

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104021

# 基于混合模型的钢轨检测识别方法\*

帅琦 董昱

(兰州交通大学自动化与电气工程学院 兰州 730070)

**摘要:**为了改善我国现有钢轨检测识别方法准确性和鲁棒性不高以及弯轨拟合较差等问题,提出一种基于直线-曲线混合模型的钢轨检测识别算法。首先对图像进行预处理,调整滞后阈值进行 Canny 边缘检测。采用累计概率 Hough 变换对直轨检测并完成近远视场的划分以及消失点的确定。对近视场直轨采用直线模型拟合,根据其检测结果对远视场进行循环线性近似获取钢轨特征点,并根据钢轨灰度特征进行验证,采用最小二乘法完成曲线拟合。直线-曲线模型的切换根据制定的规则完成。实验结果表明,提出的算法检测正确率为 90.1%,适用于不同环境的场景,具有较好的鲁棒性。

**关键词:**钢轨识别检测;组合模型;线性近似;累计概率霍夫变换;B 样条曲线

**中图分类号:** TP391.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 580.3099

## Rail detection and recognition method based on hybrid model

Shuai Qi Dong Yu

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low accuracy and robustness of rail detection and recognition methods and poor fitting of curved rail, a rail detection and recognition algorithm based on straight-curve hybrid model is proposed. In the beginning, the image is preprocessed and Canny edge detection is completed by adjusting the lag threshold. The Progressive Probabilistic Hough Transform is used to detect the direct straight track, divide the near and far field of view and determine the vanishing point. The straight track in the near field is fitted by a linear model, and the feature points of the rail are obtained by the circular linear approximation of the far field according to the detection results, and verified according to the gray characteristics of the rail. The least square method is used to complete the curve fitting. The switch of straight-curve model is completed according to the established rules. Experimental results show that the detection accuracy of the proposed algorithm is 90.1%, which is suitable for different environments and has good robustness.

**Keywords:** rail recognition and detection; combination model; linear approximation; progressive probabilistic Hough transform; B-spline curve

## 0 引言

铁路运输过程受天气条件限制较小,且具有运输能力大、成本低、效率高等优点,已成为人们出行的首要选择。在现有情况下,如何进一步提高列车运行的安全性、可靠性是铁路系统亟需解决的问题。国际铁路联盟(UIC)发布 2020 欧亚、中东地区的 31 个铁路公司的事故安全报告,该报告指出,90%的铁路事故由第三方人、物

擅闯铁路线路所致。因铁路行车具有速度快、制动距离长、因线路固定而不可闪避等特征,当在铁路场景中发生地质灾害导致的山体滑坡、塌方、落石,或出现机动车辆、行人、动物横穿轨道等随机侵限行为时<sup>[1]</sup>,可能造成列车脱轨、行车中断、人员伤亡、既有建筑毁坏等一系列严重后果。

根据检测方式不同,异物侵限检测方法可分为接触式和非接触式两种<sup>[2]</sup>。接触式检测方法以电网检测法和光纤光栅检测法为代表,其原理是由传感元件测量防护

收稿日期: 2021-03-03 Received Date: 2021-03-03

\* 基金项目: 国家自然科学基金(61763023)项目资助

网的形变程度确定是否有异物侵限事件的发生。非接触式检测方法主要包括视频、雷达、超声波检测法和红外线屏障法,其原理主要是利用电磁波和声波的传播特性,在不与异物接触的情况下完成检测。目前针对异物侵限问题主要采取的防护和检测手段为在事故频发的特殊地段安装防护网,对桥隧等关键点架设监控设备或相关检测设备,同时采用巡道工和司机瞭望的人工的检查方式共同完成侵限异物的监控和检测。但这些方法检测的时效性不高,且只能实现定点的静态监控。

近年来,随着我国铁路不断面向智能化方向发展,对于保障列车安全行驶的技术要求也越来越高。根据国际电工协会标准 IEC62290-1,在自动化等级(grade of automation, GoA),GoA-3、GoA-4 级下要求列车运行环境完全由自动化设备进行检测<sup>[3-5]</sup>。传统的静态监测已经不能满足复杂工作环境和全线路实时监测等要求,因此具备一套可以连续实时检测列车前方障碍物的系统,是当前复杂自然环境下保障列车安全运行的现实需求。而钢轨作为判断异物是否侵限的重要依据,其检测的准确性是实现列车前方运行环境感知的基础<sup>[6-7]</sup>。根据铁路限界标准,限界外侧与中心线路距离应小于 2 440 mm,以标准轨距 1 435 mm 按照对应像素等比例扩充即可得到限界。因此对于异物侵限的铁路限界模型检测问题,即可转换为图像中的钢轨检测问题。

通过模板和特征检测是目前最普遍的基于计算机视觉的结构化道路检测方法<sup>[8-9]</sup>。钢轨检测与无人驾驶车辆的车道线检测有许多共同特征,然而铁路场景复杂,除钢轨外还具有应答器、道砟、轨枕等其他干扰部件,因此针对车道线的检测方法难以完全适用于钢轨检测。对此,国内外众多学者提出了不同的钢轨检测方法。基于特征的钢轨检测一般通过轨枕和道床与钢轨在方向、边缘、长度和局部区域内纹理与灰度等特征的对比差异实现钢轨提取,该方法的精确度高,但容易受到光照阴影的影响,且实时性较差<sup>[10-13]</sup>。基于模型的钢轨检测方法根据不同几何形态的钢轨采用不同的模型进行拟合,这种方法计算量小,检测速度快,抗干扰能力强,具有一定的鲁棒性<sup>[14]</sup>。王前选等<sup>[15]</sup>采用基于 Radon 变换的 Bresenham 直轨检测算法,由于其定点监测,不能有效的拟合弯轨区段,也不适合连续实时的场景。Zheng 等<sup>[16]</sup>提出一种分段直线的拟合方法,通过图像分割和直线检测得到大量的线段端点,然后采用最小二乘法进行曲线拟合,但是分割过小直线检测时间长效果差,分割过大导致拟合不准确,固定分割数难以满足不同场景的需求。

本文提出了一种基于直线-曲线混合模型的钢轨检测识别方法,针对远视场区域,采用牛顿法线性近似搜索钢轨边界点,并考虑钢轨的灰度特征进行验证筛选,根据钢轨的不同几何特征切换混合模型完成对钢轨线的

检测。

## 1 钢轨检测识别算法结构

本文采用的基于直线-曲线混合模型的钢轨检测识别算法主要模块以及对应的理论支撑框图如图 1 所示。

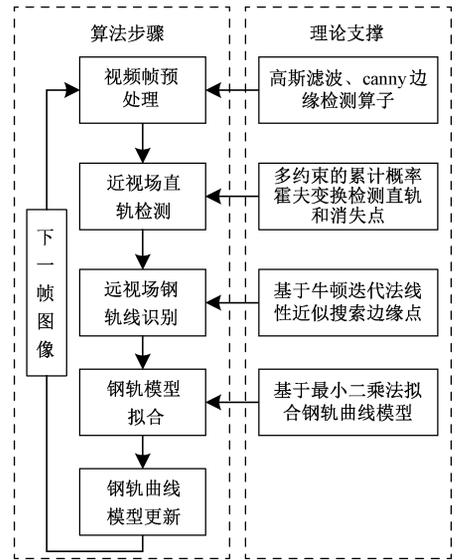


图 1 钢轨检测识别算法结构

Fig. 1 Block diagram of rail detection and recognition algorithm

算法首选对视频帧进行降噪处理以及边缘提取等预处理,完成近视场直轨的检测。将近视场检测终点作为搜索起点,根据线性拟合结果设置搜索区域对远视场进行循环线性近似得到钢轨边界点。通过模型的判别,若为直轨则延伸近视场检测结果,若为弯轨采用 3 次 B 样条曲线模型进行拟合,完成钢轨线的检测。

## 2 钢轨边缘特征检测

### 2.1 图像预处理

相机采集的原始图像如图 2(a) 所示,由于相机采集的列车前方运行图像包含大量的背景信息,并且在机车行走时会产生难以避免的振动,导致图像中产生一定的噪声干扰。

本文首先将原始图像灰度化,减小运算量的同时也降低光照改变产生的影响。然后采用中值滤波进行降噪处理,从而减少道砟纹理等噪声点,提高图像的质量。预处理结果如图 2(b) 所示。

### 2.2 边缘提取

钢轨属于结构化道路,具有相对不变的结构方向,而且其颜色纹理特征与图像中其他非钢轨信息有显著区别。因此我们采用 Canny 边缘检测器对图像进行边缘检

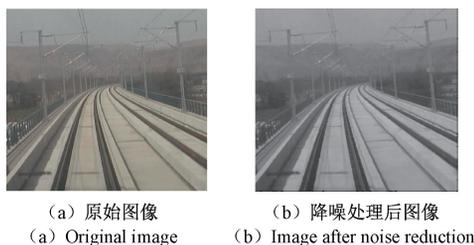


图 2 图像预处理

Fig. 2 Image preprocessing

测,如图 3(a)所示。

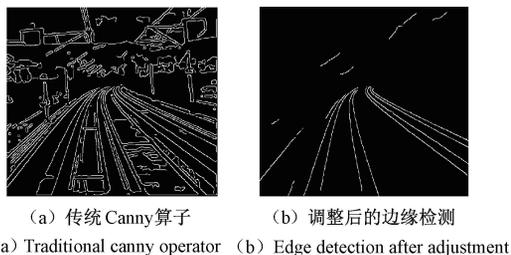


图 3 钢轨边缘检测

Fig. 3 Rail edge detection

由图 3 可知,Canny 边缘检测器不仅检测出了钢轨边缘信息,同时也检测出大量如轨枕等其他非钢轨的边缘信息。Canny 边缘检测通过  $T_1$  和  $T_2$  ( $T_1 < T_2$ ) 两个滞后阈值,对边缘进行检测和连接。当某点的像素值大于  $T_2$  时,该像素作为边缘被保留;当某点的像素低于  $T_1$  时,将该点的像素值置零清除。如果某点的像素值介于高低两个阈值之间,当该点与一个已经确定的边缘像素连接时被保留。为了后续便于对钢轨线进行检测提取,根据钢轨与轨枕等干扰信息的结构方向不同,本文通过调整两个滞后阈值对背景进行过滤,最大程度实现钢轨与背景信息的分割。对比调整前后的 Canny 边缘检测效果,可以看出采用调整过的边缘检测能够较好地提取出钢轨线并且过滤枕木等水平边缘信息的影响,有利于进行下一步的钢轨检测。

### 3 钢轨混合模型建立

选择合适的钢轨模型对后续的限界模型构建的准确性和实时性至关重要。对于现有的结构化道路常用模型来说,直线模型由于其模型简单、计算简便等优点,使用较为广泛。钢轨存在直轨和弯轨两种形状,对于弯轨来说,直线模型不能实现较好的拟合效果。摄像机固定安装在机车车头位置,摄像机与钢轨直接相对视角固定,在采集的图像中近视场中呈现直轨特征,对于远视场来说则可能出现直轨或弯轨两种情况。因此本文将钢轨划分

为近视场的直轨段和远视场的曲线段,采用直线-曲线混合模型完成对钢轨线的拟合。

#### 3.1 近远视场区域划分

由铁路设计标准可知,钢轨为两条连续且平行的曲线,因此根据相机成像透视原理,在世界坐标系下两条平行的钢轨在图像坐标系中交于一点,该点称之为消失点,消失点内侧为需要检测钢轨线区域范围。图像坐标系的定义如图 4 所示,以  $v_d$  作为近远视场的边界。

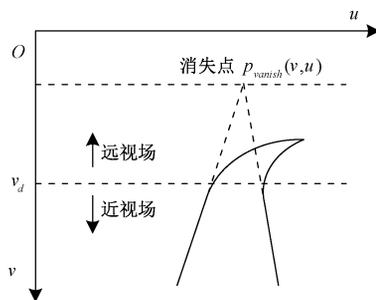


图 4 近远视场划分示意图

Fig. 4 Schematic diagram of myopic field and hyperopia field division

对于近视场直轨,采用标准直线模型:

$$\begin{cases} u_l(v) = k_l v + b_l (v \geq v_d) \\ u_r(v) = k_r v + b_r (v \geq v_d) \end{cases} \quad (1)$$

#### 3.2 远视场曲线模型选取

我国铁路线路主要有直线、缓和曲线、圆曲线三种组成,并且通过缓和曲线完成从直线到圆曲线的过渡。样条曲线能够较为容易地完成任意形状的曲线拟合,并且具有较好的灵活性、光滑性和连续性等特点。基于以上的优点以及我国铁路使用的缓和曲线为三次曲线这一先验知识,本文选用 3 次 B 样条曲线作为拟合远视场区域钢轨线的数学模型<sup>[17]</sup>,满足不同轨道的要求,使拟合效果更加平滑贴近实际。

B 样条曲线模型的数学描述为:

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i N_{i,k}(t) \quad (2)$$

式中: $P_i$  为控制点; $N_{i,k}(t)$  为调和函数,也被称为  $k$  次 B 样条基函数。

3 次 B 样条曲线示意图如图 5 所示。设置 4 个离散随机点  $P_0, P_1, P_2, P_3$ , 其坐标为  $(x_0, y_0), (x_1, y_1), (x_2, y_2), (x_3, y_3)$ 。再设置两个中间点  $Q_1, Q_2$ , 其中  $Q_1 = (P_0 + P_2)/2, Q_2 = (P_1 + P_3)/2$ 。为了保证得到的曲线的始端和终端分别为  $P_0$  和  $P_3$ , 还需要添加两个点  $P_s$  和  $P_e$  分别为位于起始处和终端处, 其中  $P_s = 2P_0 - P_1, P_e = 2P_3 - P_2$ 。最终按照控制点  $P_s, P_0, P_1, P_2, P_3, P_e$  这一顺序拟合得到三段 3 次 B 样条曲线, 每段曲线都由 4 个控制节点  $P_i$  控制。

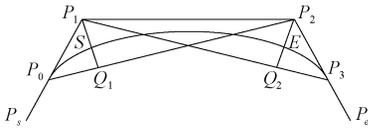


图5 3次B样条曲线拟合示意图

Fig. 5 Cubic B-spline curve fitting diagram

B样条曲线具有局部性,当其中一个控制点出现变动时,只会对相邻的曲线段的形状产生影响,不会改变整条曲线的走向。在实际应用中,若出现某个奇异的拟合点,由于B样条曲线的局部性存在,不会对整条钢轨线的拟合造成影响。

3次B样条曲线的矩阵表达式为:

$$f(t) = \frac{1}{6} [t^3 \quad t^2 \quad t \quad 1] \begin{bmatrix} -1 & 3 & -3 & 1 \\ 3 & -6 & 3 & 0 \\ -3 & 0 & 3 & 0 \\ 1 & 4 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix}$$

$$0 \leq t \leq 1 \tag{3}$$

当平面上存在  $n$  个离散点时,记为  $P_i (i=0, 1, 2, \dots, n-1)$ 。以  $P_0, P_1, P_2, P_3$  为控制节点绘制第1段曲线,以  $P_1, P_2, P_3, P_4$  绘制第2段曲线,以此类推,以  $P_{n-4}, P_{n-3}, P_{n-2}, P_{n-1}$  绘制第  $n-3$  段曲线。用该方法绘制曲线具有  $C^2$  级连续性。

### 3.3 模型切换原则

计算远视场的起始点和终点的斜率与近视场直轨部分斜率之差是否满足  $\pm 5^\circ$ ,若满足,则说明远视场为直轨,那么保留近视场直轨参数,延长其直线范围;若不满足,说明远视场为弯轨,选择3次B样条曲线模型进行弯轨拟合。

## 4 钢轨检测识别与模型的拟合

### 4.1 近视场直轨标定

霍夫变换<sup>[18]</sup>作为一种经典的直线检测算法,被广泛应用在结构化道路检测中。标准霍夫变换通过直线上的点在标准坐标下与参数空间中曲线的映射关系,利用同一条直线上的点在参数空间中对应曲线也交于一点这一特性,把直线的提取转变为统计最大值的过程,其原理如图6所示。该算法具有良好的抗噪性和稳定性,但是由于其需要不断累加的统计特性,导致计算量较大。为了改善这个不足,本文采用基于约束条件的累计概率霍夫变换(progressive probabilistic Hough transform, PPHT)对近视场的直轨进行检测。

PPHT<sup>[19]</sup>是在经典霍夫变换的基础上,由检测全部的边缘点改为随机抽取边缘图像的某个像素点,更适合

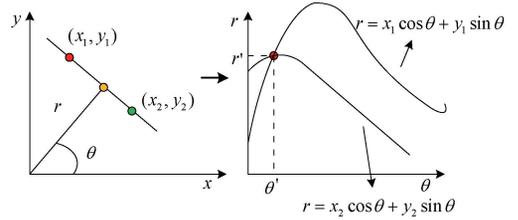


图6 Hough变换原理

Fig. 6 Schematic diagram of Hough transform

对实时性要求高的系统。

为了进一步减少算法的计算量,本文分别对直线的长度和角度进行限制约束。在车载摄像机安装位置确定之后,钢轨在近视场中呈现的角度也就确定相对集中在  $[\pi/3, \pi/2]$  和  $[-\pi/3, -\pi/2]$ 。由于直轨始终位于图像消失点之下,因此近视场直轨的长度小于1/2原始图像对角线的长度,本文据此来对PPHT进行约束以减少计算的复杂度,提高运行效率。对于极坐标累加器  $(\rho_i, \theta_i)$ ,  $\rho$  的范围为  $[-D/2, D/2]$ ,  $\theta$  的范围为  $[\pi/3, \pi/2]$  和  $[-\pi/3, -\pi/2]$ ,且两个区间范围内各只保留一条最大值记录。近视场钢轨检测结果如图7所示。



图7 近视场钢轨检测结果

Fig. 7 Rail inspection results in near field

标准坐标与极坐标之间的转换公式为  $\rho = v \cos \theta + u \sin \theta$ ,根据公式即可得到近视场标准直轨模型公式为:

$$\begin{cases} u_l(v) = -\cot \theta_l + \rho_l / \sin \theta_l (v \geq v_d) \\ u_r(v) = -\cot \theta_r + \rho_r / \sin \theta_r (v \geq v_d) \end{cases} \tag{4}$$

由式(4)可得到左右直轨直线模型的交点,即为消失点  $P$  的坐标。由摄像机透视成像以及枕木之间的距离,将近视场与远视场分界位置  $v_d$  近似设为消失点  $P$  下图像的1/2处。结合左右直轨直线模型方程,即可求出左右轨道与远近视场切换处的交点坐标,同时也是远视场钢轨模型的始端坐标。

### 4.2 远视场钢轨检测识别

#### 1) 基于线性近似的钢轨特征点提取

近视场的直轨模型提取完成后,可以得到近视场边界的钢轨的边界信息。根据铁路线路标准对线路设计的

要求,可认为钢轨是连续平滑的曲线。在基于此先验知识和已经检测出的近视场直轨模型的基础上,为了得到远视场钢轨边界的坐标,利用牛顿迭代法<sup>[20]</sup>对远视场区域进行线性近似,完成钢轨边界点的搜索。

在近视场已检测到的直轨基础上,提取部分近视场直轨临界点集,令其为  $S = \{S_i = (x_i, y_i) | i = 1, 2, 3, \dots, n\}$ 。首先提取点集  $S$  中末尾  $m$  个点进行线性拟合,得到直线  $y = f(x)$ 。过点  $S_n$  做该直线的切线  $L$  作为的近似线,其方程为:

$$y = f(x_n) + f'(x - x_n)(x - x_n) \tag{5}$$

以  $a$  为间隔,根据近似线设置远视场搜索范围:

$$x_c = x_n + a \tag{6}$$

$$y_c = f(x_n) + f'(x_n)(x_c - x_n) \tag{7}$$

以近似线  $L$  上点  $(x_n, y_n)$  和  $(x_c, y_c)$  为边界,将两点间的截得的近似线作为中轴线,设置搜索区域的宽度为  $b$ ,将该区域内搜索到的点作为钢轨线的特征点。线性近似示意图如图 8 所示,其中  $m$  个拟合点以及搜索区域中的特征点在图中分别标出。

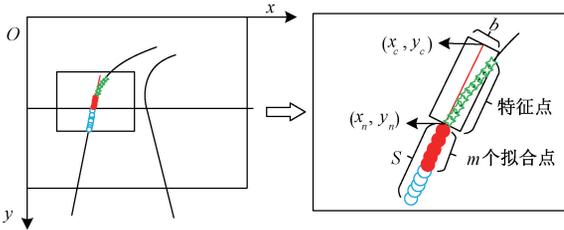


图 8 线性近似示意图

Fig. 8 Schematic diagram of linear approximation

### 2) 基于钢轨灰度特征的特征点验证

图像中钢轨的空间特征明显,在几何特征上,钢轨为纵向的连续曲线,而轨枕和道床为水平横向直线,在边缘检测时已经根据此项差别对干扰点进行初步剔除。此外根据标准钢轨轨距为 1 435 mm,因此左右钢轨间的距离需满足此标准规定。由于列车与钢轨接触行驶,摩擦导致表面呈现较高的灰度亮度值,与其他部分存在明显差别。

部分钢轨截图如图 9 所示,提取图 9 中标记线上的灰度投影如图 10 所示。由图 10 可知,由于钢轨亮度较高,钢轨在灰度投影中表现出两个幅值较高的近似矩形的脉冲。



图 9 部分钢轨截面

Fig. 9 Partial rail section

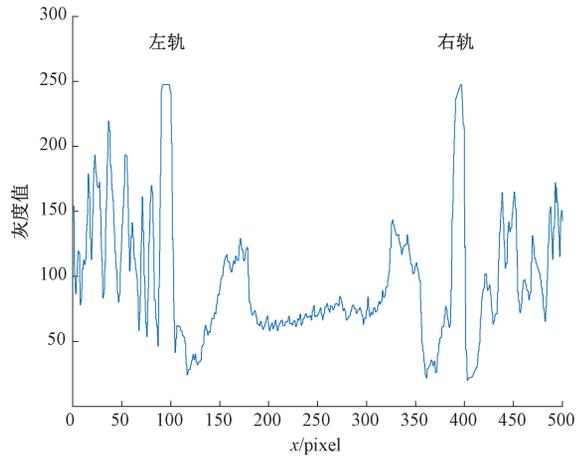


图 10 截面灰度投影

Fig. 10 Cross section gray projection

基于以上先验知识对获取到的钢轨特征点进行验证。首先在特征点周围设定矩形窗口  $S_{p \times q}$  进行采样,根据式(8)、(9)对采样区域进行灰度分布计算。

$$h(j) = \sum_{i=1}^p S_{p \times q}(i, j), j \in \{1, 2, 3, \dots, q\} \tag{8}$$

$$G(j) = \frac{h(j)}{\max\{h(j)\}}, j \in \{1, 2, 3, \dots, q\} \tag{9}$$

式中:  $h(j)$  为每个特征点的灰度值,  $G(j)$  为钢轨线横截面的灰度分布。

由图 10 可知,若是单条钢轨线的横截面灰度投影,呈现近似矩形的单脉冲形状,因此单条钢轨线横截面的灰度分布也呈明显的单脉冲特性,如图 11 所示。由钢轨点灰度分布呈现相似轮廓这一特性对检测到的特征点进行验证,再通过扰动分析的方法对验证通过的特征点进行筛选,最终得到真实钢轨线边界点,并将其并入到点集  $S$  中作为下一次循环的线性拟合点。

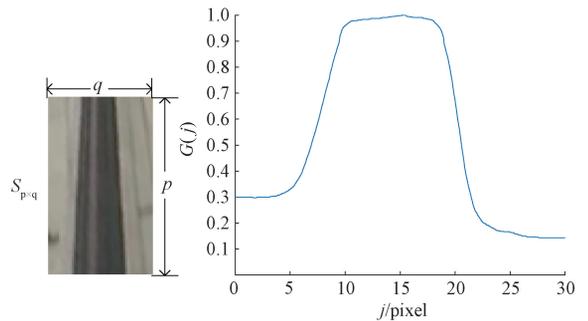


图 11 特征点验证

Fig. 11 Feature point verification

如果出现在搜索区域内没有检测到特征点以及某个特征点造成钢轨线的斜率出现较大变化的情况时,缩小间隔长度  $a$  之后再次进行搜索。重复以上循环步骤,直

到完成远视场区域内边界点的搜索。

### 3) 基于最小二乘法的模型拟合

在拟合钢轨线模型时,常见的方法有随机抽样一致性算法(RANSCA)和最小二乘法。RANSCA 其优点是抗噪性好,但是需要循环迭代计算,不适合对实时性要求较高的系统。最小二乘法计算速度快,缺点是容易受到噪声干扰。在本文中利用线性近似得到的钢轨边界点不存在或只存在极少数噪声点,因此本文决定采用最小二乘法拟合钢轨模型,既可以保证精确度又能确保算法的计算效率。

## 5 钢轨检测识别算法流程

本文提出的基于混合模型的钢轨检测识别算法流程主要分为图像预处理、近视场直轨模型的求解、远视场特征点搜索以及远视场钢轨模型的判断和拟合 4 个部分。具体检测流程如图 12 所示。当检测过程中出现算法错误或特征点搜索失败等情况时,系统自动回到初始化部分,并给出检测失败的提示。

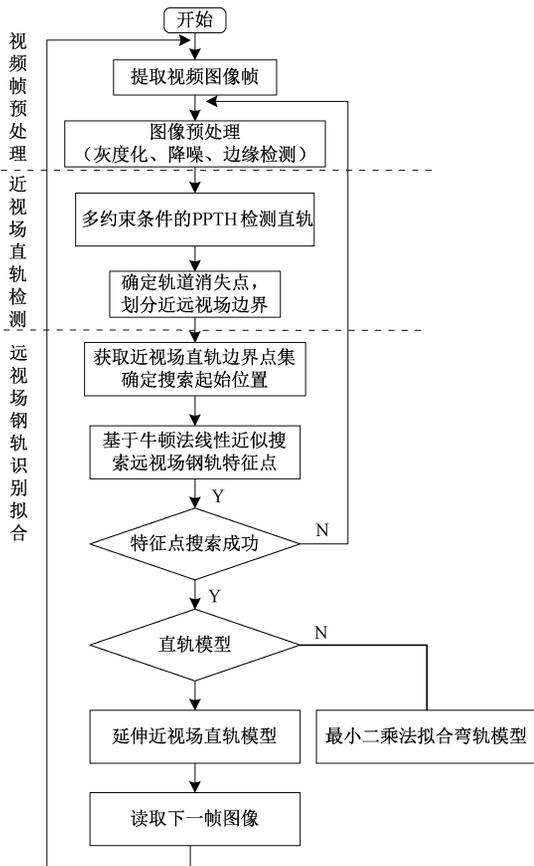


图 12 钢轨检测识别算法流程

Fig. 12 Algorithm flow of rail detection and recognition

钢轨识别检测算法具体流程如下。

1) 提取车载视频图像帧作为初始图像等待下一步处理。

2) 对初始图像进行预处理,包括灰度化、中值滤波降噪、以及基于双阈值的 Canny 边缘检测。

3) 采用多约束条件的 PPHT 对近视场的钢轨进行检测,完成近视场直轨的标定。

4) 根据获得的直轨参数求解轨道消失点坐标,并将轨道消失点下图像的 1/2 作为近远视场的分界位置。

5) 根据直轨参数和远近视场分界线求解交点坐标,确定远视场特征点搜索的起始位置,并提取近视场直轨临近边界的部分点集。

6) 采用牛顿迭代法对远视场区域进行线性近似,完成钢轨边界特征点的搜索。利用钢轨的灰度特征进行特征点的验证,最终完成远视场钢轨边界点的搜索。

7) 根据模型判别规则确定远视场拟合模型,若为直轨则保留近视场直轨参数,延长其直线范围;若为弯轨,选择 3 次 B 样条曲线模型完成钢轨曲线的拟合。

8) 顺序提取下一帧视频图像重复以上过程。

## 6 实验结果分析

为了验证钢轨检测识别算法的性能,本文选取了宝鸡-兰州客运专线和甘肃省兰州市某地方线两个场景下车载摄像机采集的实时运行视频数据,并将视频拆解成图像帧进行离线处理。算法通过 MATLAB2016a 实现,实验环境为 Intel Core i5 CPU, 2.5GHz, RAM8GB, Windows10。

实验选取两个场景下共 242 幅图像,其中客运专线 174 幅,地方线 68 幅,图像像素尺寸统一为 400×360。不同场景下,钢轨检测识别的结果如图 13 所示。

图 13(a) 为正常光照下的直轨图像,本文和文献 [14] 能够准确提取钢轨曲线,而文献 [12] 在检测过程中,像素点提取完全依靠边缘检测结果,因远处图像的边缘特征较弱,未能准确获取到远处钢轨的像素点,因此对远视场钢轨曲线的提取产生了偏移;图 13(b) 有阴影遮挡的弯轨图像,本文算法在面对强干扰的场景下能够较为准确的提取钢轨线,文献 [14] 因光影信息影响导致阴影遮挡部分的提取结果出现偏移,文献 [12] 由于弯轨处斜率变化仅能识别近视场直轨部分;图 13(c) 为隧道内直轨检测图像,由于隧道内光照不足,本文算法在远视场处出现一定偏移,但仍能提取出钢轨曲线,文献 [14] 由于检测到的远视场边缘特征不足,因此提取到的钢轨曲线较短,文献 [12] 由于对边缘检测的依赖性且光照不足导致的边缘检测效果不佳,导致不能有效地提取到主直线的像素点,从而无法完成下一步的直线拟合步骤,出现了漏检情况;图 13(d) 为隧道出口处曝光过度图像,由于

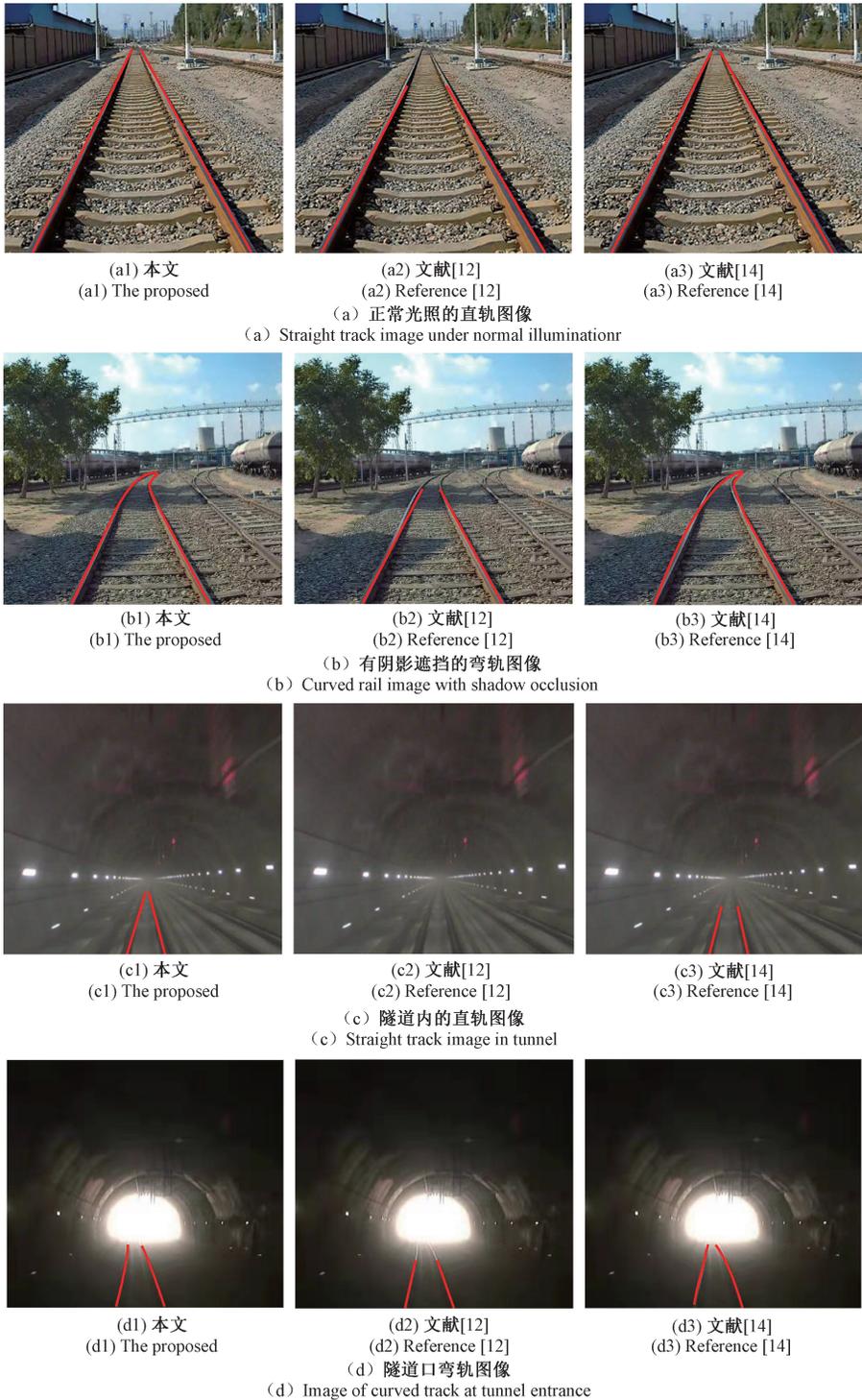


图 13 钢轨检测实验结果

Fig. 13 Experimental results of rail inspection

出口处曝光度过高,只能提取近视场处钢轨曲线,无法检测到远视场隧道出口处预期的钢轨曲线。

由此可见,本文提出的基于直线-曲线混合模型的钢轨检测识别算法能够适应绝大多数的场景,具有较好的

鲁棒性,同时采用的数学模型也能更为精确的拟合钢轨曲线。

通过对实验结果进行统计分析,共有 218 幅图像准确提取钢轨曲线,16 幅图像提取钢轨曲线错误,8 幅图像

出现漏检情况,算法正确率为 90.1%,平均用时为 39.5 ms,而文献[12]算法的检测正确率 77%,文献[14]算法检测正确率为 89.6%,平均用时为 42 ms。实验结果对比如表 1 所示。

表 1 算法实验检测结果对比

Table 1 Comparison of algorithm experimental results

算法	正确率/%	误检率/%	漏检率/%	平均耗时/ms
文献[12]	77	-	-	-
文献[14]	89.6	8.3	2.1	42
本文	90.1	6.6	3.3	39.5

## 7 结 论

本文提出一种基于直线-曲线混合模型的来实现对铁路钢轨曲线的描述,从而能够满足我国铁路不同形状的线路要求,使得拟合效果更加精准。采用基于牛顿法对远视场区域进行线性近似循环搜索钢轨特征点,并根据钢轨的灰度特征进行特征点验证,提高了算法的实时性和准确性。通过在不同环境的场景下进行实验,结果表明本文提出的算法在不同环境下对钢轨线的检测均具有较高的正确率,在实时性方面也具有一定的优势。在后续研究中,可将算法应用于铁路异物侵限检测。

## 参考文献

- [1] 王洋,余祖俊,朱力强,等.基于 CNN 的高速铁路侵限异物特征快速提取算法[J].仪器仪表学报,2017,38(5):1267-1275.  
WANG Y, YU Z J, ZHU L Q, et al. Fast feature extraction algorithm for high-speed railway clearance intruding objects based on CNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(5): 1267-1275.
- [2] 郭保青,杨柳旭,史红梅,等.基于快速背景差分的高速铁路异物侵入检测算法[J].仪器仪表学报,2016,37(6):1371-1378.  
GUO B Q, YANG L X, SHI H M, et al. High-speed railway clearance intrusion detection algorithm with fast background subtraction [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(6): 1371-1378.
- [3] ZHANG Z, TRIVEDI C, LIU X, et al. Automated detection of grade-crossing-trespassing near misses based on computer vision analysis of surveillance video data [J]. Safety Science, 2017, 110: 276-285.
- [4] Railway applications-Urban guided transport management and command/control systems Part 1: System principles and fundamental concepts [S]. International Electrotechnical Commission, IEC 62290-1-2014.
- [5] 宁滨,莫志松,李开成.高速铁路信号系统智能技术应用及发展[J].铁道学报,2019,41(3):1-9.

- NING B, MO ZH S, LI K CH. Application and development of intelligent technologies for high-speed railway signaling system [J]. Journal of the China Railway Society, 2019, 41(3): 1-9.
- [6] KAZANSKIY N L, POPOV S B. Integrated design technology for computer vision systems in railway transportation [J]. Pattern Recognition and Image Analysis, 2015, 25(2): 215-219.
- [7] AMARAL V, MARQUES F, LOURENÇO A, et al. Laser-based obstacle detection at railway level crossings [J]. Journal of Sensors, 2016, DOI: 10.1155/2016/1719230.
- [8] 吴一全,刘莉.基于视觉的车道线检测方法研究进展[J].仪器仪表学报,2019,40(12):92-109.  
WU Y Q, LIU L. Research and development of the vision-based lane detection methods[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019, 40(12): 92-109.
- [9] TIAN J, LIU SH W, ZHONG X Y, et al. LSD-based adaptive lane detection and tracking for ADAS in structured road environment[J]. Soft Computing, 2021, DOI:10.1007/s00500-020-05566-4.
- [10] 王忠立,蔡伯根.一种基于几何约束的轨道提取方法研究[J].交通运输系统工程与信息,2017,17(6):56-62,84.  
WANG ZH L, CAI B G. Geometry constraints-based method for visual rail track extraction [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017, 17(6): 56-62, 84.
- [11] 刘丽瑶,陈强,李艳娜,等.应用二阶 Harris 算子的高铁轨道近景影像特征点提取[J].测绘科学,2015,40(5):84-88.  
LIU L Y, CHEN Q, LI Y N, et al. Feature points extraction from high speed railway track images based on second derivative Harris operator [J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(5): 84-88.
- [12] 李睿,武晓春.基于数字图像处理的直线型铁轨的自动识别[J].电视技术,2014,38(03):167-169.  
LI R, WU X CH. Automatic identify of linear tracks based on digital image processing [J]. Video Engineering, 2014, 38(3): 167-169.
- [13] 闵永智,殷超,党建武,等.基于图像色相值突变特征的钢轨区域快速识别方法[J].交通运输工程学报,2016,16(1):46-54.  
MIN Y ZH, YI CH, DANG J W, et al. Fast recognition method of rail region based on hue value mutation feature of image [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2016, 16(1): 46-54.
- [14] 姜泽,董昱.基于 Hough 变换和 Catmull-Rom 样条曲线

- 的钢轨检测算法 [J]. 图学学报, 2018, 39 (6): 1078-1083.
- JIANG Z, DONG Y. Rail detection algorithm based on Hough transform and Catmull-Rom spline curve [J]. Journal of Graphics, 2018, 39(6): 1078-1083.
- [15] 王前选, 梁习锋, 刘应龙, 等. 铁路钢轨视觉识别检测方法 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2014, 45 (7): 2496-2502.
- WANG Q X, LIANG X F, LIU Y L, et al. Railway rail identification detection method using machine vision [J]. Journal of Central South University ( Science and Technology), 2014, 45(7): 2496-2502.
- [16] ZHENG Y S, JIN Y W, DONG Y. Rail Detection based on LSD and the least square curve fitting [J]. International Journal of Automation and Computing, 2021, 18(1): 85-95.
- [17] 李卫东, 侯丽虹. 基于三次 B 样条曲线拟合的列车定位方法研究 [J]. 控制工程, 2017, 24(1): 135-140.
- LI W D, HOU L H. A study on the train positioning method based on cubic B-spline curve fitting [J]. Control Engineering of China, 2017, 24(1): 135-140.
- [18] 付利军, 兰方鹏. 边缘信息耦合改进的 Hough 变换的车道线实时检测算法 [J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(8): 166-172.
- FU L J, LAN F P. Lane detection algorithm based on edge information coupling improved Hough transforms [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019, 33(8): 166-172.
- [19] BOURDRAA O, HIDOUCI W K, MICHELUCCI D. Using skeleton and Hough transform variant to correct skew in historical documents [J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2020, 167: 389-403.
- [20] 王宝锋, 齐志权, 马国成, 等. 基于线性逼近的车道线弯道识别方法 [J]. 北京理工大学学报, 2016, 36(5): 470-474.
- WANG B F, QI ZH Q, MA G CH, et al. Novel lane curve detection method using linear approximation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2016, 36(5): 470-474.

### 作者简介



**帅琦**, 2019 年于西南交通大学获得学士学位, 现为兰州交通大学硕士研究生, 主要研究方向为铁路信号、图像处理。

E-mail: 11369647437@qq.com

**Shuai Qi** received her B. Sc. degree from Southwest Jiaotong University in 2019. Now she is a M. Sc. candidate at Lanzhou Jiaotong University. Her main research interests include railway signal and image processing.



**董昱**, 1985 年于兰州交通大学获得学士学位, 现为兰州交通大学教授, 主要研究方向为轨道交通运输自动化。

E-mail: 1761853586@qq.com

**Dong Yu** received his B. Sc. degree from Lanzhou Jiaotong University in 1985. Now he is a professor at Lanzhou Jiaotong University. His main research interest includes rail transit transportation automation.