

无砟轨道扣件快速匹配定位方法研究

李倩, 陈兴杰, 彭乐乐, 安小雪

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 针对现有扣件定位方法速度慢、定位不准确的问题, 结合无砟轨道的特点, 提出一种无砟轨道扣件快速匹配定位算法; 该算法针对传统匹配算法运算量大、匹配结果不准确的缺点, 采用梯度法求取扣件图像的方向场, 并根据钢轨区域方向场的各向一致性, 锁定扣件感兴趣区域, 实现图像裁剪, 减少模板搜索空间; 模板匹配则通过计算模板和图像方向场对应点之间的绝对值距离实现扣件匹配定位, 并利用方向场采样、基于统计方法确定搜索起点位置、随机抽样一致性等方法提高匹配速度和精度; 实验结果表明, 该算法匹配速度快、鲁棒性强, 能够满足扣件检测识别中对扣件匹配的实时性和准确性的要求, 与传统的模板匹配定位方法相比, 速度提高了30%左右, 且对于不同光线条件下的匹配成功率均大于95%。

关键词: 方向场; 区域定位; 扣件定位; 快速搜索; 模板匹配

Fast Matching and Localization Method for Ballastless Track Fastener

Li Qian, Chen Xingjie, Peng Lele, An Xiaoxue

(College of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620)

Abstract: Since the existing location algorithm of faster is slow and the result is inaccurate, combining with the characteristics of Ballastless Track Fastener, this paper proposed a fast matching and localization method for ballastless track fastener. In view of the problem of traditional fastener matching method, which is complex and inaccurate, the gradient directional field was used. Moreover, according to the consistency of directional field of target area, the target area of fastener can be locked, which may reduce the space of search by cropping the image. Template matching calculate the absolute distance of corresponding points in the directional field between the template and the image, which combining the directional field sampling, the starting point of search based on statistical method, and the method of adjusting the position and attitude parameters by the least square method to improve the matching speed and accuracy of results. The results of experiment show that the method greatly improves matching speed and has the characteristics of robustness, which can meet the demands of real-time and accuracy of matching and localization for ballastless track fastener. Compared with the traditional template matching method, the percent of speed improvements using this way is 30% and the percent of matching success under different lighting conditions is greater than 95%.

Keywords: directional field; area location; fastener positioning; fast search; template matching

0 引言

轨道检测是保证轨道交通运营安全的重要手段, 作为轨枕和轨道联结的重要部分, 扣件的检测和维修是轨道检测的一项重要任务。当前的扣件检测主要通过人工巡检, 该方法不仅效率低, 容易造成漏检现象, 而且存在安全隐患。近年来, 国内外学者对基于机器视觉^[1]和图像处理的轨道扣件检测进行了积极探讨, 其中轨道扣件的准确定位是实现扣件检测的前提条件, 因此众多学者对扣件定位算法进行深入研究。

王凌等^[2]在特定区域像素点扫描统计的基础上对扣件

进行定位。其对灰度化的图像进行与之处理, 考虑到道床、轨枕和扣件的分界处的像素点值0和1区分度较大, 通过阈值范围设定的方式实现扣件定位。Hao Feng等^[3]采用通过钢轨直线检测、像素水平垂直投影和几何关系定位扣件, 但是此方法耗时长。

以上算法研究主要针对于有砟轨道。较有砟轨道而言, 无砟轨道具有轨道板及轨枕区域纯净, 扣件及钢轨轮廓纹理特征明显, 利用模板匹配的算法定位扣件鲁棒性强。陈金胜^[4]等利用边缘特征定位扣件, 速度较慢。钱广春^[5]直接使用二值化像素投影方法定位扣件, 匹配精度低。范宏^[6]将灰度模板匹配的方法运用到扣件定位上, 基于模板和原始图像重合部分的像素灰度值, 计算出一个标量作为相似度量, 从而定位扣件, 该算法计算量大, 匹配速度慢。采用基于特征的图像匹配方法^[7]则具有速度快、运算量小的优点, 但是匹配精度差, 鲁棒性差。

本文针对图像处理在无砟轨道扣件定位中实际应用, 提出基于方向场的扣件匹配定位算法。首先采用梯度法求取扣件图像的方向场, 然后根据钢轨在方向场图中的各向一致性定位轨道区域, 并裁剪获得扣件感兴趣区域, 从而

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-07-25。

基金项目: 国家自然科学基金(51478258); 上海市科委重点支撑项目(18030501300); 上海工程技术大学研究生科研创新项目(E3-0903-17-01119)。

作者简介: 李倩(1993-), 女, 江苏省徐州市人, 硕士研究生, 主要从事数字图像处理方向的研究。

陈兴杰(1975-), 男, 江苏省南通市人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事信号检测与图像处理方向的研究。

减小模板搜索扣件的感兴趣区域,最后通过方向场采样、基于统计方法确定搜索起点位置、随机抽样一致性等方法进行扣件快速匹配,提高了扣件定位的速度和精度。

1 匹配原理

图 1 给出了无砟轨道快速匹配方法的算法流程图,匹配过程主要包括求取扣件图像的方向场图、裁剪获得扣件匹配的感兴趣区域、利用快速模板匹配的方法匹配扣件。采用梯度法提取图像方向场,通过像素点的梯度值得到方块的方向场图;利用块方向场的各向一致性特点定位钢轨区域,并结合钢轨和扣件横向的实际尺寸比例关系、相机参数、焦距等先验知识推算出扣件感兴趣区域,进行裁剪。为了实现快速模板匹配,先进行方向场采样,通过计算对应点之间的绝对值距离得到匹配结果。为了进一步提高匹配速度和精度,分别采用基于统计的快速搜索策略和随机抽样一致性的方法进行处理。

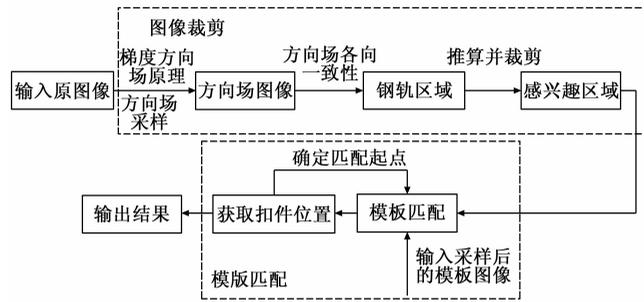


图 1 方法原理流程图

2 基于梯度方向场的扣件图像裁剪

在对图像处理时,一般只利用其像素级信息,而忽略了边缘走向等尺度特征。本文利用扣件图像边缘的纹理走向特征,根据图像方向场信息对扣件感兴趣区域裁剪,并利用扣件方向场模板实现无砟轨道扣件快速匹配。

2.1 梯度方向场原理

梯度方向表示的是灰度值变化的最大方向,利用梯度法计算扣件图像的块方向场^[8]。图像 $I(x,y)$ 上任一点像素的梯度方向向量为 $T = [g_x(x,y), g_y(x,y)]^T$, 其中 $g_x(x,y), g_y(x,y)$ 分别表示在任一像素点在 x 方向和 y 方向的偏导。即

$$\begin{bmatrix} g_x(x,y) \\ g_y(x,y) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial I(x,y)}{\partial x} \\ \frac{\partial I(x,y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (1)$$

梯度方向场大小为:

$$|T| = \sqrt{g_x(x,y)^2 + g_y(x,y)^2} \quad (2)$$

方向场是旋度的方向函数,其方向垂直于梯度方向,大小是梯度场正交分解参数 θ 的值。理想方向场满足下面关系:其中 i, j 为正交坐标的单位向量。

$$\sin \frac{|g_y(x,y)i|}{|T|}, \cos \frac{|g_x(x,y)j|}{|T|} \quad (3)$$

由三角公式可以得到

$$\theta(x,y) = \frac{1}{2} \tan^{-1}[\tan 2\theta] \quad (4)$$

由于计算得到的方向场范围是 $0-180$ 度,因此相差 180 度的 2 个方向场是同一方向,为了加强方向场的方向一致性,防止方向向量相互抵消,则梯度平方向量为:

$$[G_x, G_y]^T = [(g_x^2 - g_y^2), 2g_x g_y]^T \quad (5)$$

图像上某一点像素的梯度方向和周围像素点的梯度方向具有相关性,以该点为中心,周围 n 个点组成一个区域块,记作 W ,求块内所有像素点的平均梯度方向作为块方向场,则块方向场的梯度平方向量如下:

$$\begin{bmatrix} \bar{G}_x \\ \bar{G}_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_w G_x \\ \sum_w G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w g_x^2 - g_y^2 \\ \sum_{x=1}^w \sum_{y=1}^w 2g_x g_y \end{bmatrix} \quad (6)$$

根据将公式 (4) 和 (6) 可以求得块方向场的大小 θ :

$$\varphi = \frac{1}{2} \begin{cases} \tan^{-1}(\bar{G}_y / \bar{G}_x) & \bar{G}_x \geq 0 \\ \tan^{-1}(\bar{G}_y / \bar{G}_x) + \pi & \bar{G}_x < 0 \wedge \bar{G}_y \geq 0 \\ \tan^{-1}(\bar{G}_y / \bar{G}_x) - \pi & \bar{G}_x < 0 \wedge \bar{G}_y < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\theta = \begin{cases} \varphi + 1/2\pi & \varphi \leq 0 \\ \varphi - 1/2\pi & \varphi > 0 \end{cases} \quad (8)$$

方向场的稳定性和可靠性可以通过块方向的一致性 C 来衡量, C 由块的平方梯度向量确定,计算公式如公式 (9)。

$$C = \frac{\left| \sum_{x=u}^w \sum_{y=v}^w (\bar{G}_x, \bar{G}_x) \right|}{\sum_{x=u}^w \sum_{y=v}^w |(\bar{G}_x, \bar{G}_x)|} \quad (9)$$

C 的值在 $0-1$ 之间。若所有的平方梯度向量方向一致,则 $C = 1$,即此时的方向场方向性越强。

2.2 感兴趣区域 (ROI) 裁剪

为了提高匹配速度,根据方向场图的各向一致性特征先确定钢轨区域,再结合钢轨和扣件横向的实际尺寸比例关系、相机参数、焦距等先验知识等,将模板匹配的搜索范围锁定在钢轨两侧的扣件感兴趣区域,并进行裁剪,从整体上减少匹配计算的复杂度。由于钢轨两侧的扣件对称,所以选取一侧扣件进行分析。无砟轨道扣件感兴趣区域裁剪方法研究的具体步骤如下:

1) 图像预处理,为了减少噪声的影响,通过图像中值滤波增强图像;

2) 图像梯度的方向体现在图像灰度最大变化率上,采用线性滤波方法求取图像上每个像素点的梯度向量 $T = [g_x(x,y), g_y(x,y)]^T$;

3) 利用公式 (4) - (8) 计算图像块中每个像素点梯度方向,然后将图像划分成大小为 10×10 的块,然后通过计算,得到块方向场图 2 (b)。

4) 由公式 (9) 计算块方向场的各向一致性。根据方向场各向一致性的特点,选择 C 值最接近于 1 的区域即为

钢轨区域, 如图 2 (c) 所示。

5) 最后, 结合钢轨和扣件横向的实际尺寸比例关系、相机参数、焦距等先验知识推算出扣件感兴趣区域, 进行裁剪, 裁剪结果如图 2 (e)、(f) 所示。

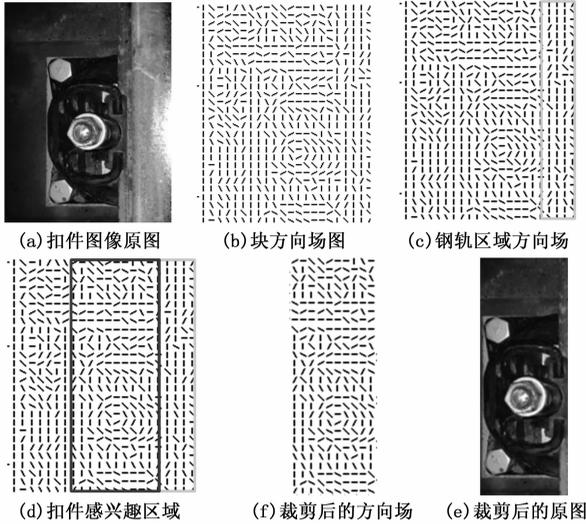


图 2 扣件感兴趣区域裁剪结果图

从图 2 (e) 可以看出, 裁剪获得的扣件感兴趣区域准确, 在不丢失扣件信息的基础上缩小了模板匹配的搜索范围, 有利于减少模板匹配的时间。

3 基于模板匹配的扣件快速匹配方法

3.1 方向场采样

由式 (8) 可以看出, 图像中每一点像素都有一个方向场, 方向场的复杂度较强。相邻块像素的梯度方向场之间具有连续性, 因此为了抑制高频噪声, 减少计算量, 可以对扣件图像和扣件模板的方向场进行采样^[9]。选取标准扣件模板原图像, 以一个方块中心点的方向值代表该方块内所有像素点的方向值。扣件直径约为 8 个像素, 考虑到方向场的细节点的方向稳定性, 选择采样间隔为 5×5 , 块大小为 10×10 , 模板采样图像如图 3 所示。

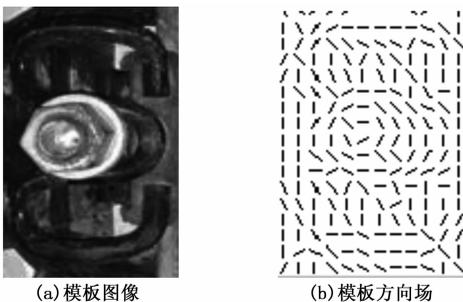


图 3 扣件模板原图和采样后的模板方向场图

3.2 基于方向场的模板匹配方法

在匹配过程中所依赖的特征是方向场以及计算出来的感兴趣区域。设粗定位出的扣件区域方向场为 $\theta(x, y)$, 采样后的模板方向场为 $\theta_t(x, y)$, 大小为 $m \times n$ 。由于对应点

之间的高阶范数距离的计算量大, 耗时长, 对噪声的鲁棒性差, 因此针对模板匹配, 本文采用对应点之间的绝对值距离作为匹配系数, 相关公式如下:

$$D(x, y) = \sum_{u=x-m/2}^{x+m/2} \sum_{v=y-n/2}^{y+n/2} |\theta(u, v) - \theta_t(u, v)| \quad (10)$$

由式 (10) 可知, 扣件图像上点方向场 $\theta(u, v)$ 和模板点方向场 $\theta_t(u, v)$ 匹配度越高, $D(x, y)$ 的值越小。因此, 模板图像在裁剪后的方向场图中搜索匹配到的 $D(x, y)$ 最小值的位置即为扣件位置。

3.3 加快匹配速度的搜索策略

在实际工程应用过程中, 短时间内会识别到大量的扣件, 因此可以统计获得关于识别目标在已裁剪图像中的位置信息。基于统计的快速搜索策略可以提高模板匹配的匹配速率。

若扣件已经匹配成功 N 次, 扣件的重心在已裁剪的搜索中的位置分别是 $(x_1, y_1), (x_2, y_2) \dots (x_N, y_N)$, 则重心均值为 (x_m, y_m) , 将所有匹配成功的扣件位置重心均值作为模板搜索的起点, 具体的算法如下:

1) 选定重心的初值为 (x_{mf}, y_{mf}) , 将初值作为位置点集的重心, 即:

$$x_{mf} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i \leq N} x_i, y_{mf} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{i \leq N} y_i \quad (11)$$

2) 定义距离度量为 d_i :

$$d_i = \sqrt{(x_i - x_{mf})^2 + (y_i - y_{mf})^2} \quad (12)$$

选取合适的距离度量阈值为 d , 满足 $d_i < d$ 的点数满足 $n = N \times m\%$, 其中 $m\%$ 为满足条件的点的百分比, 根据上述条件选出新的点集。

3) 计算新的重心 (x'_m, y'_m) :

$$x'_m = \frac{1}{N_{new}} \sum_{i=1}^{i \leq N_{new}} x_i, y'_m = \frac{1}{N_{new}} \sum_{i=1}^{i \leq N_{new}} y_i \quad (13)$$

4) 重复步骤 2), 当迭代到最大的步数或者前后的 d 的值相差小于阈值时, 迭代停止。

确定待匹配图像搜索中心后, 将搜索的路径设置为以搜索重心为搜索起点的向外螺旋式搜索, 示意图如图 4 所示。当匹配系数小于目标阈值时停止搜索, 此时匹配成功。为了防止扣件的漏匹配, 搜索终止的阈值可以递减。

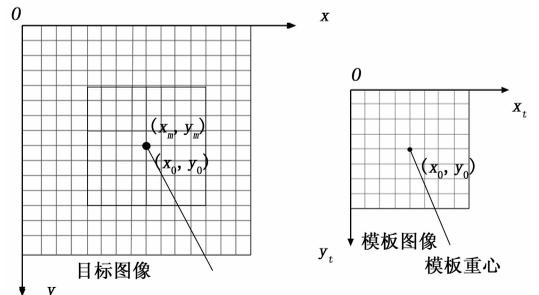


图 4 匹配搜索示意图

3.4 提高匹配精度的方法

在基于方向场的模板匹配算法的步骤中, 使用随机抽

样一致性算法^[10]可以提高匹配精度。该算法主要是对求取的块方向场进一步提纯,排除噪声干扰点,通过反复迭代使估计模型逼近实际模型。

通过数据抽样的方法从模型中获得样本集进行参数估计,然后进一步估算转换矩阵 M 。若扣件模板图像上的点为 $T_m = [x'_i \ y'_i \ 1]^T$,待匹配扣件图像上的点为 $I_m = [x_i \ y_i \ 1]^T$,则有:

$$T_m = MI_m = \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_0 & m_1 & m_2 \\ m_3 & m_4 & m_5 \\ m_6 & m_7 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (14)$$

由公式 (14) 看出,矩阵 M 中包含 8 个参数,因此至少需要 4 对匹配方向场对。

算法基本过程如下:

1) 求解模型所需要的参数匹配对为 4,置信概率用 p 表示,一般选取 95%,inliers 比例系数用 ϵ 表示,则随机采样次数 N 为:

$$N = \frac{\log(1-p)}{\log(1-\epsilon^4)} \quad (15)$$

2) 计算转换矩阵 M 。为了减少计算量,先用 3 对匹配对估计矩阵参数,然后验证第 4 对是否满足该模型,如果该对在模型上,继续验证其他匹配对,若该对不在模型上则继续重新选择模型参数。

3) 计算在矩阵变换后的匹配对,根据公式 (10) 计算其到对应匹配方向场的距离 D ,若 $D < T$,则保留该模型和匹配对,若 $D > T$,重新选择样本计算,其中 T 为设定距离阈值。

4) 将步骤 3) 中保留下来的匹配对数目记为 Num ,经过 N 次迭代计算后,取 Num 最大的样本作为最佳匹配对集合重新估计模型,得到最优估计的矩阵 M 。

随机抽样一致性算法对噪声具有鲁棒性,可以减少错误匹配,提高匹配精度。

4 实验结果分析

本文实验对 CCD 线阵相机在不同条件下采集的现场图像进行仿真,在 Windows 操作系统下,利用 MATLAB 软件环境下进行验证分析,将本文算法和已有扣件匹配算法对比,检验无砟轨道扣件快速匹配方法计算的平均耗时,并验证算法的鲁棒性。

4.1 匹配平均耗时分析

将无砟轨道扣件快速匹配的算法与基于灰度的匹配算法^[11]、基于边缘特征的匹配算法^[5]、基于特征点^[12]的匹配算法进行比较。在轨道现场采集 200 张线性光照下的扣件图像,分别采用 4 种算法对这些图像进行扣件模板匹配定位实验。4 种算法的平均耗时结果如表 1 所示,相比于其他 3 种算法,本文算法平均耗时最短,在 64 ms 左右,满足快速匹配的要求。

4.2 算法鲁棒性验证

轨道现场环境复杂,图像受非线性光照影响。拍摄轨道现场不同光照下的 500 张图像进行实验,其中线性光照、

表 1 3 种不同算法的平均耗时比较

算法类型	平均耗时/ms
基于灰度的匹配算法	120.6843
基于特征点的匹配算法	101.3560
基于边缘特征的匹配算法	97.3402
本文的算法	63.9841

非线性强光、非线性弱光下的图像非别为 300 张、100 张、100 张。线性光照和非线性光照下的图像数量参考实际情况下的概率统计,不同类型的图像张数如表 2 所示。

表 2 3 种不同光照条件下的匹配率

光照类型	图像数量/张	匹配成功率/%
线性光照	300	98.42%
非线性强光	100	96.25%
非线性弱光	100	95.93%

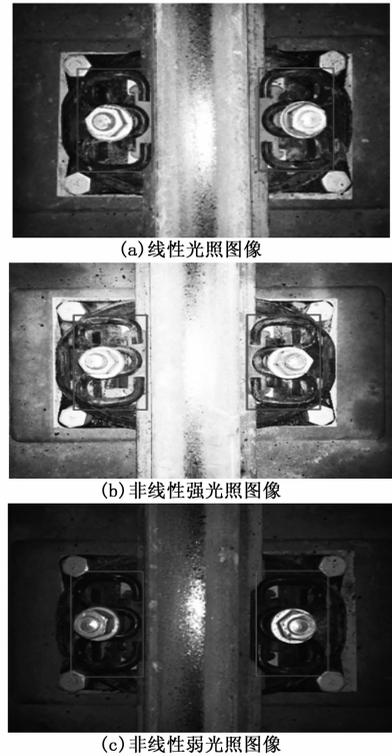


图 5 待搜索图像在不同光照条件下的匹配结果

从表 2 匹配成功率结果可以看出,线性光照下的匹配成功率达到 98.42%,非线性强光和非线性弱光的匹配成功率相对低一些。其中,非线性弱光图像匹配成功率较其他两种光照下图像的识别率低,主要是因为非线性弱光导致图像纹理特征不明显,方向场的提取存在较大误差,从而影响匹配的成功率。图 5 是不同光照下图像的匹配结果图,从图中可以看出,无砟轨道扣件匹配的位置准确,鲁棒性强,满足快速匹配的精度要求。

上述实验分析结果表明,本文所采用的无砟轨道快速匹

(下转第 279 页)