距离作为研究对象,利用多因素方差分析法、多元线性回归分析法,分析了各因素及其交互作用影响的显著性,并拟合了点云标准偏差和点云反射强度的回归方程。研究表明:目标物距离对点云数量的影响较大,5 m 距离的点云数量约是 30 m 距离的 40 倍,距离与点云数量成反比;目标物颜色对点云反射强度的影响较大,白色最大点云强度可达 0.54,而黑色只有 0.18,点云反射强度从大到小为白色、绿色、蓝色、红色、黑色;目标物距离对地面三维激光扫描点云标准偏差影响最大,30 m 距离的点云标准偏差是 5 m 距离的 3 倍左右,颜色次之,粗糙度的影响不明显,点云标准偏差与点云反射强度具有幂函数关系。

关键词 遥感;地面三维激光扫描仪;点云数量;点云反射强度;精度

中图分类号 P232 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.092801

Impacts of Different Factors on Accuracy of Point Cloud Obtained from Terrestrial Three-Dimensional Laser Scanning

Cai Yue¹, Xu Wenbing^{1,2}, Liang Dan¹, Li Chong^{1,3}, Chen Zuo¹

¹ State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China;

² College of Surveying and Geo-Informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China;

³ College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

Abstract Many factors affect the accuracy of the point cloud obtained from terrestrial three-dimensional laser scanning. These factors exist together and influence each other. Therefore, it is useful to effectively improve the accuracy of the point cloud by studying the effect of each factor and their interaction on the number, reflection intensity and standard deviation of point cloud. Set the target color, roughness and distance as the study objects. By using multi-factor variance analysis method and multiple linear regression method, the significance of the influence of the various factors and their interactions are analyzed, and regression equations between the standard deviation and reflection intensity of point cloud are fitted. Results show that distance of target object has a significant impact on the number of point cloud. The number of point cloud at 5 m is about forty times as much as the number at 30 m. Distance is inversely proportional to the number of point cloud. Color of target object has a significant impact on the reflection intensity of point cloud. The strongest reflection intensity of point cloud for white is 0.54, and the one for black is 0.18. The reflection intensity of point cloud from strongest to weakest is white, green, blue, red, black. Distance of the target object has greatest impact on the standard deviation of point cloud obtained from

收稿日期: 2017-04-14; 收到修改稿日期: 2017-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(41671449, 41401528)

作者简介: 蔡越(1992—),女,硕士研究生,主要从事三维激光扫描技术与三维建模等方面的研究。

E-mail: 371927896@qq.com

导师简介: 徐文兵(1978—),男,硕士,副教授,主要从事三维激光扫描技术在林业测量中应用等方面的研究。

E-mail: xuwb97@163.com(通信联系人)

terrestrial three-dimensional laser scanning. The standard deviation of point cloud at 30 m is three times as much as the value at 5 m. And color is taken the second place, however the effect of the roughness is not obvious. There is a power function relation between the standard deviation and reflection intensity of point cloud.

Key words remote sensing; terrestrial three-dimensional laser scanner; number of point cloud; reflection intensity of point cloud; accuracy

OCIS codes 280.3640; 240.5770; 140.3460; 100.6890; 120.5800

1 引言

三维激光扫描技术是近年来发展起来的一门新兴技术,被誉为“继全球定位系统(GPS)技术以来测绘领域的又一次技术革命”^[1]。地面三维激光扫描仪以激光为载体,通过激光束的高速发射与接收不仅可以提供扫描目标高密度的点云三维坐标信息,而且可以通过激光接收机记录目标的后向散射回波强度(也称为反射强度)^[2],还可以提供灰度信息等,这些信息具有多样性。与传统的测量仪器相比,地面三维激光扫描仪具有以下显著特点^[3]:1)非接触性,无需接触被测物体即可快速确定目标的三维信息,解决了危险目标和人员不易到达特殊目标的测量问题;2)快速性,地面三维激光扫描仪能够快速获取目标物体的三维坐标,提高了工作效率;3)主动性,地面三维激光扫描仪主动发射激光,无需外部光源,使用时不受时间限制,可以全天候作业。地面三维激光扫描技术获取的点云数据可以达到毫米级的采样间隔,可应用于地形测量、文物保护、地址灾害监测与形变监测等领域。

地面三维激光扫描仪测量的基本方法和原理与免棱镜全站仪相似,即通过测量激光信号从发出装置经目标反射并接收的时间差(或相位差)进行测距^[4]。因此,地面三维激光扫描仪与免棱镜全站仪存在诸多相似的误差,除此之外,因为其构造的特殊性,还有其他误差源。地面三维激光扫描仪在测量过程中受到多种因素的干扰,其中系统误差的影响是最大的,包括:仪器误差、与测量对象有关的误差、环境误差、算法误差^[4-5]。仪器误差主要有垂直度盘指标差、视准轴误差、偏心差等;与测量对象有关的误差主要有目标物的大小、颜色、材质、粗糙度、距离等;环境误差主要有温度、气压、湿度等;算法误差主要包括点云配准误差、目标物配准误差等。

国内外学者对三维激光扫描仪误差方面的研究主要包括两方面:1)研究系统误差对其测量精度的影响,学者大多聚焦于研究测量对象有关的误差。李佳龙等^[6]在研究目标颜色和入射角对 Trimble GX 扫描点云精度影响时指出,黑色对绿色激光的反射率较低,测得点云精度较低;入射角为 $20^{\circ}\sim 40^{\circ}$ 可使扫描的点云质量最优。郑德华等^[4]在阐述三维激光扫描仪的工作原理及各种误差影响时指出,目标物体表面粗糙程度引起激光脚点位置的偏差接近于物体表面粗糙极值的一半。Lichti D 等^[7]在研究目标反射特性对飞行时间(TOF)三维激光扫描仪测距影响时指出,激光强度在反射面的衰减导致扫描仪测距精度的下降。2)采用不同的检校方法或模型对误差进行校正。刘春等^[8]在研究地面三维激光扫描仪的检校与精度评估时指出,地面三维激光扫描仪的精度主要是由测距精度和测角精度共同决定的,采用相应检校模型进行改正后,可以显著提高数据精度。官云兰等^[9-10]在研究三维激光扫描仪的仪器误差中利用所建立的误差检校模型,对 Leica HDS3000 扫描仪系统误差进行标定,得到该仪器的系统误差值,同时对获取的数据进行改正。Gottwald R^[11]建立了一个室内检校场,运用单边法、交叉双边法和三角形法对地面三维激光扫描仪进行检校,获得完整的测试程序并将其标准化。Clark J 等^[12]在研究目标颜色对 Leica HDS2500 三维激光扫描仪测距精度影响时发现,目标颜色与点云精度存在明显且系统的相关性,并利用检校模型,对点云进行了校正。Kaasalainen S 等^[13]分析了距离和入射角对激光强度的影响,并在此基础上提出了一种针对不同扫描仪的实用强度值改正模型。

地面三维激光扫描技术的精度是实际工程应用中的重要问题^[14],影响到三维点云模型的建立和应用。因此确定各测量误差因素,分析它们各自及其交互作用对点云精度的影响对有效提高地面三维激光扫描仪的精度有重要意义^[15]。国内外大多是在室外环境下研究系统误差对其测量精度的影响,因此会受外界环境中的温度、湿度、风力、阳光等因素的干扰;研究方法大多采用单个因素单独分析,很少系统地研究多个因素的综合影响并分析其交互作用;还有部分研究只作了定性的分析,没有实验数据的支撑。本文针对 Leica ScanStation C05 三维激光扫描仪在室内环境进行实验,控制环境因素,减小误差,提高实验精度,系统地研究目标物不同颜色、粗糙度、距离及其交互作用对点云数量、点云反射强度的影响,并通过建立关系方程,定

量地说明多因素对点云精度的影响。

2 点云数据获取与处理

2.1 实验场地和仪器设备

实验场地为一条长约 30 m 的室内走廊,在走廊内按照不同距离,布设 4 个安置仪器的测站。实验在室内进行,可以避免风力引起的晃动^[16]。实验进行时,关闭走廊灯,基本上可以避免环境光的干扰;实验持续时间较短,温度和湿度对点云相对误差的影响可以忽略不计。实验仪器为 Leica ScanStation C05 地面三维激光扫描仪,采用双扫描窗口设计。仪器采用紧凑型脉冲式绿色激光,波长 532 nm,安全等级为 3R 级,视场角范围 $360^\circ \times 270^\circ$,扫描速率 50000 s^{-1} ^[17],标称精度为 100 m 以内扫描标准偏差小于 4 mm。

2.2 点云数据的获取

实验目标为 5 种颜色(白、黑、红、蓝、绿)和 2 种粗糙度(定义表面粗糙度 Ra0.2 为粗糙,Ra0.05 为光滑)的 8 K 素描纸,按一定的间隔均匀贴在白墙上,经过纸片压平处理,保证纸片具有良好的平整度且位于同一平面,同时又可以避免相邻纸片间反射激光的干扰及其背景反射激光的干扰。

在 4 种距离下进行实验,距离选定为 5,10,20,30 m。实验场地如图 1 所示。利用扫描仪高分辨率模式进行扫描,为保证实验精度与准确性,每段距离扫描 3 次以上,获取点云数据,将扫描结果导入计算机。

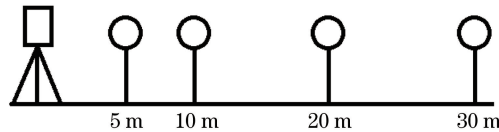


图 1 实验场地示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental site

2.3 点云数据处理方法

利用 Leica 配套的 Cyclone 软件处理点云数据,在 Cyclone 中打开 10 m 扫描图像。如图 2 所示,图(a)~(j)表示不同颜色和粗糙度的纸张点云图像。其他三种距离的扫描图基本相同。

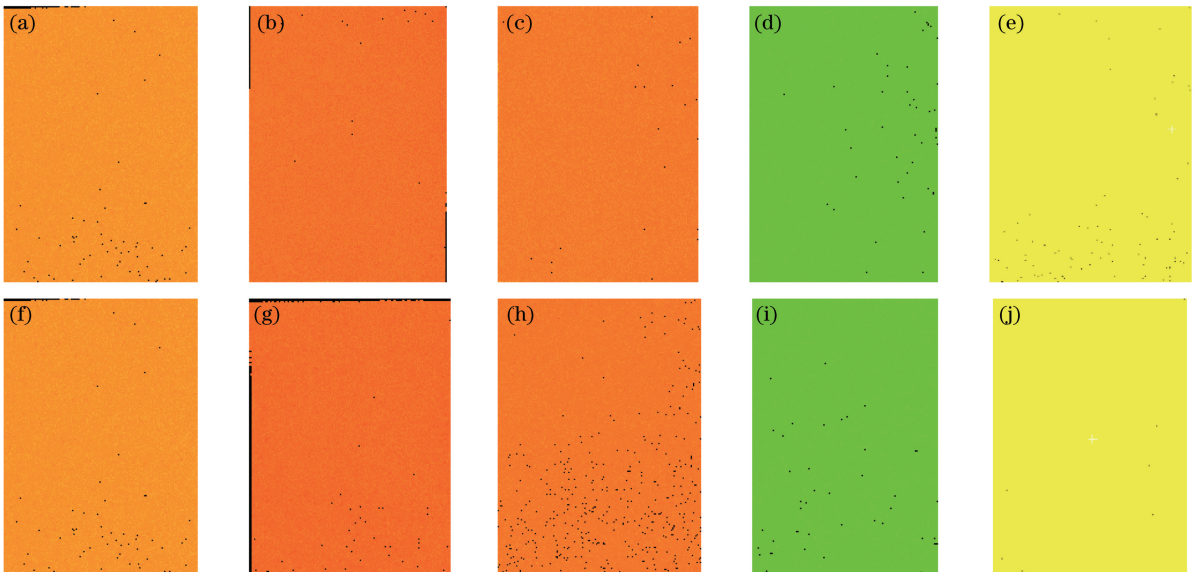


图 2 10 m 距离下不同颜色和粗糙度的纸张点云图像。(a)蓝色光滑;(b)黑色光滑;(c)红色光滑;(d)白色光滑;(e)绿色光滑;(f)蓝色粗糙;(g)黑色粗糙;(h)红色粗糙;(i)白色粗糙;(j)绿色粗糙

Fig. 2 Figures of point clouds papers with different colors and roughnesses at 10 m. (a) Blue smooth; (b) black smooth; (c) red smooth; (d) white smooth; (e) green smooth; (f) blue rough; (g) black rough; (h) red rough; (i) white rough; (j) green rough

实验采集的图像预处理步骤为:1)使用软件中的 Fence 功能分别框选相应纸张区域,剔除明显的强干扰点,如纸片边缘的拖尾点云^[18]和纸片间的变形点云等,考虑到纸张边缘点云分布不规则且难以辨别,纸张边缘点云可以忽略不计;2)再用 Fence 框在各处理区域内部截取大小为 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 的方框,如图 3 所示,为减少实验误差,重复截取 3 次;3)利用 Export 功能,将 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ 方框中的点云数据以标准格式.PTX 格式导出,即可查看各方框内的点云数量和点云反射强度信息。

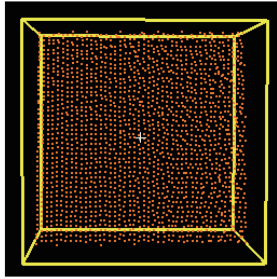


图 3 $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$ Fence 框图

Fig. 3 Figure of Fence with size of $0.1\text{ m} \times 0.1\text{ m}$

2.4 数据统计分析

数据统计分析过程为:

1) 用 Excel 2013 软件计算均值和标准差,为

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\frac{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + (x_3 - \bar{x})^2}{3}}, \quad (2)$$

利用(1)、(2)式可以分析不同颜色、不同粗糙度、不同距离的点云数量和点云强度;

2) 用 SPSS19.0 通过多因素方差分析法从目标物颜色、粗糙度、距离及其交互作用来分析各因素对点云数量、点云反射强度影响的显著性;

3) 用 Matlab 2010 对点云数据进行最小二乘平面拟合处理得到均方差即点云数据标准偏差。平面方程的一般表达式为

$$Ax + By + Cz + D = 0, \quad (3)$$

令 $a_0 = -\frac{A}{C}$, $a_1 = -\frac{B}{C}$, $a_2 = -\frac{D}{C}$, 则

$$z = a_0x + a_1y + a_2. \quad (4)$$

用点 (x_i, y_i, z_i) ($i = 0, 1, 2$) 拟合上述的平面方程,则使 S 最小时,有

$$S = \sum_{i=0}^2 (a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)^2, \quad (5)$$

即

$$\begin{cases} \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)x_i = 0 \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i)y_i = 0, \\ \sum 2(a_0x_i + a_1y_i + a_2 - z_i) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

求解上述方程组,得 a_0, a_1, a_2 , 即

$$z = a_0x + a_1y + a_2. \quad (7)$$

最小二乘平面拟合原理如(3)~(7)式所示,用回归分析法分析标准偏差和点云反射强度的函数关系,研究点云反射强度对点云精度的影响。

3 不同因素对点云数据的影响分析与讨论

3.1 不同因素对目标物点云数量的影响

3.1.1 不同因素的点云数量统计

研究表明,点云数量是影响点云精度的重要因素之一^[19]。利用 Excel 2013 统计不同目标的点云数量来研究不同因素对目标物点云数量的影响,统计结果如表 1 所示(数据格式为:均值±标准差)。统计结果表明:距离对点云数量影响较大,而颜色和粗糙度对点云数量影响不明显;同材质的目标物,白色、粗糙、5 m 距离的点云数量最多,黑色、光滑、30 m 距离的点云数量最小;在距离、粗糙度相同时,白色的点云数量最多,绿色和蓝色次之,黑色最少;在颜色、粗糙度相同时,点云数量与距离成反比,这是由于地面三维激光扫描系统发射的激光光斑因光线的发散性会随着距离的增加而不断放大^[20]。扫描仪内部坐标系的原点在仪器中心, y 轴为对物体扫描的方向, z 轴定义为垂直向上,扫描仪发射的一个激光点可以用相对于扫描仪的极坐标 (r, φ, θ) 表示, φ 为仪器水平面内的角, θ 为竖直面内的垂直角和 r 为到原点的距离,则该激光点的坐标可以表示为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos \varphi \cos \theta \\ r \sin \varphi \cos \theta \\ r \sin \theta \end{bmatrix}。 \quad (8)$$

扫描距离定位为沿 y 轴到物体表面的距离,设为 s ,根据仪器的参数和空间几何关系,可得到在 xz 平面内每平方米的点数为

$$n = \frac{\cos^3 \alpha \cos^2 \theta}{s^2 d\alpha d\theta}, \quad (9)$$

式中 $\alpha = 90^\circ \varphi$,可知点数随扫描距离的增大而迅速下降,与距离的平方成反比,理论与实验结果一致;在不同距离下,绿色和白色的粗糙面点云数量均多于其光滑面,而黑色、红色、蓝色的粗糙面的点云数量与其光滑面均无明显差异。

表 1 不同因素的点云数量

Table 1 Number of point clouds with different factors

Color	Roughness	Distance at 5 m	Distance at 10 m	Distance at 20 m	Distance at 30 m
White	Rough	2064±34	470±14	222±13	49±1
	Smooth	2036±77	461±42	217±24	48±2
Black	Rough	1951±13	413±4	201±8	46±1
	Smooth	1950±37	414±4	200±6	44±6
Red	Rough	1959±28	449±8	218±10	48±1
	Smooth	1969±11	443±6	202±6	44±6
Blue	Rough	2012±51	460±40	220±6	48±0
	Smooth	2019±98	449±41	208±11	47±2
Green	Rough	2040±45	461±12	222±17	49±6
	Smooth	2019±13	450±14	213±24	47±2

3.1.2 不同因素对点云数量影响的显著性分析

多因素方差分析结果如表 2 所示,其中 V_{df} 为统计变量自由度, F 为方差分析统计量, P 为概率值,结果表明:距离对点云数量的影响是极显著的($P < 0.01$),说明不同距离的目标物的点云数量差异性显著,其点云精度亦将受到很大影响;目标物颜色、粗糙度对点云数量的影响不显著($P > 0.05$),目标物颜色的 III 型平方和大于粗糙度,可见目标物颜色的影响较大;目标物颜色、粗糙度、距离及其交互作用对点云数量的影响都不显著,其中粗糙度、距离交互作用的离差平方和最小,颜色、距离交互作用的 III 型平方和最大,说明颜色、距离的共同作用对点云数量的影响最大,而粗糙度、距离的共同作用影响最小;目标物粗糙度、距离的交互作用对点云数量影响的显著性小于目标物粗糙度或距离单一因素的影响,说明交互效应不明显。

表2 不同因素对点云数量影响的显著性分析

Table 2 Significance analysis of impact of different factors on the number of point clouds

Source	Sum of squares of type III	V_{df}	Mean square	F	P
Roughness	974.700	1	974.700	0.924	0.339
Color	4075.383	4	1018.846	0.966	0.431
Distance	72914807.133	3	24304935.711	23038.218	0.000
Roughness and color	2582.883	4	645.721	0.612	0.655
Roughness and distance	658.433	3	219.478	0.208	0.891
Color and distance	21330.283	12	1777.524	1.685	0.086
Roughness, color and distance	6993.317	12	582.776	0.552	0.873
Error	84398.667	80	1054.983		
Total	128948952.000	120			
Total correction	73035820.800	119			

3.2 不同因素对目标物点云反射强度的影响

3.2.1 不同因素的点云反射强度统计

点云反射强度象征目标对激光的反射光谱特性,可以看作反映目标特性的一个物理量^[21],且反射强度与坐标信息的一一对应关系非常精确,无需配准,利用其可对目标的几何形状、表面特性、内部结构等物理特征信息进行提取。点云反射强度是影响点云精度的关键因素^[22]。利用 Excel 2013 统计不同因素对目标物点云反射强度的影响,如表 3 所示(数据格式为:均值±标准差)。统计结果表明:颜色对点云反射强度影响较大,距离和粗糙度对点云反射强度影响不明显。

表3 不同因素的点云反射强度

Table 3 Reflection intensities of point clouds with different factors

Color	Roughness	Distance			
		5 m	10 m	20 m	30 m
White	Rough	0.545412±0.006472	0.512289±0.001973	0.506519±0.001316	0.491842±0.001254
	Smooth	0.538602±0.001735	0.511216±0.001775	0.511465±0.000543	0.487527±0.000534
Black	Rough	0.186349±0.001790	0.181204±0.000887	0.178171±0.000963	0.176611±0.001402
	Smooth	0.179979±0.001048	0.176583±0.001289	0.174845±0.001186	0.171437±0.001799
Red	Rough	0.195919±0.000263	0.192391±0.000528	0.189254±0.000818	0.185714±0.000644
	Smooth	0.193538±0.001323	0.189396±0.000528	0.186343±0.000317	0.183357±0.001437
Blue	Rough	0.226126±0.000229	0.219750±0.000265	0.216729±0.000248	0.214230±0.001577
	Smooth	0.225443±0.000480	0.219613±0.000166	0.219246±0.005289	0.213108±0.001006
Green	Rough	0.346847±0.002030	0.326182±0.002238	0.308446±0.001399	0.298962±0.003694
	Smooth	0.344023±0.000786	0.324323±0.001137	0.311591±0.001549	0.296512±0.002147

从表 3 可知,同材质的目标物,白色、粗糙、5 m 距离的点云反射强度最大,黑色、光滑、30 m 距离的点云反射强度最小;在距离、粗糙度相同时,白色的点云反射强度最大,约为其他颜色的 2 倍,然后依次为绿色、蓝色、红色,黑色,这是因为白色是光谱中所有可见光的混合,对每种颜色的光都有较强的反射率,而 Leica 三维激光扫描仪发射的是绿色激光,因此绿色、蓝色目标物对此激光的反射强度较大,点云精度较高;在颜色、粗糙度相同时,点云强度与距离成反比,符合点云发散的几何关系;在不同距离下,白色、黑色和红色的粗糙面点云强度均大于其光滑面,而蓝色和绿色粗糙面的点云强度与其光滑面均无明显差异。根据表 1、表 3 可以发现,点云反射强度和点云数量成正相关,而点云数量可以直观地反映地面三维激光扫描点云精度,点云反射强度则可进一步说明该问题。对于目标物,其点云数量越多,说明扫描的物体越具体,点云反射强度越大,说明目标物反射性好,点云质量高。

3.2.2 不同因素对点云强度影响的显著性分析

多因素方差分析结果如表 4 所示,结果表明:目标物颜色、粗糙度、距离对点云反射强度的影响都是极显著的($P < 0.01$),且目标物颜色的 III 型平方和大于距离和粗糙度的 III 型平方和,说明目标物颜色的影响效应大于距离和粗糙度。目标物颜色、粗糙度、距离的两两交互作用以及三者的交互作用对点云强度影响的显著

性小于目标物颜色、粗糙度、距离单一因素的影响的显著性,说明交互效应不明显。

表 4 不同因素对点云反射强度影响的显著性分析

Table 4 Significance analysis of impact of different factors on the reflection intensities of point clouds

Source	Sum of squares of type III	V_{df}	Mean square	F	P
Roughness	0.000	1	0.000	35.611	0.000
Color	1.874	4	0.468	132516.666	0.000
Distance	0.011	3	0.004	1012.639	0.000
Roughness and color	0.000	4	0.000	14.033	0.000
Roughness and distance	0.000	3	0.000	2.778	0.046
Color and distance	0.006	12	0.001	151.449	0.000
Roughness, color and distance	0.000	12	0.000	1.319	0.225
Error	0.000	80	0.000		
Total	11.562	120			
Total correction	1.892	119			

3.3 不同因素对点云精度的影响

3.3.1 不同因素的点云标准偏差计算

点云数据的标准偏差是反映扫描仪点云精度的指标之一^[7]。利用 Matlab 2010 对点云三维坐标进行最小二乘平面拟合,得到点云标准偏差,如表 5 所示。统计结果表明:距离对点云精度影响较大,颜色次之,粗糙度对点云精度的影响不明显。

表 5 不同因素的点云标准偏差

Table 5 Standard deviation of point clouds with different factors

Color	Roughness	Distance			
		5 m	10 m	20 m	30 m
White	Rough	2.44	3.66	5.56	7.35
	Smooth	2.48	3.73	5.60	7.4
Black	Rough	3.3	5.02	7.47	10.19
	Smooth	3.36	5.05	7.68	10.26
Red	Rough	3.26	5.1	7.72	10.29
	Smooth	3.29	5.22	7.87	10.33
Blue	Rough	3.11	4.83	7.45	9.61
	Smooth	3.14	4.87	7.56	9.88
Green	Rough	2.75	4.58	6.56	8.71
	Smooth	2.76	4.61	6.68	8.89

从表 5 可知:当距离、粗糙度相同时,白色点云标准偏差最小,且都在 10 mm 以内,说明目标物白色点云精度最高,然后依次为绿色、蓝色、红色、黑色;当颜色、粗糙度相同时,5 m 距离的点云标准偏差最小,点云精度最高,且都在 4 mm 以内,这与该仪器的标称精度一致,30 m 距离时,点云精度最低,点云精度与距离成反比,符合点云发散的几何关系;当颜色、距离相同时,粗糙目标物比光滑的点云标准偏差小,说明粗糙度与点云精度正相关。从表 3、表 5 可知,点云标准偏差与点云反射强度负相关,点云反射强度越大,标准偏差越小。

3.3.2 不同距离的点云反射强度与标准偏差的回归分析

对距离为 5 m 时的点云反射强度和标准偏差进行回归分析可知,点云标准偏差与反射强度具有幂函数关系,拟合曲线方程为 $y = 2.059x^{-0.282}$,相关系数 R^2 为 0.997,曲线方程如图 4 所示。

对距离为 10, 20, 30 m 的点云标准偏差与反射强度进行回归分析,对应的拟合曲线方程和相关系数如表 6 所示。

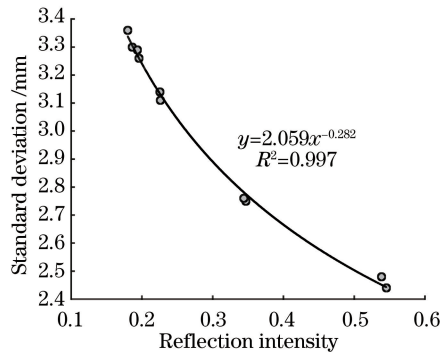


图4 5 m 距离点云标准偏差与反射强度关系曲线

Fig. 4 Relationship between standard deviation of point clouds and reflection intensity at 5 m

表6 不同距离点云标准偏差和反射强度回归分析

Table 6 Regression analysis of standard deviation and reflection intensities at different distances

Distance /m	Fitting equation	Correlation coefficient
5	$y = 2.059x^{-0.282}$	$R^2 = 0.997$
10	$y = 3.127x^{-0.294}$	$R^2 = 0.928$
20	$y = 4.677x^{-0.296}$	$R^2 = 0.973$
30	$y = 5.874x^{-0.326}$	$R^2 = 0.990$

从表6可知,不同距离点云标准偏差和反射强度仍然符合 $y = ax^{-b}$ 的幂函数关系,且扫描距离越远,系数 a 、 b 越大。根据上述分析可知,Leica 三维激光扫描仪所测点云标准偏差与反射强度之间符合幂函数关系。因此,在对点云数据进行预处理时,选取点云反射强度较高的点和反射率较高的目标物体,都可以提高点云精度。

4 结 论

目标物距离对地面三维激光扫描点云数量的影响较大,在仪器允许测程范围内,点云数量与距离成负相关。在利用三维激光扫描仪对目标物扫描建模时应尽量靠近目标物,以便获取更多的点云数量,避免在建模过程中出现数据空洞,以提高模型精度。目标物颜色对地面三维激光扫描点云反射强度的影响较大,点云反射强度从高到低依次为白色、绿色、蓝色、红色、黑色。在利用三维激光扫描仪研究目标物表面特征时,若目标物为黑色或红色时,注意控制扫描仪距离和入射角,以提高扫描精度。目标物距离对地面三维激光扫描点云标准偏差影响较大,颜色次之,粗糙度对其的影响不明显,点云标准偏差与距离成负相关,颜色影响从低到高依次为白色、绿色、蓝色、红色、黑色。点云标准偏差与点云反射强度具有幂函数关系,在实际测量时应选取反射强度较高的目标物,以提高测量精度。

本实验中粗糙度对点云数量、点云反射强度和点云标准偏差均无明显影响,可能是粗糙度差异不明显或样本数量不够,这有待于进一步设置多级粗糙度的目标物进行实验,以完善实验结果。

参 考 文 献

- [1] Wang Feng, Lin Hong, Li Changhui. 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] Tan Kai, Cheng Xiaojun. TLS laser intensity correction based on polynomial model[J]. Chinese J 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.
- [3] Cai Runbin. Registration of range images and planar regions extraction from TLS point cloud[D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
蔡润彬. 地面激光扫描数据后处理若干关键技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2008.

- [4] Zheng Dehua, Shen Yunzhong, Liu Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2005, 14(2): 32-34.
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.
- [5] Reshetyuk Y. Investigation and calibration of pulsed time-of-flight terrestrial laser scanners [D]. Stockholm: Royal Institute of Technology, 2006.
- [6] Li Jialong, Zheng Dehua, He Li, *et al.* The effects of known color and incidence angle on the accuracy of Trimble GX 3D scanning point cloud [J]. *Engineering of Surveying and Mapping*, 2012, 21(5): 75-79.
李佳龙, 郑德华, 何丽, 等. 目标颜色和入射角对 Trimble GX 扫描点云精度的影响 [J]. *测绘工程*, 2012, 21(5): 75-79.
- [7] Lichti D D, Harvey B R. The Effects of reflecting surface material properties on time-of-flight laser scanner measurements [C]. Ottawa: Symposium on Geospatial Theory Proceedings & Applications, 2002.
- [8] Liu Chun, Zhang Yunling, Wu Hangbin. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(11): 56-60.
刘春, 张蕴灵, 吴杭彬. 地面三维激光扫描仪的检校与精度评估 [J]. *工程勘察*, 2009, 37(11): 56-60.
- [9] Guan Yunlan. Study on the data processing of terrestrial laser scanner [D]. Shanghai: Tongji University, 2008.
官云兰. 地面三维激光数据处理中的若干问题研究 [D]. 上海: 同济大学, 2008.
- [10] Guan Yunlan, Cheng Xiaojun, Zhan Xinwu, *et al.* Research on systematic errors calibration of terrestrial laser scanner [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2014, 43(7): 731-738.
官云兰, 程效军, 詹新武, 等. 地面三维激光扫描仪系统误差标定 [J]. *测绘学报*, 2014, 43(7): 731-738.
- [11] Gottwald R. Field procedures for testing terrestrial laser scanners (TLS): a contribution to a future ISO standard [C]. *Proceedings of the FIG Working Week*, 2008: 1-14.
- [12] Clark J, Robson S. Accuracy of measurements made with a CYRAX 2500 laser scanner against surfaces of known colour [J]. *Survey Review*, 2004, 37(294): 626-638.
- [13] Kaasalainen S, Jaakkola A, Kaasalainen M, *et al.* Analysis of incidence angle and distance effects on terrestrial laser scanner intensity: search for correction methods [J]. *Remote Sensing*, 2011, 3(10): 2207-2221.
- [14] Lu Xiushan, Huang Lei. Grid method on building information extraction using laser scanning data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2007, 32(10): 852-855.
卢秀山, 黄磊. 基于激光扫描数据的建筑物信息格网化提取方法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2007, 32(10): 852-855.
- [15] Wang Jianjun, Liu Jidong. Analysis and sorting of impacts of measurement errors on positioning accuracy of laser point cloud obtained from airborne laser scanning [J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(4): 0414001.
王建军, 刘吉东. 影响机载激光扫描点云精度的测量误差因素分析及其影响大小排序 [J]. *中国激光*, 2014, 41(4): 0414001.
- [16] Zheng Dehua. Three-dimensional laser scanning image combination model and experimental analysis [J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2005, 33(4): 465-471.
郑德华. 三维激光扫描影像拼接模型及实验分析 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(4): 465-471.
- [17] Liu Chun, Chen Huayun, Wu Hangbin. Data processing and feature extraction of 3D laser remote sensing [M]. Beijing: Science Press, 2009.
刘春, 陈华云, 吴杭彬. 激光三维遥感的数据处理与特征提取 [M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [18] Boehler W, Marbs A. Investigating laser scanner accuracy [J]. *International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2003, 34: 696-701.
- [19] Ding Wei. Terrestrial laser scanning technology and error analysis of point cloud [J]. *Journal of Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009(s2): 447-452.
丁巍. 浅述地面三维激光扫描技术及其点云误差分析 [J]. *工程勘察*, 2009(s2): 447-452.
- [20] Cao Xiange, Zhang Suijia, Si Haiyan, *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): 5-11.
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): 5-11.

- [21] Pfeifer N, Hofle B, Briese C, *et al.* Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data[C]. Beijing: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2008, 37: 1045-1052.
- [22] Xia Guofang, Hu Chunmei, Cao Bizheng, *et al.* Study on the influence of laser incident angle on the reflection intensity of the point cloud[J]. Laser Journal, 2016, 37(4): 11-13.
夏国芳, 胡春梅, 曹毕铮, 等. 激光入射角度对点云反射强度的影响研究[J]. 激光杂志, 2016, 37(4): 11-13.