

文章编号 1004-924X(2018)04-0757-07

## 地面激光扫描标靶的优化布设

杜 岩, 吴志祥, 谢谟文\*, 吕夫侠, 余 国  
(北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

**摘要:**地面三维激光扫描仪在监测变形时,需利用标靶进行多期数据的配准,因此标靶配准的精度直接影响测量误差。为了提高配准精度,对不同标靶布设方案进行了测量误差分析。实验分别利用 25, 50, 100, 150 和 200 m 的 M1~M8 靶点进行配准,然后通过对比两期数据的目标点坐标,得出不同标靶布设距离的测量误差,并对实验误差进行系统分析。实验结果表明:三维激光扫描仪标靶的最佳位置在距离扫描仪 50 m 左右处,且当匹配存在角度偏差时,在同方向上被测目标的测量误差会增大。通过不同标靶布设方案的实验研究得出标靶的最佳布设方案和注意事项,可为实际边坡工程监测的标靶布设方案提供参考。

**关键词:**地面激光扫描;标靶;变形监测;误差分析;配准

中图分类号:P232 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182604.0757

## Optimal layout of calibration target in terrestrial laser scanning

DU Yan, WU Zhi-xiang, XIE Mo-wen\*, LÜ Fu-xia, YU Guo

(School of Civil & Resources Engineering, University of Science &  
Technology Beijing, Beijing 100083, China)

\* Corresponding author, E-mail: mowenxie@126.com

**Abstract:** Deformation monitoring with terrestrial 3D laser scanner commonly uses fixed calibration targets to register point cloud data of multiple periods. Therefore, the accuracy of the target registration directly affects the measurement error. In order to improve registration accuracy, measurement errors of different calibration target layout were analyzed. First, the calibration target points (M1—M8) at different distances (25, 50, 100, 150, 200 m) are registered, and the differences in the coordinates of eight target points (T1—T8) are obtained by comparing two period data. Finally, the errors of different calibration target layout and their sources are analyzed. Experimental results show that optimal distance of calibration target should be about 50 m from the scanner, and when a matching angle deviation exists, the measurement error will increase in the same direction. In this study, the matching precisions at different distances are obtained. This, along with other important aspects detailed in the paper, can be used as a reference for calibration target layouts in practical slope engineering.

收稿日期:2017-10-19;修订日期:2017-11-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 41372370; 41702371)

**Key words:** Terrestrial Laser Scanning(TLS); calibration target; deformation monitoring; error analysis; target registration

## 1 引言

三维激光扫描技术能在极短的采样周期内获取大量的目标采样点<sup>[1]</sup>,因此具有高速、高精度、高分辨率的优点,并已成功应用于地形测图、文物保护、城市数字化、边坡监测、逆向工程等领域。随着三维激光扫描仪在各行业的普及,地面激光扫描技术(Terrestrial Laser Scanning, TLS)在工程面状监测的应用优势逐渐显现。TLS技术在工程应用中的监测精度能够稳定在厘米级,但从厘米到毫米精度的改进则富有挑战。Cheok等<sup>[2]</sup>针对距离、材质、入射角、色彩等因素,开展了对仪器误差的研究。朱凌等<sup>[3]</sup>在不同扫描距离和角度下对标靶精度进行了分析,得出了最佳的扫描距离以及扫描角度。施贵刚等<sup>[4]</sup>分析了三维激光扫描技术多站点匹配误差的累积效果,通过相关实验总结出最优的配准站点个数,并对多站点匹配的最佳标靶距离进行了研究。王力等<sup>[5]</sup>在分析扫描数据特点的基础上,提出基于回光强度的平面标靶自动识别方法,完成了标靶的快速、全自动识别。随着仪器的更新和最近点迭代(Iterative Closest Point, ICP)算法的成熟, TLS在一定程度上可以不受距离、入射角等因素的影响,实现点云的有效配准,并通过相关实验和方法研究,建立可用于工程现场的精度标准和配准方法<sup>[6]</sup>。

早在 2002 年,英国地震调查局结合全球定位系统(GPS)将 TLS 技术应用到海岸线腐蚀监测中,并取得了成功<sup>[7]</sup>。随后, Abellan 等<sup>[8]</sup>应用 TLS 技术监测西班牙某危岩块体,验证了三维激光扫描技术在高精度监测中的可行性。此后,众多工程实例也表明该技术在土木工程监测领域有着广阔的应用空间<sup>[9]</sup>,尤其是在岩体裂隙识别<sup>[10]</sup>、岩质边坡安全监测与稳定评价方面<sup>[11-12]</sup>,具备方便快捷、准确高效和无人工干预等优势<sup>[13]</sup>,从而实现了土木工程领域边坡面状监测的技术突破。

目前,基于 TLS 的边坡面状监测技术已逐步成熟,并形成一套固定站点扫描方法<sup>[14-16]</sup>,但基于标靶方案对三维扫描仪的精度研究还有待于进一

步深入。本文在前期方法研究的基础上,通过模拟实验对不同距离上标靶的配准精度进行研究,分析最佳的标靶布测方案,以便为工程应用提供参考。

## 2 实验原理及方案

### 2.1 实验原理

TLS 以仪器中心为原点建立球面坐标系,并向目标物发射数以万计的激光束,通过激光返回时间以及角度推算出目标物各扫描点所在的球面坐标,如图 1 所示。

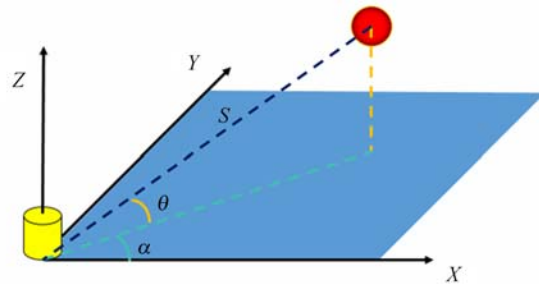


图 1 三维激光扫描仪工作原理  
Fig. 1 Principle of 3D laser scanner

根据式(1)即可得到工程常用的笛卡儿直角坐标系坐标,并进行相关变形分析。

$$\begin{cases} X = S \cos \theta \sin \alpha \\ Y = S \cos \theta \cos \alpha \\ Z = S \sin \theta \end{cases} \quad (1)$$

通过对同一目标不同时期的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)数据求差值,得到面状监测变形值。由于不同时期的数据各自有自己的坐标系,因此该技术的关键点之一在于坐标系的统一,即点云配准。工程上常使用标靶辅助点云进行配准,通常的做法是以第一期数据下的坐标系为基准坐标系,通过软件自带算法将其他几期数据拼接到底数坐标系下。点云匹配的实质是坐标轴的平移和变化,可以通过式(2)进行描述<sup>[17]</sup>。

$$\begin{bmatrix} X_C \\ Y_C \\ Z_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ Y_i \\ Z_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $\begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix}$  为由方向余弦组成的旋转矩阵,  $\begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$  为平移矢量。

在实际工程监测中,基本不存在一组旋转矩阵和平移矢量使两组点云一一对应,因此目前点云匹配基本上采用 ICP 算法或者 ICP 算法的变种算法<sup>[18]</sup>。ICP 的基本思路是通过不断的迭代,使两组点云数据逐渐接近,直到两组点云数据的相关参数小于某个阈值时迭代停止。因此,匹配精度会影响最终的三维重构精度,进而影响监测精度<sup>[19]</sup>。

本文以不同标靶布测距离为案例进行实验,得到其不同匹配精度,并对测量目标的三维重构精度进行计算,分析不同标靶布设方案下被测物体的测量误差,测量误差<sup>[20]</sup>为:

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + \sigma_z^2}, \quad (3)$$

式中:  $\sigma_p$  是测量误差,  $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  分别是该误差在 X, Y 和 Z 坐标轴上的分量。

### 2.2 实验方案

本实验采用的三维激光扫描仪型号是 Riegl VZ400,最大测量距离为 400 m。以被测物体所在地距离扫描仪 100 m 为例,在距离扫描仪 25, 50, 100, 150, 200 m 处分别设置 5 组标靶进行配准实验。标靶采用工程常用的 5 cm 反射片,精扫描垂直与水平分辨率均设置为 1 mm。为了尽可能忽略不同方向对实验结果的影响并简化其他因素的影响,这里将整个扫描仪 360° 的扫描范围均分为 8 个方向 M1~M8,并在每个方向设置一个标靶,进行 ICP 算法配准,如图 2(a)所示;同时在这 8 个方位上分别布置被测点(图 2(b)),对它们进行坐标识别。为了验证不同距离下的标靶方案对测量误差的影响,将 8 个方位被测点的误差作为该标靶方案的总体误差指标,进行比较及相关评价研究。

图 2(a)中 M1~M8 为 8 个标靶方向,分别在各方向距扫描仪 25, 50, 100, 150 和 200 m 处设置标靶,规定 50M1 表示在 50 m 处 M1 方向上的标靶,以此类推。T1~T8 为 100 m 处 8 个方向上的被测物体。表 1 是不同方位上标靶的随机匹配误差分布。

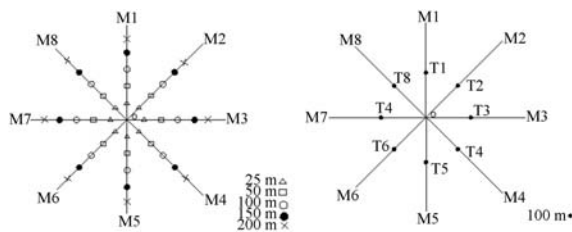


图 2 标靶(a)与被测物体(b)布设示意图

Fig. 2 Schematic diagram of calibration targets (a) and measured objects (b)

表 1 标靶匹配误差

Tab. 1 Matching errors of calibration targets (m)

Directions	$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_p$
M1	0	0.005	0	0.005
M2	0.004	0.003	0	0.005
M3	0.005	0	0	0.005
M4	0.004	0	0.003	0.005
M5	0.003	0	0.004	0.005
M6	0	0.003	0.004	0.005
M7	0	0	0.005	0.005
M8	0.003	0.003	0.003	0.005

## 3 实验结果及分析

### 3.1 实验结果

实验分别利用 25, 50, 100, 150 和 200 m 的 M1~M8 靶点进行配准,然后通过对比两期数据中 T1~T8 的坐标,得出不同标靶布设距离的测量误差,如表 2 所示。

表 2 不同标靶距离下的测量误差

Tab. 2 Measurement errors under different target distances (m)

Target point	200 m	150 m	100 m	50 m	25 m
T1	0.003 5	0.003 0	0.003 7	0.003 7	0.005 4
T2	0.003 0	0.003 0	0.002 8	0.004 7	0.008 6
T3	0.003 0	0.003 0	0.002 8	0.003 0	0.005 5
T4	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 5	0.003 0
T5	0.004 1	0.004 1	0.004 9	0.006 6	0.008 4
T6	0.004 9	0.004 9	0.005 7	0.008 5	0.013 3
T7	0.004 1	0.004 9	0.004 9	0.006 6	0.010 4
T8	0.003 5	0.003 5	0.004 1	0.004 7	0.004 7

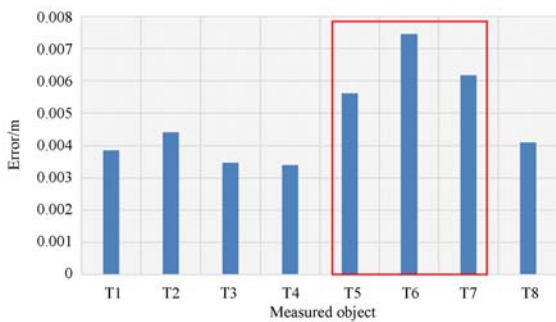


图 3 不同方向上的目标物平均测量误差

Fig. 3 Average measurement errors of objects in different directions

由实验结果可知, T5~T7 方向上始终是匹配误差最大的方向, 如图 3 所示。这主要是因为同方向上 M5~M7 靶点存在较大的 Z 向匹配误差, 使得该方向上的测量结果存在较大的误差。在其他重复试验中, 当某方向上的标靶在 Z 轴的匹配误差较大时, 其同侧的目标物也相应产生较大的测量误差。

### 3.2 实验结果修正

根据前人对三维激光扫描仪精度的研究, 靶点精度在某个距离以内基本保持不变, 而在该距离外随距离的增加而增加<sup>[21]</sup>。因此, 对不同距离的标靶布测方案进行匹配精度中值修正。

三维激光扫描仪的精度公式<sup>[17]</sup>可表示为:

$$\Delta = E_s \times 10^{-5} \times L + 0.005, \quad (4)$$

式中:  $E_s = 0.002$  mm;  $L$  表示标靶与扫描仪的距离, 在 50 m 以内取 0。该公式表示的精度曲线与前人研究的规律大致相符。在此距离精度上对前面的匹配精度进行修正, 结果如图 4 所示。

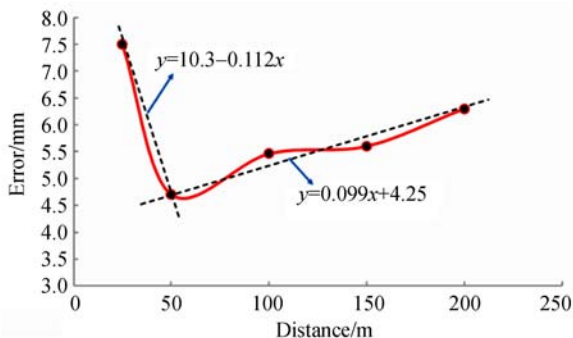


图 4 测距 100 m 时不同标靶距离下的测量误差

Fig. 4 Measurement errors with different target distances at range of 100 m

在监测目标为 100 m 的情况下, 当标靶距离

为 50 m 时, 监测误差最小, 为 4.7 mm; 随着标靶距离的增加, 误差缓慢增加; 但当标靶太靠近扫描仪时, 匹配精度会急剧下降。本文对图 4 中曲线进行拟合, 得到物体在 100 m 处匹配误差与标靶的位置关系, 即:

$$\begin{cases} \sigma = a \times (50 - L) + 4.7 & (25 \leq L \leq 50) \\ \sigma = a \times (L - 50) + 4.7 & (50 < L < 200) \end{cases}, \quad (5)$$

式中:  $\sigma$  表示不同标靶方案下 100 m 被测物体的测量误差,  $a$  为距离权重指标,  $L$  为标靶与扫描仪的距离。当  $25 \leq L \leq 50$  时,  $a = 0.112$ ; 当  $50 < L < 200$  时,  $a = 0.009$ 。当标靶距离小于 50 m 时, 距离引起的匹配误差权重相当于 50 m 时权重的 12 倍。

图 5 为目标物体分别在 50, 100 和 200 m 处, 不同标靶距离下的测量误差。当测量目标距离为 200 m, 标靶距离为 25 m 时, 匹配引起的测量误差为 14 mm, 误差达到厘米级; 标靶距离在 50 m 处误差最小。综合考虑标靶布设的局限性, 得到标靶摆放的最佳位置为距离扫描仪 50 m 左右。

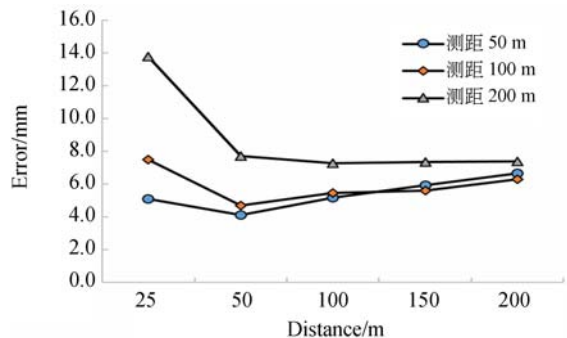


图 5 不同测距下不同标靶距离引起的测量误差

Fig. 5 Measurement errors with different target distances at different ranges

## 4 讨论

### 4.1 标靶距离对测量误差的影响

实际上, 科学的标靶布测方案可以实现对边坡的有效监测测量。其中, 标靶距离作为其中的一个参数, 对测量误差有较大的影响。数据分析发现, 标靶距离太远会导致标靶匹配精度下降, 测量误差升高; 太近则会引起匹配误差的放大效应。因此, 在实地监测时应选取合适的标靶距离, 本实验得出标靶的最佳位置为距离扫描仪 50 m 左右。

地面激光扫描技术的测量误差主要分为随机误差和系统误差,标靶匹配误差作为系统误差的一种,在实际应用中可通过改进标靶距离的方式来减少,即通过合理布设标靶距离来有效减少工程监测中匹配误差的影响。

#### 4.2 匹配误差方向对测量误差的影响

与XY平面相比,当测量误差主要分布在Z轴时,经过靶点匹配后所产生的误差是明显的。系统角度匹配误差主要由Z向测量误差决定,其表达式为:

$$M_{\theta} = \frac{M_z}{S \cos \theta}, \quad (6)$$

式中: $M_{\theta}$ 是坐标系统的角度误差, $M_z$ 是Z向测量误差。

由式(6)可以看出,产生Z向匹配误差时角度误差会随之增大<sup>[22]</sup>,从而影响目标物体的测量误差,这也是实验中T5~T7方向(该方向有明显的Z向匹配误差)存在较大误差的原因。

以标靶距离50 m为例,T5~T7方向的平均测量误差为7.5 mm,远高于反方向T1~T3区域的平均测量误差3.8 mm。因此,在标靶匹配的过程中,应尽量避免标靶垂直沉降引发的角度匹

配误差。实际工作中可在标靶配准时进行水准仪校准,避免标靶自身发生沉降造成偏心误差;另外,在同样的观测条件下应对同一个靶点进行多次观测,可有效减少Z轴方向的配准误差带来的测量角度偏心。

## 5 结 论

工程中常将TLS用于边坡面状位移的变形监测,本文基于固定站点扫描方法,通过多次模拟实验得到不同标靶距离下匹配引起的测量误差。当标靶距离扫描仪过近,实验中距离为25 m左右时,标靶匹配引起的测量误差急剧增加,其误差权重系数高达0.112,是标靶距离在50 m左右处的误差权重系数(0.009)的12倍。由此得出,本实验中三维激光扫描仪标靶的最佳位置应在距离扫描仪50 m左右处。同时在实验中得出,当匹配误差发生在Z轴方向时,会引起角度偏差,进而使得在同方向上被测目标的测量误差增大,因此应避免同方向标靶在Z轴方向的匹配误差。上述研究结果可为工程监测中标靶距离的合理布设提供参考,以有效减少因标靶匹配产生的测量误差。

#### 参考文献:

- [1] 周森,郭永彩,高潮,等. 基于三维激光扫描的移动大尺寸圆柱体工件长度快速检测系统[J]. 光学精密工程, 2014, 22(6): 1524-1530.  
ZHOU S, GUO Y C, GAO CH, *et al.*. Rapid length measuring system for mobile and large scale cylinder workpieces based on 3D laser scanning[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1524-1530. (in Chinese)
- [2] CHEOK G S, LEIGH S D, RUKHIN A L. *Calibration experiments of a laser scanner*[R]. NISTIR 6922, Gaithersburg, U. S. A: National Institute of Standards and Technology, 2002.
- [3] 朱凌. 地面三维激光扫描标靶研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(1): 33-35.  
ZHU L. Research on the target in TLS[J]. *Laser Journal*, 2008, 29(1): 33-35. (in Chinese)
- [4] 施贵刚,王峰,程效军,等. 地面三维激光扫描多视点云配准设站最佳次数的研究[J]. 大连海事大学学报, 2008, 34(3): 64-66.  
SHI G G, WANG F, CHENG X J, *et al.*. Optimal station position number for terrestrial laser scanning multi-view point cloud registration[J]. *Journal of Dalian Maritime University*, 2008, 34(3): 64-66. (in Chinese)
- [5] 王力,李广云,张洪新,等. 基于回光强度的平面标靶自动识别方法[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(10): 1910-1913.  
WANG L, LI G Y, ZHANG H X, *et al.*. Automatic recognition method of planar target based on return light intensity[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(10): 1910-1913. (in Chinese)
- [6] 官云兰,程效军,詹新武,等. 地面三维激光扫描仪系统误差标定[J]. 测绘学报, 2014, 43(7): 731-738.  
GUAN Y L, CHENG X J, ZHAN X W, *et al.*. Research on systematic errors calibration of terrestrial laser scanner[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sin-*

- ica, 2014, 43(7): 731-738. (in Chinese)
- [7] HOBBS P R N, HUMPHREYS B, REES J G, *et al.*. *Monitoring the Role of Landslides in 'Soft Cliff' Coastal Recession*[M]//MCINNES R G, JAKEWAYS J. *Instability: Planning and Management*. Isle of Wight, Britain: Thomas Telford Ltd, 2002: 589-600.
- [8] ABELLÁN A, VILAPLANA J M, MARTÍNEZ J. Application of a long-range terrestrial laser scanner to a detailed rockfall study at Vall de Núria (Eastern Pyrenees, Spain)[J]. *Engineering Geology*, 2006, 88(3-4): 136-148.
- [9] WANG W X, ZHAO W S, HUANG L X, *et al.*. Applications of terrestrial laser scanning for tunnels: a review[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2014, 1(5): 325-337.
- [10] STURZENEGGER M, STEAD D. Close-range terrestrial digital photogrammetry and terrestrial laser scanning for discontinuity characterization on rock cuts[J]. *Engineering Geology*, 2009, 106(3-4): 163-182.
- [11] ABELLÁN A, OPPIKOFER T, JABOYEDOFF M, *et al.*. Terrestrial laser scanning of rock slope instabilities[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, 39(1): 80-97.
- [12] FRODELLA W, CIAMPALINI A, GIGLI G, *et al.*. Synergic use of satellite and ground based remote sensing methods for monitoring the San Leo rock cliff (Northern Italy)[J]. *Geomorphology*, 2016, 264: 80-94.
- [13] CAO T, XIAO A CH, WU L, *et al.*. Automatic fracture detection based on terrestrial laser scanning data: a new method and case study[J]. *Computers & Geosciences*, 2017, 106: 209-216.
- [14] 谢谟文, 胡媛, 王立伟, 等. 基于三维激光扫描仪的滑坡表面变形监测方法-以金坪子滑坡为例[J]. *中国地质灾害与防治学报*, 2013, 24(4): 85-92.
- XIE M W, HU M, WANG L W, *et al.*. Landslide monitoring by three-dimensional laser scanner-case study of the displacement detection of the Jinpingzi landslide (Southwest, China)[J]. *The Chinese Journal of Geological Hazard and Control*, 2013, 24(4): 85-92. (in Chinese)
- [15] 谢谟文, 胡媛, 杜岩, 等. TLS 技术及其在滑坡监测中的应用进展[J]. *国土资源遥感*, 2014, 26(3): 8-15.
- XIE M W, HU M, DU Y, *et al.*. Application of TLS technique to landslide monitoring: Summarization and prospect[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2014, 26(3): 8-15. (in Chinese)
- [16] 胡媛. 土质滑坡 SPH 运动模型及监测方法研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2015.
- HU M. *Study on SPH Movement Model and Monitoring Method of Soil Landslide*[D]. Beijing: University of Science & Technology Beijing, 2015. (in Chinese)
- [17] 张东, 黄腾, 陈建华, 等. 基于罗德里格矩阵的三维激光扫描点云配准算法[J]. *测绘科学*, 2012, 37(1): 159-157, 173.
- ZHANG D, HUANG T, CHEN J H, *et al.*. An algorithm for terrestrial laser scanning point clouds registration based on Rodriguez matrix[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2012, 37(1): 159-157, 173. (in Chinese)
- [18] 李彩林, 郭宝云, 季铮, 等. 多视角三维激光点云全局优化整体配准算法[J]. *测绘学报*, 2015, 44(2): 183-189.
- LI C L, GUO B Y, JI ZH, *et al.*. Global optimization and whole registration algorithm of multi-view 3D laser point cloud[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(2): 183-189. (in Chinese)
- [19] LISKA C, SABLATNIG R, JAVACENTER A. Adaptive 3D acquisition using laser light[C]. *Proceedings of 2000 Czech Pattern Recognition Workshop*, Czech Pattern Recognition Society, 2000: 111-116.
- [20] 丁建勋, 马德富, 高俊, 等. 三维激光扫描数据精度影响因素分析及控制措施[J]. *城市勘测*, 2016(2): 93-96.
- DING J X, MA D F, GAO J, *et al.*. Analysis upon the influential factors of 3-D laser scanner data accuracy and control measures[J]. *Urban Geotech-*

*nical Investigation & Surveying*, 2016(2): 93-96. (in Chinese)

- [21] 张永彬,高祥伟,谢宏全,等.地面三维激光扫描仪距离测量精度试验研究[J].测绘通报,2014(12):16-19.

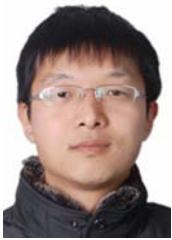
ZHANG Y B, GAO X W, XIE H Q, *et al.*. Test research of distance measurement accuracy of terrestrial 3D laser scanner[J]. *Bulletin of Surveying and*

*Mapping*, 2014(12): 16-19. (in Chinese)

- [22] 刘力,陈新东,熊玲,等.大口径非球面镜检测中激光跟踪仪测角误差研究[J].中国激光,2016,43(11):154-163.

LIU L, CHEN X D, XIONG L. *et al.*. Angle error investigation in laser tracker testing large aspheric mirrors [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(11): 154-163. (in Chinese)

#### 作者简介:



杜岩(1985—),男,河南新乡人,博士,助理研究员,2007年、2016年于北京科技大学分别获得学士、博士学位,现为北京科技大学土木工程系博士后,主要从事遥感技术在土木工程防灾减灾中的应用研究。E-mail: mutulei@163.com

#### 通讯作者:



谢谟文(1965—),男,湖北荆州人,教授,博士生导师,1985年于河海大学获得学士学位,1991年于武汉大学获得硕士学位,2003年于日本九州国立大学获得博士学位,现为北京科技大学空间技术防灾减灾研究所所长,主要从事遥感技术在土木工程防灾减灾中的应用研究。E-mail: mowenxie@126.com