

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2019.06.013

非均匀光照金刚石切割线颗粒提取方法

刘晓敏, 茅 健

(上海工程技术大学 机械与汽车工程学院, 上海 201620)

摘 要:针对常用的金刚石切割线人工检测抽检误检率高,检测精度低,而且由于实际环境中成像条件的限制,图像的背景光照不均匀,金刚石颗粒粘连在一起,给金刚石颗粒提取带来困难的现状。课题组提出了基于机器视觉的非均匀光照金刚石切割线颗粒提取方法,利用同态滤波去除噪声与光照不均匀度,最大间方差法对采集的图像进行二值化处理,引入形态学与分水岭分割融合的算法对粘连颗粒进行分割,根据八连通域标记方法统计出颗粒数。课题组对6种不同样本进行对比试验,结果表明课题组所提出的方法准确度较高,提高了计算速度。

关 键 词:金刚石切割线;同态滤波;最大类间方差法;分水岭分割算法;八连通域标记

中图分类号:TP391.41 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2019)06-0064-07

Non-Uniform Illumination Diamond Cutting Line Particle Extraction Method

LIU Xiaomin, MAO Jian

(School of Mechanical and Automotive Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: The commonly used diamond cutting line has a high false detection rate and low detection accuracy. Due to the limitation of imaging conditions in the actual environment, the background illumination of the image is uneven and the particles are stuck together, which brings difficulties to extract diamond particles. In this paper, a non-uniform illumination diamond cutting line particle extraction method based on machine vision was proposed. The homomorphic filtering was used to remove noise and illumination unevenness. The OTSU method was used to binarize the acquired image, and the morphological and watershed segmentation fusion were introduced. The algorithm divided the adhesion particles and counted the number of particles according to the eight-connected domain labeling method. The comparison experiments on six different samples show that the proposed method has higher accuracy and faster calculation speed.

Keywords: diamond cutting line; homomorphic filtering; OTSU method; watershed algorithm; eight-connected region labeling

金刚石切割线是一种重要的高精度切割的基础耗材,它是通过在金属基材线上附着金刚石颗粒后得到的。金刚石切割线目前广泛应用于工业领域中,其表面缺陷(如光线、金刚石颗粒团聚和分布不均等)将直接影响到切割效果。金刚石切割线长度长(一卷达几千米),上面附着的颗粒小(粒径几微米到几十微米),因此,其检测代价和难度都很高。目前以人工抽检为主的方式不仅成本高、效率低且稳定性容易受主观因素影响。机器视觉技术的发展为实现金刚石切割线缺陷的自动检测提供了可选途径。

金刚石切割线检测的主要部分是颗粒检测。近年来国内外学者对金属颗粒检测做了大量研究。张文晔^[1]提出了一种基于轮廓边缘粘连颗粒分割方法,并基于特征向量提取与类型识别分割粘连颗粒,实验显示有良好的分割效果;王阳阳^[2]提出了一种基于游程码表搜索的连通区域标记算法,该算法可以在搜索图像中连通区域的同时计算各连通区域的面积并完成连通区域的分类,提高了图像处理的速度;简丽娟^[3]采用 LabVIEW 编程语言,实现了金刚石晶体的面积、周长等尺寸参数的测量;郭树青等^[4]针对提取的颗粒边缘非闭合性问题,提出了基于

收稿日期:2019-06-09;修回日期:2019-08-16

第一作者简介:刘晓敏(1996),女,山东德州人,硕士研究生,主要研究方向为视觉检测。E-mail:276501482@qq.com

Hough 变换的轮廓边缘定位方法。

由于图像形状、大小等参数的不同,无法使用通用的算法来实现不同种类颗粒的分割;金刚石切割线的检测图片背景与缺陷目标灰度值区分不明显,需要突出图像中的缺陷特征,削弱图像的背景特征;颗粒的重叠、粘连情况的存在,使得对颗粒的统计、检测更加困难。因此,课题组基于机器视觉对非均匀光照金刚石切割线颗粒进行提取研究。针对缺陷目标在整个图像中所占的像素少、信噪比低和背景区域分布不均匀的特点,用同态滤波去除光照不均匀的特征。针对颗粒粘连在一起的情况,课题组在分水岭分割算法的基础上进行改进。分水岭分割算法(流域分割)是一种基于数字形态学的区域分割算法^{[5]30},通过寻找“汇水盆地”和“分水岭界限”,对图像进行分割^{[6]12}。课题组用形态学与分水岭分割融合的算法对粘连颗粒进行分割,抑制分水岭算法的过分割现象,有效和准确的分割颗粒。计数过程需要标记物体相互连接处的那些边缘点,课题组提出的方法的计数过程在像素的连通域标记的基础上进行改进的,提高了计算速度。最后,通过仿真实验验证了该方法的可行性。

1 金刚石切割线颗粒提取方法

图 1 所示是采集到的局部原始图像,可以看出,表面的金刚石颗粒和基材的明亮程度有所不同,在颗粒提取时,容易将反光区域当作缺陷区域分割出来,无法判断制品的质量。

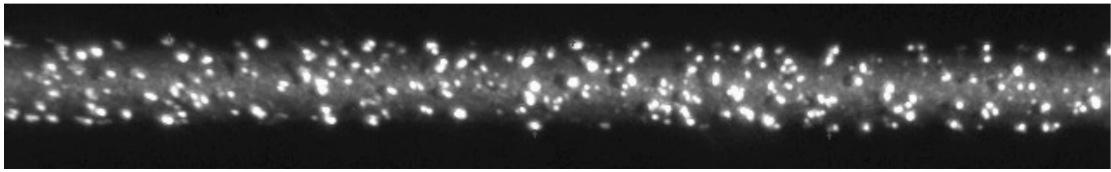


图 1 金刚石切割线原图像

Figure 1 Original diamond cutting line image

由于颗粒十分细小,边缘区域对比度不明显,直接阈值无法分割。分割之前,需要先对图像预处理补偿均匀光照;颗粒图像与背景有一定对比度,需进行二值化处理;金刚石颗粒之间存在粘连,为了使后续准确测量金刚石切割线颗粒的密度,需要对金刚石颗粒进行分割处理;最后进行颗粒计数。

1.1 同态滤波

同态滤波是通过对图像的灰度范围进行调整,使原来光照不均匀的图像的灰度变得均匀,增加暗区图像细节的同时又不损失亮区的细节^{[5]31}。

一般非自发光物体图像的强度与照明光源和物体自身的反射能力有关,假设原图像为 $f(x, y)$, 可以用分离出的入射光分量 $i(x, y)$ 与反射分量 $r(x, y)$ 的乘积来表示,即:

$$f(x, y) = i(x, y) \cdot r(x, y), 0 < i(x, y) < \infty, 0 < r(x, y) < 1. \quad (1)$$

同态滤波的步骤为^{[6]16}:

1) 通过对数变换后将乘法变成加法:

$$\ln f(x, y) = \ln i(x, y) + \ln r(x, y). \quad (2)$$

2) 进行傅里叶变换,将函数从时域向频域转换:

$$Q[\ln f(x, y) = f[\ln i(x, y)] + Q[\ln r(x, y)], \quad (3)$$

记为 $Q(u, v) = I(u, v) + R(u, v)$ 。

3) 采用理想的高通滤波器 $H(u, v)$ 对 $Q(u, v)$ 进行滤波,得到:

$$S(u, v) = H(u, v)F(u, v) = H(u, v)I(u, v) + H(u, v)R(u, v). \quad (4)$$

4) 将 $S(u, v)$ 傅里叶逆变换,得到 $h(x, y)$:

$$h(x, y) = F^{-1}[H(u, v)I(u, v)] + F^{-1}[H(u, v)R(u, v)] = h_i(x, y) + h_r(x, y). \quad (5)$$

5) 对 $h(x, y)$ 进行指数变换:

$$g(x, y) = \exp |h_i(x, y)| \cdot \exp |h_r(x, y)|. \quad (6)$$

同态滤波后的图像如图 2 所示,两侧的高频信号明显增强。针对图像出现的边缘效应问题,对图像进行边界填充,将边缘的高频信号变为中低频信号,同态滤波处理后再截取回之前大小,处理结果如图 3 所示。

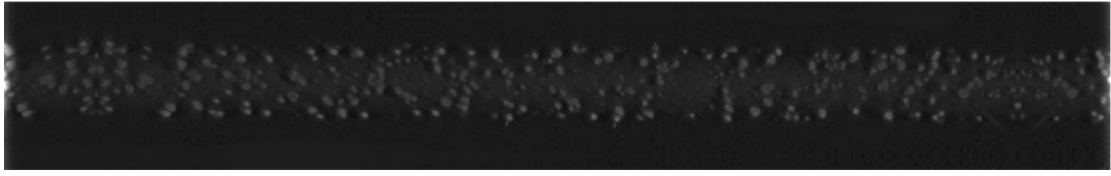


图2 未进行边界填充的同态滤波结果

Figure 2 Results of homomorphic filtering without boundary filling

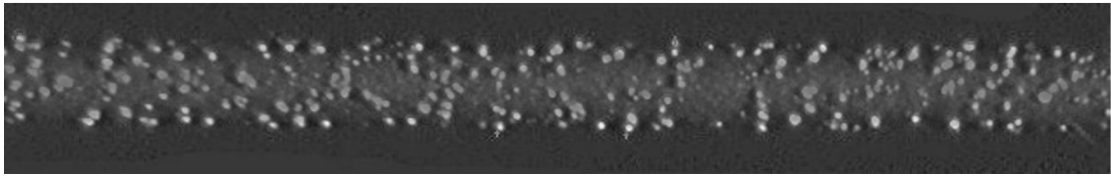


图3 进行边界填充的同态滤波结果

Figure 3 Results of homomorphic filtering with boundary filling

1.2 最大类间方差法确定阈值

最大类间方差法(OTSU)能够根据目标与背景之间的差别,最大化选取阈值^{[2]34},课题组选用最大类间方差法作为图像二值化方法,将颗粒从复杂背景中分割出来。通过最大类间方差法得到自动阈值 t ,设一幅图像的灰度值分为 $0 \sim (l-1)$ 级,将图像按灰度分为 C_0 和 C_1 ^[7],其中:

$$C_0 = \{0, 1, \dots, t\}; C_1 = \{t+1, t+2, \dots\}。$$

定义目标均值为 μ_0 ,概率为 ω_0 ;背景均值为 μ_1 ,概率为 ω_1 。且有:

$$\mu_0 = \mu_t / \omega_0; \mu_1 = (\mu_T - \mu_t) / (1 - \omega_0); \omega_0 = \sum_{i=0}^t P_i; \omega_1 = 1 - \omega_0。$$

式中: $\mu_t = \sum_{i=0}^t i P_i$; $\mu_T = \sum_{i=0}^{l-1} i P_i$,为总均值; P_i 为第 i 级像素出现的频率, $P_i = \frac{n_i}{n}$, n_i 是具有灰度级 i 的像素数, n 是

给定图像中的像素总数,且 $n = \sum_{i=0}^{l-1} n_i$ 。

选取 δ_B 作为类间方差,最佳阈值可以通过以下等式来确定:

$$\delta_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 \mu_0)^2。 \quad (7)$$

当 δ_B 达到最大值时,得到自动阈值 t 。课题组进一步分析了除最优选择之外的图像阈值,得到二进制图像结果是如图4所示。



图4 OTSU法二值化图像

Figure 4 Binary results by OTSU method

1.3 分水岭分割算法

实际采集的图像存在颗粒粘连现象,如果不对粘连颗粒进行分割处理,将影响到后续对金刚石颗粒形态的检测结果。由于分水岭分割算法主观性较强,对于环境的变化适应性较差,且容易产生过分割现象,课题组采用基于形态学运算和分水岭算法相融合的分割算法。

1) 形态学梯度计算

设 β_j 为不同尺度结构元素的权值, $T_j(x, y)$ 为各尺度下滤波后的图像,则形态学滤波结果为:

$$T(x, y) = \sum_{j=1}^3 \beta_j T_j(x, y)。$$
(8)

为了抑制算法的过分割现象,把梯度图像作为输入图像,形态学梯度定义为^[8]:

$$G(f) = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m [(f \oplus b_j - (f \ominus b_j)) \ominus b_{j-1}]。$$
(9)

式中: f 为输入图像; $b_j (1 \leq j \leq m)$ 为结构元素, m 为尺度参数。

2) 形态学开闭重构滤波器

形态学开闭操作只能删除一些高灰度级的细节,而且图像灰度低,很容易失去目标平滑过程中的信息。混合开闭重构处理不会产生新的区域极值,能够减缓过分割现象^[9]。靠近物体中心的区域是前景,远离物体的区域是背景,金刚石颗粒的边界区域是不确定区域,腐蚀处理能消除边界像素,可确定剩下的为金刚石颗粒区域,但由于它们相互接触,需要找到非颗粒区域^[10]。为此,需要对结果进行膨胀,膨胀将对象边界增加为背景。通过这种方法,边界区域被移除,可确定背景中的任何区域都为真正的背景。

假设原图像为 $f(x, y)$,输出图像为 $F_j(x, y)$,形态学开运算与闭运算分别有如下定义:

$$\text{开运算: } f(x, y) \circ b_j(x, y) = [f(x, y) \ominus b_j(x, y)] \oplus b_j(x, y);$$
(10)

$$\text{闭运算: } f(x, y) \cdot b_j(x, y) = [f(x, y) \oplus b_j(x, y)] \ominus b_j(x, y)。$$
(11)

式中: $\oplus$ 代表膨胀运算; $\ominus$ 代表腐蚀运算。

形态学开闭运算结果为:

$$F_j(x, y) = (f(x, y) \circ b_j(x, y)) \cdot b_j(x, y)。$$
(12)

首先对图像进行腐蚀运算和开运算重构,再进行膨胀运算和闭运算重构,分别得到开放重构图像和闭合重构图像^[11]。开闭重构混合处理不会产生新的区域极值,重建图像保留的区域不会出现轮廓的位置偏移。

3) 自适应标记提取

进行 H-minima 变换,消除局部最小值,减少过分割区域,自适应标记提取的定义^{[6]32}:

$$H = \frac{(M_2 - M_0)^2 + (M_0 + M_1)^2}{M_2 - M_1}。$$
(13)

式中: M_0 表示梯度图像的均值; M_1 表示梯度图像局部极小值的均值; M_2 表示梯度图像局部极大值的均值; $M_2 - M_1$ 为汇水盆地的平均深度。

4) 分水岭分割

标记前景和背景对象可以得到一个更好的分割结果,使用最小值算法计算目标区域梯度图像的最小点,用新标记的最小值修改渐变图像并标记前景物体。通过之前 OTSU 算法得到二进制图像,计算二值图像的欧氏距离,进行背景标记。前景标记标记颗粒的区域,背景标记给出背景的连通区域。根据空间扫描每个像素关系(从左上角到右下角),确定每个像素属于现有的区域或者新的区域^[12]。如果标记了相邻的像素,它属于其标记的相邻像素的集水盆地,否则就是成为一个新的最小区域并分配一个新的区域标记。排序数组的元素满足一定的空间关系。在这个数组中,梯度值越小,排序越向前,如果梯度值相同,左上角的像素在前。

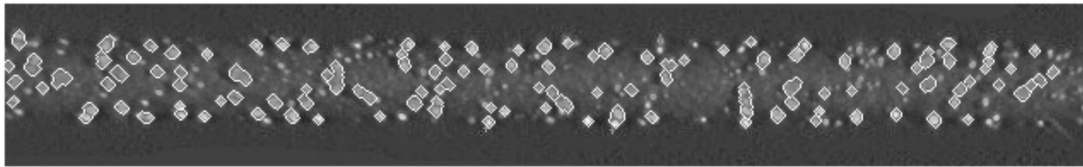


图5 传统分水岭分割结果

Figure 5 Segmentation results of traditional watershed segmentation

由图5所示,传统的分水岭算法容易将较小的颗粒忽略掉,运算结果中颗粒数明显变少。课题组研究方法通过形态学开闭运算以及自适应标记提取后(如图6),运算结果更加准确。本文分水岭分割算法结果如图7所示。

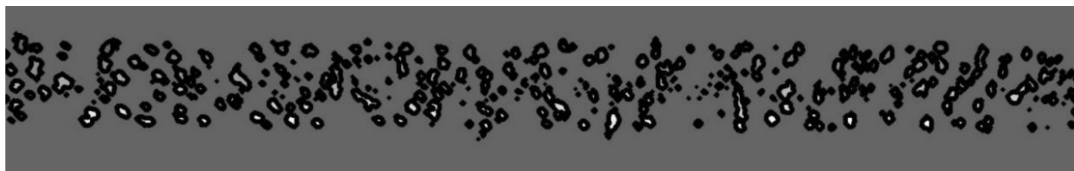


图6 自适应标记提取图像

Figure 6 Adaptive marker extraction image

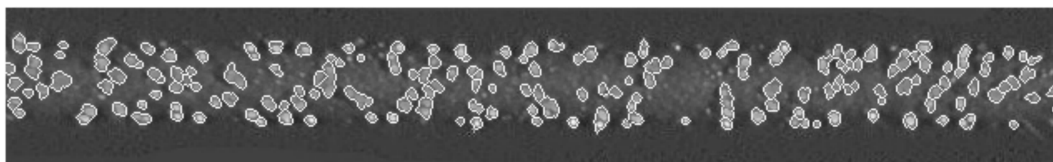


图7 文中分水岭分割结果

Figure 7 Results of watershed segmentation method in this paper

2 颗粒计数

课题组采用八连通域标记方法进行颗粒计数,对连通区域进行8连域追踪,对多个连通区域的二值图像进行面积扫描,同时计算每个区域中的像素数,并标记图像中的每个连通的黑色区域,求得对象的数目。

2.1 标记候选边界点

在二进制图像中,如果随机点的灰度值为0,观察它的8个相邻点,如果任何一个相邻点的灰度值都是255,对应点为标记的候选边界点。

2.2 连通区域标记

将 3×3 区域中4个相邻点在中心点周围逆时针排列,起始相邻点是当前中心点右上角的点。确保中心点和右上角点灰度值为255,将这2个点的标记组合为1个标记,将这4个相邻点其余3个相邻点逆时针排列^[13]。若这3个点中的有1个点的灰度值是255并且其标记不等于右上角点的标记,则这2个点等价。如果是右上角点的灰度值为0,通过类似的方法依次考虑下一个相邻点。若4个相邻点的灰度值同时为0,则将标签 N 设为当前中心点,下一个标签从 $N+1$ 开始。对于任意点,其余的点不包括当前相邻点的顺时针方向,确保整个过程始终是逆时针方向。

2.3 删除多余标记

定义一个等价数组 $E[g][k]$, g 和 k 为不同的标记点。当 $k < g$ 时, $E[g][k] = 0$;当 $k > g$ 时, $E[g][k] = 0$ 。定义 p 在 $g+1$ 与 $k-1$ 之间,若 $E[p][k] = 1$,则 $E[g][p] = 1$,最后删除总点数小于阈值 t 的标记^[14]。

实际上分割后的图像中还有一些微小的杂质,图像中标号数与颗粒数不统一,对于微小杂质的去除,可先设定一个阈值,统计标号图像中各标号下像素数为相应连通区域的面积,若面积小于设定的阈值则认为是合格。对于大面积的统计,可以定义颗粒的形状为圆形,颗粒图像不是正规的圆形所以阈值的上限可以适当增大一点,若求得某一连通区域的形状因子大于上限,则认为是过于堆积。传统的标记计数方法处理效果如图8所示,当颗粒细小时,识别效果不好,准确度不够。文中方法处理效果如图9所示,将传统方法的忽略掉的细小颗粒也提取出来,准确度得到提高。

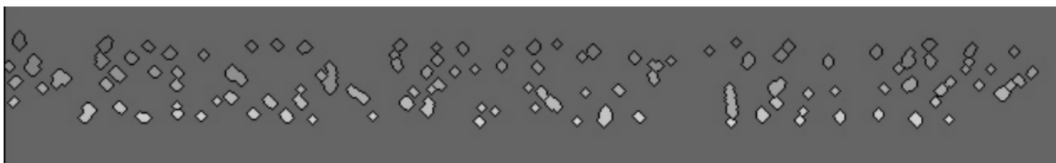


图8 传统连通域标记图像

Figure 8 Traditional connected region marker image

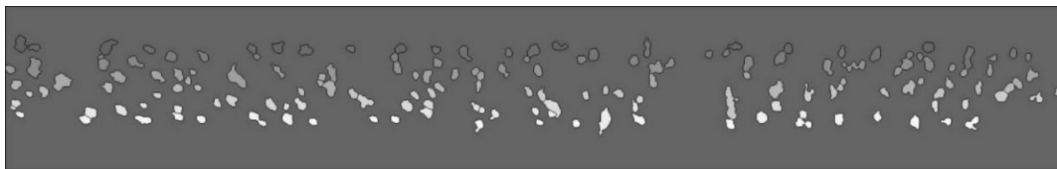


图9 课题组研究的方法连通域标记图像

Figure 9 Connected region marker image studied by research group

3 实验结果与分析^[15-16]

实验利用人眼识别视觉检测的方式,准确测量金刚石切割线上的颗粒,对采集到的6幅金刚石切割线局部图进行处理,每个图片采集部分切割线的长度。不同算法的计数结果如表1所示,不同算法相对误差折线图如图10所示。

表1 不同算法分割结果对比

Table 1 Comparison of different algorithm segmentation results

样本	人眼识别法 金刚石颗粒数	不加边界填充同态滤波算法		分水岭分割算法		连通域分割算法		课题组研究算法	
		金刚石 颗粒数	相对 误差/%	金刚石 颗粒数	相对 误差/%	金刚石 颗粒数	相对 误差/%	金刚石 颗粒数	相对 误差/%
1	234	177	24.30	166	29.05	170	27.35	221	5.55
2	178	190	6.74	149	16.29	155	12.92	175	1.60
3	196	172	12.21	159	18.87	167	14.79	190	3.06
4	170	188	10.58	166	2.35	188	10.58	163	4.11
5	187	199	5.52	129	31.55	165	11.76	177	5.34
6	191	176	7.85	177	7.32	176	7.85	186	2.61

如图10所示,传统的计数方法只适合颗粒比较稀疏,大小差别不大时的情况,当颗粒细小,颗粒分布复杂时,识别效果不好。金刚石切割线的颗粒分布不均匀,且金刚石切割线表面反光,使背景变得复杂,难以区分。因而用传统方法测量的稳定性不高,准确度不够。课题组研究算法解决了背景分布不均的问题,将目标与背景准确的分离,改善了同态滤波容易出现的边缘效应,有效抑制了传统分水岭方法的过分割问题,提高了八连通域标记的速度和准确度,通过实验验证了该方法的可行性和有效性。

4 结语

课题组将同态滤波应用于缺陷图像的预处理,该算法削弱了图像中的高频成分,适当增强了低频分量,减少了背景的不均匀光照对图像分析造成的影响,解决了表面反光和光照不均的问题。通过最大类间方差法对图像进行二值化处理,结合形态学处理和分水岭等方法对特征进行提取,能够快速准确的识别出缺陷,不受形状与位置的影响,实现与背景的分离,有效的解决了背景纹理对缺陷提取的干扰,并且能够保证在光照变化的情况下也会有很好的效果。采用的连通域标记算法使图像处理结果更清晰,计数更准确,运算速度更快。在实际应用中,课题组研究算法还没有在根本上解决传统分水岭算法过分割的问题,未来工作目标是使其在微小颗粒(以微米为单位)检测中广泛使用,并在现有方法基础上针对微小颗粒尺寸检测做进一步探究。

参考文献:

- [1] 张文晔. 基于机器视觉的金刚砂线颗粒检测技术的研究与应用[D]. 常州:江苏理工学院,2018:14-30.
- [2] 王飞阳. 基于机器视觉的金刚线在线质检技术[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2014:29-35.
- [3] 简丽娟. 基于图像分析的金刚石颗粒检测[D]. 成都:四川大学,2005:31-38.

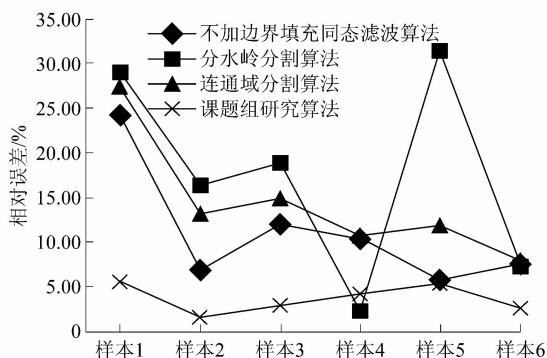


图10 不同算法相对误差折线图

Figure 10 Different algorithm relative error line chart

- [4] 郭树青,赵凤霞,张琳娜,等. 基于 Hough 变换的金刚石颗粒测量方法研究[J]. 计算机测量与控制,2015,23(1):3260-3263.
- [5] 崔帅,刘波,丁德红. 基于傅里叶变换的森林红外图像增强算法研究[J]. 红外技术,2015,37(1):29-33.
- [6] 李机智. 基于机器视觉的汽车连杆裂解槽检测技术研究[D]. 长春:吉林大学,2013:10-33.
- [7] JIANG Jun,XIAO Chun. Particle size analysis of concrete materials based on AFCM and marked watershed algorithm[C]//International Conference on Industrial Informatics-Computing Technology. Wuhan:IEEE,2017:296.
- [8] ZHOU Yuncai,REN Hui. Segmentation method for rock particles image based on improved watershed algorithm[C]//2012 International Conference on Computer Science & Service System (CSSS). Nanjing:IEEE,2012:350.
- [9] LI Deren,ZHANG Guifeng,WU Zhaocong,et al. An edge embedded marker-based watershed algorithm for high spatial resolution remote sensing image segmentation[J]. IEEE Transactions on Image Processing,2010,19(10):2781-2787.
- [10] LIN Zhonghua,YU Hongfei. The cell image segmentation and classification based on OTSU method and connected region labeling[C]//International Conference on Computer Science & Network Technology. Chengdu:IEEE,2012:1304.
- [11] XU Lulu,LU Huaxiang. Automatic morphological measurement of the quantum dots based on marker-controlled watershed algorithm[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology,2013,12(1):51-56.
- [12] SCHMITT O,HASSE M. Morphological multiscale decomposition of connected regions with emphasis on cell clusters[J]. Computer Vision & Image Understanding,2009,113(2):188-201.
- [13] BLEAU A,LEON L J. Watershed-based segmentation and region merging[J]. Computer Vision and Image Understanding,2000,77(3):317-370.
- [14] DILLENCOURT M B,SAMET H,TAMMINEN M. A general approach to connected-component labeling for arbitrary image representations[J]. Journal of the Acm,1992,39(2):253-280.
- [15] 高扬,滕奇志,熊淑华,等. 基于模糊距离变换的岩心图像颗粒分割算法[J]. 微型机与应用,2017(4):47-50.
- [16] 王敏,周树道,刘志华,等. 遥感图像薄云薄雾的去除处理方法[J]. 实验室研究与探索,2011,30(2):34-37.

《轻工机械》2020 年征订启事

《轻工机械》杂志,创刊于 1983 年,由中国轻工机械协会、中国联合装备集团有限公司与轻工业杭州机电设计研究院有限公司联合主办,是一份在国内有较高影响力、历史悠久的轻工机械领域的专业性科技期刊。以报道轻工机械、自动化技术、机电一体化、工艺设计及其应用为特色。《轻工机械》杂志系中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),已加入《中国学术期刊(光盘版)》和“中国期刊网”“万方数据资源系统”“中文科技期刊数据库”,并被《中国学术期刊文摘》、英国《科学文摘》(SA INSPEC)、美国《化学文摘》(CA)、美国《剑桥科学文摘》(CSA)、美国《乌利希期刊指南》(UPD)等收录。国内统一刊号:CN 33-1180/TH;国际标准刊号:ISSN 1005-2895;邮发代号:32-39。

● 双月刊,大 16 开,每册定价 10.00 元,全年 60.00 元。

● 邮局订阅(邮发代号 32-39),也可直接向编辑部邮购(另加邮费 2 元/本)。

● 编辑部地址:杭州市余杭区高教路 970-1 西溪联合科技广场 4 号楼 711 室 邮编:311121

● 电话:(0571)85186130 85187520 E-mail: qgjxzz@126.com

● 网址:www. qgjxzz. com

● 开户银行:工行杭州建国北路支行

● 户头:轻工业杭州机电设计研究院有限公司

帐号:1202022209014428297

税号:913300007236292912

欢迎订阅 ● 欢迎刊登广告 ● 欢迎赐稿