

一种基于车载相机的车轮位移检测新方法

宋子彬, 王永胜, 马增强, 张守梁

(石家庄铁道大学 电气与工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要:提出了一种车载式双相机的车轨位移检测方法。该方法将相机安装在车轮内外两侧,通过相机从图像中获取车轮内外信息,结合计算机视觉技术从图像中获取车轮中心轴线两端点,进一步确定车轮中心轴线的空间位置以得到轮轨位移量。实验结果表明,该方法实现了列车车轮位移的非接触检测,且精度高、实现简单,该方法的提出为后续进一步开展列车运行安全状态监测与评价研究奠定了基础。

关键词:车载相机;车轮位移;图像检测;计算机视觉

中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0373(2018)04-0030-06

0 引言

随着列车运行速度的不断提高,列车行车安全是高速铁路首先要考虑的问题。为了满足列车的安全运行形态和正常的运行机理安全性的要求,有必要对轮轨相对位移进行检测。国内外学者对列车蛇形运动,列车横向失稳,甚至脱轨等因素仅是基于传感器的机车安全运行监测进行了研究^[1-5]。日本学者 Sato Yasuhiro et al^[6]设计了一种脱轨系数连续检测装置,该装置通过安装于转向架非旋转结构上的非接触式位移传感器来检测轮轨接触力,从而获得脱轨系数的统计值。西班牙的 Monje Pedro et al^[7]设计了一套基于光电二极管的仪器装置,该装置安装于机车转向架上,用于在线检测车轮在轨道上滚动和滑动的状态。瑞士的 Oldrich Polach^[8]分析研究了轮轨接触几何状态在列车运行中稳定极限条件下对列车行为的影响,并取得了不错的效果。北京航空航天大学的 Zheng Gong^[9]利用结构光和计算机视觉技术完成了对列车车轮直径的动态测量。魏云鹏等^[10]根据有限元理论并结合 ANSYS 有限元软件分析列车在蛇形运动状态下轮轨接触区域的形状“面积”轮轨接触应力和 Mises 应力的特性,对列车在蛇形运动状态下安全状态进行了评价。

唐永康^[11]基于常规的应变片、位移计、加速度传感器搭建了一种检测车辆脱轨倾向的脱轨预警系统。随着计算机技术的发展,非接触式测量可直接精确测量目标形态结构,可实施性强,并且可重构和准确识别目标细节,由此受到众多研究学者的追捧。在基于图像处理的测量方法中,肖杰灵等^[12]在钢轨两侧安装两个摄像机,然后利用图形拼接的方法获得轮轨接触曲线,但由于系统采用非车载方式,由此鲁棒性和准确性并不高;杨淑芬^[13]建立了以 DSP 为核心的轮轨接触点检测系统,通过轮轨图像处理技术得到轮轨边缘的轮廓以得到接触状态,但此方法并不能准确提取出轮轨接触参数。

现利用双相机分别拍摄车轮内外两侧,通过车轮图片确定车辆运行中车轮中心轴线的空间位置以得出轮轨接触参数,进而得到车轮运行时的姿态变化,并通过实验验证了该方法的可行性和精确性。

1 车轮检测模型方案原理

通过图像技术不仅可以直观地得到轮轨接触状态,而且具有在线测量、非接触、精度高、成本低等优点,但在轮轨接触状态以及检测环境复杂的情况下,单一的视觉位置已经满足不了检测系统的精度和鲁

收稿日期:2017-03-15 责任编辑:车轩玉 DOI:10.13319/j.cnki.sjztdxxb.2018.04.05

基金项目:国家自然科学基金(11372199,11572206,51208318);河北省自然科学基金(A2014210142)

作者简介:宋子彬(1991—),男,硕士研究生。主要研究方向为图形图像处理与计算机视觉。E-mail:songzibin33@163.com

宋子彬,王永胜,马增强,等.一种基于车载相机的车轮位移检测新方法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2018,31(4):30-35.

棒性^[14],于是提出了一种基于车载式双相机的轮轨位移检测方法。图 1 为其硬件结构的示意图,两个 CCD 摄像机安装在转向架支架上(图中未画出),每个相机的中轴线都与轮对的圆心处所在平面平行,以便于通过车轮内外轮廓检测出轴线端点,检测流程如图 2 所示。

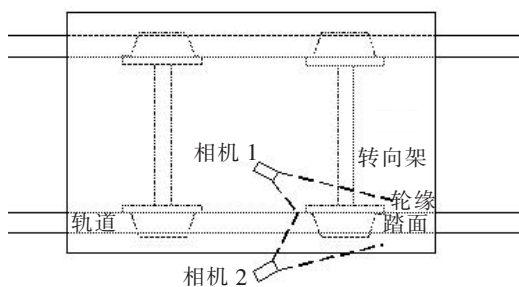


图 1 图像检测装置

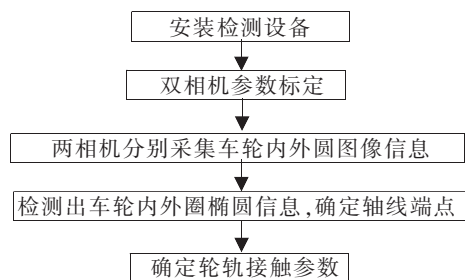


图 2 检测流程图

由于实验条件有限,使用实验室现有的精密转台、轮对模型、CCD 工业相机、面阵光源、(JAI-5000C-PMCL)以及采集卡(SOL2MEVCLF)及处理软件组成的检测硬件系统对提出的方案进行实验验证,系统实景如图 3 所示。事实上,列车闸瓦以及减震装置等对车轮遮挡严重,由此并不能采集到完整的轮廓,但车轮边缘椭圆拟合并不需整个轮廓,而只需 $1/3$ 圆即可实现^[15]。列车行驶中轮轨主要是横向位移、垂相位移,摇头角位移量相互叠加引起轴线的空间变化,只要找到轴线位置,那么轮轨位移参数的变化就可以找到。

本实验中所用转台具有 3 个方向的自由度,通过改变转台各个方向的角度完全可以模拟车轮的复杂变化。该系统通过计算机和 CCD 相机对车轮图像进行获取,通过分析处理得到机车车轮内圆和外圆的圆心准确位置,进而确定当前机车车轮中心轴线的空间位置。将中心轴线与初始位置对比,得出轮轨参数的动态变化。

假定车轮在初始时刻不存在轮轨位移量,记其位置为 AB ,在运动过程中变化后的车轮轴线位置记为 AC ,通过对比 AB, AC 的位置得出车轮中心轴线的空间位移,进而确定车轮相对轨道的姿态变化。如图 4 所示,在 XZ 平面, YZ 平面投影分别为 $O'O''$,那么与机车静止时刻 AB 位置相对比, OO' 为轮轨产生的横移量, OO' 为垂移量。由于机车车轮在运行过程中存在偏转,浮起,蠕划等动态变化,车轮位置运动复杂,机车轮轨的位移量中横移量 S_x 、垂移量 S_y 和摇头位移 S_z 分别如图 5(a),图 5(b)所示。



图 3 实验场景图

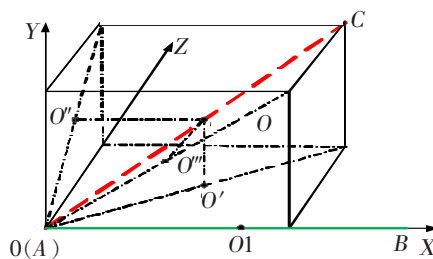


图 4 车轮轴线动态分解图

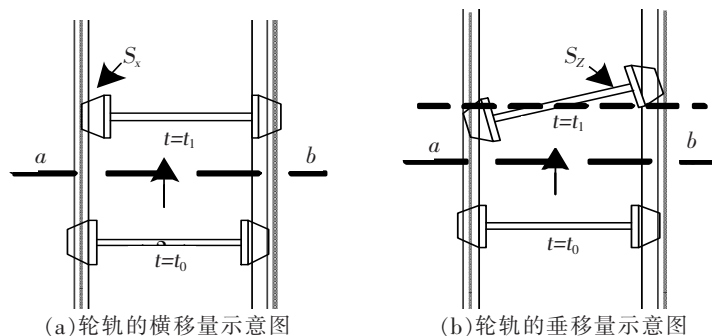


图 5 蛇形运动各方向位移量示意图

2 车轮图像的边缘检测

2.1 车轮的内外边缘检测

采集到的图像背景复杂,受光照等外界因素影响大,在进行图像边缘检测前要求除噪声的同时又保持图像的边缘。使用二维 Otsu 算法,用 2 个一维 Otsu 算法得到的 2 个阈值来代替原二维 Otsu 算法的阈值,使该算法的去噪能力大大提升。此外车轮图像中存在的噪声主要为高频分量,而图像的边缘信息也主要为高频信息^[16]。在将车轮图像进行阈值分割后,对图像进行形态学滤波。

A 被 B 腐蚀是所有结构元素原点位置的集合,其中平移的 B 与 A 的背景并不叠加。结构元素在形态学中对滤波效果起决定性作用,其形状和大小将直接影响形态滤波的输出结果,选择不同大小的方形结构元素对得到的二值图像进行腐蚀和膨胀处理,达到形态学滤波的效果,通过采用 Canny 检测算子来控制不同的阈值得到不同的检测结果,图 6 给出了不同阈值对比检测的结果。

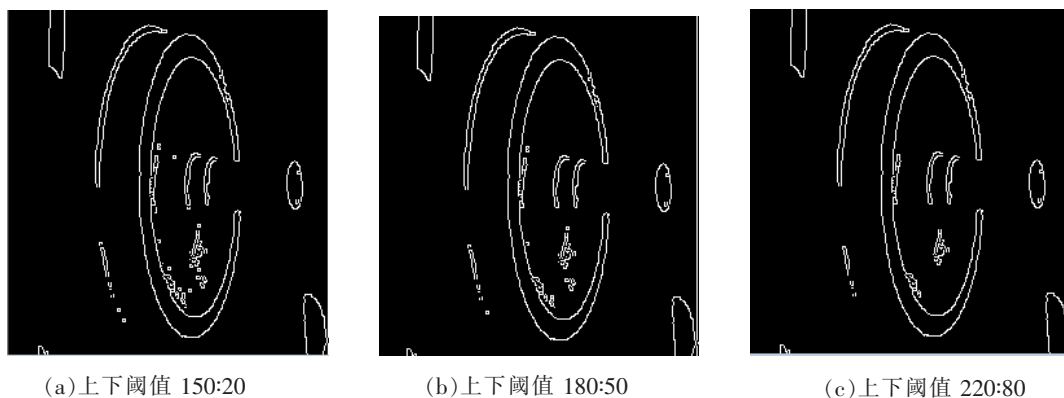


图 6 不同阈值效果图

2.2 车轮的椭圆检测

由于相机拍摄角度的变换,采集的图像中车轮边缘轮廓并非标准的椭圆,并且车轮图像边缘多处不连续,这就对边缘椭圆的提取带来了很大的困难。Canny 算法中上下阈值选取对车轮轮廓的提取以及噪声点的影响相关,选取合适的阈值才能准确提取车轮轮廓。为了提取出车轮的轮廓,采用了 Hough 圆变换,该算法依据圆心一定在圆上的每个点的模向量上,且各个圆上点模向量的交点是圆心的原理,先搜寻到圆心的 x 和 y 坐标,将三维累加平面转为二维累加平面,然后根据所有候选中心的边缘非 0 像素对其支持程度来确定半径。检测结果如图 7 所示。

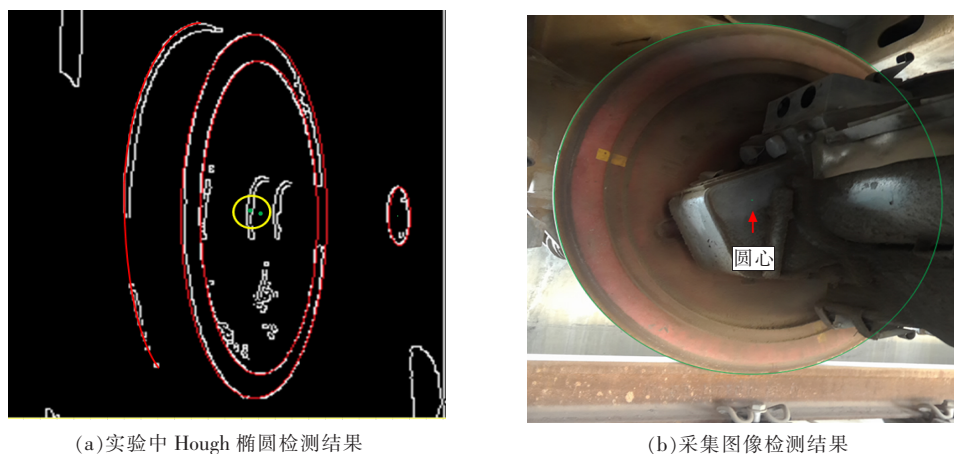


图 7 椭圆 Hough 检测结果

3 基于 Opencv 的特征点三维映射

计算机视觉的研究目标是使计算机能通过二维图像认知三维环境,并从中获取需要的信息用于重建和识别物体。为了得到车轮中心轴线的三维坐标信息,需要对摄像机系统进行标定,但要指出虽是基于双相机的检测系统,但它并不等同于双目视觉,标定过程相对简单。为了统一映射出车轮三维坐标位置,在标定两个相机的过程中要采用统一世界坐标系。通过 M 实现对摄像机进行标定并实现二维图像中特征点空间位置的求取。设矩阵 M_1 为摄像机的内参,只与摄像机的内部参数有关, M_2 为摄像机的外参,只与相机对于世界坐标系的位置有关。那么由标定映射关系^[17-18]如下

$$Z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_u & s & u_0 & 0 \\ 0 & f_v & v_0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R & T \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} = M_1 M_2 M \quad (1)$$

式中, (f_u, f_v, s, u_0, v_0) 为摄像机的 5 个内参; (R, T) 分别为得到的摄像机的外参。 $P(u, v)$ 为图像中任意一点的坐标, $P'(X_w, Y_w, Z_w)$ 为 P 点在世界坐标系中的坐标,由此完成相机的标定,图 8,图 9 为部分标定过程。

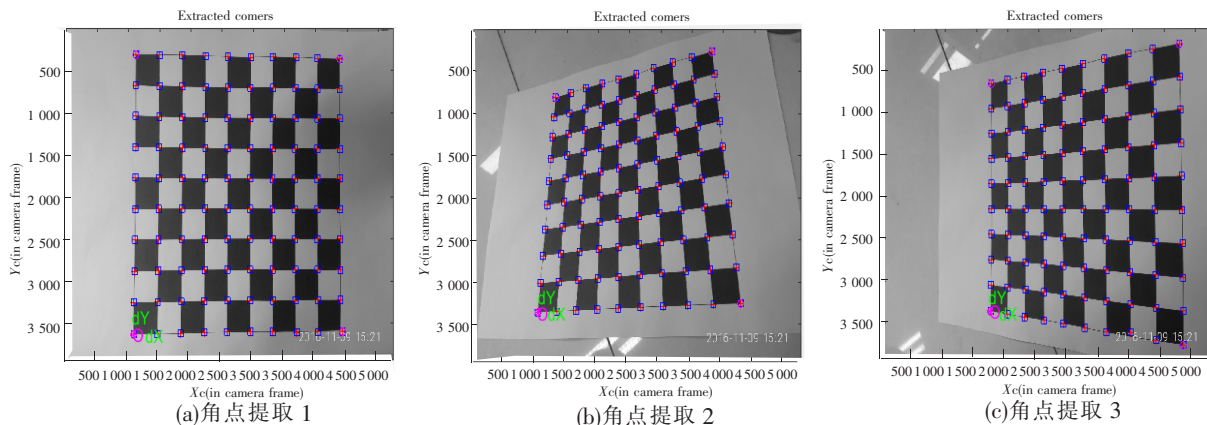


图 8 标定板标定相机内参的角点提取

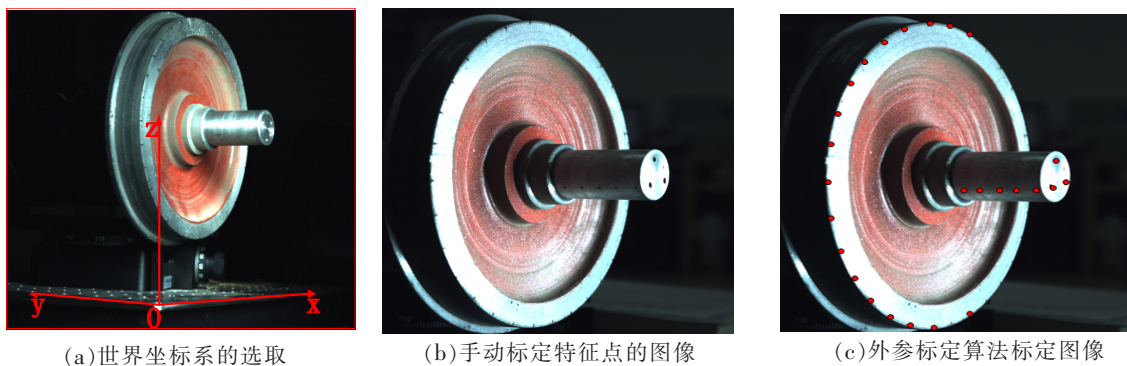


图 9 相机外参标定系统

4 实验数据处理及误差分析

CCD 相机和轨道初始成角 20° ,通过转动实验台改变夹角 β_1, β_2 ,模拟机车运行过程中由各个方向产生的偏量 $\Delta 1, \Delta 2, \Delta 3 \dots$ (垂向和横向位移为主要因素)导致车轮轴线产生的偏移量。实验进行对 $\Delta \beta_2$ (取值 $0.01^\circ \sim 0.05^\circ$) 进行调节,经过 CCD 相机的图像采集和本文的检测算法处理,检测出车轮边缘信息并得

出车轮的内外圆的圆心 O_1O_2 位置,通过检测出的图像中的坐标位置,由相机标定结果由式(1)得到车轮中心轴线位置。通过模拟实验整理实验的结果数据如表 1 所示。

表 1 当 $\Delta\beta_2 = 0.02^\circ$ 时偏转角和车轮的位置关系

夹角 β_1	内圆 O_1 坐标	外圆 O_2 坐标	O_1O_2 中点坐标	像素
20.0°	(351,338)	(361,368)	(356,353)	(158.1,78.3,163.7)
20.3°	(348,342)	(368,370)	(358,356)	(162.0,70.9,167.9)
20.6°	(350,346)	(374,368)	(362,357)	(163.4,72.4,169.3)
20.9°	(348,346)	(380,372)	(364,359)	(163.7,74.1,169.8)
21.2°	(349,352)	(385,370)	(367,361)	(164.3,75.5,171.4)
21.5°	(354,358)	(392,368)	(373,363)	(164.6,76.9,173.0)

由表 1 中得到的车轮内外圆心 A, C 的空间坐标位置,图 3 的车轮位移分解图得车轮中心轴线中点 O 坐标,那么与车轮静止时中心轴线中点 O_1 比较就可得出车轮在此时刻下的位移量,其中 y 轴分量 OO' 为轮轨产生的横移量, z 轴分量 OO'' 为垂移量。为了减少误差,对固定姿态样本图片进行多次实验,将每组实验数据与实际实验模型车轮位移量对比,在 $\beta = 20.3^\circ, \Delta\beta_2 = 0.02^\circ$ 情况下,检测相关数据如表 2 所示,误差计算如公式(2),其中检测量为 Δd ,实际量为 Δs 。

$$\begin{cases} \Delta n = \Delta d - \Delta s \\ r = \frac{|\Delta n|}{\Delta s} \times 100\% \end{cases} \quad (2)$$

表 2 $\beta = 20.3^\circ, \Delta\beta_2 = 0.02^\circ$ 时轮轨横移量数据分析

组数	F 图像坐标	F 三维 y 坐标	检测横移/mm	实际横移/mm	误差量/mm	误差/%
第一组	(368,356)	70.9	2.6	2.5	0.1	4.0
第二组	(369,355)	70.6	2.3	2.5	-0.2	-8.0
第三组	(368,355)	71.0	2.7	2.5	0.2	8.0
第四组	(367,358)	70.9	2.6	2.5	0.1	4.0
平均值	(368,356)	70.9	2.55	2.5	0.05	2.0

同理,改变夹角 β_1 ,以同样方法对横移量、垂移量进行分析,最后选取了 $\Delta\beta_2 = 0.02$ 时将位移量数据整理得出折线图如图 10 所示,结果表明该实验实现了车轮部分动态参数的检测,且取得了不错的效果。

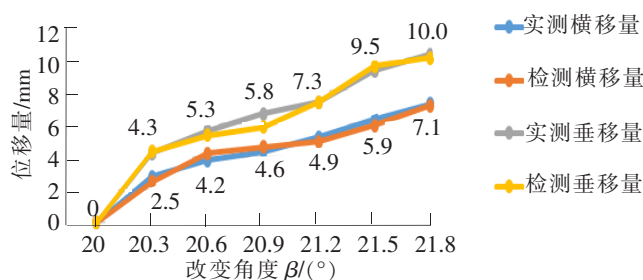
5 结论

本文主要提出了一种车载式双相机轮轨位移检测方法,通过车载双相机从图像中获取车

轮内外车轮几何特征信息,通过相机标定和特征点三位映射算法来还原车轮在运动前后车轮中心轴线所在的空间位置,通过和最初状态作对比来得到轮轨位移量。除此之外,还通过实验仿真来对该方法进行验证,结果表明该方法能够实现列车轮轨相对位移的非接触检测,证明了该方法的准确性和可行性。本方法的提出对进一步机车运行状态监测的开展及运行安全性机理的研究提供了重要信息。

参 考 文 献

[1]肖新标.复杂环境状态下高速列车脱轨机理研究[D].成都:西南交通大学,2013.

图 10 $\Delta\beta_2 = 0.02^\circ$ 时检测位移和实际位移对比图

- [2]李呈祥. 高速列车运行横移及侧滚姿态主动控制研究[D]. 北京:北京交通大学,2014.
- [3]程力. 基于轮轨表达式的轮轨接触坐标计算方法[J]. 兰州工业学院学报,2015,22(2):19-22.
- [4]干锋,戴焕云. 基于空间矢量映射的新型轮轨接触点算法[J]. 机械工程学报,2015,51(10):119-128.
- [5]钟浩. 基于改善轮轨接触状态的重载车轮型面优化[D]. 成都:西南交通大学,2014.
- [6]Sato Yasuhiro, Kurihara Jun, Mizuno Masaaki, et al. Development of continuous measurement method for rail-wheel contact forces by in-service trains[J]. Japanese Railway Engineering,2012,4:5-8.
- [7]Monje Pedro, Aranguren Gerardo, Martínez Borja, et al. Using bogie-mounted sensors to measure wheel rolling and sliding on railway tracks[C]//Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2012, 226(4): 371-380
- [8]Oldrich Polach. Influence of wheel/rail contact geometry on the behavior of a railway vehicle at stability limit[C]//ENOC-2005,Eindhoven,Netherlands, 2005,20:2203-2210.
- [9]Zheng Gong. Dynamic measurement for the diameter of a trainwheel based on structured-light vision[J]. Sensors,2016, 564(16):1-19.
- [10]魏云鹏,吴亚平,段志东,等. 列车蛇形运动状态下轮轨接触特性分析[J]. 铁道标准设计,2015,59(3):37-40.
- [11]唐永康. 空载货运列车脱轨检测系统的研制[J]. 工业控制计算机,2012, 25(8): 52-53,55.
- [12]肖杰灵,刘学毅,张 渝. 轮轨接触几何状态检测装置[J]. 中国铁道科学,2008, 29(4): 141-144.
- [13]杨淑芬. 轮轨接触点位置图像检测方法研究[D]. 成都:西南交通大学,2009.
- [14]沈沛意. 计算机视觉中的几何不变性及其应用[J]. 西安电子科技大学学报,1998,25(4):490-493
- [15]范怡,傅继武. 基于中点提取的椭圆检测算法[J]. 计算机应用,2011,31(10):2705-2707.
- [16]王晓凯,李峰. 改进的自适应中值滤波[J]. 计算机工程与应用,2010,46(3):175-176.
- [17]马颂德,张正友. 计算机视觉—计算理论与算法基础[M]. 北京:科学出版社,1998.
- [18]郝继贵,于之靖. 视觉测量原理与方法[M]. 北京:机械工业出版社,2011.

A New Method for Wheel Displacement Detection Based on Dual Cameras

Song Zibin, Wang Yongsheng, Ma Zengqiang, Zhang Shouliang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: The paper proposes a new method to detect wheel displacement based on double cameras installed on both sides of the wheels. Through the camera, information of inside and outside wheels can be obtained, and the points on both ends of the center axis of the wheel are acquired from the image by using computer vision technology to further determine the spatial position of the center axis of the wheel to obtain the wheel-rail displacement. Experimental results show that the method achieves the non-contact detection of wheel displacement and shows lots of advantages such as simplicity and high precision, which has great important significance for further exploring and evaluating locomotive safety mechanics.

Key words: vehicle-mounted camera; wheel displacement; image detection; computer vision