

一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法

高 岩 邵双运* 冯其波

(北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

摘要 提出一种激光扫描自动测量轮对几何参数的方法。传统方法将某一特定位置测量的踏面轮廓与标准轮廓进行比较,进而测量出各个参数;该方法采用两个线结构光视觉传感器对轮对进行三维扫描,通过计算机对点云数据进行处理,计算出直径、轮缘厚、踏面磨耗以及轮辋宽等参数,对线结构光视觉传感器与轮对的相对位置和姿态没有严格要求,提高了测量精度。实验结果证明了方法的可行性。

关键词 激光技术;自动测量;列车车轮;线结构光视觉传感器

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0708005

A Novel Method for Automatically Measuring Wheel Geometric Parameters by Laser Scanning

Gao Yan Shao Shuangyun Feng Qibo

(Key Laboratory of Luminescence and Optical Information of the Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract A method for automatically measuring wheel geometric parameters by laser scanning is presented. The running surface of wheel is scanned by the line structured light vision sensors, and the geometric parameters including wheel diameter, flange thickness, tread wear and rim width are calculated after processing the point cloud. This is different from the traditional methods which measures the geometric parameters by comparing a measured profile to the standard profile of wheel tread. This method is not strict with the relative position between the line structured light and the wheel. The feasibility of this method is demonstrated by experimental results.

Key words laser technique; automatic measurement; train wheels; line structured light vision sensor

OCIS codes 120.4640; 150.6910; 100.6890

1 引 言

轮对几何参数的非接触自动测量系统可以提高轮对检修的效率,对于保障列车的安全运行有重要意义^[1]。近年来,国内外出现了多种形式的轮对几何参数自动测量系统,主要利用基于线结构光的视觉传感技术测量轮对踏面轮廓,将测量轮廓与标准踏面轮廓进行比较,从而得出各个几何参数^[2-6]。这种方法要求测量时传感器的光平面经过轮对中心并且垂直于轮对内侧面,对光平面和轮对之间相对位置与姿态要求非常严格,否则会造成测量误差。

本文介绍了一种新的测量方法:利用线结构光扫描技术测量出轮对踏面三维形貌,然后通过处理点云数据计算出轮对的踏面直径、轮缘厚、踏面磨耗以及轮辋宽等几何参数。测量系统对线结构光视觉传感器与轮对之间的相对位置没有严格的要求,提高了轮对几何参数测量精度。

2 轮对几何参数自动测量系统

如图 1 所示,测量系统由两组线结构光视觉传感器、电控平移台以及数据采集与处理系统组成。

收稿日期: 2012-12-18; 收到修改稿日期: 2013-03-25

基金项目: 国家自然科学基金(51275035)、中央高校基本科研基金(2011JBM300)

作者简介: 高 岩(1984—),男,博士研究生,主要从事光电检测、机器视觉等方面的研究。

E-mail: gaoyanbjtu@hotmail.com

导师简介: 冯其波(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测方面的研究。E-mail: qbfeng@bjtu.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: SHAO_SY@tom.com

被测轮对放置在支撑机构上,当测量开始后,电控平移台带动线结构光传感器以 5 mm 的测量间隔对轮对踏面进行激光扫描测量。

扫描完毕后,数据采集与处理系统对采集到的

数据进行处理,计算出各个被测几何参数。机体中有两组线结构光视觉传感器,分别测量左右两个车轮的几何参数。测量完成后,数据采集与处理系统将自动生成电子报表,并且具有报警等功能。

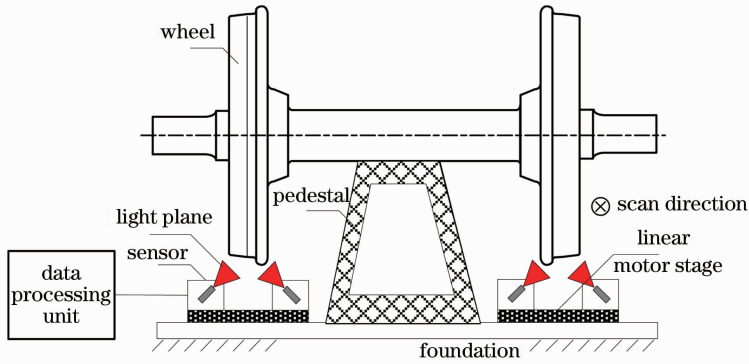


图 1 轮对几何参数自动测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wheel geometric parameters automatic measurement system

3 轮对几何参数测量原理

3.1 测量轮对踏面轮廓

线结构光视觉传感器由线激光器和 CCD 相机按三角法原理构成。通过对传感器进行标定,可以确定 CCD 图像平面和光平面的透视对应关系,将图像平面的二维坐标转换为摄像机坐标系中的三维坐标,并最终转换到光平面上的坐标系,从而结合扫描运动实现对物体轮廓的测量^[7-11]。

本系统采用两个线结构光视觉传感器对车轮的踏面轮廓进行测量。如图 2 所示,车轮两侧的传感器分别测量到一部分踏面轮廓,轮廓的坐标是在线结构光视觉传感器自身的坐标系中定义的。

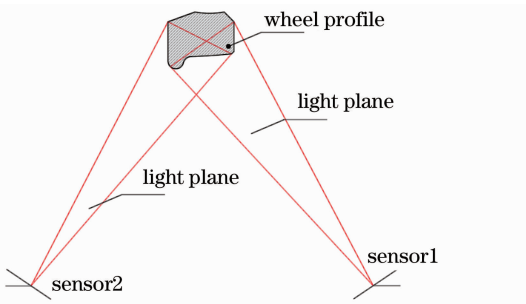


图 2 两个传感器的测量范围

Fig. 2 View field of the two sensors

为了得到完整的踏面轮廓,需要把传感器测量到的轮廓坐标从各自的传感器坐标系转换到局部世界坐标系。如图 3 所示,在两个传感器的公共视野放置一块空间网格标定板,并将局部世界坐标系建立在标定板上。采用对映函数标定方法^[12],可以得

到空间点坐标由传感器坐标系到局部世界坐标系的转换关系。设 P 是空间中的点,其在全局坐标系中的坐标与各自传感器中的坐标的关系为

$$P_w = R_1 P_{s1} + T_1, \quad (1)$$

$$P_w = R_2 P_{s2} + T_2, \quad (2)$$

R_1 和 R_2 是旋转矩阵, T_1 和 T_2 是平移矩阵。通过(1)式与(2)式,可以将两部分踏面轮廓配准,得到完整踏面轮廓。由于测量系统的结构固定,所以扫描过程中各个位置的局部世界坐标系一致。扫描结束后,将各个位置测量到的轮廓坐标由局部世界坐标系转换到全局世界坐标系中。

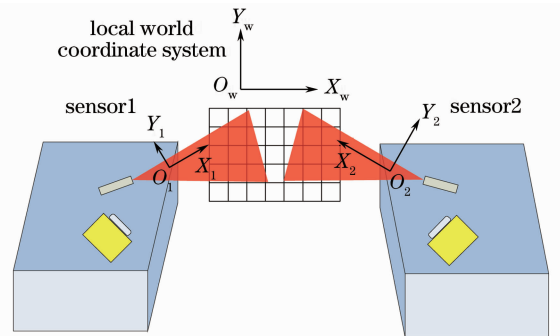


图 3 坐标系转换示意图

Fig. 3 Schematic diagram of coordinate system transformation

3.2 数据处理算法

利用线结构光视觉传感器对踏面扫描后,可以测量出轮对踏面的轮廓,如图 4 所示。对踏面轮廓数据处理后,可以计算出各个几何参数。本部分将详细介绍数据处理算法。

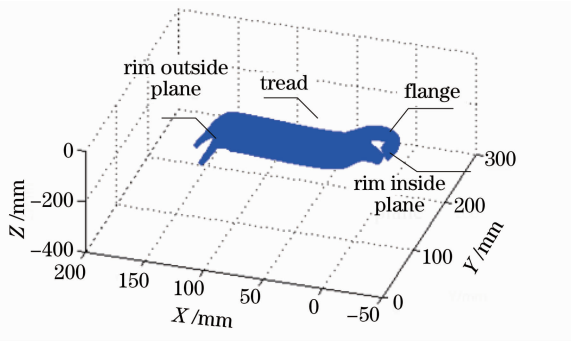


图4 轮对踏面的三维点云

Fig.4 Point cloud of wheel tread

3.2.1 拟合轮对内侧面方程

轮对踏面的点云数据中,有一部分是轮对内侧面的数据。首先将车轮内侧面的点云数据从轮廓中分离出来。轮廓中一点 P_i 与前后相邻两点 P_{i-5} 、 P_{i+5} 之间分别定义一个向量

$$\mathbf{V}_1 = (x_{i-5} - x_i)\mathbf{i} + (y_{i-5} - y_i)\mathbf{j} + (z_{i-5} - z_i)\mathbf{k}, \quad (3)$$

$$\mathbf{V}_2 = (x_i - x_{i+5})\mathbf{i} + (y_i - y_{i+5})\mathbf{j} + (z_i - z_{i+5})\mathbf{k}. \quad (4)$$

从轮廓起始点开始计算这两个向量之间的夹角,当夹角大于一定阈值时,当前点已经不属于内侧面,搜索结束。利用平面拟合算法,将内侧面点云数据拟合成一个空间平面^[13]。设内侧面方程为 $A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0$ 。

3.2.2 计算车轮直径

车轮径被定义为踏面上滚动圆的直径,滚动圆上的各点被称为基点,各个基点距离内侧面70 mm。利用这一性质并且结合内侧面方程,可以搜索出每条轮廓中的基点。已知内侧面方程为 $A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0$,计算点云数据中各点到内侧面的距离,则距离最接近70 mm的点为基点。采用基于投影的空间圆拟合算法处理基点点集,可以计算出踏面滚动圆的圆心坐标 $(x_{center}, y_{center}, z_{center})$ 以及半径 R ,从而计算出车轮直径^[14]。搜索出的基点以及拟合出的空间圆如图5所示。

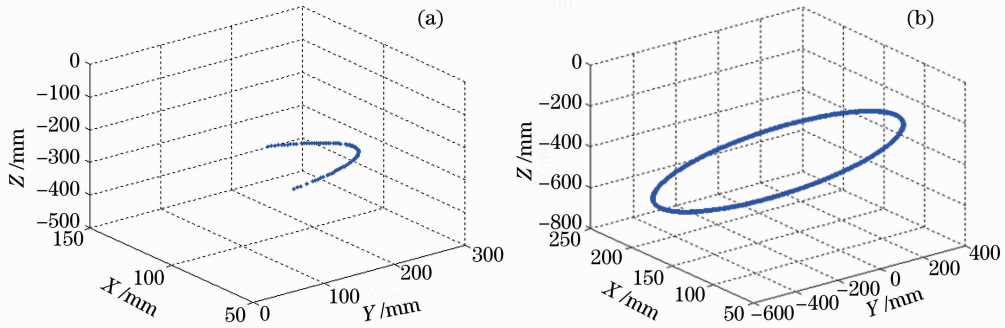


图5 空间圆拟合结果。(a) 搜索出的基点; (b) 拟合出的踏面圆

Fig.5 Result of spatial circle fitting. (a) Selected tread tapping points; (b) fitted rolling circle

3.2.3 计算轮对中心轴线方程

轮对中心轴线经过滚动圆的圆心,并且与车轮内侧面垂直。前面已经给出内侧面的方程以及踏面滚动圆的圆心坐标,则可以计算出轮对中心轴线方程

$$\frac{X - x_{center}}{A_1} = \frac{Y - y_{center}}{B_1} = \frac{Z - z_{center}}{C_1}. \quad (5)$$

轮对中心轴线方程是计算轮缘厚、踏面磨耗的关键。下面将详细介绍这两个参数的测量原理。

3.2.4 计算轮缘厚与踏面磨耗

文中利用如下的测量模型来计算轮缘厚和踏面磨耗,各个参数所采用的单位均为 mm。如图6所示, P_1 是测量轮廓上的踏面基点,设 P_1 到中心轴线的距离为 H_1 。按照轮缘厚的定义,轮缘厚计算点 P_2 到中心轴线的距离 H_2 为 $H_1 + 12$ 。在每一条测量轮

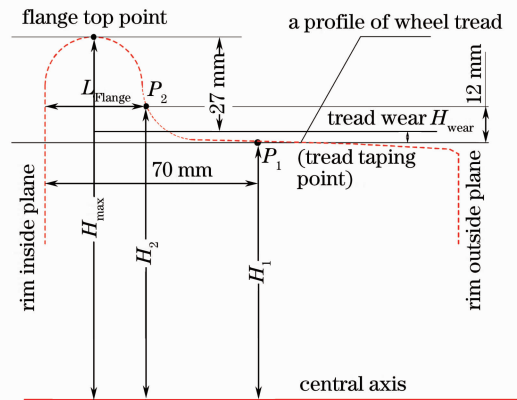


图6 轮缘厚与踏面磨耗测量模型

Fig.6 Measuring model of flange thickness and tread wear

廓中,由基点开始向内侧面方向搜索,计算每一个点到中心轴线的距离,与 H_2 最接近的点则为所求

的轮缘厚计算点。轮缘厚被定义为 P_2 到内侧面的距离，可由下面的公式计算：

$$L_{\text{Flange}} = \frac{|A_1 x_{p2} + B_1 y_{p2} + C_1 z_{p2} + D_1|}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}} \quad (6)$$

继续由轮缘厚计算点 P_2 开始向内侧面方向搜索，与中心轴线距离最大的点被定义为轮缘顶点，其到中心轴线的距离为 H_{max} 。按照踏面磨损的定义，踏面磨损的计算公式为

$$H_{\text{wear}} = H_{\text{max}} - H_1 - 27 \quad (7)$$

3.2.5 计算轮辋宽

车轮的轮辋宽是其内侧面与外侧面之间的距离。在 3.2.1 节中，已经拟合出了内侧面的平面方程 $A_1 X + B_1 Y + C_1 Z + D_1 = 0$ 。采用同样的方法，可以在点云数据中将数据外侧面的数据分离出来，然后应用平面拟合算法计算出外侧面的平面方程。设其方程为 $A_2 X + B_2 Y + C_2 Z + D_2 = 0$ 。轮辋宽的计算公式为

$$L_{\text{RimWidth}} = \frac{|(D_1/A_1) - (D_2/A_2)|}{\sqrt{1 + (B_1/A_1)^2 + (C_1/A_1)^2}} \quad (8)$$

4 实验验证与结果分析

4.1 线结构光视觉传感器的配准

多传感器数据的融合和标定在线结构光测量中是关键，本文采用一块棋盘格标定板来实现两个传感器的配准，标定板精度为 $\pm 0.002 \text{ mm}$ 。为验证传感器配准后的精度，使用两个传感器分别测量某一试块的表面，各自的光带图像在世界坐标系中的数据点如图 7 所示。

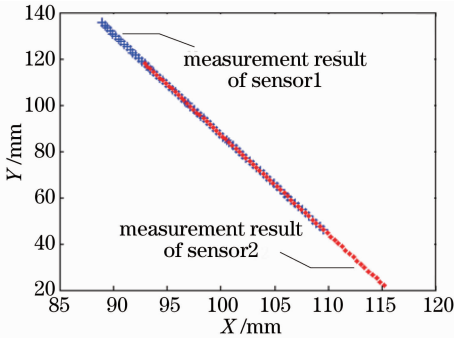


图 7 光带图像在世界坐标系中的数据

Fig. 7 Data of laser stripe in the world coordinate system

将两个传感器测量结果分别进行直线拟合，拟合后的直线方程分别为 $Y = -4.33X + 520.47$ 和 $Y = -4.31X + 517.78$ ，两条直线基本重合，由此可证明两个传感器的配准精度满足测量要求。

4.2 轮对踏面扫描测量过程

为了验证本文所提出测量方法的可行性，采用如下的实验装置对车轮进行测量，如图 8 所示。

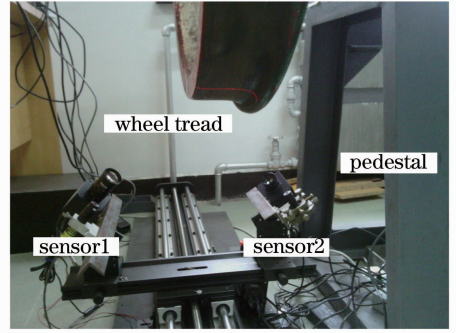


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental setup

电控平移台带动两侧的线结构光视觉传感器以 5 mm 的测量间隔对轮对踏面进行扫描。线结构光视觉传感器所采用的激光器为美国 StockerYale 的 SNF-501L-660-5-10 型线激光器，功率为 5 mW ，相机的分辨率为 $2560 \text{ pixel} \times 1920 \text{ pixel}$ ，像元尺寸为 $2.2 \mu\text{m}$ ，镜头焦距为 12 mm 。传感器的测量精度为 $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，测量范围为 120 mm 。如图 9 所示，首先使用线结构光视觉传感器以 5 mm 的采样间隔对车轮第 I 部分的踏面进行扫描，共测量到 138 条车轮踏面轮廓，被测圆弧所对应的圆心角约为 120° 。

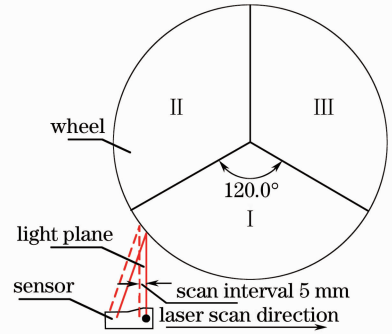


图 9 踏面激光扫描过程示意图

Fig. 9 Schematic diagram of laser scanning

扫描结束后，数据处理系统对采集到的踏面点云数据进行处理：首先从点云数据中分离出属于内侧面的数据，并拟合内侧面方程，拟合结果为： $1.79X + 27.40Y + 5.92Z - 999.60 = 0$ 。以内侧面方程为基准，搜索车轮踏面基点，并且拟合车轮滚动圆方程，求得圆心坐标为 $(141.08, 139.44, -398.03)$ ，半径为 400.70 mm 。在计算出内侧面方程和车轮滚动圆的圆心后，可以计算出轮对中心轴线方程为 $\frac{X-141.08}{1.79} = \frac{Y-139.44}{27.40} = \frac{Z+398.03}{5.84}$ ，从而计算出踏

面磨耗以及轮缘厚等参数。最后,分离出属于外侧面的点云数据,拟合车轮外侧面方程,计算结果为 $1.80X+27.37Y+5.92Z-2867.2=0$,利用(8)式计算出轮辋宽为137.8 mm。

对车轮第Ⅰ部分的测量结束后,将支架上的轮对依次转动 120° ,继续对车轮的第Ⅱ、Ⅲ部分进行

表1 轮对几何参数手工测量平均值及不确定度(单位:mm)

Table 1 Average value of manual measurement and uncertainty (unit: mm)

Wheel		Diameter	Flange thickness	Tread wear	Rim width
Ⅰ	Left	801.2(±0.2)	29.7(±0.1)	1.4(±0.2)	137.5(±0.2)
	Right	801.0(±0.2)	29.6(±0.1)	1.5(±0.2)	137.2(±0.2)
Ⅱ	Left	801.5(±0.2)	29.5(±0.1)	1.3(±0.2)	137.4(±0.2)
	Right	801.3(±0.2)	29.8(±0.1)	1.4(±0.2)	137.3(±0.2)
Ⅲ	Left	801.3(±0.2)	29.8(±0.1)	1.4(±0.2)	137.5(±0.2)
	Right	801.2(±0.2)	29.6(±0.1)	1.5(±0.2)	137.3(±0.2)

Inside the () is the uncertainty of manual measurement

利用几何参数自动测量系统对轮对进行6次测量,测量的结果如表2所示。

表2 轮对几何参数自动测量平均值及不确定度(单位:mm)

Table 2 Average value of automatic measurement and uncertainty (unit: mm)

Wheel		Diameter	Flange thickness	Tread wear	Rim width
Ⅰ	Left	801.0(±0.6)	29.5(±0.3)	1.2(±0.3)	137.8(±0.2)
	Right	801.1(±0.6)	29.8(±0.3)	1.2(±0.3)	137.4(±0.2)
Ⅱ	Left	801.4(±0.6)	29.5(±0.3)	1.5(±0.3)	137.2(±0.2)
	Right	801.5(±0.6)	29.7(±0.3)	1.2(±0.3)	137.5(±0.2)
Ⅲ	Left	801.2(±0.6)	29.7(±0.3)	1.5(±0.3)	137.5(±0.2)
	Right	801.4(±0.6)	29.3(±0.3)	1.4(±0.3)	137.4(±0.2)

Inside the () is the uncertainty of automatic measurement

从表2可以看出,测量结果满足铁道部相关标准的要求。车轮Ⅰ、Ⅱ和Ⅲ区域各个几何参数的测量结果有所不同,这主要是由于车轮自身的不圆度以及轮缘磨耗的不均匀。车轮内侧面的方程是通过扫描的踏面轮廓进行拟合得到的。在每次测量中,全局坐标系和车轮之间相对位置的变化对内侧面拟合结果的影响不大。自动测量结果与手工测量的结果有一定差异,造成测量结果差异的主要原因在于:1)手

扫描测量。

4.3 轮对几何参数测量结果

为了评估测量系统的测量结果,首先采用轮径尺和车轮第四种检查器对轮对三个被测区域的直径、轮缘厚、踏面磨耗以及轮辋宽进行手工测量。6次手工测量的结果如表1所示。

工测量位置与自动测量位置不可能完全重合;2)手工测量与自动测量都存在测量误差。

4.4 误差分析

轮缘厚、踏面磨耗及轮辋宽这三个参数的测量误差主要是由传感器的测量误差引起的,如下式所示。车轮直径测量的不确定度 δ_D 不仅受传感器测量不确定度 σ 的影响,还与扫描过程中的采样点数 N 、圆弧的中心角 θ 有关。

$$\delta_D = 2 \sqrt{\frac{N + 2 \sum_{i=1}^{N/2} \cos(2i\theta/N)}{N \{N + 2 \sum_{i=1}^{N/2} \cos(2i\theta/N) - \{2[\cos(2i\theta/N)]^2\}/N\}}} \sigma. \quad (9)$$

(9)式的推导过程可参考文献[15]。采样点数越大、扫描范围越大,直径测量精度就越高。本测量系统扫描的圆弧圆心角约为 120° ,采样点数为138,所以直径测量的误差传递系数近似为6.0。几何参

数自动测量系统所用线结构光视觉传感器的测量不确定度为 ± 0.1 mm,因此系统测量轮对直径的不确定度应为 ± 0.6 mm。理论分析的结论与实验结果基本一致。

5 结 论

提出了一种自动测量车轮几何参数的方法,实现了车轮直径、轮缘厚、踏面磨耗以及轮辋宽这几个关键参数的测量。此方法对传感器与被测量车轮的相对位置和姿态没有严格要求,提高了测量精度,是对基于线结构光视觉传感器的轮对几何参数测量系统的改进。实验的结果证明了本方法的可行性。

参 考 文 献

- 1 Sun Shanchao, Wang Chengguo, Li Haitao, *et al.*. Analysis of wheel/rail contact geometric parameters' effect on the dynamic behavior of high-speed passenger car[J]. *China Railway Science*, 2006, 27(5): 93-98.
孙善超, 王成国, 李海涛, 等. 轮/轨接触几何参数对高速客车动力学性能的影响[J]. *中国铁道科学*, 2006, 27(5): 93-98.
- 2 Feng Qibo, Cui Jianying, Liu Yizhen, *et al.*. An automatic laser measuring method of wheel geometric parameters and defects[J]. *China Railway Science*, 2003, 24(6): 23-26.
冯其波, 崔建英, 刘依真, 等. 轮对几何参数及缺陷激光自动测量方法[J]. *中国铁道科学*, 2003, 24(6): 23-26.
- 3 Gao Xiangdong. Development of the automatic detection device for wheelset parameters[J]. *Rolling Stock*, 2002, 40(10): 29-31.
高向东. 轮对参数自动检测装置的研制[J]. *铁道车辆*, 2002, 40(10): 29-31.
- 4 Yang Xuerong, Gao Xiangdong, Yan Xiangwen, *et al.*. A new method for automatically measuring wheelsets of railway wagons based on structural light vision sensing [J]. *China Railway Science*, 2005, 26(1): 142-144.
杨雪荣, 高向东, 严向文, 等. 基于结构光视觉传感技术的轮对测量新方法[J]. *中国铁道科学*, 2005, 26(1): 142-144.
- 5 Zuo Jianyong. Study on Non-Contact and Automatic Measuring System for Measurement of Wheelset Geometric Parameters[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2002. 9-22.
左建勇. 轮对几何参数非接触式自动测量系统的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2002. 9-22.
- 6 Zuo Jianyong. Test and research on measurement of wheel rim dimensions with laser sensor[J]. *Rolling Stock*, 2002, 40(2): 11-13.
左建勇. 应用激光传感器测量轮辋尺寸的试验研究[J]. *铁道车辆*, 2002, 40(2): 11-13.
- 7 Wu Qingyang, Su Xianyu, Xiang Liqun, *et al.*. A new

- calibration method for two-sensor measurement system based on line-structure light [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(2): 259-263.
吴庆阳, 苏显渝, 向立群, 等. 基于结构光视觉传感技术的轮对测量新方法[J]. *中国激光*, 2007, 34(2): 259-263.
- 8 Zhang Weiguang, Zhao Hong, Zhang Qi, *et al.*. Calibration method for three-dimensional measurement system based on linear-structure light [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(1): 182-188.
张维光, 赵 宏, 张 琦, 等. 线结构光三维轮廓测量系统的标定方法[J]. *中国激光*, 2009, 36(1): 182-188.
- 9 Ge Baozhen, Zhao Dan, Tian Qingguo, *et al.*. Three-dimensional human face laser scanning based on three-line structured light[J]. *Chinese J Lasers*, 2010, 37(6): 1594-1598.
葛宝臻, 赵 丹, 田庆国, 等. 三光带激光三维人脸扫描方法[J]. *中国激光*, 2010, 37(6): 1594-1598.
- 10 Zeng Xiangjun, Huo Jincheng, Wu Qingyang. Calibrate method for scanning direction of 3D measurement system based on linear-structure light[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0108002.
曾祥军, 霍金城, 吴庆阳. 线结构光三维测量系统扫描方向的标定[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0108002.
- 11 Chen Xinyu, Ma Zi, Chen Tianfei, *et al.*. Novel calibration method for axes in line structured light vision measurement system[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(11): 1108014.
陈新禹, 马 孜, 陈天飞, 等. 线结构光视觉测量系统运动轴线的简易标定方法[J]. *中国激光*, 2012, 39(11): 1108014.
- 12 Lin Yibin. A Study of 3D Profile Measuring Based on Laser Detecting[D]. Tianjin: Tianjin University, 2005. 8-11.
林贻斌. 激光三维轮廓检测技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2005. 8-11.
- 13 Yuan Qing, Lou Lizhi, Chen Weixian. Applying weighted total least-squares to the plane point cloud fitting of terrestrial laser scanning[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2011, (3): 1-3.
袁 庆, 楼立志, 陈伟娴. 基于加权总体最小二乘的平面点云拟合方法[J]. *测绘通报*, 2011, (3): 1-3.
- 14 Yang Wei, Chen Jiaxin, Li Jishun. Two-step spatial circle fitting method based on projection[J]. *J Engineering Design*, 2009, 16(2): 117-120.
杨 伟, 陈家新, 李济顺. 基于投影的二阶段空间圆线拟合算法[J]. *工程设计学报*, 2009, 16(2): 117-120.
- 15 Zou Feng. Research on the Measurement Uncertainty of Circular Features in Coordinate Measurements [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004. 19-25.
邹 锋. 坐标测量法中圆参数测量不确定度的研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2004. 19-25.

栏目编辑:何卓铭