

一种基于 Top-hat 的乳腺图像中钙化点的检测方法

董妍 高新波 王颖

(西安电子科技大学电子工程学院, 西安 710071)

摘要 钙化点是乳腺癌早期的一个主要放射学征象。为了实现数字乳腺图像中钙化点的自动检测,提出了一种基于 Top-hat 算子的钙化点检测方法。该方法采用形态学中的 Top-hat 算子对图像的背景进行抑制,然后结合孤立钙化点的灰度、纹理和对比度等特征对乳腺图像中的钙化点进行检测。与一般的检测方法相比,这种方法能够有效地检测到强背景中的弱小钙化点目标,而且检测结果贴近于钙化点病灶的真实形状。

关键词 Top-hat 算子 钙化点检测 计算机辅助诊断

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2006)12-1839-05

A Top-hat Based Calcifications Detection Method in Mammograms

DONG Yan, GAO Xin-bo, WANG Ying

(School of Electronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071)

Abstract Microcalcifications are the primary radiological indicator of early breast cancers. A method for the automatic detection of microcalcifications in digital mammograms is presented in this paper. The algorithm based on top-hat morphologic operator is developed to restrain the background, then the features of single microcalcifications such as gray, texture, and contrast, etc. are extracted to detect the microcalcifications in mammograms. The proposed method is based on the Top-hat operator. Comparing to other approaches, this method can more efficiently detect weak microcalcifications in the high background, and the detected results are much close to the actual shapes of the calcifications.

Keywords Top-hat, detection of calcifications, computer-aided diagnosis

1 引言

乳腺癌是一种常见高发的恶性肿瘤,严重威胁着女性的生命与健康。在目前的医疗水平下,它的治愈主要取决于病情发现的早晚,因此,应本着“及早发现,及早诊断,及早治疗”的原则,将疾病消灭于萌芽状态。簇化的钙化点和肿块是乳腺恶性肿瘤在乳腺图像上的主要表现,因此,钙化点检测是计算机辅助诊断(computer-aided diagnosis, CAD)系统中关键的一步。目前钙化点的检测方法主要包括传统的图像处理方法^[1]、基于小波变换的处理方法^[2]、基于统计学的方法^[3]、基于机器学习的方法(包括

有监督的例如支撑向量机^[4]、神经网络^[5]和无监督的例如模糊聚类^[6])以及这几种方法的综合应用。由于乳腺图像中许多弱小钙化点都处于强背景中,容易被医生忽略,如果能找到一种可以有效抑制强背景的方法,弱小钙化点就能够被很好的检测到。现有的这些方法很少有通过抑制背景来检测钙化点的,因此,寻找一种能够有效抑制背景,从而检测出强背景中弱小钙化点目标的算法成为人们关注的课题。

Top-hat 算子是基于灰度图像的数学形态学中的一种高通滤波算子,通过选择合适的结构元,就可以利用该算子将感兴趣的弱小的目标从复杂的背景中提取出来。根据这个特性,本文将 Top-hat 应用于

基金项目: 教育部重点项目(104173)、新世纪优秀人才支持计划(NCET-04-0984)

收稿日期: 2005-12-13 改回日期: 2006-01-25

第一作者简介: 董妍(1979~),女。2006年于西安电子科技大学电子工程系获信号与信息处理硕士学位。主要研究方向为图像处理与模式识别。E-mail: dyan@lab202.xidian.edu.cn

乳腺图像的微钙化点的检测中。

2 基本概念

2.1 Top-hat

Top-hat^[7,8]算子是定义在灰度数学形态学基本运算基础上的一种算子。设 $f(x)$ 和 $g(x)$ 是定义在 2 维离散空间 F 和 G 上的两个离散函数,其中, $f(x)$ 为灰度图像, $g(x)$ 为结构元素,则 $f(x)$ 关于 $g(x)$ 的形态开和形态闭分别定义如下:

$$(f \circ g)(x) = [(f \ominus g) \oplus g](x) \quad (1)$$

$$(f \bullet g)(x) = [(f \oplus g) \ominus g](x) \quad (2)$$

其中“ \oplus ”和“ \ominus ”分别为膨胀和腐蚀算子。

Top-hat 算子可以分为开 Top-hat 算子和闭 Top-hat 算子。

开 Top-hat 算子定义为

$$OHat_{f_g}(x) = (f - (f \circ g))(x) \quad (3)$$

闭 Top-hat 算子定义为

$$CHat_{f_g}(x) = ((f \bullet g) - f)(x) \quad (4)$$

Top-hat 变换具有高通滤波的某些特性,其中开 Top-hat 算子能检测图像中的峰,闭 Top-hat 算子能检测图像中的谷。本文用到的均为开 Top-hat 算子。Top-hat 滤波等效于原图像减去原图与结构元素 (SE_1) 进行开运算后得到的图像,开运算后,小于 SE_1 的目标将会被腐蚀掉而不能被膨胀恢复回来,再从原图中减去该图像,剩下的就是小于 SE_1 的目标而抑制掉比其尺寸大的背景。同理,对经过 Top-hat 运算后的图像再进行开运算(结构元素用 SE_2),将会保留尺寸小于 SE_1 和大于 SE_2 的目标。

2.2 类间方差最大的图像分割法

类间方差最大化法^[9]是基于图像灰度直方图的一种阈值化图像分割方法。它之所以能够很好地将图像分成两类是由于:方差是灰度分布均匀性的一种度量,方差值越大,说明构成图像的两部分差别越大,当部分目标错分为背景或部分背景错分为目标都会导致两部分差别变小,因此使类间方差最大的分割意味着错分概率最小。

设图像的灰度范围为 $\{1, 2, \dots, L\}$, N 为图像中像素总数, n_i 是灰度为 i 的像素数, $p_i = n_i/N$ 是灰度为 i 的像素数占像素总数的比例。选择门限 k 将灰度范围划分为 C_0 和 C_1 两类,其中 C_0 的灰度范围为 $\{1, 2, \dots, k\}$, C_1 的灰度范围为 $\{k+1, \dots, L\}$,那么两类的类间方差为

$$\sigma_B^2 = \omega_0 \omega_1 (\mu_1 - \mu_0)^2 \quad (5)$$

式中

$$\omega_0 = \sum_{i=1}^k p_i$$

$$\omega_1 = \sum_{i=k+1}^L p_i$$

$$\mu_1 = \sum_{i=k+1}^L ip_i / \omega_1$$

$$\mu_0 = \sum_{i=1}^k ip_i / \omega_0$$

最大化 σ_b^2 的过程就是自动确定门限 k^* 的过程,即最佳门限为

$$k^* = \max_{1 \leq k \leq L} \sigma_B^2 \quad (6)$$

这里的 k^* 即是使类间方差最大的阈值。

3 Top-hat 在钙化点检测中的应用

微小钙化点在乳腺图像中通常表现出一定的特征,例如具有相对高的亮度,较周围的组织密度大,有一个较明显的轮廓,且与周围组织的灰度对比度大等等,根据钙化点的这些影像学特征,提出了一种基于 Top-hat 形态学处理的钙化点自动检测算法。算法的总体框架如图 1 所示。

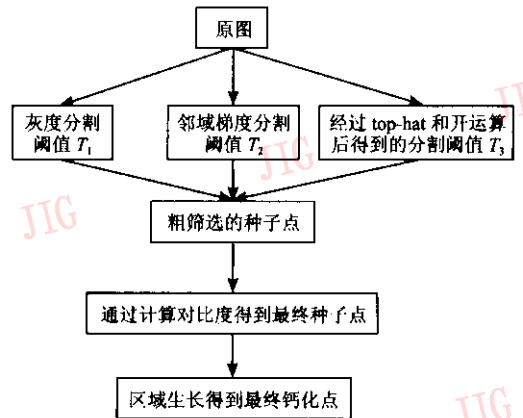


图 1 基于 Top-hat 检测钙化点的算法流程

Fig. 1 Flowchart of the proposed algorithm

在算法中,对原图进行 Top-hat 滤波是关键的一步。之所以用 Top-hat 来检测强背景中的弱小钙化点目标,主要是由于 Top-hat 等效于原图像减去原图与结构元素进行开运算后得到的图像,选用合适的结构元素(略大于钙化点的尺寸)对原图进行开运算,可以得到尺寸大于结构元素的背景,再用原图像减去开运算后的图像,就可以去除背景,检测到目标

(钙化点)。由于 Top-hat 算子中用到了钙化点的形状、大小等特征,因此检测结果非常贴近于钙化点病灶的真实形状。原图经过 Top-hat 滤波后就可以抑制掉大部分背景,检测出种子点。如果只用 Top-hat 对原图进行滤波,检测出的种子点包括许多虚警,因此,利用图像的梯度、灰度以及对比度等特征辅助 Top-hat 进行检测,使检测结果更加精确。

如图 1 所示,整个算法可以分为两个部分:种子点的选取以及区域生长。算法根据钙化点在乳腺图像中的征象选取一些种子点,然后对这些种子点根据一定的生长准则进行区域生长,从而得到完整的钙化点区域。

种子点的选取分为两步:首先粗筛选一些种子点,然后在粗筛选的种子点中确定最终的种子点。选取粗筛选的种子点时,需要确定 3 个分割阈值,获得这 3 个阈值方法是:

(1) 使用类间方差最大法分割原图 I , 得到分割阈值 T_1 ;

(2) 计算原图像的 5×5 邻域梯度图像 G , 用类间方差最大法求得 G 的分割阈值 T_2 ;

(3) 原图像经过 Top-hat 处理, 去除背景得到目标, 然后再进行开运算, 去除奇异点, Top-hat 运算以及开运算均需要选择合适的结构元素, 考虑到钙化点在 X 线图像中的实际大小, 以及钙化点通常呈现圆点状, 因而选择 disk 型结构元素, 根据仿真实验, 取其半径参数分别为 1 和 10, 这样就能够保留图像中的钙化点区域, 去除面积很小的噪声点和面积较大的腺体组织背景。这里分别选用 disk10 和 disk1, 用类间方差最大法得到开运算后图像 T 的分割阈值 T_3 。

根据以上 3 个分割阈值可以得到满足以下条件的像素点:

$$I > T_1 \& G > T_2 \& T > T_3 \quad (7)$$

这些点即是粗筛选的种子点, 其中连通的点被看作一个整体。由于这些粗筛选的种子点中仍然包括虚警, 所以还需要进一步的筛选, 来确定最终的种子点。

将粗筛选的种子点在原图中的灰度均值与其膨胀后所得到的区域灰度均值的比值定义为对比度, 膨胀过程中用到的结构元素取为 disk1。对于每个粗筛选的种子点, 计算其对比度, 如果对比度小于某个可调值, 那么该种子点就作为最终的种子点。

在种子点的基础上, 进行区域生长以提取出完

整的钙化点区域。为了确保种子点在各个方向上都能充分生长, 生长过程中采用 8 邻域的生长准则:

$$0 < p_{seed} - p_{new} < \mu(\max_p - \min_p) \mid p_{new} > p_{seed} \quad (8)$$

其中 p_{seed} 为种子点, p_{new} 为种子点 8 邻域内的待检测点, μ 为可调参数, 通过实验这里取为 0.2, \max_p 为种子点 p_{seed} 已生长区域的各个点的灰度最大值, \min_p 为种子点 p_{seed} 已生长区域的各个点的灰度最小值。

检测算法可归纳为以下几步:

(1) 对图像进行预处理, 将满足式(7)的像素点作为粗筛选的种子点;

(2) 对于粗筛选的种子点进行开运算以去除奇异点(这里结构元素取为 disk1), 剩下的点就作为待测点, 计算待测点的对比度, 根据对比度条件, 得到最终的种子点;

(3) 对最终种子点进行区域生长并输出结果。

4 实验结果

为了验证基于 Top-hat 的方法较其他方法, 能够更有效地检测到乳腺图像中强背景下的弱小钙化点目标, 对其进行了仿真, 并将检测结果与基于小波的方法得到的检测结果进行了对比。实验中用到的图像来自美国南佛罗里达州立大学 DDSM 数据库 (<http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html>), 库中的数据为 12 位和 16 位的灰度图像。实验是对两幅乳腺图像中的感兴趣区域进行的, 检测结果如图 2 ~ 图 4 所示。

图 2(a) 是一幅大小为 453×399 的图像, 其中的虚线是由专家标注出的包含有恶性钙化点簇的感兴趣区域, 虚线外还可能存在着零散的钙化点, 由于对乳腺癌的早期诊断来说, 簇化的钙化点是恶性的标志, 因此, 检测的重点是曲线内的钙化点簇。由图 2(a) 可以看到, 原图中用圆圈标注的钙化点其亮度、梯度等特征不是很明显, 不易检测。原图经过 Top-hat 滤波, 大部分背景被抑制, 目标初步显示出来, 如图 2(c) 所示, 然后根据钙化点的灰度、梯度特征, 得到粗筛选的种子点, 如图 2(e) 所示, 最后用对比度特征选择最终种子点(本文取对比度小于 1.005), 如图 2(g) 所示, 对这些种子点进行区域生长即得如图 2(h) 的检测结果。

图 3(a) 是一幅大小为 336×433 的图像。与第 1 幅图的标注相同, 本图中虚线是由专家标注出的感兴趣区域, 圆圈标注的是特征不明显钙化点。

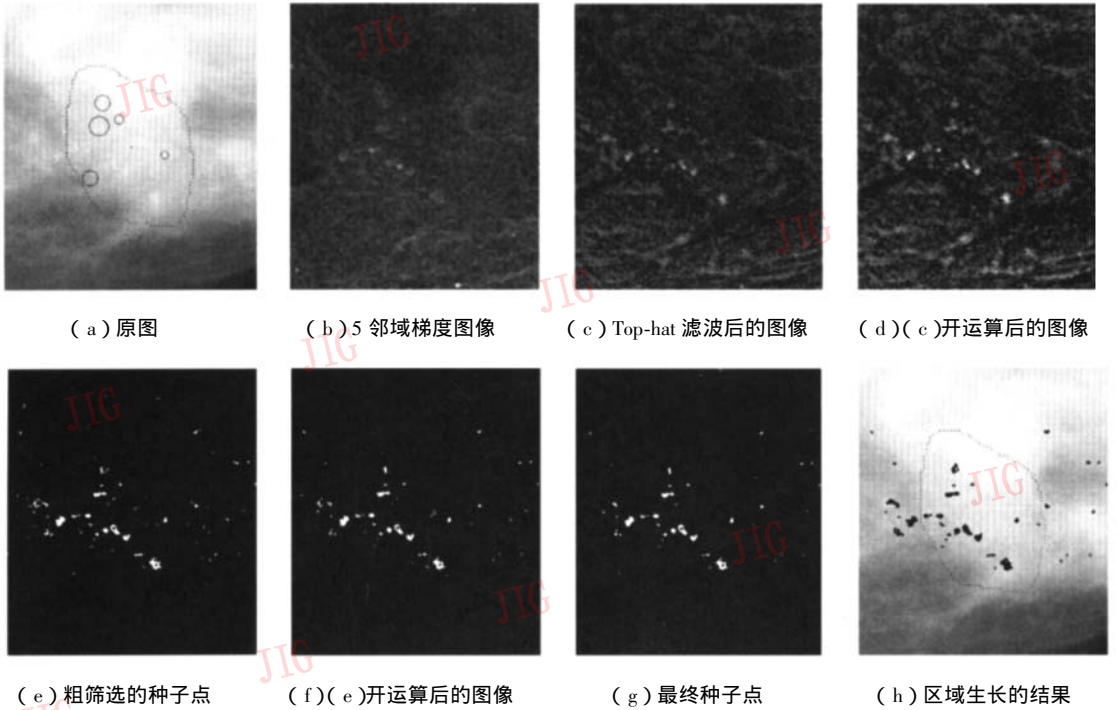


图 2 基于 Top-hat 的方法检测钙化点的实验结果 I

Fig. 2 Detection results I with Top-hat method

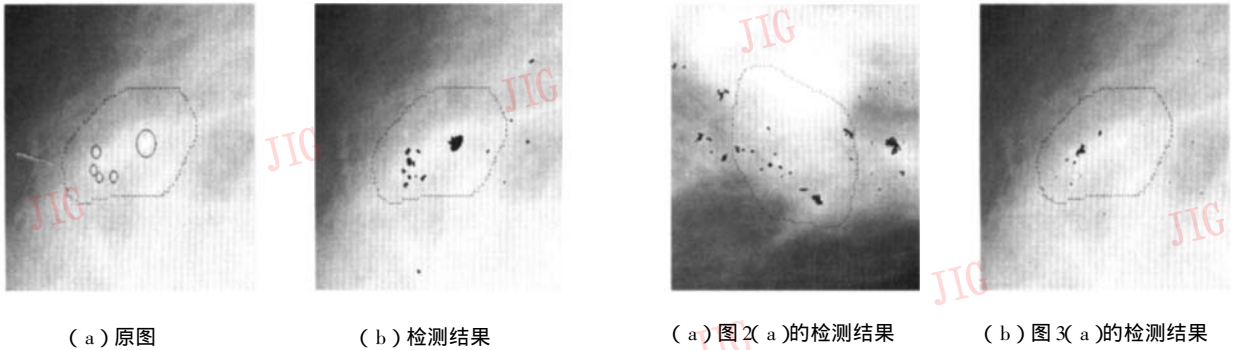


图 3 基于 Top-hat 的方法检测钙化点的实验结果 II

Fig. 3 Detection results II with Top-hat method

图 4 基于小波的方法的实验结果

Fig. 4 Detection results with wavelet method

本图中对比度条件取为小于 1.006,检测结果如图 3(b)所示。

图 4 为用小波变换的方法分别对两幅图进行钙化点检测得到的结果。在第 1 幅图中,将满足在原图中灰度大于等于某个阈值(这里取 185),并且在小波变换后的图中灰度大于等于某一阈值(这里取 168)两个条件的像素点作为种子点,然后对种子点在原图中进行区域生长后得到如图 4(a)的检测结果,在第 2 幅图中,将满足在原图中灰度大于等于 200,并且在小波变换后的图中灰度大于等于 188 两个条件的像素点作为种子点,然后对种子点在原图中进行区域生长后得到如图 4(b)的检测结果。

从实验结果可以看到,对于特征不明显的弱小的钙化点,用基于小波变换的检测方法效果不是很好(一旦降低灰度门限,将会检测到大量的虚警),而基于 Top-hat 的方法能够很好地检测出强背景下的弱小钙化点,并且检测结果贴近于钙化点病灶的真实形状,提高了检测结果的置信度,有利于计算机辅助诊断系统进行下一步判断。

5 结 论

为了更精确地检测出强背景下的弱小钙化点,本文提出一种基于 Top-hat 的钙化点检测方法。算

法利用钙化点的亮度、梯度、形态、大小、对比度特征,不仅考虑了图像的整体特征,而且考虑了其局部特征。实验结果表明,Top-hat 方法具有良好的稳定性和有效性,不仅能够很好地检测出乳腺图像中强背景中的弱小钙化点,而且检测结果贴近于钙化点病灶的真实形状。

本文提出的钙化点检测方法中涉及多个结构元素,如何自适应选择合适的结构元素(包括结构元素的形状和大小),有待进一步的研究和探讨。

参考文献(References)

- ZHANG Yu-jin. Image Engineering—image Processing and Analyzing [M]. Beijing :Tsinghua Press.[章毓晋著. 图像工程——图像处理和分折 M]. 北京 :清华大学出版社,1999.]
- Wang Ted C , Karayiannis Nicolaos B. Detection of microcalcifications in digital mammograms using wavelets[J]. IEEE Transactions on Medical Imaging ,1998 ,17(4) :498 ~509.
- Gurcan M N , Yardimci Y , Cetin A , *et al.* Detection of microcalcifications in mammograms using higher order statistics[J]. IEEE Signal Processing Letters ,1997 ,4(8) :213 ~216.
- El-Naqa I , Yang Y , Wernick M , *et al.* Support vector machine learning for detection of microcalcifications in mammogram[A]. In : Proceedings of IEEE International Symposium on Biomedical Imaging [C], Washington ,2002 :201 ~204.
- Sorantin E , Schmidt F , Mayer H , *et al.* Computer aided diagnosis of clustered microcalcifications using artificial neural nets[J]. Journal of Computing and Information Technology ,2000 ,8(2) :151 ~160.
- LIN Yao , TIAN Jie , ZHANG Xiao-peng. Application of a new medical image segmentation method based on fuzzy connectedness and FCM[J]. Chinese Journal of Stereology and Image Analysis ,2001 ,6(2) :103 ~108.[林瑶,田捷,张晓鹏. 基于模糊连通度的 FCM 分割方法在医学图像分析中的应用[J]. 中国体视学与图像分析,2001 ,6(2) :103 ~108.]
- CUI Yi. Image Processing and Analysis-Mathematical Morphology Methods and Applications[M]. Beijing :Science Press ,2000.[崔屹著. 图像处理与分析——数学形态学方法及应用[M]. 北京 :科学出版社,2000.]
- YE Bin , PENG Jia-xiong. Small target detection method based on morphology Top-hat operator[J]. Journal of Image and Graphics ,2002 ,7(7) :638 ~642.[叶斌,彭嘉雄. 基于形态学 Top-hat 算子的小目标检测方法[J]. 中国图象图形学报,2002 ,7(7) :638 ~642.]
- LI Bin , PENG Jia-xiong. Detection and recognition of infrared small target based on dynamic programming[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology ,2002 ,28(6) :68 ~70. [李斌,彭嘉雄. 基于动态规划的红外小目标检测与识别[J]. 华中理工大学学报,2000 ,28(6) :68 ~70.]
- 美国南佛罗里达州立大学. 乳腺图像数据库[EB/OL]. <http://marathon.csee.usf.edu/Mammography/Database.html> , June 2000-06.