

基于线结构光的水泥混凝土路面错台三维检测

李 伟¹, 沙爱民², 孙朝云¹, 郝雪丽¹

(1. 长安大学 信息工程学院, 陕西 西安 710064; 2. 长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 提出了一种基于线结构光的错台三维检测方法. 激光器发出的线结构光垂直入射到路面上, 然后由电荷耦合元件 (CCD) 相机拍摄经路面漫反射形成的光束, 实现原始数据采集. 依据激光三角法计算出路面三维高度数据, 并对三维数据特征和错台形状进行分析, 提出了致密错台量计算方法, 可得到平均错台量和最大错台量. 结果表明: 91% 的错台三维检测结果与直尺测量结果绝对误差在 2 mm 内.

关键词: 水泥混凝土路面; 错台检测; 线结构光; 三维检测
中图分类号: U414.75 **文献标志码:** A

Joint Faulting Three-dimension Detection Method on Cement Concrete Pavement with Line-structure Light

LI Wei¹, SHA Aimin², SUN Zhaoyn¹, HAO Xueli¹

(1. School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: In order to realize the accurate detection of joint faulting on cement concrete pavement, a kind of three-dimension detection method based on line-structure light was proposed. The structured light emitted from laser irradiated vertically on the road and the charge-coupled device (CCD) camera captured the beam which was formed by the pavement diffuse reflection, so as to realize the data acquisition. Then, the road three-dimension information was calculated based on laser triangulation algorithm. According to the three-dimension information data characteristics and the shape of cement concrete pavement joint faulting, the dense joint faulting value calculation method was proposed. The average value and maximum value of joint faulting were obtained. Experiment results show that 91% of the absolute error between three-dimension method results and measurement results by ruler is within 2 mm.

Key words: cement concrete pavement; joint faulting detecting; line-structure light; three-dimension detection

目前,常用的错台量检测方法有人工法和自动检测法. 人工法有佐治亚电子错台仪检测法^[1]和美国国家公路与运输协会(AASHTO)^[2-3]提出的测量方法. 这两种方法速度慢,交通干扰大,人为主观性强,精度低,并且由于采样点数的限制,对于斜平行错台、梯形错台、交叉错台等变形类错台存在无法表征的缺陷. 马荣贵^[4]建立了一种路面纵断面三维检测模型,可通过激光位移传感器抽样采集路面 20 点左右的深度信息,但由于采样点太少无法对错台量进行准确测量. 应用线结构光进行三维成像能够获取路面致密的三维信息,避免了以上各种方法采样点不足的缺点. 英红等^[5]根据双目摄像机的成像特点和水泥混凝土路面的图像特征,对接缝位置进行定位和错台计算,但其数学依据决定了该方法无法消除路面不一致性和多样性等自然环境所带来的影响,在水泥面板变形或倾斜的情况下,错台量的计算将产生较大的失真. 本文在路面构造深度测量装置^[6]的基础上,依据激光三角测量法^[7-11]原理,设计了基于线结构光^[12-13]的水泥混凝土路面错台三维检测方法.

1 基于线结构光的水泥混凝土路面错台三维检测系统

1.1 系统基本原理

本系统利用 808 nm 线阵激光照射路面,由面阵电荷耦合元件 (CCD) 相机拍摄路面上变形的激光线,再根据激光三角法计算路面高程数据,从而进一步计算得到错台量. 为了获得最佳的测量效果,在三

收稿日期: 2014-07-18

基金项目: 国家自然科学基金(51408045); 中央高校基本科研业务费专项资金(2013G3242007); 交通部西部交通建设科技资助项目(2011318490750); 陕西省青年科技新星项目(2013kjxx-93)

第一作者: 李 伟(1981—),男,副教授,工学博士,主要研究方向为光电检测技术. E-mail: houqing841128@163.com

通讯作者: 郝雪丽(1987—),女,博士生,主要研究方向为道路交通智能无损检测. E-mail: xuelihao_lucky@126.com

维相机的镜头前安放带通滤光片,滤除该激光频段以外的其他杂散光,系统原理如图 1 所示.线阵激光器垂直照射到路面,激光器发出的激光束经透镜扩束后照射到路面上形成一条激光线,由 CCD 相机拍摄路面上变形的激光线条进行成像,然后根据激光三角算法计算出激光照射路面位置致密的三维信息数据.

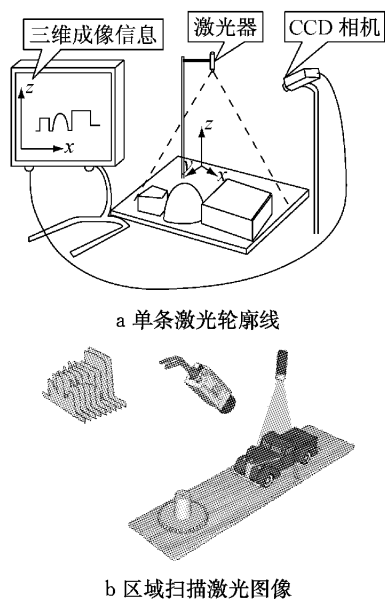


图 1 激光三维成像系统原理

Fig.1 Three-dimension imaging system principle

1.2 系统设计实现

基于线结构光的水泥混凝土路面错台三维检测系统主要设备包括高性能工控机、高分辨率面阵相机、红外线阵激光器、全球定位系统(GPS)接收机、步进电机、编码器、不间断电源(UPS),以上设备封装固定均安装在检测车后部,以实现停车静态定点检测,系统架构布局如图2所示.其中,激光光源提

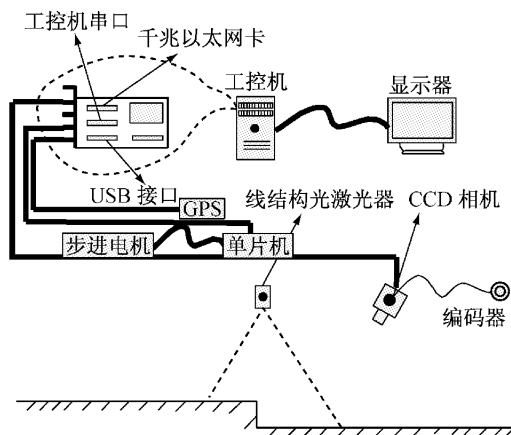


图 2 系统架构布局图

Fig.2 System architecture layout

供照射路面的激光,再由面阵相机捕获激光照射路面形成的光栅,为计算路面的错台量提供原始数据;UPS电源为整个系统供电;编码器将检测车前进的位移信号转换成电信号传输给工控机,工控机通过软件控制将电信号以触发的形式发送给 CCD 相机;最后,将采集得到的路面信息存储在工控机中.

移动式连续测量过程中车辆必然会有不同幅度的上下振动,要消除振动给测量结果带来的影响,就必须进行振动补偿.考虑到整个系统的复杂度和测量结果的准确性,目前系统采用的是停车测量的方式,即检测人员发现路面有错台后,停车对该区域进行错台量检测.

1.3 系统相机标定

相机在默认模式下获得的数据是未经过标定的,要获取有意义的路面高度数据,在开始采集数据之前相机必须先进行标定.

相机的标定工作主要由校准工具及其配套的软件配合完成.激光束照射在校准工具表面,由 CCD 相机传感器采集激光轮廓线并传输到计算机.校准软件和 CCD 相机相连,获取采集到的轮廓线,并对其分析,如图 3 所示.手持校准工具上下移动,调整软件上显示的轮廓线位置,使轮廓线与标准位置逐渐重合,重合后软件会发出提示音,此时就完成了对 CCD 相机传感器的校准工作.

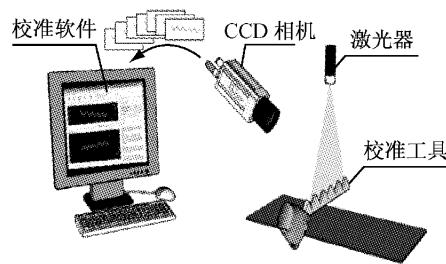


图 3 相机标定图

Fig.3 Camera calibration

2 路面激光三维数据预处理

采集路面原始三维信息数据时,由于各种原因会存在噪声点.如当采集路面有裸露的石头时,一些光点会随机发生镜面反射,或是路面上细小的裂缝光线无法到达,都可能造成在三维信息数据里有阶跃或高度为零的噪声点,如图 4 所示.

噪声点会影响特征数据的精度,导致重构曲面、曲线不光滑,降低了模型重构的精度,因此在进行错台量计算前必须对原始数据进行滤波处理.基于图

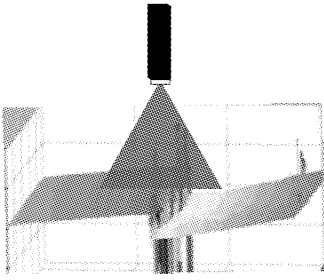


图4 成像系统受噪声影响的三维数据图像

Fig.4 Three-dimension data image affected by noise

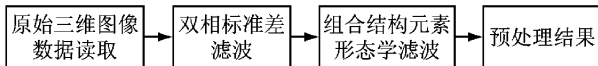


图5 图像预处理流程示意图

Fig.5 Image preprocessing process diagram

像的预处理分析方法如图5所示.具体过程如下:

(1) 从采集系统获得三维数据,水泥混凝土路面错台原图如图6所示,三维显示如图7所示.

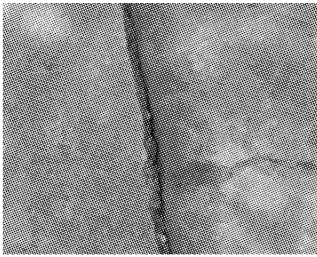


图6 路面错台图像采集原图

Fig.6 Original image acquisition of joint faulting

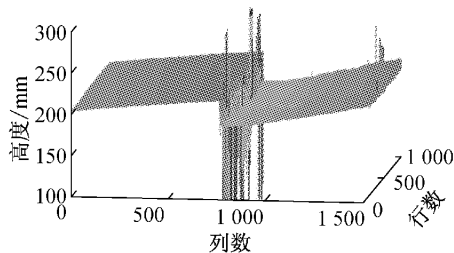


图7 错台采集数据三维显示

Fig.7 Three-dimension display of original data

(2) 以标准差来度量行、列数据点值偏离对应行、列的程度,偏离程度超过阈值的数据认为是噪声点,用对应行、列的均值替代该噪声点,具体实现方法如下:

逐行取三维图像数据矩阵 O 的数据,如对于第 i 行,可得

$$R_i = (z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{in}), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (1)$$

式中: R_i 表示矩阵 O 中第 i 行数据; z_{ij} 表示矩阵 O 中第 i 行、第 j 列的数据.按式(2)与(3)求出第 i 行数据 R_i 的算术平均值 \bar{R}_i 和标准差 S_i ,如下所示:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_{ij} \quad (2)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (z_{ij} - \bar{R}_i)^2} \quad (3)$$

依次取该行中的每一个数据 z_{ij} ,如果满足条件

$$\frac{|z_{ij} - \bar{R}_i|}{S_i} > k \quad (4)$$

则用算术平均值 \bar{R}_i 代替该点数据 z_{ij} .式(4)中 k 是行滤波系数, k 取 3~8.

用同样的方法逐列处理,得到三维图像数据矩阵 O' .

(3) 采用沿水平夹角 45° 方向和 3×3 的结构元素模板 T_1 ,对三维图像数据矩阵 O' 作开运算,去除孤立数据点, T_1 如图8所示.

0	0	1
0	1	0
1	0	0

图8 线结构元素模板

Fig.8 Line-structure element template

(4) 采用 5×5 的球结构元素模板 T_2 对数据矩阵作膨胀运算,填充边缘以消除数据中的零值点,去噪后的三维图像数据矩阵

$$O'' = (O' \circ T_1) \oplus T_2 \quad (5)$$

去噪后三维图像显示如图9所示.

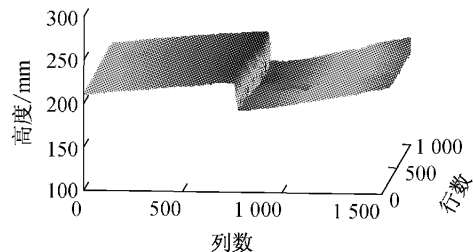


图9 错台数据预处理后的三维显示

Fig.9 Three-dimension display of data after preprocessing

3 错台量计算方法

3.1 错台形状分析

依据其变形情况,错台可分为平行错台、梯形错台和交叉错台,其横断面分别如图10~12所示.其中平行错台根据纵断面的不同又包含两种类型:两面板水平平行,如图13所示;两面板斜平行,如图14所示.

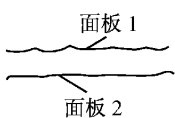


图 10 平行错台
Fig. 10 Parallel joint faulting

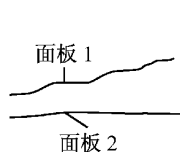


图 11 梯形错台
Fig. 11 Trapezoidal joint faulting

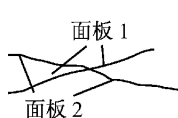


图 12 交叉错台
Fig. 12 Cross joint faulting

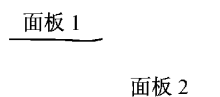


图 13 两面板水平平行(纵断面)
Fig. 13 Two parallel panel level (vertical section)

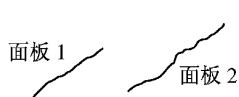


图 14 两面板斜平行(纵断面)
Fig. 14 Inclined parallel two panel (vertical section)

两面板水平平行的错台是现有检测方法重点检测对象,而针对路面变形严重的其他错台如斜平行错台、梯形错台、交叉错台检测则未见相关研究报告。若要真实地检测错台量,需考虑错台的倾斜因素,计算出错台量的最大值、平均值,才能对错台进行准确分级和评价。

3.2 致密错台量计算方法

本文提出的最大错台量和平均错台量的计算方法如下:将预处理后的三维图像数据矩阵作为输入矩阵,记为 $O'_{m \times n}$,其中 m, n 分别表示矩阵的行数和列数,此处取 $m = 1\,000, n = 1\,536$;依次读取矩阵 $O'_{m \times n}$ 的每一行,逐行求其所对应的错台量,再取所有行错台量绝对值的最大值作为最大错台量,取所有行错台量绝对值的均值作为平均错台量。具体步骤如下:

(1) 求第 i 行错台量。取横坐标相差 n 的数据两两作差后取绝对值,对该行数据处理完毕,即得到一组高度差值。取该组数据的最大值,即为该行的错台量,记为 h_i 。

(2) 按步骤(1)对整个矩阵的 1 000 行数据依次处理,可得到该矩阵包含的 1 000 行数据对应的 1 000 个错台量, $h_1, h_2, \dots, h_{1\,000}$ 。

(3) 求 h 的最大值为

$$h_{\max} = \max(h_1, h_2, \dots, h_{1\,000}) \quad (6)$$

h_{\max} 即为被检测路面区域错台的最大错台量。

(4) 求 h 的算术平均值 \bar{h} 为

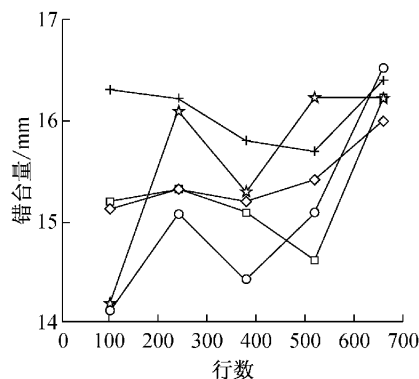
$$\bar{h} = \frac{1}{1\,000} \sum_{i=1}^{1\,000} h_i \quad (7)$$

\bar{h} 即为被检测路面区域出现错台的平均错台量。由于本系统检测范围为 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$,采集 1 000 行数据,即每隔 $50/1\,000 = 0.05\text{ cm}$ 有一个错台高度数据;取 $N = 100$,即每隔 5 cm 提取一对错台高度数据进行计算。5 cm 的范围在减小了计算量的前提下既可以完全包含错台宽度,又避免了取值太大造成的计算误差。因此,本系统取 $N = 100$ 进行了试验。

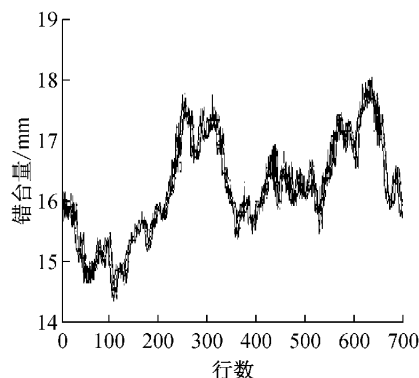
4 试验结果与分析

4.1 错台三维检测系统稳定性试验

针对常见错台,为了测试错台三维检测系统稳定性,分别用水准仪检测法和激光法对同一错台各测量五次,进行对比试验,如图 15 所示。



a 水准仪五次测量结果



b 三维检测五次测量结果

图 15 平行错台试验结果比较

Fig. 15 Experimental results of parallel joint faulting

图 15a 是用水准仪测量错台量,对错台两个水泥板上有限的采样点(本试验选取了五个采样点)重复测量五次,并用不同的线型表示五次测量结果;图 15b 是用三维检测方法在同一错台两个水泥板上进行致密采样,重复检测五次的结果。

由图 15 可知,水准仪测量法在同一个点五次测量值都有大于 1 mm 的偏差,对错台量影响较大。因此,对于常见的错台,试验结果表明本系统错台量测

量法比水准仪测量法稳定性高。

4.2 错台三维检测系统准确性试验

为了验证错台计算方法的准确性,分别进行室内及现场试验。将错台三维检测系统错台量的测量结果与传统钢尺得到的结果进行对比试验分析,结果如图 16~17 所示。

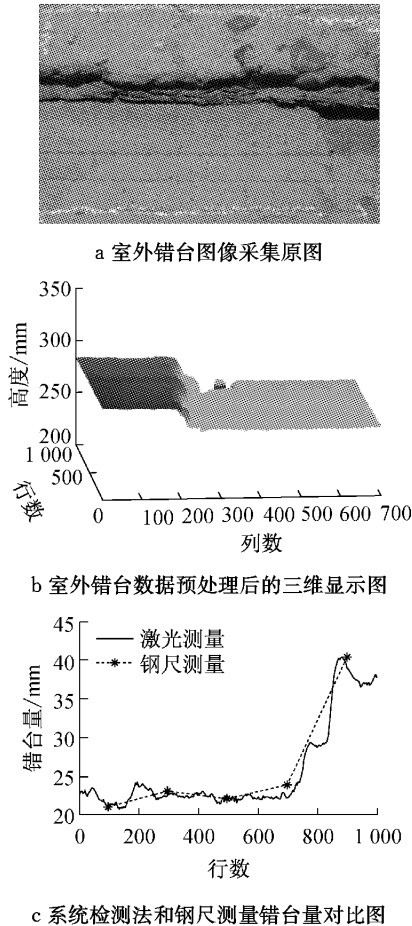


图 16 室外错台对比结果

Fig. 16 Comparison of outdoor joint faulting

对比图 16 和 17,可以定性地看出室内、室外该错台三维检测系统所得结果与钢尺测量结果一致,并且能够得到检测路面内错台所有纵断面的错台量,根据对错台分级和评价的要求,这里保存平均错台量和最大错台量的值。

对多组错台测量,采用错台三维检测方法 with 直尺测量方法,部分结果如表 1 所示。

多组错台测量结果表明,三维检测结果与直尺测量结果基本吻合,两者的绝对误差在 3 mm 以内,91%的错台绝对误差在 2 mm 内,并且本文错台三维检测还给出了最大错台量的值。

5 结论

(1) 本文提出了基于线结构光的水泥混凝土路

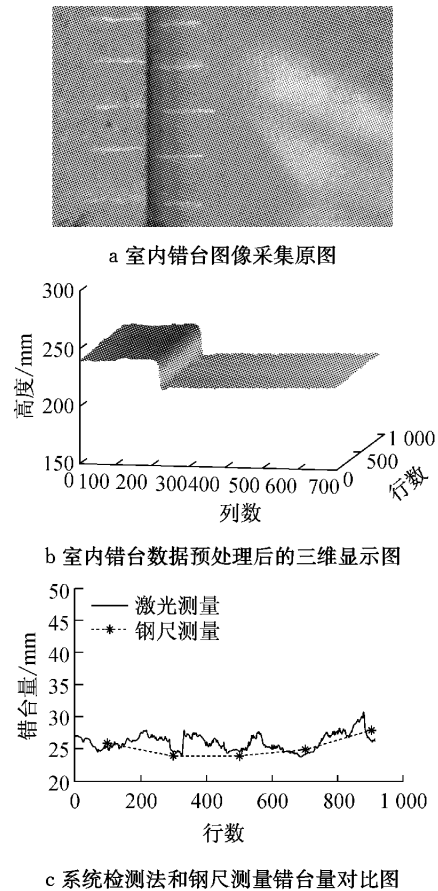


图 17 室内错台对比结果

Fig. 17 Comparison of indoor joint faulting

表 1 错台三维检测结果与直尺测量结果

Tab.1 Measuring results of three-dimension system and ruler

错台量/ mm	错台 编号	\bar{h} (直尺 法)/mm	\bar{h} (激光 法)/mm	绝对 误差/ mm	相对 误差	h_{\max} (激光 法)/mm
<5	1	1.4	1.5	0.1	0.071	2.1
	2	2.0	3.2	1.2	0.600	3.5
	3	3.3	2.9	0.4	0.121	5.7
	4	4.7	4.9	0.3	0.064	7.2
5~<10	5	6.3	7.4	1.1	0.175	9.5
	6	6.9	7.7	0.8	0.116	9.3
	7	8.6	9.1	0.5	0.058	11.4
	8	9.2	7.9	1.3	0.141	10.1
≥10	9	24.3	26.1	1.8	0.074	30.9
	10	30.1	32.6	2.5	0.083	39.2
	11	42.8	40.1	2.7	0.063	45.3
	12	46.7	48.5	1.8	0.039	54.5

面错台三维检测方法,通过采集被检测路面致密的三维数据,消除了日光强度变化对采集数据的影响,保证了采集数据的有效性。

(2) 利用预处理后三维数据重构路面的三维形态特征,实现路面状况的三维显示。

(3) 根据错台的定义和实际路面状况分析结

果,错台的形状大致可分为平行错台、梯形错台、交叉错台.本文采用致密错台量计算方法,可得到致密的错台量信息,从而求得平均错台量和最大错台量,使得各种变形错台的检测和评价成为可能,并为水泥混凝土路面技术状况评定、路面养护、路面错台的分级和处置提供依据.

参考文献:

- [1] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Distress identification manual for the long-term pavement performance program [R]. 4th ed. Springfield: Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, 2003.
- [2] Zokaie T. AASHTO-LRFD live load distribution specifications [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2000, 5(2): 131.
- [3] U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration. Preliminary evaluation and analysis of LTPP faulting data-final report [R]. Springfield: Office of Infrastructure Research and Development, Federal Highway Administration, 2000.
- [4] 马荣贵. 路面三维检测系统原理及方法研究[D]. 西安: 长安大学, 2008.
MA Ronggui. Study on the principle and method of road three-dimension measurement system [D]. Xi'an: Chang'an University, 2008.
- [5] 英红, 谈至明. 基于双目视觉的水泥混凝土路面错台检测方法[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(2): 247.
YING Hong, TAN Zhiming. Cement concrete pavement faulting detection and recognition based on binocular vision [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(2): 247.
- [6] 孙朝云, 冯兴乐, 李伟, 等. 一种沥青路面构造深度的测量装置: 中国, 0137734[P]. 2012-04-01.
SUN Zhaoyun, FENG Xingle, LI Wei, *et al.* A kind of measuring device of asphalt pavement texture depth: China, 0137734[P]. 2012-04-01.
- [7] Wu J-H, Chang R-S, Jiang J-A. A novel pulse measurement system by using laser triangulation and a cmos image sensor [J]. Sensors, 2007, 7(12): 3366.
- [8] Schalk P, Ofner R, O'Leary P. Pipe eccentricity measurement using laser triangulation [J]. Image and Vision Computing, 2006, 25(7): 1194.
- [9] 王晓嘉, 高隽, 王磊. 激光三角法综述[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25(suppl. 3): 601.
WANG Xiaojia, GAO Jun, WANG Lei. Survey on the laser triangulation [J]. Instrument Journal, 2004, 25 (suppl. 3): 601.
- [10] 唐成, 王方程, 李晓东, 等. 基于激光三角法原理的轮对几何参数自动检测系统[J]. 机械工程师, 2009(7): 92.
TANG Xu, WANG Fangcheng, LI Xiaodong, *et al.* Based on laser triangulation method principle of wheelset geometric parameters automatic detection system [J]. Manufacturing Informatization, 2009(7): 92.
- [11] Barone S, Paoli A, Rationale A V. Shape measurement by a multi-view methodology based on the remote tracking of a 3D optical scanner [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2011, 50(3): 380.
- [12] 胡文川, 袁祖荣, 张国雄. 基于线结构光的大尺寸空间角度检测算法设计与实现[J]. 光电子: 激光, 2013, 24(2): 329.
HU Wenchuan, QIU Zurong, ZHANG Guoxiong. Algorithm design and realization for large scale space angle measurement based on linear structured light [J]. Journal of Optoelectronics: Laser, 2013, 24(2): 329.
- [13] 冷惠文, 徐春广, 肖定国, 等. 基于线结构光的复杂深孔内轮廓三维测量方法[J]. 北京理工大学学报, 2013, 33(2): 139.
LENG Huiwen, XU Chunguang, XIAO Dingguo, *et al.* A method for measuring complicated deep-hole profile using line-structured-light sensor [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2013, 33(2): 139.