

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2210721

基于 LSD 聚类拟合与 KF 的轨道检测算法^{*}

刘佳嘉 白颖昊

(中国民用航空飞行学院航空电子电气学院 广汉 618307)

摘要: 针对传统无人机巡检中视觉轨道识别的识别效率低、精度差的问题,提出了一种基于 LSD 的约束聚类拟合与卡尔曼滤波相结合的轨道线检测算法。首先针对由于镜头视角造成的视角畸变,采用 IPM 算法矫正,并通过 LSD 算法检测出轨道轮廓,在轨道间距约束将 LSD 检测结果进行聚类并进行最小二乘拟合得到轨道直线。然后根据轨道几何特征和无人机动力学特性建立数学模型,并结合卡尔曼滤波器对轨道坐标信息进行跟踪估计,以保证算法的稳定性和鲁棒性。采用无人机采集多个场景的轨道图像作为测试样本,对检测算法与其他算法进行对比实验。实验结果表明,本文轨道识别算法优于其他算法,其轨道准确识别率达到 92.49%,识别速率达到 23 frame/s,满足轨道检测的稳定性和实时性要求。

关键词: 轨道检测;线性近似;线段检测器(LSD);卡尔曼滤波;约束聚类

中图分类号: U298.12;V279 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Track detection algorithm based on LSD cluster fitting and KF

Liu Jiajia Bai Yinghao

(Aviation Electronic and Electrical Institute, Civil Aviation Flight University of China, Guanghan 618307, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and poor precision of visual track recognition in traditional UAV inspection, an algorithm for track detection based on LSD constrained cluster fitting and Kalman filter is proposed. Firstly, IPM algorithm was used to correct the Angle distortion caused by the lens Angle, and the track contour was detected by LSD algorithm. Under the constraint of track spacing, LSD results were clustered and the track lines were obtained by least square fitting. Then, a mathematical model is established according to the geometric characteristics of the orbit and the dynamics characteristics of UAV, and the track coordinate information is estimated by Kalman filter to ensure the stability and robustness of the algorithm. The trajectory images of multiple scenes collected by UAV are used as test samples, and the detection algorithm is compared with other algorithms. The experimental results show that the track recognition algorithm in this paper is better than other algorithms, and its track accuracy recognition rate reaches 92.49%, and the recognition rate reaches 23 frame/s, which meets the stability and real-time requirements of track detection.

Keywords: track detection; linear approximation; line segment detector (LSD); Kalman filtering; constrained clustering

0 引言

铁路运输由于其运输能力强、成本低、受天气影响小等优点,已成为人们出行工具的首选。但目前如何进一步提高列车运行的可靠和安全性,仍是铁路交通系统亟待解决的问题。据国际铁路联盟发布的安全安全报告显示,90%的铁路事故是由于人或物闯入铁路线路导致。由于铁路运输速度快,当出现异物侵入时,容易造成脱轨、行车中断、人员伤亡等严重后果。

针对异物入侵的问题,当前主要手段是在事故多发地段架设监控、检测设备,同时采用巡道工和司机瞭望等方式辅助监控。但这些方法时效性低,且具有只能定点监控的局限。近年来,随着电气智能化和自动化的发展,铁路交通对安全行驶的要求越来越高。根据国际电工协会标准 IEC62290-1,在自动化等级(grade of automation, GoA)-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^[1-2]。传统的定点检测已无法满足复杂的铁路交通环境和实时行要求,而无人机作为近年来的热门,无人机巡检

收稿日期:2022-07-18

^{*} 基金项目:四川省科技厅项目(2022JDKP0093)资助

不受轨道地理位置的影响,同时巡检成本低、操作方便、时效性高等优点。因此一套可以实时运行检测轨道交通的无人机巡检设备是解决铁路环境安全保障问题的可行方案^[3-4]。对于异物入侵的问题,可转换为图像中的钢轨检测问题。目前,轨道的视觉识别算法主要分为基于消隐点和基于轨道模型两类。基于消隐点的方法以轨道线交点为消隐点,采用不同的轨道边缘检测和直线检测的算法得到轨道直线方程并计算出消隐点^[5-6],该类算法执行速度快但很难准确描述轨道图像中的具体轨道信息,而导致识别准确率低。

基于轨道模型的方法以轨道的结构特征作为轨道识别基础,直接识别轨道线在二维平面上的位置方程,从而得到更准确的轨道信息。该方法可分为模板匹配和特征对比^[7]两种。模板匹配的检测算法根据局部范围内的钢轨采用分段直线、样条曲线、二次或高次曲线等描述模型来实现对轨道线的拟合^[8]。王前选等^[9]通过 Bresenham 算法完成对直轨的数学描述,姜泽等^[10]通过 Hu 不变矩特征度量完成可飘移窗口搜索算法对轨道的识别,并基于模型更新完成模型拟合,但轨道的模型对噪声的扰动比较敏感,且相邻帧图像间的轨道数学描述会由于噪声的扰动出现抖动。特征对比方法利用轨道、枕木和道砟在图像中的方向、边缘梯度和局部灰度或纹理的特征差异来分割出钢轨轮廓^[11]。陈明曦等^[12]采用中值平滑滤波并用改进 Canny 算法通过利用铁轨特征实现铁轨的边缘检测。基于特征对比的方法有着较高的准确率,且鲁棒性能较高,在特征对比方法基础上结合直线检测算法拟合得出轨道直线,可准确得出轨道直线。

常见的直线检测算法有霍夫直线检测算法、线段检测算法(line segment detector, LSD)。霍夫直线检测算法通过对图像的所有像素点建立参数空间,基于统计学对所有像素点的霍夫变换参数进行投票得到最优的直线参数^[13],刘成等^[14]采用连通区域检测算法结合边缘检测、霍夫直线变换等技术识别出轨道,得出轨道中心线的坐标。王忠立等^[15]提出对轨道垂直方向分区,并将轨道线进行直线近似,通过检测合并得到轨道线目标。Saini 等^[16]提出了 ACSM 和 HT-GSD 算法,该算法通过将图像转换 HSV 色彩空间并用 Canny 检测轨道图像边缘,最后用霍夫直线检测算法检测出轨道。该算法的准确率较高,但其基于统计参数投票的方法致使该算法稳定性较低且处理速度慢。LSD 直线检测算法能够在较短的时间内获得较高精度的直线结果。

因此,为了提高算法的识别准确率和处理的速度,本文提出一种将线段检测器 LSD 和卡尔曼滤波算法相结合的轨道线检测算法,通过逆透视算法和快速双边滤波对图像进行预处理,并采用 LSD 直线检测算法进行直线段提取,然后在逆透视变换(inverse perspective mapping, IPM)基础上结合间距约束对直线进行最小二乘拟合,创建数学模型并利用卡尔曼的数据平滑效果对拟合的直线进行平滑处

理^[17],得到可靠的拟合直线,提高检测精度,最后通过采集轨道图像数据验证所提算法的准确性。

1 轨道线检测原理

轨道线检测的算法示意图如图 1 所示,总流程如下:以视频中的每一帧图像(frame)为输入图像,首先对图像进行逆透视变换,消除透视造成的近大远小现象,保持铁路轨道平行的特征;其次对图像进行快速双边滤波处理,消除噪声的同时保留轨道边缘信息。采用 LSD 线段检测器,提取视频信息中的轨道线段信息;设计了利用图像中轨道平行、具有固定间距的左右轨道直线归类的方案;采用最小二乘拟合算法进行直线拟合来达到准确的铁轨直线识别效果。在识别的基础上通过模型对数据滤波进行偏差的矫正以达到轨道线识别的准确性和鲁棒性。

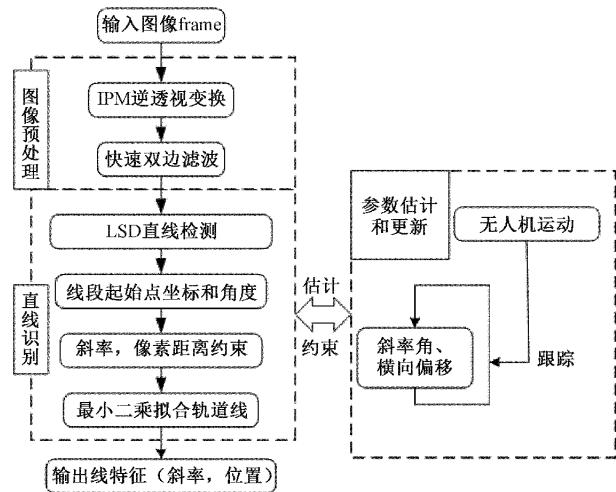


图 1 铁路轨道识别算法流程

1.1 逆透视变换

由于无人机视角下图像的透视效应,为了以左右轨道之间的平行关系和等距关系来限制直线的条件,来实现准确的轨道直线提取效果,需要矫正图像的透视变换。逆透视变换分为基于简化相机模型的 IPM 算法^[18]、基于消失点的俯仰角和偏航角计算的算法^[19]、利用相机姿态在相邻帧间加入俯仰角修正的算法^[20]。相较于后两种需要解析相机姿态的算法,前者可直接通过简化的相机模型实现,故本文采用基于简化相机模型的 IPM 算法,其单目成像原理图如图 2 所示。

图 2(a)中,平面 ABU 代表世界坐标平面,ABCD 为摄像机拍摄到的世界平面的梯形区域,O 为摄像机镜头焦点,OG 为摄像机光轴。世界坐标中,无人机前进的方向定义为 Y 轴。其中,G、A、B、C、D 各点分别对应图 2(b)中 g、a、b、c、d,H 和 W 分别表示成像平面的高和宽,g 为成像平面的中点。y 轴对应图 2(a)中的 Y 轴,即无人机移动的方向。

找出世界平面的 $P(X,Y)$ 所对应成像平面的 $p(x,y)$,

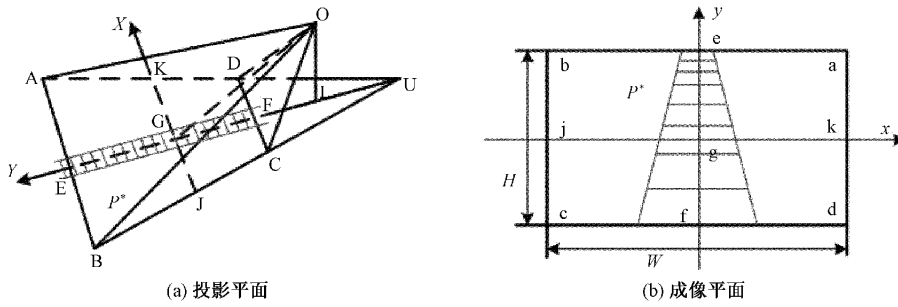


图 2 轨道的单日成像模型

利用几何映射关系可得出:

$$\begin{cases} Y_p = h \cdot k_1 \cdot y_p \cdot \frac{1 + k_2^2}{1 - k_1 \cdot k_2 \cdot y_p} \\ X_p = \frac{UG + Y_p}{UG} \cdot k_3 \cdot x_p \cdot k_4 \\ y_p = \frac{Y_p / k_1}{h + h \cdot k_2^2 + Y_p \cdot k_2} \\ x_p = \frac{UG}{(UG + Y_p) \cdot k_3 \cdot k_4 \cdot X_p} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\begin{cases} k_1 = 2 \tan(\alpha_0 / 2) / H \\ k_2 = \tan \gamma_0 \\ k_3 = h / \cos \gamma_0 \\ k_4 = 2 \tan(\beta_0 / 2) / W \\ UG = (\tan \gamma_0 - \tan(\gamma_0 - \alpha_0 / 2)) \cdot \cos(\gamma_0 - \alpha_0 / 2) / (\cos(\gamma_0 - \alpha_0 / 2) - \cos \gamma_0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, H 为图像的高, W 为图像的宽; h 为摄像机的高度; β_0 为镜头的水平视野角; α_0 为摄像机的垂直视野角; γ_0 为摄像机的俯仰角(摄像机光轴与垂线间的夹角)。

由式(1)、(2), 通过 4 对两两映射的点可求出成像坐标系到世界坐标系之间的旋转矩阵, 从而实现透视的矫正。原图如图 3(a) 所示, 算法效果如图 3(b) 所示。

1.2 快速双边滤波处理

由于无人机在空中飞行过程中可能存在抖动和等问题, 会导致图像存在一定的模糊噪声, 所以需要图像进行滤波降噪处理, 常见的滤波算法有 Gaussian 滤波、中值滤波、双边滤波。中值滤波和 Gaussian 滤波会造成图像的模糊、失去边缘信息, 不便于后续提取图像直线^[21], 而双边滤波在滤波同时能够保留边缘信息, 但传统双边滤波计算过程复杂、实时性差^[22]。为了满足算法的实时处理的要求, 本文采用快速双边滤波算法^[23], 该算法在双边滤波的基础上能提高处理效率, 从而提高处理速度。快速双边滤波公式如下:

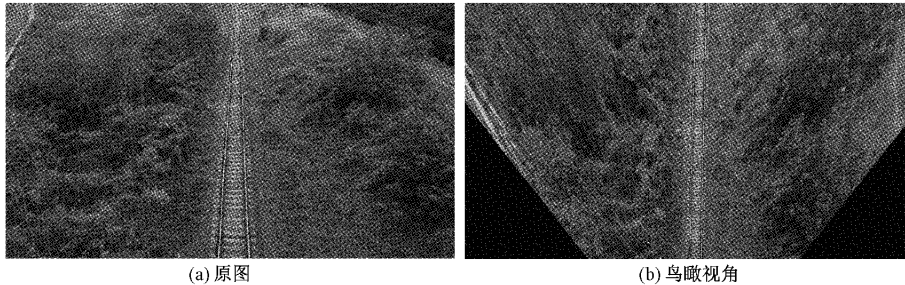


图 3 逆透视变换效果图

$$\begin{aligned} BF_p &= \frac{1}{W_p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) G_{\sigma_r}(I_p - I_q) I_q \approx \\ & \frac{1}{W_p} \sum_{i=1}^n \sum_{q \in S} e^{-\alpha_i^T \beta_i} e^{-\alpha_i^T p} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) e^{\alpha_i^T q} I_q = \\ & \frac{1}{W_p} \sum_{i=1}^n e^{-\alpha_i^T \beta_i} e^{-\alpha_i^T p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) e^{\alpha_i^T q} I_q \quad (3) \\ W_p &\approx \sum_{i=1}^n e^{-\alpha_i^T \beta_i} e^{-\alpha_i^T p} \sum_{q \in S} G_{\sigma_s}(\|p - q\|) e^{\alpha_i^T q} I_q \quad (4) \end{aligned}$$

式中: 图像 I 中坐标点 $p = (x, y)$ 的灰度值是 I_p ; I_q 是 $q = (u, v)$ 点的灰度值; q 属于中心像素 p 的邻域集合 S ; BF_p 是滤波后输出 p 点灰度; W_p 为归一化系数; G_{σ_s} 为空间权重; G_{σ_r} 为辐射差异权重; σ_s 和 σ_r 分别为 2 个高斯函

数的标准差; σ_s 确定了双边滤波函数作用的空间范围; σ_r 的设置影响滤波函数处理的细节。

1.3 基于 LSD 的线段检测

轨道检测中直线检测算法是至关重要的一步, 传统的直线检测算法如霍夫变换直线检测算法, 对长度较短线段的检测效果较差, 因此本文采用 LSD 算法检测图像中的直线。

LSD 算法生成线支持域的示意图如图 4 所示, 原图像如图 4(a) 所示, LSD 算法关键在于计算图像中每个像素点的基准场中线的角度如图 4(b) 所示, 该角度与当前像素点的梯度角相垂直。基准场存在一定的阈值, 且相邻的像

素点会形成一个线段支持域^[24],如图 4(c)所示。每个线段支持域均为组成直线的备选区域。用矩形对该区域进行拟合,得到的矩形的主轴即为该区域的主轴方向。对每个矩形区域的宽、高以及该区域内总像素点个数、level-line 角度在一定范围内(该范围为±22.5°)的像素点个数进行整合,计算基于这些数值下该矩形区域的误报次数(the number of false alarms, NFA)值,当 NFA<1 时,则认为该矩形是一条线段。相对于传统的直线检测算法,LSD 具有结果准确,误检可控,同时不需要调节参数的优点。

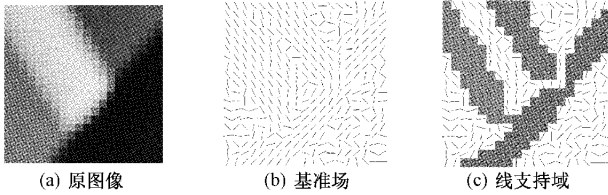


图 4 生成线支持域示意图

LSD 直线检测示意图如图 5 所示,鸟瞰图如图 5(a),图 5(b)为 LSD 检测结果,对检测到的直线进行最小长度控制,剔除一些较小的非轨道直线的干扰部分,如图 5(c)所示。图 5(c)中间较长的直线部分为轨道的位置,该部分由检测到的直线段构成。

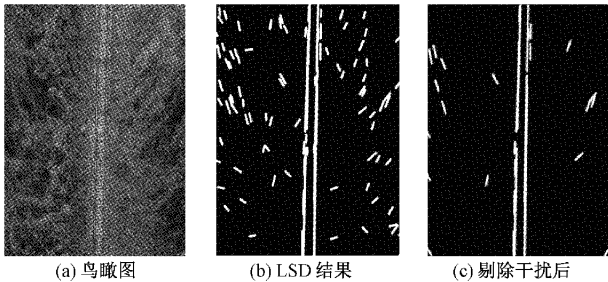


图 5 LSD 直线检测示意图

1.4 基于像素间距约束聚类最小二乘直线拟合的算法

考虑到鸟瞰图变换视角下,视频图像中两轨道互相平行,无法用斜率阈值区分左右轨道线,为有效地对轨道进行左右聚类,本文提出了基于像素间距约束聚类最小二乘直线拟合的算法,利用轨道的平行特征和轨道固定间距作为约束,对 LSD 直线簇进行左右轨道线归类,并结合最小二乘算法实现轨道线拟合。

根据实际图片获取的高度和镜头的俯仰角参数,在 IPM 模型下计算出轨道的像素间距阈值。本文选定以图 2(a)中 CD 的长度,与实际轨道间距的比例得出,计算方法如式(5)所示。

$$\begin{cases} CD = \frac{2h \cdot \tan(\beta_0/2)}{\cos(\gamma_0 - \alpha_0/2)} \\ CD/R = W/T \\ T = \frac{R \cdot W \cdot \cos(\gamma_0 - \alpha_0/2)}{2h \cdot \tan(\beta_0/2)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: T 为图像上的像素间距阈值, R 为现实轨道的宽度,对于标准轨道, $R = 1\,435\text{ mm}$ 。

两平行直线间的距离 $dist$ 可由两条直线的方程式计算得出,如式(6)所示。

$$dist = \frac{|b_1 - b_2|}{\sqrt{k^2/2 + 1}} \quad (6)$$

式中: k 为两直线的斜率, b_1 和 b_2 分别是直线 1 和直线 2 的截距。

由于直线之间可能存在夹角 θ ,如图 6 所示,无法求得两直线间的 $dist$,本算法提出用近似值代替计算,如式(7)所示。

$$dist = \frac{|b_{AB} - b_{CD}|}{\sqrt{(k_{AB}^2 + k_{CD}^2)/2 + 1}} \quad (7)$$

式中: $dist$ 是直线 AB 和直线 CD 之间的距离, k_{AB} 和 k_{CD} 分别是直线 AB 和直线 CD 的斜率, b_{AB} 和 b_{CD} 分别是直线 AB 和直线 CD 的截距。



图 6 直线拟合示意图

约束聚类算法的实现步骤:

1)在一帧图像中选取 LSD 结果中最长的直线作为初始直线,计算该直线的斜率;

2)遍历该帧图像内其他直线,计算斜率和坐标,将斜率与初始直线的斜率对比,不满足斜率差值在一定范围内的直线首先舍弃,本文选择斜率差值大于 5% 的直线舍弃;

3)遍历步骤 2)中剩余直线,计算该直线与初始直线的 $dist$ 值,设置阈值 $threshold$ 为判断剩余直线是否与初选直线为同一条直线,若 $0 \leq dist \leq threshold$,则该直线与初始直线为同一条钢轨,设为集合 A;若 $threshold < dist \leq T$,则该直线为双轨轨道的另一条钢轨,设为集合 B;若 $dist > T$,则舍弃该直线,如图 7 所示。实际的轨道宽度为 1 435 mm,轨道钢条的宽度为 70 mm,占比为 5%,故本文 $threshold$ 值设置为 $0.05T$ 。

根据约束聚类步骤,可以得出两个直线集合 A 与 B,分别为轨道左右直线的集合,设拟合直线方程为:

$$y = a \cdot x + b \quad (8)$$

根据最小二乘原理分别对集合 A 和集合 B 求解拟合直线方程的系数 a 和 b 可得直线的方程,得到的轨道识别效果如图 8 所示。

2 卡尔曼滤波跟踪轨道线

由于无人机在飞行过程中机身的抖动、光线的变化等情况都会影像图像的采集,造成某些帧图像对轨道线的误识别。采用滤波算法对轨道线进行跟踪,可以提高系统的

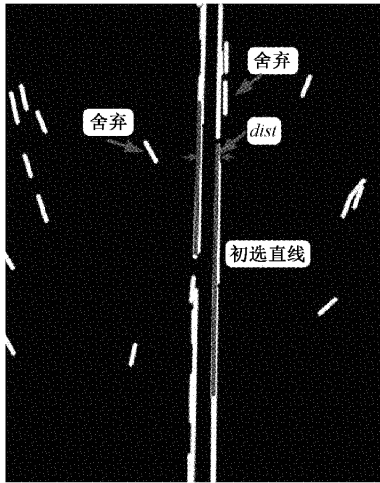


图7 约束聚类算法示意图

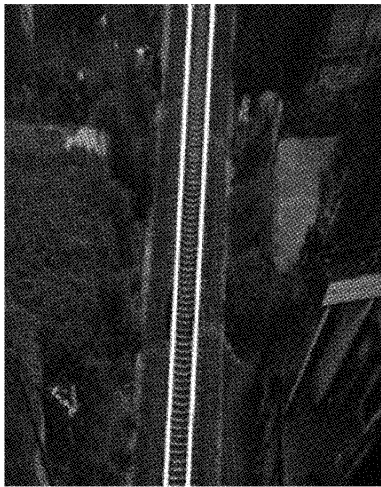


图8 直线拟合结果

稳定行。根据轨道的几何特征和无人机动力学模型建立轨道数学模型,并与KF结合,在检测出轨道后进行跟踪估计,有效提高轨道的识别精度,保证算法的有效性和鲁棒性。

2.1 轨道模型

根据无人机空间姿态和铁路相对位置进行建模。定义铁路的轨道模型为:

$$x(t, k)(z) = kW_t + e_t + \theta_t z \quad (9)$$

其中, $x(t, k)(z)$ 代表 t 时刻距离无人机距离为 z 的轨道的边界位置; k 代表轨道左右两边的轨道线, $k = -1$ 表示轨道的左边, $k = 1$ 代表轨道的右边; e_t 为无人机中心与轨道线中心的偏移; θ_t 为无人机飞行方向与轨道线切线间的夹角; h 为无人机的垂直飞行高度。估计的参数如下:

$$\mathbf{x}(t) = (e_t, \dot{e}_t, \theta_t, \dot{\theta}_t, h, v_t) \quad (10)$$

其中,字母上方的“·”表示对应参数的变化率。较于模型^[25],本文模型将轨道模型简化为直线模型,同时模型参数中新增了飞行高度的估计,便于实现式(5)的算法。

通过利用铁路轨道模型对系统参数进行估计,提高轨道检测的稳定性和抗干扰性、检测率可得到相应的提高。

2.2 参数估计

无人机飞行过程中,轨道线在成像面上呈现一个缓变的过程,且前后帧相互关联。对于连续的窗口,设 V 为无人机速度,则利用轨道模型建立前后帧参数关系如式(11):

$$\mathbf{x}(t+1) = \begin{pmatrix} 1 & \Delta t & 0 & 0 & \Delta t \times V \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \Delta t & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \mathbf{x}(t) + \mathbf{Q}(t) \quad (11)$$

其中, $\mathbf{Q}(t)$ 表示系统的过程噪声。观测值为当前提取到的直线信息,包括直线的夹角 θ_t 和偏移 e_t ,那么系统的观测方程为:

$$\begin{pmatrix} e_{t+1} \\ \theta_{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_t \\ \theta_t \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \epsilon_e \\ \epsilon_\theta \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中, $\epsilon_e, \epsilon_\theta$ 分别代表夹角和轨道中心偏移的过程噪声。

结合式(11)、(12)的状态方程和观测方程计算卡尔曼滤波后的轨道参数。通过连续帧图像的轨道信息进行参数滤波,可以得到更加平滑稳健的轨道线,从而实现更好的轨道线跟踪。

3 结果分析

本文算法基于单目视觉,图像通过大疆 MAVIC AIR2 无人机以 10 m/s 的速度通过机载摄像头获取,其焦距为 24 mm,拍摄图像大小为 1 920×1 080,其帧率为 60 frame/s,在不影响图像质量的情况下,为了降低处理器负荷提高处理速度,本文将图像像素降采样至 960×540。实验平台的系统配置为:酷睿 7 代 i5 处理器、8 G 内存,在 Windows 系统下基于 Python 语言进行实验。

为了验证算法的适应性,实验采集了大量的轨道图像数据,并将图像数据大致分为了明亮、昏暗、遮挡 3 种场景,图 9~11 分别是明亮、昏暗、遮挡 3 种场景下 3 种算法的效果对比图。其中,文献[14]方法为基于连通域的轨道识别,文献[16]方法为自适应二值化后 HT-GSD 算法。

图 9~11 中的白色线条为检测到的轨道线。图 9 明亮条件下,文献[14]算法的第 1、3 组图仅正确识别到单条轨道,第 2 组图识别线条有小幅度的偏移,如图 9(b)所示,文献[16]算法的第 2、3 组图出现小幅度的偏移,如图 9(c)所示。图 10 昏暗条件下,文献[14]算法的第 1、3 组图识别的轨道线出现重叠,第 2 组图有小幅度的偏移,如图 10(b)所示,文献[16]算法的第 1、3 组图出现小幅度的偏移,如图 10(c)所示。图 11 遮挡条件下,文献[14]算法的第 1 组图仅正确识别到单条轨道,第 2 组图未识别出轨道线,第 3

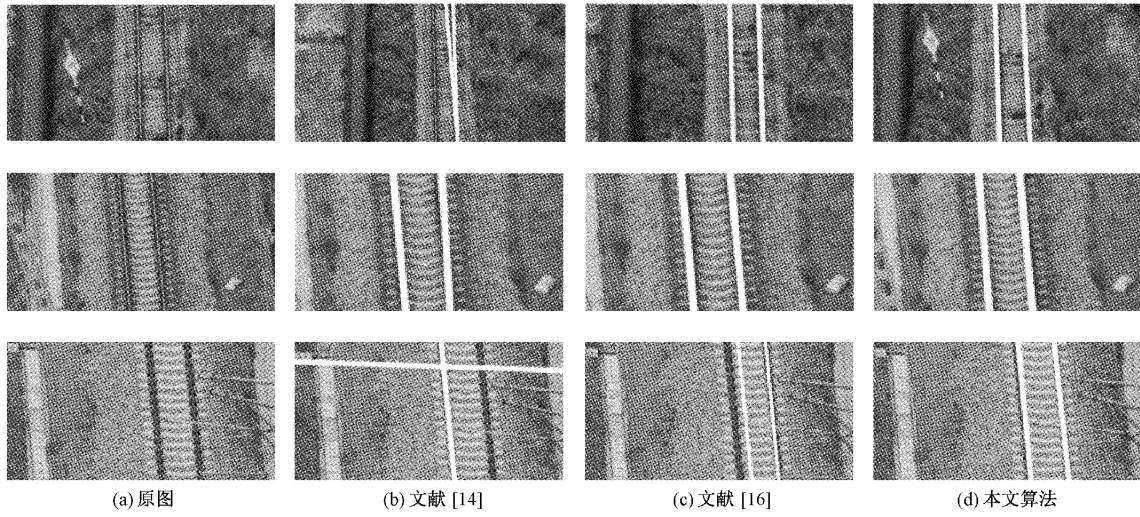


图 9 明亮条件下识别效果对比

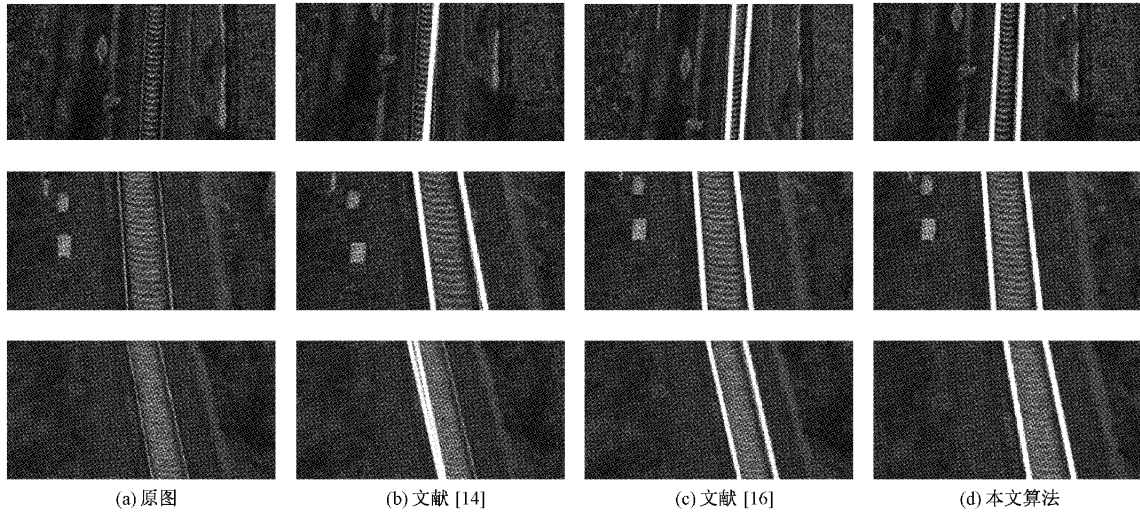


图 10 昏暗条件下识别效果对比

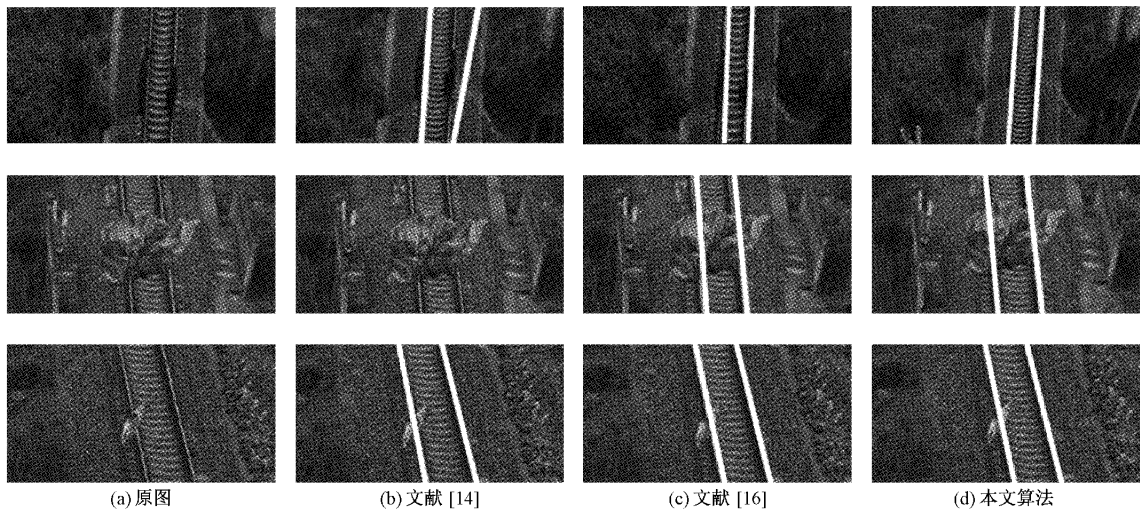


图 11 遮挡情况下识别效果对比

组图正确识别出轨道线,如图11(b)所示,文献[16]算法的第1,2组图出现轻微幅度的偏移,如图11(c)所示。在3种情况下,本文算法均能达到准确的轨道识别效果,没有出现轨道识别的偏移或者轨道线之间重叠的情况,且结合轨道的卡尔曼滤波算法进行数据平滑处理,有效地抑制了轨道线识别的抖动偏移的情况,如图9(d)、图10(d)、图11(d)。

为了准确评价算法性能,引入准确率、误检率等常用的评价指标,如下:

检出率,检测到的轨道线占全部轨道线的比值 $P_{\text{检出}}$,定义如下:

$$P_{\text{检出}} = \frac{N_{\text{检测到的轨道线}}}{N_{\text{全部轨道线数量}}} \quad (13)$$

漏检率,未检测到的轨道线占全部的轨道线比值 $P_{\text{漏检}}$,定义如下:

$$P_{\text{漏检}} = \frac{N_{\text{未检测到的轨道线}}}{N_{\text{全部轨道线数量}}} \quad (14)$$

准确率,正确的轨道线占检测到总的轨道线的数量的比值 $P_{\text{准确}}$,定义如下:

$$P_{\text{准确}} = \frac{N_{\text{检测到正确轨道线的数量}}}{N_{\text{检测到总的轨道线数量}}} \quad (15)$$

误检率,错误的轨道线占检测到总的轨道线的数量的比值 $P_{\text{误检}}$,定义如下:

$$P_{\text{误检}} = \frac{N_{\text{检测到错误的轨道线数量}}}{N_{\text{检测到总的轨道线数量}}} \quad (16)$$

表1为3个场景下的不同算法的评价指标 $P_{\text{检出}}$ 、 $P_{\text{漏检}}$ 、 $P_{\text{准确}}$ 、 $P_{\text{误检}}$ 比较,从表1中可以看出,在3个场景下,本文算法的 $P_{\text{准确}}$ 均高于文献[14]与[16],且 $P_{\text{漏检}}$ 均低与文献[14]与[16],表明本文算法在3种算法中的检测性能最优。

表1 不同算法的评价指标比较

场景	方法	检出率/ %	漏检率/ %	准确率/ %	误检率/ %
明亮	文献[14]	96.90	3.10	83.21	6.96
	文献[16]	97.11	2.89	93.00	7.00
	本文算法	97.41	2.59	93.61	6.39
昏暗	文献[14]	95.88	4.12	81.77	8.02
	文献[16]	96.12	3.88	91.40	8.60
	本文算法	96.55	3.45	91.77	8.23
遮挡	文献[14]	95.75	4.25	82.80	7.80
	文献[16]	96.50	3.50	91.89	8.60
	本文算法	96.77	3.23	92.08	7.92

算法的效率是评价轨道检测算法的一个重要指标,效率越高,表明实时性越好。本文分别测试了3种场景下的算法的平均运行帧率,如表2所示。从表2看出,本文算法平均运行帧率为23,文献[14]、[16]平均帧率分别为25、13.33,所提算法平均帧率略低于文献[14],远高于

文献[16]。综合表1和2结果对比表明,本文算法在运行效率略低于文献[14]的基础上,识别准确率远高于文献[14],同时在识别准确率和运行效率上均高于文献[16]。

表2 算法效率测试

场景	平均运行帧率		FPS/s
	文献[14]	文献[16]	
明亮	25	13	23
昏暗	25	14	23
遮挡	25	13	23
平均	25	13.33	23

由以上结果分析对比可以看出,本文算法对于不同场景的轨道识别准确率高,同时实时性好,满足轨道实时检测的要求。

4 结 论

针对传统无人机视觉轨道识别准确率低、效率低的特点,本文通过对图像预处理并采用LSD直线检测,结合提出的基于像素间距约束聚类的最小二乘直线拟合的算法,识别出铁路轨道;采取建立轨道模型结合卡尔曼滤波对识别的轨道视频数据进行平滑处理,实现准确、高效的轨道识别算法。在三种场景下对文献[14]和[16]算法和本文算法进行实验,实验结果表明,本文算法能实现较好的识别精度和效率以及鲁棒性,实现了单线轨道的识别。后续工作中,考虑到铁路复杂的道路信息,将进一步实现对包含复线轨道图像和弯轨的图像的识别工作,提高轨道检测的普适性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 姚建平,蔡德钧,安再展,等. 铁路无人机巡检研究应用现状与发展趋势[J]. 铁道建筑,2021,61(7):1-4.
- [4] 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.
- [5] PALI E, MATHE K, TAMAS L, et al. Railway track following with the AR Drone using vanishing point detection [C]. 2014 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing,

- Robotics. IEEE, 2014: 1-6, DOI: 10.1109/AQTR.2014.6857870.
- [6] JIANG X, LUO X, LUO S, et al. A straight-line-based vanishing point detection method for railway environmental images [C], IEEE 13th International Conference on Signal Processing (ICSP), IEEE, 2016, 6:737-741.
- [7] 许华荣, 王晓栋, 方遭. 基于 B 样条曲线模型的结构化道路检测算法[J]. 自动化学报, 2011, 37(3):270-275.
- [8] 超木日力格. 机车司机视野扩展系统及路轨障碍物检测的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012:23-42.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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.
- [12] 陈明曦, 侯涛, 赵晏章, 等. 基于新型改进 Canny 算法的铁轨边缘检测研究[J]. 国外电子测量技术, 2021, 40(11):48-52.
- [13] 吕侃徽, 张大兴. 基于改进 Hough 变换耦合密度空间聚类的车道线检测算法[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(12):172-180.
- [14] 刘成, 任利惠, 左建勇. 无人机轨道跟踪控制模型[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(5):170-173.
- [15] 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, 2017, 17(6):56-62, 84.
- [16] SAINI A, SINGH D. DroneRTEF: Development of a novel adaptive framework for railroad track extraction in drone images[J]. Pattern Anal Applic, 2021, 24: 1549-1568.
- [17] 彭红, 肖进胜, 程昱, 等. 基于扩展卡尔曼滤波器的车道线检测算法[J]. 光电子·激光, 2015, 26(3):567-574.
- [18] 关闯, 冯浩, 张志勇, 等. 基于行车视频消失点和逆透视变换的车速测量[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(6): 128-135.
- [19] JEONG J, KIM A. Adaptive inverse perspective mapping for lane map generation with SLAM [C]. 2016 13th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI), IEEE, 2016: 38-41.
- [20] ZHANG D, FANG B, YANG W, et al. Robust inverse perspective mapping based on vanishing point [C]. Proceedings 2014 IEEE International Conference on Security, Pattern Analysis, and Cybernetics (SPAC), IEEE, 2014: 458-463.
- [21] 刘剑, 李彤, 孙睿, 等. 基于混合滤波算法的太阳光斑图像位置跟踪[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(4): 438-443.
- [22] 李俊峰, 杨丰, 黄靖. 一种改进的增维型双边滤波的快速算法[J]. 电路与系统学报, 2013, 18(1):137-143.
- [23] WANG L, SHENG Y. Fast bilateral filtering using the Padé approximation [J]. Electronics Letters, 2017, 53(6): 395-397.
- [24] 郭克友, 王艺伟, 郭晓丽. 结合卡尔曼滤波器噪声分析的车道线检测跟踪算法[J]. 计算机测量与控制, 2016, 24(5):216-219.
- [25] WATANABE A, NAITO T, NINOMIYA Y. Lane detection with roadside structure using on board monocular camera[A]. Proc. of Intelligent Vehicles Symposium. IEEE[C]. 2009, 191-196.

作者简介

刘佳嘉(通信作者), 硕士, 副教授, 主要研究方向为航空电子、图像处理等。

E-mail: cafucljj@163.com

白颖昊, 硕士研究生, 主要研究方向为铁路无人机巡检, 图像处理。