

# 基于原始强度数据的地面激光雷达镜面反射测距误差修正

陈锦, 谭凯\*, 张卫国

华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

**摘要** 通过研究目标镜面反射造成的测距误差, 及分析强度数据与测距误差之间的关系, 建立了一种基于原始强度数据的目标镜面反射测距误差模型。研究表明, 利用原始强度数据可以建立一种测距误差修正模型, 该模型不受目标材质和表面几何形状的影响, 可以精确地对距离数据进行修正, 对提高地面激光雷达的数据精度具有重要意义。

**关键词** 大气光学; 地面激光雷达; 镜面反射; 测距误差; 原始强度数据; 多项式拟合

中图分类号 P232

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.050102

## Correction of Terrestrial Laser Scanning Ranging Errors from Specular Reflection Based on Original Intensity Data

Chen Jin, Tan Kai\*, Zhang Weiguo

State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

**Abstract** By exploring the range errors from the target specular reflection, and analyzing the relationship between range errors and intensity data, a range error model from the target specular reflection based on original intensity data is established. Experimental results show that the original intensity data can be used to establish a range error correction model, which is independent of target material and surface geometry. According to the original intensity, the distance data can be accurately corrected, which is of great significance to improve the accuracy and quality of terrestrial laser scanning.

**Key words** atmospheric optics; terrestrial laser scanning; specular reflection; range error; original intensity data; polynomial fitting

**OCIS codes** 010.0280; 280.3640; 280.1350

## 1 引言

地面激光雷达技术也称为地面三维激光扫描(TLS), 其具有分辨率高、精度高、信息量丰富以及主动性强等特点<sup>[1]</sup>, 已被广泛应用于地形地貌测量、城市土地规划、资源环境调查、历史文物保护<sup>[2]</sup>、建筑测量与三维建模<sup>[3-4]</sup>、隧道工程<sup>[5-6]</sup>以及精细农业<sup>[7-8]</sup>等领域, 为国民经济生产、社会发展和科学研究提供了重要原始资料。与其他搭载平台的激光雷达相比, TLS最大的优点为精度高, 现有商业 TLS

系统能达到毫米级甚至亚毫米级的测距精度, 能够实现被测目标精确三维重构。TLS系统的核心器件之一为光电测距单元, 其测距精度是衡量 TLS 系统优劣的关键指标之一, 也是实际应用中用户最关心的问题。

TLS测距精度受到扫描仪器系统特性、大气衰减特性、扫描几何构造和目标表面特性等因素影响<sup>[9-10]</sup>。针对仪器特性、大气衰减、扫描几何构造对 TLS 测距精度的影响, 已有研究人员做了大量研究, 这些研究成果促进了 TLS 系统测距性能优化和

收稿日期: 2018-08-06; 修回日期: 2018-08-27; 录用日期: 2018-09-27

基金项目: 国家自然科学基金(41671449)、上海市青年科技英才扬帆计划资助(18YF1406800)、中国博士后科学基金面上资助项目(2017M620141)、华东师范大学河口海岸学国家重点实验室自主课题(2017RCDW06)

\* E-mail: ktan@sklec.ecnu.edu.cn

实际扫描数据精度和质量的提高<sup>[11-15]</sup>。而关于目标表面特性对 TLS 测距精度影响的研究则相对较少,目标表面特性主要是指目标对激光的反射与散射能力,由目标反射率、粗糙度(光滑度)、纹理和材质等特性决定<sup>[16]</sup>。根据表面特性与微小物质组成的差异,目标对激光的反射可以分为漫反射和镜面反射<sup>[17-18]</sup>,漫反射均匀地向各个方向散射,测距精度较高。当目标表面较光滑时,目标表面镜面反射成分较大导致激光回波的强度、脉冲宽度、脉冲形状以及脉冲个数等参数改变,进而影响激光回波波形特征<sup>[16]</sup>。TLS 系统正是通过比较分析发射激光与激光回波的波形特征来得到扫描距离,因此,目标表面的镜面反射会导致较大的测距误差。

TLS 作为一种主动遥感手段,不仅能获取目标的三维几何信息,还能通过光电接收系统记录目标对发射激光的“后向散射回波强度”,即“激光强度”。激光强度表征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<sup>[19-22]</sup>。利用激光强度可精确快速地对扫描目标的立体特征进行提取和反演,可弥补单一几何数据的不足与缺陷。TLS 系统的激光强度受到距离、入射角、目标表面特性的影响。因此,激光强度与测距误差存在某种内在联系,这为镜面反射测距误差模型的建立提供了可行途径。理论上,TLS 根据发射回波与接收回波之间的时间差或者相位差确定扫描仪中心与扫描点之间的距离,回波波形特性直接影响测距精度。而 TLS 光电探测器将接收到的反射回波信号转换成电信号,经放大电路放大后进行信号处理,最后转换为激光强度值。由此可知,激光测距值与激光强度都是系统根据回波波形特征得到的,二者存在某种特定的内在关系<sup>[23-25]</sup>。

由于影响 TLS 测距误差的因素较多,分开考虑各个因素,建立模型并进行修正较难实现。现有的研究和应用大都将镜面反射造成的测距误差点云当作噪声点或者粗差点,直接滤除,没有探索镜面反射测距误差和强度数据之间的内在物理机制。本文考虑目标表面镜面反射特性对距离数据的影响,研究单一的激光强度值对 TLS 测距误差的影响,并建立由镜面反射引起的测距误差模型,对原始距离数据进行修正,进一步提高 TLS 测距精度。

## 2 基于原始强度数据的镜面反射测距误差模型

对于同一 TLS 系统,大气衰减忽略不计,仪器

系统特性可视为稳定的,因此镜面反射造成的测距误差主要受到距离、入射角及目标表面反射特性的影响,如图 1 所示。理论上,需要分开考虑各因素的影响,然后建立相应的模型实现原始测距值修正。TLS 系统提供原始距离观测值,该观测值与真实值之间存在较大的偏差,利用带有误差的原始距离观测值无法分析对测距误差的影响。入射角根据点的邻域拟合平面(或曲面)计算得到,计算时需要利用带有误差的点云几何信息。由于入射角受到点云局部密度与噪声的影响较大,计算得到的入射角也带有误差。不同目标的表面反射特性存在差异,扫描过程中这些特性与差异未知。因为各种因素对测距误差的影响较复杂,且无法获取影响因素的准确量,因此,分开各影响因素,单独建模在实际中并不可行<sup>[19]</sup>。

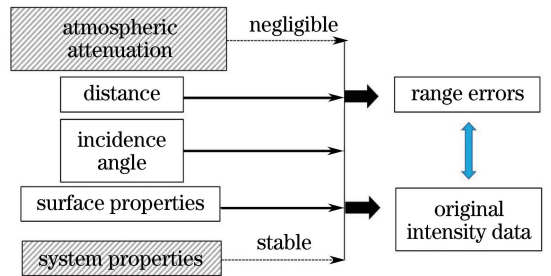


图 1 TLS 中测距误差与原始强度的影响因素  
Fig. 1 Influencing factors of range errors and intensity data in TLS

镜面反射引起的 TLS 测距误差  $\Delta R$  受到目标反射特性  $\rho$ 、入射角余弦  $\cos \theta$  和距离  $R$  的影响, $\Delta R$  可表示为

$$\Delta R = \chi_1(\rho) \cdot \chi_2(\cos \theta) \cdot \chi_3(R) = \chi(\rho, \cos \theta, R), \quad (1)$$

式中  $\chi_1$ 、 $\chi_2$ 、 $\chi_3$  分别为目标反射特性、入射角余弦及距离函数,三者形式均未知。对于同一 TLS 系统,激光强度  $I$  同样受到目标反射特性  $\rho$ 、入射角余弦  $\cos \theta$  和距离  $R$  的影响, $I$  表示为<sup>[4]</sup>

$$I = f_1(\rho) \cdot f_2(\cos \theta) \cdot f_3(R) = f(\rho, \cos \theta, R), \quad (2)$$

式中  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别为目标反射特性、入射角余弦及距离函数,三者形式也未知。值得注意的是,三个因素对测距误差和强度的影响原理和机制不同,因而(1)式和(2)式中各个函数的形式也不同。根据(1)式和(2)式可知,测距误差和强度数据都受到相同的三个因素影响,因此测距误差和强度之间存在某种函数关系。由于测距误差未知,强度值为 TLS 系统的直接观测量,因此可利用强度表征测距误差,得到:

$$\Delta R = \varphi(I), \quad (3)$$

式中  $\varphi$  为原始强度的函数。

由于仪器厂商技术保密,  $\varphi$  的理论函数形式未知, 且对于不同仪器,  $\varphi$  的形式可能不一样, 因此, 可利用不同的经验函数替代  $\varphi$ 。根据 Weierstrass 定理可知, 闭区间上的连续函数可用多项式级数一致逼近。本文利用多项式近似替代  $\varphi$ , 得到:

$$\Delta R = \sum_{i=0}^N \varphi_i I^i, \quad (4)$$

式中  $N$  和  $i$  为多项式系数。由 (4) 式可知, 利用原始强度可对由镜面反射引起的 TLS 测距误差进行单一变量表达, 得到:

$$\hat{R} = R + \Delta R, \quad (5)$$

式中  $R$  和  $\hat{R}$  分别为距离观测值和真实距离值。

### 3 实验验证与结果

#### 3.1 实验设计

实验采用 FARO Focus<sup>3D</sup> 120 地面三维激光扫描仪 (FARO 公司, 美国) 进行测距, 测距范围为 0.6~120 m, 测距误差为  $\pm 2$  mm, 在 10 m 距离时, 对 90% 反射率的目标测距噪声为 0.60 mm, 在 25 m 距离时, 对 90% 反射率的目标测距噪声为 0.96 mm, 其他参数如表 1 所示。扫描数据由每个点的三维坐标  $(x, y, z)$  及强度值  $I$  组成。激光强度无量纲, 量化等级为 11 bit, 范围为  $[0, 2048]$ 。值得注意的是, 虽然 FARO Focus<sup>3D</sup> 120 的理论最大测距值为 120 m, 但当距离较大时, 强度噪声与各类误差也相应增大, 为保证较高的数据精度与可靠性, 在实际应用中通常采用 30 m 以内的数据<sup>[23]</sup>。

表 1 Faro Focus<sup>3D</sup> 120 的主要参数

Table 1 Main parameters of FARO Focus<sup>3D</sup> 120

Emitted power / mW	Wave-length / nm	Field of view / ( $^{\circ} \times ^{\circ}$ )	Beam diver-gence / ( $^{\circ}$ )	Ranging scope / m	Exit beam diameter / mm
20	905	360 $\times$ 305	0.009	0.6-120	3.8

为了验证本文方法的可行性, 选取陶瓷砖、聚乙烯材料、不锈钢垃圾桶、液晶 (LCD) 屏幕 4 组不同类型的目标表面进行实验, 4 种目标表面都较光滑, 材质均匀, 具有很好的镜面反射能力, 平整度  $< 2$  mm。实验中, 扫描仪正对平面材料, 分辨率为 1/4, 扫描质量为 4 倍。

#### 3.2 点云数据处理

扫描结束后, 利用 FARO SCENE 4.8 点云数据

处理软件选取扫描区域内光滑平面 4 个角的点云和存在镜面反射高光效应区域的点云, 并导出由三维坐标和激光强度组成的点云数据  $(x, y, z, I)$ , 利用 Matlab 进行算法测试。由图 2 可知, 由于镜面反射的影响, 4 种材料目标表面都存在高光区域, 即高光现象。为了分析测距误差, 选取并导出高光效应区域的点云, 进行三维显示, 结果如图 3 所示。

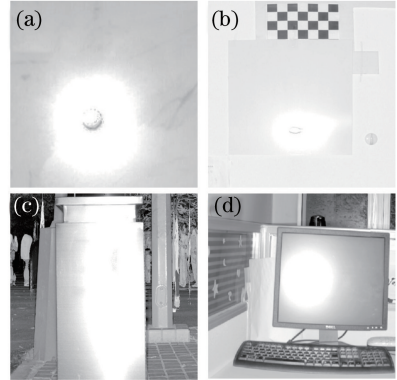


图 2 4 种不同材料表面的原始强度图像。(a) 陶瓷砖; (b) 聚乙烯材料; (c) 不锈钢垃圾桶; (d) 液晶屏幕

Fig. 2 Original intensity images of four different kinds of material surfaces. (a) Ceramic tile; (b) polyethylene; (c) stainless garbage; (d) LCD screen

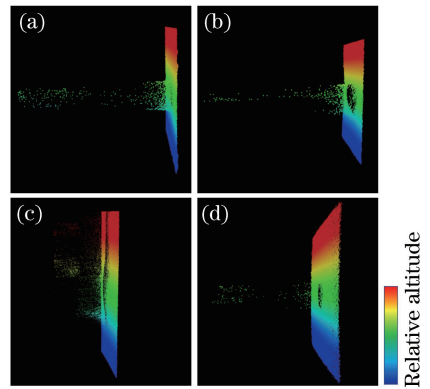


图 3 4 种不同材料表面的三维点云分布。(a) 陶瓷砖; (b) 聚乙烯材料; (c) 不锈钢垃圾桶; (d) 液晶屏幕

Fig. 3 Three-dimensional points cloud distributions of four different kinds of material surfaces. (a) Ceramic tile; (b) polyethylene; (c) stainless garbage; (d) LCD screen

由图 3 可知, 镜面反射高光效应部分的点云存在较大程度的缺失和异常, 误差点云分布大多集中在实际目标表面后方。误差点云并非杂乱分布, 而是呈圆锥形分布, 越靠近高光效应中心, 由于入射角逐渐变小, 镜面反射对激光回波的影响越强, 激光回波波形发生严重变形, 进而导致测距误差和原始强

度都增大。利用软件计算点距离可知,误差点云距真实目标表面的最大误差达到了 15 cm,如图 3(c)所示,远远超出了 FARO Focus<sup>3D</sup> 120 的标称精度。因此可知,目标镜面反射会同时导致强度数据高光效应及较大的测距误差。

对目标表面 4 个角的点云数据进行平面拟合,可得到每个平面的参数,计算某点在平面上的投影点,投影点至扫描仪中心的距离即为该点真实距离

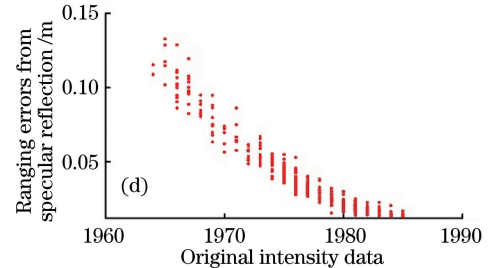
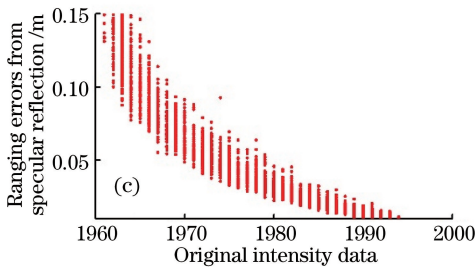
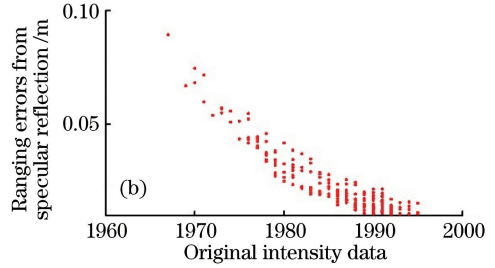
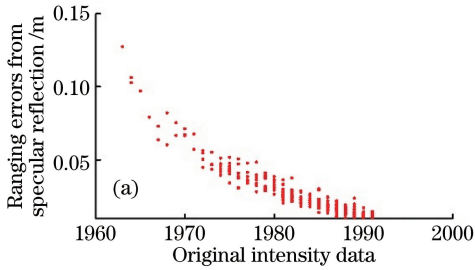


图 4 4 种材料表面的原始强度与镜面反射测距误差之间的关系。(a)陶瓷砖;(b)聚乙烯材料;(c)不锈钢垃圾桶;(d)液晶屏幕  
Fig. 4 Relationship between original intensity and range errors from specular reflections of four different kinds of material surfaces. (a) Ceramic tile; (b) polyethylene; (c) stainless garbage; (d) LCD screen

利用软件计算可知,目标的最大测距误差分别为 130,80,150,130 mm,远远超出了仪器的标称精度。4 组数据的变化趋势极为相似,随着原始强度的增大,镜面反射测距误差不断减少,二者之间的变化具备一定的规律性,说明两者之间具有明显的数学关系。原始强度和镜面反射测距误差的数据范围几乎都分布在 1960 dB~2000 dB, 0.005~0.15 m 区间之间。

### 3.3 拟合结果

分别用一阶、二阶和三阶多项式对图 4 中的散点进行拟合,结果如图 5 所示。由图 5 可知,随着拟合阶数的增加,拟合曲线与散点之间吻合性越好。参数拟合的决定系数如表 2 所示。

由表 2 可知,随着多项式阶数升高,决定系数  $r^2$  越接近 1,表明拟合效果越好。综合考虑拟合精度与简洁性,并防止过拟合,本文选取三阶多项式模型,即  $N=3$ 。根据(4)式对图 4 中数据进行平差计算,可以求得 4 组多项式参数。对所得参数进行平均,得到最终的拟合曲线表达式为

值,根据点的扫描位置与投影点位置则可计算出该点的测距误差。由于 FARO Focus<sup>3D</sup> 120 地面三维激光扫描仪自身存在约 2 mm 的测距误差,考虑目标表面平整度  $<2$  mm 及其他误差,本文将 5 mm 以上的测距误差归为镜面反射测距误差。以原始强度为横坐标,镜面反射测距误差为纵坐标,可得原始强度与镜面反射测距误差之间的关系,结果如图 4 所示。

$$\Delta R = -3.7228 \times 10^{-6} \cdot I^3 +$$

$$0.0222 \cdot I^2 - 44.2128 \cdot I + 29324.1774. \quad (6)$$

利用点的原始强度,根据(6)式可以计算点的测距误差;再根据(5)式,可计算点的真实距离值;最后,可进一步计算得到强度修正后距离的提高精度:

$$\delta = 1 - (|\hat{R} - R|/R) \times 100\%. \quad (7)$$

图 5 中, $\delta$  均值为 75%,即对于所选择的 4 个镜面反射目标,计算得到的点的真实距离较没有进行修正前,精度提高了 75%。

## 4 结 论

提出了一种由目标镜面反射引起的测距误差的修正方法,构建了 TLS 距离数据和强度数据之间的关联。实验结果表明,利用强度数据可以对目标镜面反射测距误差进行精确修正,大幅提高了 TLS 的测距精度。值得注意的是,为了定量比较分析结果,实验采用平面目标,但所建立的误差模型适用于其他不规则表面距离数据的修正。

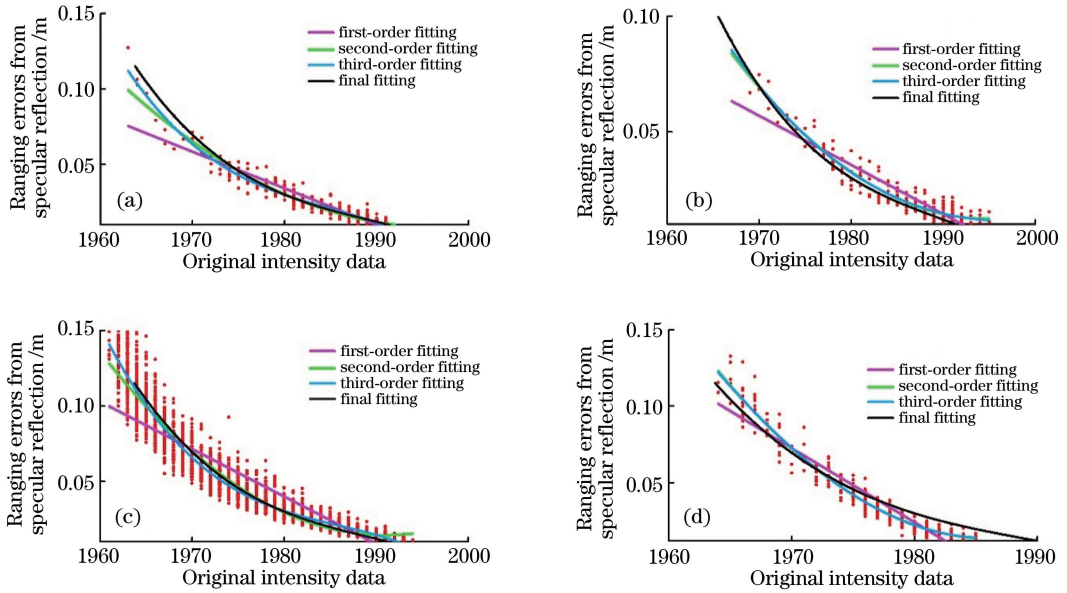


图 5 4 种材料表面的原始强度和目标镜面反射测距误差间的曲线拟合。

(a) 陶瓷砖;(b) 聚乙烯材料;(c) 不锈钢垃圾桶;(d) 液晶屏幕

Fig. 5 Polynomial fitting between intensity and range errors from specular reflections of four different kinds of material surfaces. (a) Ceramic tile; (b) polyethylene; (c) stainless garbage; (d) LCD screen

表 2 图 5 中曲线拟合的阶数与决定系数  $r^2$  间的关系

Table 2 Relationship between order of polynomial curve and determination coefficient  $r^2$  in Fig. 5

Targets	First-order $r^2$	Second-order $r^2$	Third-order $r^2$
Ceramic tile	0.88833	0.94284	0.95471
Polyethylene	0.86596	0.93675	0.93696
Stainless steel garbage	0.85031	0.94138	0.95168
LCD screen	0.90195	0.96139	0.96144

本文也存在一些不足,后续的研究可以考虑在所选择的角点贴上理想的漫反射材料,并结合漫反射测距误差统一考虑。同时,测试更多的表面使结论更具有普遍性。

参 考 文 献

[1] Yang B S, Liang F X, Huang R G. Progress, challenges and perspectives of 3D LiDAR point cloud processing [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2017, 46(10): 1509-1516.  
 杨必胜, 梁福逊, 黄荣刚. 三维激光扫描点云数据处理研究进展、挑战与趋势 [J]. 测绘学报, 2017, 46 (10): 1509-1516.

[2] Fang W, Huang X F, Zhang F, 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.

[3] Huang L, Lu X S, Liang Y. 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.

[4] Cheng X L, Cheng X J, Guo W, et al. Point cloud classification and features extraction of building facades with the corrected laser intensity value [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(9): 1432-1437.  
 程小龙, 程效军, 郭王, 等. 基于激光强度的建筑立面点云分类及信息提取 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(9): 1432-1437.

[5] Tan K, Cheng X J, Ju Q Q, et al. Correction of mobile TLS intensity data for water leakage spots detection in metro tunnels [J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2016, 13(11): 1711-1715.

[6] Li C, Lu X P, Zhu N N, et al. Continuously extracting section and deformation analysis for subway tunnel based on LiDAR points [J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2015, 44 (9): 1056-1062.  
 李琨, 卢小平, 朱宁宁, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法 [J]. 测绘学报, 2015,

- 44(9): 1056-1062.
- [7] Crommelinck S, Höfle B. Simulating an autonomously operating low-cost static terrestrial LiDAR for multitemporal maize crop height measurements[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3): 205.
- [8] Koenig K, Höfle B, Hämmerle M, *et al.* Comparative classification analysis of post-harvest growth detection from terrestrial LiDAR point clouds in precision agriculture [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 104: 112-125.
- [9] 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.
- [10] Zhang Y, Yan L, Yang H, *et al.* Research on systematic error model of terrestrial laser scanning [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2012(1): 16-19.  
张毅, 闫利, 杨红, 等. 地面三维激光扫描的系统误差模型研究[J]. *测绘通报*, 2012(1): 16-19.
- [11] Liu C, Zhang Y L, Wu H B. Accuracy evaluation of 3D laser range scanner based on field calibration[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, 2009, 37(11): 56-60.  
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, 37(11): 56-60.
- [12] Cai J M, Hua X H, Xuan W, *et al.* Research on systematic error model of terrestrial laser scanner and precision analysis[J]. *Journal of Geomatics*, 2016, 41(5): 17-21.  
蔡建民, 花向红, 宣伟, 等. 地面三维激光扫描仪系统误差模型研究及精度分析[J]. *测绘地理信息*, 2016, 41(5): 17-21.
- [13] Mao A Q, Zhu Y H, Hao S B, *et al.* The research of accuracy evaluation method and error correction model based on 3D laser scanner [J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2014(2): 72-75.  
冒爱泉, 朱益虎, 郝思宝, 等. 地面三维激光扫描仪精度测评方法和误差改正模型研究[J]. *测绘通报*, 2014(2): 72-75.
- [14] Lichti D D, Gordon S J, Tipdecho T. Error models and propagation in directly georeferenced terrestrial laser scanner networks [J]. *Journal of Surveying Engineering*, 2005, 131(4): 135-142.
- [15] Lichti D D. Error modelling, calibration and analysis of an AM-CW terrestrial laser scanner system [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2007, 61(5): 307-324.
- [16] Hu Y H. Laser imaging target reconnaissance[M]. Beijing: Nation Defense Industry Press, 2013.  
胡以华. 激光成像目标侦察[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [17] Tan K, Cheng X J. Specular reflection effects elimination in terrestrial laser scanning intensity data using phong model [J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(8): 853.
- [18] 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.
- [19] You H T, Wang T J, Skidmore A, *et al.* Quantifying the effects of normalisation of airborne LiDAR intensity on coniferous forest leaf area index estimations[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(2): 163.
- [20] Tan K, Cheng X J. Correction methods of laser intensity and accuracy of point cloud classification [J]. *Journal of Tongji University: Social Science Section*, 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.
- [21] Tan K, Cheng X J, Zhang J X. Correction for incidence angle and distance effects on TLS intensity data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(2): 223-228.  
谭凯, 程效军, 张吉星. TLS强度数据的入射角及距离效应改正方法 [J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(2): 223-228.
- [22] Tan K, Cheng X J. Adaptive unsupervised classification of TLS point cloud based on intensity data[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(3): 032801.  
谭凯, 程效军. 基于强度数据的地面激光点云自适应非监督分类 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(3): 032801.
- [23] Wujanz D, Burger M, Mettenleiter M, *et al.* An intensity-based stochastic model for terrestrial laser scanners[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 146-155.
- [24] Zhao S, Xi Q, Liu S L, *et al.* Model of terrestrial laser scanner range errors based on intensity of echo [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2013, 38

(3): 169-171,174.

赵松, 西勤, 刘松林, 等. 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): 169-171,174.

[25] 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.