

金属表面缺陷自适应分割算法*

马云鹏^{1,2}, 李庆武^{1,2}, 何飞佳^{1,2}, 刘艳^{1,2}, 席淑雅^{1,2}

(1. 河海大学物联网工程学院 常州 213022; 2. 常州市传感网与环境感知重点实验室 常州 213022)

摘要:金属表面缺陷的种类多、环境复杂度高, 现有的金属表面缺陷分割算法有效性低、适用范围窄, 为此提出一种金属表面缺陷自适应分割算法。该算法首先从8个方向对金属表面的灰度图像进行转换, 根据多幅图像灰度波动状况, 自适应地改变邻域灰度差分割算法中的阈值与步长对相应的图像进行分割, 最后利用PCA算法将多幅图像压缩至单幅图像。实验结果表明, 与现有的分割算法相比, 该算法不仅适用于多种类型的金属表面缺陷部分的分割, 而且分割准确度高。

关键词: 缺陷分割; 灰度波动; 邻域灰度差; PCA算法; 误分错误率

中图分类号: TH86 TP391.41 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Adaptive segmentation algorithm for metal surface defects

Ma Yunpeng^{1,2}, Li Qingqu^{1,2}, He Feijia^{1,2}, Liu Yan^{1,2}, Xi Shuya^{1,2}

(1. College of Internet of Things Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China;

2. Changzhou Key Laboratory of Sensor Networks and Environmental Sensing, Changzhou 213022, China)

Abstract: In complex environment, there are many kinds of defects on the surface of metal. Existing metal surface defect segmentation algorithm has the deficiencies of low efficiency and narrow application scope, to solve these problems, an adaptive segmentation algorithm for metal surface defects is proposed in this paper. In this algorithm, firstly, the gray-level images of the metal surfaces are transformed from eight directions. And then, according to the gray-level fluctuation of the multiple images, the threshold and step length in neighborhood gray level difference segmentation algorithm are adaptively changed, and corresponding image in each direction is segmented. Lastly, all the processed images are compressed to a single image with PCA algorithm. Experiment results indicate that compared with existing segmentation algorithms, the proposed algorithm not only can be applied to segment various kinds of metal surface defects, but also has high segmentation accuracy.

Keywords: defect segmentation; gray level fluctuation; neighborhood gray level difference; principal components analysis (PCA) algorithm; misclassification error rate

1 引言

相较于传统的检测方法, 利用机器视觉技术进行金属表面缺陷检测具有可靠性强、准确率高等优点, 可以大幅降低缺陷检测成本, 提高生产效率与产品质量。但该方法在工业非触性金属产品缺陷检测方面还未得到广泛的应用, 根本原因是金属表面缺陷种类多、环境复杂度高, 其主要表现形式及特点为以下几个方面^[1-5]。

1) 金属表面划痕。该类缺陷易出现在表面平整度

高、光泽度大的金属表面, 一般表现为数量较少的规律性摩擦痕迹, 该类缺陷的光学图像一般存在大量的反射光线和金属表面纹理。

2) 金属表面凹凸。该类缺陷主要是金属受到环境温度差、模具损坏等影响, 金属表面出现不规整的凹凸现象, 该类缺陷的光学图像一般存在金属表面亮度不均的现象。

3) 金属表面污点。该类缺陷在日常的生产过程中极易出现, 外界很多环境因素都会导致这类缺陷, 其表现形态没有规律, 不可预测, 该类缺陷往往会降低金属材料

的价值和可靠性。

4) 金属表面刮擦。与金属表面划痕不同,金属表面刮擦的表现形式是多条细微的摩擦痕迹密集地聚集在金属表面,金属表面的边缘位置往往最易出现刮擦。

5) 金属表面裂纹。受到外界温度、外力的影响,金属裂纹一般从表面开始向内部延伸,其表现形式为宽度不一的无规律纹理痕迹,该类缺陷的光学图像中,缺陷部分的亮度会根据裂纹的深度发生改变。

由于金属表面缺陷的种类多、复杂度高,现有的

金属表面缺陷分割算法大多都无法满足实际检测要求。例如,2013年,Padilla E等人^[1]提出了利用图像处理技术检测金属焊接接头裂纹,图像处理技术作为辅助工具有效描述了表面缺陷问题,但需借助复杂的仪器设备,导致其应用范围窄,实用性低;2015年,Yuan X. C.等人^[6]在全局自适应阈值分割算法领域提出一种改进的Otsu法,利用阈值加权提高了分割阈值的有效性,在灰度分布呈单峰状的金属表面图像缺陷分割方面取得了较好的效果,但该算法在灰度波动情况复杂的金属表面图像中的有效性较低;2015年,周鹏等人^[7]提出了基于剪切波和小波特征融合的金属表面缺陷识别方法,可有效应用于不同类型金属的表面缺陷识别,但训练过程需要大量金属表面缺陷样本图像,操作过程繁琐,实时性低。目前,金属表面缺陷分割算法较少,结合现有的工业图像分割常用的局部自适应算法和全局自适应算法,分析得到目前金属表面缺陷检测主要存在以下几个方面的问题^[2-4,8-9]:1) 当金属表面缺陷的灰度波动幅度小于金属拉丝或噪声灰度波动幅度时,全局自适应阈值分割算法易出现过分割或无法分割等问题;2) 局部自适应分割算法受到金属表面拉丝与噪声的影响较大,无法完成金属表面缺陷的分割;3) 现有的金属缺陷分割算法适用范围窄,分割效果有待提高。

针对上述问题,本文提出一种金属表面缺陷自适应分割算法,该算法既利用了多方向灰度的局部波动信息,同时借助了全局算法的整体协调性,在分割过程中自适应地改变分割阈值与步长,可以有效削弱金属表面的高反光和拉丝纹理等特性带来的影响,提升对金属表面图像中缺陷部分的分割效果。

2 金属表面缺陷分割

由于金属表面具有高反光和拉丝纹理特性,并且金属表面的缺陷包括划痕、污点、刮擦、凹凸和裂纹等多种形式,所以金属表面缺陷的图像经常是灰度分布不均衡的图像。如果仅凭借单一的绝对阈值来分割该图像,那么就无法避免金属拉丝特性与缺陷多样性带来的影响。单纯依靠灰度信号的“绝对性”对此类灰度分布不均衡

图像进行分割是不合适的^[10-12]。本文提出一种金属表面缺陷自适应分割算法,该算法首先从 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 方向对金属表面的灰度图像进行转换,再分别从 0° 、 45° 、 90° 方向对金属表面的灰度图像进行灰度波动分析,然后根据灰度波动分析结果自适应地改变阈值与步长对转换得到的多幅图像进行邻域灰度差分割处理,最后利用主成分分析法(principal component analysis, PCA)将多幅图像压缩至单幅图像。

2.1 多方向灰度波动分析

从直观角度上,图像可以看作像素灰度在二维空间的波动^[13]。对于单个像素,位于波峰的像素灰度相对较高,而位于波谷的像素灰度相对较低。对于金属表面图像,其图像的波峰波谷会受到金属表面拉丝的干扰。存在缺陷的局部区域,其对应像素点的像素值会出现部分偏高或者偏低的现象,在处理过程中,首先需要对金属表面的像素点分布及像素值情况进行学习与分析。

如图1所示,多方向灰度波动分析定义为对获取的金属表面图像分别从 0° 、 45° 、 90° 的方向分析其灰度值分布的情况,对分布的情况进行分析后,自适应地得到灰度邻域差算法中的步长与阈值等参数。

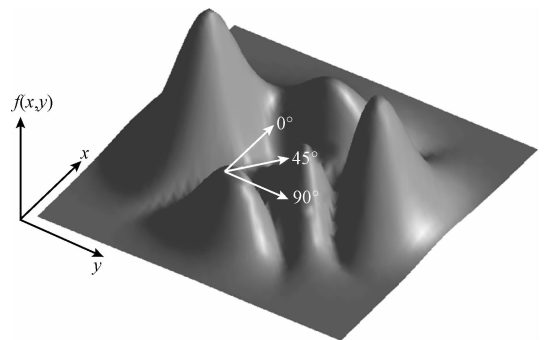


图1 灰度波动变换示意图

Fig. 1 Schematic diagram of gray-level-fluctuating of an image

在每个方向上均可获得多组一维灰度曲线并确定其自适应阈值。其中,确定各方向自适应阈值的步骤如下。

1) 计算当前方向上所有的一维灰度分布曲线的均方差 K ,其中 $F(n)$ 为当前维灰度平均值, n 为当前维分布包含的像素点数量,定义 K 为:

$$K = \frac{\sum_{i=0}^n \sqrt{|F(i)^2 - F(n)^2|}}{n} \quad (1)$$

2) 选取均方差 K 值最大的一维灰度分布曲线作为当前方向上主分布曲线 $F_k(i)$, k 的取值为 0° 、 45° 、 90° ,图2所示为一维灰度变动示意图,其中 $F(i_2)$ 为当前为平均灰度值, $F(i_3)$ 为最大灰度值, $F(i_4)$ 为最小灰度值。

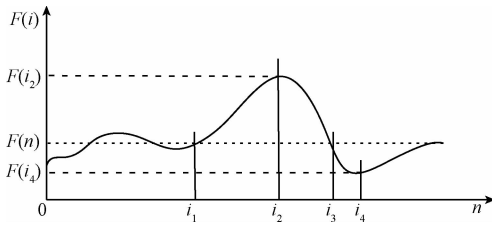


图2 一维灰度变动示意图

Fig. 2 The one dimensional gray-level-fluctuating of an image

3) 计算 $F(n)$ 与 $F(i)$ 的差值, 选取绝对值最大的差值 H , 标记当前像素点连续相邻区域像素值超过(或低于)平均灰度值 $F(n)$ 的像素点, 将该区域的步长记为 L , 例如, 图2中的步长 $L = i_3 - i_1$, $H = F(i_2) - F(n)$ 。

4) 根据 L 自适应地改变当前方向邻域灰度差分割的步长 J , 定义 J 如式(2)。

$$J = \begin{cases} 1, & L < n/3 \\ 2, & n/3 \leq L < 2n/3 \\ 3, & L \geq 2n/3 \end{cases} \quad (2)$$

根据 H 所在的标记区域, 自适应地改变当前方向邻域灰度差分割的阈值 G , 定义 G 如式(3)所示, 其中 k 和 m 分别为标记区域的起点与终点。

$$G = \frac{\sum_{i=k}^m |F(i) - F(n)|}{L} \quad (3)$$

2.2 邻域灰度差分割算法

针对金属表面图像的缺陷, 局部自适应分割算法机械地将图像划分为等大的子块并在子块内分割, 容易造成子块分割结果之间的不连贯, 误分错误率高。本文提出邻域灰度差分割算法, 首先通过灰度波动分析获取当前方向的邻域分割步长 J 与阈值 G , 然后利用灰度的局部波动信息, 同时借助全局算法的整体协调性对金属表面缺陷部分进行单方向分割处理。

经过2.1节中步骤, 可以获得金属表面图像单方向邻域灰度差分割算法的步长与阈值。例如, 若分别从 0° 、 45° 、 90° 、 125° 的方向对图像进行2.1节中4个步骤的

处理, 即可获得图像 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 方向邻域分割的步长 J 与阈值 G , 即可按式(4)对图像进行处理, 其中 $F(x, y)$ 为像素点 (x, y) 的像素值, i 和 j 可以根据分割方向取 0 、 1 、 -1 , 图像的边界点只对像素点存在的方向进行处理。

$$F(x, y) = \begin{cases} 1, & |F(x, y) - F(x + i \cdot L, y + j \cdot L)| > G \\ 0, & |F(x, y) - F(x + i \cdot L, y + j \cdot L)| < G \end{cases} \quad (4)$$

选取 0° 、 45° 、 90° 、 135° 、 180° 、 225° 、 270° 、 315° 方向对金属表面图像分别进行邻域灰度差分割, 可以得到二值化图像 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 、 T_5 、 T_6 、 T_7 、 T_8 。

2.3 PCA 法图像压缩

如果直接对 $T_1 \sim T_8$ 图像进行合成处理, 计算复杂度高, 细节信息保留度差。为了简化计算, 同时又在最大程度上保证分割效果, 采用PCA方法将8维向量 $\mathbf{T} = \{T_1, T_2, T_3, T_4, T_5, T_6, T_7, T_8\}$ 压缩至一维 $\{\mathbf{T}'\}$ [14]。PCA算法是一种数学变换方法, 它将给定的一组相关变量通过线性变换转成另一组不相关的变量, 其是在最小均方下寻找最能代表原始数据的投影, 从而达到对特征空间的降维。首先将 \mathbf{T} 的每个元素作为样本构成8维向量的样本矩阵 $\mathbf{X} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, n 为像素总数, 然后计算 \mathbf{X} 的均值向量 $\boldsymbol{\mu}$, 并用 $\boldsymbol{\mu}$ 中心化 \mathbf{X} :

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{X} - \boldsymbol{\mu} \mathbf{I}_{1 \times n} \quad (5)$$

再计算 $\hat{\mathbf{X}}$ 的协方差 \mathbf{C} , 并对 \mathbf{C} 进行SVD变换得到特征向量矩阵 $\mathbf{U} \{\xi_0, \xi_1, \dots, \xi_0\}$ 以及特征值 $\{\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_7\}$, 其中 $\lambda_0 > \lambda_1 > \dots > \lambda_7$, 则:

$$\mathbf{X}' = \mathbf{X}^T \xi_0 \quad (6)$$

式中: \mathbf{X}' 为压缩后的一维向量的样本矩阵, 将它转换到原始图像空间就可获得灰度波动矩阵 \mathbf{T}' , 该矩阵即可看作是压缩后的图像。PCA算法将图像从8维压缩到1维的过程中, 最大程度地保留了二值图像的原有信息, 同时降低了数据的维度。图3所示为4维图像压缩示意图, 其中 45° 与 225° 分割的阈值与步长参数相同, 但在分割过程中式(4)的参数 i 和 j 根据分割方向分别取 1 和 -1 。

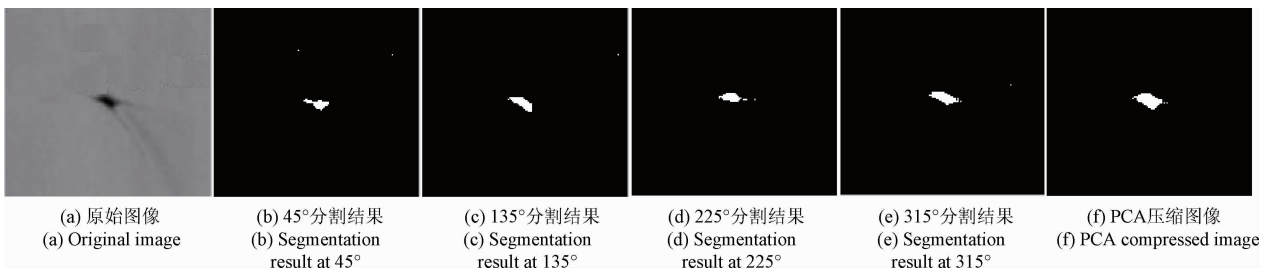


图3 金属表面图像多角度邻域灰度差分割与PCA图像压缩示意图

Fig. 3 The neighborhood gray level difference segmentation results of a metal surface image at multiple angles and the PCA compressed image

3 实验结果及分析

采用如下仿真实验环境对算法进行测试: Intel Corei5 CPU, 4 G 内存, MATLAB R2010a 编译环境。本算法的处理对象为存在缺陷的金属表面图像, 对此本文测试图库的选图原则如下:

- 1) 金属种类与其包含的缺陷种类复杂度高, 但不包含金属器件轮廓;
- 2) 金属表面图像可以具有高反光性与金属拉丝的纹理, 但无其他干扰。

由于目前图像分割研究领域中未能发现完全满足上述条件的公共测试库, 因此本文采用了自己构建的图像库。该库图像来源于使用相机拍摄的 35 幅金属表面缺陷图像, 以及从网络与文献中搜集的 20 幅金属表面缺陷图像。

3.1 分割效果对比实验

在对比算法的选择上, 首先选取二维 Otsu 全局算法^[15]作为全局分割算法的代表; Sauvola 方法^[16]是目前应用较为广泛的经典邻域法, 因此可以作为局部邻域法的代表; Yuan X. C. 等人提出一种改进的 Otsu 法^[6], 利用目标图像缺陷累积发生概率参数对分割阈值进行加权, 保证分割阈值的有效性, 在金属表面缺陷分割方面取得了较好的效果, 可以作为目前金属表面缺陷分割的代表。由于在近年发表的文献中还未发现有较全面的综述文章对大多数可见光金属表面缺陷图像分割算法进行对比和评判, 因此仅选择了上述 3 种各具代表性的算法作为本文方法的对比算法。图 4 所示的 5 行图片分别代表了 5

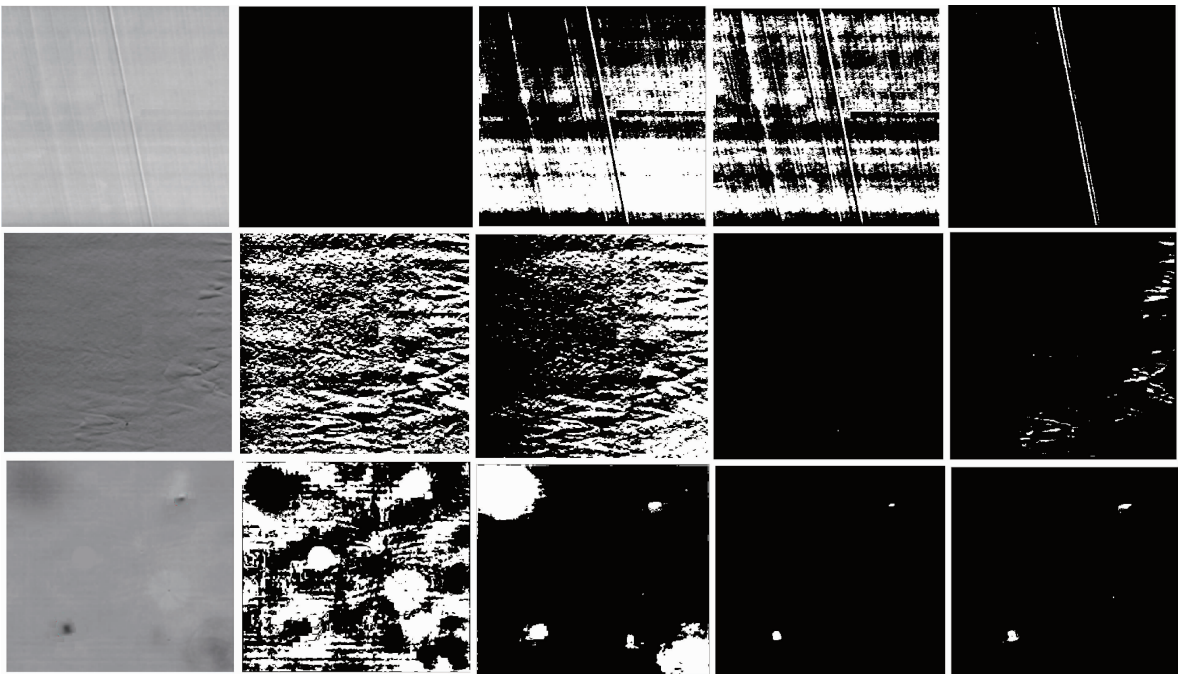
种金属表面缺陷类型, 其中第 1 行图片金属表面具有金属拉丝纹理, 但是沿着纹理方向有两条明显的金属划痕。在对比试验中 Sauvola 法无法完成金属表面缺陷分割; 二维 Otsu 法受到金属表面拉丝纹理与表面亮度的影响较大, 分割效果差; Yuan X. C. 等人提出的方法虽然消除了金属表面亮度的影响, 但效果与二维 Otsu 法效果近似; 本文方法可以消除金属表面亮度与金属拉丝纹理的影响, 分割效果较好。

在图 4 第 2 行图片中, 金属表面有明显的凸起缺陷。在对比试验中, Sauvola 法与 Yuan X. C. 等人提出的方法无法完成金属表面缺陷分割; 二维 Otsu 法分割结果中噪声过多; 本文方法可以完成金属表面缺陷分割, 但存在少许噪声。

在图 4 第 3 行图片中, 金属表面有明显的污点缺陷。在对比试验中, Sauvola 法无法完成金属表面缺陷分割; 二维 Otsu 法分割结果中噪声过多; Yuan X. C. 等人提出的方法可以完成金属表面缺陷分割, 但存在过分割的现象, 细节保留较差; 本文方法可以完成金属表面缺陷分割, 细节信息保留较好。

在图 4 第 4 行图片中, 分割图像进行取反处理, 金属表面边缘部分有轻微刮擦缺陷。在对比试验中, Sauvola 法、二维 Otsu 法、Yuan X. C. 等人提出的方法分割结果中噪声过多; 本文方法分割效果较好, 但存在过分割的现象。

在图 4 第 5 行图片中, 金属表面有明显的裂纹缺陷。在对比试验中, Sauvola 法与 Yuan X. C. 等人提出的方法无法完成金属表面缺陷分割; 二维 Otsu 法分割效果较好, 但存在少许噪声; 本文方法分割效果较好, 但部分细节信息丢失。



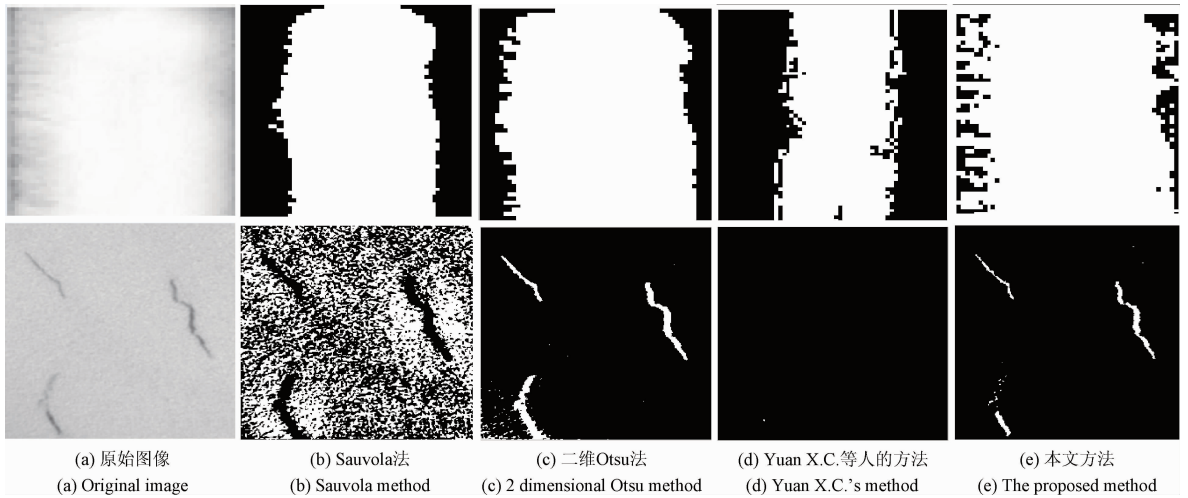


图4 金属表面缺陷分割实验结果

Fig.4 The metal surface defect segmentation experiment results

3.2 分割准确度与耗时分析

目前对图像分割质量的评判还没有一种合适的量化标准,一般依赖研究者的主观判断。现阶段文献中使用较多的标准是误分错误率 (misclassification error, ME)^[17],其数值按式(7)计算。

$$ME = 1 - \frac{|B_o \cap B_T| + |F_o \cap F_T|}{|B_o + F_o|} \quad (7)$$

式中: B_o 与 F_o 指图像标准二值掩码中的背景与前景,该掩码是按照研究人员的观察标准人工制作而成,图4中1~5行图像的标准掩码如图5所示。 B_T 与 F_T 为分割结果的背景与前景, $|\cdot|$ 为取集合元素总数操作。即 ME 等于分割结果与掩码之间交集的补集面积占总面积的比例,该值越低说明分割效果越好。尽管利用 ME 来衡量各算法的分割质量并不是非常准确,但是至少从侧面反映出了各算法的效果。



图5 图4中5幅图像的标准二值掩码图像

Fig.5 The standard binary mask images of the 5 images in Fig.4

5幅图像的分辨率分别为第1行图像345像素×315像素;第2行图像332像素×315像素;第3行图像327像素×300像素;第4行图像321像素×293像素;第5行图像

264像素×318像素。从表1可以看出,与Sauvola法、二维Otsu法、Yuan X. C. 等人法相比,本文算法可进行多种金属表面缺陷的分割,分割准确度高,但实时性还有待提高。

表1 本文算法与其他算法的ME值与耗时对比

Table 1 Comparison of ME value and CPU time consumption between the proposed algorithm and other algorithms

ME值/耗时	Sauvola法	二维Otsu法	Yuan法	本文方法
第1行图像	1/872	0.745 5/15	0.648 7/17	0.114 5/204
第2行图像	0.846 8/748	0.647 2/14	1/12	0.245 3/197
第3行图像	0.902 9/702	0.355 3/12	0.156 2/15	0.152 1/255
第4行图像	0.405 6/821	0.318 9/14	0.314 8/12	0.293 7/218
第5行图像	0.725 1/864	0.237 2/16	0.974 5/14	0.145 6/168

(ms)

4 结 论

针对金属表面图像缺陷分割问题,提出一种自适应分割算法,适用于多种类型的金属表面缺陷部分的分割,该算法首先从多个方向对金属表面的灰度图像进行转换,然后对多幅图像分别进行灰度波动分析,自适应地改变阈值与步长对图像进行邻域灰度差分割处理,最后利用 PCA 算法将多幅图像压缩至单幅图像。实验表明该算法能够对多种金属表面缺陷进行分割,有效地解决了金属表面图像缺陷分割问题。本文算法与其他算法相比,具有通用性好、分割准确度高等优点。但是也存在一些不足,例如:分割用时相比其他算法更长;在分割过程中,对于灰度变化不明显的金属表面图像容易出现细节信息丢失等问题。所以,如何提高算法的通用性与实时性,更加精确快速地完成分割任务,是下一步的研究重点。

参考文献

- [1] PADILLA E, CHAWLA N, SILIA L F, et al. Image analysis of cracks in the weld metal of a wet welded steel joint by three dimensional (3D) X-ray microtomography [J]. *Materials Characterization*, 2013, 83(3): 139-144.
- [2] 张静, 叶玉堂, 谢煜, 等. 金属圆柱工件缺陷的光电检测 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1871-1876.
ZHANG J, YE Y T, XIE Y, et al. Optoelectronic inspection of defects for metal cylindrical workpieces [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22 (7): 1871-1876.
- [3] 徐科, 周鹏, 杨朝霖. 基于光度立体学的金属板带表面微小缺陷在线检测方法 [J]. *机械工程学报*, 2013, 49(4): 25-29.
XU K, ZHOU P, YANG CH L. On-line detection technique of tiny surface defects for metal plates and strips based on photometric stereo [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(4): 25-29.
- [4] 张学武, 丁燕琼, 闫萍. 一种基于红外成像的强反射金属表面缺陷视觉检测方法 [J]. *光学学报*, 2011, 31(3): 104-112.
ZHANG X W, DING Y Q, YAN P. Vision inspection of metal surface defects based on infrared imaging [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(3): 104-112.
- [5] 唐莺, 罗飞路, 潘孟春, 等. 脉冲漏磁检测的三维场特征分析及缺陷分类识别 [J]. *仪器仪表学报*, 2009, 30(12): 2506-2510.
TANG Y, LUO F L, PAN M CH, et al. 3D magnetic field analysis and defect characterization of pulsed magnetic flux leakage field testing [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2009, 30 (12): 2506-2510.
- [6] YUAN X C, WU L SH, PENG Q J. An improved Otsu method using the weighted object variance for defect detection [J]. *Applied Surface Science*, 2015, 349(9): 472-484.
- [7] 周鹏, 徐科, 刘顺华. 基于剪切波和小波特征融合的金属表面缺陷识别方法 [J]. *机械工程学报*, 2015, 51(6): 98-103.
ZHOU P, XU K, LIU SH H. Surface defect recognition for metals based on feature fusion of shearlets and wavelets [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(6): 98-103.
- [8] 严刚, 沈中华, 陆建, 等. 利用 PVDF 检测金属表面缺陷的实验研究 [J]. *华中科技大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(增刊1): 134-137.
YAN G, SHEN ZH H, LU J, et al. Experimental research on detection of surface-breaking defects by PVDF transducer in metal [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology : Nature Science Edition*, 2007, 35(Suppl. 1): 134-137.
- [9] 李瑶, 王快社, 刘长瑞. 金属板材表面缺陷检测发展现状 [J]. *材料导报: 纳米与新材料专辑*, 2011, 25(2): 238-241.
LI Y, WANG K SH, LIU CH R. Development status of surface defects inspection for metal plants [J]. *Materials Review*, 2011, 25(2): 238-241.
- [10] 李丽娟, 徐尚龙, 秦杰. 基于图像处理技术的五金件表面缺陷检测研究 [J]. *工程设计学报*, 2011, 18(2): 134-138.
LI L J, XU SH L, QIN J. Research on hardware surface defects detection based on image processing techniques [J]. *Journal of Engineering Design*, 2011, 18(2): 134-138.
- [11] 秦雷, 刘俊岩, 龚金龙, 等. 超声红外锁相热像技术检测金属板材表面裂纹 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1123-1130.
QIN L, LIU J, GONG J L, et al. Testing surface crack defects of sheet metal with ultrasonic lock-in thermography [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(5): 1123-1130.
- [12] 王洋. 金属工件表面缺陷的图像处理技术研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
WANG Y. Research on defects on the metal surface based on image processing [D]. *Shenyang : Shenyang Ligong University*, 2012.
- [13] 魏巍, 申铨京, 千庆姬. 工业检测图像灰度波动变换自适应阈值分割算法 [J]. *自动化学报*, 2011,

37(8): 944-953.

WEI W, SHEN X J, QIAN Q J. An adaptive thresholding algorithm based on grayscale wave transformation for industrial inspection images [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2011, 37(8): 944-953.

- [14] 杜洪, 夏欣, 琚生根, 等. 基于 PCA 图像压缩算法研究与实现 [J]. *四川大学学报: 自然科学版*, 2014, 51(5): 009.

DU H, XIA X, JU SH G, et al, Image compression based on PCA [J]. *Journal of Sichuan University: Natural Science Edition*, 2014, 51(5): 009.

- [15] 汪海洋, 潘德炉, 夏德深. 二维 Otsu 自适应阈值选取算法的快速实现 [J]. *自动化学报*, 2007, 33(9): 968-971.

WANG H Y, PAN D L, XIA D S. A fast algorithm for two-dimensional Otsu adaptive threshold algorithm [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2007, 33(9): 968-971.

- [16] SAUVOLA J, PIETIKAKINEN M. Adaptive document image binarization [J]. *Pattern Recognition*, 2000, 33(2): 225-236.

- [17] SEZGIN M, SAUKUR B. Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004, 13(1): 146-168.

作者简介



马云鹏, 2015 年于河海大学获得学士学位, 现为河海大学博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理。

E-mail: yunpengma_hhu@163.com



李庆武(通讯作者), 分别于郑州大学获得学士学位、西安电子科技大学获得硕士学位、河海大学获得博士学位, 现为河海大学物联网工程学院副院长、教授、博士生导师, 主要研究方向为数字图像处理、信息获取与智能感知。

E-mail: li_qingwu@163.com

Li Qingwu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Zhengzhou University, his M. Sc. degree from Xidian University and his Ph. D. degree from Hohai University. He is currently a professor and Ph. D. supervisor in Hohai University and a vice dean of College of Internet of Things Engineering, Hohai University. His current research interest includes digital image processing, information acquisition, and intelligent sensing.