

# 基于三维激光扫描的桥梁变形检测及数据处理

邓晓隆, 田石柱

苏州科技大学土木工程学院, 江苏 苏州 215011

**摘要** 基于脉冲测距原理,利用三维激光扫描仪获取不同工况下模型的点云数据,分别从定性和定量两方面对点云数据进行处理,获得了拱桥关键构件的变形信息。提出一种基于标靶点云的桥梁变形检测方法,即采用以面取点的思路,通过圆形标靶轮廓点云来拟合标靶圆心坐标,以获得构件精确的变形值。此外,利用有限元软件建立模型,将计算结果与位移计测量值、有限元模型分析的结果进行对比。结果表明:该方法结合点云获取的桥梁变形数据具有更高的精度,同时避免了单点测量难以获取结构全面变形的缺点。

**关键词** 测量; 三维激光扫描仪; 脉冲测距; 标靶轮廓点云; 有限元模型分析; 桥梁变形

**中图分类号** U446.1; P24

**文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP55.071201

## Bridge Deformation Detection and Data Processing Based on 3D Laser Scanning

Deng Xiaolong, Tian Shizhu

*School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou, Jiangsu 215011, China*

**Abstract** Based on the principle of pulse ranging, we obtain bridge point cloud data by 3D laser scanner at different cases, and acquire deformation information of key components in this bridge by qualitative and quantitative analyses of point cloud data. In this paper, a new method based on target point cloud is proposed to get precise deformation of key components by fitting the center coordinate through the outline point cloud of circular target. The calculated results are compared with the results of the displacement transducer measurement and the finite element model (FEM) analysis. Comparison results show that the proposed method combined with the bridge deformation data acquired by point cloud has higher accuracy, and it avoids the disadvantage of single point cloud measurement that cannot get the overall deformation of the structure.

**Key words** measurement; 3D laser scanner; pulse ranging; outline point cloud of target; finite element model analysis; bridge deformation

**OCIS codes** 120.1880; 120.3930; 120.4290; 120.4640; 120.5800

## 1 引言

为保证桥梁结构在服役期间的正常使用与安全运营,定期对其进行变形检测,获取荷载状态下桥梁的变形信息,是分析桥梁健康状态的一项极为重要的技术措施<sup>[1]</sup>。传统的桥梁变形检测方法一般采用光学或电子测量仪器(如水准仪、经纬仪、全站仪等)对控制点的坐标进行周期性重复测量,获取桥梁的垂直位移和水平位移。但该类方法只能获取有限目

标点的变形数据,无法获得桥梁整体的变形信息,同时测量精度也难以保证<sup>[2-3]</sup>。

近年来发展快速的三维激光扫描技术具有测量效率高、测点多、测速快、建模效率高等优势<sup>[4-5]</sup>,弥补了传统桥梁变形检测的劣势,在桥梁检测领域的应用日益受到关注。Park等<sup>[6]</sup>将三维激光扫描仪应用到钢梁的变形监测中,通过提取单点云获取变形数据;徐进军等<sup>[7]</sup>研究了三维激光扫描技术在滑坡变形监测方面的应用,并据此提出了拟合法和重

**收稿日期:** 2017-12-11; **收到修改稿日期:** 2018-01-09

**作者简介:** 邓晓隆(1992—),男,硕士研究生,主要从事桥梁健康监测方面的研究。E-mail: 1553620798@qq.com

**导师简介:** 田石柱(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事桥梁健康监测方面的研究。

E-mail: tianshizhu@mail.usts.edu.cn(通信联系人)

心法两种滑坡监测方法;近年来,徐进军等<sup>[8]</sup>又将三维激光扫描技术应用到桥塔挠度监测方面,针对斜拉桥桥塔的特点,提取桥塔棱线处的点云,获取不同荷载情况下整个桥塔的挠度变化;黄承亮<sup>[9]</sup>将三维激光扫描技术应用到桥梁变形监测中,利用点云处理软件对点云进行建模,提取桥梁断面,从而对变形进行分析。目前,在利用三维激光扫描仪获取结构变形的研究中,常常通过对比构件变形前后某点坐标的变化值来获取变形数据,但在选取该点时,受限于点云数量多、测量环境复杂等因素,很难保证选取点的精确性,导致结果出现误差。基于三维激光扫描技术,本文从定性和定量两个角度对桥梁变形检测的测量方法进行探讨。从定量角度提出了一种通过圆形标靶轮廓点云来拟合圆心坐标的方法,即利用三维扫描仪获取构件上标靶点云,提取标靶轮廓点云的三维坐标,通过空间任意三点坐标确定标靶的圆心坐标,从而得到模型构件的变形情况,在一定程度上避免了单点测量的误差;利用有限元软件 Midas Civil 建立模型,获取不同工况下构件的变形数据,并与计

算得到的点云坐标变化值和位移传感器的测量值进行对比,验证所提方法的有效性和精度。

## 2 利用点云获取变形

### 2.1 利用点云计算变形的的方法

以往利用点云来计算变形的的方法主要是对空间目标单点的信息进行处理,即通过对比桥梁结构上同一点变形前后点云坐标的变化值来获取变形数据。该点选取的主观性很强,而且很容易受到外界客观环境的干扰,很难保证选点的精确性;同时,受大气传输、目标特性等方面的影响,在确定目标点位时容易造成误差偏大的结果<sup>[10]</sup>。因此,本研究从定性和定量两个角度分别分析结构的变形情况。从定性角度,通过点云对比可以直观地获得变形信息;从定量角度,提出在充分利用点云数据信息的基础上,通过拟合标靶的圆心坐标来提高结果的准确性,即采用以面取点的思路,充分利用标靶轮廓的点云坐标群,而不是仅用单点坐标去计算变形值。具体思路如图 1 所示

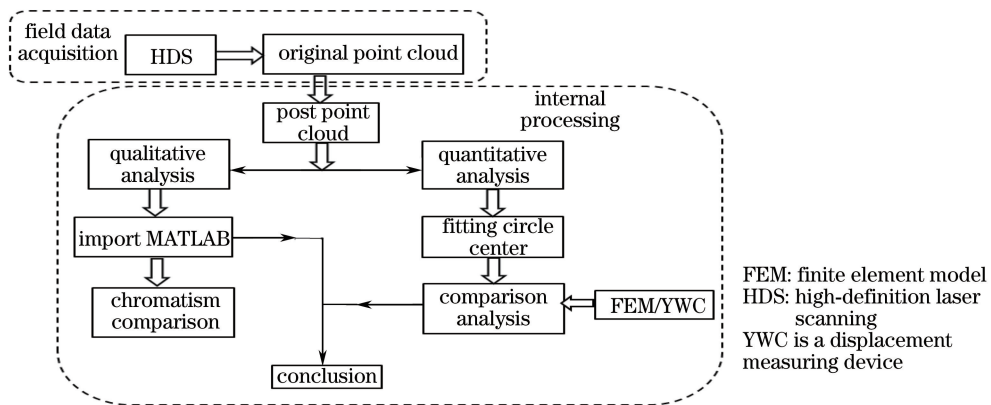


图 1 点云处理流程图

Fig. 1 Flow chart of processing point cloud

### 2.2 标靶轮廓点云拟合圆心坐标的方法

定量分析变形值时,可以取标靶圆心坐标来计算各工况下桥面系纵梁的竖向挠度,提取圆心坐标主要有两种思路:一是基于点云后期处理软件扫描到的标靶点云,直接采用人工方式提取标靶圆心坐标。此方法效率较高,但由于实验环境和实验人员主观性的影响,实验结果会有较大的误差。二是本研究提出的根据圆形标靶的轮廓点云来拟合圆心坐标的思路,如图 2 所示。其具体几何原理如下:已知圆形标靶圆周上的 3 点点云坐标为  $A(x_1, y_1, z_1)$ 、 $B(x_2, y_2, z_2)$ 、 $C(x_3, y_3, z_3)$ ,圆心坐标设为  $O(x_0, y_0, z_0)$ 。其中  $A$ 、 $B$ 、 $C$  均为已知量,圆心坐标  $O$  为

未知量。可列出如下方程:

$$\begin{aligned} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= \\ (x_0 - x_2)^2 + (y_0 - y_2)^2 + (z_0 - z_2)^2, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} (x_0 - x_1)^2 + (y_0 - y_1)^2 + (z_0 - z_1)^2 &= \\ (x_0 - x_3)^2 + (y_0 - y_3)^2 + (z_0 - z_3)^2, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{vmatrix} x_0 & y_0 & z_0 & 1 \\ x_1 & y_1 & z_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & z_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & z_3 & 1 \end{vmatrix} = 0. \quad (3)$$

将(1)、(2)式展开,分别可得:

$$\begin{aligned} 2(x_2 - x_1)x_0 + 2(y_2 - y_1)y_0 + 2(z_2 - z_1)z_0 + \\ x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_2^2 - y_2^2 - z_2^2 = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

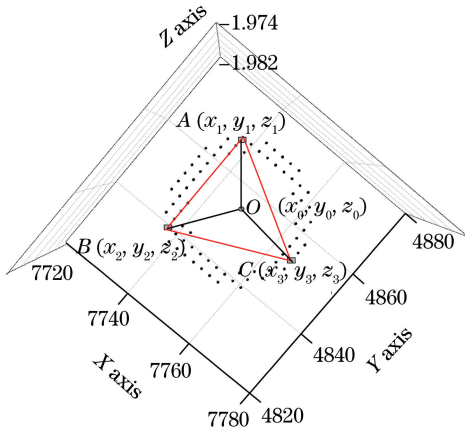


图2 标靶轮廓点云

Fig. 2 Outline point cloud of target

$$2(x_3 - x_1)x_0 + 2(y_3 - y_1)y_0 + 2(z_3 - z_1)z_0 + x_1^2 + y_1^2 + z_1^2 - x_3^2 - y_3^2 - z_3^2 = 0. \quad (5)$$

将(4)、(5)式分别写成如下形式:

$$A_2x_0 + B_2y_0 + C_2z_0 + D_2 = 0, \quad (6)$$

$$A_3x_0 + B_3y_0 + C_3z_0 + D_3 = 0. \quad (7)$$

根据四阶行列式对角线法则,(3)式等价于

$$A_1x_0 + B_1y_0 + C_1z_0 + D_1 = 0, \quad (8)$$

$$A_1 = y_1z_2 - y_1z_3 - z_1y_2 + z_1y_3 + y_2z_3 - y_3z_2, \quad (9)$$

$$B_1 = -x_1z_2 + x_1z_3 + z_1x_2 - z_1x_3 - x_2z_3 + x_3z_2, \quad (10)$$

$$C_1 = x_1y_2 - x_1y_3 - y_1x_2 + y_1x_3 + x_2y_3 - x_3y_2, \quad (11)$$

$$D_1 = -x_1y_2z_3 + x_1y_3z_2 + x_2y_1z_3 - x_3y_1z_2 - x_2y_3z_2 + x_3y_2z_1. \quad (12)$$

联立(3)~(5)式可求得圆心坐标为

$$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} A_1 & B_1 & C_1 \\ A_2 & B_2 & C_2 \\ A_3 & B_3 & C_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix}. \quad (13)$$

## 3 实验验证

### 3.1 拱桥模型加载实验

对一个拱桥模型进行加载实验,以探讨三维激光扫描仪在桥梁变形检测方面中的应用效果。实验系统由模型、相位式激光扫描仪(HDS)以及后期处理软件、YWC位移计等组成。模型外形和位移计测点(①~⑤)的布置如图3所示。

该拱桥模型的上部结构主要有拱肋、吊杆、横系梁、桥面板等,为刚性系杆刚性拱空间整体受力结构,桥面宽度为0.5 m,计算跨径为2.6 m,计算矢高

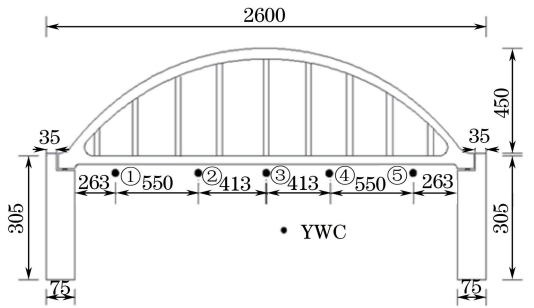


图3 模型立面与测点布置图

为0.45 m,矢跨比为0.173,拱肋拱轴线方程为: $y = -0.2693x^2 + 0.6599x + 0.0073$ 。采用荷重块加载,荷重块质量为20 kg。共分为两种加载工况。工况一:在桥面系跨中处加6块荷重块。工况二:在桥面系跨中处加10块荷重块。为了便于提取桥梁关键构件处的点云数据,在模型拱肋和桥面系纵梁处贴上平面标靶作为目标检测点;为了客观描述本实验三维激光扫描检测精度,在桥面系纵梁平面处用位移传感器进行位移数据的采集,如图4所示,其中①~⑦均为测点。

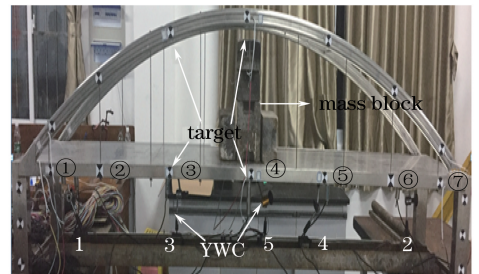


图4 位移计和标靶布置图

Fig. 4 Layout of displacement meter and target

### 3.2 实验数据处理与结果

#### 3.2.1 拱肋点云变形

处理点云后,将1#拱肋加载前和加载后的点云数据导出为txt格式,在MATLAB中通过编程将两期点云数据同时导入同一个三维坐标系中,并用MATLAB生成效果图。两期工况下的点云色差可以较为直观地表现出两种工况的拱肋变形情况。图5为工况一下1#拱肋变形图,基于此可以初步定性判定桥梁的变形情况。

#### 3.2.2 桥面系纵梁点云处理

提取标靶轮廓点云,利用2.2节中的方法求得各工况下标靶的圆心坐标,通过比较计算得到的加载前后模型构件靶心点云三维坐标的竖向坐标值,即可得到加载后的构件变形数据,表1为计算得到的工况一下加载前后桥面系纵梁靶点的圆心坐标。

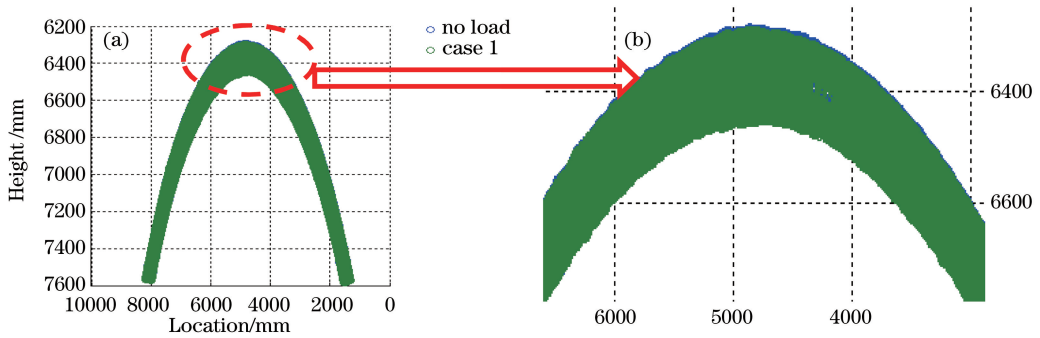
图5 工况一下1<sup>#</sup>拱肋的变形图。(a)整图;(b)局部放大图Fig. 5 Deformation of 1<sup>#</sup> arch rib at case 1. (a) Whole view; (b) partial enlarged view

表1 标靶圆心点云坐标拟合值

Table 1 Fitting value of target center point cloud coordinates

Case	Target number	Fitted coordinate /mm			Absolute value of vertical change value /mm
		<i>x</i>	<i>y</i>	<i>z</i>	
No load	1	7659.00	7812.00	-1.7762	—
	2	7695.00	7209.00	-1.8214	—
	3	7725.00	6195.00	-1.8920	—
	4	7752.00	4848.00	-1.9772	—
	5	7758.00	3468.00	-2.0603	—
	6	7719.00	2394.00	-2.1309	—
	7	7686.00	1671.00	-2.1820	—
Case 1	1	7656.00	7851.00	-1.7772	0.0010
	2	7698.00	7206.00	-1.9785	0.1571
	3	7737.00	6090.00	-3.1336	1.2416
	4	7782.00	4800.00	-3.5502	2.3730
	5	7761.00	3471.00	-3.3806	1.3213
	6	7725.00	2397.00	-2.7056	0.5747
	7	7701.00	1638.00	-2.3503	0.1683

### 3.3 对比验证

在实验过程中,通过设置的位移传感器来测量各工况下桥面系纵梁的竖向挠度,测量结果如表2所示。

表2 不同工况下位移传感器获得的竖向挠度

Table 2 Vertical deflection obtained by displacement transducer at different cases

Case	Deformation /mm				
	Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5
No load	0	0	0	0	0
Case 1	0.34	0.29	0.95	0.91	2.25
Case 2	0.39	0.47	0.89	0.94	2.5

除了用位移计和 HDS 获取模型在荷载作用下的变形,还可以利用有限元软件对结构建模,并对模拟加载工况进行分析,以获得类似的变形结果。利用有限元软件 Midas Civil 模拟该模型的加载实验。根据模型构件的具体尺寸和材料进行建模,该模型材料为 SUS3048Ni,查得其弹性模量  $E=206$  GPa,

泊松比  $\mu=0.25\sim 0.3$ 。这些参数可通过自定义的形式赋予到模型的材料特性中。为了得到相同荷载下模型的变形情况,根据加载工况在跨中及 1/4 处设均布荷载,工况一和工况二对应的均布荷载分别为 0.73 kN/m 和 1.22 kN/m。经有限元分析后,工况一和工况二模型的变形图分别如图 6 和图 7 所示。

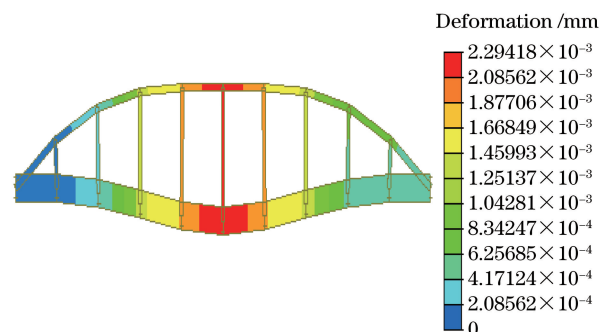


图6 Midas Civil 模拟的工况一变形图

Fig. 6 Simulated deformation by Midas Civil at case 1

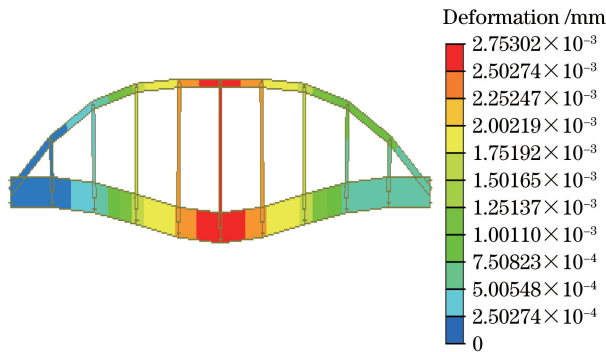


图7 Midas Civil模拟的工况二变形图

Fig. 7 Simulated deformation by Midas Civil at case 2

选取跨中位置的点为考察对象,采用2.2节的方法得到较精确的挠度,如表3所示,跨中挠度与3

表3 跨中挠度比较

Table 3 Comparison of deformation at midspan

Item	Case 1			Case 2		
	Deformation / mm	Average deformation / mm	Error / %	Deformation / mm	Average deformation / mm	Error / %
HDS	2.37		3.04	2.67		1.14
YWC	2.25	2.30	2.17	2.50	2.64	5.30
FEM	2.29		0.43	2.75		4.17

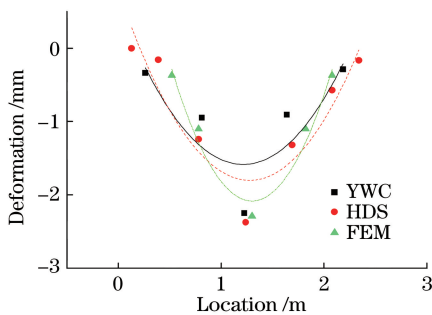


图8 工况一下的变形拟合曲线

Fig. 8 Deformation fitting curves at case 1

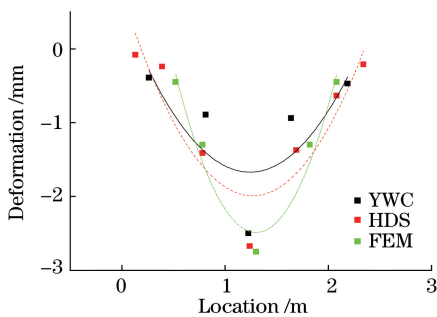


图9 工况二下的变形拟合曲线

Fig. 9 Deformation fitting curves at case 2

种方式测量结果平均值的误差在1%~4%之间。可见,通过对模型点云数据进行后处理可以减小误差,获得精度较高的数据。

将两种工况下桥面系纵梁靶心点云竖向的变化拟合成曲线,同时与位移计的测量值和有限元模拟值拟合曲线进行比较,结果如图8、9所示。图8、9展示了3种测量方式下构件不同位置处挠度的差异。由图8、9可以看出:通过HDS得到的纵梁上几个标靶圆心的变化值与利用位移计测量和有限元分析的结果基本相符;在桥面系纵梁竖向挠度的检测方面,3种方法所得的变形情况基本一致,三者之间的误差在±0.5 mm之内。考虑到该桥梁模型为刚性系杆刚性拱桥模型,在实际工程中,测量结果将会更具有代表性。

HDS获取模型加载前后的点云数据,从广域的定性分析和离散的定量分析两方面详细研究了三维激光扫描仪在桥梁变形检测中的应用。通过实验与模拟验证以及后期的数据处理可知:利用HDS获取的桥面系纵梁竖向变形数据,无论是从定性的变化趋势去判断其变形状况,还是在定量的数值比较方面,都具有良好的适用性;利用HDS能够得出模型整体或某一构件的完整变形,相对于位移计或其他传统的单点测量方式,具有极大的优势。通过分析可得如下结论:

1) 通过对加载前后1#拱肋点云数据的比较,可以较为清晰地获取加载后拱肋的变形情况,结果具有直观性,在实际工程中具有一定的应用价值。

2) 采用以面取点的思路,提出根据圆形标靶的轮廓点云来拟合圆心坐标,并将圆心坐标的计算值与通过位移计及有限元模型得到的桥面系纵梁竖向变形数据进行比较;结果表明,采用该思路后,计算结果的误差在1%~5%之间,准确性较高。通过靶心点云数据拟合出的变形曲线与实际情况具有一致性,同时具有测点多、效率高的特点。

3) 在本实验中,由于桥梁模型材料原因以及加载方式的限制,模型存在加载后变形不够明显的问题;同时,本研究主要是探索三维激光扫描仪在桥梁

## 4 结论

在对拱桥模型进行加载实验的基础上,利用

变形检测方面的应用,因此对于影响点云误差的因素,如目标反射率、点云配准等问题未进行讨论,但这些问题都会随着三维激光扫描技术的发展而得到解决。

### 参 考 文 献

- [1] Luo D A, Zhu G, Lu L, *et al.* Whole object deformation monitoring based on 3D laser scanning technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2005 (7): 40-42.  
罗德安, 朱光, 陆立, 等. 基于三维激光影像扫描技术的整体变形监测[J]. *测绘通报*, 2005(7): 40-42.
- [2] Ye G H, Deng S S, Xu W B, *et al.* Application of airborne LiDAR technology in dune deformation monitoring[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 55(5): 052802.  
叶光豪, 邓慷慷, 徐文兵, 等. 机载激光雷达技术应用于沙丘变形监测的研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 55(5): 052802.
- [3] Huang C L, Wu K, Xiang J. 3D laser scanning point cloud data compression method [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2009, 34(2): 142-144.  
黄承亮, 吴侃, 向娟. 三维激光扫描点云数据压缩方法[J]. *测绘科学*, 2009, 34(2): 142-144.
- [4] Zhang J X, Cheng X J, Cheng X L. Application of three-dimensional laser scanning technology in measurement of ship displacement [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1204003.  
张吉星, 程效军, 程小龙. 三维激光扫描技术在船舶排水量计量中的应用[J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1204003.
- [5] Xu X F, Cao Y P, Peng k. Pixel matching method in on-line three-dimensional measurement based on phase prediction[J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0612005.  
许幸芬, 曹益平, 彭旷. 基于相位预测的在线三维测量像素匹配方法[J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0612005.
- [6] Park H S, Lee H M, Adeli H, *et al.* A new approach for health monitoring of structures: terrestrial laser scanning [J]. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 2007, 22(1): 19-30.
- [7] Xu J J, Wang H C, Luo Y Z, *et al.* Deformation monitoring and data processing of landslide based on 3D laser scanning [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(7): 2188-2191.  
徐进军, 王海城, 罗喻真, 等. 基于三维激光扫描的滑坡变形监测与数据处理[J]. *岩土力学*, 2010, 31(7): 2188-2191.
- [8] Xu J J, Guo X W, Zhang H B. Pylon deflection monitoring based on terrestrial laser scanning [J]. *Journal of Geomatics*, 2017, 42(2): 67-70.  
徐进军, 郭鑫伟, 张洪波. 基于三维激光扫描技术的桥塔挠度测量[J]. *测绘地理信息*, 2017, 42(2): 67-70.
- [9] Huang C L. Research on bridge deformation monitoring methods based on laser scanning technology[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2015(s1): 206-209.  
黄承亮. 激光扫描技术下桥梁变形监测方法的研究[J]. *测绘通报*, 2015(s1): 206-209.
- [10] Cheng X L, Cheng X J, Li Q, *et al.* Laser intensity correction of terrestrial 3D laser scanning based on sectional polynomial model [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(11): 112802.  
程小龙, 程校军, 李泉, 等. 基于分段多项式模型的地面三维激光扫描激光强度改正[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(11): 112802.