

基于多项式模型的 TLS 激光强度值改正

谭 凯 程效军

同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要 从激光雷达测距方程出发,根据扫描仪的辐射机制,运用多项式模型拟合激光强度值与接收功率之间的关系。由于系统参数与目标反射率未知,接收功率无法获取,所以通过激光入射角的余弦与激光测距值平方的组合,构造新变量,实现目标反射率与扫描几何因素的分离,根据多项式模型建立激光强度值与新变量之间的模型关系。定义了标准测距值与标准入射角,分析残差特性,对激光强度中的距离和入射角效应进行改正。通过实验进行验证分析。实验结果表明:该方法能有效地去除由距离和入射角引起的强度偏差,精确地对激光强度值进行改正。

关键词 遥感; 激光强度; 激光测距值; 激光入射角; 激光雷达测距方程; 多项式模型

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0314002

TLS Laser Intensity Correction Based on Polynomial Model

Tan Kai Cheng Xiaojun

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

Abstract Starting from the laser radar range equation, the polynomial model is adopted to fit the relationship between the laser intensity value and the received power based on the instrumental radiometric mechanism. Because of the unknown system parameters and target reflectance, it is impossible to compute the definite received laser power. So, by constructing the new variable constituted by the combination of the cosine of the incidence angle and the square of the range, the scanning geometry factors and target reflectance are separated and the polynomial model is used to fit the relationship between the laser intensity and the new variable. The standard range and the standard incidence angle are defined, and the intensity biases caused by the range and the incidence angle are corrected by analyzing. Experiments are conducted to test and verify the proposed method. Results show that the method can effectively remove the variations and biases caused by the range and incidence angle as well as accurately obtain the corrected laser intensity value proportional to the reflectance of the scanned point.

Key words remote sensing; laser intensity ; laser range value; laser incidence angle; laser radar range equation; polynomial model

OCIS codes 280.3640; 280.1350; 010.0280; 010.3640; 120.6660

1 引 言

地面三维激光扫描(TLS)以其高分辨率、高精度、高效率、数字化采集、信息量丰富等优点,已在多个领域取得了广泛的应用。与传统测量方式相比,TLS以激光为载体,通过激光束的高速发射与接收不仅提供扫描目标高密度的点云三维坐标信息,而且通过激光接收机记录目标的后向散射回波强度,也称为激光强度。现有的应用大多都是基于扫描数据中的几何信息,通过几何信息求得点云的距离变化、法向变化、曲率变化、高程差异、密度大小、拓扑关系等,在此基础上实现点云的分类、分割与特征提取等应用。而在地表资源

收稿日期: 2014-10-11; 收到修改稿日期: 2014-11-14

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2013BAK08B07)

作者简介: 谭 凯(1987—),男,博士研究生,主要从事三维激光扫描强度数据处理方面的研究。E-mail: 502365061@qq.com

导师简介: 程效军(1964—),男,博士,教授,主要从事三维激光扫描与近景摄影测量方面的研究。E-mail: cxj@tongji.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

勘探、精细农业、植被种类调查、南极冰川融化、移动机器人三维视觉系统等研究领域,借助单一的几何信息往往无法进行点云的精细分类及进一步的应用。

激光强度表征目标对激光的反射光谱特性,可看作反映目标特性的一个物理量^[1],且激光强度与坐标信息是非常精确的一一对应关系,无需配准,它们具有像素级融合的特点,利用其可对目标的几何形状、表面特性、内部结构、运动和特征参量变化等物理特征信息进行提取和反演的特点,并根据反演得到的目标反射信息与相关特征,可实现点云的可视化、分类与特征提取以及对不同目标进行探测与识别^[2]。大量研究表明,激光强度受到扫描仪特性、大气传输、目标反射光谱特性、探测器与放大电路噪声、扫描几何等多种因素的影响^[1-14],存在较大偏差,同一目标测得的强度值可能不同,不同目标测得的强度值可能相同,导致同物异谱、异物同谱现象的存在。激光强度作为目标对发射激光光束后向散射回波的光功率^[3],并不能直接用于目标反射特性的提取,而是需要对其进行辐射改正,消除各种因素的影响^[15]。辐射改正是指分析激光能量传输的整个过程及其衰减的影响因素和产生机理,通过一定的模型对原始强度值中的各种影响因素进行改正或消除,使得改正后的强度值能直接反应目标表面的反射特性^[2,4-9]。通过辐射改正,可以充分挖掘和利用目标的属性信息,进行相关的基于目标特性的应用研究。如何对激光强度值进行改正,从中提取目标反射特性信息成为激光强度值应用的首要问题与研究热点。

针对机械激光雷达(LiDAR)辐射校正,国内外相关学者进行了大量研究。Pfeifer等^[3]通过在室内扫描反射率已知的不同朗伯散射体,研究了入射角、距离、反射率对激光强度值的影响,并通过对实测数据的拟合得到了激光强度值与激光测距值、激光入射角以及目标反射率之间的关系,同时通过反求得到了目标的反射率,获得了较为准确的结果。Höfle等^[2]分析了各种影响因素,通过数值改正及模型改正两种方法分别对机载激光的强度数据进行改正,生成了较为满意的强度图像。Kaasalainen等^[13]分析了距离以及激光入射角对激光强度值的影响,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。国内在此领域也展开了相应的研究,取得了一些初步的成果。刘经南等^[16]用实测的机载数据对激光回波信号的强度信息进行统计标定,并基于标定结果,实现了对联合激光强度信息和高程信息进行分类的算法,获得了较为满意的分类结果。黄磊等^[17]针对车载三维测量系统中的激光扫描仪回光强度值,提出了一种基于强度值的地物信息提取和分类方法,将回光强度值进行角度、距离统一线性改正,并分级显示,通过绘制地物在不同能量级上的分布曲线,确定曲线峰值对应的强度级,实验结果显示,区分不同地物分布曲线上的峰值可以实现地物的提取和分类。本文将理论推导与数据拟合相结合,提出了一种基于多项式模型的TLS激光强度值改正方法来消除由于距离和入射角引起的强度偏差。从激光雷达测距方程出发,根据朗伯散射模型和扫描仪的辐射机制,利用Weierstrass定理,运用多项式模型拟合激光强度值与接收功率之间的关系。在接收功率无法求得的情况下,通过对激光入射角的余弦与激光测距值平方进行组合,构造新变量,实现目标反射率与扫描几何因素的分,并通过多项式模型建立激光强度值与新变量之间的模型关系。然后通过定义标准测距值与标准入射角,对激光强度中的距离和入射角效应进行改正。

2 扩展朗伯目标的激光雷达测距方程

激光扫描仪发出的激光信号,经过大气传输到达目标,与目标表面发生作用,再返回到激光接收机,整个过程可用激光雷达测距方程定量表示。激光雷达测距方程^[18]用于系统设计和校准,可以看成发射一定功率激光后的激光到目标的传输、目标对激光的反射、散射光到探测器的传输和接收机对散射光的收集这四项因子的乘积,为三维激光扫描仪辐射改正提供了定量的理论基础。

$$P_r = \frac{P_t D_r^2}{4\pi R^4 \beta_l^2} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}} \sigma, \quad (1)$$

式中 P_r 为接收激光功率, P_t 为发射激光功率, D_r 为接收孔径, R 为扫描仪中心到扫描目标点距离, β_l 为激光光束宽度, η_{atm} 为单程大气传输系数, η_{sys} 为光学系统传输系数, σ 为目标散射截面, σ 定义为

$$\sigma = \frac{4\pi}{\Omega} \rho A_s, \quad (2)$$

式中 Ω 为散射立体角,定义为物体在以观测点为球心的球面上投影面积 S 与球半径 r 平方值的比, ρ 为目标

在激光波长下的反射率, A_s 为激光照射在目标表面的光斑面积。

三维激光扫描仪具有很高的分辨率,使得物体的尺寸远大于其分辨单元,则物体可视为扩展目标。对于扩展目标,如图1所示,光斑半径 $r = \frac{R\beta_t}{2}$, 则光斑面积 A_s 可表示为

$$A_s = \frac{\pi R^2 \beta_t^2}{4}. \quad (3)$$

目标对激光的实际辐射通常较为复杂,为了简化,假设被目标反射回来的激光束被均匀地散射到一个圆锥立体角 Ω 中。如图2所示, \mathbf{n} 为目标表面某点的法向量,入射激光束与法向量之间的夹角(激光入射角)为 θ 。当入射激光一定时,假定目标反射的激光束被均匀地散射到一个半球体上,即圆锥立体角 $\Omega = \pi$ 。此时,从任何角度观察反射面,其反射亮度都是一个常数,这种反射面称为朗伯面。根据朗伯余弦定理,对于朗伯面,不同角度接收到的光强与入射角 θ 的余弦成正比,激光接收机与发射机位置重合,因此,

$$\sigma = \pi R^2 \beta_t^2 \rho \cos \theta. \quad (4)$$

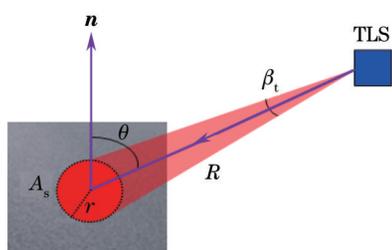


图1 激光光斑示意图

Fig.1 Schematic diagram of laser spot

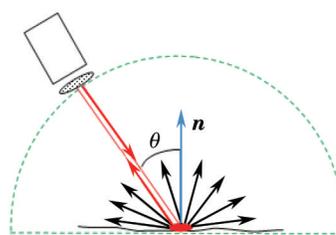


图2 朗伯散射模型

Fig.2 Lambert scattering model

将(4)式代入(1)式,可得扩展朗伯目标的激光雷达测距方程为

$$P_r = \frac{P_t D_r^2 \rho \cos \theta}{4R^2} \eta_{\text{sys}} \eta_{\text{atm}}. \quad (5)$$

大气对激光存在吸收与散射作用,这对机载激光扫描强度值改正有较大的影响;而对于近距离地面激光扫描,大气对激光传输的衰减 η_{atm} 可忽略不计。此外,(5)式中与系统相关的发射功率 P_t 、接收机尺寸 D_r 、光学系统传输参数 η_{sys} 在同一次扫描中都可以看作稳定不变的,因此(5)式可进一步简化为

$$P_r = C \frac{\rho \cos \theta}{R^2}, \quad (6)$$

式中 $C = \frac{P_t D_r^2 \eta_{\text{sys}}}{4}$, C 为与系统参数相关的常数。

(6)式中测距值是指在扫描时扫描仪中心到扫描点之间的距离;入射角是指入射激光光束与扫描点法向量之间的夹角,入射角范围为 $0^\circ \sim 90^\circ$ 。如图3所示,设扫描时刻扫描仪中心 O 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ,任一扫描点 S 坐标为 (x, y, z) ,法向量 $\mathbf{n} = (n_1, n_2, n_3)$,入射激光向量 $\overrightarrow{OS} = (x - x_0, y - y_0, z - z_0)$,则可根据(7)式计算每点的测距值和入射角,其中法向量通过KNN算法^[19-20]建立点云邻域集,再通过邻域集拟合平面,最后获得拟合平面的法向量得到。

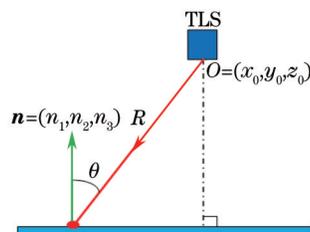


图3 扫描时刻几何关系示意图

Fig.3 Schematic diagram of geometrical relationship between the scan time

$$\begin{cases} R = \sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2} \\ \cos = \frac{\overline{OS} \cdot \mathbf{n}}{R \cdot |\mathbf{n}|} \end{cases} \quad (7)$$

3 基于多项式模型的激光强度改正模型

由(6)式可知,接收功率与目标反射率、入射角及激光测距值有关。回波信号到达接收机后,光电探测器将接收到的激光信号转换成电信号,放大电路对该电信号进行放大后再由信号处理电路进行处理^[3]。通过一系列的转换,最后系统提供给用户的是一个整数值,这个整数值就是通常所说的激光强度值。如果扫描仪辐射系统对接收功率线性放大,即激光强度值 $I \propto P_r$, 可得:

$$I \propto \frac{IR^2}{\cos \theta} \quad (8)$$

但是,接收功率经过辐射系统未知专有函数的转换与放大,通常与强度值之间并不是简单的线性关系,生产厂家通常不公开接收功率与强度值之间具体的转换公式。另一方面,对于不同的扫描仪系统,其接收机的光电处理系统原理是不一样的,强度值可能代表接收回波的能量、功率或者峰值振幅^[1]。但是可以肯定的是,强度值与接收功率之间存在一定的函数关系:

$$I = f(P_r), P_{\min} \leq P_r \leq P_t \quad (9)$$

式中 P_{\min} 为接收机所能探测到的最小接收功率, P_t 为发射功率。根据 Weierstrass 定理:闭区间上的连续函数可用多项式次数一致逼近。原始强度值经过了系统的量化取整处理,此外,受接收机探测灵敏度的影响,接收功率 P_r 也是离散的, $f(P_r)$ 并不是严格的连续函数,但在一定程度上仍可近似看成连续函数,因此采用多项式模型来拟合接收功率与强度值之间的关系:

$$I + \nu = \sum_{i=0}^n K_i (P_r)^i \quad (10)$$

式中 I 为仪器原始记录激光强度值, ν 为强度值残差, $K_i (i=0,1,2,\dots,n)$ 为多项式系数, n 为多项式次数。对于不同的扫描仪, n 取值不同。当 $n=1$ 时,接收机对接收功率线性放大。在(10)式中,等式右边部分当作理论强度值(真值),等式左边的原始记录激光强度值 I 当作观测值, ν 为观测残差,由仪器噪声和扫描环境噪声引起。

生产厂家通常不公开扫描仪的系统参数,且实际系统参数与厂家提供的参数之间也会存在一定偏差,此外,目标反射率也是未知的,由(6)式可知,无法计算接收功率,因此构造新变量:

$$P_g = \frac{\cos \theta}{R^2} \quad (11)$$

变量 P_g 由决定扫描几何形状的入射角及测距值的函数构成。对(10)式进行变换,用 P_g 代替接收功率,可得:

$$I + \nu = \sum_{i=0}^n K_i (P_g)^i \quad (12)$$

通过变量 P_g 的构造,实现了目标反射率与扫描几何因素的分离,将目标反射率内置到模型参数中,因此,不同目标由于反射率的不同而具有不同的模型参数。选取某同质区域,对每一点建立误差方程:

$$\nu = [1 \ P_g \ P_g^2 \ \dots \ P_g^n] [K_0 \ K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]^T - I \quad (13)$$

通过最小二乘平差,可求得模型系数 $[K_0 \ K_1 \ K_2 \ \dots \ K_n]^T$ 。

综合(11)式和(12)式可知,同一目标由于距离或者入射角的不同,强度会不同。为使强度值具有可比性,消除同物异谱、异物同谱现象,同时恢复强度值的物理意义,需对强度值进行改正,消除测距值及入射角的影响。定义标准测距值 R_s , 标准入射角 θ_s , 可得:

$$P_s = \frac{\cos \theta_s}{R_s^2} \quad (14)$$

式中 R_s 可在扫描范围内任意选取, θ_s 在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内也可任意选取。为了计算简单,通常可根据整个扫描数据,选取距离与入射角的均值。

根据(12)式可得:

$$I_s + \nu_s = \sum_{i=0}^n K_i P_s^i, \quad (15)$$

式中 I_s 为在标准测距值及标准入射角下的强度观测值, ν_s 为残差。如图 4 所示, 对于各扫描点, 其扫描时的测距值及入射角各不相同, 假设每一点都存在一个虚拟的扫描位置, 如图 4 中虚线部分, 使得每点都在标准入射角及标准测距值下进行扫描, 因此 I_s 也可以看成在标准入射角及标准测距值条件下的虚拟观测值。由于每点的入射角和测距值都相同, 即在相同的几何形状下进行扫描, 因此得到的强度 I_s 仅受目标反射率的影响。理论上讲, 对于同质区域, 在标准入射角及标准测距值下得到的激光强度值应相等, 但是由于环境噪声以及扫描仪系统噪声的影响, 导致残差 ν_s 的产生。可认为, 在虚拟扫描环境下的环境噪声、系统噪声与真实扫描环境下是相等的, 即:

$$\nu_s = \nu. \quad (16)$$

综合(12)式、(15)式、(16)式可得:

$$I_s = I + \sum_{i=1}^n K_i (P_s^i - P^i). \quad (17)$$

由于 I_s 与测距值及入射角都无关, 仅与目标反射率相关, 因此 I_s 为改正后的强度值。

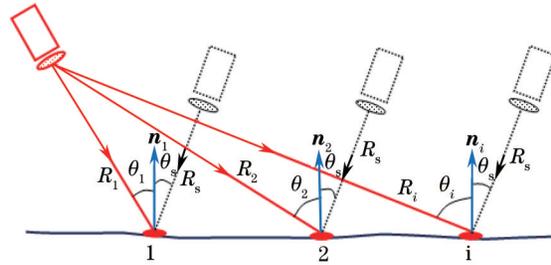


图 4 实际扫描情形(红色实线)与在标准入射角及标准测距值下的虚拟扫描位置(黑色虚线)

Fig.4 Real scanning situation (red solid lines) and virtual scanner positions (black dotted lines) under the circumstance of standard range and incidence angle

4 实验验证分析

实验采用 FARO Focus3D 120 地面三维扫描仪, 表 1 列出了扫描仪的几项主要参数, 其提供的扫描数据由每个点的三维坐标及强度值 (x, y, z, I) 组成, 其中强度值量化等级为 11 bit, 强度值范围为 0~2048。

表 1 FARO Focus3D 120 主要参数

Table 1 Main parameters of FARO Focus3D 120

Emitted Power	20 mW	Beam divergence	0.009°
Wavelength	905 nm	Maximum range	120 m
Field of view	360°×305°	Beam diameter	3.8 mm, circle

强度值改正的一个重要参数是多项式次数 n , 不同的扫描仪 n 值选取不同。对某一 FARO Focus3D 120 扫描数据, 选取不同次数的多项式模型, 计算其拟合中误差和在 Matlab 软件中的运行时间, 结果如图 5 所示。由图 5 可知, 随着多项式次数 n 的增加, 拟合中误差减少, 但是运行时间不断增加。在 $n=3$ 时, 拟合中误差趋于稳定, 为了兼顾计算时间与拟合效率, 对 FARO Focus3D 120 扫描仪, 取 $n=3$ 。

为了对强度值改正方法进行验证, 选取某一墙面作为实验对象, 此墙面表面由相间的白色石灰墙面与紫色石灰墙面组成, 墙面的右下方有小块红色瓷砖墙面。利用 FARO Focus3D 120 扫描仪对其进行扫描, 设置扫描分辨率为 1/4, 扫描质量为 4 倍, 扫描范围为 360°×305°, 在厂家提供的 FARO SCENE 软件里面经过初步去噪、配准等处理后, 在平面视图中人工选取墙面区域, 导出 .xyz 格式, 得到每个点的三维坐标 (x, y, z) 以及强度 I , 共计获得墙面点云 460081 个。图 6 为在 FARO SCENE 软件里面生成的墙面原始强度图像。如图 6 所示, 从三部分墙面中分别选取部分同名区域 A~F, 根据(13)式计算三类表面的模型参数, 如表 2 所示。

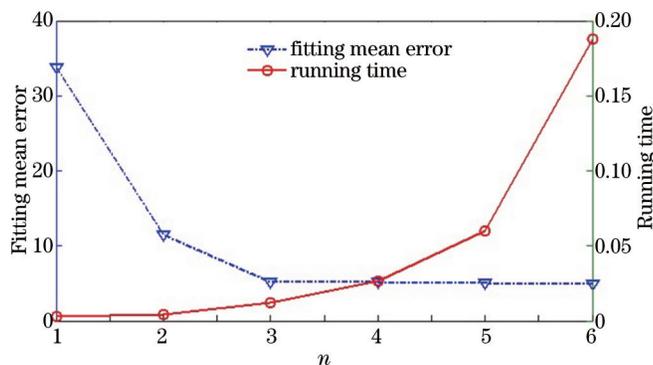


图5 拟合中误差和运行时间随多项式次数与的变化关系

Fig.5 Fitting error and running time changes with the degree of polynomial

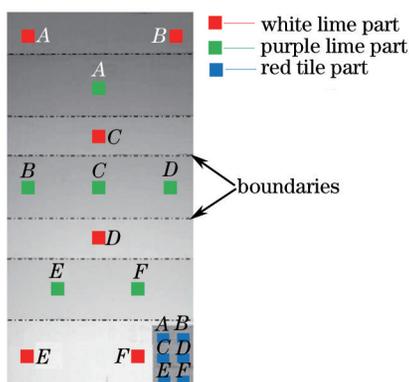


图6 原始强度图像及选取的部分同质区域

Fig.6 Original intensity image and the selected homogeneous regions

表2 三类墙面的多项式系数

Table 2 Polynomial parameters of the three walls

	$K_0 / 10^8$	$K_1 / 10^6$	$K_2 / 10^5$	$K_3 / 10^3$
White lime wall	1.43	-6.58	1.03	1.27
Purple lime wall	2.27	-8.52	1.14	1.22
Red tile wall	14.81	-84.34	15.93	-8.39

选取标准测距值 $R_s=10$ m, 标准入射角 $\theta_s=0^\circ$, 利用计算得到的模型参数, 根据(17)式计算同质区域 A~F 改正强度值, 结果如图 7 所示。

标准差(STD)作为一个重要的统计指标, 可以反映数据集的离散程度。同质区域强度值标准差越小, 表明强度值越集中, 受到其他因素的影响较小; 反之表明强度值越分散, 受到其他因素的影响较大。表 3 列出了选取的同名区域的原始强度值及改正后强度值的平均值和标准差及各区域 R_s , $\cos \theta$ 和 P_s 的分布情况(最小值用 MIN 表示, 最大值用 MAX 表示)。

由图 7 和表 3 可知, 对于白色石灰墙面与紫色石灰墙面, 在同一墙面的小区域内, 由于反射率相同, 测距值与入射角相差较小, 因此原始强度值差异相对较小。而在同一墙面的不同部分, 反射率相同, 但是测距值与入射角相差较大, 因此原始强度值差异较大。对于红色瓷砖墙面, 由于整体面积较小, 测距值与入射角变化较小, 从图 7(c)中可以看出, 每一部分强度值及强度值分布相近。从图 7 与表 3 中还可得到, 改正前, 相同墙面不同部分强度值差异较大, 而且不同墙面强度值存在较大的重叠区间。强度值改正之后, 同一墙面的强度值更为集中, 不同墙面强度值不同。对三种类型墙面, 选择的同质区域原始强度值分别分布在 [1428, 1869], [1483, 1806], [1454, 1762] 区间上, 存在较大的重叠区间。改正之后, 大部分白色石灰墙面强度值分布在 [1760, 1800] 区间内, 而其他两种墙面的强度值大部分分布在 [1720, 1750] 和 [550, 650]。改正之后, 三种墙面之间基本上不存在重叠。

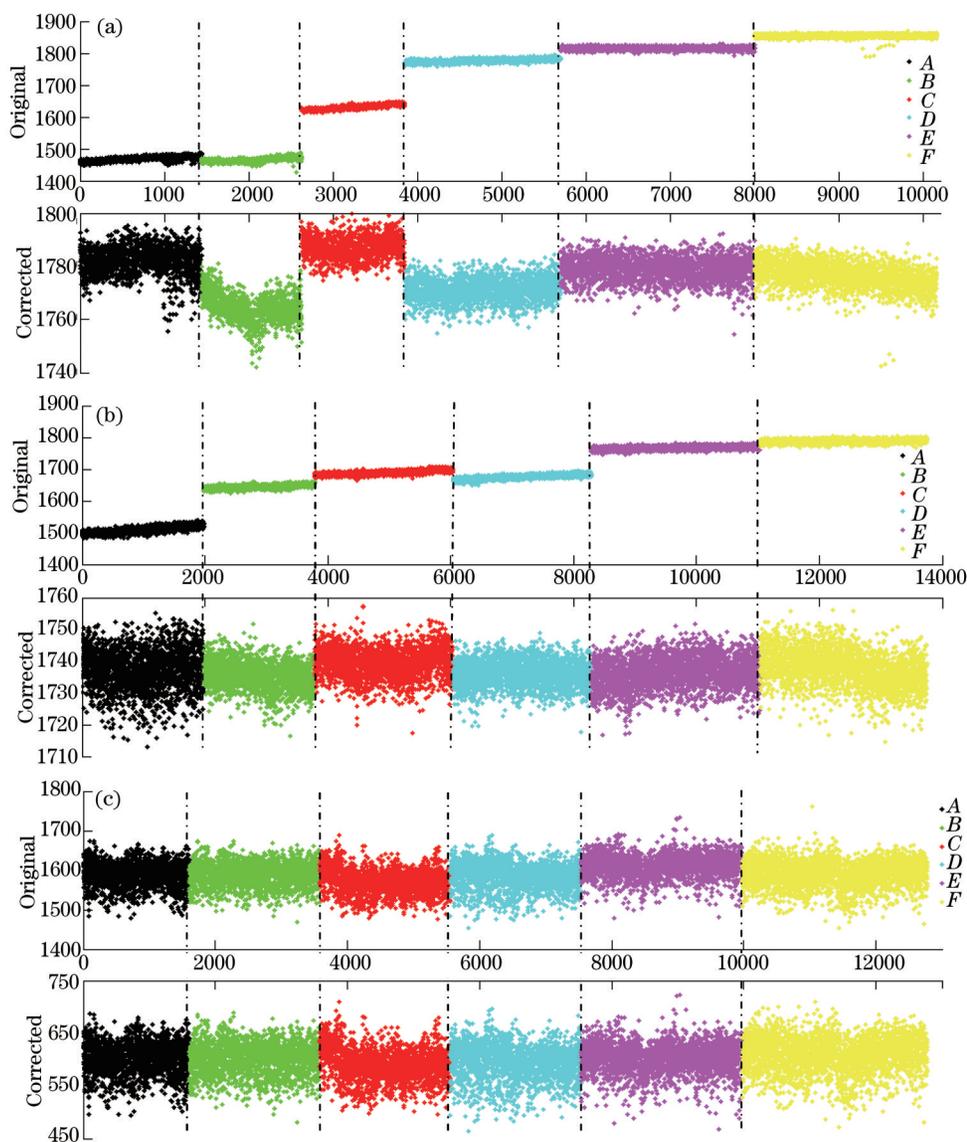


图7 选取同名区域的原始强度值及改正后强度值。(a) 白色石灰墙面; (b) 紫色石灰墙面; (c) 红色瓷砖墙面
 Fig.7 Original and corrected intensities of the selected homogeneous regions. (a) White lime wall; (b) purple lime wall;
 (c) red tile wall

表3 原始强度值和改正后强度值的平均值与标准差及 R , $\cos \theta$ 和 P_g 的分布情况

Table 3 Mean and standard deviation of the original and corrected intensities, and distribution of R , $\cos \theta$ and P_g

		A	B	C	D	E	F	Total
mean	original	1469	1465	1631	1777	1815	1854	1704
	corrected	1787	1770	1792	1776	1784	1782	1782
STD	original	7.16	7.09	7.21	5.53	4.43	5.04	154.09
	corrected	5.29	5.62	4.14	4.35	4.36	5.52 ↑	8.10
White lime wall	R/m							
	MIN	14.06	13.72	11.01	8.55	7.47	6.70	6.70
	MAX	14.76	14.33	11.36	8.78	7.63	6.77	14.76
$\cos \theta$	MIN	0.45	0.46	0.57	0.74	0.85	0.96	0.45
	MAX	0.47	0.48	0.59	0.76	0.87	0.97	0.97
$P_g/(10^{-3} m^{-2})$	MIN	2.07	2.22	4.43	9.61	14.60	21.05	2.07
	MAX	2.39	2.53	4.86	10.41	15.58	21.68	21.68

			A	B	C	D	E	F	Total
Purple lime wall	Mean	original	1510	1645	1689	1676	1767	1788	1690
		corrected	1739	1737	1741	1738	1738	1739	1739
	STD	original	10.32	6.07	6.75	7.00	5.55	5.17	90.09
		corrected	6.40	4.30	4.51	4.07	4.76	5.58 ↑	5.17
	R /m	MIN	12.31	10.11	9.51	9.63	7.79	7.45	7.45
		MAX	12.91	10.51	9.84	10.03	8.02	7.63	12.91
	cos θ	MIN	0.50	0.62	0.66	0.65	0.81	0.85	0.50
		MAX	0.53	0.64	0.69	0.68	0.84	0.87	0.87
	P _g /(10 ⁻³ m ⁻²)	MIN	3.02	5.62	6.86	6.47	12.66	14.68	3.02
		MAX	3.48	6.31	7.60	7.29	13.83	15.75	15.75
Red tile wall	mean	original	1589	1590	1571	1584	1612	1592	1591
		corrected	587	587	575	578	588	595	586
	STD	original	30.76	29.46	30.71	33.13	27.46	32.96	33.26
		corrected	30.67	29.44	30.85 ↑	33.08	27.82 ↑	33.01 ↑	31.62
	R /m	MIN	6.95	7.21	6.75	7.01	6.61	6.87	6.61
		MAX	7.04	7.34	6.83	7.13	6.67	6.97	7.34
	cos θ	MIN	0.92	0.89	0.95	0.91	0.97	0.93	0.89
		MAX	0.93	0.95	0.96	0.93	0.98	0.95	0.98
	P _g /(10 ⁻³ m ⁻²)	MIN	18.60	16.43	20.33	17.95	21.85	19.20	16.43
		MAX	19.32	17.36	21.06	18.82	22.42	20.05	22.42

由表 3 可得出以下结论：

1) 对选取的白色石灰墙面同质区域,改正前,小区域内的标准差相对较小,而整体标准差为 154.09,说明原始强度值偏差较大。对于紫色石灰墙面,也可以得出相同的结论。对于红色瓷砖墙面,由于整体面积较小,导致每一部分的单个标准差与整体标准差差别不大。

2) 改正后大部分同质区域的标准差都减少,只有小部分标准差有些许升高(表中用蓝色箭头标出)。改正之后,白色石灰墙面的整体标准差由 154.09 减少到 8.10,紫色石灰墙面的标准差由 90.09 减少到 5.17,说明此改正方法能有效地去除由测距值及入射角引起的强度偏差。对于红色瓷砖墙面,单个及整体的标准差在改正前后变化较小。

利用改正之后的强度值对整体墙面点云进行分类,分类结果如图 8 所示。总体来说,分类的结果较好。但由于计算误差及墙面自身等影响,部分点被错误分类导致这部分误差较大,如图 8 中黑色椭圆部分所示。

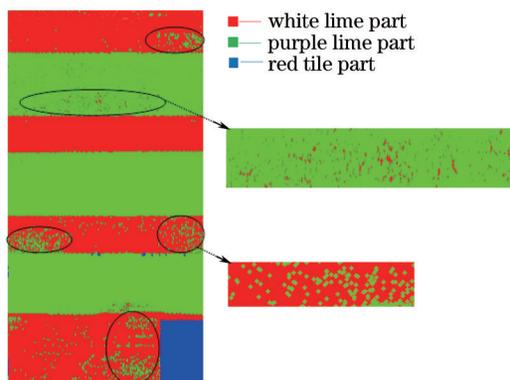


图 8 改正后强度值的分类结果
Fig.8 Classification results by the corrected intensity values

4 结 论

将理论推导与数据拟合相结合提出了一种新的强度值改正方法。不同于一般的数据拟合模型—缺乏理论基础,直接通过分析扫描数据,用各种模型近似建立强度值与其影响因素之间的关系,且建立的模型较为复杂,通用性较差。本文模型立足于扫描仪的辐射机制,并根据 Weierstrass 定理建立的多项式模型通用性强,不同的扫描仪可根据实际情况选取不同次数的多项式模型,因此适用于各种扫描仪的强度值改正。相比于理论模型,此模型考虑了实际的扫描环境噪声与系统噪声的影响,更符合实际扫描情况。实验结果表明该方法能有效地去除测距值及入射角的影响,精确地对强度值进行改正。

参 考 文 献

- 1 Pfeifer N, Höfle B, Briese C, *et al.*. Analysis of the backscattered energy in terrestrial laser scanning data[J]. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2008, 37: 1045–1052.
- 2 Höfle B, Pfeifer N. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2007, 62(6): 415–433.
- 3 Pfeifer N, Dorninger 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 Oh D. Radiometric correction of mobile laser scanning intensity data[J]. *International Institute for Geo-information Science and Earth Observation, Enchede Netherlands Master of Science thesis in Geo-information Science and Earth Observation*, 2010.
- 5 Yan W Y, Shaker A, Habib A, *et al.*. Improving classification accuracy of airborne LiDAR intensity data by geometric calibration and radiometric correction[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2012, 67: 35–44.
- 6 Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3097–3104.
- 7 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 and Remote Sensing*, 2013, 75: 40–47.
- 8 Jutzi B, Gross H. Normalization of LiDAR intensity data based on range and surface incidence angle[J]. *Int Arch Photogramm Remote Sens Spat Inf Sci*, 2009, 38: 213–218.
- 9 Errington A F C, Daku B L F, Prugger A F. A model based approach to intensity normalization for terrestrial laser scanners[C]. *SPIE*, 2011: 828605.
- 10 Cheng X J, Tan K, Lou Q Y. Relations of the laser intensity value, the laser ranging value and the laser incident angle[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2013, 239: 198–201.
- 11 Soudarissanane S, Lindenbergh R, Menenti M, *et al.*. Scanning geometry: Influencing factor on the quality of terrestrial laser scanning points[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, 66(4): 389–399.
- 12 Soudarissanane S, Van Ree J, Bucksch A, *et al.*. Error budget of terrestrial laser scanning: Influence of the incidence angle on the scan quality[J]. *Proc in the 3D-NordOst*, 2007: 1–8.
- 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 Kukko A, Kaasalainen S, Litkey P. Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data[J]. *Appl Opt*, 2008, 47(7): 986–992.
- 15 Tan Kai, Cheng Xiaojun. Study on the accuracy of point cloud classification based on the normalized laser intensity[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.
- 16 Liu Jingnan, Zhang Xiaohong. Classification of laser scanning altimetry data using laser intensity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(3): 189–193.
刘经南, 张小红. 利用激光强度信息分类激光扫描测高数据[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2005, 30(3): 189–193.
- 17 Huang Lei, Lu Xiushan, Liang Yong. Building façade extraction and classification using laser scanning intensity[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 195–198.
黄 磊, 卢秀山, 梁 勇. 基于激光扫描回光强度的建筑物立面信息提取与分类[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2009, 34(2): 195–198.
- 18 Jelalian A V. *Laser Radar Systems*[M]. Boston: Artech House, 1992.
- 19 Andrews L. A template for the nearest neighbor problem[J]. *C/C++ Users Journal*, 2001, 19(11): 40–49.
- 20 Arya S, Mount D M, Netanyahu N S, *et al.*. An optimal algorithm for approximate nearest neighbor searching in fixed dimensions[J]. *JACM*, 1998, 45(6): 891–923.