

高速列车轮对横移量图像检测方法研究

彭彬,唐荣,李子嘉

(西南交通大学 牵引动力国家重点实验室,四川 成都 610031)

摘要:针对高速列车运行过程中轮对横移量的检测,提出基于图像处理的检测方法。该方法通过简化轮轨接触结构,建立轮轨偏移测量模型,从而对获取的高速列车运行时轮轨图像数据进行处理。采用图像预处理技术对原始图像进行降噪和锐化;通过边缘检测算子检测钢轨的边缘分布,并采用分段模型实现对钢轨的拟合;统计每帧图像的钢轨位置信息并计算相对差值。仿真分析结果表明:通过图像处理得到的轮对横移量可以精确到1个像素差。

关键词:高速列车;图像处理;边缘提取;轮对横移检测

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1671-5276(2023)03-0211-04

Research on Image Detection Method of Wheelset Lateral Movement of High-speed Train

PENG Bin, TANG Rong, LI Zijia

(State Key Laboratory of Traction Power, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Based on image processing, a detection method detecting wheelset lateral movement of high-speed train is proposed. The wheel-rail contact structure is simplified to construct the wheel-rail offset measurement model, and therefore to process the wheel-rail image data obtained during high-speed train operation. By image preprocessing technology, the original image is denoised and sharpened, and with the edge detection, the distribution of rail edge is calculated, and a segmented model is applied to achieve the fitting of the rail. The statistics of the rail position information of each frame of the image are collected and their relative differences are calculated. Simulation and research results show that the wheelset lateral shift obtained through image processing can be accurate to 1-pixel difference.

Keywords: railway train; image processing; edge extraction; wheel-to-cross detection

0 引言

高速铁路及动车组列车已经成为中国工业现代化的一张亮丽名片,其相关的创新技术日新月异,其中列车高速运行时的稳定性是一直以来的研究热点。稳定性一般是指列车的曲线通过能力和蛇形运动情况,通常把轮对横移量^[1-2]作为评价列车稳定性的重要指标。然而,如何实时、准确获取轮对横移量数据尚没有一个公认的方法。常规的位移检测方法^[3]是采用接触式位移传感器和加速度传感器实现对目标物的检测,适用于静态目标物或较大位移测量。但由于列车轮对以及铁路轨道的特殊性,即动态目标小位移,常规方法实现对轮对横移量的检测较为困难。此外,也可以考虑使用红外传感器来检测轮轨偏移,但是此种检测方法缺点在于红外传感器位置以及轮对横移测量点难以确定,影响测量结果的准确性。随着计算机技术和图像处理技术^[4]的发展,借鉴于图像处理相关算法的运用案例^[5],可考虑基于图像处理的非接触式轮轨偏移量检测。

本文提出一种基于图像处理技术的轮对横移量检测方案,利用常见的高速相机采集列车运行图像,通过对相

机图像进行锐化、灰度变换等预处理操作,并利用图像边缘检测算法、直线检测算法以及曲线拟合得到各帧图像中的钢轨边缘位置,最终得到轮对横移量。

1 轮对横移量检测总体架构

利用数字图像处理检测轮对横移量关键在于通过算法自动对钢轨进行像素级的跟踪和定位,获取钢轨的位置信息,而后通过每帧图像中钢轨位置信息的变化进而得出钢轨之间的相对距离,最后通过像素坐标与世界坐标系之间的映射关系得出实际的横移量信息。

本文基于数字图形处理的轮轨偏移检测流程框图如图1所示。1)利用高速相机采集列车运行过程中轮对运行图像;2)对采集到的图像数据进行灰度变换以及中值滤波等常见的预处理手段;3)对图像进行边缘检测定位轮对以及钢轨外形,通过对图像位置的粗定位获取钢轨大致的边缘图像;4)再通过直线检测算法获取图像中轨道的相关信息,而后通过分段模型拟合得到钢轨双边缘边界线;5)计算每帧图像间钢轨相对距离,将图像中的像素距离转换成真实距离即可得到轮对横移量。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61960206010)

第一作者简介:彭彬(1996—),男,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为数字图像处理。

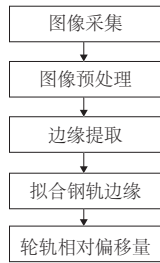


图1 轮对横移量检测流程

1.1 图像的预处理及边缘检测

对于相机的输出图像,首先进行灰度变换等预处理(效果见图2),然后使用边缘检测找出铁轨轮廓,常见的边缘检测算子有 Roberts 算子^[6]、Sobel 算子^[7]、Prewitt 算子^[8]、Log 算子、Canny 算子^[9]。表1分别为采用边缘检测算子所得到的不同的检测情况。

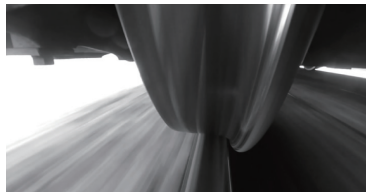


图2 预处理后的图像

表1 各算子检测边缘情况

算子	应用情况
Roberts	对边缘呈现结果不是特别理想
Sobel	对边缘处理后的图像进行了平滑处理,产生了很多干扰结果
Prewitt	对噪声产生了平滑作用,边缘结果不准确
Log	出现了双边界区域,产生边缘结果较为模糊
Canny	去噪声能力强,产生的边缘较细

通过表1显示的各算子实际检测情况,本文采取Canny算子进行图像边缘检测。Canny算法通过图像梯度局部区域的极大值来检测边缘,用高斯函数一阶微分计算梯度,使用双阈值运算来处理强边缘和弱边缘;且仅当弱边缘与强边缘连接时,弱边缘才被输出,不容易受到噪声的干扰,能够在噪声和边缘检测间取得良好的平衡,进而检测到真正的边缘条件。图3为Canny算子实际处理结果。

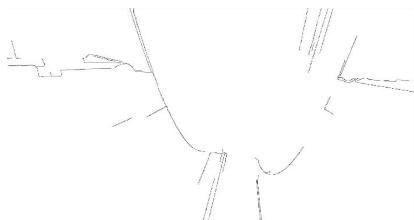


图3 Canny边缘处理后的图像

1.2 基于分段模型的钢轨图像识别

a) 识别原理

在铁道列车运行过程中,从固定在转向架上的相机取得的图像发现,钢轨的两侧边缘是两条近似直线,定位钢轨就转化为了图像处理中的直线检测问题。图3显示,Canny边缘处理后同时检测出钢轨和轮对的模糊边缘,为了准确地检测钢轨的双边缘,根据输入图像中钢轨和转向架相对不变的特点,首先对Canny输入图像进行钢轨粗定位,然后利用Hough变换检测出边缘图像中的直线,调整阈值获得最好的直线检测效果。利用曲线拟合方法将检测到的直线放入预先设计的直线或者曲线模型中完成对钢轨双边缘的匹配。

b) Hough变换

对于Hough变换^[10]而言,其属于一种图像识别方法,能够充分利用图像的全局特性将像素进行连接,从而组成一个区域封闭的边界,通常会被用来分离具有相同特征的几何形状。Hough变换直线检测的基本思想是通过点线之间的对偶性,将处于图像中的直线检测变为参数空间中的点检测。在二维图像中,像素点对应二维坐标系中的唯一坐标点,因此图像中直线可用斜截式和极坐标方程表示。

$$y=kx+b \tag{1}$$

$$\rho=xcos\theta+ysin\theta$$

将点(x, y)带入到式(1),能够获得ρ-θ方程,也就是得到在参数空间里的一条曲线,如图4所示。图4(a)中,P、Q、R3个点全在相同直线上,在图4(b)中,对应的曲线相交H点,次数达到了3次。所以说,在相同直线上的点的个数会与参数空间里曲线相交的次数对应起来,直线的长度和相交的次数如果完全一致,那么直线会愈来愈长,点的个数也会愈来愈多,相交的次数亦会愈来愈多。该变换会对相交次数予以累积筛选出峰值点,通过(ρ, θ)代入公式,反向获得坐标系里的直线方程。

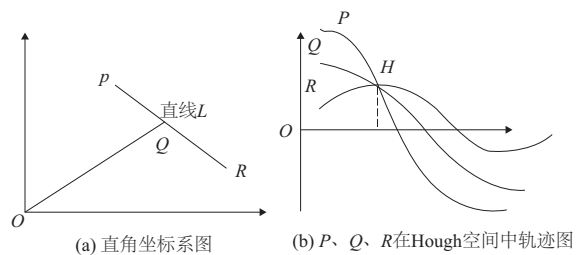


图4 Hough变换示意图

图5为Hough变换检测后的图像,受到Canny边缘检测结果的影响,产生了比较多的干扰直线。

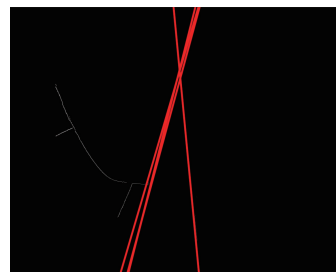


图5 Hough算法处理后的图像

c)最小二乘法曲线拟合

针对 Hough 直线检测算法虽然能够提取图片中的直线,但是会产生干扰点这种情况,需要对不同的直线进行拟合,这里采用了最小二乘法这一常见的拟合手段。最小二乘法^[11]是数学界中常用的一种优化技术。此算法根据最小化误差平方和,通过不断地迭代寻优,可以计算出一些与已知数据间误差平方和最小的数据。本文中,将使用最小二乘法进行曲线拟合。它的数学原理如下。

1)原始数据集 (x_i, y_i) 。

2)假设上述数据的经验方程为 $F(x)$,并有一组待定系数 a_n 。将 (x_i, y_i) 代入方程求差 $y_i - F(x)$ 。考虑误差存在正负号的问题,故取其平方和,记为

$$e = \sum (y_i - F(x_i))^2 \quad (2)$$

3)通过求取 e 的极小值可以得出 a_n ,从而可以根据待定系数得到拟合函数,且该函数可以使误差平方和最小。因此,最小二乘法可运用于曲线拟合。

假设上述过程中,经验函数 $F(x)$ 为一元线性函数。则可通过最小二乘法求取拟合过后的函数。

$$y = ax + b \quad (3)$$

d)使用最小二乘法匹配钢轨边缘

对图像进行直线检测算法过滤后,要提升钢轨两边缘的检测精确度,需要排除直线检测中误差较大的直线簇的干扰。图5显示,钢轨双边缘可以检测出多条干扰直线,使用上述提出的最小二乘法拟合多条直线,达到定位钢轨边缘的目的。钢轨左侧边缘具有正向斜率特性,钢轨右侧边缘具有负向斜率特性,基于钢轨的形态分布,对钢轨两条边缘分别建立左、右两条钢轨边缘的数学模型,确定两直轨的拟合模型,其数学表达式为

$$\begin{cases} y_1 = k_1 x_1 + b_1 \\ y_2 = k_2 x_2 + b_2 \end{cases} \quad (4)$$

钢轨匹配算法流程图如图6所示。

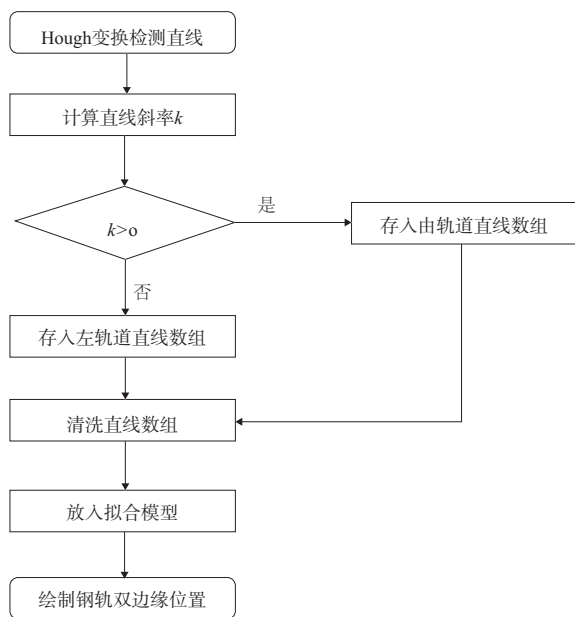


图6 钢轨匹配算法流程图

算法流程大致如下。

1)将检测出的直线划分到左、右两种轨道。

计算检测出的所有直线的斜率,根据斜率的正负粗略划分左右两条斜率。

2)分别对左、右轨道进行数据清洗,剔除斜率和截距过大的直线。计算左、右两组直线的标准差,再将每条直线与标准差做差值计算,若 $|k_n - k_{mean}| > \delta$,则剔除对应直线的所有点。

3)拟合清洗过后的数据。

1.3 计算相对横移量

本次实验由于相对位移量仅限于水平方向,所以可简化相机测距原理,使用尺度因子相机标定法^[12]。如图7所示,当相机光轴与平面法线在一条直线上时,比例因子 p 计算式为

$$p = \frac{D}{d} \quad (5)$$

或

$$p = \frac{z}{f} d_{\text{pixel}} \quad (6)$$

式中: D 为标志物的实际长度; d 为标志物的图像长度; z 为镜头到相机目标的拍摄距离; f 为镜头焦距; d_{pixel} 为像素尺寸。

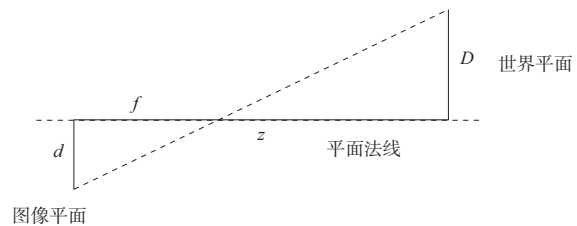


图7 距离换算示意图

2 实验仿真

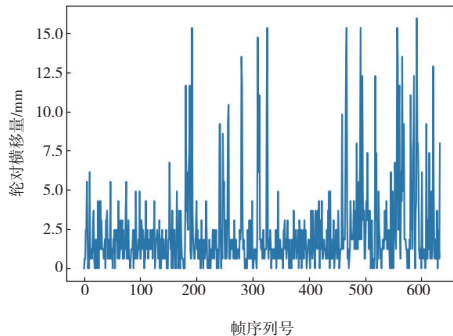
轮对横移量的整体仿真实验流程展示如图8—图11所示。首先通过高速相机采集得到的高速列车运行状态下的轮轨图像(图8);对原始输入图像进行降噪和特征锐化后得到灰度图像;接着对灰度图像边缘检测后的结果进行粗定位以及区域提取,进一步清洗得到如图9所示的结果。图10为对直线簇拟合后的最终效果。图11为通过计算帧图像间相对像素距离并转换成世界坐标的最终轮对横移量结果。



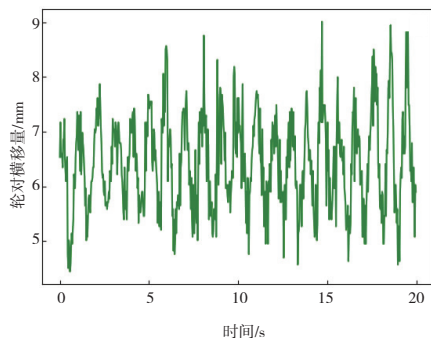
图8 高速运行状态下的轮轨图像 图9 钢轨匹配结果图像



图 10 最终效果图像



(a) 图像处理仿真数据



(b) 根据采样定理复原横移量检测图

图 11 图像处理横移量识别结果

3 结语

本文提出了一种基于非接触式的图像处理技术对轮对横移量检测的新方法,将 Canny 边缘检测算法、Hough 变换直线检测算法和曲线拟合法相结合,对高速列车轮对横移量进行测量,测量精度可以达到 1 个像素差。

参考文献:

- [1] 孙丽霞. 高速列车横向运动稳定性和动态脱轨理论分析及评价方法研究[D]. 北京: 中国铁道科学研究院, 2014.
- [2] 魏来. 高速列车相关运行安全性问题研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- [3] 肖乾, 姜雄峰, 刘海涛, 等. 铁道车轮踏面损伤实时监测方法研究综述[J]. 华东交通大学学报, 2021, 38(4): 99-112, 126.
- [4] 祁明, 祝典, 邹武星. 图像处理技术综述[J]. 数字技术与应用, 2020, 38(2): 2.
- [5] 李晓航, 郭佳, 彭富伦, 等. 一种改进的基于 Hough 变换的道路图像检测方法[J]. 应用光学, 2016, 37(2): 229-234.
- [6] ZHAO D, YANG L, WU X, et al. An improved Roberts edge detection algorithm based on mean filter and wavelet denoising[M]// Advances in Information Technology and Industry Applications. Springer, Berlin, Heidelberg: 2012: 299-305.
- [7] KANOPOULOS N, VASANTHAVADA N, BAKER R L. Design of an image edge detection filter using the Sobel operator[J]. IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1988, 23(2): 358-367.
- [8] RAHMAWATI S, DEVITA R, ZAIN R H, et al. Prewitt and canny methods on inversion image edge detection: an evaluation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1933(1): 012039.
- [9] 陈顺. 几种类型图像边缘检测的相关问题研究[D]. 武汉: 武汉纺织大学, 2021.
- [10] 徐超, 平雪良. 基于改进随机 Hough 变换的直线检测算法[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(5): 66-73.
- [11] 高秋英, 王丽丽, 王荣忠. 最小二乘法曲线拟合及优化算法研究[J]. 工业控制计算机, 2021, 34(11): 100-101.
- [12] 叶肖伟, 董传智. 基于计算机视觉的结构位移监测综述[J]. 中国公路学报, 2019, 32(11): 21-39.

收稿日期: 2021-12-20

(上接第 196 页)

- [9] JUNG J, PARK M, KIM D, et al. Optically sensorized elastomer air chamber for proprioceptive sensing of soft pneumatic actuators[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(2): 2333-2340.
- [10] CHEN Y H, SUN N, LIANG D K, et al. A neuroadaptive control method for pneumatic artificial muscle systems with hardware experiments[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2021, 146: 106976.
- [11] CAO Y, HUANG J, XIONG C H, et al. Adaptive proxy-based robust control integrated with nonlinear disturbance observer for pneumatic muscle actuators[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2020, 25(4): 1756-1764.
- [12] CHEN C, TANG W, HU Y, et al. Fiber-reinforced soft bending actuator control utilizing on/off valves[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2020, 5(4): 6732-6739.
- [13] MORELLI E A. Flight-test experiment design for characterizing stability and control of hypersonic vehicles[J]. Journal of

Guidance, Control, and Dynamics, 2009, 32(3): 949-959.

- [14] LICHOTA P, SZULCZYK J, AGUDELO NOREÑA D, et al. Power spectrum optimization in the design of multisine manoeuvre for identification purposes[J]. Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2017: 1193.
- [15] SCHROEDER M. Synthesis of low-peak-factor signals and binary sequences with low autocorrelation (Corresp.) [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1970, 16(1): 85-89.
- [16] WANG T, ZHANG Y C, CHEN Z, et al. Parameter identification and model-based nonlinear robust control of fluidic soft bending actuators [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(3): 1346-1355.
- [17] MAKKAR C, HU G, SAWYER W G, et al. Lyapunov-based tracking control in the presence of uncertain nonlinear parameterizable friction [C]//IEEE Transactions on Automatic Control. United States: IEEE: 1988-1994.

收稿日期: 2021-11-25