

吕传振, 陈长云, 宋兆山. 三维激光扫描仪在跨断层形变监测中的实验研究[J]. 华南地震, 2018, 38 (2): 23–28. [LYU Chuanzhen, CHEN Changyun, SONG Zhaoshan. Application of 3D Laser Scanner in Cross Fault Monitoring [J]. South China journal of seismology, 2018, 38(2): 23–28]

# 三维激光扫描仪在跨断层形变监测中的实验研究

吕传振, 陈长云, 宋兆山  
(中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 三维激光扫描系统是集成了多种高新技术的非接触式主动测量方式的对地观测系统。该技术可一次性获取监视区域密集点云数据, 将传统的以点代面的监测方法发展为地形、地物三维空间观测, 既可进行区域微变形监测, 亦可对兴趣点的变形进行监测。当前应用研究主要针对断层活动相关的构造地形、地貌展开, 其在高精度跨断层形变测量领域应用较少。以唐山地震台跨断层形变观测场地为试验场地, 检验该技术用于跨断层形变测量的可行性。经过多次实验, 目前中短距离上可检测到毫米级的变化量。随着研究的不断深入, 其在断层三维形变监测中有着很大的应用前景。

**关键词:** 三维激光扫描; 跨断层; 形变监测

中图分类号: TP311.52      文献标志码: A      文章编号: 1001-8662(2018)02-0023-06  
DOI: 10.13512/j.hndz.2018.02.004

## Application of 3D Laser Scanner in Cross Fault Monitoring

LYU Chuanzhen, CHEN Changyun, SONG Zhaoshan

(The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration, Tianjin 300180, China)

**Abstract:** 3D laser scanning system is a non-contact and active earth observation system which is integrated with a variety of high and new technique. The technique can obtain dense point cloud data of monitoring area at one time which improves the traditional monitoring method of fanning out points to area to three-dimensional space observation of terrain and ground objects. This method can not only be used to monitor regional micro deformation monitoring, but also monitor the deformation of interest points. Current research mainly focuses on the fault activity related to structure topography landform, while, the research related to high-precision cross-fault deformation measurement is lacked. The feasibility of this technique for cross-fault deformation measurement was tested in the Tangshan Seismic Station cross-fault deformation observation site. Results of many tests show that millimeter-level change can be detected under short and medium distance situation. This method has great application prospect in the tomographic three-dimensional deformation monitoring area with the deepening of the research.

**Keywords:** 3D laser scanning; Cross-fault; Deformation monitoring

收稿日期: 2017-07-02

基金项目: 天津市自然科学基金项目 (17JCQNJC07600); 地震系统运维专项 (2200404) 联合资助。

作者简介: 吕传振(1986-), 男, 助理工程师, 主要从事地形变测量与精密工程测量。

E-mail: lvcz81@163.com.

## 0 引言

断层形变异常最直接地将地震孕育、发生过程中地壳的受力性质表现出来。在中、强地震发生前,震中一定范围内的断层会出现不同程度的活动变化,表现为断层运动速率的大小、断层受力方式出现异常变化等。跨断层形变测量是监测断层活动最直接、最有效的方法之一,能够提供断层运动的定量化结果,较好反映断层的近场变形特征。作为地震前兆观测的一种重要手段,跨断层观测手段多年来在我国地震监测预报方面发挥着重要的作用。国内多次震例表明地震前观测到了明显的断层形变异常,如 1976 年唐山 7.8 级地震前宁河水准 1~2 测线的突然变化、1996 年丽江 7.0 级地震前永胜水准 2~3 测线的突然变化等。目前跨断层形变测量主要采用的方法有跨断层短水准测量、跨断层短基线测量等观测手段。跨断层水准测量主要采用精密水准仪,跨断层基线测量方法有钢瓦尺基线测量、激光测距仪测量等观测手段。水准仪测量所需人力较多,传统钢瓦尺面临淘汰,设备笨重,劳动强度大,对观测人员要求较高;激光测距仪为点对点观测,以点代面反映断层形变信息,有可能错失前兆信息<sup>[1-3]</sup>。

为了更有效的获取跨断层监测区域的三维形变信息、提高工作效率以及解放劳动力的需要考考虑,尝试引进新技术进行跨断层形变监测。三维激光扫描系统集成多种高新技术,采用非接触式主动测量方式的对地观测系统。该技术在三维空间信息的实时获取方面产生了重大突破,为高分辨率地球空间信息的获取提供了一种全新的技

术手段,其具有自动化程度高、受天气影响小、数据产生周期短和精度高等特点。当前三维激光扫描技术的应用研究主要围绕断层活动相关的构造地形、地貌展开,特别是汶川地震后,地面激光雷达技术被应用于断层微地貌的测量;魏占玉等采用地面激光雷达技术开展了断层面形貌变化的对比研究;郑文俊等利用该技术进行了古地震探槽的研究。其在高精度跨断层形变测量领域的应用较少<sup>[4-7]</sup>。为了研究其能否应用于跨断层形变监测,以唐山地震台跨断层形变观测场地为试验场地,检验三维激光扫描技术用于跨断层形变测量的可行性。

## 1 实验方案设计

实验分为两个部分。第一部分将监测靶标安装在可以水平和垂直移动的螺旋测微器上,检验扫描仪不同距离上对已知形变量的识别敏感度。第二部分选取固定物体的表面,进行扫描,检测扫描仪两次扫描固定物体表面的扫描精度。

### 1.1 靶标球移动检测

首先在监测区域合理布设三个拼接靶标球用于两期点云数据之间的拼接配准(图 1)。在距离扫描仪 24 m 和 48 m 的观测墩上分别放置带螺旋测微器的检测靶标球,检测不同距离上的靶标球移动固定距离扫描仪检测灵敏度。采用 1/2 倍的扫描精度对距离约 24 m 和 48 m 处的两个带测微器的靶标球进行测量。同时采用 1 倍的扫描精度对距离 48 m 的处的两个带测微器的靶标球进行测量。



图 1 靶标球移动场地布设

Fig.1 Target ball layout of the venue

(1) 1/2 倍密度水平方向移动测试: ① 首次扫描一个初始位置; ② 两靶标球测微器在水平方向移动 4.5 mm, 进行第二次扫描; ③ 两靶标球测微器在水平方向移动 9 mm, 进行第三次扫描。

(2) 1/2 倍密度垂直方向移动测试: ① 首次扫描一个初始位置; ② 两靶标球测微器在垂直方向移动 5 mm, 进行第二次扫描; ③ 两靶标球测微器在垂直方向移动 10 mm, 进行第三次扫描; ④ 两靶标球测微器在垂直方向移动 15 mm, 进行第四次扫描。

(3) 1 倍密度水平方向移动测试: ① 首次扫描一个初始位置; ② 两靶标球测微器在水平方向移动 5 mm, 进行第二次扫描; ③ 两靶标球测微器

在水平方向移动 10 mm, 进行第三次扫描。

(4) 1 倍密度垂直方向移动测试: ① 首次扫描一个初始位置; ② 两靶标球测微器在垂直方向移动 5 mm, 进行第二次扫描; ③ 两靶标球测微器在垂直方向移动 10 mm, 进行第三次扫描。

## 1.2 固定目标检测

首先在监测区域合理布设三个拼接靶标球用于两期点云数据之间的拼接配准(图 2)。采用 1 倍测量精度对图 2 中标记的区域进行连续两次扫描, 间隔时间较短, 认为固定扫描区域没有发生形变, 检测扫描仪对固定目标重复扫描的精度。

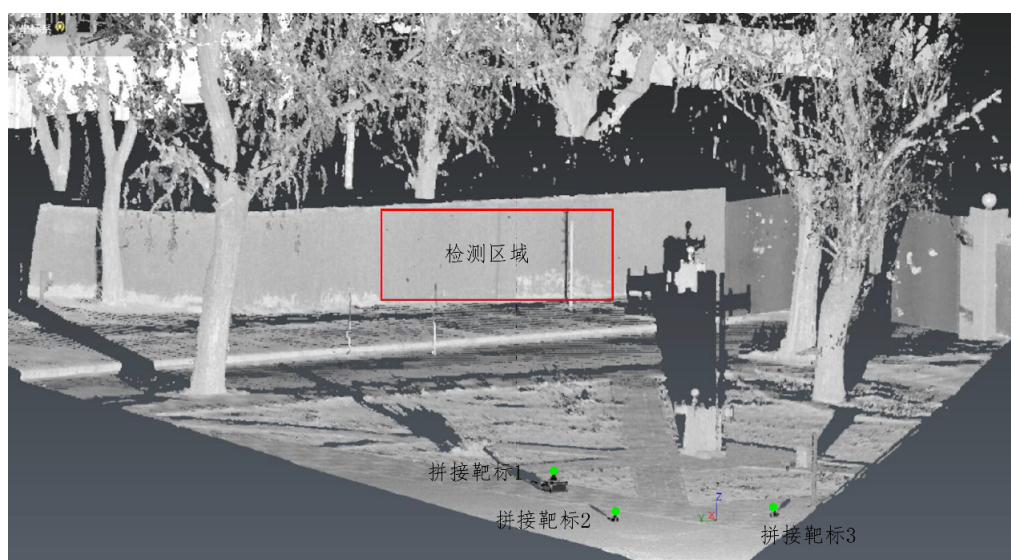


图2 固定目标扫描

Fig.2 Fixed target scan

## 2 测量结果及分析

### 2.1 靶标球移动检测分析

将两站点云数据采用预先布置的靶标球进行拼接、平差、提取目标靶标点云、删除杂点数据、拟合靶标球表面并给出球心坐标。图 3 可以看出球面拟合误差呈现正态分布, 误差在 1 mm 以内的数据达到 90%以上。

安置在 48 m 处的靶标球垂直方向位移测试结果显示: 球心拟合半径分别为 82.12 mm, 80.22 mm, 83.58 mm, 82.74 mm。靶标球移动 5 mm 测试结果分别为 5.5 mm, 6.7 mm, 4.2 mm。经过分析发现距离较远, 点云数量来看 1/2 倍扫描落在靶标球上的点密度不足, 导致拟合球不准确, 因此采用最高的 1 倍密度进行了补充实验。

从靶标球半径拟合精度来看误差为亚毫米级。

从移动固定距离靶标球检测结果来看误差为毫米级。因此可以得出三维激光扫描仪检测断层形变监测点(兴趣点)的精度达到毫米级(表 1~4)。

### 2.2 固定目标检测分析

固定目标扫描实验中两站点云数据之间利用预先布置好的三个靶标球进行拼接、测站平差、提取目标区域点云、删除杂点数据。通过软件自带的算法程序建立第一期扫描点云数据的最佳拟合平面(图 4), 将第二期扫描得到的点云数据投影到第一期扫描建立的最佳拟合面上, 分析两期点云误差的变化情况(图 5)。

从图 4 可以看出最佳拟合面点云误差分布呈现正态分布。第一期点云拟合平面后, 在实验区域的中间蓝色条状误差为负值, 上边缘局部区域误差为正。第二期点云数据投影到第一期点云数

据拟合的最佳平面时，在图像中间条状蓝色区域和上边缘局部区域出现较大误差，蓝色条状区域与第一期误差区域相近，为负值，上边缘局部区域与第一期无擦区域相近，为正值。单从图 5 可以看出误差 4 mm 以内误差占比 95.69%，3 mm 以

内的误差占比 71.09%。1 mm 内的误差占比 50.7%。根据两幅图像最佳拟合平面与两期数据的对应关系可以得到两期点云分布基本一致，可以认定三位激光扫描仪在检测固定目标时误差也能达到毫米级。

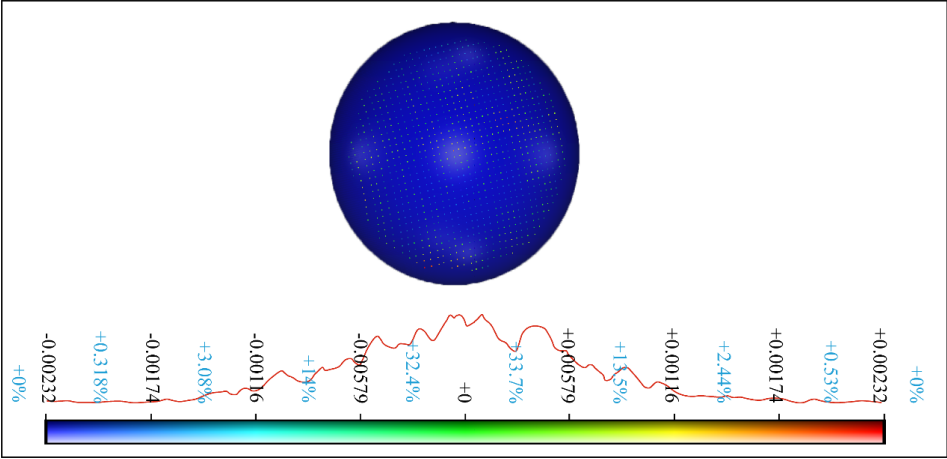


图 3 球面拟合及点云误差分布

Fig.3 Spherical fitting and point cloud error distribution

表 1 24 m 处移动靶标球半径拟合结果

Table 1 Moving target ball radius fitting result at 24 meters

移动方向	测次	球心拟合半径/mm	标准球半径/mm	半径差/mm
水平移动	首次扫描	72.77	72.5	0.27
	第二次扫描	72.44	72.5	0.06
	第三次扫描	72.27	72.5	-0.23
垂直移动	首次扫描	72.69	72.5	0.19
	第二次扫描	72.48	72.5	-0.02
	第三次扫描	72.70	72.5	0.20
	第四次扫描	72.12	72.5	-0.38

表 2 24 m 处移动靶标球距离检测结果

Table 2 Moving target detection result from the standard ball at 24 m

移动方向	拼接数据	移动量/mm	检测量/mm	误差/mm
水平移动	一二次扫描数据拼接	4.5	5.1	0.6
	二三次扫描数据拼接	4.5	5.3	0.8
	三四次扫描数据拼接	9.0	10.4	1.4
垂直移动	一二次扫描数据拼接	5.0	5.1	0.1
	二三次扫描数据拼接	5.0	5.3	0.3
	三四次扫描数据拼接	10.0	9.8	0.2
	一四次扫描数据拼接	15.0	15.5	0.5

表 3 48 m 处移动靶标球半径拟合结果

Table 3 Moving target ball radius fitting result at 48 m

移动方向	测次	球心拟合半径/mm	标准球半径/mm	半径差/mm
水平移动	首次扫描	72.54	72.5	0.04
	第二次扫描	72.66	72.5	0.16
	第三次扫描	72.40	72.5	-0.10
垂直移动	首次扫描	72.53	72.5	0.03
	第二次扫描	72.66	72.5	0.16
	第三次扫描	72.47	72.5	-0.03



表 4 48 m 处移动靶标球距离检测结果

Table 4 Moving target detection result from the standard ball at 48 m

移动方向	拼接数据	移动量/mm	检测量/mm	误差/mm
水平移动	一二次扫描数据拼接	5.0	5.2	0.2
	二三次扫描数据拼接	5.0	5.1	0.1
	一三次扫描数据拼接	10.0	9.8	0.2
垂直移动	一二次扫描数据拼接	5.0	4.9	0.1
	二三次扫描数据拼接	5.0	5.3	0.3
	一三次扫描数据拼接	10.0	10.3	0.3

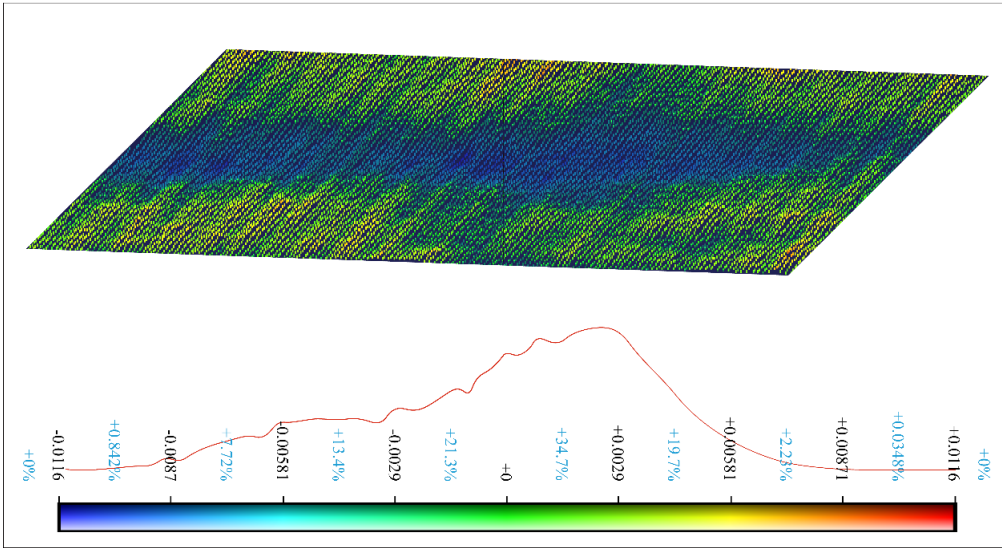


图 4 第一次扫描数据最佳拟合面

Fig.4 The best fit surface for the first sweep data

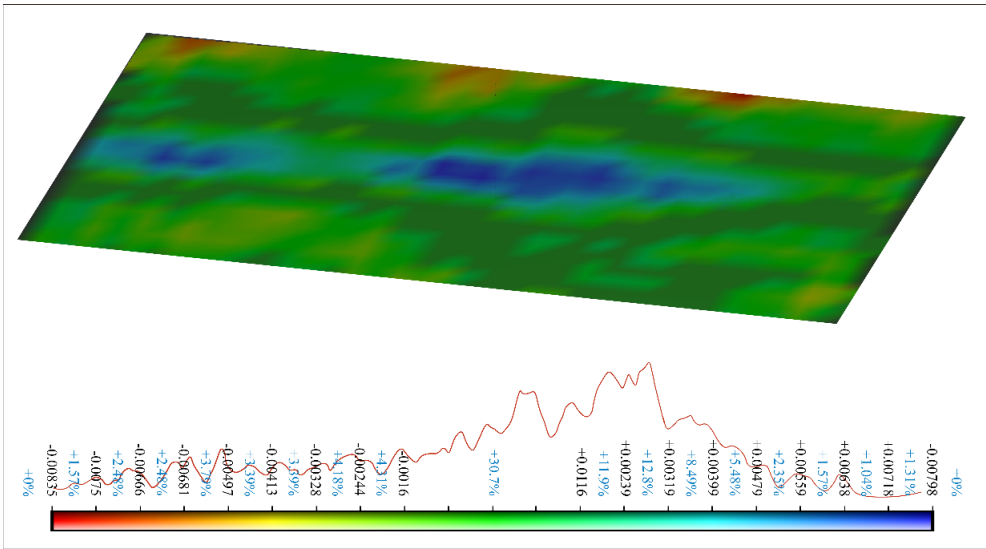


图 5 第二次扫描数据投影到第一次扫描建立的最佳拟合面上结果

Fig.5 The second scan data projected onto the best fit surface created by the first scan

3 结语

为了研究三维激光扫描仪在跨断层形变监测中的可用性，基于高精度法如三维激光扫描仪在唐山地震台开展了多次兴趣点和固定目标形变检

测实验。通过实验获得以下认识：

(1) 三维激光扫描仪在移动靶标球的检测中，通过人为加入已知形变量，利用扫描仪识别该形变信息，得出三维激光扫描仪可以检测毫米级误差。随着检测目标距离扫描仪的距离增加，扫描

到靶标的点云数量减少,拟合球面、球心的精度降低,对形变量检测变得不敏感,可以通过提高点云密度,提高扫描精度。同时实验表明三维激光扫描在固定距离上对空间前后、左右、上下的形变检测识别精度是相同的。

(2) 三维激光扫描仪在固定目标的检测中,首先将第一期数据拟合出平面作为参考,将后期数据投影到该参考上,因此,在数据分析中不仅需要讨论投影到最佳平面上的形变,同时还要兼顾本底点云投影误差的分布及量级,分析出更加可靠的信息。通过实验 50 m 范围内可以检测出毫米级的形变量。

三维激光扫描仪可以一次性快速、方便获取监测区域获取监视区域密集点云数据,通过与本底资料对比计算的到兴趣点或固定目标的三维形变信息,比传统的单一获取垂直形变或水平形变手段具有很大优势。随着研究的不断深入,这种非接触、大范围、高精度的形变监测手段在断层三维形变监测中有着很大的应用前景。

#### 参考文献:

- [1] 杨波,谢石文,韩成成,等. 台站智能化监控的关键技术. 华北地震科学[J]. 2017,35(3):32-38.
- [2] 李杰,冯志军,王强,等. 跨断层形变不同观测方法的对比分析[J]. 大地测量与地球动力学,2011,30(增刊):45-48.
- [3] 黄建平,李文静. 唐山台短水准、短基线数据分段特征[J]. 地震,2011,31(2):50-58.
- [4] 陈波,徐超,温增平. 三维激光扫描技术在震害调查中的应用[J]. 震害防御技术,2015,10(1):87-94.
- [5] 李峰,徐锡伟,陈桂华,等. 高精度测量方法在汶川  $M_s$  8.0 地震地表破裂带考察中的应用[J]. 地震地质,2008,30(4):1 065-1 075.
- [6] 魏占玉,石峰,高翔,等. 汶川地震地表破裂面形貌特征[J]. 地学前缘,2010,17(5):53-66.
- [7] 郑文俊,雷启云,杜鹏,等. 激光雷达(LiDAR):获取高精度古地震探槽信息的一种新技术 [J]. 地震地质,2015,31(1):232-241.