

距离因素对地面激光扫描精度影响分析

杨梅洁, 刘俊*

上海工程技术大学城市轨道交通学院, 上海 201620

摘要 激光强度值会受到大气环境、激光测距值、目标物特性等因素的影响, 同类目标物的激光强度值产生较大的偏差。为了消除扫描距离对地面扫描激光强度的影响, 以激光雷达测距方程为基础, 设计了同种材料、不同距离与点云反射强度的实验, 通过实验得出了激光扫描距离与点云激光强度之间的变化关系和数学模型, 并将实验数据修正效果较好的模型(如泰勒插值多项式模型、分段多项式模型、分段高斯函数与多项式混合模型)用于实例点云激光强度的修正, 结果显示, 泰勒插值多项式模型修正效果最好, 可以有效地消除距离因素引起的点云强度偏差, 使同类目标的激光强度趋于一致, 异类目标的激光强度差异明显。

关键词 遥感; 激光强度修正; 地面三维激光扫描; 距离因素; 泰勒插值多项式; 分段函数

中图分类号 P237

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.122804

Influence of Distance Factor on the Scanning Accuracy of Terrestrial Laser

Yang Meijie, Liu Jun*

College of Urban Rail Transit, Shanghai Engineering Science University, Shanghai 201620, China

Abstract Laser intensity is affected by factors such as atmospheric environment, scanning distance, target characteristics, thus the laser intensity values of the similar targets have a large deviation. In order to eliminate the impact of the scanning distance on the intensity of terrestrial laser scanning, based on Lidar ranging equation, experiments with the same material, different distance, and reflection intensity of point cloud, are designed. The relationship between the laser scanning distance and the laser intensity of point cloud and the mathematical model are obtained. The models with better experimental data correction effects (including Taylor interpolation polynomial model, Sectional polynomial model, Sectional Gaussian function, and polynomial mixed model) are used to modify the laser intensity of the point cloud. The results show that the Taylor interpolation polynomial model has the best correction performance, which effectively eliminates the deviation of point cloud intensity caused by the distance factor, and makes the laser intensity of the same kind of target tend to be consistent, and the laser intensity difference of heterogeneous targets is obvious.

Key words remote sensing; laser intensity correction; terrestrial three-dimensional laser scanning; distance factor; Taylor interpolation polynomials; sectional function

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 280.1350; 120.666

1 引言

地面激光扫描(TLS)系统通过发射和接收高速激光光束,用以获取目标物点云的三维坐标信息以及激光回波强度信息,激光强度表征目标物对激光的反射光谱特性,同一环境下,同种目标反射光谱特

性趋于一致,针对该特点进行反演,获取相应的点云特征信息,与点云几何信息结合使用可提高点云精细分割和特征提取的精准度。但在实测应用中,激光强度受到大气环境、目标物自身反射特性和空间几何状态、探测器、扫描仪特性等因素的影响,可能出现同一目标的反射强度值不同,不同目标的反射

收稿日期: 2019-09-22; 修回日期: 2019-10-08; 录用日期: 2019-11-02

基金项目: 上海工程技术大学博士启动资助基金(E3-0501-18-01081)

* E-mail: junliurs@sues.edu.cn

强度值相同的现象,这样的偏差导致激光强度不能够直接作为目标物的实际反射特性参与到目标分割和提取,必须经过激光辐射分析^[1],对激光能量传输的整个过程及衰减机理进行分析,寻求更合适的模型修正并消除各种因素对原始激光强度值的影响,使修正后的激光强度值更趋于理论上的同物同谱、异物异谱,能够直接体现出目标物的表面反射特性,使其点云分割效果更精准。

以激光雷达(LiDAR)的辐射校正原理为基础,针对地面激光扫描的反射强度修正,国内外部分学者进行了相关研究。

从选择辐射修正的影响因素角度来概括,主要包括目标物的扫描距离、入射角度、目标颜色和粗糙度等。Clark等^[2]通过目标物颜色和地面激光扫描仪测距精度之间的相关性研究,发现了它们之间存在明显的相关性,但没有给出系统的变化规律;Pfeifer等^[3]利用朗伯散射体反射率已知特性,分析了入射角度、扫描距离、实验对象特定反射率与实测激光回波强度值之间的关系,使得分析结果更加准确,但该方法更适用于目标物的理论反射率已知情况;高祥伟等^[4]通过室内实验获取大量实验点云数据,针对6种颜色和2种粗糙度的目标材料进行数据分析,得出颜色对激光反射强度的影响更大,但是并没有验证数据的适用性;蔡越等^[5]利用多因素方差分析法和线性回归分析法,对目标物颜色、距离、粗糙度进行交互分析,根据影响程度得出部分颜色和粗糙度对激光反射强度值的相关性顺序,并得出结论——点云的标准偏差与点云反射强度具有幂函数关系。

从理论分析以及修正模型的角度来概括,主要包括从实测数据规律出发和从激光雷达测距方程出发,进行修正模型的选择。从实测数据规律出发,Kaasalainen等^[6]分析了距离以及入射角对激光反射强度的影响,并提出了针对不同扫描仪的强度值修正模型;夏国芳等^[1]以标准反射板和木板两种材料作为实验对象,分析不同入射角条件下目标点云的数量和反射率之间的规律,并提出了多项式函数的拟合方法,但最终没有进行强度值的修正;从激光雷达测距方程出发,结合扫描仪的辐射机制,利用Weierstrass定理,谭凯等^[1]运用多项式模型拟合激光强度值与目标因素之间的关系,通过对间接平差模型的拟合结果进行了比较,得出三次多项式模型能够更好地对强度值进行改正和对点云进行分类的结论;贾东峰等^[8]在此基础上根据误差估算模型和

参数模型设计了实验方案,得出最佳入射角区间;程小龙等^[9]在多项式函数修正模型的基础上,针对距离影响因素提出进行分段多项式拟合的方法,使得激光强度修正的精度有了进一步的提升。

本文将理论推导和数据拟合相结合,探讨了针对扫描距离因素多项式函数插值拟合与逼近拟合修正模型的应用效果,并将分段函数的概念应用于其他拟合方法,最终通过不同的函数模型对实验数据的激光反射强度进行修正,获取更有效的强度修正方法。

2 点云强度的距离修正模型

结合激光强度数据进行点云分割和特征提取可以弥补几何数据信息的不足,但是激光反射强度值会受到大气环境、物体材料特性、表面粗糙度、入射角、扫描距离等诸多因素的影响,出现不同目标的强度值互相交叉,无法直接利用实测强度值本身,而扫描距离作为明显的影响因子,需要针对强度数据的距离因素进行修正^[10-13]。理论上激光回波强度值与各因素的影响关系,可以用激光雷达方程^[10]表示为

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

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; R 为扫描仪中心点到目标物的距离; η_{atm} 为大气传输系数; η_{sys} 为激光雷达的光学传输系数。激光回波强度值代表的是接收的激光强度,不考虑各因素的具体关系,激光强度可以表示为

$$I = C f_1(\rho) f_2(R) f_3(\theta), \quad (2)$$

式中: C 为环境常量; $f_1(\rho)$ 为目标反射率函数; $f_2(R)$ 为目标扫描距离函数,由实验点云强度数据拟合函数得出; $f_3(\theta)$ 为目标扫描入射角函数; I 为原始反射强度。根据强度修正的原则,针对目标距离因素的修正,需保证已知常数 C 、目标反射率函数 $f_1(\rho)$ 和目标扫描入射角函数 $f_3(\theta)$,控制相同变量,保证距离因素独立出来,实际情况中,无法全部获取这些参数和函数关系,因此根据等比关系,来建立激光强度修正模型,

$$\frac{I}{I_s} = \frac{C f_1(\rho) f_2(R) f_3(\theta)}{C f_1(\rho) f_2(R_s) f_3(\theta)}, \quad (3)$$

$$I_s = \frac{f_2(R_s)}{f_2(R)} I, \quad (4)$$

式中: I_s 代表修正后强度值; R_s 拟合函数极值点位置。

3 点云反射强度数据获取

本实验采用 FARO Focus^{3D}120 地面三维激光扫描仪,表 1 列出扫描仪几项主要重要的参数,其提供的扫描数据由每个点的三维坐标及强度(x, y, z, I)组成,强度值范围为 0~2048。

实验地点为室内走廊,扫描分辨率为 1/8,扫描质量为 4 倍,扫描示意图如图 1(a)所示;在平面纸板(40 cm×60 cm)上均匀贴设反射片(3 cm×3 cm),利用铅垂线保证纸板竖直向下,纸板平面扫

表 1 FARO Focus^{3D}120 主要参数

Table 1 Main parameters of FARO Focus^{3D}120

Emitted power /mW	Wavelength /nm	Beam diameter /mm	Field of view /($^{\circ}$)×($^{\circ}$)	Beam divergence /($^{\circ}$)	Rang /m
20	905	3.8	360×305	0.009	0.6—120

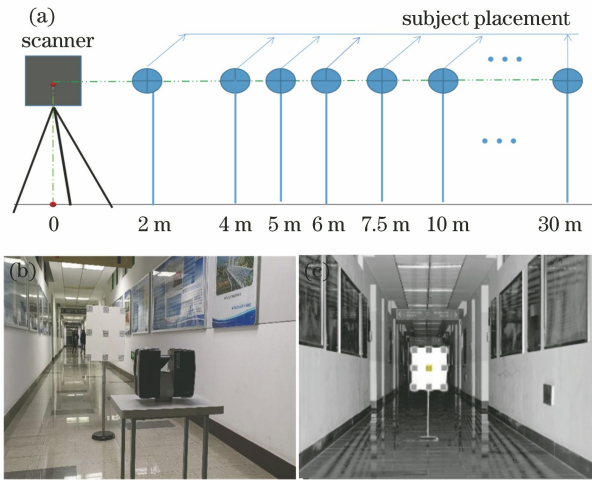


图 1 激光强度和扫描距离实验。(a)示意图;(b)真实场景图;(c)截取目标数据图

Fig. 1 Experiment of laser intensity and scanning distance. (a) Schematic; (b) real scene; (c) intercepting target data

拟合函数模型的选择:点云强度与距离之间的函数关系 $f_2(R)$ 视为可导的连续性函数,由于实验激光强度数据与距离呈非线性关系,考虑采用常见的几种曲线方程对激光强度均值进行拟合。由于任意函数均可利用泰勒多项式无限逼近,可忽略初步对拟合线型的选择,避免了拟合函数选择造成的偏差,简单便利。当使用泰勒多项式进行数据拟合时,为了避免拟合函数可导性的不确定性,采用拉格朗日插值多项式方法进行拟合,原始数据拟合保留最后两个点(不参与插值多项式的拟合过程),验算方差和标准差,与其他函数拟合结果进行比较。

由于点云的数量庞大,点与点之间相互独立,且

扫描仪激光发射方向正交,如图 1(b)所示;为避免获取数据的偶然性,同一对象在既定的同一位置进行三次扫描,每一次扫描的数据导入 FARO SCENE 软件中利用选择工具截取相同位置的数据作为初始点云数据[图 1(c)],通过截取面积大小控制入射角度范围在(0 ± 0.3) $^{\circ}$ 以内。并对获取的点云数据进行预处理,采用三倍标准方差 σ 原则进行异常数据初步剔除,使其尽量满足正态分布,根据点的反射率与强度值 I 一一对应的关系^[11],进行进一步噪声点的剔除,剔除后的数据取算术均值用于模型拟合。

符合相同的激光反射机制,符合统计学规律;如果 n 个随机变量独立且同分布,那么当 n 趋于无穷大时, n 个随机变量的和的分布函数就呈现正态分布的形式,而高斯函数正是描述正态分布的函数,因此考虑采用高斯函数进行数据规律分析;其他函数形式包括分段多项式、指数函数、幂函数、傅里叶函数等,分别考虑进行数据拟合,拟合结果如表 2 所示。分段函数分段点的确定采用多项式拟合极小值点作为分段点。

拟合数据和原始数据对应点的残差平方和(SSE),越接近于 0,说明模型选择和拟合越好,前半段双峰高斯函数拟合残差平方和为 0.023,效果最好,后半段残差平方和最小为三次多项式的拟合 6.546;均方根误差(RMSE)也称回归分析的拟合标准差,越接近于 0,拟合效果越好,前半段最小为双峰高斯函数拟合的 0.12,后半段效果最好的是三次多项式拟合的 2.408;确定系数(R-square)越接近 1,表明方程的变量 x 对 y 的解释能力越强,这个模型对数据拟合的也较好,前半段高斯函数拟合度为 1,后半段确定系数最大为三次多项式拟合的 0.998;整段泰勒多项式拟合 SSE、R-square 以及 RMSE 分别为 0.0209、1 和 0.098,拟合效果较好。由表 2 综合考虑,认为整段泰勒插值多项式,以及五次多项式、双峰高斯函数、傅里叶函数分别与三次多项式的分段组合方式均有较好的拟合效果。

激光强度的距离修正模型分别如下。

1) 泰勒插值多项式模型。为消除函数可导不确定性,采用拉格朗日插值法进行拟合建立的扫描距离与激光强度之间关系为

$$f_{\text{taylor}}(R) = \sum_{i=0}^n c_i R^i, \quad (5)$$

表2 反射强度数据拟合表
Table 2 Reflection intensity data fitting table

Fitting function	Parameter	First half			Parameter	Second half		
		SSE	R-square	RMSE		SSE	R-square	RMSE
Polynomial	1	6173	0.5747	38.16	1	90.62	0.956	5.35
	2	6089	0.5892	38.25	2	84.32	0.963	6.467
	3	82.230	0.9933	5.394	3	6.546	0.998	2.409
	4	52.091	0.9974	5.120	—	—	—	—
	5	7.982	0.9993	2.562	—	—	—	—
Power function	—	—	—	—	1	81.23	0.961	5.097
Exponential function	—	—	—	—	1	89.53	0.958	5.431
Fourier function	—	—	—	—	2	53.15	0.978	7.289
	1	7.354	0.9989	1.811	1	84.97	0.963	9.249
Gaussian function	1	7.522	0.9995	1.954	—	—	—	—
	2	0.023	1	0.120	1	85.43	0.961	6.451
Taylor polynomial	Interpolation	0.0209	1	0.098	Whole curve Last two points are reserved to calculate the root mean square error of the fitting function			

式中： c_i 是泰勒多项式系数； n 是函数最高阶数，由拟合数据点数 $n + 1$ 决定； R 是扫描点到扫描仪中心点距离。联合(4)式和(5)式建立距离修正模型为

$$I_s^{\text{taylor}} = \frac{f_{\text{taylor}}(R_s)}{f_{\text{taylor}}(R)} I, \quad (6)$$

式中：取入射角为 0，扫描距离 $R_s = 10$ m 的位置； I_s^{taylor} 代表激光强度值 I 经泰勒多项式修正模型修正后的强度值。

2) 分段函数模型。双峰高斯函数建立的扫描距离和激光强度关系为

$$f_{\text{gauss}}(R) = a_1 \times \exp\left(\frac{R - b_1}{c_1}\right)^2 + a_2 \times \exp\left(\frac{R - b_2}{c_2}\right)^2, \quad (7)$$

式中： a_1 、 a_2 、 c_1 、 b_1 、 b_2 、 c_2 为高斯函数参数； $f_{\text{gauss}}(R)$ 代表自变量为 R 的高斯函数。

傅里叶函数建立的扫描强度和激光强度关系为

$$f_{\text{fourier}}(R) = a_0 + a_1 \times \cos(\omega R) + b_1 \sin(\omega R), \quad (8)$$

式中： a_0 、 a_1 、 b_1 、 ω 为傅里叶函数参数； $f_{\text{fourier}}(R)$ 代表自变量为 R 的傅里叶函数。

分段多项式方程建立的扫描距离和激光强度关系为

$$f_3(R) = \begin{cases} \sum_{i=0}^{N_1} (a_i R^i), & R < R_{\text{cp}} \\ \sum_{i=0}^{N_2} \left[b_i \left(\frac{1}{R} \right)^i \right], & R \geq R_{\text{cp}} \end{cases}, \quad (9)$$

式中： a_i 、 b_i 、 N_1 、 N_2 是多项式的参数； $f_3(R)$ 代表自变量为 R 的分段多项式函数； R_{cp} 是多项式的分段点位置，分段点位置由实验数据拟合极值小点确定。

联合(7)式、(9)式和(4)式建立分段高斯函数与多项式混合距离修正模型，

$$I_s^{\text{g}} = \frac{f_2(R_s)}{f_2(R)} I = \begin{cases} \frac{f_3(R_s)}{f_{\text{gauss}}(R)} I, & R < R_{\text{cp}} \\ \frac{f_3(R_s)}{\sum_{i=0}^{N_2} \left[b_i \left(\frac{1}{R} \right)^i \right]}, & R \geq R_{\text{cp}} \end{cases}, \quad (10)$$

式中： I_s^{g} 代表激光强度值 I 经分段高斯和多项式混合模型修正后的强度值。

联合(8)式、(9)式和(4)式建立分段傅里叶与多项式混合距离修正模型，

$$I_s^{\text{f}} = \frac{f_2(R_s)}{f_2(R)} I = \begin{cases} \frac{f_3(R_s)}{f_{\text{fourier}}(R)} I, & R < R_{\text{cp}} \\ \frac{f_3(R_s)}{\sum_{i=0}^{N_2} [b_i (1/R)^i]}, & R \geq R_{\text{cp}} \end{cases}, \quad (11)$$

式中： I_s^{f} 代表激光强度值 I 经分段傅里叶和多项式混合模型修正后的强度值。

联合(9)式和(4)式建立的分段多项式距离修正模型^[9]，

$$I_s = \frac{f_2(R_s) I}{f_2(R)} = \begin{cases} \frac{f_3(R_s)}{\sum_{i=0}^{N_1} (a_i R^i)} I, & R < R_{\text{cp}} \\ \frac{f_3(R_s)}{\sum_{i=0}^{N_2} [b_i (1/R)^i]} I, & R \geq R_{\text{cp}} \end{cases}, \quad (12)$$

式中: I_s 代表激光强度值 I 经分段多项式模型修正后的强度值。

4 点云强度改正实例及结果

4.1 点云强度改正实例分析

为了对强度值修正方法进行验证,采用两种验证

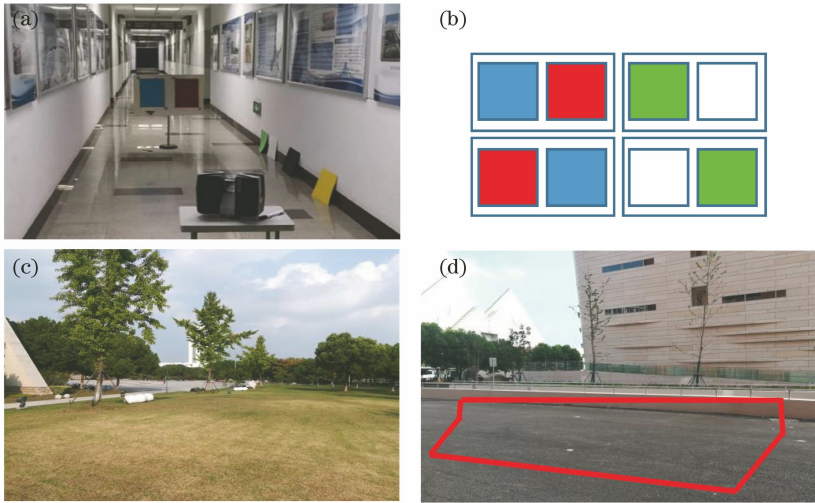


图2 实验场景。(a)室内实验场景;(b)四色卡纸组合示意图;(c)草坪场景;(d)地面场景(红色线框内)

Fig. 2 Experimental scene. (a) Indoor experimental scene; (b) schematic diagram of four-color cardboard combination; (c) lawn scene; (d) ground scene (inside red line frame)

实验仪器为 FARO Focus^{3D}120 扫描仪,扫描分辨率设置为 1/8,扫描质量为 4 倍,扫描数据导入 FARO SCENE 软件中选取局部区域,导出 .xyz 格式数据,后续分别采用泰勒多项式修正模型、分段多项式模型、分段高斯函数与多项式混合模型以及分段傅里叶与多项式混合模型,进行获取的激光强度数据进行修正,修正前后的激光强度数据分布如表 3 所示,激光强度 I 的分布偏差可以用最大值(max)、最小值(min)来表示,采用标准差(STD)来体现数据分布的离散程度。

由表 3 得出以下结论:

1) 对于室内环境下,相同颜色的卡纸,根据扫描位置左右的不同,原始强度最大值与最小值分布范围相差较小,由于同一卡纸小范围内,由于反射率相同,扫描距离相差较小,因此原始强度值差异较小。

2) 室内环境下,分布于平面板左右的两边相同颜色卡纸,对应的原始激光强度值 I 最大值、最小值和平均值差异不大,除白色卡纸左右两边的激光强度值 I 最小值相差为 10 之外,其他同色卡纸左右对应的 min、max、mean 偏差基本处于 3 以内;由于一张卡纸尺寸较小,反射率相同,同一区域内扫描距离

方式:1)室内环境下,固定扫描仪位置,对同一位置不同颜色的卡纸(20 cm×30 cm)进行扫描,两张卡纸粘贴在面板上,相对于扫描入射角 0°点对称分布,如图 2(a)所示,卡纸颜色及组合形式如图 2(b)所示;2)室外环境下,选择两处场景进行扫描,分别为草坪场景[图 2(c)]和地面场景(红色线框内)[图 2(d)]。

R 的偏差在 4 cm 以内,因此同一区域内的原始激光强度值 I 分布范围(max-min)较小,基本处于 7~15 之间,对应的 STD 也较小,处于 0.090~4.112 之间。

3) 室外环境下,草坪场景和地面场景扫描距离分布范围较大,对应原始扫描数据分别为 5024881 和 3512205 个点,对应的激光强度 I 分布范围分别为 [1648, 2035]、[1325, 1789],对应的 STD 分别为 669.5 和 469.3,激光强度 I 的整体偏差较大。

4) A 代表泰勒插值多项式修正模型;B 代表分段多项式模型;C 代表分段高斯和多项式混合修正模型;D 代表分段傅里叶和多项式混合修正模型。

5) A 模型修正后,室内环境下,位于左右位置的蓝色卡纸,其激光强度 I 的分布范围由 [1943, 1950]、[1942, 1950] 变成 [1862, 1865]、[1861, 1866],即左右两边蓝色卡纸激光强度 I 的偏差(max-min)从 7 和 8 分别变成 3 和 5,激光强度 I 标准差从 2.357 和 0.122 变成了 0.202 和 0.042,偏差和标准差明显减小;同样,红色卡纸的激光强度 I 分布偏差从 11 和 12 变成 7 和 4,标准差从 0.090 和 1.269 变成 0.008、0.135;绿色卡纸的激光强度 I 分布偏差从 7、7 变成 4、3,标准差从 2.162、0.766 变成

表3 原始强度值及修正后强度值的分布情况

Table 3 Distribution of original intensity and corrected intensity

Item	Blue		Red		Green		White		Lawn	Ground	
	Left	Right	Left	Right	Left	Right	Left	Right	scene	scene	
R/m	min	5.947	5.963	5.941	5.935	5.942	5.947	5.954	5.941	1.948	1.998
	max	5.971	5.944	5.965	5.964	5.971	5.962	5.993	5.963	30.25	10.10
	min	1943	1942	1941	1943	1944	1945	1938	1948	1648	1325
	max	1950	1950	1952	1955	1951	1952	1953	1956	2035	1789
I	A min	1862	1861	1868	1869	1867	1866	1869	1869	1825	1465
	A max	1865	1866	1875	1873	1871	1869	1878	1874	1911	1568
	B min	1949	1952	1949	1943	1954	1954	1956	1956	1836	1546
	B max	1955	1959	1957	1951	1960	1962	1968	1963	1955	1689
	C min	1785	1785	1761	1759	1730	1728	1726	1725	1767	1398
	C max	1793	1792	1767	1770	1735	1736	1738	1734	1965	1584
	D min	1788	1756	1683	1650	1684	1729	1779	1750	1694	1368
	D max	1799	1781	1690	1661	1691	1735	1796	1764	2005	1656
	Original	1946	1946	1947	1948	1947	1948	1949	1952	1895	1548
	A	1864	1865	1871	1870	1869	1867	1874	1872	1866	1543
	B	1952	1958	1953	1948	1957	1958	1966	1958	1903	1563
	C	1789	1786	1765	1768	1734	1724	1735	1729	1869	1458
Mean	D	1793	1768	1686	1658	1689	1732	1786	1758	1889	1435
	Original	2.357	0.122	0.090	1.269	2.162	0.766	0.423	4.112	669.5	469.3
	A	0.202	0.042	0.008	0.135	0.246	0.198	0.097	0.695	35.66	45.44
	B	0.268	0.079	0.028	0.684	0.682	0.654	0.165	1.115	78.35	82.5
STD	C	1.857	0.102	0.064	0.789	1.121	0.725	0.221	4.356	98.76	101.5
	D	2.684	0.165	1.35	1.147	1.684	0.754	0.554	4.451	389.2	205.7

0.246、0.198；白色卡纸激光强度 I 分布偏差从 15、8 变成 9、5；室外场景中，草坪场景和地面场景的激光强度 I 分布偏差从 387、454 分别变成 86、103，标准差从 669.5、469.3 分别变成 35.66、45.44，整体而言，室内激光强度 I 分布范围和标准差基本缩小一半以上，室外场景分布范围和标准差大幅度减小，证明修正模型 A 的修正效果明显有效。

6) 同理，由表 3 可以看出，模型 B 修正之后，蓝、红、绿、白四色卡纸和室外草坪及地面场景中激光强度 I 的分布偏差(max-min)除右侧的绿色卡纸稍有上升之外其他均明显减小，对应的 STD 均变小；模型 C 修正后，四色卡纸激光强度 I 的分布偏差右侧的绿色和白色卡纸稍有升高，其他大部分处于减小状态，对应的 STD 除右侧白色卡纸外均呈减小状态；模型 D 修正后，除红色卡纸和右侧绿色卡纸稍有减小外，室内环境下，其他部分均有明显的增大，室外环境下，两种场景的强度值 I 的分布偏差略有减小，但不明显，对应的 STD 基本处于一半增大、一半减小的状态，说明模型 D 的修正效果不稳定。

7) 通过室内场景与室外场景中的目标物对应激光强度 I 的分布偏差以及 STD 在修正前后的对

比分析，可以看出，采用四个修正模型对激光强度 I 的修正效果按照显著程度从大到小排序依次为 A、B、C、D；从修正效果而言，经过模型 D 的修正之后，半数目标物激光强度值 I 的离散程度不降反升，修正状态不稳定，因此考虑模型 D 不适用于实测激光强度值 I 的修正，而模型 A 修正后的激光强度 I 的分布范围明显缩小，标准差大幅降低，修正效果最好。

室内场景中，卡纸属于单一目标，修正后，激光强度值 I 的分布 min、max、mean 和 STD 可以直接反映出激光强度值 I 的修正效果，但是室外场景中，扫描目标物不单一，因此从 min、max、mean、STD 的变化中还不能直接判断修正效果是否可以将不同目标物有效地区分开，因此需要将修正结果可视化，观察修正模型对于利用激光强度值 I 进行目标分类是否有效。

4.2 点云强度改正效果

选取 FARO Focus^{3D}120 激光扫描仪采集的室外场景点云数据进行激光强度修正前后的可视化展示，以便观察修正模型对室外环境以及多目标点云强度数据的修正效果，包括草坪场景和停车场入口

处地面场景两组点云强度数据。计算激光测距值 R , 按照提出的效果较好的三种改正模型对两组点云数据进行激光强度的距离修正, 并将改正前后的点云激光强度转化为 RGB 值显示, 在 MATLAB 软件中实现强度值与 RGB 转换。转换思路为: 1) 将强度值转换为二进制 (24 位长), 取前 8 位与 $0x0000ff$

做位与运算为 B , 取前 16 位与 $0x00ff00$ 做位与运算为 G ; 2) 将强度值转化为灰度值 ($0 \sim 255$), 根据 RGB 与灰度的等换关系反算出 R , 将数据存储为 .pts 格式文件 (x, y, z, I, R, G, B), 并在 Cloud Compare 软件中实现可视化, 结果如图 3 和图 4 所示。

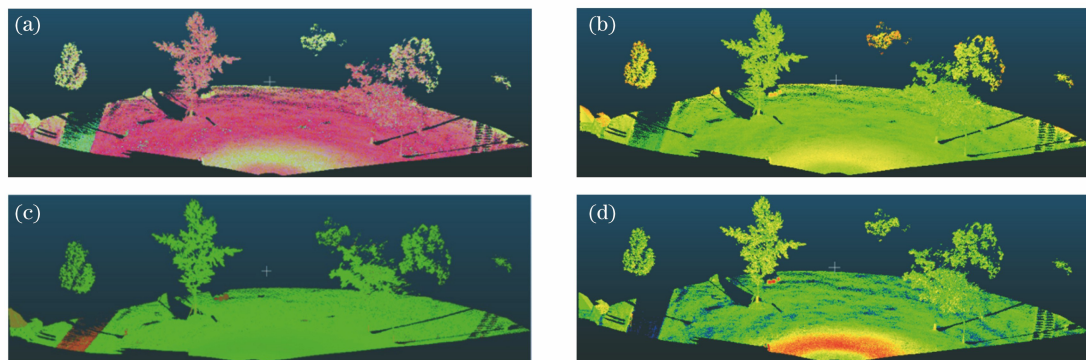


图 3 草坪场景点云强度修正前后 RGB 值。(a)修正前;(b)分段多项式模型修正后;(c)泰勒插值多项式模型修正后;(d)分段高斯函数与多项式混合模型修正后

Fig. 3 RGB value of point cloud intensity for lawn scene before and after correction. (a) Before correction; (b) modified sectional polynomial model; (c) modified Taylor interpolation polynomials model; (d) modified the mixed model of sectional Gaussian function and polynomial

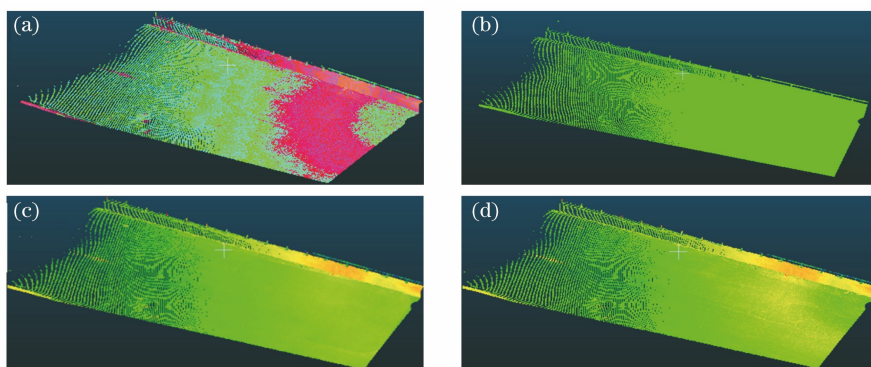


图 4 地面点云强度修正前后 RGB 值。(a)修正前;(b)分段多项式模型修正后;(c)泰勒插值多项式模型修正后;(d)分段高斯函数与多项式混合模型修正后

Fig. 4 RGB value of point cloud intensity for ground scene before and after correction. (a) Before correction; (b) modified sectional polynomial model; (c) modified Taylor interpolation polynomials model; (d) modified the mixed model of sectional Gaussian function and polynomials

由于激光强度受到大气环境、光照、激光测距值、激光入射角等变量的影响, 同类目标点云强度的 RGB 值存在较大差异, 尤其是不同距离条件下的树冠和草坪颜色差异明显, 如图 3(a) 所示。利用实验效果较好的三种改进模型对激光强度值进行修正后, 由图 3(b) 可以看出, 近处的树冠和远处的树冠颜色差异缩小, 基本表现为绿色, 少量点为黄绿色, 同样草坪 RGB 颜色过渡区差异减小, 黄色范围缩小, 但道路的颜色 (绿色) 与草坪颜色 (绿色) 区分度

降低, 对于同类目标的距离修正效果较好, 但是可能会导致不同物体之间的区分度降低, 不利于后续点云分类。由图 3(c) 可以看出, 颜色材质相近的树冠和草坪激光强度经过修正后, 基本处于绿色, 靠近扫描仪的部位, 绿色颜色稍微加深, 同时可以有效地区分景观模型 (橘红色)、树根部 (橘黄色) 和路面 (红色) 与草坪树冠 (绿色), 保证距离修正效果的同时, 不同目标可以有效区分, 修正效果优于图 3(b)。由图 3(d) 可以看出, 草坪场景修正后, 远处与近处的

树冠仅表现为绿色,草坪近处的差异范围减小,对比度减弱,整体表现为绿色,小部分偏橘黄,路面为蓝色,景观为红色,不同目标可以相对区分,但是同类目标的距离修正效果稍差于图 3(a)和图 3(b)。

从图 4(a)中可以看出,材质相同的水泥地面点云强度的 RGB 值有很大差异,材质与地面相近的矮墙侧面远处与近处也有很大差异;强度修正之后,地面和墙面点均为绿色,墙面上的铁质扶手也为绿色,虽然同类目标的距离修正效果显著,但是无法有效区分材质相差较大的扶手和地面,修正效果不理想,如图 4(b)所示;相较于修正前,图 4(c)地面点 RGB 值基本处于绿色,同类目标的颜色对比差异减小,与地面材质相近的侧面矮墙大部分为黄色,扶手为蓝绿色,能够有效区分材质差异明显的目标物;图 4(d)修正效果稍劣于图 4(c),区别体现在地面上存在的黄色部分多于图 4(c)。依据三种修正模型的同类目标距离修正效果,优劣排序为图 4(c)、图 4(b)、图 4(d);依据三种修正模型的异类目标距离修正效果,优劣排序为图 4(c)、图 4(d)、图 4(b)。整体而言,泰勒插值多项式模型的修正效果较好。

5 讨论与分析

近年来激光三维扫描技术在工程检测领域的应用越来越深入,由坐标信息的利用转向激光强度数据的深度挖掘,结合图像分割技术的日渐成熟,将点云数据的应用从传统的点云建模转化为结合图像技术进行目标物的特征识别和分类^[11-19],是近两年和未来的主要探讨方向。由于点云强度受到的影响因素较多,部分研究开始考虑进行强度的距离修正,目前最新的修正方法是依靠于激光雷达方程的分段多项式修正方法,相较于传统的数据拟合方程修正方法而言,更加科学,但是目前没有更多修正方法的效果比对,因此,本文旨在将多种方法的强度修正效果进行对比,寻求更为有效的强度修正方法。

本文最终利用的修正模型中,针对激光强度距离因素的修正效果而言,同类目标的距离修正效果较好,异类目标物差异效果稍弱,经讨论认为主要原因有:1)颜色。颜色相近的目标物,即使进行强度修正,效果也不明显,比如草坪场景中白色景观(橘红)以及有白色涂料的树根部(橘黄)以及草坪上少量裸露部分点(红色),虽然颜色略有差异,但是并不明显。2)激光入射角度。考虑距离修正时,严格意义上应该控制除了距离以外的变量为定值,除了系统变量,当对整个场景点云进行激光强度修正时,没有

考虑入射角的变化,这是导致修正效果无法达到理论效果的原因之一。但是就目前能够达到的距离因素修正效果而言,分段多项式模型和分段高斯函数与多项式模型,均是通过逼近拟合的方法建立模型,而且因分段点的确定方法不同(极大值法与极小值法),会导致修正效果的差异,相较而言,泰勒多项式采用插值拟合的方法针对整段点云进行修正模型的建立,避免了考虑分段点的位置问题,且修正效果较好,因此认为泰勒多项式模型更加简单有效。

未来研究难点在于将影响目标激光强度的影响因素,如颜色、粗糙度、尺寸等,独立分解并量化成函数表达式,同时建立激光强度修正模型,从而消除同物异值和同值异物的偏差,才能更好地更深入地利用点云强度信息进行特征的提取与分类,提升整体测量结果的精度。

6 结 论

三维激光扫描反射原理满足激光雷达方程,以此为基础,固定其他因素对激光强度的影响,对激光强度的距离效应进行修正,提出了分段高斯函数与多项式混合模型、整段泰勒插值多项式模型拟合强度数据和距离值之间关系的方法,基本可使相同目标的激光强度趋于一致。实验结果表明,通过这两种方法对激光强度进行修正的效果,以及与分段多项式模型修正效果的对比,可以发现,相较于分段多项式模型的修正效果,泰勒插值多项式模型修正不仅可以使同一类目标的强度值趋于一致,还可以有效地区分出异类物体,有效地消除由扫描距离引起的强度偏差,激光强度的修正效果更好。

参 考 文 献

- [1] Tan K, Cheng X J. Correction methods of laser intensity and accuracy of point cloud classification [J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 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.
- [2] 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.
- [3] Pfeifer N, Derringer P, Haring A, et al. Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and functional relations [C] // Proceedings of

- the VIII Conference on Optical 3D Measurement Technology, 2007: 328-337.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] Xia G F, Hu C M, Cao B Z, 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.
- [8] Jia D F, Cheng X J, Liu Y P, et al. Precision of laser point cloud related to the incident angle [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2018, 46(5): 47-53.
贾东峰, 程效军, 刘燕萍, 等. 入射角度对激光点云精度的影响分析[J]. 工程勘察, 2018, 46(5): 47-53.
- [9] Cheng X L, Cheng X J, Li Q, et al. Laser intensity correction of terrestrial 3D laser scanning based on sectional polynomial model [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(11): 112802.
程小龙, 程效军, 李泉, 等. 基于分段多项式模型的地面三维激光扫描激光强度改正[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(11): 112802.
- [10] Jelalian A V. Laser radar systems [M]. Boston: Artic House, 1992.
- [11] Tan K, Cheng X J. Dual-threshold algorithm for intensity image edge extraction of terrestrial laser scanning point cloud[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(9): 1425-1431.
谭凯, 程效军. 双阈值法地面激光点云强度图像边缘提取[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 1425-1431.
- [12] Hu C M, Li T S. Research on a generation method of terrestrial LiDAR reflection intensity imagery based on central projection [J]. Laser Journal, 2014, 35(8): 12-14.
胡春梅, 李天烁. 一种基于中心投影的地面激光雷达反射强度图像的生成方法[J]. 激光杂志, 2014, 35(8): 12-14.
- [13] Li T S, Wang Y M, Hu C M. Automatic registration of point cloud based on laser intensity[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2014(S2): 143-145, 150.
李天烁, 王晏民, 胡春梅. 基于激光反射强度的点云自动配准研究[J]. 测绘通报, 2014(S2): 143-145, 150.
- [14] Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(15): 3097-3104.
- [15] Tan K, Cheng X J. Intensity data correction based on incidence angle and distance for terrestrial laser scanner [J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2015, 9(1): 094094.
- [16] Tan K, Cheng X J. TLSlaser 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.
- [17] Guo W, Cheng X J. Registration method for airborne and terrestrial light detection and ranging point cloud based on laser intensity classification [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(6): 062803.
郭王, 程效军. 基于激光强度分类的机载与地面激光雷达点云配准方法[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(6): 062803.
- [18] Jiang H J, Lai J C, Wang C Y, et al. Research on ranging property of laser radar and its range accuracy [J]. Chinese Journal of Lasers, 2011, 38(5): 0514001.
姜海娇, 来建成, 王春勇, 等. 激光雷达的测距特性及其测距精度研究[J]. 中国激光, 2011, 38(5): 0514001.
- [19] Li Q, Cheng X J, Tian R, et al. Correction and normalization of multi-scan terrestrial three-dimensional laser scanning intensity [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(12): 122802.
李泉, 程效军, 田芮, 等. 多站地面三维激光扫描强度数据纠正与归一化[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(12): 122802.