

基于图像内凹度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法

孙继平, 李小伟

(中国矿业大学(北京)人工智能学院, 北京 100083)

摘要: 尽早发现矿井火灾并处置, 可避免或减少人员伤亡和财产损失及次生事故的发生。井下没有日光、月光、星光及闪电等自然光源, 影响矿井火灾图像识别的主要是矿井光源。圆形度能够排除圆形光源的干扰, 但难以排除非圆形光源的干扰。矩形度能够排除矩形光源的干扰, 但难以排除非矩形光源的干扰。在工程实际中, 因摄像机的拍摄角度不同, 矿井光源图像会出现变形, 无法呈现理想的规则形状, 使用圆形度和矩形度算法难以排除矿井光源的干扰。揭示了火焰图像轮廓外接图面积明显大于其图像实际面积, 圆形灯、长方形灯和正方形灯等矿井实际光源图像轮廓外接图面积近似等于其光源图像实际面积等特点。提出基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法, 计算目标图像面积与图像轮廓外接图面积的比值(即图像内凹度), 根据火焰图像内凹度数值较小, 而矿井光源图像内凹度数值较大, 区分火焰与矿井光源。提出的内凹度方法不受摄像机距检测目标距离和图像大小、摄像机安装位置和摄像机拍摄检测目标的角度、矿井光源形状等影响, 适应性强, 识别准确率高。实验表明, 内凹度识别方法计算得到的矿井干扰光源减去火焰图像平均差值最大, 波动最小, 区分度最好, 受摄像机拍摄角度及距离影响最小, 抗干扰能力最强, 准确率为91.6%。矩形度识别方法计算得到的矿井干扰光源减去火焰图像平均差值较大, 波动较小, 区分度较好, 受摄像机拍摄角度及距离影响较小, 抗干扰能力一般, 准确率为72.5%。圆形度识别方法计算得到的矿井干扰光源减去火焰图像平均差值最小, 波动最大, 区分度最差, 受摄像机拍摄距离影响较小, 受摄像机拍摄角度影响大, 抗干扰能力最差, 准确率为12.0%。因此, 提出的内凹度识别方法, 优于矩形度和圆形度, 区分度最好, 受摄像机拍摄角度及距离影响最小, 抗干扰能力最强。

关键词: 矿井火灾; 图像内凹度; 图像轮廓; 外接图面积; 火灾监测; 图像识别

中图分类号: TD752.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-9993(2024)07-3253-12

Mine external fire recognition and anti-interference method based on the internal concavity of image

SUN Jiping, LI Xiaowei

(School of Artificial Intelligence, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Early detection and distinguish of mine fires can avoid or reduce casualties, property damage, and secondary accidents. There are no natural light sources such as sunlight, moonlight, starlight, and lightning underground, and the main factor affecting the recognition of mine fire images is the mine light source. Circularity can eliminate interference from cir-

收稿日期: 2023-12-12 修回日期: 2024-05-07 责任编辑: 郭晓炜 DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2023.1681

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52364017); 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0801800)

作者简介: 孙继平(1958—), 男, 山西翼城人, 教授, 博士生导师。E-mail: sjp@cumtb.edu.cn

通讯作者: 李小伟(1991—), 男, 河南商丘人, 博士研究生。E-mail: 844051159@qq.com

引用格式: 孙继平, 李小伟. 基于图像内凹度的矿井外因火灾识别及抗干扰方法[J]. 煤炭学报, 2024, 49(7): 3253-3264.

SUN Jiping, LI Xiaowei. Mine external fire recognition and anti-interference method based on the internal concavity of image[J]. Journal of China Coal Society, 2024, 49(7): 3253-3264.



移动阅读

cular light sources, but it is difficult to exclude interference from non-circular light sources. Rectangularity can eliminate interference from rectangular light sources, but it is difficult to exclude interference from non-rectangular light sources. In engineering practice, due to the different shooting angles of the camera, the image of the mine light source may deform and cannot present an ideal regular shape. It is difficult to eliminate the interference of the mine light source using circularity and rectangularity algorithms. It has been revealed that the area of the external connection graphic area of the flame image is significantly larger than the actual area of the image, and the external connection graphic area of the actual light source image of the mine, such as circular lamps, rectangular lamps, and square lamps, is approximately equal to the actual area of the light source image. In this study, a mine fire recognition and anti-interference method is proposed based on the internal concavity of image, the ratio of the target image area to the external connection graphic area of the image (i.e. internal concavity of image) is calculated, and the flames and mine light sources are distinguished based on the small concavity value in the flame image and the large concavity value in the mine light source image. The internal concavity method proposed in this paper is not affected by the distance from the camera to the detection target and the size of the image, the installation position and angle of the camera to capture the detection target, and the shape of the mine light source. It has strong adaptability and high recognition accuracy. The experiment shows that the internal concave recognition method calculates the maximum average difference between the mine interference light source and the flame image, with the smallest fluctuation and the best discrimination. It is also least affected by the camera's shooting angle and distance, and has the strongest anti-interference ability, with an accuracy of 91.6%. The rectangular recognition method calculates the average difference between the mine interference light source and the flame image, with small fluctuations and good discrimination. It is less affected by the camera's shooting angle and distance, and has average anti-interference ability, with an accuracy rate of 72.5%. The roundness recognition method calculates the minimum average difference between the mine interference light source and the flame image, with the highest fluctuation and the worst discrimination. It is less affected by the camera shooting distance and more affected by the camera shooting angle, and has the worst anti-interference ability, with an accuracy of 12.0%. Therefore, the internal concave recognition method proposed in this paper is superior to rectangular and circular degrees, with the best discrimination, minimal influence from camera shooting angle and distance, and the strongest anti-interference ability.

Key words: mine fire; internal concavity of image; image outline; external connection graphic area; fire monitoring; image recognition

矿井火灾是煤炭开采过程中的主要灾害之一,困扰着煤矿安全生产^[1-7]。矿井火灾包括矿井内因火灾和矿井外因火灾^[8-11]。矿井内因火灾主要发生在采空区,因煤炭等可燃物与空气接触,氧化发热达到燃点,进而自燃。矿井外因火灾因井下皮带与滚筒和托辊摩擦起热,电缆和电气设备超负荷、漏电及短路,电焊、气焊,违规爆破、瓦斯和煤尘爆炸等产生明火造成^[5,8-9]。

矿井外因火灾(以下简称矿井火灾)具有发现难、发展迅猛、灭火和救护困难等特点^[3]。矿井火灾经历了着火点温度升高,产生烟雾和有害气体,产生早期明火火焰,进而引燃更多的可燃物,火势变大,最后发展成熊熊大火^[9-14]。火焰是火灾早期特征之一。局部燃烧的火焰,如果及时扑灭,就不会酿成导致大量人员伤亡和财产损失的火灾。因此,尽早发现矿井火灾早期火焰,及时灭火,对避免或减少人员伤亡和财产损失具有重要意义。

矿井火灾监测方法主要有烟雾、温度、气体(CO₂、

CO、O₂)等传感器监测,光纤分布式测温监测,图像监测等方法^[15-21]。传感器监测矿井火灾属于点监测,单台传感器监测范围小,当传感器离火源较远时,受空气运移时间影响,响应时间长;多点布置传感器,成本高,维护工作量大。光纤分布式测温多用于井下输送带、电缆和电气设备等温度监测,但光缆易损坏,安装维护困难。

火灾图像监测方法属于面监测,具有监测范围广等优点,但受矿井光源和粉尘等影响。矿井火灾火焰监测方法,可以通过透雾和透尘方法,减少粉尘对火焰识别的影响。但矿井火灾烟雾监测方法,无法消除粉尘对烟雾识别的影响。因此,矿井火灾图像监测方法主要是火焰识别方法。目前已有成熟的透雾和透尘方法^[22-29],但缺少有效的排除矿井光源干扰的方法。

为排除井下矿井光源对火灾火焰识别的干扰,文献^[11]研究了火焰和矿井光源的紫外图像轮廓特征,提出了基于火灾紫外图像的圆形度、矩形度、尖角等

特征排除矿井光源干扰;文献[13]研究了火焰和矿井光源的近红外和可见光图像轮廓特征,提出了基于近红外图像和可见光图像多信息融合的矿井火灾识别方法,利用图像圆形度、矩形度、尖角等特征排除矿井光源干扰;文献[14]研究了火焰和矿井光源的可见光双目视觉轮廓特征,提出了基于火灾双目视觉图像圆形度、矩形度、尖角等特征排除矿井光源干扰;文献[30]提出利用火灾近红外图像圆形度、矩形度、尖角等特征排除矿井光源干扰。上述文献,选用圆形、矩形矿井光源的正面角度图像,均没有研究摄像机不同拍摄角度,造成矿井光源变形的影响。

文献[11,13-14,30]研究了基于圆形度、矩形度等特征排除矿井光源干扰的方法,可以排除理想圆形和矩形光源的干扰,但无法排除非理想圆形和矩形光源的干扰,误报率较高。在工程实际中,因摄像机的安装位置和拍摄角度不同,会导致矿井光源图像轮廓出现变形,无法呈现理想的圆形或矩形等规则形状。因此,圆形度和矩形度算法受摄像机安装位置、拍摄角度影响大,难以排除矿井光源的干扰。

疑似火灾图像经过图像处理,其轮廓边界上的尖角会变得较为平缓,轮廓边界曲线也将趋向于更加光滑。因此,在利用尖角特征进行火灾图像识别时,也难以排除光源干扰的影响。

因此,研究受摄像机拍摄角度和距离影响小、抗多种矿井光源干扰的矿井火灾图像监测方法,具有重要的理论意义和实用价值。

1 火焰和矿井光源图像轮廓特征

井下没有日光、月光、星光及闪电等自然光源,影响矿井火灾图像识别的主要是矿井光源^[9]。矿井光源包括巷道灯、矿灯、车灯、信号灯(含报警灯)和指示灯等^[9]。

矿井光源是人造光源,其轮廓形状规则,主要有圆形、长方形、正方形等。矿井火灾不受人控制,受环境因素影响大,火焰图像轮廓形状不固定、不规则。因此,可以根据火焰和矿井光源图像轮廓特征,区分火焰和矿井光源,减少矿井光源对火焰图像识别的干扰。

为研究矿井光源图像特征,课题组在国家能源集团国神公司三道沟煤矿和国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿,现场采集了矿井光源图像。

1.1 火焰图像轮廓特征

火焰是火灾的早期特征之一。在火灾早期明火火焰阶段,火焰图像轮廓受温度、风向、风速等影响呈不固定、不规则形态,如图1(a)所示。对火焰图像通过阈值分割进行二值化处理,求出火焰图像的轮廓,

如图1(b)所示,火焰图像轮廓具有内凹、不规则等特征。

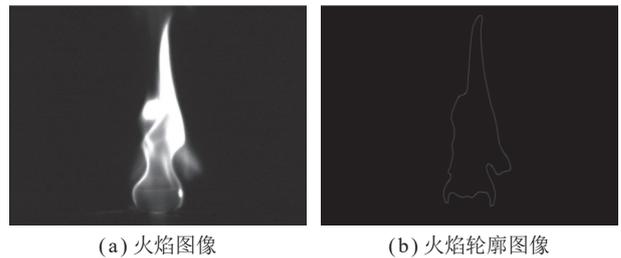


图1 火焰及轮廓图像特征

Fig.1 Flame and contour image features

1.2 矿井光源图像轮廓特征

矿井光源是人造光源,轮廓均已固定且呈规则形态,主要有圆形(图2(a))、长方形(图3(a))、正方形(图4(a))等形状。对图2(a)所示圆形光源图像通过阈值分割进行二值化处理,求出圆形光源图像轮廓,如图2(b)所示,圆形光源图像轮廓具有无内凹、边界相对光滑等特征。

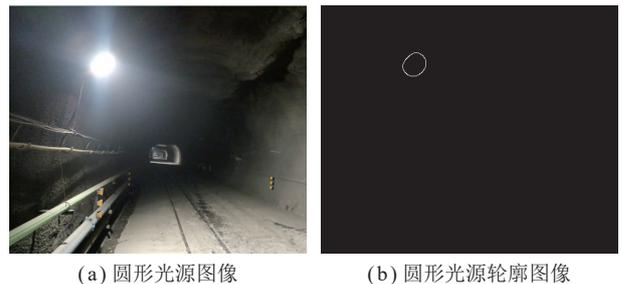


图2 圆形光源及轮廓图像特征

Fig.2 Circular light source and contour image features

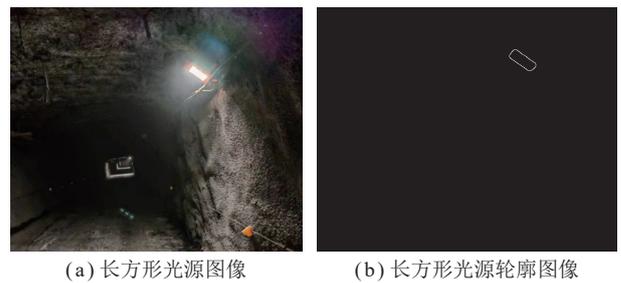
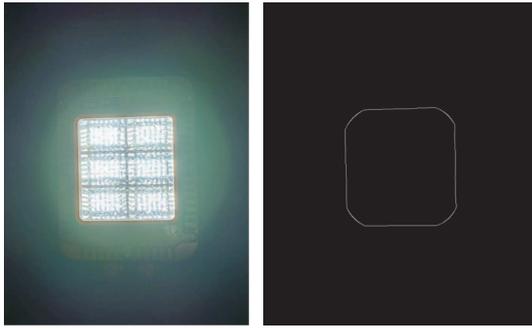


图3 长方形光源及轮廓图像特征

Fig.3 Rectangle light source and contour image features

对图3(a)所示长方形光源图像通过阈值分割进行二值化处理,求出长方形光源图像轮廓,如图3(b)所示,长方形光源图像轮廓具有无内凹、边界曲线光滑等特征。

对图4(a)所示正方形光源图像通过阈值分割进行二值化处理,求出正方形光源图像轮廓,如图4(b)所示,正方形光源图像轮廓具有无内凹、边界曲线光滑等特征。



(a) 正方形光源图像 (b) 正方形光源轮廓图像

图 4 正方形光源及轮廓图像特征

Fig.4 Square light source and contour image features

2 火焰和矿井光源图像内凹度计算

2.1 图像外接图及内凹度计算方法

根据上述火焰图像轮廓有内凹、不规则等特征,圆形、长方形和正方形光源图像轮廓无内凹、相对光滑等特征,本文提出用目标图像面积与图像轮廓外接凸多边形(以下简称外接图)面积的比值(以下简称图像内凹度),区分火焰与矿井光源。目标图像内凹度最大为 1,表示无内凹面积。目标图像内凹度数值越小,说明内凹面积越大。

目标图像轮廓外接图由图像轮廓上最外凸点^[31]依次直线连接得到,而最外凸点表示为当图像轮廓上任意两外凸点所在的直线仅与轮廓相交于这两外凸点时,则称这两外凸点为轮廓上的最外凸点。

在图像轮廓上取任意连续三坐标点 (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) ,若 (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_i, y_i) 共线, (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 共线;但 (x_{i-1}, y_{i-1}) 、 (x_i, y_i) 、 (x_{i+1}, y_{i+1}) 不同时共线,则称坐标点 (x_i, y_i) 为其轮廓上的拐点,其中 x 、 y 表示轮廓上坐标点的值。而拐点又分为外凸点或内凹点。则外凸点求解步骤如下所示。

(1) 根据式(1),求出图像轮廓上所有拐点坐标。

$$\begin{cases} k_{i-1} = \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} \\ k_{i+1} = \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $\{(x_{i-1}, y_{i-1}), (x_i, y_i), (x_{i+1}, y_{i+1})\}$ 为图像轮廓上任意相邻坐标点组; k_{i-1} 、 k_{i+1} 分别为两坐标点所在直线斜率,且当 $k_{i-1} \neq k_{i+1}$ 时,则坐标点 (x_i, y_i) 为轮廓上拐点坐标。

(2) 根据式(2)求出目标图像面积。

$$S_d = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + (x_2 y_3 - x_3 y_2) + \cdots + (x_j y_1 - x_1 y_j)] \quad (2)$$

式中, S_d 为目标图像面积; $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_j, y_j)\}$

为轮廓上逆时针依次排列的所有坐标点。

(3) 任取图像轮廓上一拐点坐标 (x_e, y_e) ,则将该坐标点左右两相邻拐点坐标 $(x_{e-1}, y_{e-1}), (x_{e+1}, y_{e+1})$ 直接直线连接,组成新图像轮廓,则根据式(3)求出新图像面积。

$$S_a = \frac{1}{2} [(x_1 y_2 - x_2 y_1) + \cdots + (x_{e-1} y_{e+1} - x_{e+1} y_{e-1}) + \cdots + (x_j y_1 - x_1 y_j)] \quad (3)$$

式中, S_a 为新图像面积; $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \cdots, (x_{e-1}, y_{e-1}), (x_{e+1}, y_{e+1}), \cdots, (x_j, y_j)\}$ 为新轮廓上逆时针依次排列的所有坐标点。

(4) 当判定 $S_a < S_d$ 时,则拐点 (x_e, y_e) 即为图像轮廓上的外凸点。

(5) 依据所求的图像轮廓上外凸点坐标求出所有最外凸点坐标。任取图像轮廓上两外凸点坐标 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) ,得到两外凸点坐标所在直线斜率 k_w 。则将任一外凸点坐标代入式(4),求得两外凸点所在的直线方程为

$$k_w = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} \quad (4)$$

由式(5)可知,若除已知的两外凸点 (x_a, y_a) 、 (x_b, y_b) 外,图像轮廓上其余点均不满足该直线方程式时,则判定外凸点 $(x_a, y_a), (x_b, y_b)$ 是图像轮廓上的最外凸点坐标。

$$y = \frac{y_b - y_a}{x_b - x_a} (x - x_a) + y_a \quad (5)$$

(6) 将求出的所有最外凸点坐标依次直线连接到包裹着图像轮廓的外接图。则目标图像轮廓外接图面积由式(6)计算得到。

$$S_t = \frac{1}{2} [(m_1 n_2 - m_2 n_1) + (m_2 n_3 - m_3 n_2) + \cdots + (m_p n_1 - m_1 n_p)] \quad (6)$$

式中, S_t 为目标图像轮廓外接图面积; $\{(m_1, n_1), (m_2, n_2), \cdots, (m_p, n_p)\}$ 为图像轮廓外接图上逆时针方向依次排列的所有坐标点。

(7) 根据目标图像面积与其图像轮廓外接图面积的比值,求出目标图像内凹度 N_a 。内凹度 N_a 由式(7)计算得到。

$$N_a = \frac{S_d}{S_t} \quad (7)$$

2.2 火焰图像轮廓外接图及内凹度计算

将图 1(b) 图像轮廓上最外凸点依次直线连接,得到火焰图像轮廓外接图,如图 5(a) 所示。不难看出,火焰图像轮廓外接图大于其实际轮廓,外接图边界内包括较大的非实际火焰图像区域。根据式(2)计算

图 1(b) 所示火焰图像面积 $S_d=28\ 396.5$ (为便于比较, 面积采用无量纲值, 以下同)。根据式 (6) 计算图 5(b) 所示火焰图像轮廓外接图面积 $S_t=42\ 765.5$ 。根据式 (7) 计算火焰图像内凹度 $N_a=0.664$ 。

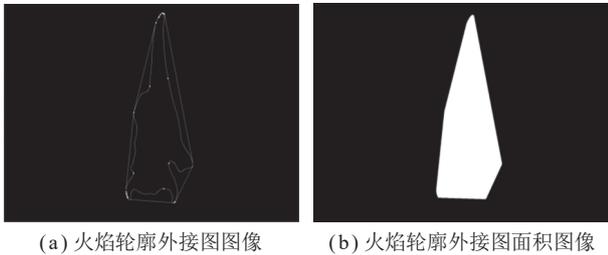


图 5 火焰轮廓外接图及面积图像

Fig.5 Flame contour externality and area image

以上分析表明, 火焰图像轮廓外接图面积明显大于火焰图像面积, 火焰图像轮廓外接图面积包含较大内凹图像面积。

2.3 矿井光源图像轮廓外接图及内凹度计算

将图 2(b) 图像轮廓上最外凸点依次直线连接, 得到圆形光源图像轮廓外接图, 如图 6(a) 所示。不难看出, 圆形光源图像轮廓外接图与其实际轮廓几乎重合, 理想情况下, 外接图内不包括非实际圆形光源图像区域。根据式 (2) 计算图 2(b) 所示圆形光源图像面积 $S_d=1\ 417.5$ 。根据式 (6) 计算图 6(b) 所示圆形光源图像轮廓外接图面积 $S_t=1\ 450.0$ 。根据式 (7) 计算圆形光源图像内凹度 $N_a=0.978$ 。

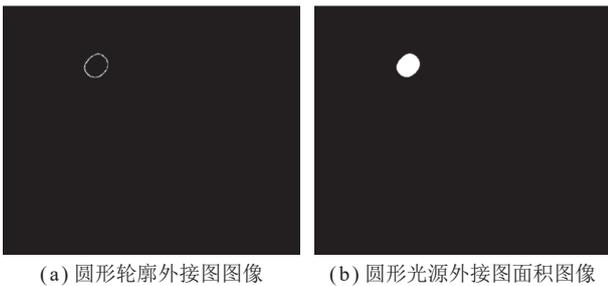


图 6 圆形光源轮廓外接图及面积图像

Fig.6 Circular light sources contour externality and area image

以上分析表明, 圆形光源图像面积近似等于图像轮廓外接图面积, 圆形光源图像轮廓外接图面积几乎没有内凹图像面积。

将图 3(b) 图像轮廓上最外凸点依次直线连接, 得到长方形光源图像轮廓外接图, 如图 7(a) 所示。不难看出, 长方形光源图像轮廓外接图与其实际轮廓几乎重合, 理想情况下, 外接图内不包括非长方形光源图像。根据式 (2) 计算图 3(b) 所示长方形光源图像面积 $S_d=1\ 365.4$ 。根据式 (6) 计算图 7(b) 所示长方形光源图像轮廓外接图面积 $S_t=1\ 390.0$ 。根据式 (7) 计算

长方形光源图像内凹度 $N_a=0.982$ 。这表明, 长方形光源图像面积近似等于图像轮廓外接图面积, 长方形光源图像轮廓外接图面积几乎没有内凹图像面积。

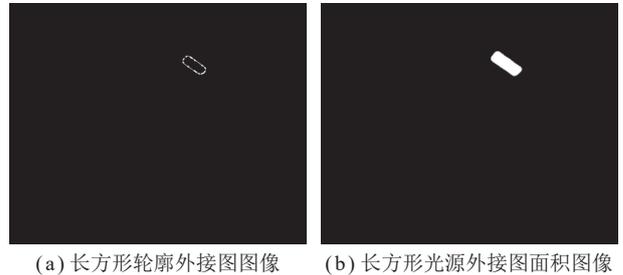


图 7 长方形光源轮廓外接图及面积图像

Fig.7 Rectangular light sources contour externality and area image

将图 4(b) 图像轮廓上最外凸点依次直线连接, 得到正方形光源图像轮廓外接图, 如图 8(a) 所示。不难看出, 正方形光源图像轮廓外接图与其实际轮廓几乎重合, 理想情况下, 外接图内不包括非正方形光源图像。根据式 (2) 计算图 4(b) 所示正方形光源图像面积 $S_d=77\ 444.5$ 。根据式 (6) 计算图 8(b) 所示正方形光源图像轮廓外接图面积 $S_t=78\ 492.5$ 。根据式 (7) 计算正方形光源图像内凹度 $N_a=0.987$ 。这表明, 正方形光源图像面积近似等于图像轮廓外接图面积, 正方形光源图像轮廓外接图面积几乎没有内凹图像面积。



图 8 正方形光源轮廓外接图及面积图像

Fig.8 Rectangular light sources contour externality and area image

上述研究表明, 火焰图像轮廓外接图大于其实际图像, 外接图内包括较大的非火焰图像, 火焰图像轮廓外接图面积明显大于火焰图像面积, 火焰图像轮廓外接图面积包含较大的内凹图像面积。圆形光源、长方形光源和正方形光源图像轮廓外接图与其实际轮廓几乎重合, 圆形光源、长方形光源和正方形光源图像轮廓外接图面积近似等于其对应光源图像面积, 外接图面积几乎没有内凹图像面积。理想情况下, 外接图内不包括非圆形光源、长方形光源和正方形光源图像。

3 基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法

为减小矿井光源对火焰图像识别的干扰,本文提出了基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法,计算目标图像面积与图像轮廓外接图面积的比值即图像内凹度,根据火焰图像内凹度数值较小,而矿井光源图像内凹度数值较大,区分火焰与矿井光源,如图9所示。

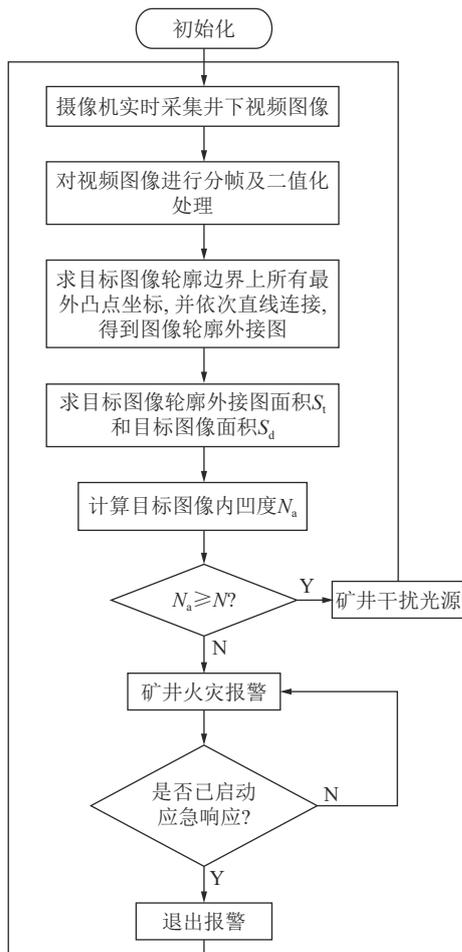


图9 基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法

Fig.9 Mine fire recognition and anti-interference method based on the internal concavity of image

基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法识别步骤如下:

(1) 采集图像并进行二值化处理。摄像机实时采集井下监控区域视频图像。对视频图像进行分帧预处理,对帧图像通过阈值分割进行二值化处理。

(2) 计算目标图像轮廓外接图。求图像中高亮区域轮廓上的所有最外凸点坐标,将最外凸点坐标点依次直线连接,得到图像轮廓外接图。

(3) 计算目标图像轮廓外接图面积及目标图像面

积。根据式(2)计算图像面积 S_a 。根据式(6)计算图像轮廓外接图面积 S_t 。

(4) 计算目标图像内凹度与判别报警。根据式(7)计算目标图像内凹度 N_a ;若目标图像内凹度 $N_a < N$,则发出矿井火灾报警。若目标图像内凹度 $N_a \geq N$,则判定为矿井干扰光源,返回继续监测。由于矿井光源实际轮廓尺寸非理想等因素,矿井光源图像轮廓外接图面积与矿井光源图像实际面积存在较小的偏差。因此,设定一个阈值 $N(N$ 的取值范围: $0 < N < 1$),减少矿井光源非理想等因素的影响,即当矿井光源图像内凹度 $N_a \geq N$ 时,则判定为矿井光源干扰。

(5) 启动应急响应。矿井火灾报警后,若没有启动应急响应,则继续进行矿井火灾报警。若已启动应急响应,则退出当前报警状态,返回继续监测。

(6) 计算矿井光源图像内凹度最小值 N_1 ,火焰图像内凹度最大值 N_2 ,报警阈值 N 应按式(8)选取。

$$N_2 < N < N_1 \quad (8)$$

为提高抗干扰能力,报警阈值 N 应按式(9)选取。

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (9)$$

本方法采用图像内凹度,区分火焰和矿井光源。因此,不受摄像机距检测目标距离、图像大小等影响。本方法根据火焰图像有内凹形状的特点,识别火焰;根据圆形和矩形等矿井光源轮廓无内凹形状,识别矿井光源。因此,本方法可排除各种矿井光源对火焰识别的干扰。无内凹形状的图像,经旋转和缩放后,仍为无内凹形状的图像。因此,摄像机安装位置、摄像机拍摄检测目标的角度,不影响本方法对矿井光源的识别。

风会改变火焰的形状,但不会改变火焰图像内凹的特性。风不会改变光源的形状,更不会使光源图像具有内凹的特性。因此,风不会影响本方法对火焰和光源的识别。

总之,本方法不受摄像机距检测目标距离和图像大小、摄像机安装位置和摄像机拍摄检测目标的角度、矿井光源形状、风等影响,适应性强,识别准确率高。

4 试验研究与结果对比分析

4.1 火焰图像内凹度试验

图10为明火火焰图像,火焰与像机镜头平行,距离约5m拍摄。图11为计算机处理后的火焰图像面积及外接图面积图像。火焰图像面积 $S_a=44\ 955.5$ 。火焰图像外接图面积 $S_t=74\ 770.5$ 。火焰图像内凹度 $N_a=0.601$ 。

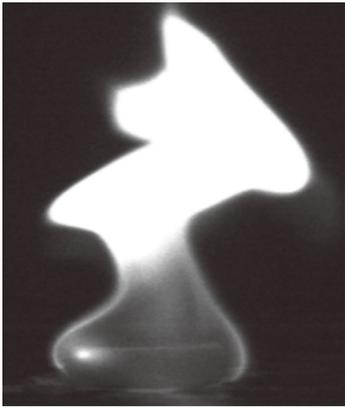


图 10 明火火焰图像

Fig.10 Open flame image

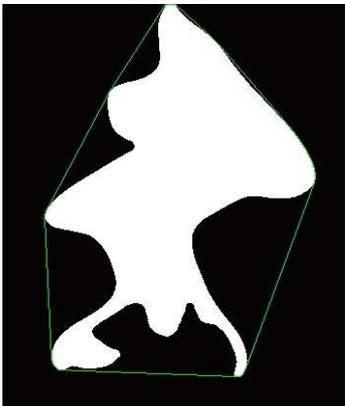


图 11 火焰图像面积及外接图面积

Fig.11 Flame image area and external connection graphic area

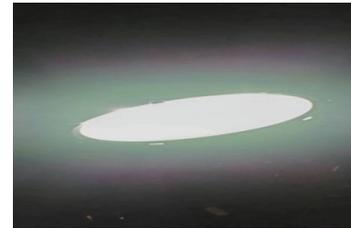
4.2 矿井光源图像内凹度试验

为了验证本方法抗矿井光源干扰的有效性,课题组在国家能源集团国神公司三道沟煤矿和国家能源集团宁夏煤业有限责任公司羊场湾煤矿,现场采集了煤矿井下不同拍摄角度和拍摄距离的真实矿井光源图像,包括圆形灯、长方形灯、正方形灯。因拍摄角度和拍摄距离的不同,光源图像的形状、大小均发生了改变。

为保证试验数据样本的全面性,分别在综采工作面(以下简称“工作面”)、硐室、巷道采集了不同形状、不同类型的多组矿井光源图像。其中在工作面和硐室中采集了 2 种类型的长方形照明灯图像,在巷道中采集了正方形照明灯和圆形照明灯图像。其中巷道圆形照明灯 1 与像机镜头约成 45°夹角,距离约 2 m,如图 12(a) 所示;硐室长方形照明灯与像机镜头约成 60°夹角,距离约 3 m,如图 12(b) 所示。巷道正方形照明灯与像机镜头约成 60°夹角,距离约 10 m,如图 12(c) 所示;工作面长方形照明灯与像机镜头约成 75°夹角,距离约 5 m,如图 12(d) 所示;巷道圆形照明灯 2 与像机镜头约成 75°夹角,距离约 5 m,如图 12(e)

所示。

使用本文方法编制的软件,识别上述圆形灯、长方形灯、正方形灯等矿井下真实光源图像,计算机预处理和二值化光源图像,自动识别光源图像轮廓外接图,计算出每种光源图像面积、外接图面积、图像内凹度。



(a) 巷道圆形照明灯1图像



(b) 硐室长方形照明灯图像



(c) 巷道正方形照明灯图像



(d) 工作面长方形灯图像



(e) 巷道圆形照明灯2图像

图 12 矿井光源图像

Fig.12 Mine light source image

图 13(a) 为计算机处理后的巷道圆形灯 1 图像面积及外接图面积。圆形灯 1 图像面积 $S_d=11\ 209.0$ 。圆形灯 1 图像外接图面积 $S_t=11\ 745.0$ 。圆形灯 1 图像内凹度 $N_a=0.954$ 。

图 13(b) 为计算机处理后的硐室长方形照明灯图像面积及外接图面积。长方形照明灯图像面积 $S_d=6\ 721.0$ 。长方形照明灯图像外接图面积 $S_t=7\ 291.0$ 。长方形照明灯图像内凹度 $N_a=0.922$ 。

图 13(c) 为计算机处理后的巷道正方形照明灯图像面积及外接图面积图像。正方形照明灯图像面积 $S_d=2\ 484.0$ 。正方形照明灯图像外接图面积 $S_t=2\ 689.0$ 。正方形照明灯图像内凹度 $N_a=0.924$ 。

图 13(d) 为计算机处理后的采面长方形灯图像面积及外接图面积图像。长方形灯图像面积 $S_d=2\ 625.0$ 。

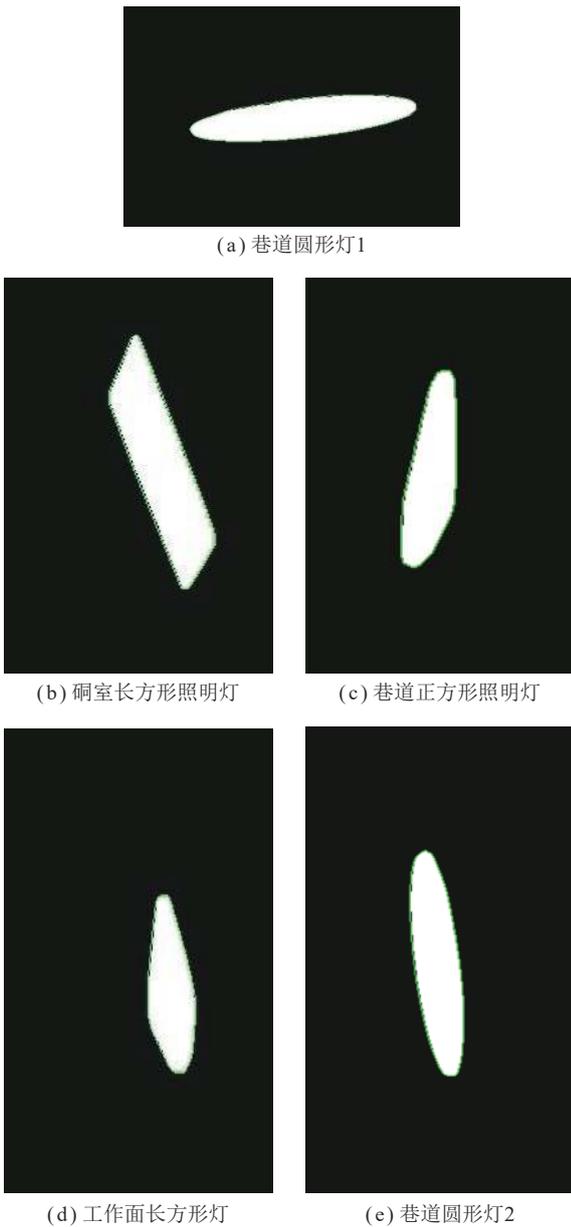


图 13 图像面积及外接图面积

Fig.13 Area and external connection graphic area

长方形灯图像外接图面积 $S_t=2\ 829.0$ 。长方形灯图像内凹度 $N_a=0.928$ 。

图 13(e) 为计算机处理后的巷道圆形灯 2 图像面积及外接图面积。圆形灯 2 图像实际面积 $S_d=6\ 140.5$ 。圆形灯 2 图像外接图面积 $S_t=6\ 548.0$ 。圆形灯 2 图像内凹度 $N_a=0.938$ 。

本文提出的内凹度方法在不同拍摄角度和拍摄距离下识别矿井光源图像内凹度值 (为便于比较, 面积采用无量纲值), 见表 1。如图 12 所示, 光源图像轮廓随着拍摄角度不同发生明显改变, 但本方法仍然可以很好的识别矿井光源图像, 其内凹度值最大为 0.954, 最小值为 0.922。本方法受拍摄角度和拍摄距离影响小, 识别准确率高。

表 1 矿井光源图像内凹度识别结果

Table 1 Result of internal concave recognition in mine light source images

图像类别	拍摄角度/ (°)	拍摄距离/ m	图像实际 面积 S_d	图像外接 图面积 S_t	图像内 凹度 N_a
巷道圆形灯1	45	2	11 209.0	11 745.0	0.954
硐室长方形灯	60	3	6 721.0	7 291.0	0.922
巷道正方形灯	60	10	2 484.0	2 689.0	0.924
工作面长方形灯	75	5	2 625.0	2 829.0	0.928
巷道圆形灯2	75	5	6 140.5	6 548.0	0.938

4.3 报警阈值选取与识别试验结果分析

4.3.1 报警阈值选取

如图 14 所示, 菱形点折线部分是根据第 2.3 节和 4.2 节多组矿井光源图像数据样本得到的内凹度, 圆形点折线部分是对第 1.1 节和 4.1 节 2 组火焰图像数据样本进行扩充, 多角度旋转和缩放后, 得到多组火焰图像数据样本, 并进一步求得图像的内凹度。

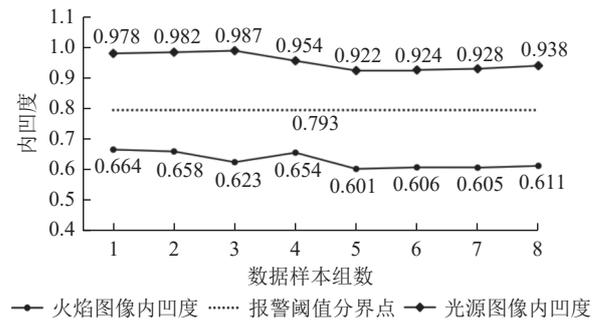


图 14 火灾报警阈值选取

Fig.14 Selection of fire alarm threshold

由图 14 得到的火焰图像内凹度最大值 $N_2=0.664$ 。矿井光源图像内凹度最小值 $N_1=0.922$ 。因此, 本文将识别火灾火焰图像的报警阈值 N 设为 0.793(虚线)。

4.3.2 识别试验结果分析

第 4.1 节及 4.2 节数据样本试验结果见表 2(为便于比较, 面积采用无量纲值)。计算机识别火焰图像内凹度 $N_a=0.601$, 满足火灾报警条件, 被正确识别为火灾图像。巷道圆形灯 1、硐室长方形灯、巷道正方形灯、采面长方形灯、巷道圆形灯 2 等矿井下火灾干扰光源图像内凹度分别为 0.954、0.922、0.924、0.928、0.938, 均不满足火灾报警条件, 被正确识别为矿井火灾干扰源图像。

4.4 本方法与现有识别方法比较

4.4.1 识别效果对比分析

圆形度^[20]和矩形体^[20]是目前矿井火灾主要识别方法。

表 2 火焰及其干扰光源图像内凹度识别结果分析

Table 2 Analysis of internal concave recognition results in flame and its interfering light source images

图像类别	拍摄角度/(°)	图像实际面积 S_d	图像外接图面积 S_l	图像内凹度 N_a	内凹度 N_a 与报警阈值 N 的关系	识别结果
火焰	平行	44 955.5	74 770.5	0.601	$N_a < N$	火焰
巷道圆形灯1	45	11 209.0	11 745.0	0.954	$N_a > N$	干扰光源
硐室长方形灯	60	6 721.0	7 291.0	0.922	$N_a > N$	干扰光源
巷道正方形灯	60	2 484.0	2 689.0	0.924	$N_a > N$	干扰光源
采面长方形灯	75	2 625.0	2 829.0	0.928	$N_a > N$	干扰光源
巷道圆形灯2	75	6 140.5	6 548.0	0.938	$N_a > N$	干扰光源

$$J = \frac{S}{S_j} \quad (11)$$

圆形度反映的是任一物体外形轮廓接近于圆形的程度, 计算公式如式 (10) 所示^[20]。规则圆形物体的圆形度 $C=1$ 。火焰的形状不规则, 与规则圆形形状差别较大, 因此, 火焰图像圆形度较小。通过图像轮廓的圆形度, 可以判定待检测区域是否为圆形发光物体, 但不能判定火焰。因为非圆形发光物体图像轮廓的圆形度也很小。

$$C = \frac{4\pi S}{L^2} \quad (10)$$

式中, C 为圆形度; S 为检测区域面积; L 为检测区域轮廓周长。

矩形度反映的是任一物体外形轮廓接近于矩形的程度, 计算公式如式 (11) 所示^[20]。规则矩形物体的矩形度 $J=1$ 。火焰的形状不规则, 与规则矩形形状差别较大, 因此, 火焰图像矩形度值较小。通过图像轮廓的矩形度, 可以判定待检测区域是否为矩形发光物体, 但不能判定火焰。因为非矩形发光物体图像轮廓的矩形度也很小。

式中, S_j 为检测区域最小外接矩形面积。

火焰及矿井光源图像的圆形度和矩形度与该方法识别结果对比见表 3。

火焰识别方法计算得到的矿灯等非火焰数值减火焰数值的差值越大, 特别是光源与火焰差值平均值越大, 越容易区分矿灯与火焰, 抗干扰能力越强。光源与火焰差值的波动幅度越小, 方法的适应性越强。3 种算法识别光源与火焰差值最小值、最大值、平均值及波动幅度, 见表 4。

从圆形度、矩形度与内凹度 3 种算法的对比结果可知, 本方法最优, 矩形度算法识别效果居中。因此, 在识别速度方面, 本方法仅选择与矩形度算法进行比较。从算法原理来讲, 矩形度计算了目标图像最小外接矩形面积及其实际面积的比值; 本方法计算了目标图像外接图面积及其实际面积的比值。目标图像的最小外接矩形面积大于其外接图面积, 因此求解最小外接矩形面积会耗费较长的计算时间。因此, 本方法

表 3 火焰及矿井光源图像圆形度、矩形度与内凹度对比分析

Table 3 Comparative analysis of circularity, rectangles, and internal concavity in flame and mine light source images

图像类别	拍摄角度/(°)	圆形度/%	光源与火焰圆形度差值/%	矩形度/%	光源与火焰矩形度差值/%	内凹度/%	光源与火焰内凹度差值/%
火焰	平行	23.5		45.6		60.1	
巷道圆形灯1	45	35.6	12.1	77.9	32.3	95.4	35.3
硐室长方形灯	60	25.4	1.9	77.4	31.8	92.2	32.1
巷道正方形灯	60	43.3	19.8	70.0	24.4	92.4	32.3
采面长方形灯	75	53.3	29.8	68.8	23.2	92.8	32.7
巷道圆形灯2	75	32.9	9.4	77.4	31.8	93.8	33.7

表 4 圆形度、矩形度与内凹度识别效果对比分析

Table 4 Comparative analysis of circularity, rectangles, and internal concavity

算法类别	光源与火焰最小差值/%	光源与火焰最大差值/%	光源与火焰差值平均值/%	光源与火焰差值波动幅度/%	识别效果
内凹度	32.1	35.3	33.2	3.2	最好
矩形度	23.2	32.3	28.7	9.1	居中
圆形度	1.9	29.8	14.6	27.9	最差

的识别速度优于矩形度。

4.4.2 识别准确率、精确率及召回率对比分析

将火焰图像作为正类样本,矿井光源图像作为负类样本。由式(9)及表3数据样本可知,圆形度识别报警阈值为0.245,矩形度识别报警阈值为0.572,内凹度识别报警阈值为0.762。

试验测试样本142组,其中火焰图像130组,矿井光源图像12组。识别分类结果见表5。本文提出的内凹度算法的识别准确率达到91.6%,比矩形度高19.1%,比圆形度高79.6%;精确率为99.2%,比矩形度高2.3%,比圆形度高37.3%;召回率为91.5%,比矩形度高19.2%,比圆形度高81.5%。综合以上分析,本文提出的内凹度算法是比对算法中最优的。

表5 圆形度、矩形度与内凹度的识别准确率、精确率及召回率对比

Table 5 Comparison of recognition accuracy, precision, and recall for circularity, rectangles, and internal concavity

算法类别	准确率/%	精确率/%	召回率/%
内凹度	91.6	99.2	91.5
矩形度	72.5	96.9	72.3
圆形度	12.0	61.9	10.0

因此,本文提出的内凹度识别方法,优于矩形度和圆形度,区分度最好,受摄像机拍摄角度及距离影响最小,抗干扰能力最强。

线状火焰也具有内凹特点。因此,本方法还可用于线状火焰识别。将本方法用于双目相机监测矿井火灾,除可识别火灾火焰,还可判定火源位置与火源大小,具有良好的应用前景。

5 结 论

(1) 矿井火灾图像监测方法属于面监测,具有监测范围广等优点,但受矿井光源和粉尘等影响。矿井火灾火焰监测方法,可以通过透雾和透尘方法,减少粉尘对火焰识别的影响。但矿井火灾烟雾监测方法,无法消除粉尘对烟雾识别的影响。因此,矿井火灾图像监测方法主要是火焰识别方法。目前已有成熟的透雾和透尘方法,但缺少有效的排除矿井光源干扰的方法。

(2) 圆形度能够排除圆形光源的干扰,但难以排除非圆形光源的干扰。矩形度能够排除矩形光源的干扰,但难以排除非矩形光源的干扰。在工程实际中,因摄像机的拍摄角度不同,矿井光源图像轮廓会出现变形,无法呈现理想的规则形状,使用圆形度和矩形度算法难以排除矿井光源的干扰。因此,需研究受摄

像机拍摄角度和距离影响小、抗多种矿井光源干扰的矿井火灾图像监测方法。

(3) 矿井火灾火焰不受人控制,其形状不固定,不规则。火焰图像轮廓具有内凹、不规则等特征。火焰图像轮廓外接图包含较大的非实际火焰图像,火焰图像轮廓外接图面积明显大于其实际面积。矿井光源是人造光源,其形状固定且规则。矿井光源图像轮廓具有无内凹、相对光滑等特征。矿井光源图像轮廓外接图面积近似等于其实际面积。

(4) 提出基于图像内凹度的矿井火灾识别及抗干扰方法,计算目标图像面积与图像轮廓外接图面积的比值(即图像内凹度),根据火焰图像内凹度数值较小,而矿井光源图像内凹度数值较大,区分火焰与矿井光源。本文提出的内凹度方法采用图像面积与图像轮廓外接图面积的比值,区分火焰和矿井光源。因此,不受摄像机距检测目标距离、图像大小等影响。本方法根据火焰图像有内凹形状的特点,识别火焰;根据圆形和矩形等矿井光源轮廓无内凹形状,识别矿井光源。因此,本方法可排除各种矿井光源对火焰识别的干扰。无内凹形状的图像,经旋转和缩放后,仍为无内凹形状的图像。因此,摄像机安装位置、摄像机拍摄检测目标的角度,不影响本方法对矿井光源的识别。

(5) 火焰识别方法计算得到的矿灯等非火焰数值减火焰数值的差值越大,越容易区分光源与火焰,抗干扰能力强。内凹度识别计算得到光源减去火焰图像平均差值最大,波动最小,区分度最好。矩形度识别计算得到光源减去火焰图像平均差值较大,波动较小,区分度较好。圆形度识别计算得到光源减去火焰图像平均差值最小,波动最大,区分度最差。因此,本文提出的内凹度识别方法,优于矩形度和圆形度,区分度最好,受摄像机拍摄角度及距离影响最小,抗干扰能力最强。

(6) 风会改变火焰的形状,但不会改变火焰图像内凹的特性。风不会改变光源的形状,更不会使光源图像具有内凹的特性。因此,风不会影响本方法对火焰和光源的识别。但风会干扰矩形度和圆形度方法对火焰和光源的识别。线状火焰也具有内凹特点。因此,本方法还可用于线状火焰识别。将本方法用于双目相机监测矿井火灾,除可识别火灾火焰,还可判定火源位置与火源大小。

参考文献(References):

- [1] 孙继平,钱晓红. 煤矿重特大事故应急救援技术及装备[J]. 煤炭科学技术, 2017, 45(1): 112-116, 153.

- SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Emergency rescue technology and equipment of mine extraordinary accidents[J]. *Coal Science and Technology*, 2017, 45(1): 112–116,153.
- [2] 康红普, 李全生, 张玉军, 等. 我国煤矿绿色开采与生态修复技术发展现状及展望[J]. *绿色矿山*, 2023, 1(1): 1–24.
- KANG Hongpu, LI Quansheng, ZHANG Yujun, et al. Development status and prospect of greenmining and ecological restoration technology of coal mines in China[J]. *Journal of Green Mine*, 2023, 1(1): 1–24.
- [3] 孙继平, 孙雁宇, 范伟强. 基于可见光和红外图像的矿井外因火灾识别方法[J]. *工矿自动化*, 2019, 45(5): 1–5, 21.
- SUN Jiping, SUN Yanyu, FAN Weiqiang. Mine exogenous fire identification method based on visible light and infrared image[J]. *Industry and Mine Automation*, 2019, 45(5): 1–5,21.
- [4] 骆铁楠. 基于时间平滑多特征量火灾快速识别算法[J]. *煤炭技术*, 2021, 40(5): 132–134.
- LUO Tienan. Fast recognition algorithm research of fire flame based on multifeatures longitude regression with temporal smoothing[J]. *Coal Technology*, 2021, 40(5): 132–134.
- [5] 郑学召, 回硕, 文虎, 等. 矿井火灾孕灾机制及防控技术研究进展[J]. *煤矿安全*, 2017, 48(10): 148–151, 155.
- ZHENG Xuezhao, HUI Shuo, WEN Hu, et al. Research progress on preventing and controlling technology and disaster-forming mechanism of mine fire[J]. *Safety in Coal Mines*, 2017, 48(10): 148–151,155.
- [6] 孙继平, 钱晓红. 2004—2015年全国煤矿事故分析[J]. *工矿自动化*, 2016, 42(11): 1–5.
- SUN Jiping, QIAN Xiaohong. Analysis of coal mine accidents in China during 2004-2015[J]. *Industry and Mine Automation*, 2016, 42(11): 1–5.
- [7] 孙继平. 煤矿事故分析与煤矿大数据和物联网[J]. *工矿自动化*, 2015, 41(3): 1–5.
- SUN Jiping. Accident analysis and big data and Internet of Things in coal mine[J]. *Industry and Mine Automation*, 2015, 41(3): 1–5.
- [8] 范伟强. 矿井外因火灾双光谱图像监测方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2024: 1-177.
- FAN Weiqiang. Research on dual-spectrum image monitoring method for mine external fire[D]. Beijing: China University of Mining & Technology-Beijing, 2024: 1-177.
- [9] 孙继平, 李小伟, 徐旭, 等. 矿井电火花及热动力灾害紫外图像感知方法研究[J]. *工矿自动化*, 2022, 48(4): 1–4, 95.
- SUN Jiping, LI Xiaowei, XU Xu, et al. Research on ultraviolet image perception method of mine electric spark and thermal power disaster[J]. *Journal of Mine Automation*, 2022, 48(4): 1–4,95.
- [10] 郭军, 刘荫, 金永飞, 等. 矿井胶带火灾巷道环境多参数时空演化规律[J]. *西安科技大学学报*, 2019, 39(1): 21–27.
- GUO Jun, LIU Yin, JIN Yongfei, et al. Spatiotemporal evolution law of multiple parameters of roadway environment for rubber-belt fire in mine[J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2019, 39(1): 21–27.
- [11] 徐旭. 矿井外因火灾紫外图像识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2022: 1–76.
- XU Xu. Research on ultraviolet image recognition method based on external mine fire[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2022: 1–76.
- [12] 孙雁宇. 基于图像的矿井火灾识别方法研究[D]. 北京: 中国矿业大学, 2019: 2–60.
- SUN Yanyu. Research on image-based mine fire identification method[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2019: 2–60.
- [13] 崔佳伟. 基于近红外和可见光图像的矿井外因火灾识别方法研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2021: 1-55.
- CUI Jiawei. Recognition of external mine fire based on visible light image and near-infrared image[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021: 1-55.
- [14] 李月. 基于双目视觉的矿井外因火灾监测与定位方法研究[D]. 中国矿业大学(北京), 2021: 10–75.
- LI Yue. Research on mine fire monitoring and location method based on binocular vision[D]. Beijing: China University of Mining and Technology-Beijing, 2021: 10–75.
- [15] 熊昊, 李伟. 基于SVM的视频火焰检测算法[J]. *传感器与微系统*, 2020, 39(1): 143–145, 149.
- XIONG Hao, LI Wei. Video flame detection algorithm based on SVM[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2020, 39(1): 143–145,149.
- [16] 徐宏宇, 续婷. 一种基于颜色和纹理的优化SVM火灾识别方法[J]. *沈阳航空航天大学学报*, 2021, 38(4): 54–60.
- XU Hongyu, XU Ting. A color/texture-based improved SVM for fire recognition[J]. *Journal of Shenyang Aerospace University*, 2021, 38(4): 54–60.
- [17] 王思嘉, 裴海龙. 基于火焰图像红外动态特征的早期火灾识别算法[J]. *现代电子技术*, 2010, 33(8): 104–105, 110.
- WANG Sijia, PEI Hailong. Algorithm for early fire recognition based on infrared dynamic characteristics of flame images[J]. *Modern Electronics Technique*, 2010, 33(8): 104–105,110.
- [18] 王亚, 张宝峰. 基于显著性检测的红外森林火灾监测系统[J]. *消防科学与技术*, 2018, 37(12): 1700–1703.
- WANG Ya, ZHANG Baofeng. Infrared forest fire monitoring system based on saliency detection[J]. *Fire Science and Technology*, 2018, 37(12): 1700–1703.
- [19] 刘培江, 董辉, 宋子刚, 等. 基于视频图像处理技术的火焰识别算法[J]. *热能动力工程*, 2021, 36(3): 64–71.
- LIU Peijiang, DONG Hui, SONG Zigang, et al. Flame recognition algorithm based on video and image processing technology[J]. *Journal of Engineering for Thermal Energy and Power*, 2021, 36(3): 64–71.
- [20] 孙继平, 崔佳伟. 矿井外因火灾感知方法[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(4): 1–5, 38.
- SUN Jiping, CUI Jiawei. Mine external fire sensing method[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(4): 1–5,38.
- [21] 孙继平, 李月. 基于双目视觉的矿井外因火灾感知与定位方法[J]. *工矿自动化*, 2021, 47(6): 12–16, 78.
- SUN Jiping, LI Yue. Binocular vision-based perception and positioning method of mine external fire[J]. *Industry and Mine Automation*, 2021, 47(6): 12–16,78.
- [22] 王伟峰, 张宝宝, 王志强, 等. 基于YOLOv5的矿井火灾视频图像

- 智能识别方法[J]. 工矿自动化, 2021, 47(9): 53-57.
WANG Weifeng, ZHANG Baobao, WANG Zhiqiang, et al. Intelligent identification method of mine fire video images based on YOLOv5[J]. Industry and Mine Automation, 2021, 47(9): 53-57.
- [23] 孟修建, 乔欢欢, 王雅, 等. 改进 AOD-Net 的道路交通图像去雾算法[J]. 计算机系统应用, 2024, 33(1): 206-212.
MENG Xiujian, QIAO Huanhuan, WANG Ya, et al. Improved AOD-net algorithm for dehazing road traffic images[J]. Computer Systems and Applications, 2024, 33(1): 206-212.
- [24] 杨燕, 陈飞. 基于残差上下文注意和跨层融合的去雾网络[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-14 [2023-12-11]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0194>.
YANG Yan, CHEN Fei. Dehazing networks based on residual context attention and cross-layer fusion[J/OL]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics: 1-14 [2023-12-11]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2023.0194>.
- [25] 杨秀璋, 武帅, 李娜, 等. 复杂环境下自适应去雾的 YOLOv3 汽车识别算法[J]. 计算机科学, 2023, 50(S2): 220-227.
YANG Xiuzhang, WU Shuai, LI Na, et al. YOLOv3 car recognition algorithm with adaptive defogging in complex environment[J]. Computer Science, 2023, 50(S2): 220-227.
- [26] 田昊, 王小玉. 融合暗通道先验与粒子群算法的去雾改进算法[J]. 北京邮电大学学报, 2024, 47(2): 118-122, 129.
TIAN Hao, WANG Xiaoyu. Image defogging algorithm based on dark channel prior and particle swarm optimization[J]. Journal of Beijing University of Posts and Telecommunications, 2024, 47(2): 118-122, 129.
- [27] 陆世豪, 祝云, 廖华, 等. 基于图像去雾技术的变电站图像清晰化方法[J]. 电气技术, 2023, 24(10): 51-56.
LU Shihao, ZHU Yun, LIAO Hua, et al. Substation image clearness method based on image defogging technology[J]. Electrical Engineering, 2023, 24(10): 51-56.
- [28] 杨森, 冯全, 杨梅, 等. 彩色叶片图像去尘算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2016, 28(8): 1224-1231.
YANG Sen, FENG Quan, YANG Mei, et al. An algorithm of dust removal for color leaves image[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2016, 28(8): 1224-1231.
- [29] 郝博南. 基于去尘估计和多重曝光融合的煤矿井下图像增强方法[J]. 工矿自动化, 2023, 49(11): 100-106.
HAO Bonan. Coal mine underground image enhancement method based on dust removal estimation and multiple exposure fusion[J]. Journal of Mine Automation, 2023, 49(11): 100-106.
- [30] 李光宇, 李守军, 缪燕子. 基于机器视觉和灰色模型的矿井外因火灾辨识与定位方法[J]. 矿业安全与环保, 2023, 50(2): 82-87.
LI Guangyu, LI Shoujun, MIAO Yanzi. Identification and positioning method of mine external fire based on machine vision and grey model[J]. Mining Safety & Environmental Protection, 2023, 50(2): 82-87.
- [31] 崔钰萍, 李子涵, 郑国磊. 广义多边形凸包弹性线递支模拟算法[J]. 北京航空航天大学学报, 2024, 50(1): 216-223.
CUI Yuping, LI Zihan, ZHENG Guolei. Computing convex hull of a generic polygon with simulation of progressive support for an elastic line[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2024, 50(1): 216-223.