

文章编号 1004-924X(2017)05-1322-09

基于差商的油液监测铁谱图像自适应分割

温广瑞^{1,2}, 徐 斌¹, 张志芬^{1*}, 陈 峰¹

- (1. 西安交通大学智能仪器与监测诊断研究所, 陕西 西安 710049;
2. 新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:针对油液监测中铁谱磨粒图像分割阈值难以选取的问题,本文提出一种基于差商的自适应铁谱图像分割算法。首先,将铁谱磨粒灰度图像转换成三维灰度直方图,并对其进行切片分析;然后,引入 Newton 插值多项式,将不同切片所得的频数作为切片灰度-频数曲线的插值点,基于差商构造第一类可接受函数和第二类可接受函数,结合实验数据确定两类误差,选取同时满足两类误差的最小灰度值作为分割阈值;最后,用本文方法对不同类型的磨粒图像以及添加高斯噪声和椒盐噪声后图像分别进行分割实验,并与经典的迭代阈值法、Otsu 算法、最大熵法进行了比较。实验结果表明,本文方法受噪声干扰较小,误检率和漏检率整体优于其他 3 种算法。对分割所得的磨粒图像进行特征提取,并利用支持向量机进行识别,本文方法对 3 种故障磨粒识别准确率最高,达到 82.86%,虽在运行时间上无明显优势,但综合性能最优,能满足油液监测过程中铁谱图像自适应分割的需求。

关键词:油液监测;铁谱图像;差商;图像分割

中图分类号:TP394.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20172505.1322

Self-adaptive segmentation of oil monitoring ferrographic image based on difference quotient

WEN Guang-rui^{1,2}, XU Bin¹, ZHANG Zhi-fen^{1*}, CHEN Feng¹

- (1. *The Research Institute of Diagnosis and Cybernetics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;*
 - (2. *School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Xinjiang University, Wulumuqi 830047, China*)
- * *Corresponding author, E-mail: zzf919@xjtu.edu.cn*

Abstract: Aiming at problem that segmentation threshold value of a ferrographic image is difficult to select in oil monitoring, a self-adaptive ferrographic image segmentation algorithm based on difference quotient was introduced. Firstly, the ferrographic abrasive particle image was converted into three-dimensional grey histogram and then a slice analysis was made on it; then, by introducing Newton interpolation polynomial, the pixel number obtained from different slices was took as interpolating point of slice grayscale-frequency curve; the first kind of acceptable function and the second kind of acceptable function were established based on difference quotient, and two kinds of errors were identified by combination of experimental data. The minimum gray value which simultaneously

收稿日期:2016-11-14;修订日期:2017-01-16.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51421004, No. 51365051);教育部新世纪优秀人才支持项目(No. NCET-13-0461)

satisfied the two kinds of errors was selected as segmentation threshold value. Finally, segmentation experiments on different types of ferrographic images and ferrographic images with Gaussian noise and salt & pepper noise were conducted to compare the performance of proposed algorithm and three classical algorithms including iterated thresholding method, Otsu algorithm and maximum entropy. The experimental result indicates that the proposed algorithm is rarely interfered by noise and its average false positive rate and average omission rate is overall superior to other three algorithms. Through conducting feature extraction on ferrographic image and identification by support vector machine, it can be found that the proposed method has the highest identification accuracy rate on three faulted abrasive particles, which reaches 82.86%. Although there are no obvious advantages on operation time, but the method has optimal comprehensive property and can meet the requirement for making a self-adaptive segmentation on ferrographic image in the process of oil monitoring.

Key words: oil monitoring; ferrographic image; different quotient; image segmentation

1 引言

图像分割是图像分析和图像理解的基础^[1],在机器视觉、模式识别、医学图像处理、遥感图像分割等领域有着广泛应用^[2]。其中,基于阈值的图像分割技术以其简单、高效、便于理解的特性而得到广泛的研究与应用。经典的阈值分割算法主要包括迭代阈值法(Iterative Thresholding, IT)、最大类间方差法(Otsu法)以及最大熵法(Maximum Entropy, ME)^[3]等。图像分割不精确会导致的目标信息缺失或大量噪声的引入,都会给后续的信息提取及目标识别带来诸多不便^[4]。

油液分析广泛用于低速重载、往复运动机械设备的故障监测^[5]。由于磨粒能够反映摩擦系统时变特征的系统输出,故通过对磨粒做定性及定量分析,可获取设备的磨损信息,从而实现磨粒和磨损状态的自动识别及其在工业检测中的应用,这是当前油液分析技术研究的热点。铁谱分析技术是一种最主要的油液分析方法^[6],在预处理环节需要对图像进行二值化分割,将磨粒从背景中分割出来,便于提取铁谱片上的磨粒信息及进行后续处理^[7]。目前铁谱图像分割主要采用灰度阈值法和Otsu算法^[5]。灰度阈值法根据铁谱图像的灰度直方图分布选择分割阈值,虽简单易行,但需要人工参与且依赖经验,导致分割效率较低且分割结果因人而异。Otsu算法在图像灰度直方

图有双峰但无明显低谷或者双峰与低谷都不明显时,都能得到较为满意的结果^[8],然而,铁谱图像背景色彩单一,其灰度直方图通常呈单峰,导致Otsu算法在处理铁谱图像时的分割效果不佳。

为了实现铁谱图像自适应精准分割,本文提出一种铁谱图像自适应分割方法。该方法利用铁谱图像的三维信息,在差商的基础上构建误差接受函数,实现铁谱图像的二值化分割。对大量铁谱图像以及添加噪声后的图像进行二值化分割,分别从定性定量角度,与迭代阈值法、Otsu法以及最大熵法等经典图像分割算法做对比,以验证本方法在分割精度以及抗噪能力上的优越性。同时,对分割所得的铁谱图像进行特征提取以及故障磨粒识别,从铁谱分析处理的整个技术体系评价本文方法对识别结果的影响。

2 原理

2.1 差商的概念

假设 $f(x)$ 是具有复杂表达式的实函数,且已知 $f(x)$ 在某个区间 $[a, b]$ 上具有 $n+1$ 个互异点 $(x_0, f(x_0)), (x_1, f(x_1)), \dots, (x_n, f(x_n))$, 则可用一个比较准确且易于计算的近似函数代替原来的函数^[9], 使得:

$$P(x_i) = f(x_i) (i=0, 1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

其中: $P(x)$ 为插值多项式, $f(x)$ 为被插值函数, x_0, x_1, \dots, x_n 为插值点, $[a, b]$ 为插值区间。若用 $L_n(x)$ 表示以 $\{(x_i, f(x_i))\} (i=0, 1, 2, \dots, n)$ 为插值数据点的 n 次 Lagrange 形式的插值多项式, 则

可表示为:

$$L_n(x) = \alpha_0 + \alpha_1(x - x_0) + \dots + \alpha_n(x - x_0) \dots (x - x_{n-1}), \quad (2)$$

当 $x_i \neq x_j (i \neq j)$ 时, 由插值条件可得:

$$\begin{cases} \alpha_0 = f[x_0] \\ \alpha_1 = f[x_0, x_1] \\ \alpha_2 = f[x_0, x_1, x_2] \\ \vdots \\ \alpha_n = f[x_0, x_1, x_2, \dots, x_n] \end{cases} \quad (3)$$

由此, 可得 Newton 插值多项式:

$$N_n(x) = f[x_0] + f[x_0, x_1](x - x_0) + \dots + f[x_0, x_1, \dots, x_n](x - x_0) \dots (x - x_{n-1}), \quad (4)$$

其中: $f[x_0]$ 为零阶差商, $f[x_0, x_1]$ 为一阶差商, $f[x_0, x_1, x_2, \dots, x_n]$ 为 n 阶差商。差商的定义如下:

函数 $f(x)$ 在互异点 x_i, x_j 处的一阶差商为:
 $f[x_i, x_j] = (f_{x_i} - f_{x_j}) / (x_i - x_j)$. (5)

函数 $f(x)$ 在互异点 x_i, x_j, x_k 处的二阶差商为:

$$f[x_i, x_j, x_k] = (f[x_i, x_j] - f[x_j, x_k]) / (x_i - x_k). \quad (6)$$

一般的, 函数 $f(x)$ 在 $n+1$ 个互异点上的 n 阶差商是函数 $f(x)$ 的 $n-1$ 阶差商的差商^[10]。

2.2 铁谱磨粒图像自适应分割方法

针对铁谱磨粒图像背景颜色单一及灰度直方图通常呈单峰^[11]的特点, 本文提出自适应铁谱图像分割方法, 其处理流程如图 1 所示。

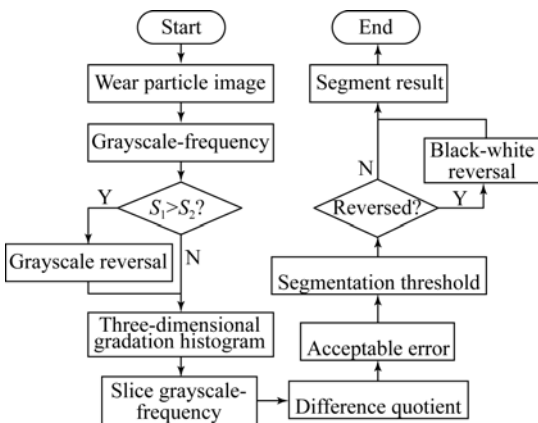


图 1 自适应分割方法处理流程图

Fig. 1 Flowchart for self-adaptive segmentation method

具体的处理步骤为:

(1) 从铁谱图像采集系统中获取彩色铁谱图

像, 对其进行灰度化处理, 并统计每一灰度值下的像素点总数, 绘制灰度-频数曲线。

(2) 以灰度-频数曲线峰值对应的灰度值 t 为分割线, 分别计算:

$$S_1 = \sum_{i=0}^{t-1} n_i; S_2 = \sum_{i=t+1}^{255} n_i, \quad (7)$$

其中 n_i 表示灰度值为 i 的像素点个数。

(3) 判断 S_1 和 S_2 大小。若 $S_1 > S_2$, 则对灰度图像进行灰度翻转, 即 $i_t = 255 - i$; 否则不对其进行处理。上述 i 表示原始图像灰度值, i_t 表示翻转之后图像的灰度值。

(4) 在步骤(3)基础上将灰度值作为纵坐标, 绘制三维灰度直方图, 并对其做切片处理, 统计每一灰度值切片与三维直方图相交像素点的个数。计算方法如下:

$$S_k = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (k = 0, 1, 2, \dots, 255), \quad (8)$$

其中: S_k 是灰度值为 k 时作切片得到的像素点数, m, n 分别表示灰度图像像素点的行数和列数, x_{ij} 表示像素点的值。当切片与三维直方图相交时 $x_{ij} = 1$, 否则 $x_{ij} = 0$ 。

(5) 根据不同切片所得的频数绘制切片灰度-频数曲线, 并根据差商性质在其基础上绘制两类可接受函数曲线 $F_x = f[x_i, x_j]$ 及 $G_x = 2f[x_i, x_j, x_k]$ 。

(6) 以曲线 $F_x = f[x_i, x_j]$ 最小值所对应的灰度值 x_0 为搜索起点, 并将对应的两类误差分别设置为 ϵ_1 和 ϵ_2 。若满足:

$$\begin{cases} F_x = |f_{x_n} - f_{x_{n+1}}| \leq \epsilon_1 * m * n \\ G_x = |F_{x_n} - F_{x_{n+1}}| \leq \epsilon_2 * m * n \end{cases}, \quad (9)$$

则搜索终止, 求得可接受解 $x^* = x_n$ 。否则继续执行步骤(6), 直至满足上述条件。

(7) 以步骤(6)所得阈值 x_n 对图像进行二值化分割。若该图像在步骤(3)中经历过灰度翻转处理, 则在二值化分割后需对其进行二值翻转处理。

3 实验结果及分析

本文通过不同类型的铁谱磨粒图像来验证所提方法的有效性。实验图像 (1 200 pixel × 1 600 pixel) 均来自铁谱图像采集系统, 如图 2 所

示。实验过程中,为了更好地表现细节部分,对图像进行缩放处理,缩放后的图像为 600 pixel×800 pixel×256 的灰度图。



图 2 铁谱磨粒图像采集系统

Fig. 2 Acquisition system for ferrographic-image

3.1 磨粒图像自适应分割

选取 4 幅磨粒图像作为处理对象,如图 3(彩图见期刊电子版)所示,4 幅图像分别代表不同背景颜色、不同污染程度以及不同磨粒类型的铁谱图像。以图 3(b)为例,对具体过程进行说明。

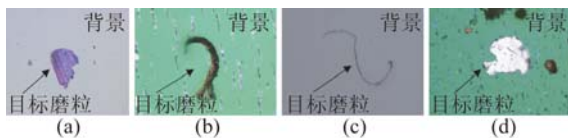


图 3 4 种典型磨粒图像

Fig. 3 Four typical wear particle images

图 3(b)的灰度-频数曲线如图 4 所示。为便于后续分割处理,需保证磨粒像素灰度值大于背景像素灰度值,因此需要按照公式(7)计算 S_1 和 S_2 的大小。图 4 中 $S_1 > S_2$ 表明磨粒主体部分的灰度值小于背景灰度值,需对其进行灰度翻转处理。

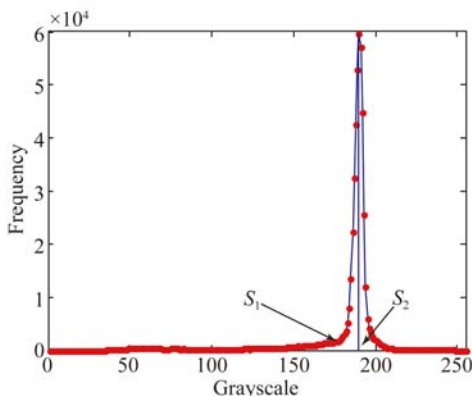


图 4 灰度-频数曲线

Fig. 4 Grayscale-frequency curve

经灰度翻转后的三维灰度直方图如图 5(彩图见期刊电子版)所示。对图 5 中的三维灰度直方图做切片处理,A、B、C 为三维直方图在不同灰度值处的切片。按照式(8)计算每一灰度值下的频数,得到图 6 所示的切片灰度-频数曲线,图 6 中的切片 A、B、C 与图 5 中切片 A、B、C 一一对应。将图 5 中离散点 $(x_i, f(x_i)) (i=0, 1, 2, \dots, 255)$ 看作是切片灰度-频数曲线的一组插值点,采用 Newton 插值多项式进行插值,则图 6 中曲线的 n 次插值多项式可用式(4)表示。为求取合适的分割阈值,对图 6 中 $a、b、c$ 3 点做放大处理,其中 Δh_1 和 Δh_2 分别表示 $a、b$ 和 $b、c$ 之间的纵坐标之差, Δx_1 和 Δx_2 分别表示 $a、b$ 和 $b、c$ 之间的横坐标之差,由于 $a、b、c$ 具有相邻的灰度值,则 $\Delta x_1 = \Delta x_2 = 1$,根据差商的定义有: $f[x_a, x_b] = -\Delta h_1; f[x_b, x_c] = -\Delta h_2; f[x_a, x_b, x_c] = (\Delta h_2 - \Delta h_1)/2$ 。

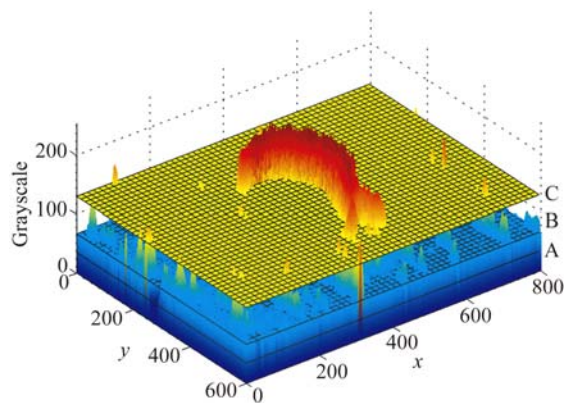


图 5 三维灰度直方图

Fig. 5 Three-dimensional grayscale histogram

差商本身不具有任何物理意义^[12],本文中 Δh_1 和 Δh_2 对应的纵坐标为频数,因此一阶差商 $f[x_a, x_b] = -\Delta h_1$ 表示阈值 x_b 比阈值 x_a 分割所得磨粒像素总数少 Δh_1 。同理, $f[x_b, x_c] = -\Delta h_2$ 表示阈值 x_c 比阈值 x_b 分割所得磨粒像素总数少 Δh_2 。因此,第一类可接受函数 $F_x = f[x_i, x_j]$ 的物理意义为:相邻两灰度值 x_i 与 x_j 作为分割阈值所得磨粒像素点的变化。当分割阈值在 x_a, x_b 之间变化,与分割阈值在 x_b, x_c 之间变化时,磨粒像素点两次变化的波动为 $\Delta h_2 - \Delta h_1 = 2f[x_a, x_b, x_c]$ 。第二类可接受函数 $G_x = 2f[x_i, x_j, x_k]$ 表示的物理意义为:相邻两第一类可接受函数的波动大小。

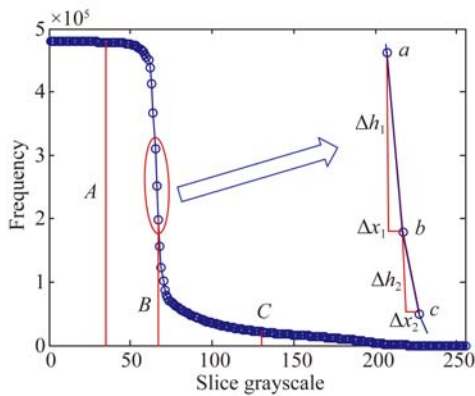


图 6 切片灰度-频数曲线

Fig. 6 Grayscale-frequency curve for slice

分别以灰度值 A、B、C 作为分割阈值对图 3(b)进行分割,分割结果如图 7 所示。由图 7 可知,从 A 至 C,随着灰度值的增大,白色背景像素点被错误划分为黑色磨粒像素点的个数在不断减少。结合图 5 可以看出,当分割阈值在 A 至 B 之间变化时,由于该段灰度直方图已被完全填充,无法分割出磨粒形态特征,因此,为了缩小分割阈值的搜索区间,需要选择合适的阈值搜索起点;而当分割阈值在 B 至 C 之间变化时,虽然可以得到磨粒轮廓外形,但随着分割阈值的变化,得到的分割结果也存在差异。因此,为了得到最佳分割阈值,还需要确定合适的搜索终止条件。



(a)分割阈值 A (b)分割阈值 B (c)分割阈值 C
(a)Threshold A (b)Threshold B (c)Threshold C

图 7 不同阈值下的分割结果

Fig. 7 Segmentation results under different thresholds

绘制两类可接受函数 $F_x = f[x_i, x_j]$ 及 $G_x = 2f[x_i, x_j, x_k]$ 的变化曲线,如图 8 所示。从图 6 可以看出,切片灰度-频数曲线经历了“密集—稀疏—密集”的过程,在相同的变化区间内,图 8 的两类接受函数变化曲线经历了“平缓—波动—平缓”的变化过程,这与图 7 中“背景—过渡—磨粒”的分割结果一一对应。因此,为了缩小分割阈值搜索区间,选择第一类可接受函数 $F_x = f[x_i, x_j]$ 最小值对应的灰度值为阈值搜索起点。

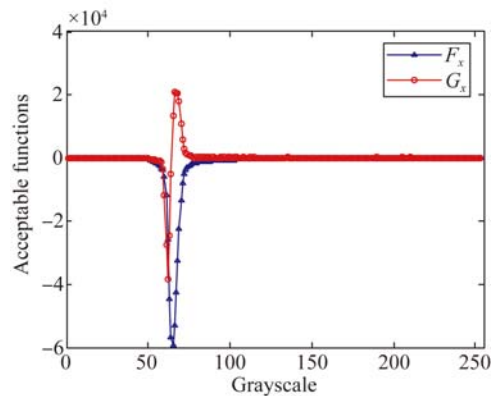


图 8 可接受函数的变化曲线

Fig. 8 Curves of two kinds of acceptable functions

由式(9)可知, $\epsilon_1 = F_x / (m * n)$, $\epsilon_2 = G_x / (m * n)$, 结合图 8 绘制的两类可接受误差曲线,为表现细节,图 9 仅列举了两类可接受误差 ϵ_1 及 ϵ_2 在灰度值为 [70, 150] 内的变化情况。

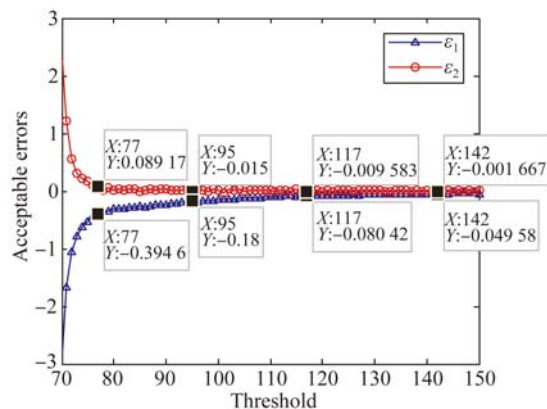


图 9 两类可接受误差的变化曲线

Fig. 9 Curves of two kinds of acceptable errors

当两类可接受误差 (ϵ_1, ϵ_2) 选取的迭代终止条件不同时,得到的分割阈值如式(10)所示:

$$T = \begin{cases} 77, & \text{if } (\epsilon_1, \epsilon_2) = (0.40\%, 0.10\%) \\ 95, & \text{if } (\epsilon_1, \epsilon_2) = (0.20\%, 0.02\%) \\ 117, & \text{if } (\epsilon_1, \epsilon_2) = (0.10\%, 0.01\%) \\ 142, & \text{if } (\epsilon_1, \epsilon_2) = (0.05\%, 0.005\%) \end{cases} \quad (10)$$

图 10 列举了分割阈值依次为 77、95、117、142 的分割结果。

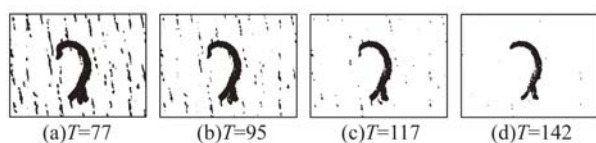


图 10 不同阈值下的分割结果

Fig. 10 Segmentation results under different thresholds

通过对大量不同铁谱图像进行枚举分析发现,将第一类可接受误差和第二类可接受误差分别设置为 $\epsilon_1 = 0.1\% * (m * n)$, $\epsilon_2 = 0.01\% * (m * n)$ 时,可实现不同铁谱磨粒图像的准确分割。因此,当两类可接受函数 $F_x = f[x_i, x_j]$ 及 $G_x = 2f[x_i, x_j, x_k]$ 满足上述 ϵ_1 和 ϵ_2 时,搜索终止。

为验证本文算法对铁谱磨粒图像的分割效果,采用迭代阈值法、Otsu 法、最大熵法以及本文算法对图 3 中 4 幅磨粒图像进行分割,其分割后的结果如图 11 所示(从上到下分别为迭代阈值法、Otsu 法、最大熵法及本文算法的结果)。从图 11 中不难看出:Otsu 法和最大熵法的分割结果中背景气泡及杂质较多,3 种经典算法对于图 3(d)的分割效果都不佳,而本文方法对于不同类型的磨粒,均可以取得较好的分割效果。

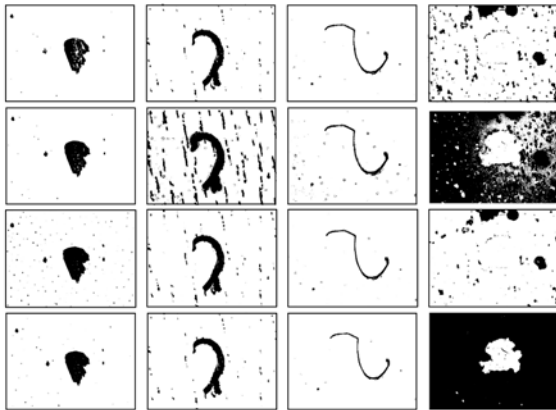


图 11 4 种算法的分割结果

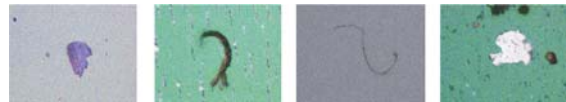
Fig. 11 Segmentation results of four different algorithms

3.2 噪声磨粒图像自适应分割

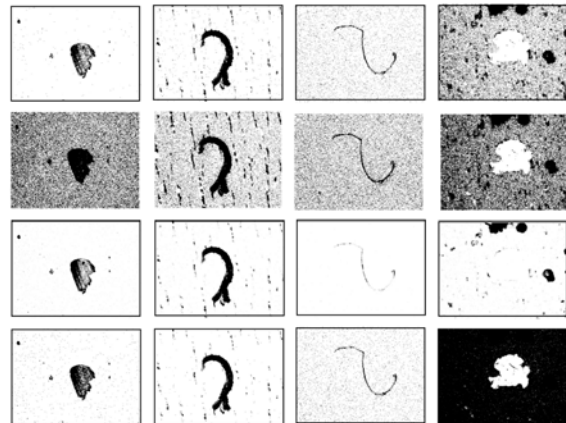
在数字图像生成、传输和存储的过程中,容易产生噪声^[12]。因此需要分析算法的抗噪性能,采用本文方法对添加高斯噪声和椒盐噪声的图像进行自适应分割。在图 3 上添加均值为 0,方差为 0.01 的高斯噪声,如图 12(a)所示;添加噪声密度为 5% 的椒盐噪声,如图 13(a)所示。对两类噪声图像的分割结果分别如图 12(b)和 13(b)所示,从上至下分别为采用迭代阈值法、Otsu 法、最大熵法以及本文算法的结果。

由图 12(b)可见,添加高斯噪声后,Otsu 法的分割结果中噪点严重,虽能明显看出磨粒与背景像素的差异,但过多的噪点将给后续特征提取带来困难。最大熵法的分割结果中虽然噪点较少,但存在较多磨粒像素被误分割为背景的情况,造成磨粒信息缺失。迭代阈值法对前 3 幅图像的分割结果与

本文算法结果较为接近,但对于图 3(d)存在分割错误。4 幅图的图像分割结果表明:本文算法对高斯噪声的抗噪能力更好。由图 13(b)可见,添加椒盐噪声后,迭代阈值法和 Otsu 法已无法得到正确的分割结果。最大熵法分割结果较其他几种方法噪点较多,背景上的气泡或杂质等均无法得到正确分割。图 13 中 4 幅图像的分割结果表明:本文算法对椒盐噪声的抗噪能力更好。

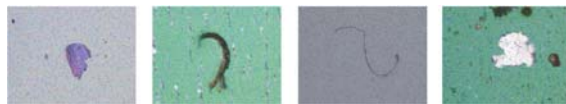


(a)添加高斯噪声的磨粒图像
(a)Wear particle images with Gaussian noise

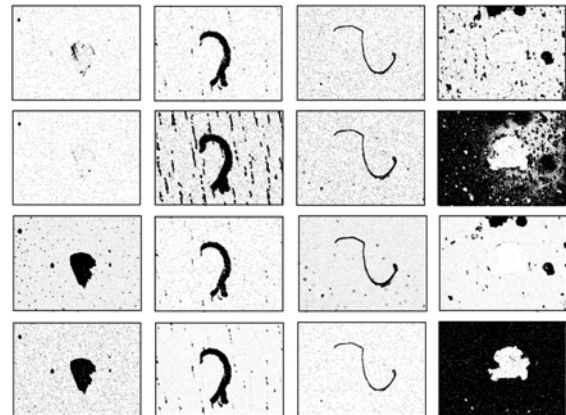


(b)4 种算法的分割结果
(b)Segmentation results using four different algorithms
图 12 图 3 添加高斯噪声分割实验

Fig. 12 Segmentation experiment by adding Gaussian noise to Fig. 3



(a)添加 5% 椒盐噪声的磨粒图像
(a)Wear particle images with 5% salt-pepper noise



(b)4 种算法分割结果对比
(b)Segmentation results using four different algorithms
图 13 图 3 添加椒盐噪声分割实验

Fig. 13 Segmentation experiment by adding salt-pepper noise to Fig. 3

3.3 定量对比分析

上述实验通过比较分割后图像质量,验证了本文算法的优越性。下面将从时间复杂度、运算时间、误检率及漏检率几方面来定量比较各分割算法的优劣。

3.3.1 时间复杂度

迭代阈值法、Otsu 法以及最大熵法均属于一维直方图分割算法,它们的时间复杂度主要在构造直方图、选取阈值以及利用阈值指导分割方面。对于一幅大小为 $M \times N$,灰度级为 L 的图像,3 种算法的时间复杂度均为 $O(M \times N) + O(L^2)$ 。而本文算法是在三维直方图的基础上做分割,无论是确定阈值搜索起点及还是确定阈值终点时,均需对 L 个点进行运算,因此其时间复杂度为:

$$O(M \times N) + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (L + L) = O(L \times M \times N)。$$

3.3.2 运算时间

表 1 列举了 4 种算法对图 3、图 12(a)、图 13(a)做图像分割的运算时间的平均值。实验用计算机配置为 Inter(R) Core(TM) i3-4150 CPU 3.50 GHz,测试环境为 Windows8.1,编程环境为 MATLAB R2012a。从表 1 可以看出,本文算法的运算时间与 3.3.1 时间复杂度的计算结果一致,本文算法虽较其余 3 种经典算法的耗时长,但仍然在可接受范围内,基本达到工程应用要求。

表 1 不同算法平均运行时间

Tab.1 Average running times of different algorithms (s)

算法	图 3	图 12(a)	图 13(a)
IT	0.213 4	0.271 6	0.273 2
Otsu	0.173 8	0.192 0	0.195 1
ME	0.477 4	0.512 7	0.523 7
本文方法	0.606 4	0.612 0	0.621 7

3.3.3 误检率及漏检率

误检率(FPR)指原本为背景却被分割为目标像素的像素比率。漏检率(FNR)指原本为目标却被分割为背景的像素比率。假设磨粒图像 I 在理想情况下的分割结果为 R ,其中 R_b 表示分割后的背景区域, R_f 表示分割后的磨粒区域。采用上述分割算法对图像 I 进行分割的结果为 U ,其中

U_b 表示分割后背景区域, U_f 表示分割后磨粒区域。平均误检率(FPR)和平均漏检率(FNR)的计算式如下:

$$FPR = \frac{|U_f \cap R_b|}{|R_b|} \times 100\%, \quad (11)$$

$$FNR = \frac{|U_b \cap R_f|}{|R_f|} \times 100\%. \quad (12)$$

采用上述 4 种算法分别对图 3、图 12(a)和图 13(a)进行图像分割,并计算 4 幅图像的 FPR 和 FNR,结果见表 2。从表 2 可以看出,IT 法在处理图 3 时漏检率小于本文算法,且在处理图 13(a)时误检率小于本文算法。但评价算法优劣时,误检率和漏检率不可单独判断,需同时考虑。观察表 2 不难看出,综合考虑误检率及漏检率时,本文方法的结果要优于其余 3 种算法,这与上文定性分析结果一致。

表 2 不同算法误检率和漏检率

Tab.2 FPRs and FNRs using different algorithms

图像	指标	IT	Otsu	ME	本文方法
图 3	FPR	0.258 4	6.99×10^{-4}	0	0
	FNR	0.135	2.629 6	1.725 3	0.351 8
图 12(a)	FPR	1.051	1.082 3	0.336 7	0.197 8
	FNR	16.14	25.393	18.506	11.163
图 13(a)	FPR	0.249	0.581 9	0.823 9	0.407 3
	FNR	19.74	18.713	13.338	10.538

3.4 铁谱磨粒图像识别

铁谱磨粒图像二值化分割问题,属于铁谱图像预处理环节,本文将该方法放到整个图像处理技术体系中,以评价本文方法对磨粒图像处理结果的影响。选取 3 种不同类型的故障磨粒图像,包括滑动磨粒、切削磨粒以及氧化物磨粒。从每种故障磨粒图像中各选取 20 个样本,采用上述 4 种不同分割算法对其进行二值化分割,采用相同滤波方法滤波后提取形态特征。

如图 14 所示,从左至右依次为滑动磨粒、切削磨粒以及氧化物磨粒,从上至下依次为原始磨粒图像,采用本文方法做二值化分割后的图像以及滤波后图像。从图中可以看出,滤波后磨粒图像不仅滤除了气泡以及背景,而且较完整地保留了磨粒的几何外形。对 3 种故障磨粒图像提取 5 种形态特征,包括磨粒面积百分比、长短轴比、等效直径、圆度以及矩形度,其特征提取结果如表 3 所示。

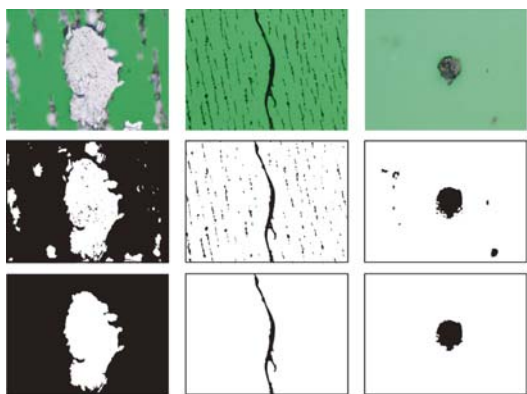


图 14 3 种不同类型磨粒图像的分割及滤波结果

Fig. 14 Segmentation and filtering results of three typical wear particle images

表 3 图 14 中磨粒形态特征

Tab. 3 Morphological features of wear particles in Fig. 14

特征	图 14 左	图 14 中	图 14 右
磨粒面积百分比	0.195 7	0.024 1	0.04 6
长短轴比	1.673 3	5.478 9	1.180 7
等效直径	345.838 6	72.462 7	86.297 0
圆度	0.623 8	0.149 3	0.719 1
矩形度	0.145 1	0.038 8	0.341 4

从上述 3 种故障磨粒图像各选取 20 组,从每种故障磨粒中随机选取 10 组作为训练样本,利用 SVM(Support Vector Machine)作为分类器识别剩余的 10 组样本,为了更加客观地比较识别结

参考文献:

[1] 张新明,尹欣欣,涂强. 动态迁移和椒盐变异融合生物地理学优化算法的高维多阈值分割[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10):2943-2949.
ZHANG X M, YIN X X, TU Q. High-dimensional multilevel thresholding based on BBO with dynamic migration and salt & pepper mutation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):2943-2949. (in Chinese)

[2] 唐庆菊,刘俊岩,王扬,等. 基于模糊 C 均值聚类和 Canny 算子的红外图像边缘识别与缺陷定量检测[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(9):274-278.
TANG Q J, LIU J Y, WANG Y, et al.. Infrared image edge recognition and defect quantitative determination based on the algorithm of fuzzy C-means clustering and Canny operator[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(9):274-278. (in Chinese)

果,上文提到的 4 种分割方法各自独立运行,表 4 中的识别结果为各算法在 MATLAB 中独立运行 10 次后的平均值。从识别结果来看,本文算法的识别准确率要高于其他几种经典算法。由此可以看出,较好的二值化分割结果对磨粒图像后续的精处理十分重要。

表 4 采用不同分割算法的 SVM 识别结果

Tab. 4 SVM recognition results based on different segmentation algorithms

分割方法	IT	Otsu	ME	本文算法
准确率/%	73.33	80.71	74.28	82.86

4 结 论

本文根据铁谱图像处理的要求,提出一种自适应的铁谱磨粒图像二值化分割方法。介绍了自适应铁谱图像分割方法的具体处理流程,并研究了最佳分割阈值的搜索起点及搜索终止条件。采用迭代阈值法、Otsu 法、最大熵法以及本文算法分别对原始磨粒图像、高斯噪声图像以及椒盐噪声图像做分割处理,并从定性分析和定量对比的角度验证了本文方法的优越性。将本文方法用于故障磨粒识别,其准确率可达 82.86%,优于其他传统方法。结果证明本文方法综合性能最优,具有较高的工程实用价值。

[3] MEHMET S, BULENT S. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1), 146-165.

[4] 王冬冬,张炜,金国锋,等. 尖点突变理论在红外热波检测图像分割中的应用[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(3):1009-1015.
WANG D D, ZHANG W, JIN G F, et al.. Application of cusp catastrophic theory in image segmentation of infrared thermal waving inspection [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(3):1009-1015. (in Chinese)

[5] 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 SH Q, DAI X J. Wear particle image segmentation method based on the recognition of background color [J]. *Tribology*, 2007, 27(5):467-471. (in Chinese)

- [6] 李绍成,左洪福,张艳彬. 油液在线监测系统中的磨粒识别[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 589-595.
LI SH CH, ZUO H F, ZHANG Y B. Wear debris recognition for oil on-line monitoring system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(3): 589-595. (in Chinese)
- [7] WEI Y, CHIN K S, MENG H, *et al.*. Shape classification of wear particles by image boundary analysis using machine learning algorithms [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2016, 72-73: 346-358.
- [8] 袁小翠,吴禄慎,陈华伟. 基于 Otsu 方法的钢轨图像分割 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(7): 1772-1781.
YUAN X C, WU L SH, CHEN H W. Rail image segmentation based on Otsu threshold method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(7): 1772-1781. (in Chinese)
- [9] 甄西丰. 差商与牛顿插值多项式的承袭性算法 [J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(4): 35-38.
ZHEN X F. Algorithms with heredity for difference quotient and Newton interpolation polynomial [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 2000, 28(4): 35-38. (in Chinese)
- [10] 王兴华,王何宇. 数值差商公式研究 [J]. 中国科学 A 辑数学. 2005, 35(6): 712-720.
WANG X H, WANG H Y. A study for formulas of numerical difference quotient [J]. *Science in China Ser. A Mathematics*, 2005, 35(6): 712-720. (in Chinese)
- [11] GWIDON P S, GWIDON W S, PAWEL P. Automated classification of wear particles based on their surface texture and shape features [J]. *Tribology International*, 2008, 41(1): 34-43.
- [12] 赵东,赵宏伟,于繁华. 动态多目标优化的运动物体图像分割 [J]. 光学精密工程, 2015, 23(7): 2109-2116.
ZHAO D, ZHAO H W, YU F H. Moving object image segmentation by dynamic multi-objective optimization [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(7): 2109-2116. (in Chinese)

作者简介:



徐斌(1991—),男,湖北孝感人,硕士研究生,2014年于三峡大学获得学士学位,主要从事油液图像处理及状态监测方面的研究。E-mail: binxu0102@gmail.com

导师简介:



温广瑞(1976—),男,陕西西安人,教授,博士生导师,1998年、2001年、2006年于西安交通大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事机械运行状态监测与故障诊断方面的研究。E-mail: grwen@mail.xjtu.edu.cn



张志芬(1984—),女,山西太谷人,博士后,讲师,2007年、2010年于兰州理工大学分别获得学士、硕士学位,2015年于上海交通大学获得博士学位,主要研究方向为焊接质量监控及缺陷预测。E-mail: zzf919@mail.xjtu.edu.cn