

文章编号:1004-9037(2014)01-0134-07

改进的形态学肺部图像边缘检测

景少玲¹ 白 静¹ 叶鸿瑾²

(1. 太原理工大学信息工程学院, 太原, 030024; 2. 山西医科大学计算机数学部, 太原, 030001)

摘要:针对肺部图像边缘检测中存在的噪声问题,在数学形态学边缘检测的基础上做了3点改进:(1)结合结构元素3个基本选取原则,即形状的相似性、尺寸的覆盖性和不同结构元素的组合性,选取适合肺部图像的全方位结构元和多尺度结构元;(2)改进了普通的形态学边缘检测算子,将全方位结构元和多尺度结构元相结合,得到适用于肺部图像的新型复合形态学边缘检测算子;(3)将峰值信噪比(Peak signal-to-noise ratio, PSNR)加入权重计算方法中,改进了权值的计算方法。最后通过仿真实验,对PSNR为50.684 9 dB的肺部噪声图像进行边缘检测,并与一般算法进行比较,结果表明改进算法在PSNR和均方误差(Mean square error, MSE)上均有明显改善,能够检测出更清晰、去噪效果更好的肺部图像边缘。应用于其他图像或加入不同噪声时,本文算法也能检测出更清晰的图像边缘,表明该算法具有很好的鲁棒性。

关键词:边缘检测;全方位结构元;多尺度结构元;峰值信噪比

中图分类号:TN911.73;TP391.41

文献标志码:A

Edge Detection of Lung Images Based on Improved Morphology

Jing Shaoling¹, Bai Jing¹, Ye Hongjin²

(1. College of Information Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, 030024, China;

2. Department of Computer Teaching, Shanxi Medical University, Taiyuan, 030001, China)

Abstract: In view of the noise problems when detecting the edge of lung images, three points are improved based on the mathematical morphology edge detection. Firstly, connected with three fundamental select principles for the structuring element, i. e. the similarity of shape, the covering of size and the composition of the different structuring elements, it particularly chooses omnidirectional structures and multi-scale structures suitable for the lung images. Secondly, it improves common morphological edge detection operator, and combines omnidirectional structures and multi-scale structures to obtain a new compound morphology edge detection operator which is suitable for edge detection of the lung images. Thirdly, it adds peak signal-to-noise ratio (PSNR) into weight calculation method and improves the method for calculating weights. Finally, it detects the edge of lung noise images with PSNR of 50.684 9 dB through the simulation. Compared with the general algorithm, The results show that the improved algorithm can improve PSNR and mean square error (MSE) substantially and can detect more and better de-noising lung image edge. Applied to other images or different noise images, the proposed algorithm can detect sharper edges of the image, indicating that the algorithm has good robustness.

Key words: edge detection; omnidirectional structures; multi-scale structures; peak signal-to-noise ratio(PSNR)

基金项目:国家自然科学基金(61072087)资助项目;山西省自然科学基金(2010011019-3)资助项目;山西省科技公关(社会发展)(20120313013-6)资助项目。

收稿日期:2012-10-17;**修订日期:**2012-12-21

引 言

边缘检测是医学图像处理的关键技术之一,边缘检测的好坏,会直接影响后续的治疗过程。为了改善边缘检测的性能、去除边缘检测中存在的噪声、提高边缘检测的精度,文中采取数学形态学进行图像边缘检测。与传统方法相比,形态学在图像边缘检测的方向同向性及连续性方面都更加优越^[1-2]。但是边缘检测的性能取决于结构元素的选择,如何根据边缘特征自适应地选择结构元素已成为形态学中一个难点与热点^[3]。在一般形态学边缘检测中,大多采用圆形、方形等简单对称的结构元素,只能检测到与结构元素同方向的边缘,而对其他方向的边缘不敏感,因此难于适应图像中复杂的边缘、纹理等特征^[4-5]。而本文提出的全方位结构元形态学运算,是指选取能够覆盖原方形滤波窗口内几乎所有线条走向的不同结构元素,分别应用于改进后的全方位形态学算子中,可以检测出不同方向的边缘,最后将这些边缘加权求和,获得较满意的效果。多尺度结构元形态学运算,是指根据大小结构元素各自的特点,即大尺度结构元素检测边缘粗,去噪能力强;小尺度结构元素检测边缘细,去噪能力弱,合理选取大小不同的结构元素,分别应用于改进后的多尺度形态学算子中,提取不同特征的边缘,最后将这些边缘加权求和,获得较满意的边缘^[6-9]。因此为了获得不同方向、不同特征的边缘,进一步提出将全方位结构元形态学运算和多尺度结构元形态学运算相结合的算法。

现有的基于数学形态学的边缘检测算法多采用复合抗噪型算子,在图像融合处理过程中,有的利用信息熵的概念,有的利用权值与图像差值成反比的原则^[10-12],但是在权值的计算过程中都未曾有所改进,由于权值的大小直接影响到检测边缘的清晰度,为了获得更加清晰的边缘,本文将峰值噪比(Peak signal-to-noise ration, PSNR)引入权值的计算中。在常用的评价方法中,有的采用信噪比或 PSNR,有的采用均方误差(Mean square error, MSE)^[13-15]。文中通过对现有算法的改进,提出了一种全方位多尺度自适应边缘检测算法,首先推导出一种适用于肺部图像的全方位和多尺度抗噪边缘检测算子,该算子可以有效地滤除图像中的各种噪声,然后使用 8 种方向和 3 种大小的结构元素检测边缘,并采用改进后的权值将 11 幅边缘图像加权求和。实验结果表明,该算法能有效地检测到完

整的图像边缘,同时又具有很强的抗噪性能,PSNR 和 MSE 也有了明显改善。

1 结构元素的选取

1.1 全方位结构元的选取

全方位多结构元覆盖了方形窗口内几乎所有的线条走向,是一种全面划分方形滤波窗口的方法。 $(2N+1) \times (2N+1)$ 的方窗对应的全方位结构元为

$$W_f = \{f(n_1 + f_1, n_2 + f_2) / \theta_f = f_\alpha \mid -N \leq f_1, f_2 \leq N\}$$

式中: $f=0, 1, \dots, 4N-1$; $\alpha=180^\circ/4N$, 为单位旋转角^[6]。

本文选取 $N=2$, 即采用 5×5 的结构元素。它们分别对应: $\theta=0^\circ, 22.5^\circ, 45^\circ, 67.5^\circ, 90^\circ, 112.5^\circ, 135^\circ, 157.5^\circ$, 即本文从 8 个方位对肺部图像进行边缘检测。

1.2 多尺度结构元的选取

假定一个结构元素序列 $\{g_i \mid i=1, 2, \dots, n\}$ 具有相同形状且尺寸随 i 增加而单调增大, 则定义序列 $\{g_i\}$ 为一多尺度序列^[6]。根据肺部图像的特点, 本文取基本有限结构元 g_i 为半径为 1 的圆形, 且 g_i 的大小随 i 的增大而单调增大, 取 $i=1, 2, 3$ 。然而当 $i=1, 2$ 时, 结构元素实则为菱形, 这样采用不同形状的结构元素可以针对不同形状的噪声, 去噪的效果更好。本文选取的是半径为 1, 2 的菱形结构元素和半径为 3 的圆形结构元素, 符合结构元素选取中的组合性原则, 能更好地去除不同形状的噪声, 也能更好地对肺部不同形状的边缘进行检测。

2 改进的形态学边缘检测算子

定义二维空间 \mathbf{Z}^2 (\mathbf{Z} 为整数集合) 上的图像灰度离散函数为 $f(x, y)$, \mathbf{Z}^2 上的结构元素为 $b(i, j)$, $i \times j \in (-s, \dots, s)^2$, $s \in \mathbf{Z}$, 则结构元素 $b(i, j)$ 对图像函数 $f(x, y)$ 的膨胀、腐蚀、开、闭运算分别如下

$$(f \oplus b)(x, y) = \max\{f(x-s, y-s), \dots, f(x, y), \dots, f(x+s, y+s)\}$$

$$(f \ominus b)(x, y) = \min\{f(x-s, y-s), \dots, f(x, y), \dots, f(x+s, y+s)\}$$

$$f \circ b(x, y) = [(f \ominus b) \oplus b](x, y) \quad (1)$$

$$f \cdot b(x, y) = [(f \oplus b) \ominus b](x, y) \quad (2)$$

膨胀具有扩大图像的作用, 可以去除比结构元素小的暗点。膨胀后, 目标扩张, 孔洞收缩。腐蚀

具有收缩图像的作用,可以去除比结构元素小的亮点。腐蚀后,目标收缩,孔洞扩张。将两者结合起来形成膨胀腐蚀型边缘检测算子

$$G(x, y) = f(x, y) \oplus b(x, y) - f(x, y) \ominus b(x, y) \quad (3)$$

但是式(3)算子对图像并没有去噪的作用,而开闭运算对图像具有去噪的作用。开运算通常可以去掉轮廓上的毛刺,截断狭窄的山谷,而闭运算能去除区域中的小孔,填平狭窄的断裂、细长的沟壑以及轮廓的缺口,开闭运算对图像轮廓都有平滑作用^[11]。所以将开、闭组合起来形成开闭边缘检测算子

$$G(x, y) = f(x, y) \cdot b(x, y) - f(x, y) \circ b(x, y)$$

将开、闭、膨胀、腐蚀相结合便可得到一般的抗噪开闭膨胀腐蚀型边缘检测算子

$$G(x, y) = f(x, y) \cdot b(x, y) \circ b(x, y) \oplus b(x, y) - f(x, y) \cdot b(x, y) \circ b(x, y) \ominus b(x, y)$$

由于开运算可以去除图像中的亮点(正脉冲),闭运算可以去除图像中的暗点(负脉冲)。而且在用开运算去除亮点(正脉冲)的同时,会增强暗点(负脉冲)的幅值,所以先对图像作开运算去除亮点,再作闭运算去除由此增强的暗点,这样能达到理想的降噪效果,经过反复实验确定本文的新型复合抗噪边缘检测算子,即采用全方位结构元进行边缘检测时运用算子

$$G_f(x, y) = f(x, y) \circ W_f(x, y) \cdot W_f(x, y) \oplus W_f(x, y) - f(x, y) \circ W_f(x, y) \cdot W_f(x, y) \ominus W_f(x, y) \quad f=0, 1, \dots, 7 \quad (4)$$

采用多尺度结构元进行边缘检测时运用算子

$$H_i(x, y) = f(x, y) \circ g_i(x, y) \cdot g_i(x, y) \oplus g_i(x, y) - f(x, y) \circ g_i(x, y) \cdot g_i(x, y) \ominus g_i(x, y) \quad i=1, 2, 3 \quad (5)$$

3 改进的权值计算方法

PSNR 是最普遍、最广泛使用的评鉴画质的客观量测法,其计算公式为

$$\text{PSNR} = 10 \lg \left\{ \frac{(f_{\max} - f_{\min})^2}{\frac{1}{M \times N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} [h(x, y) - f(x, y)]^2} \right\} \quad (6)$$

式中: $f_{\max} = \max f(x, y)$, $f_{\min} = \min f(x, y)$, $x=0, 1, \dots, M-1$; $y=0, 1, \dots, N-1$; $h(x, y)$ 为对原图像处理后得到的新图像。 $[M, N]$ 为图像的大小。

MSE 定义为各测量值误差的平方和再取平均值的平方根,用在信号处理中表示经算法处理后的信号与原始信号的误差大小。本文的信号指的是图像像素大小, MSE 越小,则信号误差越小,算法相对更好。目前其在图像画质评价中尚未有明确的标准,仍以主观评价为主。将 PSNR 应用于本文有两个目的:(1)用它和 MSE 一起来评价本文方法的去噪效果;(2)将它与一般的权值计算方法相结合,在边缘检测的结果中加入了 PSNR 的信息,使信噪比大的图像拥有更大的权值,信噪比小的图像拥有较小的权值,从而使得到的边缘更加真实清晰,也更加科学。具体步骤为:

(1)由改进的式(4)和式(5)算子分别计算出全方位和多尺度下的 11 个边缘图像 $G_f(x, y)$ 和 $H_i(x, y)$,然后分别按式(6)计算出其 PSNR_n ,再计算出每个 PSNR 在所有 PSNR 中所占比例

$$v_f = \text{PSNR}_f / \sum_{n=0}^{10} (\text{PSNR}_f + \text{PSNR}_i)$$

$$v_i = \text{PSNR}_i / \sum_{n=0}^{10} (\text{PSNR}_f + \text{PSNR}_i)$$

$$f=0, 1, \dots, 7; i=1, 2, 3; n=0, 1, \dots, 10$$

(2)根据式(1,2)定义的形态开、闭运算,构造不同尺度的结构元素对噪声图像进行形态学开闭滤波,得到去噪声图像

$$f_i(x, y) = f(x, y) \cdot g_i(x, y) \circ g_i(x, y) \quad i=1, 2, 3$$

(3)计算不同尺度下图像的方差

$$\sigma_i^2 = |f - f_i|^2$$

(4)以各个不同尺度下图像方差的比例确定权值

$$\omega_i = \sigma_{3-i}^2 / \sum_{i=1}^3 \sigma_i^2$$

(5)试验中发现,采用全方位结构元素进行边缘检测时,权值大小几乎相等,所以本文取权值为方位数的均值

$$\omega_f = \frac{1}{7} \quad f=0, 1, \dots, 7$$

(6)最后得到本文的权值:用全方位结构元进行边缘检测时的权值为: $\omega_f + v_f$; 用多尺度结构元进行边缘检测时的权值为: $\omega_i + v_i$ 。

4 改进算法的图像边缘检测步骤

根据上述选取的结构元素和改进的边缘检测算子对图像进行边缘检测,具体步骤为:

(1)对图像加入峰值信噪比为 50.684 9 dB 的椒盐噪声或 28.768 6 dB 的高斯白噪声。

(2)由改进的权值计算步骤计算出边缘信息和权值。

(3)结合新的权值,采用全方位结构元和多尺度结构元检测结果相融合的方法计算图像边缘信息

$$I(x, y) = \sum_{f=1}^7 (\omega_f + \nu_f) G_f + \sum_{i=1}^3 (\omega_i + \nu_i) H_i$$

5 实验过程及结果

5.1 算法实现流程与实验环境

本文算法的具体实现流程图如图 1 所示。

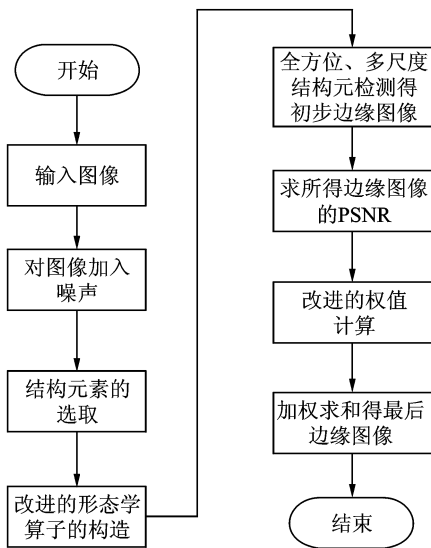


图 1 算法实现流程图

Fig.1 The algorithm flow chat

实验所用软件为 MATLAB 7.0.4;实验图像来源有:医院提供的一肺癌病人的肺部病灶 CT 图像、一健康人的肺部 CT 图像、经典的 Lena 图像,图像大小均为 512 像素×512 像素。

添加的噪声分别为:椒盐噪声(Salt & pepper, 噪声密度为 0.02);高斯白噪声(Gaussian,均值0,误差 0.01)。全方位结构元素为 5×5 的 8 个方位的线型结构元素;多尺度结构元素为半径为 1,2 的菱形结构元素和半径为 3 的圆形结构元素。

5.2 实验结果及分析

5.2.1 肺部病灶图像的边缘检测结果

文中采用 3 幅不同的原始图像,分别为图 2,图 7 和图 12(b)。图 2 为原始的肺部病灶图像,图 3 为对原图加椒盐噪声后的图像,图 4 为采用全方位结构元进行边缘检测时一般算法和改进算法对比的结果,图 5 为采用多尺度结构元进行边缘检测时,一般算法和改进算法的对比结果,图 6 为采用全方位和多尺度结构元两者结合进行边缘检测时,

一般算法和改进算法对比的结果。表 1 给出了实验中的数据,列出一般方法和改进方法在 PSNR 和 MSE 上的比较。

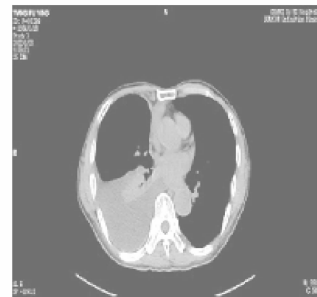


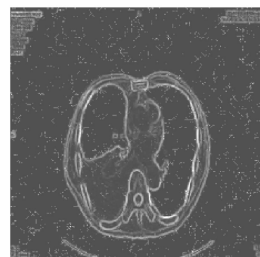
图 2 肺部病灶图像

Fig.2 Lung lesions images



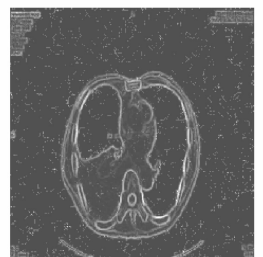
图 3 加椒盐噪声肺部病灶图像

Fig.3 Lung lesions images with salt & pepper noise



(a) 一般算法

(a) The general algorithm

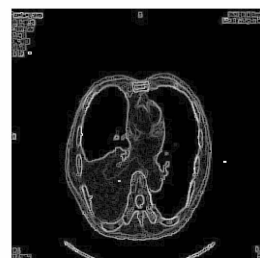


(b) 改进算法

(b) Improved algorithm

图 4 肺部病灶全方位结构元检测结果对比

Fig.4 Comparison results for lung lesions detection based on omnidirectional structures



(a) 一般算法

(a) The general algorithm



(b) 改进算法

(b) Improved algorithm

图 5 肺部病灶图像多尺度结构元检测结果对比

Fig.5 Comparison results for lung lesions detection based on multi-scale structures

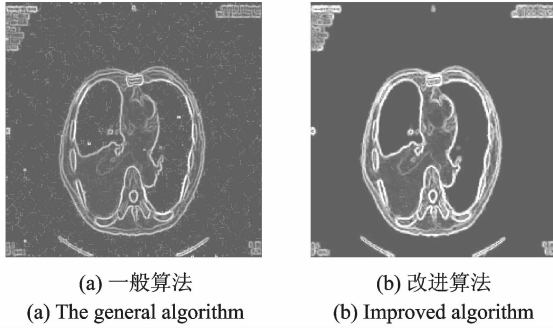


图 6 肺部病灶图像全方位与多尺度结构元结合检测结果对比

Fig. 6 Comparison results for lung lesions detection based on combination of omnidirectional structures and multi-scale structures

表 1 改进前后算法的 PSNR 和 MSE 比较

Table 1 PSNR and MSE comparison before and after improving algorithm

结构元素	PSNR/dB	MSE
全方位结构元	一般算法 31.006 1	0.515 7
	改进算法 31.374 3	0.473 9
多尺度结构元	一般算法 31.187 3	0.494 7
	改进算法 31.396 1	0.471 5
两者结合	一般算法 31.769 9	0.432 7
	改进算法 32.242 7	0.388 0

5.2.2 经典 Lena 图像的边缘检测结果

本节改用 Lena 图像(图 7,8),各图的实验方法与 5.2.1 节一一对应。单独使用全方位结构元检测边缘时,结果为图 4 和图 9,其中图 4(a),图 9(a)是采用一般算法得到的结果,明显看出图像中含有噪声,且在去噪的同时削弱了边缘,造成边缘模糊,不够清晰。图 4(b),图 9(b)是改进算法检测的结果,不但去除了噪声,而且边缘保持比较明显。单独使用多尺度结构元检测边缘时,结果为图 5 和图 10,其中图 5(a),图 10(a)是采用一般算法得到的结果,可以看出图像中也含有少量噪声,且边缘间断、不连续。图 5(d),图 10(b)是改进算法检测的结果,不但去除了噪声,而且连续性较好,但是部分边缘不太明显。如果将全方位与多尺度结构元两者结合检测边缘时,结果为图 6 和图 11,其中图 6(a),图 11(a)是采用一般算法得到的结果,可以看出比单独使用全方位结构元检测的结果图 4(a),图 9(a)和单独使用多尺度结构元检测的结果图 5(a),图 10(a)都清晰,但是仍然含有少量噪声,且最外面的轮廓略有点模糊,边缘不够清晰。而图 6(b),图 11(b)是改进算法的检测结果,分别比图 4

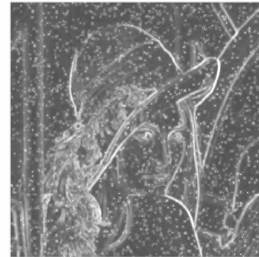
(b),图 5(b)和图 6(a)以及图 9(b),图 10(b)和图 11(a)都清晰,不但去噪效果较好,而且由于增强了权值,所以得到的边缘也更加清晰明显,连续性也



图 7 原始 Lena 图像
Fig. 7 Original Lena image



图 8 加椒盐噪声 Lena 图像
Fig. 8 Lena image with salt & pepper noise



(a) 一般算法
(a) The general algorithm



(b) 改进算法
(b) Improved algorithm

图 9 Lena 图像全方位结构元检测结果对比

Fig. 9 Comparison results for Lena image detection based on omnidirectional structures



(a) 一般算法
(a) The general algorithm



(b) 改进算法
(b) Improved algorithm

图 10 Lena 图像多尺度结构元检测结果对比

Fig. 10 Comparison results for Lena image detection based on multi-scale structures

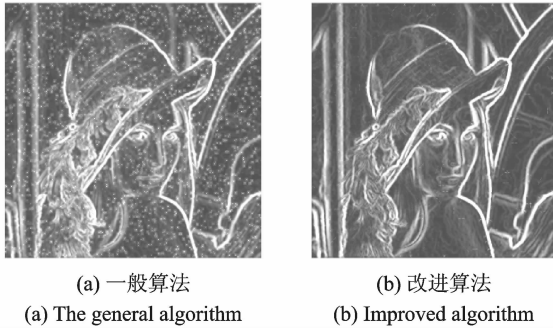


图 11 Lena 图像全方位与多尺度结构元结合检测结果对比

Fig. 11 Comparison results for Lena image detection based on combination of omnidirectional structures and multi-scale structures

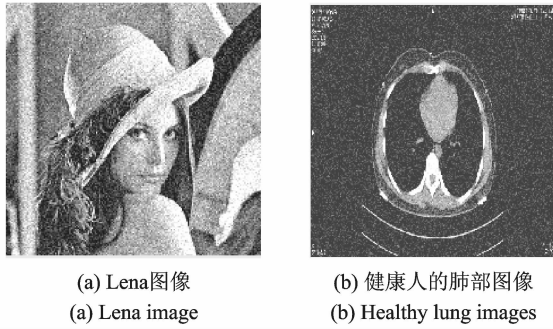


图 12 加高斯白噪声后的图像

Fig. 12 Images with Gaussian white noise

更好,甚至连很小的轮廓也能检测出来。从表 1 的数据可以看出采用改进算法,其去噪效果在 PSNR 上有所提高,在 MSE 上有所降低,均优于一般的形态学算子边缘检测结果。

5.2.3 对加高斯白噪声的图像边缘检测结果

图 12(a,b)为加高斯白噪声后的图像,图 13, 14 为采用全方位和多尺度结构元两者结合进行边

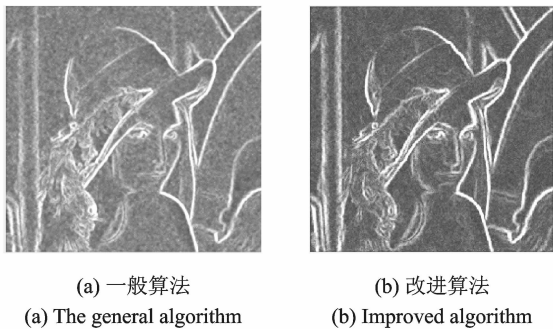


图 13 全方位与多尺度结构元结合检测结果对比(对于图 12(a))

Fig. 13 Comparison results for fig. 12(a) detection based on combination of omnidirectional structures and multi-scale structures

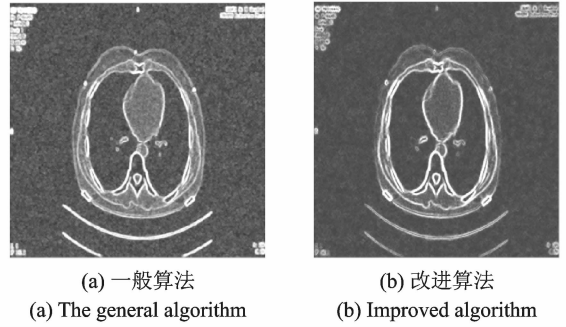


图 14 全方位与多尺度结构元结合检测结果对比(对于图 12(b))

Fig. 14 Comparison results for fig. 12(b) detection based on combination of omnidirectional structures and multi-scale structures

缘检测时一般算法和改进算法对比的结果,可以看出改进算法依然比一般算法的边缘检测效果好,说明本文提出的算法可以应用于其他图像和其他噪声情况,具有很好的鲁棒性。

6 结束语

本文讨论了一般的形态学边缘检测算子的基本思想和实现步骤,然后对一般的形态学边缘检测算子进行了改进,构造了一种更适合于肺部带噪图像的抗噪边缘检测算子,最后通过仿真实验对一般算法和改进算法进行比较,结果表明将全方位结构元和多尺度结构元相结合进行边缘检测时,从主观和客观两方面来评价,得到的边缘效果都比单独使用其中一种结构元素更好。

形态学边缘检测中结构元素的选择和形态学算子的构造是检测边缘好坏的重点和难点,结构元素不同的组合顺序也有不同的去噪效果,文中虽然得到了一些结果,但所做的工作仍非常有限,针对不同图像选取不同的结构元素并构造不同的形态学算子以便得到更好的边缘正是作者想要进一步研究的内容。

参考文献:

[1] 赵德春,彭承琳,陈园园,等.用形态学改进医学图像边缘检测算法[J].重庆大学学报,2010,33(2):123-126.

Zhao Dechun, Peng Chenglin, Chen Yuanyuan, et al. An improved morphological edge detection algorithm of medical image[J]. Journal of Chongqing University,2010,33(2):123-126.

- [2] Yang Jun, Li Xiaobo. Boundary detection using mathematical morphology[J]. Pattern Recognition Letters, 1995, 16(12): 1277-1286.
- [3] 桑恩方, 沈郑燕, 卞红雨, 等. 形态小波阈声纳图像去噪算法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(3): 324-329. Sang Enfang, Shen Zhengyan, Bian Hongyu, et al. Sonar image denoising algorithm in morphological wavelet domain[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(3): 324-329.
- [4] 张黄群, 于盛林, 白银刚. 形态学图像去噪中结构元素选取原则[J]. 数据采集与处理, 2008, 23(S): 81-83. Zhang Huangqun, Yu Shenglin, Bai Yingang. Selected principle for structuring element in image denoising based on mathematical morphology[J]. Journal of Acquisition and Processing, 2008, 23(S): 81-83.
- [5] Pan S, Kudo M. Segmentation of pores in wood microscopic images based on mathematical morphology with a variable structuring element[J]. Computers and Electronic in Agriculture, 2011, 75(2): 250-260.
- [6] 宋鸣, 胡学龙, 高燕. 基于全方位和多尺度形态学的图像边缘检测[J]. 扬州大学学报: 自然科学版, 2005, 8(1): 39-42. Song Ming, Hu Xuelong, Gao Yan. Image edge detection based on omnidirectional multiscale morphology[J]. Journal of Yangzhou University: Natural Science Edition, 2005, 8(1): 39-42.
- [7] 张德丰. MATLAB 数字图像处理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 184-186. Zhang Defeng. MATLAB digital image processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2009: 184-186.
- [8] 赵晓丽, 孔勇. 基于高斯小波的多尺度积图像边缘检测算法[J]. 数据采集与处理, 2012, 27(4): 490-494. Zhao Xiaoli, Kong Yong. Image edge detection algorithm based on multi-scale product of Gaussian wavelet[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2012, 27(4): 490-494.
- [9] 黄海龙, 王宏. 一种基于数学形态学的多形状多尺度边缘检测算法[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2010, 31(10): 1483-1486. Huang Hailong, Wang Hong. A multi-shape and multi-scale edge detection algorithm based on mathematical morphology[J]. Journal of Northeastern University: Natural Science Edition, 2010, 31(10): 1483-1486.
- [10] 刘清, 林土胜. 数学形态学的边缘检测算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(35): 188-189. Liu Qing, Lin Tusheng. Edge detection algorithm based on multi-structure element multi-scale mathematical morphology[J]. Computer Engineering and Applications, 2008, 44(35): 188-189.
- [11] 王爱玲, 叶明生, 邓秋香. MATLAB R2007 图像处理技术与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008: 256-257. Wang Ailing, Ye Mingsheng, Deng Qiuxiang. Image processing technology and applications in MATLAB R2007[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2008: 256-257.
- [12] Shih M Y, Tseng D C. A wavelet-based multiresolution edge detection and tracking[J]. Image and Vision Computing, 2005, 23(4): 441-451.
- [13] 张维强, 宋国乡. 基于一种新的阈值函数的小波域信号去噪[J]. 西安电子科技大学学报: 自然科学版, 2004, 31(2): 296-299. Zhang Weiqiang, Song Guoxiang. Signal de-noising in wavelet domain based on a new kind of thresholding function[J]. Journal of Xidian University: Natural Science Edition, 2004, 31(2): 296-299.
- [14] 刘高生, 马小三, 王培珍. 基于改进的中值滤波和数学形态学的图像边缘检测[J]. 计算机与现代化, 2011(8): 57-59. Liu Gaosheng, Ma Xiaosan, Wang Peizhen. A new edge detection algorithm based on improved median filter and mathematical morphology[J]. Computer and Modernization, 2011(8): 57-59.
- [15] 孙涛, 李传富, 刘伟, 等. 基于特征向量的颅脑 CT 图像分割方法[J]. 数据采集与处理, 2010, 25(5): 605-610. Sun Tao, Li Chuanfu, Liu Wei, et al. Segmentation of brain CT images based on eigenvectors[J]. Journal of Data Acquisition and Processing, 2010, 25(5): 605-610.

作者简介: 景少玲(1987-), 女, 博士研究生, 研究方向: 数字图像处理; 白静(1965-), 女, 博士, 教授, 研究方向: 数字信号处理及模式识别, E-mail: bj613@126.com; 叶鸿瑾(1964-), 女, 高级工程师, 研究方向: 数字图像处理, 控制理论与控制工程。

