

DOI:10.3969/j.issn.1671-024x.2025.02.011

基于图像匹配的钢丝绳芯输送带接头抽动自动检测

李现国^{1,2}, 郭宽宽¹, 苗长云^{1,2}

(1. 天津工业大学 电子与信息工程学院, 天津 300387; 2. 天津工业大学 天津市光电检测技术与系统重点实验室, 天津 300387)

摘要: 针对钢丝绳芯输送带接头抽动检测有效性和准确性差的问题, 提出一种基于图像匹配的钢丝绳芯输送带接头抽动自动检测方法。首先进行图像预处理, 提高图像质量; 然后使用自动阈值提取钢丝绳端头点; 再利用改进的 ORB 算法进行图像匹配, 将待检测图像和基准图像中的钢丝绳端头点一一对应; 最后采用基于钢丝绳端头基准点集的接头抽动测量方法计算接头抽动量并进行故障定位。实验结果表明: 本文方法能够自动检测并标识出钢丝绳芯输送带接头处的钢丝绳端头点, 准确得到钢丝绳端头点的匹配点对, 计算出单个钢丝绳端头抽动量、钢丝绳上(下)端头平均抽动量和接头整体抽动量, 检测并标识出异常钢丝绳端头的位置和变化量, 实现了对接头抽动的自动检测和综合判断。

关键词: 钢丝绳芯输送带; 接头抽动; 图像匹配; 钢丝绳端头点提取; ORB 算法

中图分类号: TD77.1; TP391

文献标志码: A

文章编号: 1671-024X(2025)02-0078-06

Automatic detection of joint twitching of steel wire rope core conveyor belt based on image matching

LI Xianguo^{1,2}, GUO Kuankuan¹, MIAO Changyun^{1,2}

(1. School of Electronics and Information Engineering, Tiangong University, Tianjin 300387, China; 2. Tianjin Key Laboratory of Optoelectronic Detection Technology and System, Tiangong University, Tianjin 300387, China)

Abstract: Aiming at the problem of poor effectiveness and accuracy of joint twitch detection, an automatic detection method of steel wire rope core conveyor belt joint twitch based on image matching is proposed. Firstly, image preprocessing is carried out to improve the image quality. Then the automatic threshold is used to extract the wire rope end point. Then, the improved ORB algorithm is used for image matching, and the steel wire rope end points in the detected image and the reference image are corresponded one by one. Finally, the joint twitch measurement method based on the set of wire rope end reference points is used to calculate the joint twitch and locate the fault. The experimental results show that this method can automatically detect and identify the end points of the steel wire rope at the joint of the steel wire rope core conveyor belt, accurately obtain the matching point pairs of the end points of the steel wire rope, calculate the end twitch of a single steel wire rope, the average end twitch of the steel wire rope upper (lower) end and the overall end twitch, and detect and identify the position and variation of the abnormal end points of the steel wire rope. And the automatic detection and comprehensive judgment of joint twitch are realized.

Key words: steel wire rope core conveyor belt; joint twitching; image matching; extraction of wire rope end point; ORB algorithm

钢丝绳芯输送带是以钢丝绳作为骨架材料的橡胶输送带, 具有抗拉强度高、抗冲击、耐摩擦、寿命长等优点, 广泛应用于煤炭、矿山、港口、电力、化工等领域。在实际应用中, 一条完整的钢丝绳芯输送带由若干段钢丝

绳芯输送带通过硫化工艺搭接而成, 搭接的部位称为钢丝绳芯输送带接头(简称为“接头”)。接头区域是整条钢丝绳芯输送带中抗拉强度最低、最为薄弱的部位, 易出现接头抽动故障进而导致断带事故的发生^[1-2]。

收稿日期: 2021-12-20 基金项目: 天津市重点研发计划科技支撑重点项目(18YFZCGX00930)

通信作者: 李现国(1981—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为工矿企业安全监测监控技术与系统。E-mail: lixianguo@tiangong.edu.cn

文献[3]提出了一种在接头两端预埋磁块、通过霍尔传感器检测输送带接头抽动的方法;文献[4]研制了一种预埋识别芯片的钢丝绳芯输送带接头变形量在线检测装置,但这种预埋检测模块的方法会破坏接头的完整性且易受到外部环境干扰;文献[5]提出了一种基于有限元法分析接头性能的方法,但该方法受限于接头抽动量的准确检测;文献[6]提出了一种基于电磁感应原理的钢丝绳芯输送带钢丝绳故障监测方法,先通过 2 块条形磁铁持续磁化钢丝绳,然后通过电感线圈构成的 112 通道的模块采集信号,该方法获取的图像分辨率仅为 25 mm,且易受到安装距离和环境的影响^[7]。X 光探测技术是一种成熟的无损探测技术,具有直观、速度快、探测精度高等优点,所以近年来对钢丝绳芯输送带接头抽动故障的检测主要在接头的 X 光图像上进行。文献[8]提出了一种基于二元稳健独立基本特征(BRIEF)的接头抽动检测方法;文献[9]提出了一种基于 Blob 分析的接头抽动检测方法;文献[10]提出了一种测量钢丝绳端头之间距离变化的抽动检测方法。但是这 3 种方法需要接头搭接得比较规范,而实际中的接头很难达到这种要求。接头抽动后,一般

都会表现为接头处钢丝绳端头位置变化,从 X 光图像上看,钢丝绳搭接空档会变大,当抽动范围大时接头处钢丝绳整体区域会变小,基于此特性,本课题组前期提出了一种基于条件 Y 差分算法的矿用钢丝绳芯输送带接头抽动量计算方法^[11]以及一种基于上下接头拟合直线的接头整体伸长的判断方法^[12],并应用于课题组前期研制的基于 X 光的钢丝绳芯输送带无损检测系统中。但文献[11]的方法需要人工辅助选择搭接空档,文献[12]的方法不能够准确定位故障部位。图像匹配是将 2 幅图像相同或相似部分一一对应的技术,通过匹配结果定位哪些部位发生了抽动,从而准确检测故障部位^[13]。本文提出一种基于图像匹配的钢丝绳芯输送带接头抽动自动检测方法,使用自动阈值提取钢丝绳端头点,再利用改进的 ORB 算法^[14]进行图像匹配,实现对接头抽动量的自动测量和判断,以提高接头抽动检测的有效性和准确性。

1 检测方法流程

本文提示的检测方法流程如图 1 所示。

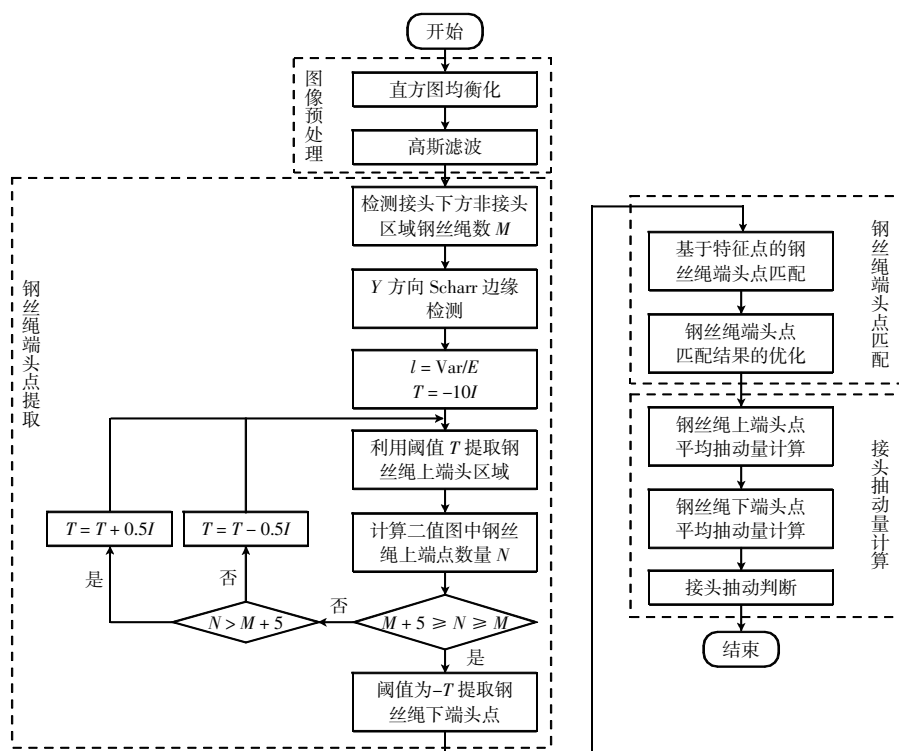


图 1 本文方法流程

Fig.1 Flow chart of proposed method

2 图像预处理

钢丝绳芯输送带 X 光图像采集过程中,由于射线源焦点发出的 X 光是以扇束的形式穿透钢丝绳芯输

送带、其到达线阵探测器时 X 光强度不均以及探测器自身的稳定性等因素,导致采集得到的 X 光图像存在亮度不均和噪声干扰问题,对钢丝绳端头点的提取造成了一定的影响^[15],所以需要图像进行预处理,提高

图像质量。本文首先用直方图均衡化增强图像,降低 X 光强度不均的影响并提高图像的对比度;再使用高斯滤波滤除图像噪声,减少噪声干扰。钢丝绳芯输送带接头 X 光图像如图 2 所示。

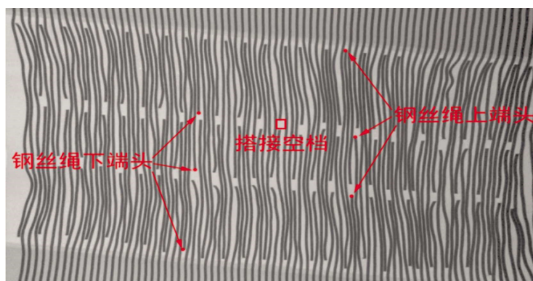


图 2 钢丝绳芯输送带接头 X 光图像

Fig.2 X-ray image of steel cord conveyor belt joint

3 钢丝绳端头点提取

3.1 钢丝绳上端头数量估计

输入一幅分辨率大小为 $m \times n$ 的接头图像(其中 m 表示每行有 m 个像素, n 表示每列有 n 个像素),图像中钢丝绳上端头(端头向上的钢丝绳端头)的数量约等于接头下方非接头区域中钢丝绳的数量,取图像最下方不含接头部位的 $m \times 20$ 图像为检测部分,进行阈值分割生成二值化图像,并进行反相处理。然后沿中间行由左向右检索不为零的点,并剔除距离前一个不为零的点小于 3 的点,得到的点的数量即为钢丝绳的数量 M ,约等于钢丝绳上端头的个数。

3.2 边缘检测算子

Sobel 算子是一种一阶微分算子,对噪声具有平滑作用,常用来进行边缘检测,但是精确度不高。Scharr 算子是 3 阶 Sobel 算子的一个改进,拥有更好的精确度。Scharr 相对于 Sobel 系数更大,能够检测更多的细节,同时将差异放大便于进行图像分割。离散 Scharr 算子的卷积模板如式(1)所示。

$$\text{Scharr}_x = \begin{bmatrix} +3 & 0 & -3 \\ +10 & 0 & -10 \\ +3 & 0 & -3 \end{bmatrix}$$

$$\text{Scharr}_y = \begin{bmatrix} +3 & +10 & +3 \\ 0 & 0 & 0 \\ -3 & -10 & -3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

钢丝绳芯输送带接头部分的 X 光图像从垂直方向看,钢丝绳端头处灰度值发生突变^[6],变化最为剧烈,接头端头处可作为一个水平的边缘,利用边缘检测算子进行检测,本文选用 Y 向的 Scharr 算子。

3.3 钢丝绳端头点提取算法

利用 Y 向 Scharr 算子对预处理后的 X 光接头图像 I 进行卷积运算,得到运算结果 R 。然后设置双阈值以提取钢丝绳上端头点和下端头点,并使用接头数量为迭代终止条件的迭代实现阈值的自适应,具体算法流程为:

(1) 使用式(2)计算 R :

$$R(x, y) = \text{Scharr}_y * I(x, y) = [3I(x+1, y-1) + 10I(x+1, y) + 3I(x+1, y+1)] - [3I(x-1, y-1) + 10I(x-1, y) + 3I(x-1, y+1)] \quad (2)$$

在 R 中钢丝绳上端头处的数值为负值,钢丝绳下端头处的数值为正值。

(2) 利用方差和均值设置步长 l ,并设置用于图像二值化时的阈值 T 的初始值为 $-10l$ 。

$$l = \text{Var}(I)/E(I) \quad (3)$$

式中: $E(I)$ 为图像像素值的均值; $\text{Var}(I)$ 为图像像素值的方差。

(3) 令 R 中小于 T 的点的像素值置为 255,其他点置为 0,得到钢丝绳上端头二值图像。

(4) 对钢丝绳上端头二值图像进行轮廓检测,对每个轮廓都计算最小外接圆,并取其圆心作为钢丝绳端头点坐标,计算得到钢丝绳上端头点的数量 N 与 3.1 节中估计的钢丝绳上端头点数量 M 进行比较。如果检测钢丝绳上端头点数 N 比估计值 M 小,则阈值 $T = T + 0.5l$;检测钢丝绳上端头点数 N 大于 $(M + 5)$,则阈值 $T = T - 0.5l$,然后返回第(3)步。否则就进行下一步。

(5) 令阈值 $T = -T$,将 R 中大于 T 点的像素值置为 255,其他点置为 0,提取出钢丝绳下端头点。

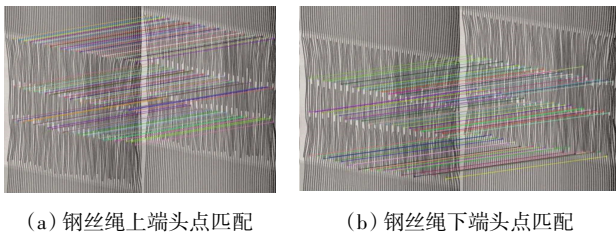
4 钢丝绳端头点匹配

由于钢丝绳芯输送带接头均为人工制作,任一接头之间都存在差异,所以针对每一个接头,将首次运行基于 X 光的钢丝绳芯输送带无损检测系统时采集的一张初始图像作为参考图像,再次采集的该接头图像作为待检测图像。对比这 2 张图像的差异,判断接头是否发生了变化,并通过变化的程度来判断是否发生接头抽动故障。在接头图像采集过程中,因为钢丝绳芯输送带经常出现左右移动和上下抖动,造成接头图像有时候采集的不完整,接头两侧或某一侧的信息丢失,传统坐标匹配的方法就失去了作用,因此本文提出一种基于图像匹配算法的钢丝绳端头点匹配方法。

4.1 基于特征点的钢丝绳端头点匹配

基于特征点的图像匹配算法一般包括 3 个步骤:

特征点提取、特征点描述和特征点匹配^[17]。基于特征点的传统匹配算法有尺度不变特征转换(SIFT)、加速增强功能(SURF)、ORB等,其中ORB算法是一种融合了加速分段测试特征(FAST)特征点提取算法^[18]和BRIEF描述算法^[19]的快速特征点提取和描述算法,具有较高的准确性和速度^[20],但实验表明使用FAST特征提取算法提取特征点不能选择性地提取钢丝绳端头点,所以本文将3.3节提出的钢丝绳端头点提取算法替换ORB中的FAST特征点提取算法,然后使用汉明距离进行匹配,减小了计算量和误匹配率。为了进一步减小误匹配率,对上下钢丝绳端头点分别进行匹配,并使用距离和斜率约束去除误匹配点^[21],匹配效果如图3所示。



(a) 钢丝绳上端头点匹配 (b) 钢丝绳下端头点匹配

图3 钢丝绳端头点匹配效果

Fig.3 Matching effect of wire rope end points

由图3可以看出,经过钢丝绳端头点匹配之后得到了参考图像与待检测图像之间的若干可靠匹配点对,但检测到的钢丝绳端头点并没有完全一一对应,有的点没有匹配成功,需要进一步优化。

4.2 钢丝绳端头点匹配结果的优化

利用上文得到的可靠匹配点对将其余的钢丝绳端头点也都一一对应起来,钢丝绳上下端头点分开进行。具体步骤为:

(1) 将2幅图像中钢丝绳端头点进行分层处理,根据搭接方式(S 级搭接)^[22]分为 $S+1$ 层,其中前 S 层为普通层,取最左端的 S 个钢丝绳端头点通过距离约束分成 S 层,然后依次将其余的钢丝绳端头点按距离划分到第 i 层($i \leq S$),剩余的钢丝绳端头点放入垃圾层中。

(2) 将端头点可靠匹配点对同样分为 $S+1$ 层。

(3) 根据端头点可靠匹配点对将层与层对应。 A 点为参考图像中的钢丝绳端头点, B 点为与 A 点可靠匹配的待检测图像中的点,如果 A 在参考图像钢丝绳端头点的第 i 层, B 在待检测图像钢丝绳端头点的第 j 层,那么 i 和 j 就是2个对应层。

(4) 利用横向位置关系将每一层2个相邻可靠匹配点之间的钢丝绳端头点进行对应,完成对钢丝绳端头点的一一对应和匹配优化。

5 接头抽动量计算

经过上述步骤之后,可以通过计算搭接空档的伸长量的方法来判断接头抽动,但是由于接头的磨损和搭接不规范,搭接空档很难被准确检测和自动匹配,该方法无法有效使用。本文提出一种基于钢丝绳端头基准点集的接头抽动测量方法。

首先选取4.1节得到的钢丝绳下端头的可靠匹配点对作为基准点集,然后利用式(4)计算第 p 个待测钢丝绳上端头点与第 q 个基准点的 $\Delta L(p, q)$,并利用式(5)计算 $\Delta L(p, q)$ 的平均值作为该钢丝绳端头的抽动量 $\Delta L_{\text{elongation}}(p)$ 。利用式(6)求出所有钢丝绳上端头的抽动量的均值作为钢丝绳上端头的平均抽动量 ΔL_{all} 。

$$\Delta L(p, q) = \Delta L_{\text{ref}}(p, q) - L_{\text{det}}(p, q) \quad (4)$$

$$\Delta L_{\text{elongation}}(p) = \sum_{q=1}^{N_d} \Delta L(p, q) / N_d \quad (5)$$

$$\Delta L_{\text{all}} = \sum_{p=1}^{N_{\text{tip}}} \Delta L_{\text{elongation}}(p) / N_{\text{tip}} \quad (6)$$

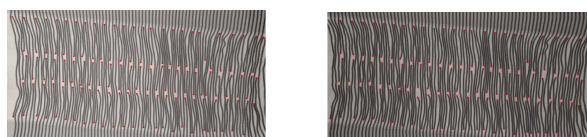
式中: $L_{\text{ref}}(p, q)$ 和 $L_{\text{det}}(p, q)$ 分别为参考图像和待检测图像中第 p 个待测钢丝绳上端头点与第 q 个基准点之间纵坐标的差值; N_d 为钢丝绳下端头可靠匹配点对的个数; N_{tip} 为钢丝绳上端头的数量。

同理可计算每根钢丝绳下端头的抽动量和钢丝绳下端头的平均抽动量。钢丝绳上端头的平均抽动量和钢丝绳下端头的平均抽动量的平均值为该钢丝绳芯输送带接头的整体抽动量。如果某个端头点抽动量比对应的平均抽动量大5则判定此端点为异常端头点,如果接头整体抽动量大于10则判定接头发生严重抽动故障。

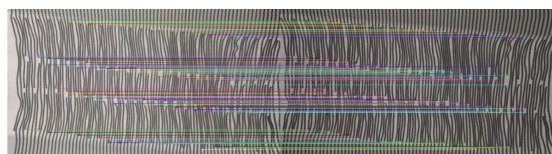
6 实验结果及分析

本文选取某煤矿采用3级搭接的钢丝绳芯输送带某接头作为实验对象进行测试,将2020年1月20号采集的图像作为参考图像、2020年6月25号采集的图像作为待检测图像,为了更好地验证本文方法的效果,分别将待检测图像中上下各一个钢丝绳端头进行了抽动处理。使用本文方法的接头抽动自动检测结果如图4所示。图4(a)和图4(b)分别为钢丝绳上下端头点提取的结果;基于特征点的钢丝绳端头点匹配结果如图4(c),每条线连接的是一可靠匹配点对,再基于可靠匹配点对进行优化将所有钢丝绳端头点进行匹配得到图4(d)。计算钢丝绳端头点到基准点的垂直方向纵坐标的差值,结果如图4(e)所示,利用式(5)可计算出各钢丝绳端头的抽动量。通过计算钢丝绳上

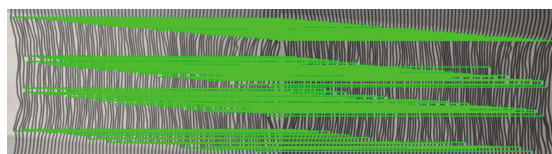
下端头的抽动量的平均值作为整体抽动的衡量指标,找出并标注异常钢丝绳端头点,检测结果如表 1 所示。异常点标注如图 4(f)所示,参考图像中标出了异常点位置,待测图像中标出了钢丝绳端头点抽动矩形框,垂直方向的长度表示抽动的长度。



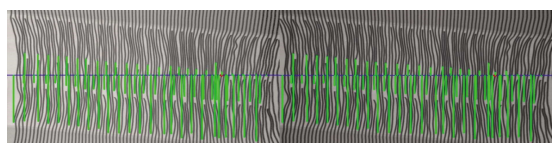
(a) 参考图像钢丝绳端头点提取 (b) 待检测图像钢丝绳端头点提取



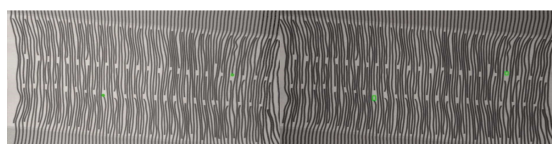
(c) 基于特征点的钢丝绳端头点匹配结果



(d) 钢丝绳端头点匹配结果的优化



(e) 钢丝绳端头点到基准点的垂直方向纵坐标差值表示 (以红色标识的某上端头点为例)



(f) 异常点标注

图 4 某矿 1 号接头处理结果

Fig.4 Treatment results of No. 1 joint in a mine

表 1 接头抽动自动检测结果

Tab.1 Automatic detection results of joint twitching

端头	平均抽动量 (像素)	异常钢丝绳端头点抽动量(像素)	结论
钢丝绳上端头	1.340 256	21.744 535	整体状态良好,有一个异常钢丝绳上端头
钢丝绳下端头	1.252 285	15.693 396	整体状态良好,有一个异常钢丝绳下端头

根据表 1 中数据可以计算出钢丝绳芯输送带接头的整体抽动量为 1.296 271 像素,表明该钢丝绳芯输送带接头整体出现了轻微的接头抽动变化。本文方法自动检测出了 2 个异常钢丝绳端头点,且检测的抽动量与通过图像处理软件人工检测得到的结果一致。本文方法与文献[7]中设定固定阈值提取钢丝绳端头点方法相比,本文使用的自适应阈值方法适应性更强;与文

献[8]中的接头匹配算法相比,本文使用的基于特征点的钢丝绳端点匹配更加有效;与文献[10]方法相比,本文方法不用人工辅助校准;与文献[12]方法相比,本文方法既能进行单个钢丝绳端头点分析又能进行整体分析,更加全面。

本方法在一台 Intel(R) Core(TM) i7-5500U CPU @2.40GHz 2.40 GHz、8 G 运行内存、64 位操作系统的笔记本电脑上的运行时间约在 2~3 s 之间(因为迭代运算的次数存在不确定性),具有一定的实时性。

7 结束语

本文提出了一种基于图像匹配的钢丝绳芯输送带接头抽动自动检测方法。该方法包含图像预处理、钢丝绳端头点提取、钢丝绳端头点匹配和接头抽动量计算 4 个步骤。首先,依据钢丝绳芯输送带 X 光成像的特点,使用直方图均衡化和高斯滤波进行图像预处理,提高了图像的对比度、降低了噪声影响。然后,基于 Schar 算子的边缘检测结果,提出了钢丝绳端头点提取算法,使用自适应阈值分割得到了钢丝绳端头的二值图像,并通过轮廓检测和提取最小外接圆心分别得到钢丝绳上端头点和下端头点,准确检测出了钢丝绳端头。随后,提出了一种基于图像匹配算法的钢丝绳端头点匹配方法,将钢丝绳端头点提取算法获得的结果用于改进的 ORB 算法,并使用汉明距离进行匹配,得到了参考图像与待检测图像之间的可靠匹配点对,减小了计算量和误匹配率,但由于存在漏匹配情况,使用分层方法对匹配结果进行了进一步优化,实现了钢丝绳端头点的一一对应。最后,提出了一种基于钢丝绳端头基准点集的接头抽动测量方法,实现了每根钢丝绳上下端头的抽动量、钢丝绳上下端头的平均抽动量和接头的整体抽动量的计算。实验结果表明:本文方法能够自动检测并标识出钢丝绳芯输送带接头处的钢丝绳端头点,得到参考图像与待检测图像之间的匹配点对,计算出单个钢丝绳端头点抽动量和接头整体抽动量,检测并标识出异常钢丝绳端头点的位置和变化量,与人工检测得到的结果一致,实现了对接头抽动的自动检测。

参考文献:

[1] LONG X Y, LI X G, SUN M W, et al. Quantitative analysis of bond and splice strength of steel cord conveyor belt[J]. Journal of Adhesion Science and Technology, 2020, 34(14): 1544-1555.

[2] BŁAŻEJ R, JURDZIAK L, KIRJANÓW A, et al. Evaluation of the quality of steel cord belt splices based on belt condition

- examination using magnetic techniques[J]. *Diagnostyka*, 2015, 16(3):59-64.
- [3] 兰西柱. 钢芯输送带接头断裂在线监测仪的研制[J]. *煤炭科学技术*, 2000, 28(12): 14-15.
LAN X Z. Development of on-line monitoring and measuring meter for connecting point breaking of steel cable conveyor belt[J]. *Coal Science and Technology*, 2000, 28(12): 14-15 (in Chinese).
- [4] 袁景, 袁婉潼. 一种钢丝绳芯输送带接头变形量在线检测装置: 中国, CN201721898106.3[P]. 2018-07-27.
YUAN J, YUAN W T. An online detection device for the joint deform of steel wire rope core conveyor belt: China, CN2017-21898106.3[P]. 2018-07-27 (in Chinese).
- [5] 龙新雨. 基于 Abaqus 的钢丝绳芯输送带接头变形的有限元分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2019.
LONG X Y. Finite element analysis of joint deformation of steel cord conveyor belt based on Abaqus[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2019 (in Chinese).
- [6] OLCHÓWKA D, RZESZOWSKA A, JURDZIAK L, et al. Statistical analysis and neural network in detecting steel cord failures in conveyor belts[J]. *Energies*, 2021, 14(11): 3081-3081.
- [7] BŁAŻEJ R, JURDZIAK L, KOZŁOWSKI T, et al. The use of magnetic sensors in monitoring the condition of the core in steel cord conveyor belts: Tests of the measuring probe and the design of the DiagBelt system[J]. *Measurement*, 2018, 123: 48-53.
- [8] 韩现代, 曹雪虹, 焦良葆. 钢丝绳芯输送带接头抽动检测方法[J]. *工矿自动化*, 2017, 43(8): 67-71.
HAN X D, CAO X H, JIAO L B. Detection method of joint twitching of steel cord conveyor belt[J]. *Industry and Mine Automation*, 2017, 43(8): 67-71 (in Chinese).
- [9] 黄元麒. 基于 X 光图像的钢丝绳芯输送带接头抽动检测算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2019.
HUANG Y Q. Research on titch detection algorithm of wire rope conveyor belt joint based on X-ray image[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2019 (in Chinese).
- [10] 方崇全, 樊荣, 张荣华. 新型钢丝绳芯输送带接头抽动检测算法[J]. *煤矿机械*, 2015, 36(4): 13-16.
FANG C Q, FAN R, ZHANG R H. New detection algorithm for steel core conveyor belt splice twitch[J]. *Coal Mine Machinery*, 2015, 36(4): 13-16 (in Chinese).
- [11] 李现国, 苗长云, 符祎, 等. 矿用输送带接头伸长量计算及故障检测方法[J]. *煤炭科学技术*, 2015, 43(3): 82-86.
LI X G, MIAO C Y, FU Y, et al. Fault detection method and joint elongation calculating for coal mining conveyor belt[J]. *Coal Science and Technology*, 2015, 43(3): 82-86 (in Chinese).
- [12] 张灿. X 光钢丝绳芯输送带接头伸长自动检测算法研究与实现[D]. 天津: 天津工业大学, 2018.
ZHANG C. Research and implementation of automatic detection algorithm for joint extension of X-ray steel cord conveyor belt[D]. Tianjin: Tianjin Polytechnic University, 2018 (in Chinese).
- [13] MA J Y, JIANG X Y, FAN A X, et al. Image matching from handcrafted to deep features: A survey[J]. *International Journal of Computer Vision*, 2021, 129(1): 23-79.
- [14] MA C Q, HU X G, XIAO J, et al. Improved ORB algorithm using three-patch method and local gray difference[J]. *Sensors*, 2020, 20(4): 975.
- [15] 薛冕, 刘翔, 石蕴玉, 等. 抑制光照不均匀影响的图像特征点提取算法[J]. *计算机工程与应用*, 2021, 57(4): 183-191.
XUE M, LIU X, SHI Y Y, et al. Image feature point extraction algorithm to suppress influence of uneven illumination[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2021, 57(4): 183-191 (in Chinese).
- [16] 李现国, 苗长云, 张艳, 等. 基于统计特征的钢丝绳芯输送带故障自动检测[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(7): 1233-1238.
LI X G, MIAO C Y, ZHANG Y, et al. Automatic fault detection for steel cord conveyor belt based on statistical features[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(7): 1233-1238 (in Chinese).
- [17] 廖泓真, 王亮, 孙宏伟, 等. 一种改进的 ORB 特征匹配算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2021, 47(10): 2149-2154.
LIAO H Z, WANG L, SUN H W, et al. An improved ORB feature matching algorithm[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2021, 47(10): 2149-2154 (in Chinese).
- [18] RUBLEE E, RABAU D V, KONOLIGE K, et al. ORB: An efficient alternative to SIFT or SURF[C]//2011 International Conference on Computer Vision. Barcelona, Spain: IEEE, 2011: 2564-2571.
- [19] BHAT A. T-norm-based classifier and FAST features for illumination invariant face recognition[J]. *International Journal of Biometrics*, 2016, 8(3/4): 301.
- [20] MOHAMMAD S, MORRIS T. Binary robust independent elementary feature features for texture segmentation[J]. *Advanced Science Letters*, 2017, 23(6): 5178-5182.
- [21] 李少波, 张伟, 孙采鹰, 等. 搭载 RGB-D 相机轮式机器人误匹配特征点剔除方法[J]. *小型微型计算机系统*, 2020, 41(11): 2359-2364.
LI S B, ZHANG W, SUN C Y, et al. Method of removing the mismatched feature points of wheeled robot with RGB-D camera [J]. *Journal of Chinese Computer Systems*, 2020, 41(11): 2359-2364 (in Chinese).
- [22] 郭冬. 钢丝绳芯输送带接头硫化工艺在煤矿复杂环境下的研究[J]. *煤炭与化工*, 2018, 41(5): 76-78, 81.
GUO D. Steel cord conveyor belt joint vulcanization process of exploration and application in coal mine complex environment[J]. *Coal and Chemical Industry*, 2018, 41(5): 76-78, 81 (in Chinese).

本文引文格式:

李现国, 郭宽宽, 苗长云. 基于图像匹配的钢丝绳芯输送带接头抽动自动检测[J]. *天津工业大学学报*, 2025, 44(2): 78-83.

LI X G, GUO K K, MIAO C Y. Automatic detection of joint twitching of steel wire rope core conveyor belt based on image matching[J]. *Journal of Tiangong University*, 2025, 44(2): 78-83 (in Chinese).