

基于分段多项式模型的地面三维激光扫描 激光强度改正

程小龙¹, 程效军², 李泉², 徐文兵^{2,3*}

¹江西理工大学建筑与测绘工程学院, 江西 赣州 341000;

²同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092;

³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

摘要 受扫描仪到扫描物体的激光测距值、激光入射角、大气衰减等因素的影响, 相同目标的激光强度存在较大偏差。从激光雷达测距方程出发, 分别对激光强度的距离效应和角度效应进行改正。激光强度与激光入射角的余弦大致呈线性关系, 但激光强度的距离效应较为复杂, 激光强度总体上不与距离的平方呈反比, 因此提出了一种利用分段多项式模型来消除激光强度距离效应的方法。实验表明, 提出的改正模型能对点云激光强度进行有效补偿, 通过将激光强度分别进行角度改正和距离改正, 能够有效消除由距离和入射角引起的强度偏差, 使同类物体的激光强度趋于一致。

关键词 遥感; 地面三维激光扫描; 激光强度改正; 激光测距值; 激光入射角; 经验模型; 分段多项式函数

中图分类号 P237 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.112802

Laser Intensity Correction of Terrestrial 3D Laser Scanning Based on Sectional Polynomial Model

Cheng Xiaolong¹, Cheng Xiaojun², Li Quan², Xu Wenbing^{2,3}

¹ School of Architectural and Surveying & Mapping Engineering, Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou, Jiangxi 341000, China;

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

³ State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Zhejiang A & F University, Lin'an, Zhejiang 311300, China

Abstract The laser intensity of same targets may vary significantly due to the influence of laser measuring distance between scanner and object, laser incidence angle, and atmospheric conditions, etc. The distance effect and incidence angle effect are corrected based on the laser radar range equation. The laser intensity is linearly proportional to the cosine of the incidence angle. However, the distance effect of laser intensity is more complicated, and the laser intensity is not inversely proportional to the square of the distance. Therefore, the sectional polynomial model is proposed to correct the distance effect. The experimental results indicate that the proposed model can effectively compensate the point cloud laser intensity. The deviation of intensity caused by the distance and incidence angle can be removed effectively with angle correction and distance correction, which makes the corrected laser intensity of the same target tend to be consistent.

Key words remote sensing; terrestrial 3D laser scanning; laser intensity correction; laser measuring distance; laser incidence angle; empirical model; sectional polynomial function

OCIS codes 010.0280; 010.3640; 280.3640; 280.1350; 120.6660

收稿日期: 2017-04-10; 收到修改稿日期: 2017-05-11

基金项目: 江西理工大学博士启动基金(jxxjbs3401223283)、浙江省公益技术研究项目(LGN18C160004)

作者简介: 程小龙(1988—), 男, 博士, 讲师, 主要从事三维激光扫描技术与三维数字仿真方面的研究。

E-mail: 494322312@qq.com

* 通信联系人。E-mail: xuwb97@163.com

1 引言

地面三维激光扫描(TLS)中的光电探测器主要用于优化距离测量,除了获取扫描目标高密度、高精度的三维空间信息外,还可以通过光电接收系统记录目标对发射激光的后向散射回波强度,也称为激光强度。激光强度作为点云的属性信息,表征目标对激光的反射光谱特性,是反映目标特性的重要物理量^[1-2]。激光强度与坐标信息呈非常精确的一一对应关系,利用激光强度可以直接、精确、快速地对目标结构、材质、属性甚至运动特征进行提取和反演,弥补单一几何数据的不足与缺陷,实现点云分类与目标特征提取的精细化、实时化与智能化,也可以对不同目标进行直接、快速、高精度的探测与识别,满足未来激光探测与测量(LiDAR)领域对目标信息获取的实时、高效、准确、高精度、多维度等要求。激光强度作为 LiDAR 特有的测量值,会受到扫描仪特性、大气传输、目标特性和扫描几何构造等众多因素的影响,因此不能直接从激光强度中提取目标特性。LiDAR 从回波数据中提取目标特征的首要与核心问题就是对激光强度进行改正。目前,国内外针对激光强度的校正研究还处于初始阶段,Pfeifer 等^[3]使用数据驱动的方法对点云的激光强度进行改正,利用两款扫描仪进行实验,基于改正的激光强度估计目标的反射率,得到的反射率的标准偏差大于 6%。谭凯等^[4]利用线性、对数、三次多项式这三种物理改正模型对点云强度进行改正,并利用改正后的强度值进行点云分类,分析了三种模型的改正精度和效率。程小龙等^[5]提出了一种基于激光雷达方程的数据模型改正方法,采用该方法对激光强度进行角度和距离线性改正,利用改正后的激光强度对建筑立面点云进行分类,并提取了建筑立面信息的特征。Tan 等^[6]通过消除激光入射角和激光测距值对强度值的影响,确定了物体表面的反射率,实现了地面点云的分类。激光强度改正是 LiDAR 研究领域的重点与难点。若能精确地对激光强度加以改正,将会对 LiDAR 数据处理与目标特征的提取产生重要影响,大大拓展 LiDAR 的应用领域。本文根据激光雷达方程,通过实验确定了激光测距值、入射角和激光强度之间的关系,并分别对激光强度的距离效应和角度效应进行改正,使同类目标的激光强度趋于一致。

2 点云强度改正模型

激光强度表征了目标对激光的反射光谱特性,利用强度数据可以弥补几何数据的不足,对目标的几何形状、表面特性、内部结构、运动和特征参量等进行提取和反演。但是,激光强度受扫描仪系统特性、大气衰减、目标特性、扫描环境等多种因素的影响,会出现同物异谱和异物同谱的现象。因此,需要对影响强度数据的各种因素进行改正。激光探测器接收的回波信号强度主要有以下 4 个基本影响因素^[7]:仪器系统误差、大气衰减、目标的反射特性和目标的几何特性。激光雷达方程概括了这些影响因素与激光回波信号功率之间的关系^[8]:

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho \cos \theta}{4R^2} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}}, \quad (1)$$

式中 P_r 为激光接收功率, P_t 为激光发射功率, D_r 为接收孔径, ρ 为目标反射率, θ 为激光入射角, R 为扫描仪到目标的距离, η_{atm} 为大气传输系数, η_{sys} 为激光雷达的光学系统传输系数。通常,激光强度代表接收功率的峰值振幅^[9],因此

$$I = K \frac{\rho \cos \theta}{R^2} \eta_{\text{atm}}, \quad (2)$$

式中 I 为原始激光强度, $K = P_t D_r^2 \eta_{\text{sys}} / 4$ 为系统常数。由(2)式可知,激光强度主要受目标反射率、激光入射角、激光测距值及大气特性的影响。

主要基于三种模型^[10]消除目标反射率、激光入射角、测距值及大气特性对激光强度的影响,这三种模型分别为理论模型、经验模型和参考目标模型。

1) 理论模型。基于激光传输的整个过程,利用简化的激光雷达方程,根据大气对激光的散射、反射、吸收等特性,建立相应的激光大气衰减模型,通过表达式

$$I_s = I \frac{R^2}{R_s^2} \frac{1}{\cos \theta} \times 10^{2Ra/1000}, \quad (3)$$

对影响激光强度的测距值、入射角及大气特性进行改正,式中 I_s 为改正后的激光强度, R_s 为参考距离, a 为

大气衰减因子。

2) 经验模型。不考虑激光扫描的物理背景,直接建立相应的数据模型,拟合激光强度与各种影响因素之间的关系,通过选取扫描数据中部分同质区域计算模型参数,对强度数据进行改正。由于入射角、激光测距值及大气特性的影响是相互独立的,因此,在经验模型中,激光强度可表示为^[11]

$$I = f_1(\rho)f_2(\cos\theta)f_3(R)\eta_{\text{atm}}, \quad (4)$$

式中 $f_1(\cdot)$ 、 $f_2(\cdot)$ 、 $f_3(\cdot)$ 分别为反射率、入射角及距离的函数。根据激光强度改正的定义^[2],在已知入射角(即距离函数)的情况下,激光强度的改正值和目标反射率函数相关,即

$$I_s = f_1(\rho) = \frac{I}{f_2(\cos\theta)f_3(R)\eta_{\text{atm}}}. \quad (5)$$

3) 参考目标模型。激光强度会受到仪器因素的影响,通常用户无法获取仪器的系统参数以及系统内部数据的处理原理,这时可通过比较参考目标在实验室或实际扫描中测得的强度数据,反演某些系统参数,进而对其他地物的强度数据进行改正。

由于 TLS 激光强度的距离效应和入射角效应较为复杂,激光强度不与距离的平方呈反比关系,因此 TLS 激光强度的改正通常都采用经验模型。以平面靶标作为统一的实验对象,由于平面靶标的反射率很高,接近 100%,故而可将反射率 ρ 对激光强度的影响看作常数 C 。通过统一反射率,可以建立相应的数据模型拟合激光强度与激光测距值、入射角这两个影响因素之间的关系,进而计算模型参数,进行激光强度改正。故(4)式可简化为

$$I = Cf_2(\cos\theta)f_3(R)\eta_{\text{atm}}. \quad (6)$$

在地面激光扫描过程中,由于激光测距值较小,可以忽略大气衰减对激光强度的影响^[12]。故(6)式可简化为

$$I = Gf_2(\cos\theta)f_3(R), \quad (7)$$

式中 G 为常数。因此,通过固定其他因素对激光强度的影响,分别探讨激光测距值、激光入射角与激光强度的关系,利用分段多项式模型消除激光测距值对激光强度的影响,利用多项式模型消除激光入射角对激光强度的影响,可以实现激光强度的统一改正。

2.1 点云强度的距离改正

通过固定入射角及其他影响因素,选取平面靶标作为扫描对象,以一定的步长(近距离步长为 1 m,远距离步长为 5 m)改变目标的激光测距值,采用 FARO focus 3D 激光扫描仪对平面靶标在相同高度下进行扫描,如图 1 所示,可以获得平面靶标的坐标 (X, Y, Z) 及激光强度,进而得到激光测距值与激光强度的关系,如图 2 所示。

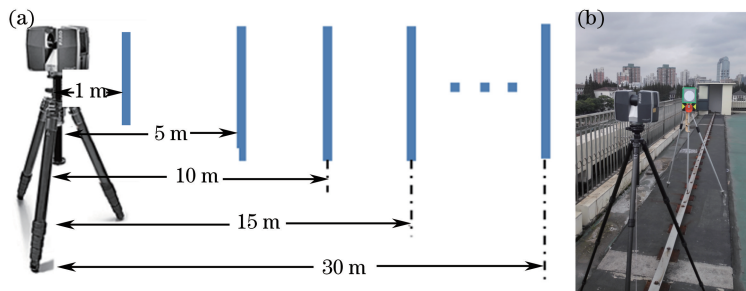


图 1 距离改正实验区域。(a)示意图;(b)真实场景

Fig. 1 Area of distance effect correction experiment. (a) Schematic; (b) real scene

不同于机载点云强度,地面点云激光强度在近距离时不遵循(2)式所示的与距离呈反比的关系,这主要源于地面扫描仪光电探测器和光学接收器的影响。许多地面扫描设备并没有提供消除这些影响的激光强度改正模型,因此需要根据实际的点云强度与激光测距值之间的关系,探寻扫描目标激光强度的距离效应。

从图 2 可以看出,对于 FARO focus 3D 激光扫描仪,激光强度只在 5~7 m 范围内遵循 K/R^2 法则,因此采用分段函数来表达激光测距值和激光强度之间的关系,即对近距离和非近距离采用不同的多项式函数

来拟合激光测距值和激光强度的关系,建立的激光测距值和激光强度的关系如下:

$$f_3(R) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N_1} (a_i R^i), & R < R_{cp} \\ \sum_{i=0}^{N_2} \left[b_i \left(\frac{1}{R} \right)^i \right], & R \geq R_{cp} \end{cases}, \quad (8)$$

式中 N_1 、 N_2 、 a_i 、 b_i 为多项式参数, R_{cp} 为分段函数在临界点处的距离。

联合(7)式和(8)式建立激光强度的距离改正模型:

$$I_s = \frac{K f_2(\cos \theta_s) f_3(R_s)}{K f_2(\cos \theta_s) f_3(R)} I = \frac{f_3(R_s) I}{f_3(R)} = \begin{cases} f_3(R_s) I / \sum_{i=0}^{N_1} (a_i R^i), & R < R_{cp} \\ f_3(R_s) I / \sum_{i=0}^{N_2} \left[b_i \left(\frac{1}{R} \right)^i \right], & R \geq R_{cp} \end{cases}, \quad (9)$$

式中 θ_s 为参考入射角,一般设为 0 ,即激光垂直射向目标物体。

从图2可以看出, R_{cp} 的范围大致为 $5 \sim 7$ m。因此,选择 $4 \sim 10$ m 的点云数据拟合强度和测距值的多项式函数,将这个函数的极值点作为分段函数的临界点 R_{cp} ,如图3所示,通过对选择的点云数据进行多项式拟合,求取多项式的极值点,从而确定分段函数在临界点处的距离 $R_{cp} = 6.5$ m。

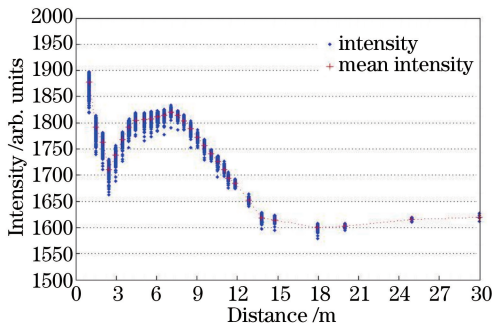


图2 FARO focus 3D扫描仪得到的激光测距值与激光强度的关系

Fig. 2 Relationship between laser measuring distance and laser intensity acquired by FARO focus 3D scanner

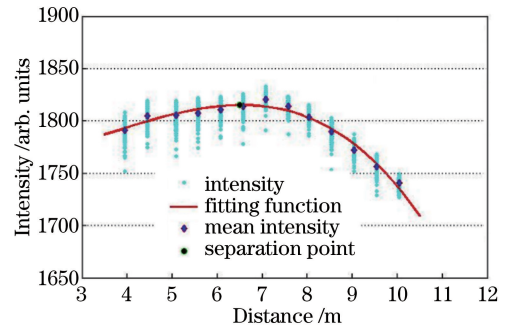


图3 分段多项式函数临界点的确定

Fig. 3 Determination for critical point of sectional polynomial function

2.2 点云强度的入射角改正

通过固定激光测距值及其他影响因素进行角度改正实验。选取平面靶标为扫描对象,以一定的步长(5°)改变目标的入射角,扫描范围为 $0^\circ \sim 80^\circ$,如图4所示。

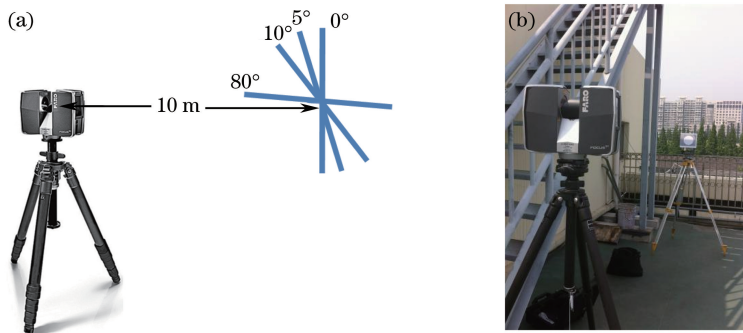


图4 角度改正实验。(a)示意图;(b)真实场景

Fig. 4 Incidence angle effect correction experiment. (a) Schematic; (b) real scene

采用 FARO focus 3D 激光扫描仪在相同距离下对平面靶标进行扫描,获得了平面靶标的坐标 (X, Y, Z) 及激光强度,得到了激光入射角与激光强度的关系,如图5所示。

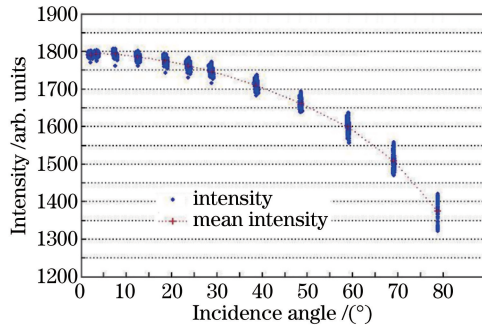


图5 FARO focus 3D扫描仪得到的激光入射角与激光强度的关系

Fig. 5 Relationship between laser incidence angle and laser intensity acquired by FARO focus 3D scanner

分析激光入射角与激光强度的关系,探寻激光入射角对激光强度的影响。从图5可以看出,对于FARO focus 3D激光扫描仪,激光强度与激光入射角的余弦 $\cos \theta$ 大致呈线性关系,因此采用多项式函数来表达激光入射角和激光强度之间的关系。建立的激光入射角和激光强度的关系式如下

$$f_2(\cos \theta) = \sum_{i=0}^{N_3} [c_i (\cos \theta)^i], \quad (10)$$

式中 N_3 、 c_i 为多项式参数。扫描仪中心坐标为 $(0, 0, 0)$, 利用 K 近邻域求取点云法矢 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$, 则激光入射角的余弦 $\cos \theta$ 为

$$\cos \theta = \left| \frac{(X, Y, Z) \mathbf{n}}{R |\mathbf{n}|} \right|, \quad (11)$$

式中 $|\mathbf{n}|$ 为法矢的模。

联合(7)式和(10)式可以建立激光强度的角度改正模型:

$$I_s = \frac{K f_2(\cos \theta_s) f_3(R_s)}{K f_2(\cos \theta) f_3(R_s)} I = \frac{f_2(\cos \theta_s) I}{f_2(\cos \theta)} = f_2(\cos \theta_s) I / \sum_{i=0}^{N_3} [c_i (\cos \theta)^i]. \quad (12)$$

2.3 分段多项式函数拟合

利用最小二乘法对 $f_2(\cos \theta)$ 、 $f_3(R)$ 进行多项式拟合,选取不同的幂 N_1 、 N_2 、 N_3 , 利用参与拟合的点与拟合函数的均方根误差(RMSE)作为 $f_2(\cos \theta)$ 、 $f_3(R)$ 的选取依据,如表1所示,最终确定 $N_1=5$ 、 $N_2=4$ 、 $N_3=3$,这样可在保证 $f_2(\cos \theta)$ 、 $f_3(R)$ 拟合精度的同时亦不会过分拟合。

表1 分段多项式函数的选取及拟合函数的均方根误差

Table 1 Selection of sectional polynomial function and root-mean-square error of fitting function

Number	$f_3(R)$		$f_2(\cos \theta)$	RMSE		
	N_1	N_2	N_3	$f_3(R), R < R_{cp}$	$f_3(R), R > R_{cp}$	$f_2(\cos \theta)$
1	2	2	1	28.6	13.3	14.2
2	3	3	2	12.5	7.1	10.8
3	4	4	3	10.3	5.7	10.1
4	5	5	4	9.7	5.5	10.0
5	6	6	5	9.5	5.5	10.0

3 点云强度改正实例及结果

3.1 点云强度改正实例分析

利用分段多项式改正模型进行平面靶标激光强度的距离改正,不同激光测距值下平面靶标的强度范围及平均强度在改正前后的结果如图6所示。

利用多项式改正模型进行平面靶标激光强度的入射角改正,不同激光入射角下平面靶标的强度范围及平均强度在改正前后的效果如图7所示。

分析图6和图7可以发现:激光强度经过距离和入射角改正后,平面靶标的平均激光强度趋于一致。计

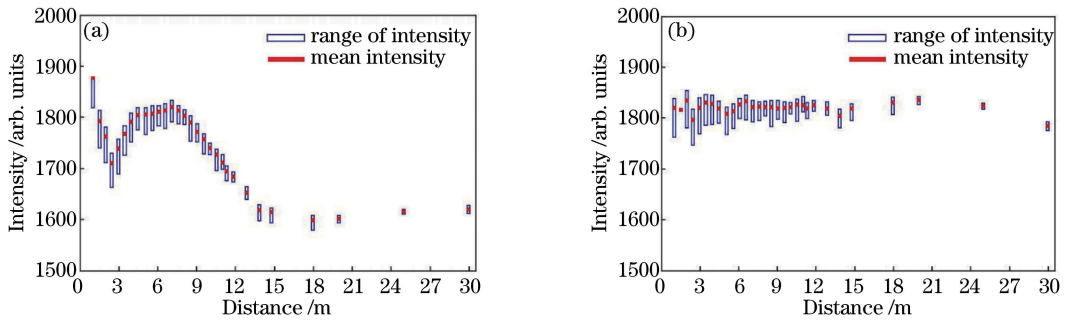


图 6 激光强度的距离改正。(a)改正前;(b)改正后

Fig. 6 Distance correction of laser intensity. (a) Before correction; (b) after correction

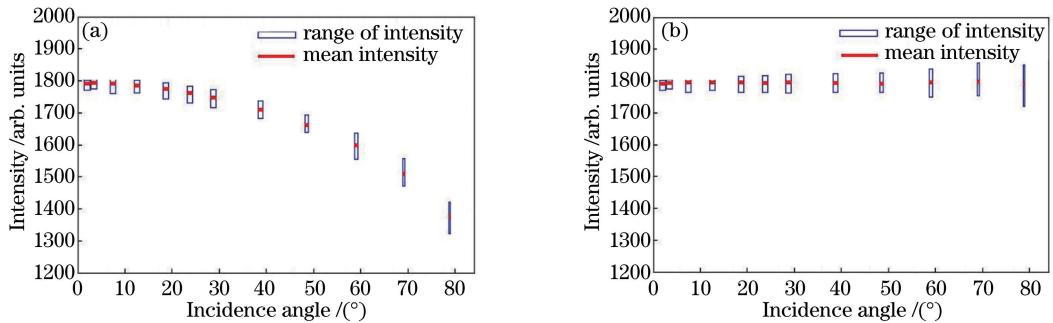


图 7 激光强度的入射角改正。(a)改正前;(b)改正后

Fig. 7 Incidence angle correction of laser intensity. (a) Before correction; (b) after correction

算得到了改正前后激光强度的标准差,如表 2 所示。由表 2 可知,通过距离和入射角改正后的激光强度平均值的标准差变小,激光强度得到了很好的改正。

表 2 改正前后激光强度平均值的标准差

Table 2 Standard deviation of mean laser intensity before and after correction

Correction mode	Minimum		Maximum		Standard deviation	
	Before	After	Before	After	Before	After
	correction	correction	correction	correction	correction	correction
Distance effect correction	1599	1796	1877	1830	120.7	16.5
Incidence angle effect correction	1376	1790	1793	1796	76.9	4.5

分别采用 FARO focus 3D 和 Leica HDS3000 激光扫描仪对两块不同材质的墙体进行扫描,获取墙体点云的三维坐标及强度来验证所提改正模型的适用性,利用点云和扫描仪中心计算出目标点的激光测距值 R ,利用(11)式计算出目标点的激光入射角 θ 。分别利用分段多项式模型对激光强度进行距离改正和入射角改正,以实现两块墙体激光强度的统一改正,改正效果如图 8 所示。

分析图 8 可以得出:理论上利用同一款激光扫描仪采集的同一区域墙体点云的激光强度应大致相等,但由于受到激光测距值、激光入射角等系统变量的影响,同一区域墙体的激光强度相差较大;利用分段多项式改正模型后,减小了激光测距值及激光入射角的影响,激光强度只与目标的表面特性有关,改正后的激光强度较为接近。利用分段多项式改正模型可以对不同仪器采集的两块墙体点云的激光强度进行很好的改正,改正后的墙体点云激光强度趋于一致。对两块墙体点云数据求取改正前后的激光强度的分布及标准差,如表 3 所示。

由表 3 可知:对于两块材质不同的墙体,FARO focus 3D 和 Leica HDS3000 激光扫描仪采集的原始激光强度的标准差分别为 18.9 和 527.7,强度值的分散程度大;经模型改正后,强度值的标准差分别为 6.4 和 57.6,呈正态分布,改正效果良好。将分段多项式改正模型与文献[4]中线性改正模型及对数改正模型进行对比,计算得到了改正前后墙体点云强度的标准差,如表 4 所示。

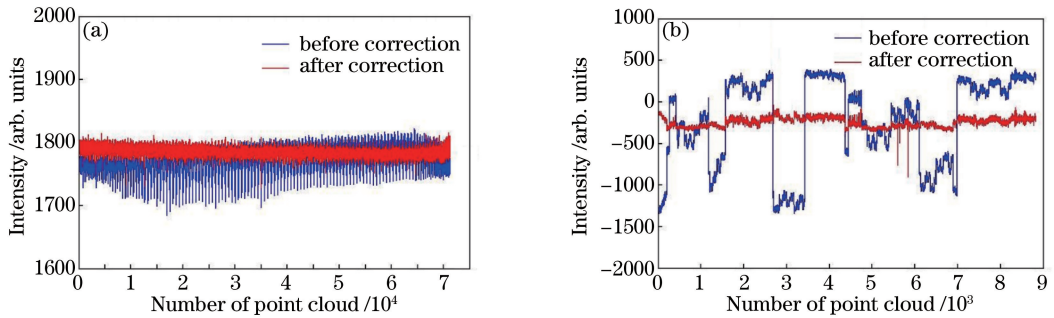


图 8 不同扫描仪点云强度的改正结果。(a) FARO focus 3D 扫描仪;(b) Leica HDS3000 扫描仪

Fig. 8 Correction results of point cloud intensity with different scanners. (a) FARO focus 3D scanner; (b) Leica HDS3000 scanner

表 3 改正前后激光强度的分布及标准差

Table 3 Distribution and standard deviation of laser intensity before and after correction

Instrument	Intensity distribution	Minimum	Maximum	Standard deviation
FARO focus 3D	Before correction	1695	1821	18.9
	After correction	1765	1805	6.4
Leica HDS3000	Before correction	-1350	430	527.7
	After correction	-322	-120	57.6

表 4 不同模型改正前后墙体点云强度的标准差

Table 4 Standard deviation of point cloud intensity of walls before and after correction using different correction models

Correction Model	Standard deviation	
	Before correction	After correction
Linear correction model	527.7	110.6
Logarithmic correction model	527.7	72.3
Sectional polynomial correction model	527.7	57.6

由表 4 可知,相对于线性改正模型及对数改正模型,利用分段多项式改正模型对墙体激光强度进行改正后的强度的标准差最小。表 3 和表 4 说明了分段多项式改正模型的可行性和适用性。

3.2 点云强度的改正效果

选取 FARO focus 3D 激光扫描仪采集的某栋建筑立面的点云数据[如图 9(a)所示]及某建筑场景的点云数据[如图 10(a)所示]进行强度改正,直观地表现点云强度的改正效果,计算激光测距值 R ,并通过计算两组点云数据的法向量[如图 9(b)和图 10(b)所示]确定激光入射角 θ ,按照提出的改正模型对两组点云数

据进行激光强度改正,并将改正前后的点云激光强度转换为 RGB 值显示,在 VC++2008 与点云库(PCL)混合编程的平台上实现强度值与 RGB 值的转换^[5],建筑立面点云数据改正前后的效果如图 9(c)和图 9(d)所示,建筑场景点云数据改正前后的效果如图 10(c)和图 10(d)所示。

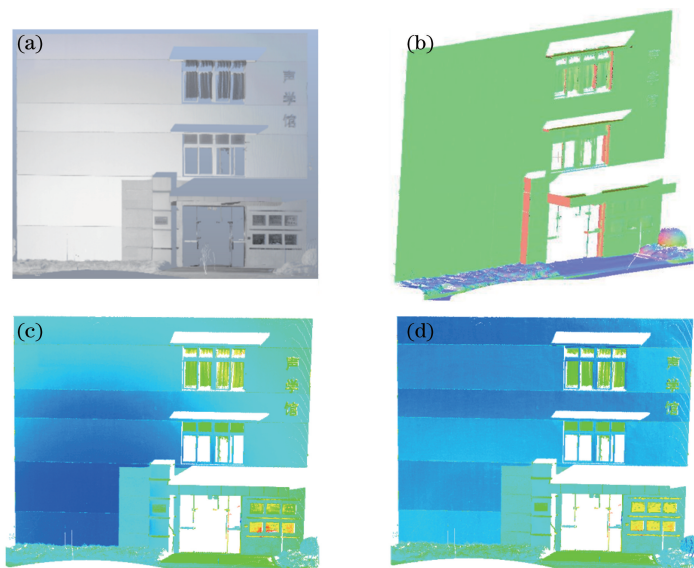


图 9 墙体改正前后点云强度的 RGB 值。(a)原始点云;(b)点云法向量;(c)改正前;(d)改正后

Fig. 9 RGB value of point cloud intensity for a facade before and after correction. (a) Original point cloud; (b) normal vector of point cloud; (c) before correction; (d) after correction

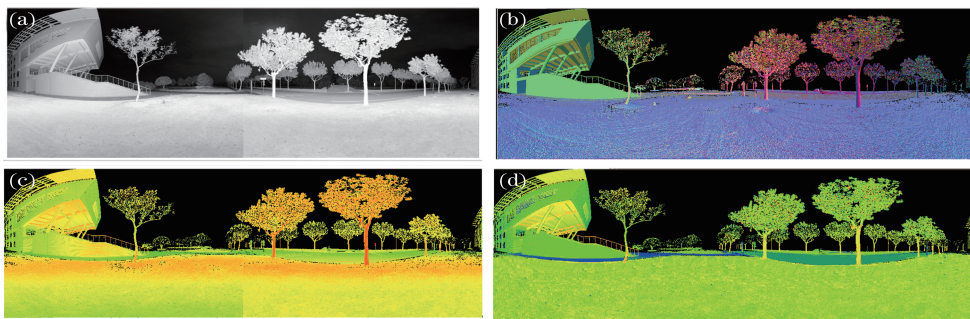


图 10 建筑场景改正前后点云强度的 RGB 值。(a)原始点云;(b)点云法向量;(c)改正前;(d)改正后

Fig. 10 RGB value of point cloud intensity for building scene before and after correction. (a) Original point cloud; (b) normal vector of point cloud; (c) before correction; (d) after correction

分析图 9 可以得出,对于同类目标,比如窗户及颜色和材质相同的墙面,理论上,点云强度的 RGB 值应大致相同,但由于激光强度受激光测距值、激光入射角、大气衰减等系统变量的影响,同类目标点云强度的 RGB 值存在很大差异,如图 9(c)所示。利用提出的改正模型进行激光强度改正后,消除了激光测距值及激光入射角对激光强度的影响,使得同类目标点云强度的 RGB 值趋于一致,如图 9(d)所示,窗户及金属标牌点云强度的 RGB 值分别统一为绿色和黄色。从图 10(d)可以看出,建筑场景点云数据经过强度改正后,能够有效地区分出建筑立面(深绿色)、台阶扶手(浅红色)、水泥道路(浅蓝色)、瓷砖道路(深蓝色)、植被(浅绿色)等地物。对于强度值相近的地物(草地和树木的枝叶),可以根据点云的几何信息进行进一步区分。因此,在点云数据处理过程中,对目标点云的激光强度进行有效改正可以辅助实现目标点云的分类及特征提取,提高点云处理的效率。

4 结 语

根据激光雷达方程,固定其他因素对激光强度的影响,分别对激光强度的距离效应和角度效应进行改

正,提出了一种利用分段多项式模型拟合激光测距值和激光强度之间关系的方法,通过将激光强度分别进行基于多项式模型的角度改正和距离改正,可使相同目标的激光强度趋于统一。实验表明,提出的改正模型可以对点云激光强度进行有效补偿,有效消除了由距离和入射角引起的强度偏差,使得同类目标的激光强度由离散分布变为正态分布,激光强度的改正效果较好。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Kaasalainen S, Krooks A, Kukko A, *et al.* Radiometric calibration of terrestrial laser scanners with external reference targets[J]. *Remote Sensing*, 2009, 1(3): 144-158.
- [3] Pfeifer N, Höfle B, Briese C, *et al.* Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data [C]. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2008, 37: 1045-1051.
- [4] Tan Kai, Cheng Xiaojun. Correction methods of laser intensity and accuracy of point cloud classification[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science Edition)*, 2014, 42(1): 131-135.
谭凯, 程效军. 激光强度值改正模型与点云分类精度[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2014, 42(1): 131-135.
- [5] Cheng Xiaolong, Cheng Xiaojun, Guo Wang, *et al.* Point cloud classification and features extraction of building facades with the corrected laser intensity value[J]. *Journal of Tongji University(Natural Science Edition)*, 2015, 43(9): 1432-1437.
程小龙, 程效军, 郭王, 等. 基于激光强度的建筑立面点云分类及信息提取[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2015, 43(9): 1432-1437.
- [6] Tan K, Cheng X J, Cheng X. Modeling hemispherical reflectance for natural surfaces based on terrestrial laser scanning backscattered intensity data[J]. *Optics Express*, 2016, 24(20): 22971.
- [7] Fang W, Huang X F, Zhang F, *et al.* Intensity correction of terrestrial laser scanning data by estimating laser transmission function[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2015, 53(2): 942-951.
- [8] Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3097-3104.
- [9] Kaasalainen S, Pyysalo U, Krooks A, *et al.* Absolute radiometric calibration of ALS intensity data: effects on accuracy and target classification[J]. *Sensors*, 2011, 11(11): 10586-10602.
- [10] Ding Q, Chen W, King B, *et al.* Combination of overlap-driven adjustment and Phong model for LiDAR intensity correction[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, 2013, 75: 40-47.
- [11] Tan K, Cheng X. Intensity data correction based on incidence angle and distance for terrestrial laser scanner[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2015, 9: 094094.
- [12] Kim I I, Mc Arthur B, Korevaar E J. Comparison of laser beam propagation at 785 nm and 1550 nm in fog and haze for optical wireless communications[C]. *SPIE*, 2001, 4214: 26-37.