

基于鲁棒 Otsu 的红外无损检测缺陷分割算法

汪子君, 邱俨睿, 杨宏霄, 孙 磊

(电子科技大学 航空航天学院, 四川 成都 611731)

摘 要: 在红外无损检测获取的图像中, 缺陷区域与非缺陷区域所占面积比例悬殊, 且图像经过序列增强处理之后仍然存在阴暗区域, 导致缺陷分割准确性受损。为此, 结合局部阈值分割法的相对阈值思想, 提出一种基于鲁棒 Otsu 的缺陷分割算法。首先, 引入邻域均值与邻域总梯度作为表征像素点的所属类别与空间状态的重要参数。然后, 采用基于像素点-块区的统计调整模型对红外图像缺陷区和非缺陷区的灰度值进行动态调整。最后, 采用基于灰度-邻域偏差的改进二维直方图及其区域划分方法, 通过自动选取邻域边长的遗传算法搜索最佳阈值, 实现红外图像的缺陷分割。结果表明: 该算法不仅改善了 Otsu 算法的鲁棒性, 且能够提高红外无损检测缺陷分割的准确性。

关键词: Otsu; 改善算法; 红外无损检测; 缺陷; 遗传算法

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0204004

Algorithm for defect segmentation in infrared nondestructive testing based on robust Otsu

Wang Zijun, Qiu Yanrui, Yang Hongxiao, Sun Lei

(School of Aeronautics and Astronautics, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: In infrared nondestructive testing, the proportion of defects is very different from that of background, and the low contrast region of infrared image has not been completely eliminated after image sequence enhancement, resulting in impaired accuracy of defect segmentation. In order to solve this problem, a defect segmentation method based on robust Otsu algorithm was proposed, which combined the relative threshold idea of local threshold segmentation method. Firstly, the mean value and the total gradient of the neighborhood were used to represent the category and spatial state of the pixels. Secondly, a point-block fusion statistical adjusted model on this basis was established for dynamically adjusting the gray scale values of the infrared image defects and non-defect regions. Finally, the improved two-dimensional histogram and its region division method based on gray value and neighborhood gray deviation was set for calculation of fitness function in genetic algorithm through which the optimal threshold could be determined from the mutative neighborhood size, then segmentation of defects could be achieved. The results show that this method improves the robustness of Otsu and the accuracy of defect segmentation.

Key words: Otsu; improved algorithm; infrared nondestructive testing; defects; genetic algorithm

收稿日期: 2018-09-10; 修订日期: 2018-10-11

基金项目: 中央高校基本科研业务费(ZYGX2016J156)

作者简介: 汪子君(1981-), 女, 副研究员, 硕士生导师, 主要从事红外无损检测方面的研究。Email: wangzijun@uestc.edu.cn

通讯作者: 邱俨睿(1994-), 女, 硕士生, 主要从事红外无损检测方面的研究。Email: 982694033@qq.com

0 引言

在红外无损检测的缺陷信息提取过程中, 缺陷分割能够极大地提高信息分析和处理效率^[1], 是缺陷识别的关键一步^[2]。目前, 阈值分割算法是应用最为广泛的图像分割算法, 可以大致分为全局阈值分割法和局部阈值分割法。其中, 对全局阈值分割法的研究主要集中在 Otsu 算法及其改进算法上^[3]。Otsu 算法对灰度分布呈现明显双峰的红外图像, 可以取得较好的分割效果, 但是对灰度分布较为复杂的红外无损检测图像, 由于该算法利用的图像信息较少, 难以对缺陷进行有效分割。而近年来提出的改进算法中, 较为经典的基于二维直方图的 Otsu 改进算法, 充分利用图像的空间相关信息, 提高了算法对信噪比较低或灰度分布不均匀的红外图像的处理能力^[4], 更适用于缺陷分割。文中通过对经典的 Otsu 改进算法的原理进行分析, 提出了改进的二维直方图及其区域划分方法, 通过对红外无损检测中获得的图像进行处理加以验证, 并针对结果中发现的不足, 进一步提出了鲁棒 Otsu 算法。

1 改进的二维直方图及其区域划分方法

经典二维直方图及其区域划分方法中, 表示邻域空间相关性的统计信息有均值^[4]、梯度^[5]、方差^[6]等。最先提出的基于灰度-邻域均值的方法, 由于选取的邻域均值统计特性较为片面, 反应像素点空间关系的能力较弱; 且相应的区域划分方法忽略了大量像素点, 当应用到红外无损检测缺陷信息提取时, 缺陷分割的准确性难以保证。后来陆续提出的基于灰度-邻域梯度^[5]、基于灰度-邻域方差^[6]等改进的二维直方图及其区域划分方法, 一定程度上, 改善了算法的分割效果, 但存在误分类较多等问题。因此, 为了改进二维直方图及其区域划分方法, 提高在红外无损检测过程中, Otsu 算法分离缺陷的准确性, 受 T.Romen Singh 依据像素点灰度值与邻域均值之间的差异来确定局部阈值的思想^[7]及其改进思想的启发^[8], 文中所提出的方法是基于灰度-邻域偏差的二维直方图及其区域划分方法。基于灰度-邻域偏差的二维直方图, 以像素点灰度值 $f(x,y)$ 为横坐标, 以邻域偏差 $m(x,y)$ 为纵坐标。邻域偏差 $m(x,y)$ 表示像素

点灰度值与其邻域平均灰度的偏离程度, 可以表示为:

$$m(x,y) = \frac{\sqrt{|f(x,y) - v(x,y)|}}{v(x,y)} \quad (1)$$

式中: $v(x,y)$ 为以 (x,y) 为中心像素点的邻域中所有像素点的平均灰度。

图 1 为该算法对应的二维直方图及其区域划分。通常就缺陷或非缺陷区域而言, 其内部正常的像素点灰度值大小相近, 邻域灰度偏差都较小, 因此对应图 1 中的区域 1、2; 而噪声的邻域偏差较大, 对应区域 3、4。偏差相对于均值、梯度, 更充分地考虑了中心像素点与其邻域像素点的离散程度, 更能有效解决之前环节去除噪声不彻底的问题。另外, 在经典的二维直方图及其区域划分方法中, 基于方差的方法比基于均值、梯度的方法取得了相对较好的分割效果, 但是计算复杂度较高, 且其区域划分方法未考虑缺陷区与非缺陷区交界处方差的特殊情况。而该算法改用偏差描述像素点灰度值的离散程度, 简化计算复杂度, 并且引入积分图像进一步缩短计算时间, 与基于方差的方法相比, 既能够保证缺陷分割的准确性, 又能够很好地解决运算时间较长的问题。

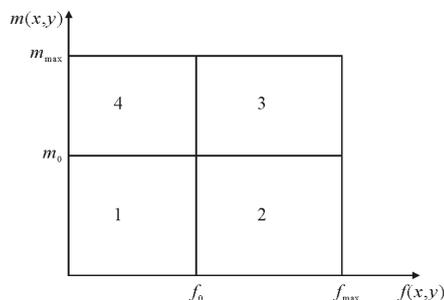


图 1 文中二维直方图区域划分方法

Fig.1 Two-dimensional histogram regional division of the improved algorithm

2 鲁棒 Otsu 算法

改进的二维直方图及其区域划分方法分离缺陷的准确性有所提高, 但是依然表现出对阴暗区域(缺陷区灰度值与非缺陷区灰度值相近的区域) 处理能力的不足。而局部阈值分割法针对不同区域动态设置阈值的思想, 使其在处理阴暗区域时效果更优^[9]。综合考虑二者的优势, 针对红外无损检测的图像特殊性, 提出鲁棒 Otsu 算法。首先利用阴暗区域的缺陷区和非缺陷区之间的灰度值差异, 依据像素点的

统计特征,对红外图像的灰度值进行动态调整,使得阴暗区域的缺陷更为明显,而其他区域变化不大。然后运用改进划分方法的全局阈值分割法进行处理,从而解决红外无损检测过程中,缺陷分割之前的环节去除噪声不彻底和残留阴暗区域的问题。

2.1 调整函数

动态调整是指根据输入图像的不同特征信息,动态制定调整函数的函数模型和参数,从而实现分区处理,改善缺陷信息缺失现象。指数函数在输入变量为正数的情况下,当参数为实数“1”时,函数值与输入变量相等;当参数为大于“1”的实数时,函数值为被增强的输入变量,即若输入变量小于“1”,则函数值比输入变量小,反之,函数值比输入变量大;当参数为小于“1”的正实数时,函数值为被减弱的输入变量,即若输入变量小于“1”,则函数值比输入变量大,反之,函数值比输入变量小。一次项函数在输入变量为任意实数的情况与指数函数在输入变量为正数的情况类似。在红外无损检测过程中,获得的红外图像序列经过格式转换、增强处理后,每帧红外图像都是三维矩阵,根据各维度矩阵包含图像信息的特征,第一维矩阵采用一次项型调整函数,其他采用指数型调整函数。所以文中指数型调整函数设为:

$$h(x,y)=\begin{cases} 0, f(x,y)=0 \\ |f(x,y)|^{k(x,y)} \cdot \frac{f(x,y)}{|f(x,y)|}, \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $h(x,y)$ 为输出图像矩阵第 x 行第 y 列像素点的输出灰度值; $f(x,y)$ 为输入图像矩阵第 x 行、第 y 列像素点的输入灰度值; $k(x,y)$ 为输入图像矩阵第 x 行、第 y 列像素点对应调整函数的参数,由该像素点自身的特征信息决定。

一次项型调整函数为:

$$h(x,y)=k(x,y) \cdot f(x,y) \quad (3)$$

在红外无损检测过程中,经过增强处理的红外图像,残存阴暗区域的根本原因是闪光灯加热不均匀,导致同帧图像缺陷区和非缺陷区的灰度值在空间上发生轻微的均匀变化,使得灰度值相互靠拢,差异减小。假设邻域边长设置在合理范围内,则邻域均值可以抑制噪声的影响表征像素点类型(属于缺陷区或者非缺陷区);又因为某邻域内所有像素点的梯度之和,会随着该邻域中是否含有缺陷而产生较大变化,所以邻域总梯度可以表征局部区域是否含有

缺陷的空间信息。针对阴暗区域缺陷区与非缺陷区像素点灰度值差异较小的特征,基于调整函数是正相关模型的特点,就希望利用邻域总梯度找到含有缺陷的区域,对所属类别不同的像素点采用使调整函数作用不同的参数。因此,参数受邻域均值、邻域总梯度联合影响。另外,梯度图像充分利用像素点与邻域灰度的差异信息,其邻域均值、邻域总梯度可以更好地表现上述物理意义,达到自适应动态调整的作用。因此,采用原始图像的梯度图像作为获取参数的输入图像。

高斯函数在图形上是一种钟形曲线,其函数形式为:

$$g(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

根据高斯函数的特性:函数变量越接近曲线对称轴,函数取值越大,反之,函数取值则越小。将依据邻域均值(或邻域总梯度)单一统计信息得到的参数称为中间调整参数,先建立中间调整参数的函数模型:将邻域均值(或邻域总梯度)作为输入变量,按其在高斯钟形曲线上的位置分配中间调整参数。使得邻域均值(或邻域总梯度)分布在曲线对称轴附近的像素点获得大于 1 的中间调整参数,在对称轴处达到最大,而邻域均值(或邻域总梯度)与对称轴距离较远的像素点获得小于 1 的中间调整参数,从而使红外图像经公式(2)或者公式(3)调整后得到的红外图像,阴暗区域缺陷区与非缺陷区像素点的灰度差异增大,非阴暗区域保持正常状态,如图 2 所示。

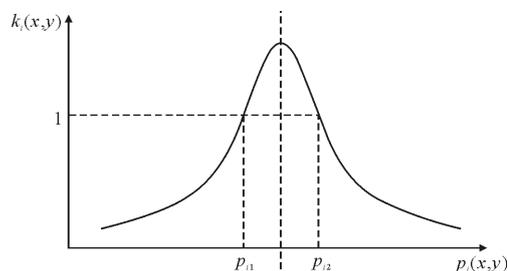


图 2 确定中间调整参数的函数曲线

Fig.2 Function curve for intermediate adjustment parameters

图中 (x,y) 为像素点在图像矩阵中的坐标; $p_i(x,y), i=1,2$ 为对应的单一统计信息, $p_1(x,y), p_2(x,y)$ 分别表示邻域均值、邻域总梯度; p_{ii} 表示阴暗区域中的

缺陷区域的最大邻域均值(或邻域总梯度), p_{ir} 表示阴暗区域中的非缺陷区的最大邻域均值(或邻域总梯度), p_{n1} 、 p_{n2} 分别为两者中较小、较大的值,对称轴取两者的平均值对应的纵轴平行线,即:

$$\mu = \frac{p_{n1} + p_{n2}}{2} = \frac{p_{n1} + p_{ir}}{2} \quad (5)$$

式中: $k_1(x, y)$ 、 $k_2(x, y)$ 分别为邻域均值、邻域总梯度对应的中间调整参数,有:

$$\begin{cases} k_i(x, y) > 1, p_n(x, y) < p_i(x, y) < p_{n2} \\ k_i(x, y) = 1, p_i(x, y) = p_{n1}, p_{n2} \\ k_i(x, y) > 1, \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

计算公式如下所示:

$$k_i(x, y) = \frac{g(p_i(x, y))}{g(\mu)} \quad (7)$$

再确定参数:参数由梯度图像的邻域均值、邻域总梯度联合决定,设为 $k(x, y)$ 。将两个中间调整参数的权重设置为相等,则可由下式给出:

$$k(x, y) = \left(\frac{k_1(x, y) + k_2(x, y)}{2} \right)^C \quad (8)$$

式中: C 为事先设定的常数。

2.2 统计模型

对同一梯度图像,采用两种不同的统计模型确定邻域均值(或邻域总梯度)。一种是基于像素点的统计模型,首先设定网格尺寸 d ,将梯度图像划分成多个块区 $S_q, q=1, 2, \dots, N$,如图 3 所示。

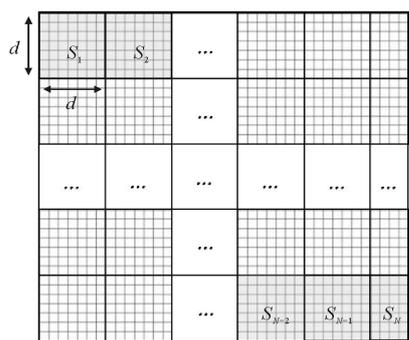


图 3 网格分区模型

Fig.3 Model of blocks

然后针对块区进行处理,得到块区均值图像、块区总梯度图像。最后对两幅图像进行插值,得到任意像素点的邻域均值与邻域总梯度。在块区处理过程中,块区均值图像是通过在每个块区求取平均灰度,再赋值到该块区的所有像素点上得到。即:

$$p_1\{(x, y) | (x, y) \in S_q\} = \frac{\sum_{(x, y) \in S_q} f(x, y)}{d^2} \quad (9)$$

$q=1, 2, \dots, N$

块区总梯度图像是通过先求取梯度图像与块区均值图像之间的灰度距离,即梯度图像每个像素点灰度值与块区均值图像该像素点灰度值之差的绝对值,再针对每个块区,求该块区所有像素点对应的灰度距离之和,赋值到该块区的所有像素点上所得。即:

$$p_2\{(x, y) | (x, y) \in S_q\} = \sum_{(x, y) \in S_q} |f(x, y) - p_1(x, y)| \quad (10)$$

$q=1, 2, \dots, N$

另一种是基于块区的统计模型,对原始图像设定网格尺寸,得到块区均值图像、块区总梯度图像,不再进行插值,各像素点对应的值即为该像素点的邻域均值与邻域总梯度。

2.3 动态调整模型

在建立调整模型时,建立基于像素点-块区的统计调整模型,这主要是因为:基于像素点的统计模型在抑制毛刺现象的基础上,突出单个像素点信息的作用,有助于反映图像的细节;基于块区的统计模型利用块区优势能够区别像素点类型,得出缺陷区和非缺陷区差异较大的参数,有利于缺陷区和非缺陷区的分区(局部)处理;两种模型各有优势,因此建立基于像素点-块区的统计调整模型,综合两种模型可以利用更多信息,得到效果更为理想的调整图像。另外,该模型的基本思想是充分利用原始图像局部信息的差异,所以,当基于像素点统计信息计算公式(6)时,设置的 C 值小于基于块区统计信息计算公式(6)时的 C 值,使得基于块区的统计模型对调整的影响大于基于像素点的统计模型对调整的影响。

综上所述,调整模型的结构框图如图 4 所示,首先,对输入图像矩阵求取梯度图像,再对梯度图像分别基于像素点统计模型、块区统计模型求取包含邻域均值、邻域总梯度在内的统计信息;然后,利用像素点统计信息,采用公式(6)计算得到对应参数,从而得到调整函数,对原始图像进行处理得到初调图像,再利用块区统计信息,采用公式(6)计算得到对应参数,从而得到调整函数,对初调图像进行处理得到中间图像;最后对中间图像进行插值处理,消除块区之间的不连续现象,得到最终的调整图像。

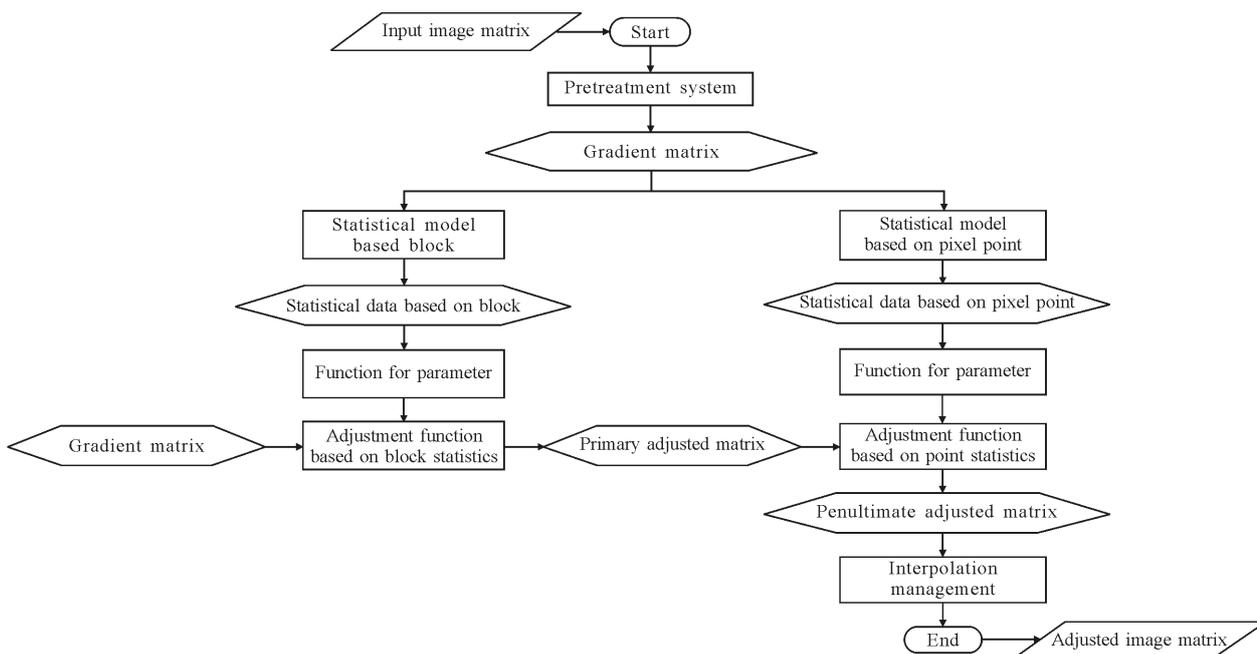


图 4 动态调整模型算法框图

Fig.4 Dynamically adjusting model algorithm

3 最佳阈值搜索

3.1 邻域边长参数

邻域边长的取值会影响邻域空间相关信息的统计结果,从而影响阈值的选取;而选取不同的阈值会影响红外图像的缺陷分割效果。所以应用鲁棒 Otsu 算法对红外图像进行缺陷分割时,如果事先设定邻域边长的取值,求得的阈值不一定为最佳阈值。因此在运用鲁棒 Otsu 算法求取阈值时,不固定邻域边长的取值。

3.2 基于遗传算法的鲁棒 Otsu 算法

将邻域边长设置为可变参数有助于提高算法的灵活性,但是求解最佳阈值需要遍历邻域边长的所有可能取值,会延长计算时间。遗传算法是模拟生物进化过程的计算模型,可以通过模拟生物进化过程搜索最优解^[10]。因此文中引入遗传算法对最佳阈值进行搜索:首先进行编码工作,邻域边长的取值根据经验选取 5~53 之间的奇数,需 6 位二进制代码表示,随机产生 6 个染色体数串作为初始种群;其次进行适应度评价,每一个染色体数串对应一个邻域边长,从而对应一个该情况下的类间方差最大值,以该类间方差最大值作为该染色体数串的适应度;然后进行交配、变异操作,设置交配概率为 0.8,变异概率为 0.01;再依照轮盘选择法,进行复制操作,使得具

有较大适应度的染色体更有机会复制到下一代,不断迭代交配、变异、复制的操作,直到完成 6 次迭代^[10]。由此搜索到使类间方差达到最大的邻域边长及对应的最佳阈值向量,节省运算时间。

4 实验结果及分析

在红外无损检测实验过程中,采用 2 个闪光灯(功率均为 1 000 W)进行加热,检测方法为单面法,加热方式为长单脉冲(脉冲宽度为 5 ms);采用热像仪 Cedic(型号为 Jade MWIR,分辨率为 3~5 μm)完成试件表面温度采集,热像仪的温度分辨力为 20 mk,采样频率为 50 Hz;实验试件为碳纤维增强塑料(CFRP, Carbon Fibre Reinforced Plastic)平板试件,厚度约为 5 mm,试件背面预埋 6 个平底洞,如图 5 所示。

图 6 为实验获取的图像序列(图像像素为 320 pixel×240 pixel)经过增强等处理后效果最好的一帧红外图像。该图像根据 matlab 软件中的 imagesc 函数的颜色查找表索引关系,经过线性映射的方式从二维矩阵转换为 RGB 三维矩阵。图 6(a)~(c)分别为该图像的三维矩阵。从图中可以看出:原始图像存在大量噪声,缺陷在图像中所占比例远小于非缺陷区所占比例,图像右侧偏下区域缺陷区和非缺陷区的灰度值较为接近,在第一维图像矩阵中,非缺陷区灰度值从左向右逐渐增大,在第二维图像矩阵中,非

缺陷区灰度值从左向右逐渐减小。

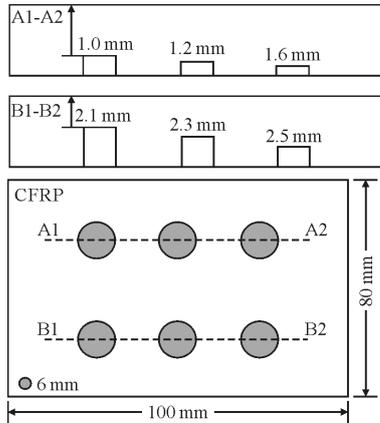
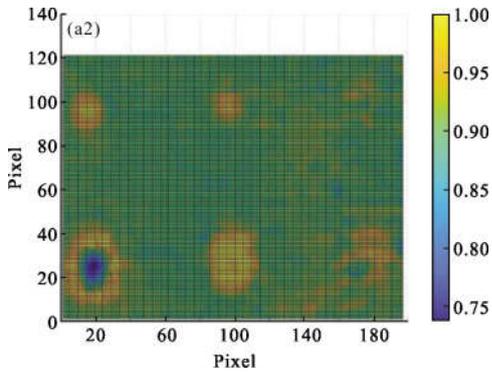
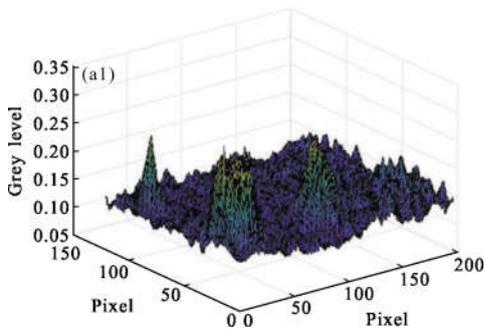
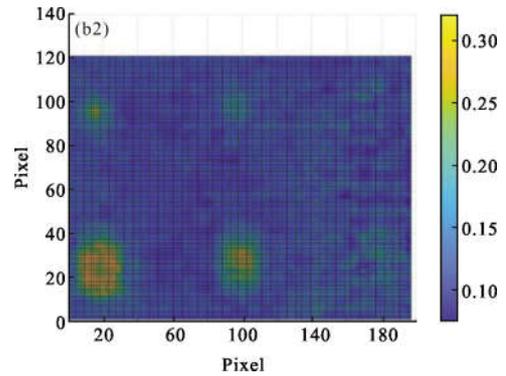
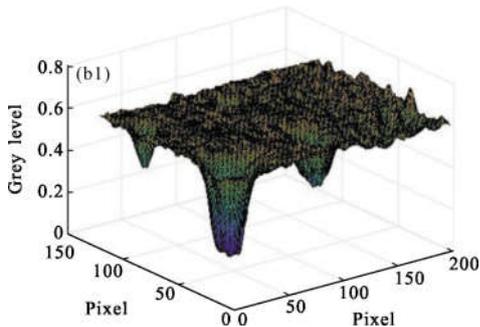


图 5 平板试件
Fig.5 Plane sample



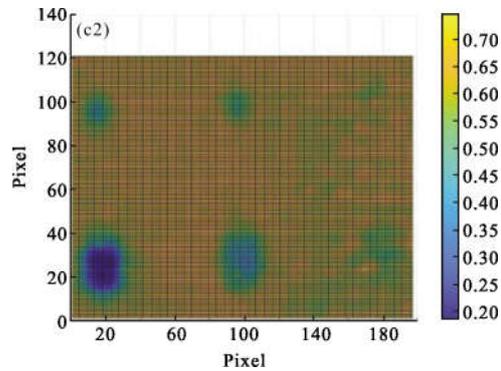
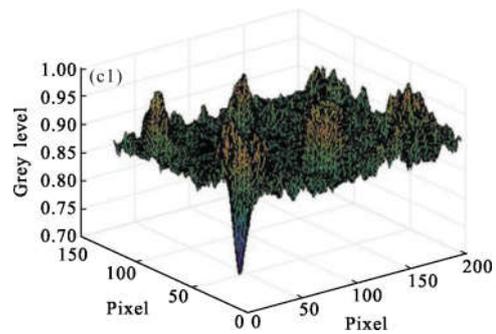
(a) 第一维图像矩阵

(a) No.1 dimensional matrix of the original image



(b) 第二维图像矩阵

(b) No.2 dimensional matrix of the original image



(c) 第三维图像矩阵

(c) No.3 dimensional matrix of the original image

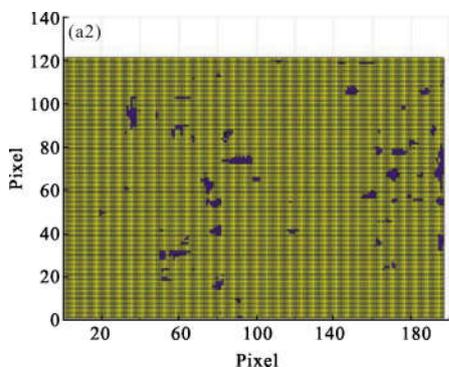
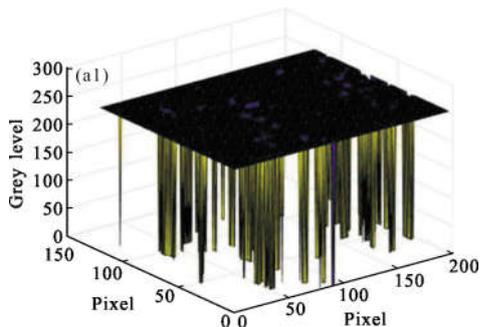
图 6 原始图像

Fig.6 Original image

图 7(a)~(d)分别为采用基于灰度-邻域均值^[4]、基于灰度-邻域梯度^[5]、基于灰度-邻域方差^[6]、基于灰度-邻域偏差的二维直方图及其区域划分方法处理原始图像各维矩阵取得的效果最好的缺陷分割效果。采用灰度-邻域方差的方法得到的最好的缺陷分割效果是对第二维图像矩阵的处理效果，其他各方法得到的最好的缺陷分割效果都是对第一维图像矩阵的处理效果。

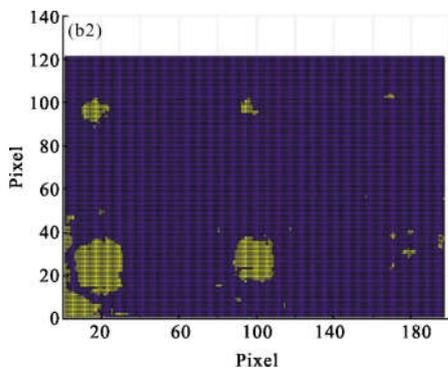
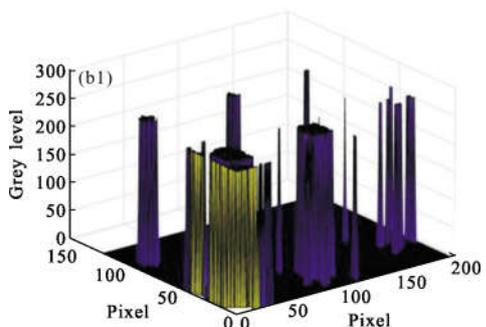
从图 7(a)可以看出,采用灰度-邻域均值的方法

不能有效实现红外无损检测图像的缺陷分割;从图 7 (b)可以看出,采用灰度-邻域梯度的方法可以分割出与非缺陷区灰度值差异较大的缺陷,对阴暗区域



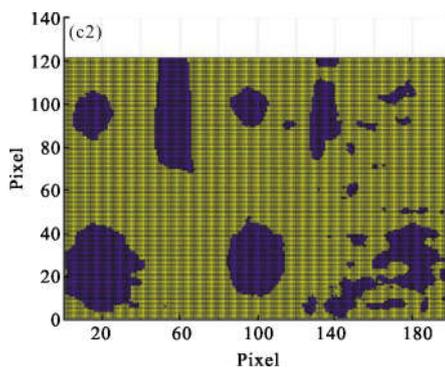
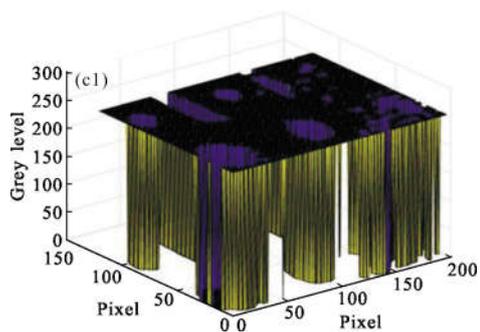
(a) 基于灰度-邻域均值的方法

(a) Algorithm based on gray value and neighborhood gray mean



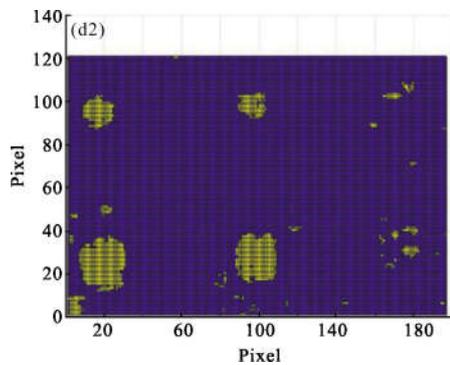
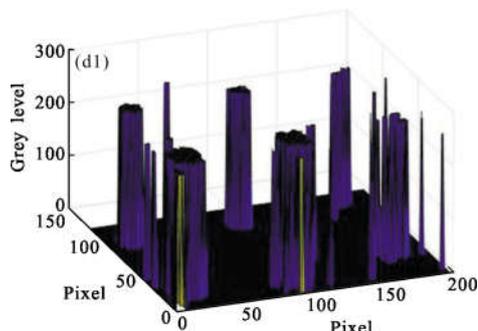
(b) 基于灰度-邻域梯度的方法

(b) Algorithm based on gray value and neighborhood gray gradient



(c) 基于灰度-邻域方差的方法

(c) Algorithm based on gray value and neighborhood gray variance



(d) 基于灰度-邻域偏差的方法

(d) Algorithm based on gray value and neighborhood gray deviation

图 7 四种方法处理效果

Fig.7 Results obtained by four algorithms

处理效果较差, 损失了过多的与非缺陷区灰度值差异较小的缺陷信息, 准确性有待提高; 从图 7(c) 中可以看出, 采用灰度-邻域方差的方法能够较好地抑制阴暗区域对分割效果的影响, 但是受其区域划分方法的影响误分类较多, 过多的非缺陷区域被二值化为与缺陷相同的灰度级, 影响缺陷分割的准确性; 从图 7(d) 可以看出: 采用基于灰度-邻域偏差的方法可以较好地分割出与非缺陷区灰度值差异较小的缺陷, 从图 7(d) 与图 7(b) 可以看出: 该方法对阴暗区域的分割效果更为聚集, 从图 7(d) 与图 7(c) 可以看出: 该方法产生的误分类数大大减少。因此, 采用基于灰度-邻域偏差的方法与经典划分方法相比, 对算法分离缺陷的准确性有所提升。

在采用基于灰度-邻域偏差的方法实现缺陷分割的过程中加入动态调整模型, 图 8 为原始图像经过动态调整后得到的调整图像。图 8(a)~(d) 分别为

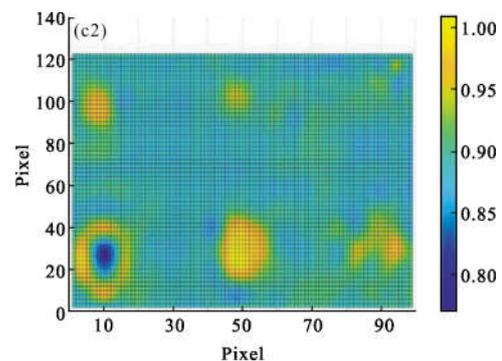
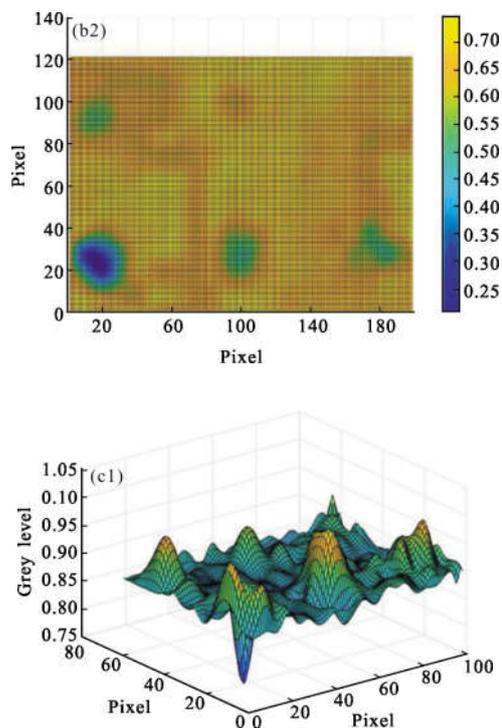
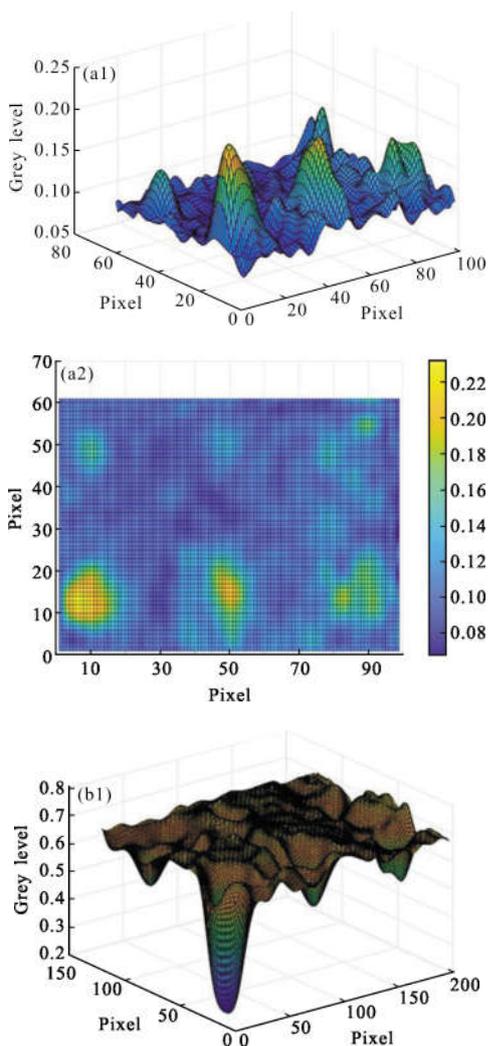


图 8 调整图像
Fig.8 Adjusted image

该图像的三维矩阵。从图中可以看出, 融合的调整模型解决了在红外无损检测过程中, 缺陷分割之前环节残留灰度值分布不均匀的问题, 同时较好地抑制了之前环节去除噪声不彻底带来的影响。图 9 为采用融合的调整模型与改进的二维直方图及其区域划分方法相结合的鲁棒 Otsu 算法的分割效果。从图中可以看出: 采用鲁棒 Otsu 算法与基于灰度-邻域均值、灰度-邻域梯度、灰度-邻域方差的经典改进算法相比, 能够较好地分割出与非缺陷区灰度值差异较小的缺陷, 并且保证对阴暗区域的缺陷实现有效分割的同时, 产生极小的误分类数, 提高了在红外无损检测过程中, Otsu 算法进行缺陷分割的准确性。

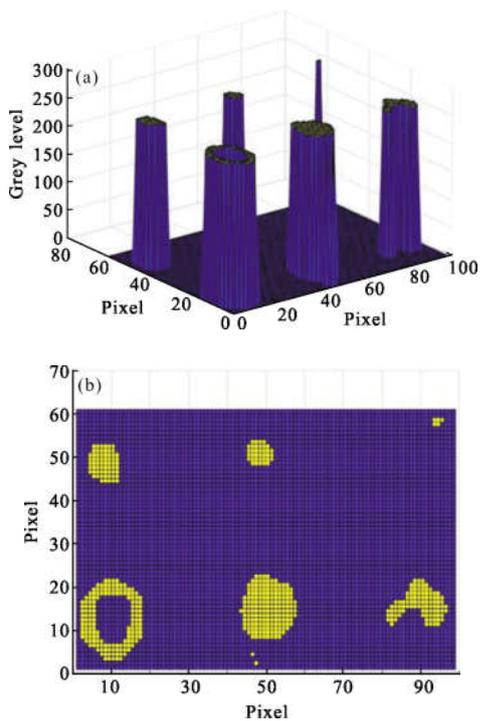


图 9 鲁棒 Otsu 算法的处理效果

Fig.9 Results obtained by robust Otsu algorithm

5 结 论

文中提出了一种全局阈值分割法与局部阈值分割法相结合的红外无损检测缺陷分割方法。针对缺陷区和非缺陷区所占比例悬殊、信噪比较低、残留阴暗区域等影响缺陷分割准确性的图像特征，文中依据像素点邻域均值、邻域总梯度，结合高斯函数实现动态调整，建立了基于像素点-块区的统计调整模型，保证了非阴暗区域像素点的原始特性。采用基于灰度-邻域偏差的二维直方图及其区域划分方法对经典划分方法进行改进，结合遗传算法自动选取邻域边长保证最佳阈值的有效性、提高阈值计算的实时性。该方法注重利用图像的灰度与空间信息，鲁棒性、灵活性较强，有利于为红外无损检测缺陷分割技术提供新思路。

参考文献:

[1] Zhang Jinyu, Yang Zhengwei, Tian Gan. Infrared Thermal Wave Testing and Images Sequence Processing Technology[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2015. (in Chinese)
张金玉, 杨正伟, 田干. 红外热波检测及其图像序列处理技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.

[2] Wang Dongdong, Zhang Wei, Jin Guofeng, 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)
王冬冬, 张伟, 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.

[3] Kumbhar P G, Holambe S N. A review of image thresholding techniques [J]. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, 2015, 5(6): 160–163. (in Chinese)

[4] Wang Xinyue, Gao Xuhui. Image segmentation method of self-adopting threshold [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2006, 35(S4): 167–171. (in Chinese)
王歆玥, 高旭辉. 一种自适应阈值分割方法 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(S4): 167–171.

[5] Xu Chao, Huang Fenghua, Mao Zhengyuan. An improved two-dimensional Otsu thresholding segmentation method [J]. *Application and Electronic Technique*, 2016, 42 (12): 108–111. (in Chinese)
徐超, 黄风华, 毛政元. 一种改进的二维 Otsu 阈值分割算法[J]. 电子技术应用, 2016, 42(12): 108–111.

[6] Yang Huixian, Yan Wei, Tan Zhenghua, et al. Improvement image segmentation based on average gray level-local variance two dimensional histogram[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2017, 53(4): 209–213. (in Chinese)
杨恢先, 颜微, 谭正华, 等. 改进的灰度-局部方差二维直方图图像分割[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(4): 209–213.

[7] Jaafar H, Ibrahim S, Ramli D A. A robust and fast computation touchless palm print recognition system using LHEAT and the IFKNCN classifier [J]. *Comput Intell Neurosci*, 2015, 2015(5): 1–17.

[8] Fu Xiang, Zhang Jian, Wang Wei, et al. A new local threshold segmentation algorithm [J]. *Computer Applications and Software*, 2015, 32(4): 195–197. (in Chinese)
符翔, 张剑, 王维, 等. 一种新的局部阈值分割算法[J]. 计算机应用与软件, 2015, 32(4): 195–197.

[9] Wan A M. A proposed optimum threshold level for document image binarization [J]. *Advanced Research in Computing and Applications*, 2017, 7(1): 8–14.

[10] Zhuo Jinwu. Application of MATLAB in Mathematical Model [M]. Beijing: Beihang University Press, 2014. (in Chinese)
卓金武. MATLAB 在数学建模中的应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2014.