

基于激光强度的建筑立面点云分类及信息提取

程小龙, 程效军, 郭王, 谢丹

(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仪的点云激光强度值, 提出了一种基于激光雷达方程的数据模型改正方法. 通过将激光强度值进行角度和距离改正, 分析数据模型的改正效果, 并利用改正后的激光强度值对建筑立面点云进行分类及建筑立面信息的特征提取. 实验表明: 改正模型能对点云激光强度值进行有效补偿, 使得同类物体的激光强度值趋于统一. 因此, 利用改正后的点云激光强度值对建筑立面点云进行分类及特征提取, 能够保证分类精度及目标识别效果.

关键词: 激光雷达方程; 激光强度值改正; 数据改正模型; 点云分类; 信息提取

中图分类号: P232

文献标志码: A

Point Cloud Classification and Features Extraction of Building Facades with the Corrected Laser Intensity Value

CHENG Xiaolong, CHENG Xiaojun, GUO Wang, XIE Dan

(College of Surveying and Geo-informatics, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: A correction method for data model based on laser radar equation was presented for the laser intensity of point cloud from 3D laser scanning. The laser intensity value is corrected according to the different angles and distances, and the correction effect of the data model is also analyzed. With the corrected laser intensity value, the point cloud of building facades could be classified and the features could be extracted. The experiments results indicated that the correction model could effectively compensate laser intensity value, thus making the laser intensity value of congeneric objects trend to be unified. Therefore, the classification of point cloud and the feature extraction of building facades with the corrected laser intensity value can guarantee the classification precision and target recognition effect.

Key words: laser radar equation; laser intensity correction; data correction model; point cloud classification; information extraction

大多数的机载和地面扫描系统在进行扫描时都会记录回波信号强度, 许多研究表明激光点云的强度值在航带校正、林业、海岸线提取及地面点云分类等领域有着重要的潜在价值. 人们通过分析激光强度值的影响因素, 利用不同的改正方法对点云强度进行校正, 并对加入校正后点云强度的地形信息进行点云的分类及特征提取, 取得了一定的研究成果. Coren 等^[1]利用改正后的激光强度值产生伪反射图像, 并直接利用该信息将地面点云分为 4 类(光秃的地面、草地、稀疏和茂密的植被); Höfle 等^[2]基于模型驱动方法对点云的激光强度值进行改正, 所提出的改正方法, 对利用激光强度进行表面的分类和分时相分析具有巨大的应用潜力; 黄磊等^[3]针对车载三维测量系统中的激光扫描仪回光强度值, 将回光强度值进行角度、距离统一改正, 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, 实现基于强度值的地物信息提取和分类. 程效军等^[4]基于激光雷达方程分别建立线性、对数、三次多项式物理改正模型对点云强度的各种因素进行改正, 利用改正后的强度值进行点云分类, 并对三种模型改正效果、分类精度、运算效率等进行比较分析.

本文通过分析距离、角度、大气衰减等因素对激光强度值的影响, 对距离和角度引起的强度差异进行统一改正和补偿, 区分出不同物体之间的强度值分布, 并利用改正后的点云激光强度进行建筑立面点云的分类及建筑立面信息的提取.

收稿日期: 2014-06-28

基金项目: 现代工程测量国家测绘地理信息局重点实验室开放课题资助(TJES1303)

第一作者: 程小龙(1988—), 男, 博士生, 主要研究方向为三维激光扫描技术及点云数据处理等. E-mail: 494322312@qq.com

程效军(1964—), 男, 工学博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数字城市与三维建模等. E-mail: cxj@tongji.edu.cn

1 基于数据模型的点云强度改正

理论上同类物体的回波强度应该是一致的,但是由于受到探测器到扫描物体的距离、激光入射角、大气衰减、扫描物体表面的几何特性等因素的影响^[5-7],强度值存在较大偏差,获取的点云强度信息必须进行改正才能利用其进行点云的目标分类及特征提取.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.一般的激光雷达方程为

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

式中: P_r 为激光接收功率; P_t 为激光发射功率; R 为扫描仪到目标的距离; D_r 为接收孔径; 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; ρ 为目标反射率; α 为激光入射角.本文利用平面靶标作为统一的实验对象进行点云的强度值改正,此时平面靶标可以认为是均匀朗伯散射体(反射率高及表面平整),又因激光强度值与在特定的时间间隔内光子撞击探测器的次数(即接收功率 P_r)成正比($I \propto P_r$),因此可从激光雷达方程出发,建立激光强度值 I 与这些影响因素之间的模型关系,即:

$$I \propto \frac{P_t \rho \cos \alpha}{4R^2} \eta_{\text{atm}} \eta_{\text{sys}} \quad (2)$$

因实验距离较短, η_{sys} 可忽略不计;对于大气衰减对激光强度值的影响,以往通常简单利用激光回波值乘以2倍距离的平方来改正激光强度的传播损耗,很显然对于小的激光测距值,激光强度的传播损耗也很小,此时只考虑空气质量(能见度)对激光强度的影响^[8].由于实验数据为同一时段,故大气衰减对激光强度值的影响为一固定值;平面靶标平整,故可以忽略扫描物体表面的几何特性(粗糙度等)的影响;以及平面靶标的反射率高^[9](激光波长为900 nm时接近100%),可将 ρ 作为常数.故可建立强度和影响因素之间的关系:

$$I \propto F \frac{\cos \alpha}{4R^2} \quad (3)$$

其中 F 为一常数.利用强度和影响因素之间的关系,通过数据模型分别讨论激光测距值、激光入射角对激光强度值的影响,并根据拟合的数据模型进行激光强度值的改正.

1.1 点云强度的距离改正

距离改正实验采用 FARO focus 3D 三维激光扫描仪在同一角度对同一平面靶标进行不同距离扫描,扫描获得点云的三维坐标 (X, Y, Z) 以及强度值.

令改正前的激光强度值为 I ,激光测距值为 R ,根据式(3)建立激光强度值与激光测距值 R 之间的函数关系:

$$I = \frac{K}{R^2} + C \quad (4)$$

式中, K, C 为未知参数, $R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2}$,利用激光扫描仪在距平面靶标(5, 10, 15, 20, 25, 30 m)进行扫描,对应距离扫描得到的靶标点云数据为(4 298, 2 130, 1 630, 934, 640, 304个),通过所测共计9 936个点云数据的三维坐标及激光强度对式(4)进行拟合.拟合后的激光强度值与激光测距值之间的函数关系为

$$I = \frac{5\,016.4}{R^2} + 1\,579.7 \quad (5)$$

设参考距离为 R_s , R_s 一般设为平均扫描距离,实际测距值为 R ,据此可建立激光强度值的距离改正模型:

$$I_s = (I - C) \frac{R^2}{R_s^2} + C \quad (6)$$

其中 I_s 为距离改正后的激光强度值,即:

$$I_s = (I - 1579.7) \frac{R^2}{R_s^2} + 1\,579.7 \quad (7)$$

利用式(7)对不同扫描距离下的平面靶标强度值进行距离改正,改正前后的效果如图1所示,图1a为不同扫描距离下平面靶标的强度值范围及平均强度值,图1b为改正后不同距离下平面靶标的强度值范围及平均值,通过对比发现,点云激光强度值经过距离改正后,不同扫描距离下的平面靶标强度值范围变小,趋于统一,平均强度值的标准差由改正前的94.69变为改正后的19.25,改正后的强度平均值基本保持一致.

1.2 点云强度的角度改正

角度改正实验采用 FARO focus 3D 三维激光扫描仪在同一距离对同一平面靶标进行旋转扫描,平面靶标固定在全站仪上,通过旋转全站仪的照准部分使得平面靶标的旋转的角度为 $(-30^\circ \sim 30^\circ)$,每隔 5° 扫描一次,获取平面靶标的点云的三维坐标 (X, Y, Z) 以及强度值,根据式(3)可建立激光强度值与激光入射角 α 之间的函数关系:

$$I = A \cos \alpha + \omega \quad (8)$$

式中, A, ω 为未知参数,利用 K 近邻域求取点云法矢 (n_1, n_2, n_3) ,则激光入射角可由式(9)求出:

$$\cos \alpha = \frac{(X, Y, Z) \cdot (n_1, n_2, n_3)}{R \cdot |n|} \quad (9)$$

其中 $|n|$ 为法矢的模,通过在 $(-30^\circ \sim 30^\circ)$ 范围内每

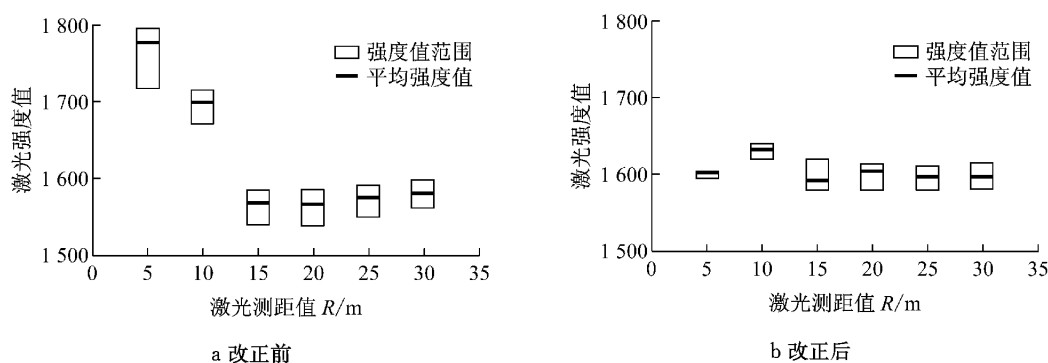


图 1 距离改正前后强度值范围及平均强度值

Fig.1 Range and average of intensity values in the compared test of distance correction

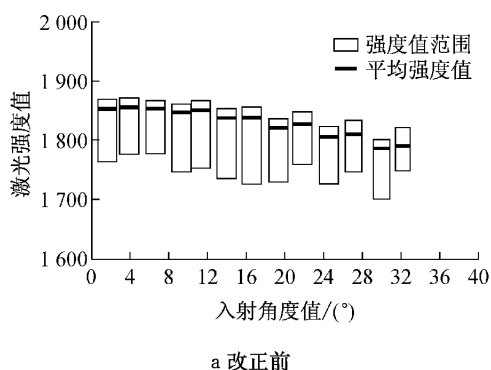
隔 5° 旋转平面靶标, 扫描得到 13 组共计 27 607 个点云数据, 根据所测的 13 组数据对式(8)进行拟合. 拟合后的激光强度值与激光入射角之间的函数关系为

$$I = 416.328 \cos \alpha + 1439.4 \quad (10)$$

设参考入射角为 α_s , 一般设为平均入射角, 实际入射角为 α , 据此可建立激光强度值的距离改正模型:

$$I_s = (I - \omega) \frac{\cos \alpha_s}{\cos \alpha} + \omega \quad (11)$$

其中 I_s 为角度改正后的激光强度值, 即:



$$I_s = (I - 1439.4) \frac{\cos \alpha_s}{\cos \alpha} + 1439.4 \quad (12)$$

利用式(12)对不同扫描角度下的平面靶标强度值进行角度改正, 改正前后效果如图 2 所示, 通过对比发现, 点云激光强度值经过角度改正后, 不同扫描角度下的平面靶标强度值范围变小, 平均强度值的标准差由改正前的 24.15 为改正后的 3.69, 改正后的强度平均值基本保持一致.

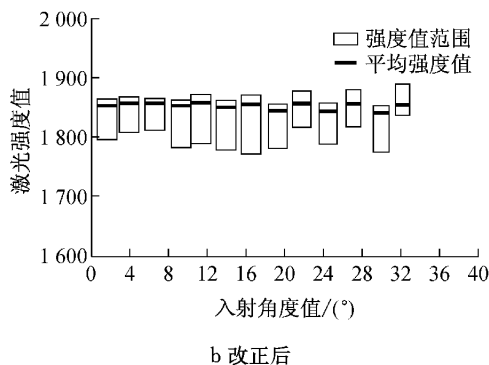


图 2 角度改正前后强度值范围及平均强度值

Fig.2 Range and average of intensity values in the compared test of angle correction

2 点云强度改正实例及结果

2.1 点云强度改正实例分析

为验证改正方法的有效性以及适用性, 本文采用 FARO focus 3D 三维激光扫描仪对某一区域墙体进行扫描(可看成表面性质均匀的扩展朗伯散射体), 获取 71 580 个点的三维坐标 (X, Y, Z) 以及强度值 I , 以及利用 Leica HDS3000 三维激光扫描仪对另一用石灰粉刷的白色墙体进行扫描(也可看成表面性质均匀的扩展朗伯散射体), 获取 8 832 个点的三维坐标及强度值, 并分别计算出两组数据的激光测距值 R 和激光入射角 α . 利用本文提出的数据改

正模型对两组数据的点云强度进行距离和角度改正, 改正效果如图 3 所示.

综合分析图 3a、3b 可以得出, 对两款不同激光扫描仪采集的墙体点云强度进行改正后, 除少数异常点外, 各点的激光强度值都趋于统一, 说明基于数据模型的点云强度改正方法具有一定的适用性. 为了定量地分析改正效果, 分别对两组数据求取改正后的强度值的标准差, 见表 1. 由表 1 可得: FARO focus 3D 和 Leica HDS3000 两款激光扫描仪采集的墙体原始激光强度值标准差分别为 42.9、512, 经模型改正后强度值标准差分别为 6.4、61, 墙体强度值离散度变小, 改正效果较好.

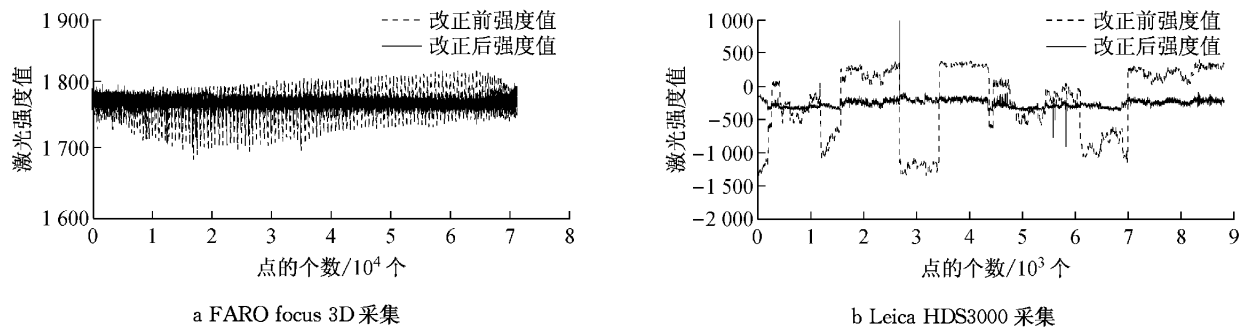


图3 点云强度值改正效果

Fig.3 Result of point-cloud intensity correction

表1 激光强度值改正前后标准差

Tab.1 Standard error before and after the laser intensity correction

型号	点云强度	最小值	最大值	标准差
FARO focus 3D	改正前	1 684	1 821	42.9
	改正后	1 713	1 798	6.4
Leica HDS3000	改正前	-1 376	473	512
	改正后	-901	1 063	61

2.2 点云强度改正效果

为了直观地表现点云强度的改正效果,将

FARO focus 3D 三维激光扫描仪所采集的墙体点云数据的强度值转换为 RGB(三原色)值显示,转换思路如下:将强度值转换为二进制(24 位长),取前 8 位与 0x0000ff 做位或运算为 R,中间 8 位与 0x0000ff 做位或运算为 G,末 8 位与 0x0000ff 做位或运算为 B,这样使得每一个强度值对应一个 RGB 值,以保证显示效果.在 VC++2008 与 PCL 混合编程的平台上实现强度值与 RGB 值的转换,转换结果如图 4 所示.

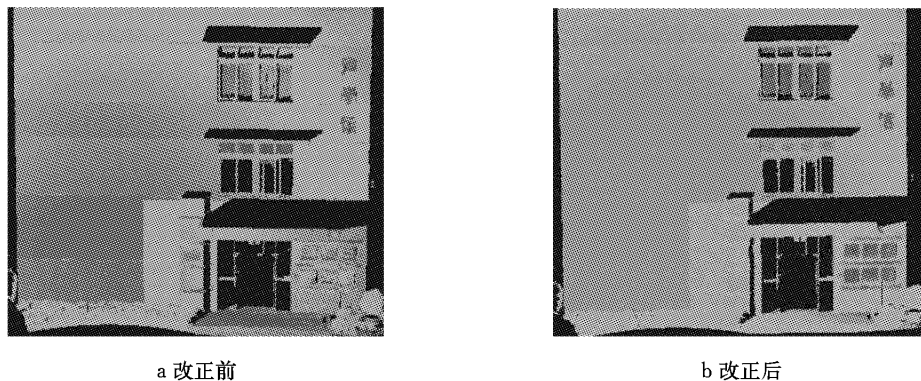


图4 改正前后的点云强度的 RGB 值

Fig.4 Result of converting intensity into RGB in the compared test of correction

分析图 4 可得:同类物体的激光强度值经过角度和距离改正后,激光测距值及激光入射角对其强度值的影响得到了较好的补偿,使得同类点云强度的 RGB 值一致或相近,如图 4b 所示.在实际应用中,点云强度值的有效改正可为后续点云分类及特征提取提供数据基础,提高点云处理及模型重建的效率.

3 点云的分类及建筑立面信息的提取

3.1 建筑立面点云的分类

为了方便建筑的三维重建,需将建筑立面的主墙体分离出来,由于树木和道路等地物点云远离建筑主体,可以通过人工删除的方式得到建筑立面点

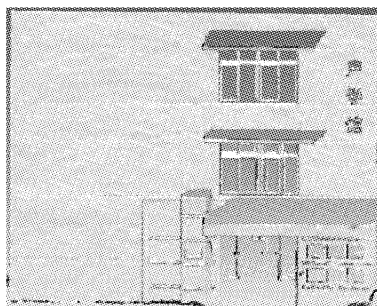
云.对建筑的立面的点云数据强度值进行改正后,此时可根据激光强度值进行建筑立面点云的直接分类,将玻璃和金属表面分离出来,得到建筑立面的主墙体.在利用激光强度信息对建筑立面点云进行分类时,需对建筑立面不同材质表面的激光散射强度进行标定;对不同材质进行强度标定时,采用最佳扫描距离 15 m 和最佳入射角度 0°对不同材质进行扫描,得到不同材质的强度范围,表 2 给出了几种建筑立面相关材质的实际标定结果.

为了将主墙体从建筑立面中分割出来,可根据标定的点云激光强度值的分布表,设定相应的强度阈值进行墙体分割,主墙面分割效果如图 5 所示.由于扫描物体表面的几何特性影响,主墙体的部分点云被错误分类(图5b),但主墙体大部分点云能分离

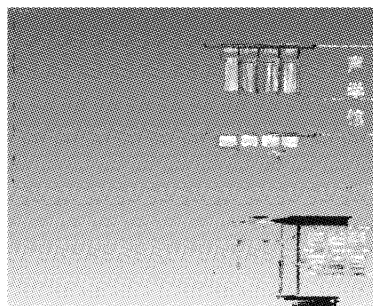
表 2 激光强度标定

Tab.2 Demarcation of the Laser Intensity

金属	玻璃	树木及植被	瓷砖	混凝土及粉刷石灰
457~650	986~1 157	1 145~1 356	1 450~1 661	1 586~1 740



a 主墙体



b 其余部分

图 5 建筑立面主墙体的分类效果

Fig.5 Classification for the main wall of facade

出来,较为完整地保存了建筑立面的位置及形状信息,为后续的建模及信息提取提供数据基础。

为了定量地分析原始激光强度值及改正后激光强度值分类的效果,通过统计的方法对其分类精度进行了比较,以式(13)表示分类精度 f 。

$$f = \frac{n_{zh}}{n} \times 100\% \quad (13)$$

式中: n_{zh} 为正确分类点数; n 为总点数。

对于实验中墙体的 71 580 个点云,原始激光强度值用于墙主体的分类的精度为 32.38%,改正后的墙主体点云分类精度为 96.74%,分类精度大大提高。

3.2 基于强度图像的立面信息提取

利用中心投影原理把点云数据投影为强度图像;将点投影至参考面后,得到平面点云。对平面点云建立栅格形式的图像数据结构。然后,将栅格中点的强度值转换为灰度值,本文使用 8 比特量化的灰度级,其取值范围为 0 至 255。利用落入栅格中点的

平均灰度值代替图像上的每一像素的像素值,生成改正前后的建筑立面强度图像,墙体改正后的强度图像如图 6c 所示,改正后的强度图像中同类材质的灰度统一均匀,不同材质强度图像中灰度差异较大。

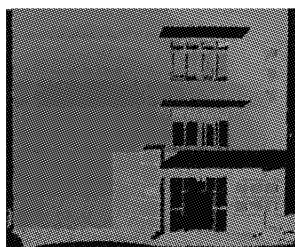
在逆向工程中,特征提取是其中非常重要的步骤,相对于从三角网格或散乱点云中直接提取特征线,根据强度图像提取特征,对三维目标进行降维处理,可以提高目标自动识别与探测的效率。本文基于改正后强度图像相邻像素间的灰度差利用 Canny 算子实现边缘探测及特征提取,如图 6d 所示。通过和基于三角网格提取的特征对比发现,基于改正后的强度图像提取的特征基本能反映出建筑的立面信息,不同材质的边缘清晰完整;而基于三角网格提取的特征,如图 6b 所示,由于网格只含有点的拓扑关系,没有点云强度信息,不能提出不同材质的边缘特征,所以基于改正后强度图像的特征提取能较好地实现目标的自动识别与探测。



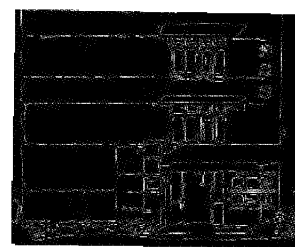
a 墙体点云网格化



b 基于三角网格提取的特征



c 改正后的强度图像



d 基于改正后强度图像提取的特征

图 6 建筑立面信息提取

Fig.6 Information extraction of facade

4 结语

本文从激光雷达方程出发,提出了一种基于数

据模型的激光强度值改正方法。通过分析各种因素对激光强度值的影响,对距离和角度引起的强度差异进行统一改正和补偿,得到建筑立面不同部分的强度值分布,并利用改正后的强度值对建筑点云进

行分类,得到建筑的主体墙面.结果表明:针对不同的扫描系统,强度改正数据模型具有一定适用性,改正模型能对激光强度值进行有效改正,改正后的强度值用于建筑立面的点云的分类,能大大提高分类精度,为进一步点云数据处理提供了理论基础.但由于不能完全对扫描物体的激光强度值进行补偿,使本文方法不能对建筑立面进行绝对精确分类,同时目标的自动识别精度还有待提高.因此下一步的研究工作是要结合点云的几何信息与强度信息,寻求一种更好的分类及特征提取方法,进一步提高分类精度和分类效果.

参考文献:

- [1] Coren F, Sterzai P. Radiometric correction in laser scanning [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(15): 3097.
- [2] Bernhard Höfle, Norbert Pfeifer. Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 62(6): 415.
- [3] 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.
HUANG Lei, LU Xiushan, LIANG Yong. Building facade information extraction and classification using laser scanning intensity [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2009, 34(2): 195.
- [4] 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.
TAN Kai, CHENG Xiaojun. Study on the correction methods of laser intensity and the accuracy of point cloud classification [J]. *Journal of Tongji University: Natural Science*, 2014, 42(1): 131.
- [5] Kaasalainen S, Ahokas E, Hyypä J, *et al.* Study of surface brightness from backscattered intensity: calibration of laser data [J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2005, 2(3): 255.
- [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.
- [7] Pfeifer N, Dorninger P, Haring A, *et al.* Investigating terrestrial laser scanning intensity data: quality and functional relations [C]// *Proceedings International Conference on Optical, Vienna: [s. n.], 2007, 328-337.*
- [8] Kim I I, McArthur B, Korevaar E J. Comparison of laser beam propagation at 785nm and 1 550 nm in fog and haze for optical wireless communications [C]// *Information Technologies 2000. International Society for Optics and Photonics. Boston: [s. n.], 2001: 26-37.*
- [9] 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.
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.

(上接第 1300 页)

- [6] Calderone A J, Lehman D, Moehle J. Behavior of reinforced concrete bridge columns having varying aspect ratios and varying lengths of confinement [R]. Berkeley: University of California, 2000.
- [7] Japan Road Association. Specifications for highway bridges, Part V, Seismic Design [S]. [S. l.]: Japan Road Association, 2002.
- [8] Lee W K, Billington S L. Modeling residual displacements of concrete bridge columns under earthquake loads using fiber elements [J]. *Journal of Bridge Engineering*, 2010, 15(3): 240.
- [9] Berry M, Parish M, Eberhard M. PEER structural performance database user's manual [R/OL]. [2004-12-31]. Berkeley: University of California, <http://nisee.berkeley.edu/spd>.
- [10] 宋晓东. 桥梁高墩延性抗震性能的理论及试验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2004.
SONG Xiaodong. Study on ductile seismic capacity of tall bridge piers in test and theory [D]. Shanghai: Tongji University, 2004.
- [11] Park R, Priestley M J N, Gill W D. Ductility of square confined concrete columns [J]. *Journal of Structural Division*, 1982, 108(ST4): 929.
- [12] Paulay T, Priestley M J N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings [M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1992.
- [13] Berry M, Lehman D, Lowes L. Lumped-plasticity models for performance simulation of bridge columns [J]. *ACI Structural Journal*, 2008, 105(3): 270.