

融合颜色聚类 and 分水岭算法的铁谱图像分割

王静秋, 张 龙, 王晓雷

(南京航空航天大学 江苏省精密与微细制造技术重点实验室, 江苏 南京 210016)

摘要: 通过分析不同颜色空间下铁谱图像 k-means 颜色聚类效果, 提出在 CIELAB 颜色空间利用二维颜色分量进行 k-means 均值聚类的算法, 从而实现铁谱图像背景和磨粒的分离. 将 k-means 颜色聚类结果作为基础图像, 利用阈值法分别针对背景和磨粒提取区域极小值, 从而获得背景和磨粒标记图像, 在此基础上利用标记分水岭算法实现了铁谱图像磨粒沉积链自动分割. 研究表明, 本文所提出的方法消除了背景因素对磨粒沉积链分割的不良影响, 提高了分割的准确度.

关键词: 铁谱图像; 图像分割; k-means 聚类; 分水岭变换

中图分类号: TH 117.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-1964(2013)05-0866-07

Ferrographic image segmentation by the method combining k-means clustering and watershed algorithm

WANG Jing-qi, ZHANG Long, WANG Xiao-lei

(Jiangsu Key Laboratory of Precision and Micro-Manufacturing Technology,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing, Jiangsu 210016, China)

Abstract: By evaluating the results of k-means clustering in different color spaces including RGB, HSI and CIELAB, this study proposed the algorithm of k-means clustering using two-dimensional color components in CIELAB color space. By this algorithm, the wear particles could be segmented directly from the background of ferrographic image. Then, the results of k-means clustering are used as basic images, threshold method is adopted to extract regional minimal values of particles and background to obtain the marker images of both particles and background. At last, the automatic segmentation of wear particles is achieved by using improved watershed algorithm. The results show that the method in this study could improve the segmentation accuracy of wear particle chains by eliminating the influences from background.

Key words: ferrographic image; image segmentation; k-means clustering; watershed

铁谱技术是一种通过对磨屑的粒度、形状、颜色和纹理等特征的分析, 进行磨损工况监测和故障诊断的有效手段. 油液中的磨屑是设备长期磨损过程的积累, 单个磨屑记录的是局部瞬间的磨损情况, 而磨屑群体的共性特征代表着当前设备的主要磨损状态. 提取具有足够样本数量磨屑的统计特征是提高铁谱分析准确性的关键. 计算机图像处理技

术的应用为减轻铁谱分析对操作人员的依赖, 提高分析效率和精度提供了可能. 经过科研人员的努力, 在利用图像处理技术进行单个磨粒的形状、纹理、尺度特征提取方面已取得了长足的进步^[1-6]. 但在磨屑群体特征提取方面, 距离应用还有较大差距^[7]. 其中一个主要问题是: 由于铁磁性磨粒在沉积过程中受磁场作用, 沿磁力线方向排列成链

收稿日期: 2012-09-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51205202); 江苏省高校优势学科建设工程项目; 南京航空航天大学基本科研业务费专项科研项目(NP2011028)

通信作者: 王静秋(1972—)女, 辽宁省抚顺市人, 副教授, 博士研究生, 从事计算机图像处理和铁谱分析方面的研究.

E-mail: meeqwang@nuaa.edu.cn Tel: 025-84893630

状,磨粒与背景、磨粒与磨粒之间分割非常困难,因此铁谱图像分割是铁谱分析过程的首要步骤及关键。

图像分割是将图像分解成若干互不交叠的区域,每个区域具有相同或相近的性质,例如颜色(或亮度)、边界和纹理等。目前,一般的图像分割技术主要包括基于颜色(或亮度)、边界和纹理的分割等^[8]。基于颜色的图像分割是目前的研究热点。图像可以看成是由不同颜色的各个区域组成,颜色是图像上不同区域最自然和直观的区别,所以基于颜色的彩色图像分割相比于单色图像可以得到更好的分割效果。

彩色图像分割涉及到颜色空间的表示方法和处理,分割方法主要包括基于直方图的分割、基于像素的分割和基于区域的分割^[9]。

基于直方图的分割主要是利用图像上颜色分量的分布来进行分割,包括利用一个颜色分量的直方图或 3 个颜色分量的直方图。近年来一些学者开始研究利用两个颜色分量的直方图进行图像分割,这种方法可以降低计算复杂程度从而得到较好的效果^[10]。

基于像素的分割(如 k-means 均值聚类)主要利用每个像素的特征信息,例如颜色、亮度等,根据每个像素性质的相近程度进行分割或聚类,每个像素彼此独立,分割过程中没有涉及到像素的位置信息,其最终结果是将原图像上的每个像素标记成不同的类别。

基于区域的分割(如 watershed 分水岭分割)主要利用像素的位置信息,通过初始化种子点来判断相邻像素是否属于同一个区域。该方法可以得到单像素宽的、连通的封闭的轮廓。但是该方法也有缺点,例如需要初始化种子点以及存在过分割现象等。所以,对彩色图像的分割,既没有一种通用的算法也没有一种“最好的”彩色空间^[11]。

1 铁谱图像分割及难点

铁谱图像包含着磨粒的形状、颜色和纹理等大量信息。铁谱图像主要是利用光学显微镜,采用不同的照明方式得到的,通常有两种不同背景颜色的铁谱图像,如图 1 所示。一种为白色反射光/绿色透射光照方式获取的铁谱图像,背景颜色为绿色;另外一种为红色反射光/绿色透射,背景颜色为暗黄色。除此之外,不同磨粒也呈现不同的颜色,如白色、黄色、黑色、红色等,还有亮磨粒和暗磨粒等。

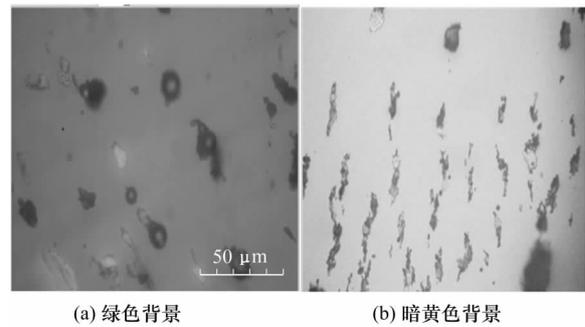


图 1 不同背景颜色的铁谱图像

Fig. 1 Ferrograph images with different background colors

目前针对铁谱图像分割,采用较多的是灰度阈值法和背景色彩识别方法^[12-14],但由于磨粒亮度和颜色的不同,所以无论将阈值定在何处,总会遗漏一部分过亮或过暗的磨粒,从而造成分割不完全。

有些研究利用磨粒的形状和纹理特征进行图像分割和磨粒识别^[15],但是该方法主要针对单独或较少磨粒。而实际由于磨粒沉积过程中磁场的作用,磨粒按磁力线排列成链状、互相搭接、部分轮廓模糊等,都导致难以利用形状和纹理特征信息对磨粒进行准确分割。所以如何正确可靠地分割磨粒沉积链,恐怕是铁谱图像分析最艰巨的任务之一。

但是,通过对铁谱图像颜色特征进行分析,可以发现,尽管不同照明类型铁谱图像的背景颜色不同,磨粒的颜色特征分布也不同,但是磨粒与背景的颜色特征却有很明显的差别。因此可以寻求利用背景和磨粒的颜色特征来进行铁谱图像分割的有效方法。

本文为实现不同背景颜色铁谱图像上磨粒沉积链的准确分割,对 k-means 颜色均值聚类和标记分水岭算法进行了尝试。首先在 CIELAB 颜色空间,利用二维颜色分量 k-means 均值聚类,实现铁谱图像背景与目标的分离;然后通过对 k-means 聚类分析的结果进行形态学运算,利用阈值法提取区域极小值,从而分别得到背景和磨粒的标记图像。最后利用 watershed 分水岭变换实现铁谱图像上磨粒沉积链的有效分割。

2 k-means 聚类分析原理

k-means 算法是目前广泛使用的一种数据聚类方法,但将其应用于彩色图像颜色聚类的研究还很少^[16]。

对于一组给定的数据集 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\} \in R^D$, k-means 算法的目标是将数据集 X 聚类成完全互异的 K 个数据集 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$,并且满足最小平方误差

$$SSE = \sum_{K=1}^K \sum_{x_i \in S_K} \|x_i - C_K\|^2, \quad (1)$$

式中: $\| \cdot \|$ 表示欧几里德距离; C_K 是聚类 S_K 的中心, 即所有属于这个聚类的数据的平均值。但是由于 k-means 算法计算量很大, 所以通常采用由 Lloyd 提出的预先随机选取聚类中心的启发式算法^[17]。首先从数据集中任意选取 K 个值作为初始聚类中心, 然后将每一个数据分配到最近的聚类中心, 再根据所分配的数据计算平均值获得新的聚类中心。重复以上这两个步骤, 直到满足最小平方误差。由以上过程可以知道, k-means 算法的聚类结果与初始聚类中心的选择相关, 而且如果图像数据相对于聚类中心分布均匀且紧密, 可以得到较好的聚类效果。

彩色图像 k-means 聚类首先要给出聚类的数量, 而铁谱图像分割首先是要将背景和磨粒区域区分开来, 所以在应用 k-means 算法进行颜色聚类分析时, 可以取 $K=2$, 即针对背景和磨粒进行颜色聚类, 这样聚类的结果即为背景和磨粒两个区域, 从而将磨粒从背景区域分离出来。

3 不同颜色空间下的铁谱图像 k-means 颜色聚类分析

当人们用眼睛来观察铁谱图像时, 可以很容易地发现不同的磨粒颜色不同, 而且与背景的颜色有很大差别, 以至于人们很容易地就可以将一幅图像的背景和不同磨粒识别出来。然而对于计算机而言, 整幅图像不过是不同的数字, 所以需要寻求合适的方法在合适的颜色空间进行有效而快速地分割。在计算机技术中使用广泛的彩色空间包括 RGB, HSI 和 CIELAB 等。RGB 为设备相关的颜色空间, 它是彩色图像在计算机内部表达中使用最多的, 主要原因之一是三基色的标准化, 即建立在 3 种基色 R, G, B 的加性混合基础上, 几乎所有可见彩色都可用 3 个矢量的线性组合来表示。HSI 颜色空间是利用色调 (hue)、饱和度 (saturation) 和亮度 (intensity) 基于人类对彩色的感知来直观地描述一种彩色, 比用 RGB 矢量分量描述更简单。HSI 彩色空间的优点之一是其对彩色信息和非彩色信息的分离, 使得其非常适合利用计算机进行彩色图像处理。国际照明协会 CIE (Commission Internationale de l'Eclairage) 制定了 CIELAB 颜色空间, 分别用 L^* , a^* 和 b^* 值来测量色值。 L^* 代表着明度, 从明亮 ($L^*=100$) 到黑暗 ($L^*=0$) 之间变化; a^* 值表示颜色从绿色 ($-a^*$) 到红色

($+a^*$) 之间变化; 而 b^* 值表示颜色从黄色 ($+b^*$) 到蓝色 ($-b^*$) 之间变化。

无论以上哪一种颜色空间, 一幅彩色图像都可以用 3 个分量来表示:

$$P(x, y) = [P_1(x, y), P_2(x, y), P_3(x, y)]. \quad (2)$$

对于整幅彩色图像进行颜色聚类分析, 通常对每一个分量进行聚类, 或者对 3 个分量同时进行聚类, 但是这种方法计算需要较长时间, 且聚类效果不稳定。本文针对彩色铁谱图像, 利用二维分量聚类方法, 在不同颜色空间进行了 k-means 颜色聚类分析, 其过程如图 2 所示。

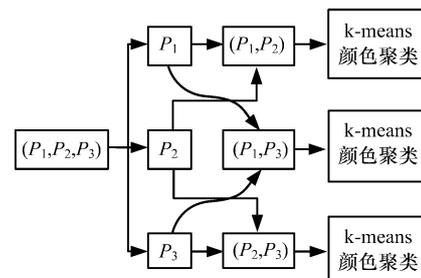


图 2 二维分量的 k-means 聚类分析过程
Fig. 2 k-means clustering analysis of two-dimensional components

3.1 RGB 和 HSI 颜色空间的二维颜色分量 k-means 聚类

图 1a 为一张典型的铁谱磨粒图像, 背景为绿色, 磨粒包括亮磨粒和暗磨粒等。在 RGB 和 HSI 颜色空间中, 分别利用二维颜色分量 (R, G) , (R, B) , (G, B) , (H, S) , (H, I) , (S, I) 针对图像背景、磨粒进行聚类分析, 聚类结果和数据分布如图 3 和图 4 所示。

聚类结果中, 黑色代表磨粒, 白色代表背景。数据分布图中, X 和 Y 轴分别代表相应的二维颜色分量, 黑色和灰色的点分别代表背景和磨粒的颜色分量分布, \otimes 标记为相应的聚类中心。

从聚类结果来看, 图 3a, b 和图 4b 中, 部分背景被错误地聚类成磨粒。这主要是因为由于光照的原因, 图像背景存在着人眼很难区别的均匀, 图像四周较暗的背景会被误分割为磨粒。在图 3c 和图 4c 中, 如图中方框所示, 部分亮磨粒和颜色较浅的磨粒没有分割出来。图 4a 中, 磨粒的边缘部分也存在分割不准确的情况。从图 3 和图 4 各数据分布图也可以看出, 在 RGB 和 HSI 颜色空间下, 图像的二维颜色分量分布散乱不紧密, 存在聚类中心计算错误的现象。所以在以上两个空间下利用二维颜色分量很难将背景和磨粒准确地分割开。

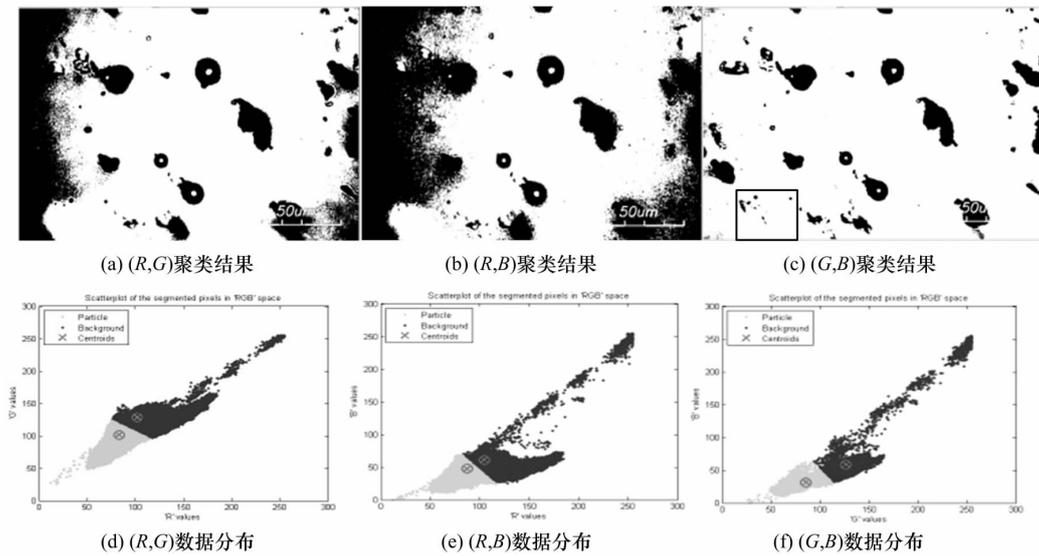


图 3 RGB 颜色空间下二维颜色分量 k-means 聚类结果及数据分布

Fig. 3 K-means clustering results and data distribution of two-dimensional color components in RGB color space

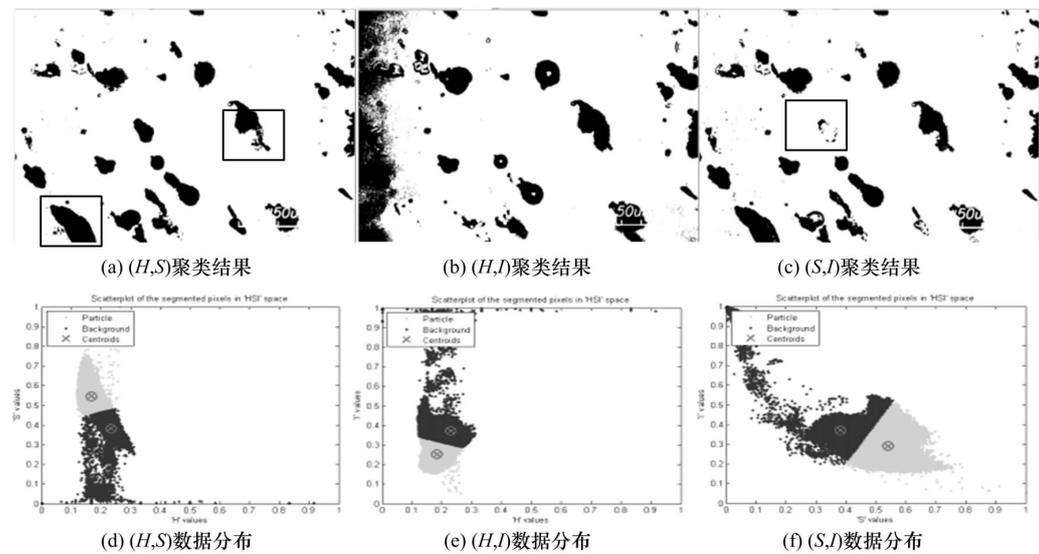


图 4 HSI 颜色空间下二维颜色分量 k-means 聚类结果及数据分布

Fig. 4 K-means clustering results and data distribution of two-dimensional color components in HSI color space

3.2 CIELAB 颜色空间的二维分量 k-means 聚类

在 CIELAB 空间下, L^* 代表明度, a^* 和 b^* 分别为两种不同的颜色分量. 本研究分别利用明度和颜色的二维分量 (L^*, a^*) 和 (L^*, b^*), 以及颜色二维分量 (a^*, b^*) 对图 1a 的图像背景、磨粒进行聚类分析, 得到的聚类结果和数据分布图如图 5 所示.

从图 5a, b 可以看出, 利用明度和颜色二维分量 (L^*, a^*) 或 (L^*, b^*) 进行铁谱图像 k-means 聚类分析, 因为聚类过程中涉及到每个像素的亮度信息, 使得亮度分布不均的部分背景(过暗)或磨粒上的高光点(过亮)都被错误地进行聚类. 如图 5a 和图 5b 方框标记中的亮磨粒被错误聚类为背景; 而

图 5b 左侧较暗的背景则被错误地聚类为磨粒.

在图 5c 中, 采用二维颜色分量 (a^*, b^*) 进行聚类分析, 忽略亮度分量 L^* 对图像的影响, 而且因为图像背景与磨粒的这两个颜色分量区别度较大, 从而可以得到很好的分割效果. 从图中也可以看出, 无论是亮磨粒还是暗磨粒, 都可以通过 CIELAB 空间的二维颜色分量 (a^*, b^*) 的 k-means 聚类同时分离出来. 从图 5 的各数据分布图 5d, e, f 也可以看出, 采用明度和颜色分量 (L^*, a^*), (L^*, b^*) 进行聚类时, 部分数据相对聚类中心分布分散不紧密; 而采用二维颜色分量 (a^*, b^*) 进行聚类时, 数据分布均匀, 同类数据分布紧密, 聚类效果良好.

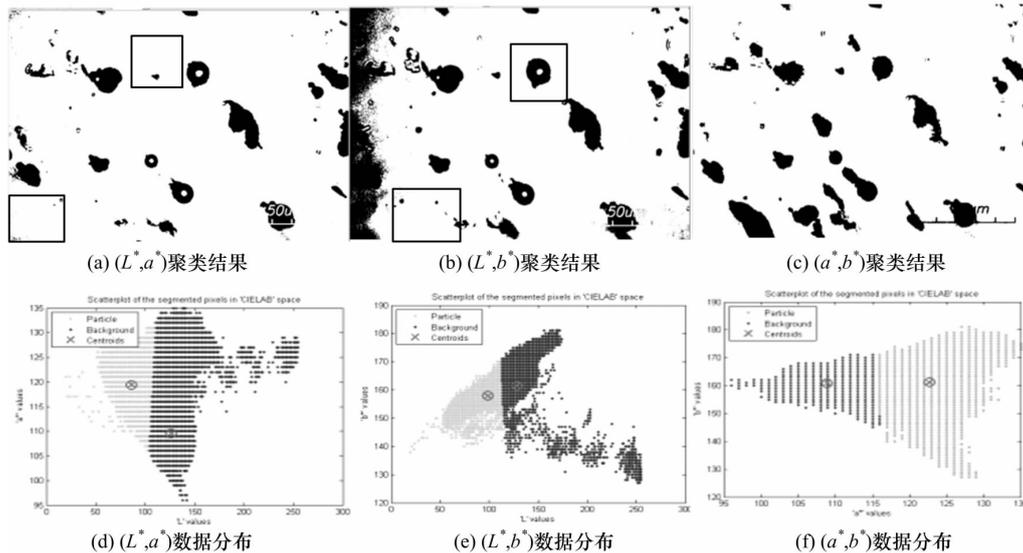


图 5 CIELAB 颜色空间下二维分量 k-means 聚类结果及数据分布

Fig. 5 K-means clustering results and data distribution of two-dimensional components in CIELAB color space

4 铁谱图像磨粒沉积链的 watershed 分水岭分割

如前节所述,采用 CIELAB 空间的二维颜色分量(a^* , b^*)的 k-means 算法对铁谱图像进行颜色聚类分析,可以快速地实现图像背景与磨粒的分割。但是这并不意味着磨粒本身已经被分割开来。聚类分析只是将每个像素判别到相应的背景或磨粒类别中,在颜色聚类的过程中并没有考虑每个像素的空间位置和连通状况,所以无论连通或不连通的像素都可能划分到相同的类别中。因此为了后续不同磨粒类型的识别,在实现磨粒和背景分割后,还需要进行磨粒之间的分割,特别是沉积链上各个磨粒的分割。

分水岭分割方法是一种基于区域的图像分割方法,其基本思想是把图像看作是测地学上的拓扑地貌。图像中每一像素的灰度值表示该点的海拔高度,每一个局部极小值及其影响区域称为集水盆,而集水盆的边界则形成分水岭。

采用分水岭算法可以准确地对图像进行分割,但由于图像中的噪声等,直接利用分水岭算法很容易导致过分割。而避免过分割的方法是采用基于标记的分水岭算法,因此标记的提取是利用分水岭算法进行图像分割的难点和重点之一。提取标记的主要方法是将彩色图像转化为灰度图像,然后利用阈值法提取区域极小值作为标记^[18]。

对于铁谱图像,如果直接采用灰度阈值化进行分割,磨粒与背景可能无法正确分开,所以很难准

确提取磨粒区域的极小值,从而影响后续的分水岭分割,图 6 即为一个失败的算例,该图是采用 Otsu 提出的最大类间方差阈值法对图 1b 进行分割的结果,图像上部分背景被错误地分割为磨粒。而本文采用 k-means 颜色聚类后的结果图像作为分水岭算法的标记基础图像,利用数学形态学运算(如开、闭和重建运算等)进行处理,再分别针对磨粒和背景区域采用阈值法提取极小值,从而得到磨粒和背景两个标记图像。最后根据磨粒和背景标记图像,利用分水岭算法,实现磨粒沉积链的准确分割,其过程如图 7 所示。图 8 为图 1b 暗黄色背景铁谱图像的分割结果,其中图 8a 为利用二维颜色分量(a^* , b^*)k-means 聚类结果,图 8b 为 watershed 分割结果,每个磨粒分别用不同的颜色显示出来。从图 8 和图 6 的对比中可以看出,采用本文所设计的方法,磨粒分割精度得到很大提高。



图 6 最大类间方差阈值分割结果

Fig. 6 Result of Otsu algorithm

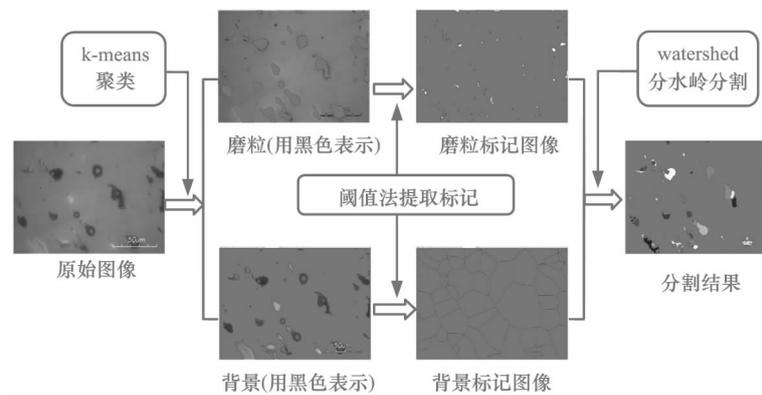
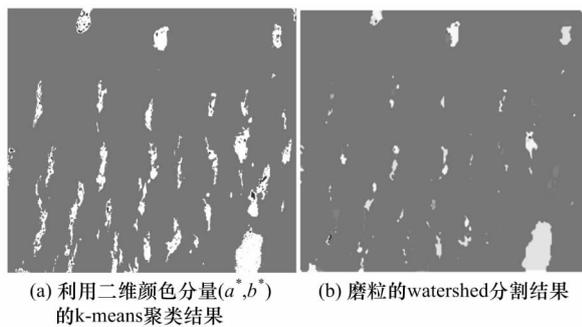


图 7 铁谱图像的 k-means 聚类和 watershed 分割流程

Fig. 7 Ferrograph image k-means clustering and watershed segmentation



(a) 利用二维颜色分量(a^* , b^*)
 (b) 磨粒的 watershed 分割结果的
 k-means 聚类结果

图 8 黄色背景铁谱图像分割

Fig. 8 Segmentation of ferrograph image with yellow background

5 结 论

本文提出了融合 k-means 颜色聚类和 watershed 算法进行磨粒沉积链分割的方法。在实验过程中,分别选取具有绿色和黄色背景的不同磨损状态下的铁谱图像,在 CIELAB 颜色空间下利用二维颜色分量(a^* , b^*)进行聚类分析及分水岭分割,通过与人工分割进行比对磨粒沉积链分割准确率可以达到 90%左右,得到结论如下:

1) 在 CIELAB 颜色空间利用二维颜色分量(a^* , b^*)进行铁谱图像的 k-means 颜色聚类分析,使得对于不同照明类型所获得的铁谱图像,都可以直接进行处理,所以该算法具有广泛的适用性。利用两个颜色分量进行铁谱图像的 k-means 颜色聚类分析,排除光照强度分量,从而可以有效避免因为光照强度变化,如图像中心亮度高四角亮度低等影响铁谱图像分割,使得各种磨粒(亮磨粒、暗磨粒和混合色磨粒)与铁谱图像背景可以直接分离。

2) 利用 k-means 和 watershed 算法对铁谱图像进行颜色聚类和磨粒沉积链自动分割,将 k-means 聚类分析的结果作为分水岭算法的基础图像,将两种算法融合起来,比使用一种分割方法效果好,这主要是因为铁谱图像处理中不仅利用颜

色聚类分析(利用像素值的大小),也同时利用了像素连通位置(像素位置信息),从而得到一种实用有效的分割方法,且分割的准确性和速度也达到了铁谱分析的要求。

参考文献:

- [1] 陈桂明,谢友柏,江良洲. 图像颜色特征提取在铁谱图像分类及磨粒识别中的应用研究[J]. 中国机械工程, 2006, 17(15): 1576-1579.
CHEN Gui-ming, XIE You-bai, JIANG Liang-zhou. Application study of color feature extraction on ferrographic image classifying and particle recognition [J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17 (15): 1576-1579.
- [2] 袁成清,严新平,彭中笑. 磨粒的三维表面特征描述[J]. 摩擦学学报, 2007, 27(3): 294-296.
YUAN Cheng-qing, YAN Xin-ping, PENG Zhong-xiao. Three dimensional surface characterization of wear debris [J]. Tribology, 2007, 27(3): 294-296.
- [3] 包春江,刘向东,杨志伊. 铁谱图像的彩色纹理特征提取与识别[J]. 润滑与密封, 2007, 32(4): 17-19.
BAO Chun-jiang, LIU Xiang-dong, YANG Zhi-yi. Color texture feature extracting and recognition of ferrograph image [J]. Lubrication Engineering, 2007, 32(4): 17-19.
- [4] 刘洪涛,葛世荣. 磨屑轮廓的雷达图分形表征[J]. 科学通报, 2007, 52(13): 1586-1590.
LIU Hong-tao, GE Shi-rong. Radar-graph fractals of the shape of the debris [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(13): 1586-1590.
- [5] STACHOWIAK G W, PODSIADLO P. Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features[J]. Tribology International, 2008, 41: 34-43.
- [6] PODSIADLO P, STACHOWIAK G. Development of advanced quantitative analysis methods for wear par-

- ticle characterization and classification to aid tribological system diagnosis [J]. *Tribology International*, 2005, 38: 887-897.
- [7] 唐小行, 刘书进, 刘同冈, 等. 铁谱磨损颗粒群体综合评判系统研究[J]. *中国矿业大学学报*, 2009, 38(6): 840-845.
TANG Xiao-hang, LIU Shu-jin, LIU Tong-gang, et al. Study of debris group synthetic decision system in ferrography[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2009, 38(6): 840-845.
- [8] YU J, TAN J. Object density-based image segmentation and its applications in biomedical image analysis [J]. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2009, 96(3): 193-204.
- [9] LEZORAY O, CARDOT H. Cooperation of color pixel classification schemes and color watershed [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(7): 783-789.
- [10] LEZORAY O, CHARRIER C. Color image segmentation using morphological clustering and fusion with automatic scale selection [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2009, 30(4): 397-406.
- [11] 章毓晋. 彩色数字图像处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010: 187-189.
- [12] 高孝清, 左洪福, 陈 果, 等. 复杂背景下磨粒显微图像分割[J]. *南京航空航天大学学报*, 2001, 33(6): 565-568.
GAO Xiao-qing, ZUO Hong-fu, CHEN Guo, et al. Debris image segmentation under complicated background [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2001, 33(6): 565-568.
- [13] 陈 果, 左洪福. 图像分割的二维最大熵遗传算法 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2002, 14(6): 530-533.
CHEN Guo, ZUO Hong-fu. 2-D maximum entropy method of image segmentation based on genetic algorithm [J]. *Journal of Computer Aided Design & Computer Graphics*, 2002, 14(6): 530-533.
- [14] 于世强, 戴兴建. 基于背景色彩识别的磨粒图像分割方法[J]. *摩擦学学报*, 2007, 27(5): 467-471.
YU Shi-qiang, DAI Xing-jian. Wear particle image segmentation method based on the recognition of background color [J]. *Tribology*, 2007, 27(5): 467-471.
- [15] STACHOWIAK G W, PODSIADLO P. Towards the development of an automated wear particle classification system [J]. *Tribology International*, 2006, 39: 1615-1623.
- [16] CELEBI M E. Effective initialization of k-means for color quantization [C] // *IEEE International Conference on Image Processing*. Cairo: IEEE, 2009: 1649-1652.
- [17] LLOYD S P. Least squares quantization in PCM [J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 1982, 28(2): 129-137.
- [18] 王静秋, 王晓雷. 基于背景减除的彩色铁谱图像自动分割[J]. *润滑与密封*, 2011, 36(5): 48-52.
WANG Jing-qiu, WANG Xiao-lei. Color ferrography image segmentation based on background subtraction [J]. *Lubrication Engineering*, 2011, 36(5): 48-52.

(责任编辑 姚志昌)