

## 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

唐庆菊<sup>1</sup>, 刘俊岩<sup>2</sup>, 王 扬<sup>2</sup>, 刘元林<sup>1</sup>, 梅 晨<sup>1</sup>

- (1. 黑龙江科技大学 机械工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022;
2. 哈尔滨工业大学 机电工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘 要:** 针对脉冲红外热成像检测缺陷构件时, 红外图像噪声较大、边缘信息模糊等特点, 提出了一种基于模糊 C 均值聚类和 Canny 算子相结合的边缘检测新方法。该方法首先对输入的红外图像进行整体灰度变换, 采用模糊 C 均值聚类对图像进行区域分割、提取和二值化; 再将各个区域进行叠加, 使红外图像的边缘变得连续; 最后, 采用 Canny 算子对处理后的图像进行边缘检测, 实现缺陷的识别。在图像边缘检测基础上, 分析了图像定位缺陷位置与实际缺陷位置之间的相对误差, 并运用物像关系, 实现缺陷几何尺寸的定量检测。结果表明: 该方法对缺陷边缘识别完整清晰, 具有较高的定位精度和抗噪能力, 有利于缺陷的识别与定量检测。

**关键词:** 红外图像; 边缘检测; 模糊 C 均值聚类; Canny 算子; 定量检测

**中图分类号:** TG115.28 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0928001

## Infrared image edge recognition and defect quantitative determination based on the algorithm of fuzzy C-means clustering and Canny operator

Tang Qingju<sup>1</sup>, Liu Junyan<sup>2</sup>, Wang Yang<sup>2</sup>, Liu Yuanlin<sup>1</sup>, Mei Chen<sup>1</sup>

- (1. School of Mechanical Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin 150022, China;
2. School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** A new edge detection method based on Fuzzy C-means clustering and Canny operator was proposed to detect the defects of infrared thermal imaging with large noise, edge information ambiguity and so on. In this method, the gray scale transformation of the input infrared image was carried out, and the image was segmented, extracted, and binarized by the Fuzzy C-means clustering; then each area was superimposed to make the edge of infrared image continuous. Finally, the image was processed by the Canny algorithm, and the edge of the infrared image was continuous. Canny operator was used to detect the edge of the image, and the defect recognition was realized. Based on the image edge detection, the relative error between calculated and actual defects position was analyzed, and the geometric size quantitative detection of defects was realized. The results show that the proposed method can detect the

收稿日期: 2016-01-05; 修订日期: 2016-02-03

基金项目: 国家自然科学基金(51405139); 黑龙江省青年科学基金(QC2013C054);

黑龙江科技大学优秀青年才俊培养计划(Q20130104)

作者简介: 唐庆菊(1981-), 女, 副教授, 博士, 主要从事红外热波检测与评价技术方面的研究。Email: tangqingju@126.com

defect edge completely and clearly, and has higher accuracy and anti-noise ability, which is advantageous for the identification and quantitative detection of defects.

**Key words:** thermal imaging; edge detection; Fuzzy C-means algorithm clustering; Canny operator; quantitative determination

## 0 引言

边缘在图像中蕴含着大量重要的信息, 图像边缘检测能大幅度地减少无关数据量, 而将红外图像中的重要信息保留下来, 如缺陷的轮廓边缘, 从而达到识别缺陷几何特征的目的。经典的图像边缘检测方法主要有 Roberts、LOG、Prewitt、Sobel、Zerocross、Canny 等算子。该类算法主要通过得到一阶导数峰值点或二阶导数零交叉点, 成为被处理图像的候选边缘检测点, 人工设置作为评价标准的图像的全局阈值, 最后删除图像中梯度值小于阈值的候选边缘点, 达到消除噪声与弱边缘点的目的<sup>[1-3]</sup>。

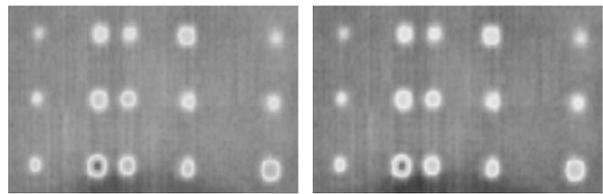
文中通过对多种边缘检测算法对红外图像边缘检测效果的分析, 提出了模糊 C 均值聚类与 Canny 算子相结合的边缘检测算法, 得到效果更佳的缺陷边缘几何特征, 从而实现了对缺陷直径大小的计算。根据红外图像边缘检测的检测结果表明: 该算法所获得的缺陷边缘完整清晰, 有利于对缺陷的判定与识别。

## 1 基于经典检测算子的缺陷边缘检测

在采用红外热成像系统进行检测试验时, 采用 FLIR 公司焦平面阵列式红外热像仪 SC7000 完成构件表面温度信号的采集。为了提高红外定位精度, 采用配置软件 Cirrus 对热像仪自身进行非均匀校正。

图 1 为检测内部含有模拟脱粘缺陷的 SiC 涂层-高温合金基体试件(命名为 #S1)试验过程中获得的一幅红外图像和经变换后的灰度图像。图 2 为采用 Sobel 等经典边缘检测算子对缺陷边缘的检测结果。观察图 2 可知, Sobel、Prewitt、Roberts 这 3 种算子提取的红外图像边缘不够精细, 有的缺陷边缘识别不完整并且还有漏检问题。LOG、Zerocross、Canny 这 3 种算子提取的红外图像边缘较精细, 但有些边缘并不是真正的边缘, 特别是在图像灰度变化梯度较小的区域, 二阶导数得到的过零点输出有可能被此时的小噪声干扰。其中 LOG 和 Zerocross 算子存

在着对部分缺陷边缘识别不够完整的问题。通过对比分析, Canny 算子虽然识别出了所有的缺陷边缘, 但也同时包含大量无用的多余信息, 会在一定程度上干扰对缺陷的识别。



(a) 输入红外图像 (b) 灰度变换  
(a) Input infrared image (b) Gray level transformation

图 1 输入图像(#S1)

Fig.1 Input image(#S1)

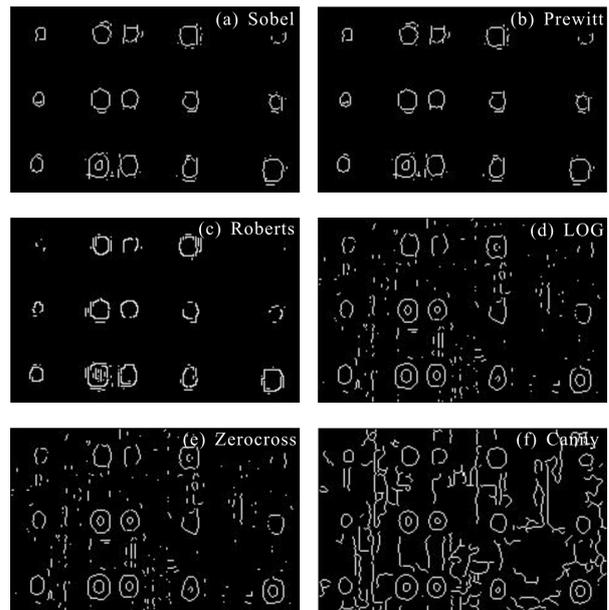


图 2 几种经典算子边缘检测结果(#S1)

Fig.2 Edge detection results of several classical operators (#S1)

## 2 基于模糊 C 均值聚类-Canny 算子的缺陷边缘检测

经典边缘检测算子的原理通过检查图像每个像素的邻域并量化其灰度变化率, 而由于大量外界因素在采集红外图像过程中产生干扰, 通常获取的图

像信息十分复杂,在对图像序列进行处理的过程中对于图像序列信息的选取以及数据采集样本点的分类通常具有模糊性和不确定性,所以,单纯采用这些经典边缘检测算子很难获得满意的检测效果。聚类分析则是以“物以类聚”为基本思想,该原理通过一定的聚类规则,把某些具有相同特征的样本数据聚集在一起,从而实现对本数据进行分类<sup>[4]</sup>。聚类分析的学习过程属于无监督式,在模式识别、自动控制和图像处理等诸多领域已经得到了广泛应用。文中提出的边缘检测混合算法是将模糊聚类算法和 Canny 算子相结合,实现对红外图像中缺陷边缘比较精确的识别,进而实现对缺陷直径尺寸大小的计算。

2.1 模糊 C 均值聚类边缘检测算法

K 均值聚类和模糊 C 均值聚类是比较经典的两种聚类算法。K 均值聚类即普通 C 均值聚类,其硬性对样本数据进行划分,严格地将每个样本数据都划分为某一类数据。而在实际问题中,事物通常不是“非此即彼”,因此也要考虑关于模糊的存在问题,即有些事物或特征“亦此亦彼”,不只是属于某一类,但属于不同类的不同程度。于是在聚类分析之中引入模糊数学理论,则可较好地描述图像信息的不确定性<sup>[5-6]</sup>。因此,采用模糊 C 均值聚类算法对红外图像进行聚类分析。

基于模糊划分思想的模糊 C 均值聚类算法,其原理是使得被划分为同一簇的对象间相似度最大,而被划分为不同簇之间的对象间相似度最小,然后根据隶属度确定每个样本数据属于某个聚类的程度<sup>[7]</sup>。FCM 算法将数据  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  分为  $c$  类,假设  $x_k$  为  $X$  中的任意样本,  $u_{ik}, 0 \leq u_{ik} \leq 1$  为  $x_k$  对第  $i$  聚类的隶属度。因此可用  $c \times n$  阶矩阵  $U$  表示该分类结果,称矩阵  $U$  为模糊矩阵,该矩阵具有以下性质:

$$\begin{cases} u_{ik} \in [0, 1] & \forall i, \forall k \\ \sum_{i=1}^c u_{ik} = 1 & \forall k \\ 0 < \sum_{i=1}^c u_{ik} < 1 & \forall i \end{cases} \quad (1)$$

为了能够在许多可能的分类寻求一个合理的分类结果,需要确定合适的聚类准则。因此,定义目标函数为加权类内误差平方和:

$$J(U, c_1, \dots, c_c) = \sum_{i=1}^c \sum_{k=1}^n u_{ik}^m d_{ik}^2 \quad (2)$$

式中:  $U$  为模糊分类矩阵,  $U=[u_{ik}]i=1, 2, \dots, c; k=1, 2, \dots, n$  且满足  $\sum_{i=1}^c u_{ik}=1, \forall k; c_i$  为模糊组  $i$  的聚类中心;  $d_{ik}$  为第  $i$  个聚类中心与第  $k$  个数据点间的欧几里德距离,  $d_{ik}=\|c_i-x_k\|; m$  为加权指数,  $m \in [1, \infty)$ 。

模糊 C 均值聚类算法经过迭代,使公式(2)达到最小的必要条件为:

$$c_i = \frac{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m x_k}{\sum_{k=1}^n u_{ik}^m} \quad (3)$$

$$u_{ik} = \frac{1}{\sum_{j=1}^c \left( \frac{d_{ik}}{d_{jk}} \right)^{\frac{2}{m-1}}} \quad 1 \leq i \leq c, 1 \leq k \leq n \quad (4)$$

在待分类数据  $X$ 、聚类的类别数  $c$  和权重  $m$  已知的情况下,FCM 的迭代步骤如下:(1) 按照公式(1),隶属度矩阵  $U$  通过在  $[0, 1]$  区间上取随机数进行初始化。(2) 按照公式(3)计算  $c$  个聚类中心  $c_i, i=1, 2, \dots, c$ 。(3) 将上述两步获得的值代入公式(2),计算目标函数。如果目标函数比某确定阈值小,或相对于某阈值  $\epsilon$  大于上次目标函数值的改变量,则算法在这个时候停止。(4) 用公式(4)计算新的模糊矩阵  $U$ ,然后返回步骤(2)。从而确定各类聚类的中心  $c_i$  和各个样本数据属于各类的隶属度矩阵,完成模糊聚类划分。

2.2 基于模糊 C 均值聚类和 Canny 算子的红外图像边缘检测

图 3 为采用模糊 C 均值聚类-Canny 算子实现红外图像边缘检测的算法流程。首先通过灰度变换

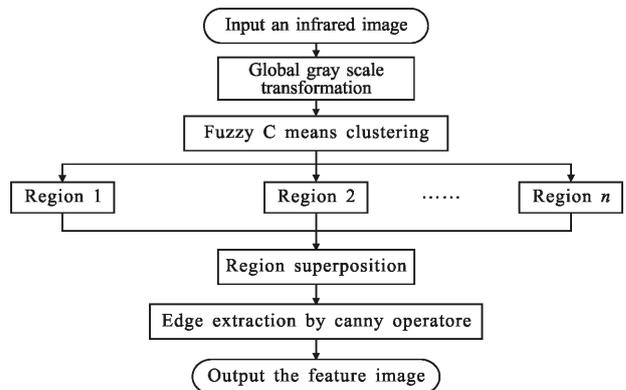


图 3 模糊 C 均值聚类-Canny 算子边缘检测算法流程

Fig.3 Edge detection algorithm flow of fuzzy C means clustering-morphology-Canny operator

算法对输入红外图像进行整体灰度变换,采用模糊 C 均值聚类对转换的红外图像进行区域分割,并用不同灰度值对各分割区域进行标记;然后对聚类后的各个区域进行提取,分别进行二值化;接着将各个区域进行叠加,使红外图像边缘变得连续;最后,将处理后的图像采用 Canny 算子进行边缘检测,实现缺陷的识别。

聚类数目  $c$  一般要小于聚类样本数据的总个数,与此同时要保证  $c > 1$ 。算法的柔性用权重  $m$  进行控制,若  $m$  过大,则会使得聚类效果很差,若  $m$  过小,则会导致算法与 K 均值聚类算法差异很小,根据经验,通常取  $m \in [1.5, 2.5]$ <sup>[6]</sup>。设置聚类数目  $c=2$ ,模糊加权指数  $m=1.7$ ,聚类收敛阈值  $\epsilon=0.05$ ,对于图 1 所示的输入图像进行处理,利用上述模糊 C 均值聚类算法处理及 Canny 算子边缘检测后的图像如图 4 所示。此方法所获取的结果与经典的边缘检测算子识别结果相比,所有缺陷边缘的显示都完整清晰,故可准确实现缺陷的判定与识别。

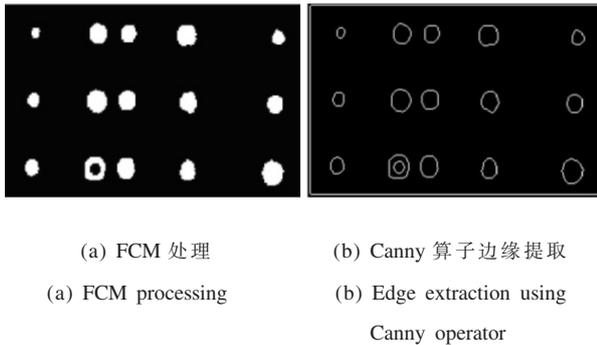
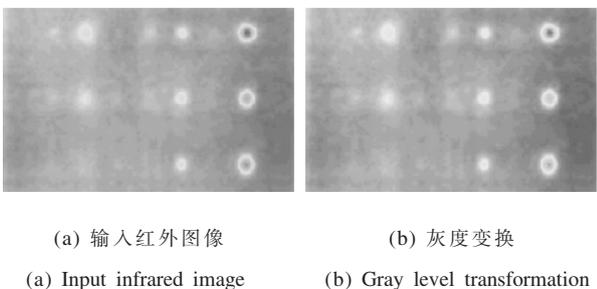


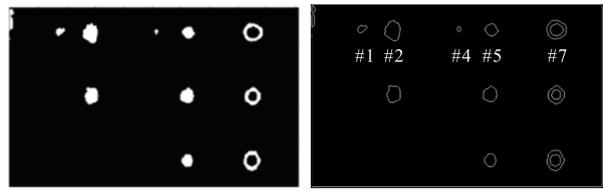
图 4 模糊 C 均值聚类-Canny 算子边缘检测结果(#S1)

Fig.4 Edge extraction results of Fuzzy C means clustering-Canny operator (#S1)

采用上述模糊 C 均值聚类-Canny 算子,对内部含有模拟脱粘缺陷的 SiC 涂层-C/C 复合材料基体试件(命名为 #S2)的红外检测热图,进行边缘识别,也获得了很好的处理效果,如图 5 所示。



(a) 输入红外图像 (a) Input infrared image  
(b) 灰度变换 (b) Gray level transformation



(c) FCM 处理 (c) FCM processing  
(d) Canny 算子边缘提取 (d) Edge extraction using Canny operator

图 5 模糊 C 均值聚类-Canny 算子边缘检测结果(#S2)

Fig.5 Edge extraction results of Fuzzy C-means clustering-Canny operator (#S2)

### 3 图像定位精度分析

在红外热波无损检测中,对红外图像进行图像增强、分割与边缘识别的意义是使图像有利于后续的缺陷提取、定位和定量检测。以检测试件 #S2 时红外图像处理结果为例,对图像定位精度进行分析。在红外图像中,试件所占区域在长度和宽度方向分别为 254 像素和 232 像素,而试件实际长度和宽度分别为 96 mm 和 95 mm,因此,可根据此比例关系求出各像素点对应试件中的实际位置。

图 5(d)中,缺陷 #1 与 #2、#2 与 #4、#4 与 #5、#5 与 #7 中心之间的实际距离分别为 10 mm、20 mm、10 mm、20 mm。在此以缺陷 #7 中心位置作为基准点,分别测出图像中缺陷 #1、#2、#4、#5 中心与缺陷 #7 中心之间的像素个数,计算出对应的距离,并求出图像定位缺陷计算位置与实际位置(即计算距离与实际距离)之间的相对误差,结果如表 1 所示。

表 1 计算位置与实际位置比较

Tab.1 Comparison between calculated and actual position

Defect No.	#1	#2	#4	#5
Number of pixels between centers of other defects and #7 defect	160	133	79	53
Calculated distance between centers of other defects and #7 defect/mm	60.4724	50.2677	29.8583	20.0315
Actual distance between centers of other defects and #7 defect/mm	60	50	30	20
Relative error between calculated distance and actual distance	0.7873%	0.5354%	0.4723%	0.1575%

由表 1 可知,根据图像定位计算出的缺陷位置,与实际缺陷位置之间的相对误差均在 1% 以下,可满足工程实际应用的缺陷定位精度要求。其中,被检测构件表面发射率、大气吸收率、环境温度以及热像仪本身性能等因素,是红外定位误差的主要来源。

#### 4 基于边缘检测的缺陷直径尺寸计算

以试件 #S2 作为分析对象,依据图 5 (d)所示缺陷边缘计算各个缺陷的直径大小。设  $t_{px} \times t_{py}$  为该图像像素数,  $L \times B$  为此图像区域对应试件的长宽尺寸,根据图像边缘对应的像素数  $d_p$  来测量其直径大小,则缺陷的实际尺寸  $d_m$  为:

$$d_m = \frac{Ld_p}{t_{px}} \text{ 或 } d_m = \frac{Bd_p}{t_{py}} \quad (5)$$

由图 5(d)可知,图像中缺陷边缘不是标准圆形,且最右侧 3 个缺陷有内外两个边缘。对于单边缘缺陷,沿图像长度  $d_{mL}$  和宽度  $d_{mB}$  两个方向分别测量缺陷直径,取两次测量的平均值作为缺陷的实际直径尺寸,即:

$$d_m = \frac{1}{2} (d_{mL} + d_{mB}) = \frac{1}{2} \left( \frac{Ld_p}{t_{px}} + \frac{Bd_p}{t_{py}} \right) \quad (6)$$

对于双边缘缺陷,根据公式(6)以内侧边缘为基准测量缺陷直径  $d_{mi}$ ,以外侧边缘为基准测量缺陷直径  $d_{mo}$ ,对两次测量结果取均值作为缺陷的实际直径尺寸,即:

$$d_m = \frac{1}{2} (d_{mi} + d_{mo}) \quad (7)$$

选取试件 #S2 上第 1 行缺陷为分析对象,应用上述方法计算预测缺陷的直径尺寸,结果如表 2 所示。

表 2 缺陷直径尺寸

Tab.2 Diameter size of defects

Defect No.	#2	#5	#7
DA <sub>r</sub>	4	3	4.0
r	1.6	2.0	4.0
DA <sub>e</sub>	4.45	3.27	4.60
e <sub>DA</sub>	11.3%	9.0%	15.0%

Note: DA<sub>r</sub>-Actual defect diameter; r-Diameter depth ratio; DA<sub>e</sub>-Predictive defect diameter; e<sub>DA</sub>-Diameter prediction error.

在上述图 5(d)中,通过采用模糊 C 聚类-Canny 算子对红外图像进行边缘检测,识别出了 #1、#2、#4、#5 和 #7 缺陷,当中最小径深比为 1.2(#4),最小直径为 1 mm(#1)。对于 #2、#5 和 #7 缺陷,它们的识别误差分别为 11.3%、9.0% 和 15.0%。但因 #1 缺陷

直径较小,#4 缺陷径深比较小,虽然可以确认缺陷的存在,但由于采用该方法定量计算缺陷直径尺寸有着比较大的误差。而无法识别径深比为 1.0(#3)和 0.8(#6)的缺陷。

#### 5 结 论

文中以红外热像仪检测实验采集的真实红外图像为研究对象,分析了传统经典边缘检测算子的边缘识别效果和特点,提出了一种模糊 C 均值聚类和 Canny 算子相结合的红外图像边缘检测混合算法。在红外图像边缘检测的基础上,分析了图像定位缺陷计算位置与实际位置之间相对误差。运用物像关系的性质,达到了对缺陷几何尺寸定量检测的目的。结果表明:该方法对缺陷边缘的识别完整清晰,定位精度和抗噪能力较高,缺陷的判定与识别准确。

#### 参考文献:

- [1] Sneha Arora, Sanyam Anand. A new approach for image steganography using edge detection method [J]. *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*, 2013, 1(3): 626-629.
- [2] Rashmi, Mukesh Kumar, Rohini Saxena. Algorithm and technique on various edge detection: a survey [J]. *Signal & Image Processing*, 2013, 4(3): 65-75.
- [3] Jamal Raiyn. A novel automatic object detection in images [J]. *Current Research in Computer Science*, 2013, 1(1): 1-4.
- [4] Szilagri L, Szilagri S, Benyo B. Efficient inhomogeneity compensation using Fuzzy C-means clustering modles [J]. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 2012, 1(1): 1-4.
- [5] Fagbola T Mathew, Babatunde R Seyi. Image clustering using a hybrid GA-FCM algorithm [J]. *International Journal of Engineering and Technology*, 2013, 3(2): 99-107.
- [6] Mohamed Mahjoub A. Improved FCM algorithm applied to color image segmentation [J]. *Canadian Journal on Image Processing and Computer Vision*, 2011, 2(2): 16-19.
- [7] Cao Junfeng, Shi Jiacheng, Luo Haibo, et al. Image enhancement using clustering and histogram equalization [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(12): 3437-3441. (in Chinese)
- [8] Li Qinghui, Li Aihua, Su Yanzhao, et al. Fire detection algorithm using FCM clustering [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(5): 1661-1665. (in Chinese)