

# 结构件内部缺陷断层图像的模糊边缘检测

孔凡树, 姚芳, 贾超, 邹琪, 王蓓蓓, 艾东

KONG Fan-shu, YAO Fang, JIA Chao, ZOU Qi, WANG Bei-bei, AI Dong

燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004

College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

E-mail: yaofang0122@163.com

**KONG Fan-shu, YAO Fang, JIA Chao, et al. Fuzzy edge detection of inner defect based on cross-image. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(20): 179-180.**

**Abstract:** Considering the main characters of inner defect in Industry Computer Tomography (ICT) image, such as complex shape, randomness, serious noise, and always fuzzy, this paper brings forward an improved fuzzy edge-detection method on the basis of studying the Pal algorithm. The algorithm introduces the best threshold into algorithm, and improves Pal membership function, then establishes a new fuzzy enhancement transformation, finally, an edge-connection step is added. The proposed algorithm is superior in detecting fuzzy edges. Experimental results show that the algorithm is a more practical, more efficient fuzzy edge extraction algorithm.

**Key words:** Otsu's method; membership function; image enhancement; edge-connection

**摘要:** 由于结构件内部缺陷形状复杂、随机性大及其断层图像噪声严重并具有一定的模糊性, 在研究 Pal 模糊边缘检测算法的基础上, 提出一种改进的模糊边缘检测算法。该算法将最佳阈值引进算法中, 并以此改进了 Pal 算法中的隶属度函数, 建立了新的模糊增强变换, 最后增加了边缘连接的步骤。该算法具有较强的检测模糊边缘的能力, 实验结果表明该算法是一种更实用、更高效的模糊边缘提取算法。

**关键词:** Otsu 法; 隶属函数; 图像增强; 边缘连接

**DOI:** 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.20.053 **文章编号:** 1002-8331(2009)20-0179-02 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP391

## 1 引言

图像边缘检测一直以来都是图像处理与分析领域的研究热点<sup>[1]</sup>, 边缘蕴含了丰富的内在信息, 携带了原始图像绝大部分的特征信息, 是图像分割、目标区域识别、区域形状提取等图像分析领域中的基础。

工业上的结构件在其内部往往出现孔洞、气泡或裂纹等缺陷, 其计算机断层图像中内部缺陷的形状复杂多样, 图像一般都具有很强的模糊性。在图像处理领域中, 边缘的模糊性是广泛存在的, 对于图像处理的结果、描述和解释等都带有模糊性。20 世纪 80 年代中期, 国外学者 Pal 和 King 提出了一种图像边缘检测模糊算法(简称 Pal 算法)<sup>[2]</sup>, 首次将模糊集理论引入到图像的边缘检测算法中, 该方法能够有效地将物体从背景中分离出来, 具有较好的抑噪和边缘检测效果。Pal 算法与相对传统的空间域微分算法相比有了更多的优势, 但它也有很多缺陷, 如运算复杂, 速度慢, 复杂的隶属函数中各种参数具有可调性等, 针对这些缺陷的一些改进算法也在不断提出, 大大提高了运算速度, 并提高了边缘检测效果<sup>[3-5]</sup>。本文在分析 Pal 算法及其改进算法的基础上, 针对断层图像提出一种改进算法, 实验

证明本算法不仅提高了检测速度并且取得了理想的检测效果。

## 2 Pal 模糊边缘检测算法

Pal 和 King 的模糊边缘检测算法的思想是: 首先将图像从空间域映射到模糊特征域, 即一个模糊矩阵, 利用模糊集理论对图像在模糊空间中作增强处理, 即对模糊矩阵进行多次非线性变换, 以增强边缘两侧像素灰度的对比度, 减少图像的灰度层次, 然后来提取边界<sup>[6]</sup>。

(1) 用隶属函数  $G$  将图像  $X$  映射成一个模糊隶属度矩阵, Pal 和 King 采用的隶属函数为:

$$\mu_{mn} = G(l_{mn}) = \left[ 1 + \frac{(L-1) - l_{mn}}{F_d} \right]^{-F_e} \quad (1)$$

其中  $\mu_{mn}$  表示图像像素  $(m, n)$  的灰度级  $l_{mn}$  相对于某个特定灰度级  $l$  的隶属度, 通常取  $l$  为最大灰度级  $L-1$ 。参数  $F_e$  和  $F_d$  与  $\mu_{mn}$  的形状有关, 通常取  $F_e$  为 2。

(2) 对图像进行模糊增强。模糊增强是对  $\mu_{mn}$  进行多次非线性变换  $Tr$ , 其结果是增大(当  $\mu_{mn} > 0.5$ )或减少(当  $\mu_{mn} \leq 0.5$ )  $\mu_{mn}$

基金项目: 河北省自然科学基金(the Natural Science Foundation of Hebei Province of China under Grant No.E2007000386)。

作者简介: 孔凡树(1970-), 女, 助工, 研究方向: 计算机图形学; 姚芳(1985-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 基于 CT 图像的结构件内部缺陷边缘检测研究; 贾超(1967-), 男, 博士, 教授, 主要研究领域: 计算机图形学、虚拟现实等。

收稿日期: 2008-09-05 修回日期: 2009-02-03

的值,以此来增强边缘信息,削弱非边缘信息,数学描述为:

$$\mu'_{mn} = Tr(\mu_{mn}), r=1, 2, \dots$$

$$T_1(\mu_{mn}) = \begin{cases} 2(\mu_{mn})^2, & 0 < \mu_{mn} < 0.5 \\ 1-2(1-\mu_{mn})^2, & 0.5 \leq \mu_{mn} \leq 1 \end{cases} \quad (2)$$

(3)对  $\mu'_{mn}$  进行逆变换,从而得到经过模糊增强后的图像  $X', X'$  中的像素的灰度级  $l'_{mn}$  为:

$$l'_{mn} = G^{-1}(\mu'_{mn}) \quad (3)$$

式(3)是式(1)中  $G(\cdot)$  运算的逆运算。

(4)提取边缘。使用 Nakagowa 和 Rosenfeld 提出的“min”或“max”算子,定义图像的边缘矩阵为:

$$E_{edge} = [l'_{mn}]_{M \times N} \quad (4)$$

式中,

$$l'_{mn} = |l'_{mn} - \min\{l'_{ij}\}|, (i, j) \in Q \quad (5)$$

$Q$  可以取为以坐标  $(i, j)$  为中心的  $3 \times 3$  窗口。

### 3 改进的模糊边缘检测

本文算法抛弃了复杂的隶属度函数计算形式,重新定义了隶属度函数,简化了复杂的变换运算,并且提出了确定模糊增强变换中最佳隶属度阈值的算法。此外,通过动态选择的值,以适应不同类型图像和不同用户的要求。该算法比 Pal 算法更快捷、更有效。改进的模糊边缘检测算法的步骤如下:

(1)采用最大类间方差法(Otsu 方法)选择最佳阈值  $D_T$

Otsu 方法<sup>[7]</sup>是经典的非参数、无监督自适应阈值选取方法。它不需要其他先验知识,因而应用范围很广,是最常用的阈值确定方法之一。设给定的图像具有  $L$  级( $L=255$ )灰度值,其分割阈值为  $t$ ,背景区域的像素数占总像素数的比率为  $w_1(t)$ ,平均灰度值为  $u_1(t)$ ;相对应目标区域为  $w_2(t)$  和  $u_2(t)$ 。则阈值  $D_T$  的计算式为:

$$D_T = \arg \max (w_1(t)w_2(t)(u_1(t)-u_2(t))^2) \quad (6)$$

(2)重新定义隶属度函数

$$\mu_m = \begin{cases} \frac{1}{2} \left[ \frac{x_{mn}}{D_T} \right]^2, & x_{mn} \leq D_T \\ 1 - \frac{1}{2} \left[ \frac{X_{\max} - x_{mn}}{X_{\max} - D_T} \right]^2, & x_{mn} > D_T \end{cases} \quad (7)$$

与 Pal 算法不同的是,本算法分区域地将  $\mu_{mn}/X_{mn}$  表示为图像像素  $(m, n)$  灰度级  $X_{mn}$  相对于阈值  $D_T$  和最大灰度值  $X_{\max}$  的隶属度,这样对图像低灰度区域的信息损失小,并且重新定义的隶属度函数没有复杂的幂运算,提高了算法的效率。

(3)图像的模糊增强处理

模糊增强运算的目的是以特定阈值  $X_T$  为界限,对低灰度区域进行衰减弱化运算,对高灰度区域进行增强运算,以此使得图像各个区域之间的层次比较清楚,而且使得边缘两边的灰度进行对比增强,其提取的边缘可以更细、更准确。这里  $G(X_T) = \mu_c$ , 通常情况下取  $\mu_c = 0.4$  (突出主干边缘信息) 或者  $\mu_c = 0.85$  (突出细节边缘信息), 则其所得的检测结果即可满足用户的需要。根据下式进行  $Tr$  变换:

$$\mu'_{mn} = Tr(\mu_{mn}) = \begin{cases} 2(\mu_{mn})^2, & 0 \leq \mu_{mn} \leq \mu_c \\ 1-2(1-\mu_{mn})^2, & \mu_c < \mu_{mn} \leq 1 \end{cases} \quad (8)$$

该变换增大了大于  $\mu_c$  或减小了小于  $\mu_c$  的  $\mu_{mn}$  值。此外,对增强

后的空域图像进行  $2 \times 2$  邻域平均法的平滑运算,滤除一定的噪声以减小噪声对下一步提取边缘的影响。

(4)逆变换的公式

$$X_{mn} = G^{-1}(\mu_{mn}) = \begin{cases} \mu_{mn} D_T, & x_{mn} \leq D_T \\ X_{\max} - \mu_{mn} (X_{\max} - D_T), & x_{mn} > D_T \end{cases} \quad (9)$$

(5)提取增强图像的边缘

此步采用 Pal 算法中的方法,如公式(4)、(5)。

(6)边缘连接

边缘连接是图像边缘提取中的一项重要的后处理技术。它能够在保持原有图像不失真的情况下,较大地提高边缘图像边界的连通性。

边缘像素连接的基础是它们之间有一定的相似性。这里利用像素梯度的幅度和方向来确定它们之间的相似性。根据边缘像素梯度在这两方面的相似性可把它们连接起来。具体来说,如果像素  $(s, t)$  在像素  $(x, y)$  的邻域且它们的梯度幅度和梯度方向分别满足以下两个条件(其中  $T$  是幅度幅值,  $A$  是角度幅值):

$$|\nabla f(x, y) - \nabla f(s, t)| \leq T \quad (10)$$

$$|\phi(x, y) - \phi(s, t)| \leq A \quad (11)$$

那么就可以把  $(s, t)$  上的像素和  $(x, y)$  上的像素连接起来<sup>[8]</sup>。

### 4 对比实验及分析

这里利用 VC++6.0 编程实现了传统的边缘检测方法、Pal 算法及本文的边缘检测算法。

如图 1 所示,图 1(a)所示为原始图像;图 1(b)是用 Robert 算子所得的边缘检测结果,检测结果的信息丢失严重,并放大了噪声;图 1(c)是用 Sobel 算子所得的边缘检测结果,所得边缘模糊、连续性不好,且得到的边缘较粗;图 1(d)采用 Pal 算法,一定程度上消除了边缘的模糊性,可滤除一定的噪声,但边缘检测效果不是非常理想,而且运算时间较长;图 1(e)为本文算法中没有进行边缘连接时的图像;图 1(f)是本文算法最终的边缘检测结果,采用本文提出的改进算法,勾画出了较为清晰的轮廓,检测效果较好而且处理速度较 Pal 算法快。

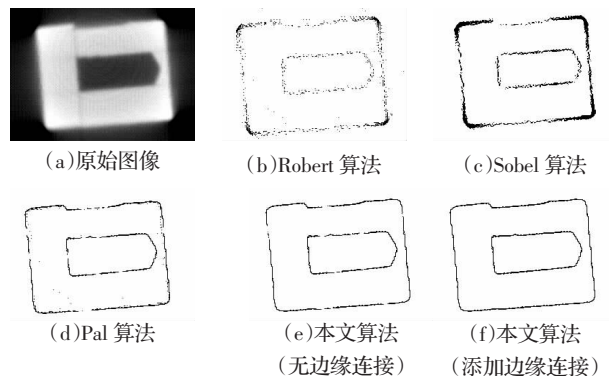


图 1 实验分析和比较

各种边缘检测的运行速度如表 1 所示,尽管本文算法较其他改进的模糊算法的运行速度稍慢,但是已经比 Pal 算法快了许多,针对边缘检测的效果来看,小部分的时间的付出换取好的检测效果是值得的。

表 1 各种边缘检测运行速度对比

算法	Pal 算法	文献[6]	本文算法
时间/s	59	12	21