

基于图像处理的潘得路快速弹条扣件状态识别

袁文祥, 柴晓冬, 李立明, 彭乐乐

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201620)

摘要: 为研究针对潘得路快速弹条扣件状态识别的方法, 通过一种基于外触发模式同步控制线阵相机的方法, 以保证线阵相机能够在列车变速运行情况下采集的图像不产生纵向畸变; 对采集到的图像进行预处理, 利用交叉交叉法实现扣件区域的定位并提取; 采用基于快速归一化积相关算法的模板匹配定位扣件区域的扣件绝缘帽、固定螺栓并获取其中心坐标参数, 在此基础上提出一种基于特征距离的扣件状态识别方法。通过搭建图像采集轨道车实验验证了该同步控制法能够保证线阵相机在列车变速运行时采集的图像不产生纵向畸变; 进一步实验验证该快速归一化积相关算法相较于归一化积相关算法匹配速度提升了近 60%, 同时实验验证了该基于特征距离的扣件状态识别方法能够实现潘得路快速弹条扣件状态的识别。

关键词: 同步控制; 模板匹配; 特征距离; 状态识别

State Recognition of Pandrol Fast Projectile Fastener Based on Image Processing

Yuan Wenxiang, Chai Xiaodong, Li Liming, Peng Lele

(College of Urban Railway Transportation, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to detect the state of the Pandrol fast projectile fastener, a method of synchronous control of linear camera based on external trigger mode is used to ensure that the fastener's images be collecting undistorted when the train's speed changes. Preprocessing the collected images, and using cross crossing method to locate and extract fastener area. A template matching method based on fast normalized cross correlation algorithm is used to locate the fastener insulation cap and fixed bolt position in fastener area and obtain its central coordinate parameters, then, a recognition method of fastener status based on feature distance is proposed. The experiment of image acquisition railroad car proves that the synchronization control method can ensure that the images collected by linear array camera do not produce longitudinal distortion when the train is running at variable speed; Further experiment shows that the matching speed of the fast normalized cross correlation algorithm is improved by nearly 60% compared with the normalized cross correlation algorithm; At the same time, the experiment proves that the method based on feature distance can recognize the state of the Pandrol fast projectile fastener.

Keywords: synchronous control; template matching; characteristic distance; state recognition

0 引言

近年来我国的高速铁路以及城市轨道交通高速发展, 钢轨扣件作为轨道的重要组成部分之一, 其良好的状态为高速铁路及城轨交通的安全运行提供有效保障。潘得路快速弹条扣件(又称 FC 扣件)作为新型轨道扣件, 已被广泛应用于欧洲(CEN)、德国(DB-AG)、法国(SNCF)、日本(RTRI)、澳大利亚(AS)及北美(AREA)等国家的铁路上^[1]。同时, 也是引进中国应用在高铁客运专线上的轨道扣件, 现已引入 FC 扣件的线路有合武客运专线线两段, 石太客运专线^[1]。

针对轨道扣件状态的检测, Jinfeng Yang 等学者采用方向场描述扣件特征, 根据线性分析方法获得的权重系数矩阵匹配标准模板和测试图像, 从而实现扣件是否存在状态的检测^[2-3]; Babenko P.、Shah M. 等学者在 SIFT 特征

的基础上运用马赫滤波器和支撑向量机检测扣件的存在与否^[4-5]; 李永波等学者采用梯度方向直方图和主成分分析方法提取扣件特征, 之后采用支撑向量机进行分类^[6]; Yiqi Xia 等学者用 Haar 特征描述扣件图像, 再用 AdaBoost 分类方法达成识别扣件状态的目的^[7]; Khan R. A. 在 Harris-Shi-Tomasi 角点检测的基础上用模板匹配的方法来识别扣件弹条的状态^[8]。目前国内针对轨道扣件状态检测方法的研究主要针对 ω 型弹条扣件, 而对潘得路快速弹条扣件状态检测的研究很少。

本文针对潘得路快速弹条扣件的扣紧状态和非扣紧状态的检测, 设计一种基于外触发模式同步控制线阵相机的方法, 以保证线阵相机在列车做变速运行情况下采集的轨道扣件区域图像不产生纵向畸变(拉伸或者压缩); 接着对采集得到的图像进行基于灰度直方图均衡化^[9]和中值滤波^[10]的预处理, 以改善采集图像的对比度、减小白噪声的影响; 之后, 利用交叉交叉法^[11-12]实现采集图像中的扣件区域定位, 并提取出该扣件区域图像; 对所提取的扣件区域图像, 采用基于快速归一化积相关算法的模板匹配定位

收稿日期:2018-11-13; 修回日期:2018-12-05。

作者简介: 袁文祥(1991-), 男, 江苏徐州人, 硕士研究生, 工程师, 主要从事轨道智能检测方向的研究。

扣件绝缘帽及固定螺栓并获取其中心坐标参数；根据定位获取的相关中心坐标参数，提出一种基于特征距离的扣件状态识别方法。

1 系统结构

系统结构如图 1 所示，其是在同步控制线阵相机采集图像的基础上进行对 FC 扣件状态的识别。图像采集系统主要由线阵相机、光源、滤光片、光电编码器和工控机构成。光电编码器输出对应行车距离信息的脉冲数，并以此脉冲通过外触发模式同步控制线阵相机的行频，保证线阵相机采集的图像不产生纵向畸变（拉伸或压缩）。扣件状态识别主要由扣件定位和特征距离计算部分构成。将采集到的图像通过灰度直方图均衡化增强对比度和中值滤波去噪等预处理，利用十字交叉法对预处理后的图像进行扣件所在区域的定位并提取；通过基于快速归一化积相关算法的模板匹配将所提取的扣件区域中的扣件绝缘帽及固定螺栓定位并获取其中心坐标参数；根据这些坐标参数，计算特征距离并进行分类统计以实现扣件状态的识别。

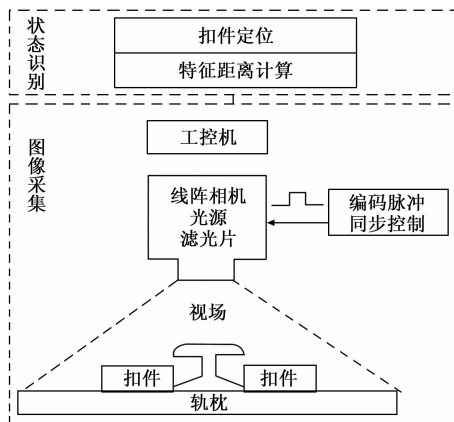


图 1 系统结构

2 线阵相机的同步控制采集图像

列车在实际运行过程中，由于其加速及减速阶段等现实原因，致使其不能够总是匀速运行，这样就无法满足线阵相机采集图像时保证图像不产生纵向畸变（纵向的拉伸或者压缩）。为了解决此问题，关键就是要实现以列车运行距离信息来同步控制线阵相机的图像采集。线阵相机的主要技术参数是其行频，即线阵相机每秒所曝光的次数。根据线阵相机的外触发模式，可以设计一种通过光电编码器匹配列车运行距离信息的方式来调整线阵相机的频率转换系数 FR (Frequency conversion Rate)，从而实时的对线阵相机的行频进行控制，以此实现对线阵相机采集图像的同步控制。

将线阵相机的横向视野 $HFOV$ (Horizontal Field of View) 设为 W (m)，线阵相机的横向分辨率 HR (Horizontal Resolving power) 设为 HR (pixel)，光电编码器每转一圈的输出脉冲数设为 F (个/r)，编码器与检测物体接触的外接转轮半径设为 R (m)，光电编码器输出相数设为 n 相

(每相有正负两个输出)，则相机捕获到的编码器输出频率是其输出每相信号频率的 $2n$ 倍，即 $2nF$ 。根据这些参数可以计算出控制线阵相机的频率转换系数 FR 。

则相机的纵向放大倍率 VPM (Vertical Promote Multiple rate) 为：

$$VPM = \frac{2nF}{2 \times \pi \times R} \quad (1)$$

相机的横向放大倍率 HPM (Horizontal Promote Multiple rate) 为：

$$HPM = \frac{HR}{W} \quad (2)$$

相机的频率转换系数 FR 为：

$$FR = \frac{HPM}{VPM} \quad (3)$$

根据所求得的 FR 参数，设置线阵相机频率转换器中的参数，从而实现线阵相机采集图像的同步控制。这样保证了线阵相机能够在列车以变速运行的情况下采集非畸变的轨道扣件图像。

3 扣件状态识别算法

在线阵相机所采集获取的轨道扣件图像的基础上，对采集到的图像进行基于灰度直方图均衡化和中值滤波的预处理，利用十字交叉法对扣件区域进行定位并提取；之后对所提取的扣件区域采用基于快速归一化积相关算法的模板匹配定位到扣件绝缘帽和固定螺栓，并获取其中心坐标参数；最后通过计算扣件绝缘帽和固定螺栓中心坐标的特征距离，并以此特征距离为判决条件实现扣件状态的识别目的。

3.1 基于 FNCC 算法的模板匹配定位

快速归一化积相关算法 (Fast Normalized Cross Correlation, FNCC) 是基于归一化积相关算法 (Normalized Cross Correlation, NCC) 的改进，通过减小每次匹配过程中的计算量，达到在保证匹配精度的前提下提高匹配速度的目的。FNCC 算法的原理如下：

设 $S(x, y)$ 为 $m \times n$ 的搜索图， $T(x, y)$ 为 $M \times N$ 的模板图，其误差平方和测度公式为：

$$D(i, j) = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S(i+t-1, j+t-1) - T(s, t)]^2 \quad (4)$$

式 (4) 中， $1 \leq i \leq m-M+1$ ， $1 \leq j \leq n-N+1$ 。 $D(i, j)$ 越小，则两幅图越相似。把公式 (4) 展开可得：

$$\begin{aligned} D(i, j) = & \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S(i+s-1, j+t-1)]^2 + \\ & \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t)]^2 - \\ & 2 \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S(i+s-1, j+t-1) \times T(s, t)] \end{aligned} \quad (5)$$

式 (5) 中右边三项分别为：

$$D_s(i, j) = \sum_{s=1}^N [S(i+s-1, j+t-1)]^2$$

$$D_s(i, j) = 2 \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S(i+s-1, j+t-1) \times T(s, t)] \cdot$$

$$D_i(i, j) = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t)]^2 \quad (6)$$

式 (6) 中, $D_s(i, j)$ 为搜索图像中与模板图像对应区域的能量, 其与所搜索的区域像素位置 (i, j) 有关, 并且随着 (i, j) 的变化而逐步变化; $D_i(i, j)$ 是模板图像与搜索图像对应区域的互相关函数, 它随着像素位置 (i, j) 的变化而变化, 当 T 和 S 中对应区域相匹配时, $D_s(i, j)$ 取得最大值; $D_i(i, j)$ 是模板图像的能量, 它与图像像素位置 (i, j) 无关, 是一个常数。因此, 采用互相关误差平方和测度公式:

$$R(i, j) = \frac{D_s}{D_i} =$$

$$\frac{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t)] \times [T(s, t)]}{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t)]^2} \quad (7)$$

对式 (7) 归一化得:

$$R(i, j) =$$

$$\frac{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t)] \times [T(s, t)]}{\sqrt{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t)]^2} \times \sqrt{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t)]^2}} \quad (8)$$

由式 (8) 知, $R(i, j)$ 越大, $S_{i,j}$ 与 T 越匹配, 当 $S_{i,j} = nT$, 时 (n 为正整数), $R(i, j)$ 最大, 且为 1。在此基础上, 对式 (8) 变换得:

$$R(i, j) =$$

$$\frac{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) - \bar{S}_{i,j}] \times [T(s, t) - \bar{T}]}{\sqrt{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) - \bar{S}_{i,j}]^2} \times \sqrt{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t) - \bar{T}]^2}} \quad (9)$$

$$\text{式 (9) 中, } \bar{S}_{i,j} = \frac{1}{M \times N} \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N S_{i,j}(s, t), \bar{T} = \frac{1}{M \times N} \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N T(s, t)$$

对式 (9) 等式右边分子展开得:

$$\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) \times T(s, t)] -$$

$$\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) \times \bar{T}] -$$

$$\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times T(s, t)] + \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times \bar{T}] \quad (10)$$

由于模板 T 的均值 $\bar{T}$ 、匹配区域的均值 $\bar{S}_{i,j}$ 、式 (9)

中 $\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t) - \bar{T}]^2$ 、式 (10) 中 $\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times \bar{T}]$ 项皆为常数, 可设 $k_1 = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times \bar{T}]$, $k_2 = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t) - \bar{T}]^2$ 。为了提高匹配计算速度, 可把 k_1 、 k_2 常数项事先计算出来, 在每次匹配计算时直接带入, 以减小计算量。同时, 式 (10) 中 $\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) \times \bar{T}]$ 和 $\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times T(s, t)]$ 两项由于

$\bar{T}$ 和 $\bar{S}_{i,j}$ 为常数对相关不起决定作用, 可以省略这两项的计算。因此, 改进的互相关误差平方和测度公式为:

$$R(i, j) =$$

$$\frac{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) \times T(s, t)] + k_1}{\sqrt{\sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [S_{i,j}(s, t) - \bar{S}_{i,j}]^2} \times \sqrt{k_2}} \quad (11)$$

$$\text{式 (11) 中, } \bar{S}_{i,j} = \frac{1}{M \times N} \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N S_{i,j}(s, t), k_1 = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [\bar{S}_{i,j} \times \bar{T}], k_2 = \sum_{s=1}^M \sum_{t=1}^N [T(s, t) - \bar{T}]^2$$

由于扣件区域图像中的扣件绝缘帽和固定螺栓具有稳定且均匀的灰度特征, 因此将扣件绝缘帽区域及固定螺栓区域分别制作成子模板, 分别采用以上论述的快速归一化积相关算法对扣件区域图像进行模板匹配定位, 以定位到扣件绝缘帽及固定螺栓的区域位置并分别获取其中心坐标参数。获取的左右扣件绝缘帽中心坐标分别记为 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$; 获取的左右固定螺栓区域中心点坐标分别记为 $O_1(x_3, y_3)$ 、 $O_2(x_4, y_4)$ 。定位到的扣件绝缘帽中心坐标以及固定螺栓中心坐标, 将用于下文所述的基于特征距离的扣件状态识别算法。

3.2 基于特征距离的扣件状态识别

在上文所述基于快速归一化积相关算法的模板匹配定位扣件区域特征的基础上, 根据所获取的扣件特征区域中心坐标, 提出了本文针对潘得路快速弹条扣件状态识别的算法, 即基于扣件特征距离的扣件状态识别算法。该算法主要分为两种, 一种是基于扣件绝缘帽特征距离的扣件状态识别算法, 另一种是基于扣件弹条特征距离的扣件状态识别算法。下面首先详细介绍基于扣件绝缘帽特征距离的扣件状态识别算法。

基于扣件绝缘帽特征距离的扣件状态识别算法的原理就是对扣件绝缘帽特征区域的位置坐标进行计算, 并与接下来论述的相对稳定的参考位置进行对比, 统计所得的特征距离参数, 进行分类从而得到扣件状态信息, 以此实现扣件状态识别的目的。该算法能够定量的给出扣件所处状态的像素距离参数, 直观的表明了所需检修的扣件数目。

计算特征距离需要选取一个相对稳定的参考位置。由于列车车轮一般为圆锥踏面, 搭载在列车上的相机也会随列车横向摆动, 采集获取的图像中钢轨表面中心线并不一定在图像的正中央, 因此无法选取钢轨区域的中心线作为参考位置。相对的, 由于 FC 扣件的固定螺栓 (钢轨左右各一个) 位置相对固定, 具有良好的参考价值。如图 2, 选取左右两个固定螺栓中点 O_1 和 O_2 连线的中点 $O(x_0, y_0)$ 作为特征距离参考点。

$O(x_0, y_0)$ 点坐标由定位到的 $O_1(x_3, y_3)$ 、 $O_2(x_4, y_4)$ 坐标求得:

$$x_0 = \frac{x_3 + x_4}{2}, y_0 = \frac{y_3 + y_4}{2} \quad (12)$$

计算左右扣件绝缘帽中心点 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 和特征距离参考点 O 的水平相对距离 Δx_1 、 Δx_2 :

相机采集图像过程中不受列车速度变化的影响。

通过进一步实验验证扣件状态识别方法。在 PC 机 Windows7 操作系统下，通过 Matlab2014a 版本软件对采集获取的一组扣件图像（100 张）进行基于灰度直方图和中值滤波的预处理，利用十字交叉法对预处理后的采集图像中的扣件区域进行定位并提取；接着通过 Matlab2014a 版本软件对采集获取的这组提取到的扣件区域图像分别进行基于 NCC 算法和 FNCC 算法的模板匹配定位，以实现其扣件绝缘帽及固定螺栓的定位，并获取其中心坐标。统计匹配定位这组图像使用的基于 FNCC 算法和 NCC 算法所用时间，之后分别取其平均值进行对比，对比结果如表 2 所示。

表 2 各算法匹配定位所用平均时间对比

匹配算法	匹配绝缘帽平均时间 t_1 /ms	匹配螺栓平均时间 t_2 /ms
NCC	1668	1545
FNCC	642	588

由表 2 可见，该基于 FNCC 算法的模板匹配在保证匹配精确度的前提下，相较于基于 NCC 算法，其定位扣件绝缘帽和固定螺栓所用时间都得到了有效减小，匹配定位速度提高了 60% 左右。

根据基于 FNCC 算法模板匹配定位到的这组扣件区域图像的扣件绝缘帽、固定螺栓及扣件弹条的中心坐标参数 $P_1(x_1, y_1)$ 、 $P_2(x_2, y_2)$ 、 $O_1(x_3, y_3)$ 、 $O_2(x_4, y_4)$ 、 $Q_1(x_5, y_5)$ 、 $Q_2(x_6, y_6)$ ，进行基于特征距离的计算，求取相对特征距离 Δx_1 、 Δx_2 、 Δx_3 、 Δx_4 ，其中阈值 C_1 (pixel)、 C_2 (pixel) 取先验实验的平均值分别为 255 (pixel) 和 375 (pixel)。利用 Matlab2014a 软件得到相对特征距离统计图如图 6、图 7 所示。再由统计结果及阈值 C_1 、 C_2 ，可对这组图像的扣件状态进行分类，扣件状态识别结果如表 3、表 4 所示。

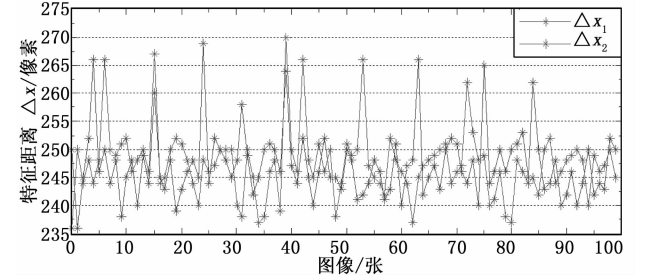


图 6 基于绝缘帽特征距离的相对特征距离统计图

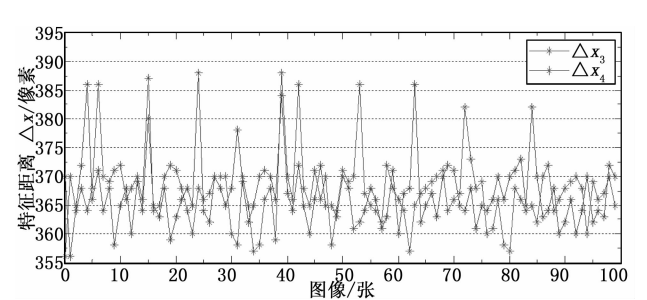


图 7 基于弹条特征距离的相对特征距离统计图

表 3 基于绝缘帽特征距离的扣件状态识别结果

扣件	扣紧/张	非扣紧/张
左侧扣件	94	6
右侧扣件	92	8

表 4 基于弹条特征距离的扣件状态识别结果

扣件	扣紧/张	非扣紧/张
左侧扣件	94	6
右侧扣件	93	7

将基于特征距离的扣件状态分类结果和原始采集图像扣件状态（如表 5）进行对比，结果显示，基于扣件绝缘帽特征距离的扣件状态识别结果与实际情况相吻合，扣件状态识别率达到 100%，而基于扣件弹条特征距离的扣件状态识别结果与实际情况出现了偏差，扣件状态识别率为 99%。

表 5 原始采集图像扣件状态

扣件	扣紧/张	非扣紧/张
左侧扣件	94	6
右侧扣件	92	8

因为现实情况的需要，我们将两种扣件状态识别算法综合起来，做与运算的关系，即只有当这两种算法的识别结果都显示扣件处于扣紧状态时，认为该位置的扣件为扣紧状态，否则，即使有一种算法的结果显示该处扣件处于非扣紧状态时，认为该处扣件为非扣紧状态需要检修并标记。这样既能够保证扣件状态识别算法的可靠性，又有效避免了对非扣紧状态扣件的漏检，从而保障了列车运营的安全。

5 结论

为了研究针对潘得路快速弹条扣件的状态检测，采集高分辨率的潘得路快速弹条扣件图像至关重要，于是通过基于外触发模式的同步控制线阵相机方法，以保证线阵相机能够在列车做变速运行情况下采集到的图像不产生纵向畸变（拉伸或者压缩）；接着对线阵相机所采集获得的图像进行数字图像预处理，之后利用十字交叉法实现扣件区域的定位并提取；然后采用基于快速归一化积相关算法的模板匹配定位扣件区域中的扣件绝缘帽和固定螺栓，并获取其中心点的坐标参数；在此基础上提出一种基于特征距离的扣件状态识别方法。该基于特征距离的扣件状态识别方法分为两种，一种是基于扣件绝缘帽特征距离的扣件状态识别算法，另一种是基于扣件弹条特征距离的扣件状态识别算法。

通过搭建图像采集轨道车实验验证了该同步控制法能够保证线阵相机在列车变速运行时所采集的图像不会产生纵向畸变；进一步通过实验验证基于快速归一化积相关算法的模板匹配相较于基于归一化积相关算法的模板匹配速度