

地面激光扫描仪的灰度优先距离检校模型

杨书娟^{1,2}, 张珂殊¹, 邵永社¹

- (1. 中国科学院电子学研究所, 北京 100190;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 针对加乘常数改正和灰度改正的优先顺序, 提出了灰度优先的距离检校模型。首先分析了脉冲式测距的主要误差源; 然后验证了加乘常数和距离改正表的存在性, 以及灰度对加乘常数的影响, 接着验证了不同距离处距离改正表的一致性; 最后提出了灰度优先的距离检校模型。为了得到不同灰阶的数据, 利用地面激光扫描仪对不同灰阶靶标板进行二维扫描, 并用不同距离的数据, 比较了不同距离检校模型的精度, 实验结果表明, 灰度优先检校模型的精度高于常数优先检校模型的精度, 距离精度提高到 5 mm。同时, 灰度优先检校模型的结果不受灰度影响, 具有普适性。

关键词: 灰度优先; 距离; 检校模型; 误差源;

中图分类号: TN958.98 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201948.0106007

Ranging calibration model of terrestrial laser scanner based on gray level priority

Yang Shujuan^{1,2}, Zhang Keshu¹, Shao Yongshe¹

- (1. Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: For the priority order of the multiplication constant correction and the gray correction, a gray-scale priority calibration model was proposed. Firstly, the main error sources of pulsed ranging were analyzed. Then the existence of the multiplication constant and distance correction table and the influence of gray scale on the multiplication constant were verified. Then the consistency of the distance correction table at different distances was verified. Finally, a gray-scale priority distance calibration model was provided. In order to obtain different gray-scale data, two-dimensional scanning of different gray-scale target plates was carried out by using ground laser scanner. The accuracy of different distance calibration models was compared by using different distance data. The experimental results show that accuracy of the gray-scale priority calibration model is higher than the precision of the constant priority calibration model, and the distance accuracy is improved to 5 mm. At the same time, the result of the gray-scale priority calibration model is not affected by the gray scale and has universality.

Key words: gray priority; range; calibration model; error sources

收稿日期: 2018-08-10; 修订日期: 2018-09-20

作者简介: 杨书娟(1988-), 女, 博士生, 主要从事激光雷达三维数据处理技术方面的研究。Email: yangshujuan880822@126.com

导师简介: 张珂殊(1972-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光探测技术, 嵌入式计算机系统和计算机综合信息处理技术方面研究。

Email: kszhang@mail.ie.ac.cn

0 引言

地面激光扫描技术,也称“实景复制”技术,是随着激光扫描测量技术的不断发展而出现新型空间数据获取技术,同传统的测量手段相比,该技术具有数据非接触性、获取速度快、高密度性、穿透性、主动性,全数字特征和操作方便等优点,因此,在文物遗产保护、城市数字化、应急灾后评估、变形监测、地形采矿等领域得到了广泛的应用^[1]。

自 2000 年以来,地面激光扫描仪被引入测绘领域,点云数据的准确度、精度及仪器检校问题就成为了关注焦点,研究人员展开了大量的研究工作^[2-8]。就国外而言,Zhan 等提出了激光雷达的辐射定标模型^[9],Doc Jana 等使用红、白、黄、绿、灰黑等彩色标靶研究了反射率、颜色等因素对距离的影响^[10];Briese. C 等研究了距离、色彩、入射角和目标材质等几方面对测距的影响^[11];以上方法得到了几种反射率彩色标靶的测距误差值,但是没有对测距误差的修正做进一步研究。就国内而言,郑德华等分析了影响激光扫描仪距离测量的因素^[12],刘春为多种三维激光扫描仪的检校提供了模型参考^[13]。王留召对国产 RA-360 激光扫描仪的距离参数进行了标定^[14]。

尽管目前使用地面激光雷达设备比较普遍,但对激光雷达设备的了解还不是很深刻,对检校工作研究也不够深入。对于距离标定,大多学者都提出了距离需要加乘常数和灰度改正,但从未验证加乘常数改正和灰度改正的优先顺序。

因此,文中以国产地面激光雷达设备为研究对象,首先介绍了脉冲式测距的原理,并分析了距离的主要误差源。然后验证了加乘常数和距离改正表的存在性、灰度对加乘常数的影响,以及不同距离处距离改正表的一致;并提出了灰度优先的距离检校模型。接着为了得到不同灰阶的数据,利用地面激光扫描仪对不同灰阶靶标板进行二维扫描,并详细推导了二维扫描的距离标定模型。最后利用不同距离的二维扫描数据,对比了灰度优先检校模型和不同灰度的加常数优先检校模型和的距离精度,发现灰度优先检校模型的距离精度最高,且结果不受灰度的影响,因此,灰度优先检校模型更具有普适性。

1 测距原理与误差分析

目前地面三维激光扫描仪的测距系统原理主要分为脉冲式激光测距和相位式激光测距,测距原理不同导致误差来源也不同,文中主要分析脉冲式激光测距。脉冲式激光测距通过光时域反射技术将空域中的距离测量转换成时间间隔测量,其基本原理可用公式表示为:

$$R = \frac{1}{2} c \cdot t \quad (1)$$

式中: c 为光在真空中的传播速度,约 3×10^8 m/s; t 为测距系统内部时间测量单元记录的时间间隔; R 为测距,单位为 m。

从公式(1)可以看到,测距精度取决于时间间隔的测量精度,而脉冲时刻鉴别单元直接测量激光脉冲的起止时刻,目前时刻鉴别的主流方法为前沿鉴别法,如图 1 所示,不同的激光波形直接影响探测器探测回波信号的时刻,产生计时误差 Δt ,从而导致测距误差。

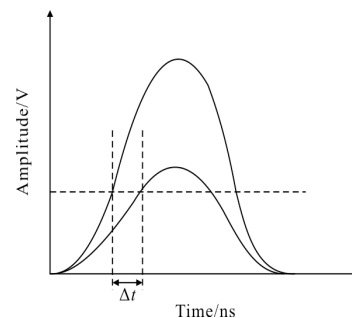


图 1 前沿鉴别法

Fig.1 Frontier identification

因此,影响脉冲式激光测距误差的主要因素包括激光脉冲宽度、测距系统内部时间测量单元精度以及外界环境。其中,激光脉冲宽度直接决定测距的分辨率;内部时间测量单元的精度直接影响测距精度;在外界环境中,不同反射率物体使得回波信号产生不同程度的展宽和变形,计时误差导致测距误差^[15]。

2 测距误差检校模型

2.1 验证加乘常数和灰度改正的存在性

在距离地面激光雷达扫描仪 20、40、80 m 处放置不同的灰度板(灰度 300、1200 和 1800),用激光扫描仪进行定点扫描,并用全站仪测量灰度板的真实距离,统

计观测距离与真实距离的差值,如图 2 所示,横轴为真实距离,纵轴分别为灰度 300、1 200 和 1 800 对应的真实距离与观测距离的差值均值,单位为 m。

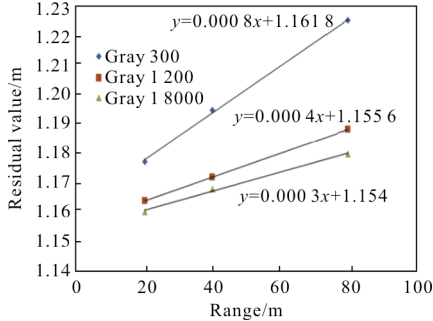


图 2 灰度和距离对距离残差的影响

Fig.2 Effect of gray scale and distance on distance residual

从图中可以看到:(1) 同一距离不同灰度的距离残差不同,说明需要根据灰度修正距离;(2)由于观测距离均大于全站仪测量的真实值,说明距离需要加常数修正;(3)不同灰度对应的乘常数不同,灰度 300 与 1 800 的乘常数相差 0.000 5,对于 100 m 测距数据而言,乘常数对距离的影响达 0.05 m,说明距离需要乘常数修正。

不同灰度数据计算的乘常数不一致,主要是激光扫描仪测量不同灰度区间的测距精度不一致造成的。

2.2 验证灰度改正表趋势的一致性

在距离地面三维激光扫描仪 20、40、80 m 处放置一块垂直地面的平面标靶,标靶上粘贴高反射率材料,并在扫描仪前方放置一个光衰减器,通过电池带动光衰减器连续匀速旋转,得到不同距离下不同回光强度所对应的距离值,并用全站仪测量真实距离,得到不同距离处不同灰度对应的距离残差,如图 3 所示,横轴为灰度,纵轴为距离残差,单位为 m。

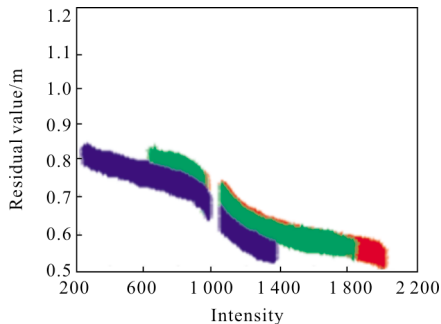


图 3 不同距离处不同灰度对应的测距残差

Fig.3 Ranging residuals corresponding to different gray levels at different distances

图 3 中蓝色点、绿色点和红色点分别为 80、40、20 m 对应的灰度与距离残差的关系,可以看到,不同距离处灰度与距离残差的关系基本一致。

2.3 灰度优先的距离检校模型

通过上述分析发现,灰度会影响乘常数,但灰度与距离残差的关系基本稳定,因此文中采用灰度优先检校模型进行距离标定。

(1) 真实距离

实验时,地面激光雷达采用二维线扫描方式扫描不同颜色相间的靶标板,并与激光雷达中心同高的位置 A 粘贴强反射片,根据图 2 中激光雷达中心 O 与标志板上激光点 P 和强反射片 A 的关系,可计算靶标板上每个激光点 P 的真实距离。

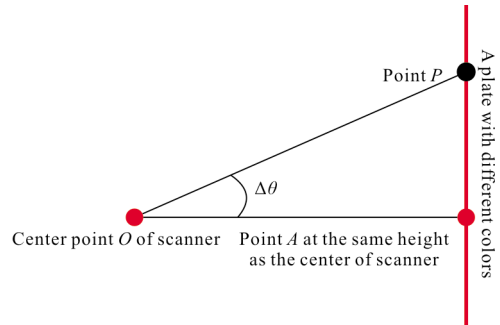


图 4 计算真实距离

Fig.4 Calculating the true distance

计算激光点 P 真实距离的公式如下所示。

$$\begin{cases} D_{\text{real}} = D_L^A / \cos(\Delta\theta) \\ \Delta\theta = |\theta_P - \theta_A| \\ D_L^A = D_o^A - D_o^L \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_{real} 为激光点 P 的真实距离; D_o^A 和 D_o^L 分别为全站仪中心点到靶标板和全站仪中心点到激光扫描仪中心的平距; D_L^A 为激光扫描仪中心到靶标板的平距; θ_P 和 θ_A 分别为激光点 A 与 P 的扫描角度值,单位为 rad; $\Delta\theta$ 为激光点 A 与 P 的夹角。

(2) 灰度优先的距离检校模型

首先统计每个灰度对应测距残差,计算某一固定灰度距离残差的平均值;再对所有灰度的距离值进行改正,得到距离改正表;最后利用距离改正表修正后的距离和真实距离,基于最小二乘平差,计算修正距离的加乘常数。

灰度优先检校的数学模型如公式(3)所示。

$$D_L^A / \cos(\Delta\theta) = (1 + Pa) \times (D_{\text{观测}} + V_i) + Pb \quad (3)$$

式中： $D_{\text{观测}}$ 为激光扫描仪的距离观测值； V_i 为灰度 I 对应的测距改正值； Pa 和 Pb 为修正距离的加常数和乘常数。将公式(3)进行线性化处理,如公式(4)所示。

$$V = [D_{\text{观测}} + V_i] \begin{bmatrix} d_{Pa} \\ d_{Pb} \end{bmatrix} - (D_L^A / \cos(\Delta\theta) - (1 + Pa) \cdot (D_{\text{观测}} + V_i) - Pb) \quad (4)$$

将公式(5)进行简化,可表示为:

$$V = Bx - L \quad (5)$$

式中： $x = (Pa, Pb)$ ； B 为公式(3)关于 Pa 和 Pb 的偏导数； L 为真实距离-距离改正表修正后的距离。

基于间接平差原理,计算未知数 x 和检校后距离的精度 σ ,如公式(6)、(7)所示。

$$x = (B^T B)^{-1} (B^T L) \quad (6)$$

$$\sigma = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{n-2}} \quad (7)$$

(3) 具体检校流程

具体检校流程图如图 5 所示。

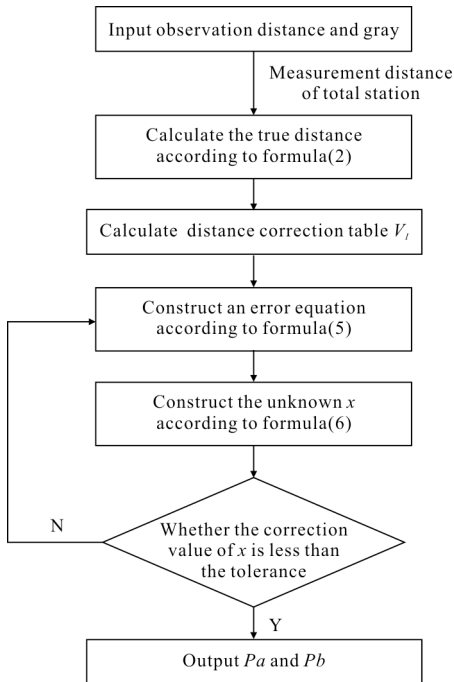


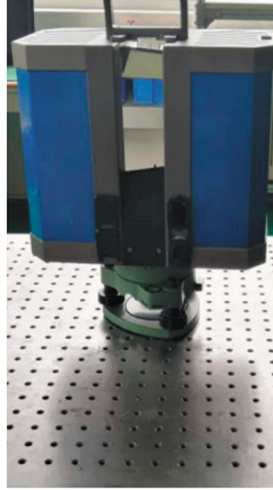
图 5 灰度优先检校的流程图

Fig.5 Flow chart of gray priority calibration

3 实验

3.1 实验结果

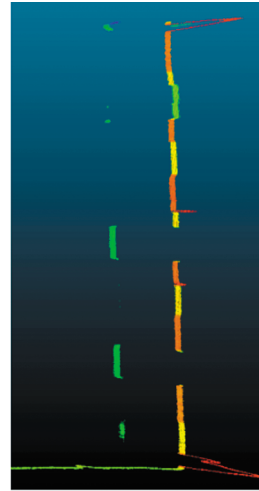
该次实验选择北科天绘研制的地面激光雷达扫描仪进行数据采集,如图 6(a)所示。实验场地为 200 m 的空旷场地,靶标板的大小为 2 m×0.2 m,靶标板上粘贴不同颜色相间的硬纸板,如图 6(b)所示。



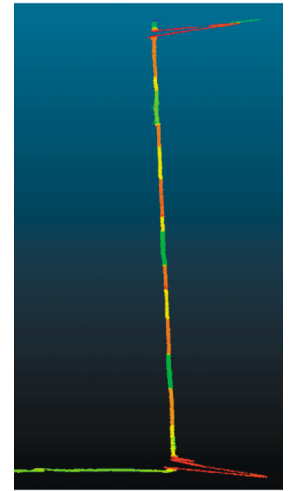
(a) 地面激光雷达扫描仪
(a) Terrestrial Laser Scanner



(b) 靶标板
(b) Target board



(c) 检校前靶标点云
(c) target point cloud before calibration



(d) 检校后靶标点云
(d) Target point cloud after calibration

图 6 靶标板

Fig.6 Target board

数据采集步骤:先用全站仪确定好直线;再在直线不同距离处放置靶标板,并使用全站仪测量全站

仪中心点分别到靶标板和地面激光扫描仪中心的平距;最后用地面激光雷达采用二维线扫描方式扫描靶标板。

地面激光雷达采集的原始数据为二进制格式,用激光扫描预处理软件得到点云数据,通过点云后处理软件提取靶标板上所有激光点的原始距离和扫描角度值,再结合全站仪测量的平距,基于灰度优先检校模型,通过 matlab 编程可得到距离改正表和加乘常数。

从图中可以看到,距离检校前,由于不同颜色纸板的原始距离受灰度影响,靶标板凹凸不平,如图 6(c)所示;距离检校后,靶标板变得非常平整,基本为一条直线,如图 6(d)所示,说明消除了灰度对距离的影响。

3.2 精度分析

该次实验选用了 4 种检校模型进行精度对比。方法 1 采用灰度优先检校方法,方法 2、3 和 4 采用加乘常数优先检校方法,不同的是,在计算加乘常数时,模型 2 选用了所有测距数据,模型 3 选用了灰度为 300 的测距数据,而模型 4 选用了灰度为 1 700 的测距数据,加乘常数的检校结果如表 1 所示。

表 1 不同模型的加乘常数对比

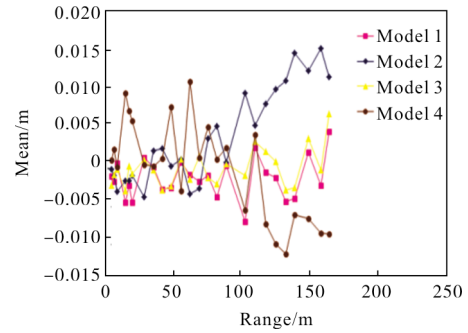
Tab.1 Comparison of the multiplication and constant of different models

	Multiply constant	Add constant
Model 1	0.000 081	0.001 421
Model 2	0.000 498	-0.955 04
Model 3	0.000 226	-0.975 22
Model 4	0.000 624	-0.964 67

从图中可以看到模型 2、3 和 4 的加乘常数存在差异,以模型 1 的乘常数为基准值,则对于 100 m 测距而言,方法 2、3 和 4 的乘常数对距离的影响值分别为 -0.041、-0.014、-0.054 m,即选用不同灰度的数据计算乘常数的结果对远距离的影响差异大,因此,加乘常数优先检校方法的结果受灰度的影响大,而灰度优先检校的结果不受灰度的影响。

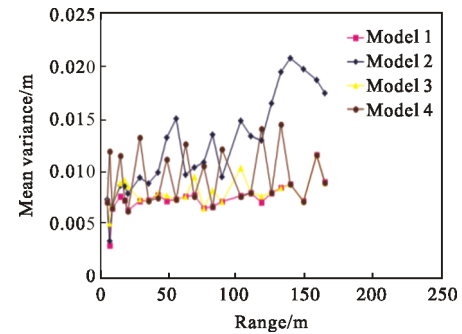
为了验证检校精度,对比了不同检校模型检校后距离残差的均值和均方差,如图 7 所示,横轴代表激光雷达设备中心到靶标板的平距,纵轴代表检校

后距离残差的均方差,单位为 m。



(a) 距离残差均值

(a) Mean of distance residual



(b) 距离残差的均方差

(b) Mean square error of distance residual

图 7 距离精度

Fig.7 Distance accuracy

从图中可以看到:模型 1 和模型 3 的精度最高,距离残差均值小于 5 mm,距离残差均方差约为 1 cm;模型 4 的精度次之,距离残差均值和均方差都约为 1 cm;模型 2 检校效果最差,远距离的残差均值达 1.5 cm,远距离的残差均方差约为 2 cm。

以上检校结果主要是不同灰度区间的测距精度不一致造成的,具体表现在:(1)若选择测距精度较差的灰度区间(模型 2 和 4)计算加乘常数时,平差结果受测距精度差的干扰较大,会直接影响加乘常数的准确性,因此检校结果不适用于所有数据;(2)若先对每个灰度的距离残差求平均,再对同一距离所有数据的距离残差(距离改正表修正后)求平均,两次平均可减弱测距精度差数据对加乘常数的影响,因此模型 1 的精度最高。

4 结论

文中在分析地面激光扫描仪测距误差源的基础

上,利用采集的试验数据,分析发现:(1)距离和灰度对距离存在影响;(2)灰度对乘常数存在影响;(3)不同距离的灰度改正表的一致性。因此,提出了灰度优先的距离检校模型。

为了得到不同灰阶的数据,文中用地面激光雷达对不同灰阶的靶标板进行二维扫描。基于不同距离处的扫描数据,比较了不同距离检校模型的精度。实验结果表明:(1)加乘常数优先检校方法的检校精度受灰度的影响较大,而且不同激光扫描仪选取的最优灰度可能也不一样,因此该方法还存在不确定性。(2)灰度优先检校不存在灰度选取问题,且检校精度最高,适用所有脉冲式激光雷达的距离检校,因此灰度优先检校方法具有普适性,为后续数据应用奠定了基础。

参考文献:

[1] Moritani Ryota, Kanai Satoshi. Cylinder-based simultaneous registration and model fitting of laser-scanned point clouds for accurate as-built modeling of piping system [J]. Computer-Aided Design and Applications, 2018, 10(41): 1-14.

[2] Medi T, Holst C, Kuhlmann H. Towards system calibration of panoramic laser scanners from a single station[J]. Sensors, 2017, 17(32): 11-45.

[3] Xu Zhengping, Shen Honghai, Xu Yongsen. Review of the development of laser active imaging system with direct ranging[J]. Chinese Optics, 2015, 8(1): 28-38. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 许永森. 直接测距型激光主动成像系统发展现状[J]. 中国光学, 2015, 8(1): 28-38.

[4] Xu Zhengping, Shen Honghai, Yao Yuan. Scanner less laser active imaging validating system by directly ranging [J]. Optics and Precision Engineering, 2016, 24 (2): 251-259. (in Chinese)
徐正平, 沈宏海, 姚园. 直接测距型无扫描激光主动成像验证系统[J]. 光学精密工程, 2016(2): 251-259.

[5] Li Mi, Song Yingsong, Yu Jing, et al. High precision laser pulse distance measuring technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(8): 1469-1473. (in Chinese)
李密, 宋影松, 虞静, 等. 高精度激光脉冲测距技术[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(8): 1469-1473.

[6] Xia Wenze, Han Shaokun, Cao Jingya, et al. Ladar range estimation technology [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(9): 0906005. (in Chinese)

夏文泽, 韩绍坤, 曹京亚, 等. 激光雷达距离估计技术[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9): 0906005.

[7] Zhang Jian, Zhang Lei, Zheng Fei. Development status of airborne 3D imaging lidar systems[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 213-232. (in Chinese)
张健, 张雷, 曾飞. 机载激光 3D 探测成像系统的发展现状[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 213-232.

[8] Guo Yulan, Wan Jianwei, Lu Min. Three dimensional orientation estimation for ladar target [J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(4): 843-850. (in Chinese)
郭裕兰, 万建伟, 鲁敏. 激光雷达目标三维姿态估计[J]. 光学精密工程, 2012, 20(4): 843-850.

[9] Zhan Li, Alan H S, David L B Jupp, et al. Radiometric calibration of a dual-wavelength, full-waveform terrestrial lidar[J]. Sensors, 2016, 16(3): 313.

[10] Mazalová J, Valentová K, Vlcková L. Testing of accuracy of reflectorless distance measurement of selected Leica and Topcon total stations [J]. GeoScience Engineering, 2010, 56 (1): 19-26.

[11] Briese C, Pfennigbauer M, Lehner H. Radiometric calibration of multi-wavelength airborne laser scanning data. ISPRS Ann. Photogramm[J]. Remote Sens Spat Inf Sci, 2012, I-7: 335-340.

[12] Zheng Dehua, Chen Yunzhong, Liu Chun. 3D laser scanner and its effect factor analysis of surveying error [J]. Engineering of Surveying and Mapping, 2015, 14 (2): 32-34. (in Chinese)
郑德华, 沈云中, 刘春. 三维激光扫描仪及其测量误差影响因素分析[J]. 测绘工程, 2015, 14(2): 32-34.

[13] Liu Chun, Zhang Yunling, Wu Hangbin. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2009, 13 (11): 56-60. (in Chinese)
刘春, 张蕴灵, 吴杭彬. 地面三维激光扫描仪的检校与精度评估[J]. 工程勘察, 2009, 13(11): 56-60.

[14] Wang Liuzhao, Han Youmei, Zhong Ruofei. The range calibration of the vehicular laser scanner [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 12(1): 19-20. (in Chinese)
王留召, 韩友美, 钟若飞. 车载激光扫描仪距离测量参数标定[J]. 测绘通报, 2010, 12(1): 19-20.

[15] Zhao Song, Xi Qin, Liu Songlin. Model of terrestrial laser scanner range errors based on intensity of echo [J]. Science of Surveying and Mapping, 2013, 38(3): 169-171. (in Chinese)
赵松, 西勤, 刘松林. 基于回光强度的地面三维激光扫描仪测距误差模型[J]. 测绘科学, 2013, 38(3): 169-171.