

多站地面三维激光扫描强度数据纠正与归一化

李泉, 程效军, 田芮, 杨泽鑫

同济大学测绘与地理信息学院, 上海 200092

摘要 针对地面三维激光扫描强度纠正局限于单站点云强度纠正的问题, 提出基于高斯混合模型的直方图匹配方法, 对多站点云强度进行纠正。该方法通过拟合距离-强度模型与入射角-强度模型, 对单站点云强度值进行纠正。利用高斯混合模型拟合纠正后的单站点云强度直方图, 并对直方图进行分割。通过子直方图匹配对多站点云强度进行归一化。实验结果表明, 本文提出的方法不仅可以有效纠正单站点云强度值的差异, 也可以改善多站点云强度值的差异。

关键词 遥感; 地面三维激光扫描; 强度; 纠正; 高斯混合模型; 归一化

中图分类号 P232 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.122802

Correction and Normalization of Multi-Scan Terrestrial Three-Dimensional Laser Scanning Intensity

Li Quan, Cheng Xiaojun, Tian Rui, Yang Zexin

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

Abstract Current point cloud intensity correction is confined to single scan station. In order to solve this problem, we propose a histogram equalization method for multi-scan intensity based on Gaussian mixture model. Firstly, the range-intensity and incidence angle-intensity correction models are used to correct the intensity for a single scan station. Then Gaussian mixture model is used to fit the histogram of intensity distribution after correction and segment the histogram. Finally, normalization of multi-scan intensity is achieved through sub-histogram matching. The experiment results indicate that the proposed method can not only correct the intensity of a single scan station efficiently, but also improve the inconsistency among different scan stations.

Key words remote sensing; terrestrial three-dimensional laser scanning; intensity; correction; Gaussian mixture model; normalization

OCIS codes 280.3640; 010.3640; 280.1350

1 引言

地面三维激光扫描(TLS)是目前快速、高精度获取三维空间数据的主要手段之一, 被广泛应用于三维重建、文物保护和变形监测等领域。除了获取扫描目标表面三维坐标信息外, 也可获取目标对发射激光光束的激光强度值^[1]。激光强度表征扫描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。众多研究表明, 激光强度作为点云特有的属性信息在地物分类、建筑物健康检测、林业等领域均有着重要的应用价值^[2-4]。但是在扫描过程中, 获取的强度信息易受扫描距离、扫描入射角、扫描仪内部机制和扫描环境等多种因素的影响, 制约了强度信息的广泛应用^[5-6]。因此研究如何消除这些影响因素是应用点云强度信息的首要

收稿日期: 2017-07-03; **收到修改稿日期:** 2017-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)

作者简介: 李泉(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事点云强度纠正与点云分类方面的研究。

E-mail: 329yvonnelee@tongji.edu.cn

导师简介: 程效军(1964—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事三维激光扫描与数字近景摄影测量方面的研究。

E-mail: cxj@tongji.edu.cn

工作。对于地面三维激光扫描仪,由于扫描距离相对较近,如大气等环境因素的影响可以忽略不计,其他因素中扫描距离和入射角对强度的影响最大,因此近年来大量地面激光扫描强度纠正研究主要集中在扫描距离和入射角对强度影响这两方面。Kaasalainen等^[7]详细分析了强度的影响因素,并提出了距离、入射角纠正模型对点云强度进行纠正。谭凯等^[8]针对地面三维激光点云强度,运用多项式模型拟合激光强度值与接收功率之间的关系,对激光强度中的距离和入射角效应进行改正。虽然目前针对地面三维激光扫描强度纠正已经提出了多种纠正模型,且均能达到较理想的纠正效果,但是相关研究均是针对单站点云强度的纠正。而通常为了获取完整场景的数据,地面三维激光扫描仪往往需要架设多站,由于受架设时环境、仪器等因素的影响,多站点云之间的强度往往也存在差异。本文通过分析距离和入射角对激光强度值的影响,建立距离-强度模型和入射角-强度模型,并对单站点云强度值的差异进行纠正。针对多站点云强度值之间的差异,利用基于高斯混合模型的直方图匹配方法进行纠正,并对纠正后强度值进行比较分析。

2 点云强度纠正

点云强度纠正的目的是去除相关因素的影响,使强度值尽可能与扫描目标反射特性相关,从而使同质区域的强度值趋于一致。扫描距离和入射角是影响地面三维激光扫描强度的最主要因素,强度与这两者的关系通常可以表示为

$$I = f_1(\rho) \times f_2(R) \times f_3(\theta), \quad (1)$$

式中 I 为激光强度, $f_1(\rho)$ 为反映扫描目标特性的函数, $f_2(R)$ 为表示扫描距离影响的函数, $f_3(\theta)$ 为表示入射角影响的函数。

由于入射角和距离对激光强度的影响相互独立,因此可以分别建立纠正模型。为了对距离因素进行纠正,令扫描入射角及扫描目标一定,得到距离与强度的关系,拟合 $f_2(R)$ 函数,距离因素纠正公式为

$$I_{CR} = I_{raw} \times f_2(R_s) / f_2(R), \quad (2)$$

式中 I_{CR} 为经过距离纠正的强度值, I_{raw} 为原始强度值, R_s 为标准距离, R 为扫描距离。

为了对入射角因素进行纠正,令扫描距离及扫描目标一定,得到入射角与强度的关系,拟合 $f_3(\theta)$ 函数,纠正公式为

$$I_{CA} = I_{CR} \times f_3(\theta_s) / f_3(\theta), \quad (3)$$

式中 I_{CA} 为经过入射角纠正的强度值, θ_s 为标准入射角, θ 为扫描入射角。

为了得到距离-强度关系的函数,采用 Faro focus^{3D} 三维激光扫描仪控制入射角不变,对同一平面靶标(可将其近似作为标准扩展朗伯面)进行不同距离的分段扫描。对扫描获取的强度值及距离进行拟合,如图 1 所示,从图 1 可以看出,距离与强度关系中存在 4 个不同的变化趋势,在 6~14 m 时,强度与距离近似满足激光雷达方程,而 14 m 之后,强度随着距离增长虽然没有一定的增长或者减小趋势,但出现了明显的震荡趋势。因此将距离强度函数分为 4 部分进行分别拟合,得到分段拟合的距离-强度函数模型为

$$f_2(R) = \begin{cases} a_1 R^{b_1} + d_1, & 1 \leq R \leq 2.5 \\ a_2 R^3 + b_2 R^2 + c_2 R + d_2, & 2.5 < R \leq 5.5 \\ a_3 R^3 + b_3 R^2 + c_3 R + d_3, & 5.5 < R \leq 14, \\ d_4 + \sum_{i=1}^4 \{m_i \times \cos(2^{i-1} \times R \times \omega) + [n_i \times \sin(2^{i-1} \times R \times \omega)]\}, & R > 14 \end{cases} \quad (4)$$

式中 ω 为傅里叶级数展开中信号的基频。

为了得到入射角-强度关系的函数,同样利用 Faro focus^{3D} 三维激光扫描仪控制距离不变,对同一靶标进行不同角度的旋转扫描,将靶标固定于可以定量旋转角度的平板上,每次变化 5° 进行扫描。对扫描获取的强度值和入射角进行拟合,如图 2 所示,从图 2 可以看出,入射角的余弦与强度数据呈线性关系,采用多项式函数进行拟合,得到拟合的入射角-强度模型为

$$f_3(\theta) = a \cos \theta^3 + b \cos \theta^2 + c \cos \theta + d. \quad (5)$$

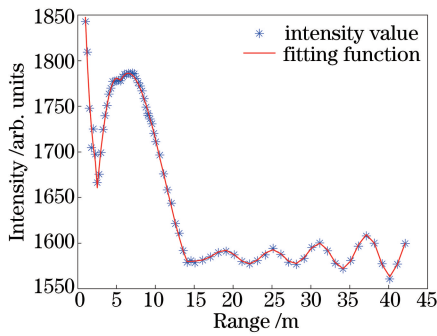


图 1 距离-强度关系模型

Fig. 1 Model of range-intensity relation

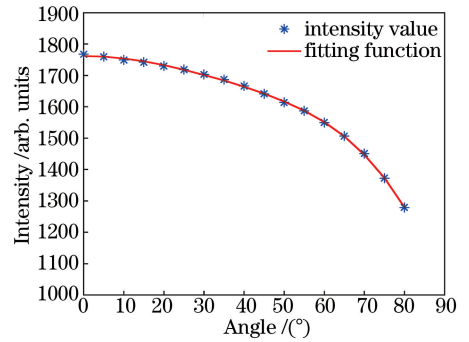


图 2 角度-强度关系模型

Fig. 2 Model of angle-intensity relation

3 多站点云强度归一化

利用上述点云强度纠正模型分别对多站点云数据的强度进行纠正,虽然各站独立的纠正效果较好,但多站相同地物间的强度仍然存在不一致。这主要由于强度纠正模型可以对距离及入射角效应进行有效纠正,而其他因素如仪器内部因素、外界环境因素,对于强度的影响仍然存在,因此不同站之间的点云强度仍然有偏差。为了纠正各站点云强度之间的差异,本文对 Yan 等^[9]提出的基于高斯混合模型的直方图匹配的多条带状机载强度归一化方法进行改进,得到适用于地面三维激光扫描的点云强度归一化方法。对于不同站的相同地物获取其强度分布直方图,利用高斯混合模型对直方图进行拟合,并求出各个高斯元素的交点。利用所求出的交点,对强度直方图进行分割,通过子直方图匹配进行多站点云强度归一化。

3.1 高斯混合模型

高斯混合模型(GMM)是单一高斯概率密度函数的延伸,GMM 的核心思想是将任意形态(声音、图像、多维变量模型等)用高斯函数累积加权得到。高斯混合模型为

$$p(x) = \sum_{k=1}^K \pi_k p(x|k), \quad (6)$$

式中 K 为混合模型的个数, π_k 为第 k 个高斯的权重, $p(x|k)$ 为第 k 个高斯概率密度,其均值为 μ_k , 方差为 σ_k 。对此概率密度的估计即分别求出各分布的 π_k 、 μ_k 和 σ_k 分量。混合高斯模型参数估计最常用的方法是期望最大(EM)算法,主要分 2 步:1) 假设知道各高斯模型参数(可以定义初值,或者是基于上一步迭代的结果),去估计每个高斯模型的权值;2) 基于估计的权值,重新确定高斯模型参数。重复上述 2 个步骤直至算法收敛。由于 EM 算法对初值较敏感,如果初值选取不理想,往往会收敛到局部极值,而不能保证全局最优。Yan 等^[9]将直方图平均等分为 3 部分,初值分别为 3 部分的中心点,由于机载三维激光扫描仪获取的多种地物强度数据分布相对平均,因此能得到有效的计算结果。但对于本文获取的地面三维激光扫描强度,如图 3 为获取的某一站点云强度分布直方图,从中可以看出,其分布相对不均匀,因此不能对强度值进行简单的均分选定初值。

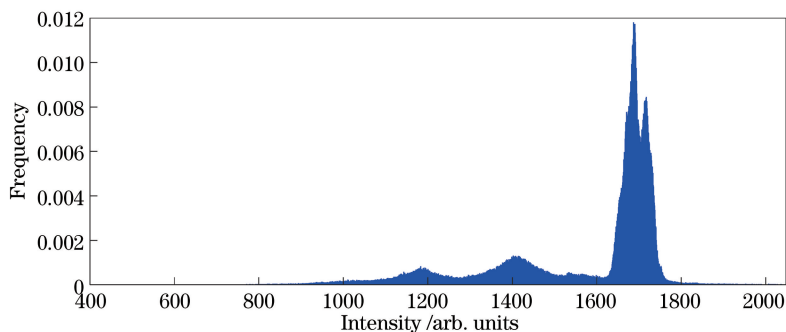


图 3 强度分布直方图

Fig. 3 Histogram of intensity distribution

因此,利用 k -means 算法先给出强度数据的粗糙分组,然后根据分组数据给出参数的粗劣估计值作为 EM 算法的初始值,之后再利用 EM 算法估计高斯混合模型的模型参数。通过 k -means 对原始强度进行聚类后可以较好地避免 EM 算法估计收敛到局部最优值。如图 4 所示为通过估计得到的图 3 中强度分布直方图的拟合高斯混合模型。

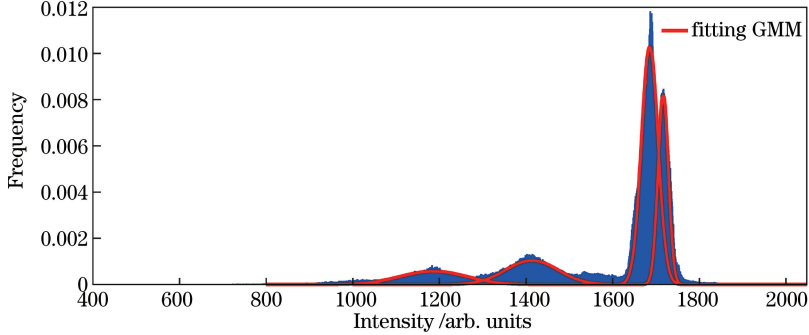


图 4 高斯混合模型拟合结果

Fig. 4 GMM fitting results

3.2 多站点云强度归一化

利用 GMM 拟合强度直方图中每个高斯元素之后,基于每个相邻高斯分布的交点对整个直方图进行分割。相邻高斯分布的交点强度值推导公式为

$$\pi_k p(I|k) = \pi_{k+1} p(I|k+1), \quad (7)$$

式中 I 为强度值, $p(I|k)$ 为第 k 个高斯元素的概率密度函数,

$$p(I|k) = G(I, \mu_k, \sigma_k^2). \quad (8)$$

利用概率分布公式,可将(7)式改为

$$\begin{cases} aI^2 + bI + c = 0 \\ a = \sigma_{k+1}^2 - \sigma_k^2 \\ b = 2(\mu_{k+1}\sigma_k^2 - \mu_k\sigma_{k+1}^2) \\ c = \sigma_{k+1}^2\mu_k^2 - \sigma_k^2\mu_{k+1}^2 - 2\sigma_k^2\sigma_{k+1}^2 \ln(\mu_k\sigma_{k+1}/\mu_{k+1}\sigma_k) \end{cases}, \quad (9)$$

根据(9)式可以分别求得两站点云强度分布直方图的各个高斯分布的交点,对原始直方图进行分割,分割结果如图 5 所示。

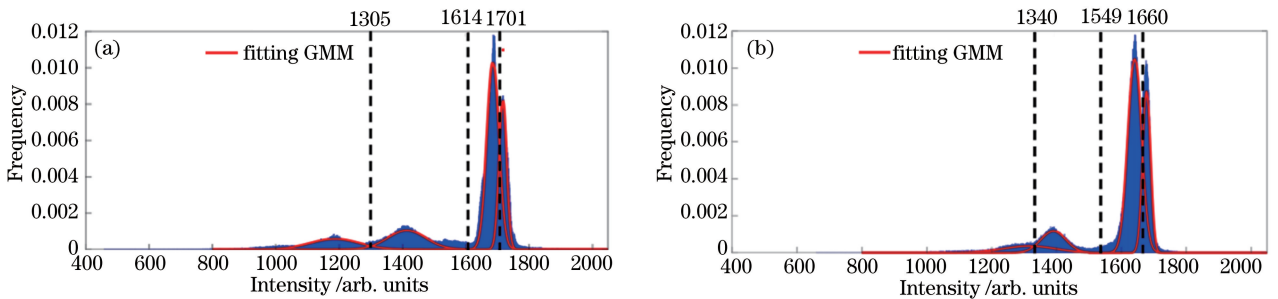


图 5 两站点云强度直方图分割结果。(a)第 1 站结果;(b)第 2 站结果

Fig. 5 Histogram segmentation results of two scan stations. (a) The first scan station; (b) the second scan station

对原有的直方图进行分割求出交点之后,利用数字图像处理中的直方图匹配技术,以第 1 站的强度分布直方图为标准,将第 2 站的强度分布直方图进行分段匹配,使两站点云强度分布趋于一致。从图 6 可以看出,经过直方图匹配后第 2 站的点云强度分布与第 1 站趋于一致。

4 实验与分析

为了验证本文提出的强度纠正与归一化方法,利用 Faro Focus^{3D}扫描仪分别对 2 个建筑物进行多站扫

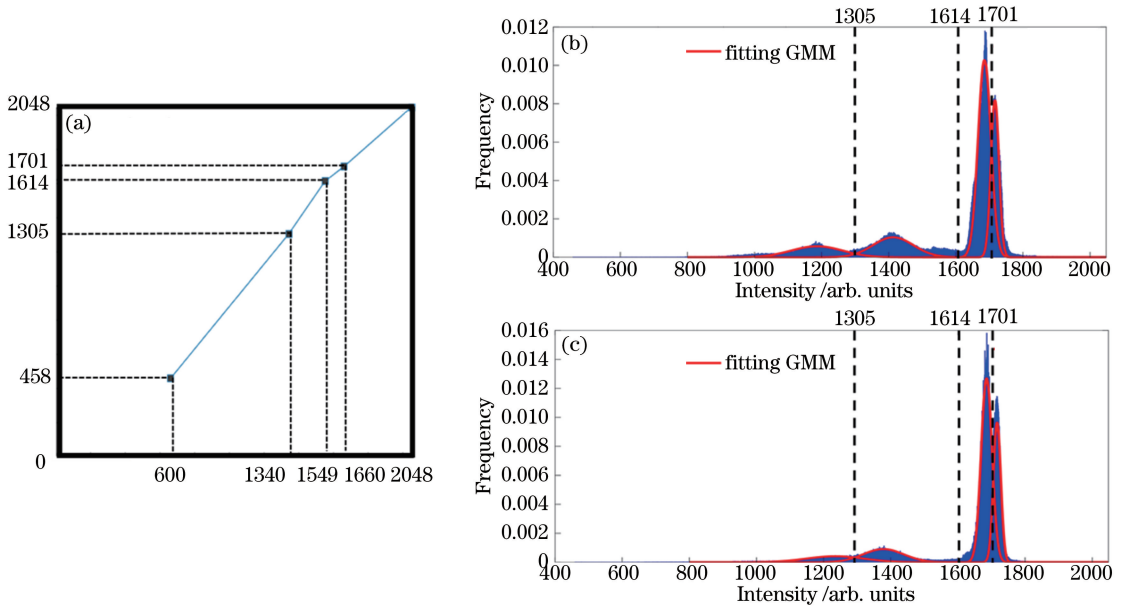


图 6 两站点云强度直方图匹配。(a)直方图匹配数学模型;(b)第 1 站直方图;(c)匹配后第 2 站直方图

Fig. 6 Histogram matching of two scan stations. (a) Mathematical model of histogram matching; (b) histogram of the first scan station; (c) histogram of the second scan station after matching

描。通过对扫描获取的数据进行去噪等预处理操作,分别获取不同站的建筑物点云三维坐标 (X, Y, Z) 以及强度值 I 。如图 7(a)所示为建筑物 A 的实景照片,图 7(b)为扫描建筑物 A 时扫描仪扫描布设站点架设的示意图。

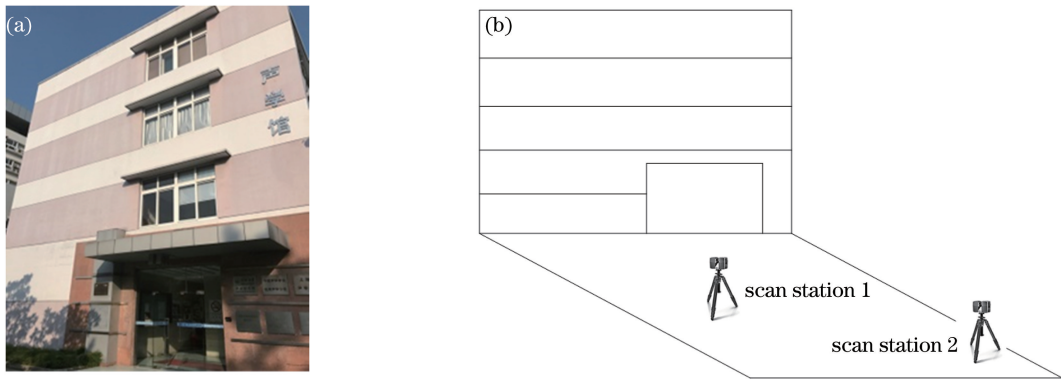


图 7 建筑 A 及扫描布设情况示意图。(a)建筑物 A;(b)扫描仪两站扫描布设情况示意

Fig. 7 Building A and illustration of two scan stations. (a) Building A; (b) illustration of two scan stations

根据距离-强度和入射角-强度纠正模型,分别对两站点云强度数据进行纠正。为了更好地显示强度纠正的效果,将三维点云数据投影至二维影像,并利用伪彩色图像显示纠正前后强度值的变化。图 8 所示为建筑物 A 第 1 站点云强度纠正结果图像及其强度分布直方图。

对比纠正前后建筑物 A 强度图像,可以看到纠正前点云强度受到距离以及入射角的影响,同质区域在不同距离及入射角下获取的强度差异较大;纠正后,同质区域在不同距离及入射角下获取的强度基本相同。由图 8 纠正前后点云强度值分布图可知,纠正前点云强度值分布相对散乱,纠正后强度值分布区域规则,呈高斯分布。

同样利用强度纠正模型对建筑物 A 第 2 站点云强度进行纠正,为了更好地对比两站纠正前后的点云强度,以第 1 站为标准站,将第 2 站点云配准至第 1 站,如图 9 所示为建筑物 A 第 2 站点云强度纠正结果图像及其强度分布直方图。

为进一步分析纠正效果,在两站纠正前后的点云数据中分别选取 3 块同质区域,选取区域如图 10 所示。对选取区域的点云强度值进行提取,并分别比较 3 块区域的强度值的均值 μ 和标准差 σ 。由于纠正前后同

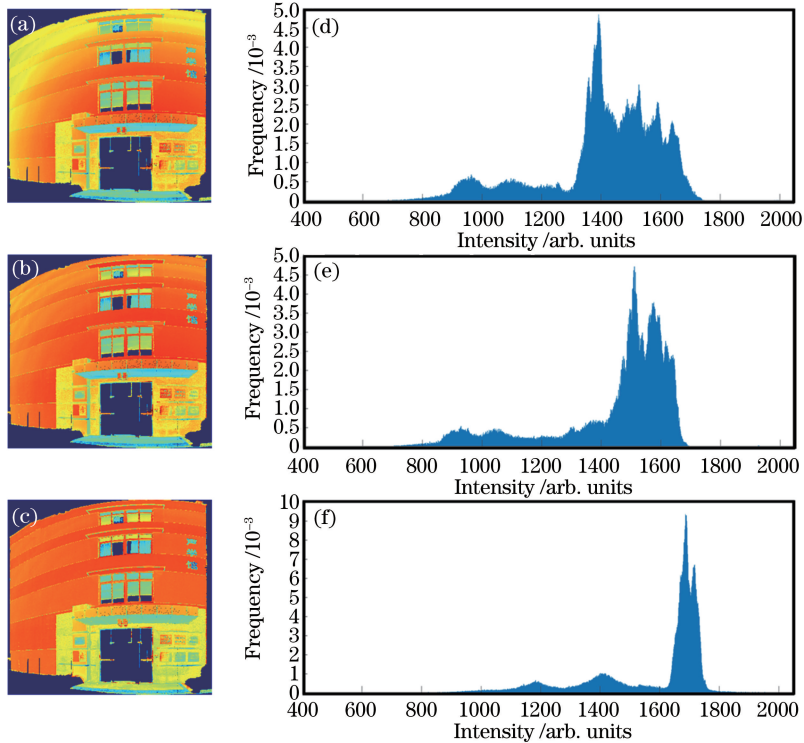


图 8 建筑 A 第 1 站点云强度纠正结果。(a)原始强度伪彩色图;(b)距离纠正后强度伪彩色图;(c)入射角纠正后强度伪彩色图;
(d)原始强度分布直方图;(e)距离纠正后强度分布直方图;(f)入射角纠正后强度伪彩色图

Fig. 8 Intensity correction results of the first scan station of building A. (a) Pseudo color image of original intensity; (b) pseudo color image of intensity after range correction; (c) pseudo color image of intensity after incidence angle correction; (d) histogram of original intensity distribution; (e) histogram of range-corrected intensity distribution; (f) histogram of incidence angle-corrected intensity distribution

质区域强度均值差异较大,为了更好地比较纠正前后 2 组数据离散程度,选用变异系数 η 评价纠正效果,其为原始数据标准差与原始数据平均数的比,即

$$\eta = \sigma / \mu \times 100\% . \quad (10)$$

两站同质区域纠正前后强度值具体分析结果分别见表 1 与表 2。

表 1 第 1 站同质区域纠正前后强度值分析

Table 1 Analysis of intensity values before and after correction within homogenous regions in the first scan station

The first scan station	Mean value μ		Standard deviation σ		Coefficient of variation $\eta / \%$	
	Original	Corrected	Original	Corrected	Original	Corrected
Region 1	1518	1675	66.34	11.79	4.37	0.70
Region 2	1644	1731	15.56	4.61	0.95	0.27
Region 3	1406	1678	24.67	9.10	1.75	0.54

表 2 第 2 站同质区域纠正前后强度值分析

Table 2 Analysis of intensity values before and after correction within homogenous regions in the second scan station

The second scan station	Mean value μ		Standard deviation σ		Coefficient of variation $\eta / \%$	
	Original	Corrected	Original	Corrected	Original	Corrected
Region 1	1325	1627	23.88	11.88	1.80	0.73
Region 2	1411	1675	15.10	7.73	1.07	0.46
Region 3	1384	1643	12.18	8.28	0.88	0.50

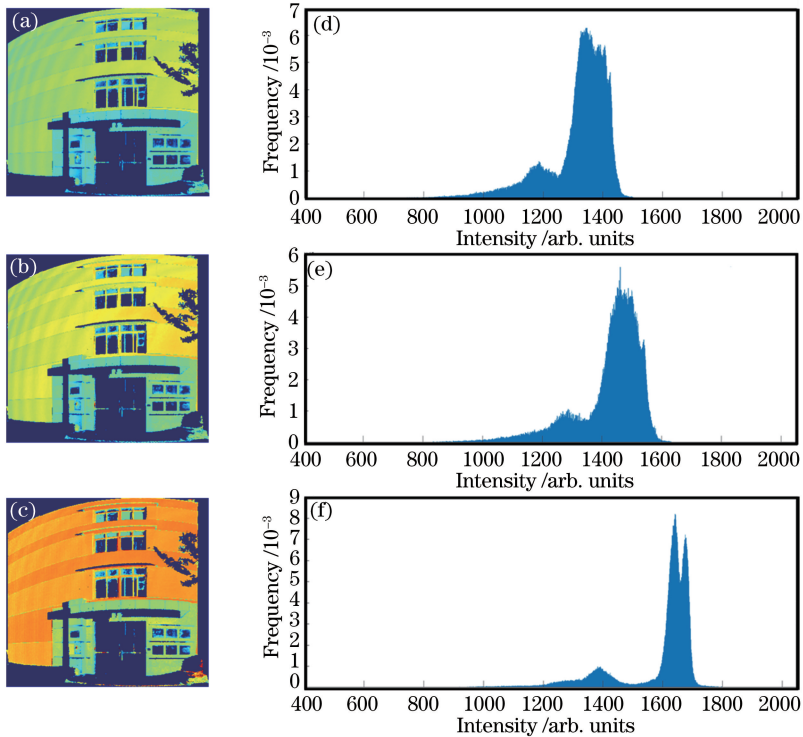


图9 建筑 A 第 2 站点云强度纠正结果。(a)原始强度伪彩色图;(b)距离纠正后强度伪彩色图;

(c)入射角纠正后强度伪彩色图;(d)原始强度分布直方图;(e)距离纠正后强度分布直方图;(f)入射角纠正后强度伪彩色图

Fig. 9 Intensity correction results of the second scan station of building A. (a) Pseudo color image of original intensity;

(b) pseudo color image of intensity after range correction; (c) pseudo color image of intensity after incidence angle

correction; (d) histogram of original intensity distribution; (e) histogram of range-corrected intensity distribution;

(f) histogram of incidence angle-corrected intensity distribution

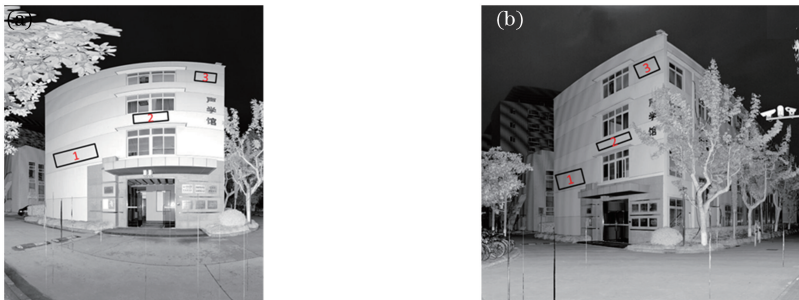


图10 建筑物 A 两站点云数据同质区域选取情况。(a)第 1 站同质区域;(b)第 2 站同质区域

Fig. 10 Selection of homogenous regions in two stations of building A. (a) Homogenous regions in the first scan station;

(b) homogenous regions in the second scan station

由表 1 和表 2 可知,纠正后的同质区域点云强度标准差均有一定降低。变异系数可反映单位均值的离散程度,其值越小说明数据间差异越小。纠正后的点云强度变异系数明显降低,说明纠正后强度值明显趋于一致。

虽然各站的强度均得到了较好的纠正,但是两站之间同质区域的点云强度仍然存在偏差。从表 1 和表 2 中可以发现,两站的 3 个同质区域之间仍然存在一定的偏差,如同质区域 2 的强度均值相差 56。从图 11 也可以看出,两站点云的强度值之间仍存在一定的偏差。

利用多站点云强度归一化方法,以第 1 站为标准站,对第 2 站点云强度进行归一化纠正,纠正后的伪彩色图像如图 12 所示,归一化前后的两站点云强度直方图分布如图 13 所示。

为了定量分析点云归一化的效果,分别对两站 3 个同质区域归一化前后的点云强度均值进行比较。3

个区域归一化前后均值如表 3 所示。由表 3 可以看出,归一化之后两站点云同质区域的强度明显趋于一致。归一化前两站同质区域点云强度差异值最大达到 56,归一化之后差异最大为 16,可以看出强度差异明显缩小。

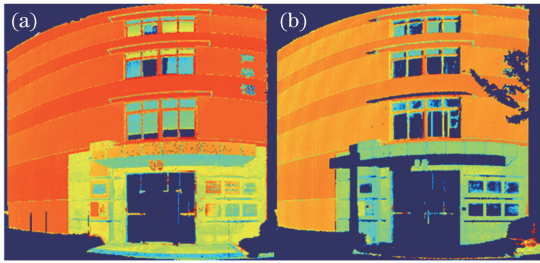


图 11 建筑物 A 强度纠正后两站点云强度伪彩色图。
(a)第 1 站;(b)第 2 站

Fig. 11 Pseudo color images of corrected intensity of two scan stations of building A. (a) The first scan station; (b) the second scan station

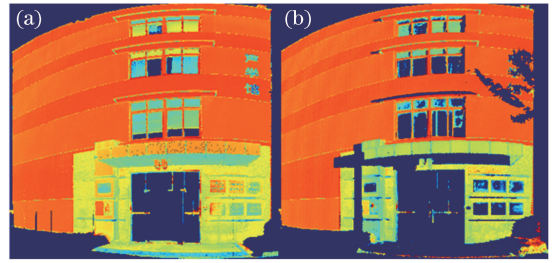


图 12 建筑物 A 强度归一化两站点云强度伪彩色图。
(a)第 1 站;(b)第 2 站

Fig. 12 Pseudo color images of normalized intensity of two scan stations of building A. (a) The first scan station; (b) the second scan station

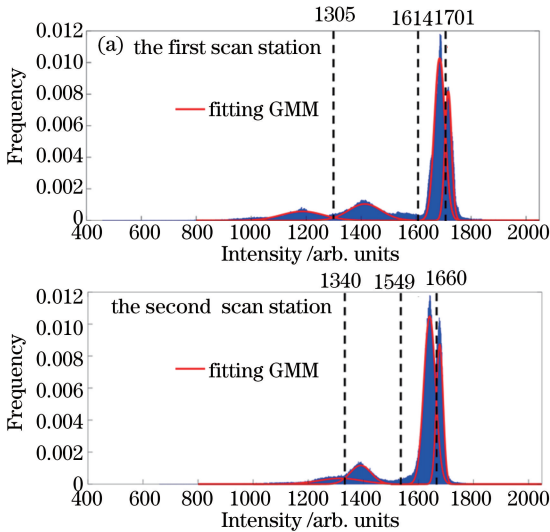


图 13 建筑物 A 强度归一化 2 站点云强度直方图。(a) 归一化前;(b)归一化后

Fig. 13 Histogram of intensity distribution of two scan stations of building A before and after normalization.
(a) Before normalization; (b) after normalization

表 3 归一化前后同质区域强度值比较

Table 3 Comparison of intensity values before and after normalization within homogenous regions in two scan stations

Scan station	Region 1 mean value μ		Region 2 mean value μ		Region 3 mean value μ	
	Before normalization	After normalization	Before normalization	After normalization	Before normalization	After normalization
First	1675	1675	1731	1731	1678	1678
Second	1627	1675	1675	1715	1643	1687
Difference	48	0	56	16	35	9

图 14(a)为建筑物 B 的实景照片,图 14(b)为扫描建筑物 B 时扫描仪扫描布设站点架设的示意图。

同样利用本文提出的方法对建筑物 B 进行强度纠正与归一化,其结果如图 15 所示。可以看出利用该方法不仅可以有效纠正单站点云强度之间的差异,还能有效归一化多站点云强度。

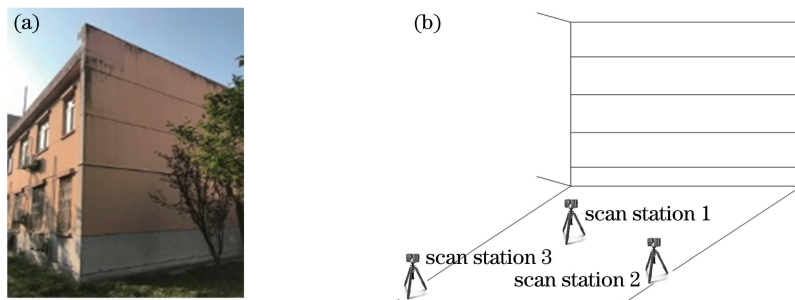


图 14 建筑 B 及扫描布设情况示意图。(a)建筑物 B;(b)扫描仪 3 站扫描布设情况示意

Fig. 14 Building B and illustration of three scan stations. (a) Building B; (b) illustration of three scan stations

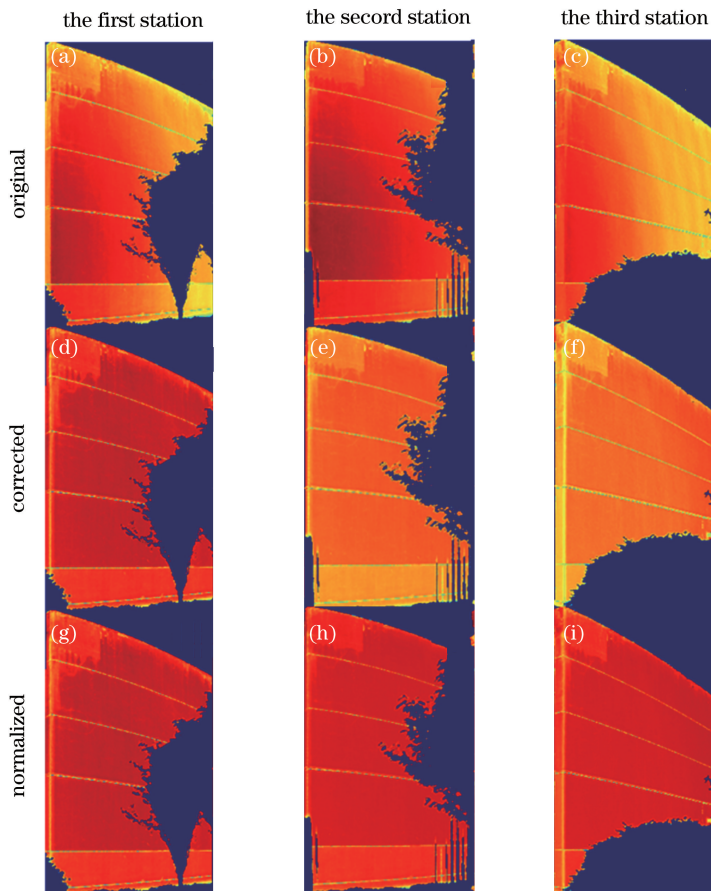


图 15 建筑 B 3 站点云强度纠正与归一化结果。(a)第 1 站原始强度伪彩色图;(b)第 2 站原始强度伪彩色图;(c)第 3 站原始强度伪彩色图;(d)第 1 站纠正后强度伪彩色图;(e)第 2 站纠正后强度伪彩色图;(f)第 3 站纠正后强度伪彩色图;(g)第 1 站归一化后强度伪彩色图(标准站);(h)第 2 站归一化后强度伪彩色图;(i)第 3 站归一化后强度伪彩色图

Fig. 15 Intensity correction and normalization results of three scan stations of building B. (a) Pseudo color image of original intensity of the first station; (b) pseudo color image of original intensity of the second station; (c) pseudo color image of original intensity of the third station; (d) pseudo color image of corrected intensity of the first station; (e) pseudo color image of corrected intensity of the second station; (f) pseudo color image of corrected intensity of the third station; (g) pseudo color image of normalized intensity of the first station (standard); (h) pseudo color image of normalized intensity of the second station; (i) pseudo color image of normalized intensity of the third station

5 结 论

针对目前地面三维激光扫描强度纠正局限于单站点云强度差异纠正的问题,提出了一种基于高斯混合

模型的直方图匹配方法,对多站地面三维激光扫描强度进行纠正。经过实验验证,本文提出的方法可以有效纠正多站点云强度值的差异,纠正后的结果在实际应用中可以为后续应用强度进行点云分类以及特征提取提供数据基础。但是该方法主要针对如建筑物等表面类似标准朗伯面的目标进行纠正,对于其他如金属等带有镜面反射的表面尚不能进行有效纠正,下一步的研究重点是结合目标表面反射特性,实现不同反射特性目标的强度纠正与归一化。

参 考 文 献

- [1] Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3097-3104.
- [2] González-Jorge H, Gonzalez-Aguilera D, Rodriguez-Gonzalvez P, *et al.* Monitoring biological crusts in civil engineering structures using intensity data from terrestrial laser scanners[J]. *Construction and Building Materials*, 2012, 31: 119-128.
- [3] Côté J F, Widlowski J L, Fournier R A, *et al.* The structural and radiative consistency of three-dimensional tree reconstructions from terrestrial lidar[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(5): 1067-1081.
- [4] Kukko A, Kaasalainen S, Litkey P. Effect of incidence angle on laser scanner intensity and surface data[J]. *Applied Optics*, 2008, 47(7): 986-992.
- [5] Fang Wei, Huang Xianfeng, Zhang Fan, *et al.* Mural image rectification based on correction of laser point cloud intensity[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(5): 541-547.
方伟, 黄先锋, 张帆, 等. 依据点云强度校正的壁画纠正[J]. *测绘学报*, 2015, 44(5): 541-547.
- [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] Kaasalainen S, Niittymaki H, Krooks A, *et al.* Effect of target moisture on laser scanner intensity [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010, 48(4): 2128-2136.
- [8] 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.
- [9] Yan W Y, Shaker A. Radiometric correction and normalization of airborne LiDAR intensity data for improving land-cover classification[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(12): 7658-7673.