

doi:10.16055/j.issn.1672-058X.2022.0006.016

基于霍夫变换的烧结矿粒度识别研究

张学锋,陈天宇,储岳中,汤亚玲

(安徽工业大学 计算机科学与技术学院,安徽 马鞍山 243000)

摘 要:针对烧结矿生产时无法直接得到粒度大小和分布,人工检测的准确性和即时性不高等问题,提出了一种基于图像增强和霍夫变换的烧结矿粒度识别方法。该方法首先使用形态学开操作、图像像素点分割、拉普拉斯图像锐化算子等方法进行图像增强,然后应用高斯滤波和图像边缘检测算法,最后用霍夫圆检测算法进行烧结矿粒度检测,实时处理获取的图像,并检测出烧结矿的粒度大小和分布。该方法可以快速检测出图像中的烧结矿,其中图像像素点分割方法是根据烧结矿和背景的像素值设置分段函数进行分割,大幅度减少图像中的噪声,提升了烧结矿和背景的对比度以及亮度,并且检测的准确性和即时性高,克服了人工检测的弊端,准确率可达到 98% 以上。通过实验表明:该方法对提高烧结矿的生产效率、改善资源的利用、降低人员成本具有积极作用。

关键词:烧结矿;粒度检测;图像增强;边缘检测;霍夫圆检测

中图分类号:TP391.41

文献标志码:A

文章编号:1672-058X(2022)06-0118-07

0 引 言

在烧结矿的生产中,原料的粒度结构对烧结矿的生产有重要的影响^[1],通过检测烧结矿的粒度大小可以调控原料的粒度结构。烧结矿的粒度及其分布是烧结矿质量检测中的重要指标,其主要问题是检测图像中烧结矿的粒度大小。烧结矿检测的核心是检测图像中的类圆物体,目前的方法准确性和及时性不高,容易受到人的主观意识影响,现场工作人员没法及时了解烧结矿的实时生成情况,这些是急需解决的问题。

目前,对于烧结矿的粒度检测也做了一些实验,如:郜学^[2]对中国烧结产业的发展现状和趋势进行研究,证实了节能减排的重要性。高梓航^[3]提出的基于线性变换的 RGB 图像色彩矫正方法,通过图像线性变换可以减少图像中的随机噪声。张建立^[4]

提出了使用形态学方法处理矿石图像,该方法可以很好地对图像进行分割。王浩^[6]对多种图像增强方法做出了自己的综述,图像增强技术可以增加图像中的有用信息^[5],分析了图像增强的优缺点。赵博文^[7]对图像滤波方法进行了综述,证明了高斯滤波可以很好地减少图像中的高斯噪声。郝大鹏^[8]提出了基于 Prewitt 算子的边缘检测算法,该方法可以很好地检测出图像中的物体轮廓。秦开怀^[9]提出了一种基于 Hough 变换的圆形快速检测方法,可以很好地检测出类圆物体的大小和分布等信息。

本文在以上研究的基础上,提出了一种基于霍夫变换的烧结矿粒度识别方法。首先通过摄像系统获得对应位置上的烧结矿图像,然后对图像进行各种图像学处理,从而得到所需要的实用信息。本方法首先使用形态学开操作消除部分噪声,然后根据图像的像素值检测结果,使用分段函数对图像进行像素点分割处理,分割出图像中的烧结矿和背景,增

收稿日期:2021-04-19;修回日期:2021-05-28.

基金项目:安徽省教育厅重大课题基金(KJ2017ZD05);结合实物机器人的化工企业救援仿真系统(TZJQR002-2021).

作者简介:张学锋(1978—),男,河北石家庄人,教授,博士,从事计算机仿真研究.

通讯作者:陈天宇(1997—),男,安徽合肥人,硕士生,从事计算机视觉研究. Email:2422394380@qq.com.

强烧结矿的轮廓信息以及图像锐化处理进行图像增强,再然后使用高斯滤波算法减少图像中的噪声。使用 Prewitt 算法进行边缘检测,最后使用霍夫变换检测出图像中的烧结矿大小和分布。本方法可以快速检测出图像中烧结矿的粒度大小和分布等信息,准确性高,减少因主观意识的影响,及时反馈烧结矿的生成情况,对烧结矿的稳定生产和提产降耗有着重要的作用。

1 模型设计

1.1 烧结矿检测模型

烧结矿粒度检测系统包括烧结矿传送皮带,摄像系统,保护装置,光源和现场控制箱等设备组成。传送皮带会将烧结矿传送到指定区域,摄像系统拍下烧结矿的图像,保护装置保证摄像系统的长久运行,光源提供足够的光照,保证图像的拍摄质量,然后将图像传入现场控制箱,使用图像增强和霍夫变换等算法检测出烧结矿的粒度大小和烧结矿当前的生成情况。

多次试验结果表明,采用图像像素点分割和图像锐化等方法进行图像增强,可以很好地减少图像中的噪声,提升了整张图像的亮度,以及烧结矿和背景的对比度,凸显了图像中的有用信息,让后期的边缘检测和霍夫变换可以更准确地检测出图像中的烧结矿。现场人员可以很好地掌握烧结矿的生成现状,及时对原料的投放量进行更改,避免了原料的浪费,提高烧结矿的产量和企业的经济效应。

通过图 1 的装置可以完成对烧结矿图像的采集和处理,摄像系统用来采集烧结矿图像,保护装置和光源等用来保证该装置的持久运行,控制箱可以实时检测当前采集的烧结矿图像,从而得到当前生成的烧结矿基本信息,让工业生产更加智能化和透明化。

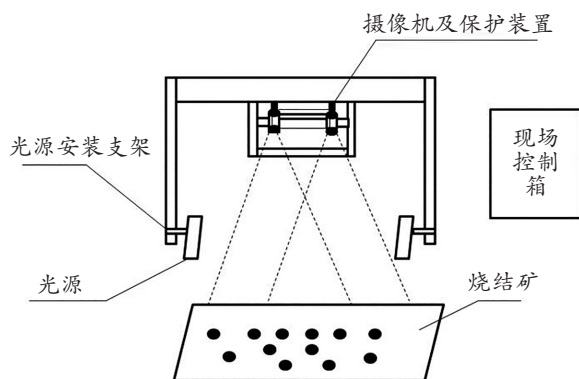


图 1 烧结矿检测装置

Fig. 1 Sinter detection device

1.2 系统控制

本系统使用计算机图像处理技术处理图像,使用 QCustomPlot 绘制出烧结矿的折线图反映当前烧结矿生成的情况,并将这些信息显示在客户界面和存储到数据库中。

启动程序后,实时图像界面会实时显示当前获取的图像,并对该图像进行检测,获取烧结矿的粒度大小和当前的粒度分布等情况,统计出不同粒度区间内的烧结矿大小,即大于 20 mm,20 mm 至 30 mm,大于 30 mm 的烧结矿所占的比重,将这些结果显示在用户界面和存储入数据库中,并用 QCustomPlot 绘制并显示出折线图,增加鼠标响应函数,帮助现场人员更好地观察某时刻的烧结矿生成情况,同时支持查询某一时间段内的生产状况,方便现场工作人员的观察,减少主观失误,现场工作人员可以根据生成情况决定原料的增减。软件系统的工作流程图如图 2 所示。

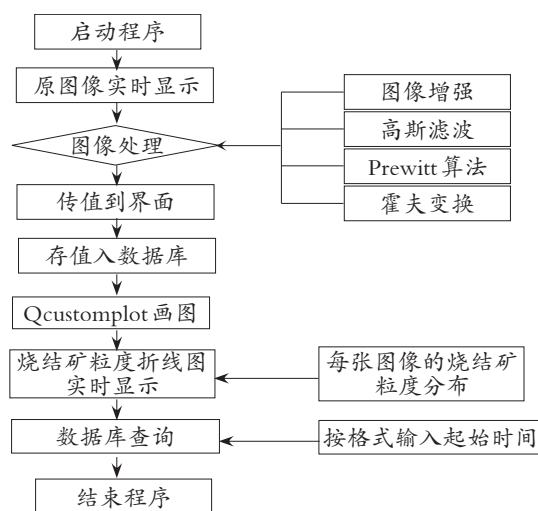


图 2 软件系统流程图

Fig. 2 Flow chart of software system

通过以上的实验步骤可以检测出烧结矿的粒度大小和分布等重要信息,让现场工作人员可以更好地实现人机交互,从而提高当前烧结矿的质量,减少原料和人力物力的消耗,提高企业的经济效应和核心竞争力。

2 图像预处理

本文所使用的图像预处理方法主要包括图像增强、高斯滤波、Prewitt 边缘检测等算法。图像增强是为了加强图像中的实用信息,提升图像整体的对比度。高斯滤波可以消除图像中的大量噪声,让后

期的边缘检测和霍夫变换不会过多地受到噪声的影响。图像边缘检测是为了更好地检测出图像中烧结矿的轮廓信息。

2.1 图像增强

本方法在增强图像之前先对图像的尺寸进行更改,防止图像因尺寸过大而影响展示的效果,然后开始图像增强,该图像增强方法先进行图像形态学的开操作,再检测出图像中烧结矿的灰度值,通过烧结矿的灰度值设计分段函数来进行图像的像素点分割,最后进行图像拉普拉斯锐化处理。可以增强图像中的烧结矿的轮廓特征,提升烧结矿和背景的对比度和亮度,消除图像中的随机噪声,让后期的检测更为准确。

首先根据烧结矿图像的大小,调整图像的整体大小,再对此图像使用形态学开操作,该方法主要是先对图像进行腐蚀处理然后进行膨胀操作,开操作可以消除烧结矿图像中的小白点,在细小点处分离烧结矿,并在平滑较大物体边界的同时不明显地改变其面积。其数学公式如下:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (1)$$

式(1)就是形态学开操作,先进行腐蚀后进行膨胀操作,从而实现图像中大量有用信息的增强,减少烧结矿图像中小气孔的影响,让后期的检测效果更好。

然后使用技术手段,检测图像整体的灰度值,得出烧结矿的灰度值大小在 60 以内,于是设置分段函数,60 为临界点,对图像采用像素点分割算法,突出图像中烧结矿的特征,大幅度增强了图像的亮度。像素点分割的函数下:

$$\begin{cases} g(x,y) = 0 & f(x,y) \leq 60 \\ g(x,y) = af(x,y) & f(x,y) > 60, a > 2 \end{cases} \quad (2)$$

其中, $g(x,y)$ 为结果图像, $f(x,y)$ 为原图像, a 表示原图像被放大的倍数,通过该分段函数可以实现图像中烧结矿和背景的分割,凸显了烧结矿的轮廓特征,大幅度提升图像的亮度,减少图像中的噪声,增强了图像的有用信息,避免了图像叠加中全局提升图像的亮度,造成图像中有用信息的缺失。避免了图像线性操作中当 a 的值过大时,整个图像颜色就会变得单一,烧结矿和背景完全同化,让后期的检测受到影响。

最后使用拉普拉斯算子完成图像锐化,拉普拉斯算子是简化的多向同性微分算子,拥有旋转不变的特性^[10]。图像的拉普拉斯算子是多向同性的二阶导数,如下:

$$\nabla^2 f(x,y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \quad (3)$$

为了更适合用于烧结矿图像处理,得到图像锐化如下:

$$g(x,y) = f(x,y) + c[\nabla^2 f(x,y)] \quad (4)$$

其中, $g(x,y)$ 是结果图像, $f(x,y)$ 是起始图像,系数 c 表示细节权重。该函数是图像锐化函数对应的公式。根据选用的模板 c 的取值为 1,当 c 的值为 1 表示掩膜中心系数为正,当 c 的值为 -1 表示掩膜中心系数为负,因为当模板的中心系数为正数时才是图像锐化模板,所以 c 的取值是 1。本文使用的拉普拉斯锐化算子模板是:

$$\begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

图像锐化的作用是增强图像灰度差异,使模糊图像更加清晰地显现,本方法采用拉普拉斯图像锐化算子,先生成灰度骤变的图像,再将该图像和原图进行叠加处理。该锐化方法可以同时展现图像锐化效果和保留原图背景信息,凸显图像中的细节,增加了图像中烧结矿的轮廓和边缘特征,更有利于进行之后的检测。

通过图 3 和图 4 的对比发现,经过图像增强后图像中的噪声大幅度减小,图像亮度 and 对比度大量提升。



图 3 原图

Fig. 3 Original diagram

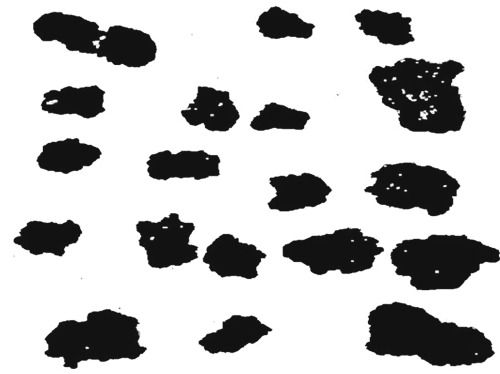


图 4 图像增强后的图像

Fig. 4 The diagram after image enhancement

2.2 图像边缘检测

本文使用 Prewitt 算子实现图像的边缘检测, Prewitt 算子是依据图像中像素点各个相邻方向的灰度差异进行处理,可以在边缘处达到相当精确的效果,同时还对噪声具有模糊的作用。

对图像进行边缘检测前需要进行高斯滤波,烧结矿图像中大多数噪声均属于高斯噪声,因此使用高斯滤波方法可以很好地为烧结矿图像降噪。本文使用高斯滤波方法,对图像进行降噪处理。

一维高斯分布函数,如下所示:

$$G(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

二维高斯分布函数,如下所示:

$$G(x,y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

使用 OpenCV 中的 GaussianBlur 函数可以对烧结矿图像进行高斯滤波,先将图像转换为灰度图,然后进行高斯滤波处理,设定合适的阈值,其中 size 的取值为(9,9),高斯滤波在横向和竖向的滤波系数都为 2,通过对比多个值,发现 size 为(9,9)和滤波系数为 2 时效果更好,可以很好地减少服从正态分布的图像噪声,消除烧结矿图像中的高斯噪声,从而削弱了噪声对后期检测的干扰,让检测的结果更为准确。

然后对图像进行边缘检测,边缘检测可以检测出图像中的边缘信息^[11],Prewitt 算子是利用水平和垂直两个方向的模板与目标图像进行领域卷积来完成对边缘的检测。相比于其他算子 Prewitt 算子对噪声的抑制效果更好,因此更适合用于烧结矿图像的检测。Prewitt 算子模板如图 5 所示。

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1

P_x

1	1	1
0	0	0
-1	-1	-1

P_y

图 5 Prewitt 算子

Fig. 5 Prewitt operator

目标图像与 P_x 卷积后可以反映图像的垂直边缘,与 P_y 卷积后可以反映图像的水平边缘。最重要的是,这两个卷积是可分离的:

X 方向的卷积,如下所示:

$$P_x = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Y 方向的卷积,如下所示:

$$P_y = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

从分离的结果来看, P_x 算子是先对目标图像进行垂直方向的均值平滑处理,然后完成水平方向的处理。 P_y 算子是先对目标图像进行水平方向的均值模糊处理,然后在完成垂直方向的处理。这就是 Prewitt 算子能够抑制噪声的主要原因。

通过边缘检测可以检测出图像中烧结矿的边缘信息,检测效果如图 6 所示。

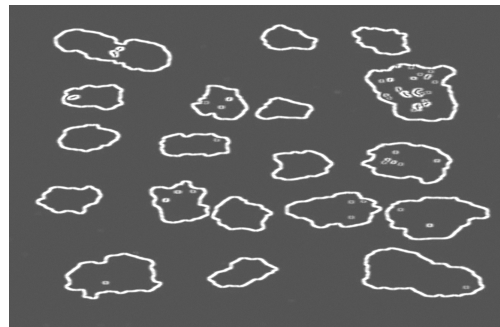


图 6 Prewitt 边缘检测

Fig. 6 Prewitt edge detection

Prewitt 算子可以很好地检测出烧结矿的轮廓信息,而且没有断点,检测的结果比较准确。

3 Hough 变换

3.1 Hough 圆检测具体步骤

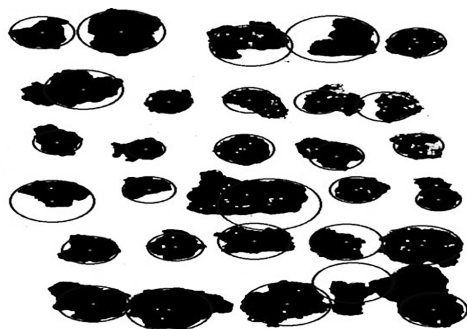
本方法使用的圆检测方法是 OpenCV 中的 HoughCircles 函数,HoughCircles 函数有很多好处,它对噪声不怎么敏感,并且可以在同一张图像中检测出多个圆,可以很好地使用在烧结矿的粒度检测领域,HoughCircles 函数检测类圆物体的步骤是:先检测出类圆物体的中心,即对预处理后的图像再进行边缘检测,计算出图像的梯度,从而可以确定烧结矿的中心。然后检测出烧结矿的半径,计算某一个烧结矿的中心到边缘的距离,找出这些相等的距离,就是该烧结矿的半径^[12]。对每一个烧结矿完成上述步骤,就会得到图像中所有烧结矿的半径。

在 OpenCV 的 HoughCircles 函数中使用的是

HOUGH_GRADIENT 方法,然后根据实际情况设定好其他参数,首先把 dp 值设置为 1,根据图像中的烧结矿稠密程度,确定两个烧结矿之间的最短距离也就是保留距离,再设定合适的阈值,阈值需要多次调参来确定,参数越大,检测到的烧结矿越少,参数越小,检测到的烧结矿越多,从而得到最合适的阈值,最后设定最大半径和最小半径,通过此方法便可以检测出烧结矿的粒度大小。

然后根据检测出的轮廓信息,绘制出烧结矿的中心和大概轮廓,让检测的结果更加直观地显示出来,并且统计出图像中的烧结矿的个数、大小分布、平均粒度、最大粒度、最小粒度等信息,以及粒度小于 20 mm,20 mm 至 30 mm 和大于 30 mm 的烧结矿所占比重。让整体的效果更好地展示给客户,有利于后期的工业生产。

将基于图像增强的 Prewitt 算法和 Roberts 算法、LOG 算法、无边缘检测算法的效果图进行比较。检测结果如图 7 所示。



(a) 改进的 Prewitt 算法



(b) 无边缘检测



(c) LOG 算法



(d) Roberts 算法

图 7 各种算法效果比较

Fig. 7 Comparison of the effects of various algorithms

如图 7 可知在对图像进行增强处理后再进行 Prewitt 算法边缘检测算法后效果更好。然后使用 HoughCircles 函数检测,可以更好地检测出图像中的烧结矿,然后提取图像中的有用信息,更好地应用于工业生产。图 7 中用外接圆来展示烧结矿的轮廓,该圆圈可以大体上表示出该烧结矿的轮廓,且误差不是很大,在烧结矿的粒度检测领域起到了抛砖引玉的作用,可以很好地应用于烧结矿工业生产中。

3.2 实验结果

本文的方法如下:首先根据图像的大小,调节图像大小,然后进行图像形态学开操作,图像像素点分割和图像锐化等方法进行图像增强,再然后使用高斯滤波和图像边缘检测,检测图像的边缘信息,最后使用 HoughCircles 函数检测出图像中的烧结矿粒度大小。

表 1 是调整烧结矿的密集程度和个数检测的结果,本方法检测的烧结矿粒度大小比较准确,因为烧结矿不规则,所以存在误差。经过对比发现,本方法检测后的效果更好,图像的对比度更高,并且可以检测到很多有用的信息,满足工业生产的需要。

表 1 烧结矿粒度检测结果表

Table 1 Test results of sinters particle size test

编号	真实 /mm	本文方法 /mm	无边缘检测 /mm	LOG /min	Roberts /mm
1	34.20	32.20	32.10	30.47	32.10
2	34.20	32.57	26.60	26.63	28.50
3	34.20	30.77	24.96	27.49	27.25
4	29.80	28.00	27.95	27.75	27.78
5	28.28	28.36	25.80	27.05	28.31
6	29.39	28.89	27.73	28.31	28.20
7	29.39	29.72	27.23	30.18	28.65
8	27.84	26.63	26.27	29.12	29.33
9	27.84	28.19	29.52	31.10	30.58
10	25.23	25.53	24.05	26.25	23.05

通过 QCustomPlot 组件可以画出烧结矿的粒度分布,图 8 展示一张图像中的烧结矿生成趋势,即每个烧结矿的粒度大小情况。其中灰色线表示烧结矿粒度在 20 mm 至 30 mm 所占比例,黑色线表示粒度小于 20 mm 所占比例,白色线表示粒度大于 30 mm 所占比例。

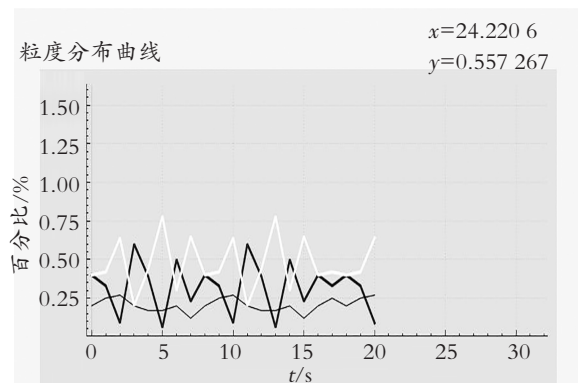


图 8 烧结矿分布图

Fig. 8 Distribution of sinters

图 8 可以很好地帮助现场人员了解烧结矿的生成情况,同时使用了鼠标响应函数,用户可以很好地得到鼠标光标所在点的数据,然后根据烧结矿的粒度大小来判断原料的增减,最终可以生产出更多符合要求的烧结矿。

4 结束语

提出了一种高效和稳定的烧结矿粒度检测方法。采用计算机视觉技术,利用图像获取装置实时采集烧结矿的图像,然后使用图像增强和霍夫变换等方法对图像进行实时检测,可以在不影响生产的前提下准确地实时反馈烧结矿的粒度和分布等信息。本方法主要使用了形态学开操作、图像像素点分割、图像锐化、高斯滤波和 Prewitt 算子进行图像预处理,使用霍夫变换检测出烧结矿的大小和分布等信息。实验结果证明:使用图像像素点分割方法,可以根据图像中的烧结矿灰度值设置分段函数,对烧结矿和背景进行分割,相对于常规的方法,可以更好地减少图像中的噪声,对烧结矿的边缘检测更准确,准确率可达到 98%。该方法对烧结矿透明化和智能化的生产具有重要的意义,有利于降低耗能和高效生产,减少资源的浪费,从而提高了企业的经济效益。

参考文献 (References):

- [1] 刘桐,张巧玉,盛建华,等. 燃料粒度结构变化对烧结生产的影响[J]. 烧结球团, 2020, 45(3): 17—21.
LIU Tong, ZHANG Qiao-yu, SHENG Jian-hua, et al. Influence of fuel particle size structure change on sintering production[J]. Sintering Pellet, 2020, 45(3): 17—21.
- [2] 邵学. 中国烧结行业的发展现状和趋势分析[J]. 钢铁, 2008(1): 85—88.
Gao Xue. Analysis of the development and trend of sintering industry in China[J]. Steel, 2008(1): 85—88.
- [3] 高梓航,刘晓欣. 基于线性变换的 RGB 图像色彩矫正算法[J]. 信息技术与信息化, 2019(8): 23—26.
GAO Zi-hang, LIU Xiao-xin. RGB image color correction algorithm based on linear transformation[J]. Information Technology and Informatization, 2019(8): 23—26.
- [4] 张建立,叶平坤,孙深深. 形态学图像处理下的矿石粒度的检测[J]. 机械设计与制造, 2020(3): 68—71.
ZHANG Jian-li, YE Ping-kun, SUN Shen-shen. Detection of ore particle size based on morphological image processing [J]. Mechanical Design and Manufacturing, 2020 (3): 68—71.
- [5] DAI H, GU X, HE L, et al. An adaptive color image enhancement algorithm based on local luminance discontinuity[C]// 2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing, Yantai, China, 2010: 626—630.
- [6] 王浩,张叶,沈宏海,等. 图像增强算法综述[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 438—448.
WANG HAO, ZHANG Ye, SHEN Hong-hai, et al. Overview of image enhancement algorithms[J]. Optics of China, 2017, 10(4): 438—448.
- [7] 赵博文,张力夫,潘在峰,等. 基于 OpenCV 的图像滤波方法比较[J]. 信息与电脑(理论版), 2020, 32(15): 78—80.
ZHAO Bo-wen, ZHANG Li-fu, PAN Zai-feng, et al. Comparison of image filtering methods based on OpenCV [J]. Information and Computer (Theoretical Edition), 2020, 32(15): 78—80.
- [8] 郝大鹏,丁琦. 基于 Prewitt 算子的量子边缘检测算法[J]. 西安航空学院学报, 2019, 37(3): 71—74.
HAO Da-peng, DING Qi. Quantum edge detection algorithm based on Prewitt operator[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2019, 37(3): 71—74.

- [9] 秦开怀,王海颖,郑辑涛.一种基于 Hough 变换的圆和矩形的快速检测方法[J].中国图象图形学报,2010,15(1):109—115.
QIN Kai-huai, WANG Hai-ying, ZHENG Ji-tao. A fast detection method of circle and rectangle based on Hough transform[J]. Chinese Journal of image and graphics, 2010, 15(1): 109—115.
- [10] 齐立磊,肖飞.基于位图图像锐化处理算法的设计与实现[J].计算机与数字工程,2013,41(9):1505—1507.
QI Li-lei, XIAO Fei. Design and implementation of image sharpening algorithm based on bitmap [J]. Computer and Digital Engineering, 2013, 41(9): 1505—1507.
- [11] CHI N, CHHABRA A. A hybrid approach for color based image edge detection[C]//2014 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics(ICACCI), Delhi, India, 2014: 2443—2448.
- [12] YE H, SHANG G, WANG L, et al. A new method based on hough transform for quick line and circle detection [C]// 2015 8th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI), Shenyang, China, 2015: 52—56.

Study on Particle Size Identification of Sinter Based on Hough Transform

ZHANG Xue-feng, CHEN Tian-yu, CHU Yue-zhong, TANG Ya-ling

(School of Computer Science and Technology, Anhui University of Technology, Anhui Maanshan 243000, China)

Abstract: In view of the fact that the size and distribution of sinter in production cannot be obtained directly, and the accuracy and timeliness of manual detection are not high, a sinter particle size identification method based on image enhancement and Hough transform is proposed. Firstly, morphological open operation, image pixel segmentation and Laplacian image sharpening operator are used for image enhancement. Then, Gaussian filtering and image edge detection algorithm are applied. Finally, Hoff circle detection algorithm is used for sinter particle size detection. The acquired images are processed in real time, and the sinter particle size and distribution are detected. This method can quickly detect the sinter in the image, and the image pixel segmentation method is based on the segmentation function of sinter and background pixel values, which greatly reduces the noise in the image and improves the contrast and brightness of sinter and background, and has high accuracy and timeliness of detection. This method overcomes the shortcoming of manual detection with an accuracy of up to 98%. The experiment shows that this method has positive effect on improving sinter production efficiency, improving resource utilization rate and reducing personnel cost.

Key words: sinter; particle size detection; image enhancement; edge detection; Hough circle detection

责任编辑:罗姗姗

引用本文/Cite this paper:

张学锋,陈天宇,储岳中,等.基于霍夫变换的烧结矿粒度识别研究[J].重庆工商大学学报(自然科学版),2022,39(6):118—124.

ZHANG Xue-feng, CHEN Tian-yu, CHU Yue-zhong, et al. Study on particle size identification of sinter based on Hough transform [J]. Journal of Chongqing Technology and Business University (Natural Science Edition), 2022, 39(6): 118—124.