

## 基于高清晰度CT图像的孤立性肺结节计算机辅助诊断系统

张泽文<sup>1</sup>, 张才擎<sup>2</sup>, 张成琪<sup>3</sup>

1. 山东中医药大学第一临床医学院, 山东 济南 250014; 2. 山东省千佛山医院呼吸科, 山东 济南 250014; 3. 山东省千佛山医院影像科, 山东 济南 250014

**【摘要】**本文介绍了一款基于高清晰度CT(High Definition CT, HDCT)图像的孤立性肺结节(Solitary Pulmonary Nodule, SPN)计算机辅助诊断系统(Computer-Aided Diagnosis System, CADS),该系统对SPN良恶性诊断具有一定的临床使用价值。收集经临床病理证实SPN患者110例,包括恶性肿瘤、良性肿瘤、结核和炎性假瘤,随机抽取60例作为实验集,50例作为验证集。实验集HDCT图像经图像预处理、感兴趣区域(Region of Interest, ROI)基于标记的分水岭算法分割和ROI纹理特征参数提取,对获得的5项纹理特征参数做统计处理,将统计结果应用于系统以对SPN做良恶性分析并给出提示信息。验证集HDCT图像输入系统,由运行结果可知本系统对SPN诊断能获得较为满意的效果。本系统运用基于标记的分水岭算法,对于胸壁或纵隔粘连的结节及磨玻璃病变等均可以较好地将其分割提取出来,同时自动分析后给医师提示SPN良恶性,辅助临床医师对SPN诊断,提高恶性SPN的检出率,使诊断更加客观、科学。

**【关键词】**计算机辅助诊断;孤立性肺结节;高清晰度CT;分水岭算法;纹理特征提取

**【中图分类号】**TP391.41;R318

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2015)05-0669-05

## Computer-aided diagnosis system for solitary pulmonary nodules based on high definition CT images

ZHANG Ze-wen<sup>1</sup>, ZHANG Cai-qing<sup>2</sup>, ZHANG Cheng-qi<sup>3</sup>

1. The First Clinical Medical College, Shandong University of Traditional Chinese Medicine, Jinan 250014, China; 2. Department of Respiration, Qianfoshan Hospital, Jinan 250014, China; 3. Department of Imaging, Qianfoshan Hospital, Jinan 250014, China

**Abstract:** A computer-aided diagnostic system (CADS) for solitary pulmonary nodule (SPN) based on high definition CT (HDCT) images is introduced in this paper. And the CADS has certain clinical values in the diagnosis of malignant and benign SPN. Confirmed by clinical pathology, 110 cases of SPN were selected, including malignant tumors, benign tumors, tuberculosis and inflammatory pseudotumors. Among these cases, 60 cases were randomly selected as the experimental set, while the other 50 cases were in the validation set. HDCT images of the experimental set were preprocessed, and the region of interest (ROI) was segmented by marker-based watershed algorithm, and ROI texture feature parameters were extracted to statistically analyze the acquired five texture feature parameters. The statistical results were applied in the CADS to diagnose malignant and benign SPN and provide related messages. HDCT images of the validation set were inputted in the CADS. The system operation performance showed the CADS could achieve a satisfactory effect in the diagnosis of SPN. The CADS, applying marker-based watershed algorithm, can effectively segment and extract the nodules adjoined with the chest wall or mediastinum and the ground glass lesions. Meanwhile, the automatic analysis of CADS can provide some diagnostic messages of SPN to assist clinicians in the clinical diagnosis, improving the detection rate of malignant SPN and making the diagnosis more objective and scientific.

**Key words:** computer-aided diagnostic system; solitary pulmonary nodule; high definition CT; marker-based watershed algorithm; texture feature extraction

**【收稿日期】**2015-06-02

**【基金项目】**国家自然科学基金(61272245)

**【作者简介】**张泽文(1990-),男,在读硕士研究生。Tel: 15168888268;E-mail: 359638479@qq.com。

**【通信作者】**张成琪,教授,博士生导师。E-mail: chengqizhangjn@yahoo.com.cn。

## 前言

孤立性肺结节(Solitary Pulmonary Nodule, SPN)指肺部单发的、直径小于或等于30 mm且不伴肺门与纵隔淋巴结肿大、肺不张与肺炎的结节性病变<sup>[1]</sup>。SPN是肺内常见的病变,大规模放射学检查表明SPN发生率为0.09%~0.20%,其中恶性结节的发生率为3%~6%,以周围型肺癌为主<sup>[2]</sup>。在我国多数大城市,肺癌的发病率和死亡率居恶性肿瘤的第一位,如果能够诊断和治疗早期肺癌,病人5年生存率将会由原来的14%上升到49%<sup>[3]</sup>。及时检测与诊断SPN的良恶性有利于发现早期肺癌,同时避免了肺内良性结节过度诊断而实施的不必要手术。CT具有良好的密度分辨率及消除重叠结构的断层作用,尤其是高清晰度CT(High Definition CT, HDCT),可以将结节的大小、形态、位置、边界特征、内部结构以及周围改变等高质量地显示出来,成为诊断与鉴别诊断依据的可靠来源<sup>[4]</sup>。现如今HDCT日益普及,HDCT扫描逐渐成为SPN诊断的重要手段。

我们开发了一种基于HDCT图像的孤立性肺结节计算机辅助诊断系统(Computer-Aided Diagnosis System, CADs),该系统能够交互式地对肺部HDCT图像进行分析后提示医生SPN的良恶性,从而降低由医生主观因素带来的诊断误差,提高了恶性SPN的检出率<sup>[5-7]</sup>,使诊断更加客观、科学。

## 1 系统实现方法

由图1所示,首先对输入的原始HDCT图像进行预处理(包括原始图像剪切、灰度化等)。得到预处理图像后,对我们来说感兴趣区域(ROI)就是SPN,所以运用基于标记的分水岭图像分割算法<sup>[8]</sup>对预处理图像进行分割得到SPN区域,然后根据该SPN区域对预处理图像进行数字减影得到ROI。之后提取ROI的纹理特征参数<sup>[9]</sup>,根据这些参数做统计处理,最后根据统计结果对SPN做良恶性判断并给出提示信息。

### 1.1 原始图像预处理

一幅原始HDCT图像除了人体断层影像外,还包括衣物、CT床、扫描参数和病号信息等与系统处理无关的数据,算法的有效性和运算时间会受到这些冗余数据的影响,因而去除这些无关区域,保留肺实质部分。通过对原始图像交互式剪切,得到了保留肺实质的图像,然后将其转换为灰度图像。

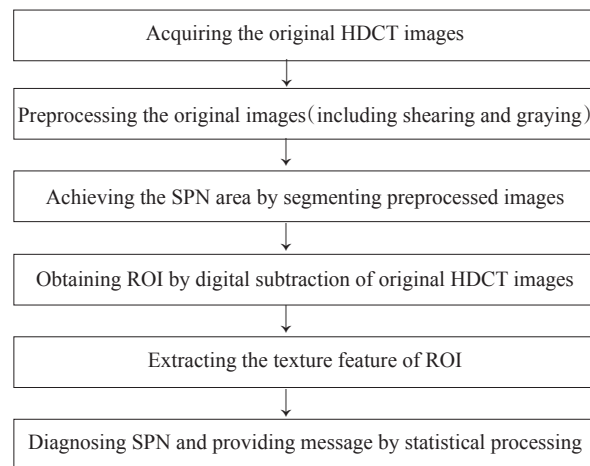


图1 系统诊断SPN算法流程图

Fig.1 Flow chart of SPN diagnosis

Note: HDCT: High definition CT; SPN: Solitary pulmonary nodule; ROI: Region of interest

### 1.2 分割SPN区域

分水岭分割算法的基本思想:把图像看成是大地测量学上的拓扑地貌,图像中每个像素的灰度值表示该像素的绝对高度,每个局部极小值及其影响区域称为集水盆,集水盆的边界形成分水岭。该算法是一种基于拓扑理论的数学形态学分割方法<sup>[10,11]</sup>。

通过模拟浸入过程来说明分水岭的形成:在每个局部极小值表面,穿刺一个小孔,之后把整个模型慢慢浸入液体中。随着浸入的加深,每个局部极小值的影响区域缓缓向外扩张,在两个集水盆汇合处构建大坝,形成分水岭。

如果直接运用分水岭分割算法效果往往并不好<sup>[12-13]</sup>,为降低其产生的过度分割问题,我们采用基于标记的分水岭图像分割算法分割预处理图像。首先标记图像的前景和背景,每个对象内前景像素是相连的,同时背景里每个像素值不属于任何目标物体,然后进行分割函数计算,采用分水岭分割算法实现图像分割,经填充后得到SPN区域图像。

**1.2.1 图像边界获取** 通过Sobel边缘算子对图像进行垂直和水平方向滤波,求取模值。经Sobel算子滤波后的图像在无边界处的值会很小,在边界处会显示较大的值,最终获得了显示图像边界的梯度图像 $I_c$ 。

$$g(x,y) = \text{grad}(f(x,y)) = \sqrt{[f(x,y) - f(x-1,y)]^2 + [f(x,y) - f(x,y-1)]^2} \quad (1)$$

式中,  $f(x,y)$  表示原始图像,  $\text{grad}()$  表示梯度运算。

**1.2.2 形态学重建技术标记前景和背景** 开运算和闭运算可以去除比结构元素小的特定图像细节,同时

保证全局几何失真不产生。先腐蚀后膨胀的过程称为开运算,能够把比结构元素小的毛刺滤过掉,切断纤细连接而起到分离作用,因而可以去除肺内细小物体、分离一些与肺轮廓相连的区域;先膨胀后腐蚀的过程称为闭运算,能够把比结构元素小的孔洞填补上,连接短的间隔而起到搭接作用,因而可以平滑肺实质边缘尖角,填平小的凹陷。因此我们使用形态学重建技术对前景和背景对象进行标记,得到二值标记图像  $I_{mark}$  :

$$\text{开运算: } A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (2)$$

$$\text{闭运算: } A \cdot B = (A \oplus B) \ominus B \quad (3)$$

**1.2.3 基于标记的分水岭分割算法分割 SPN** 通过数学形态学中的极小值标定技术,修改分割图像  $I_c$ 。1.2.2 节中提取得到了标记,将其强制作为梯度图像的局部极小值,忽略原有图像中所有局部极小值。经修改的梯度图像中,只有二值标记图像  $I_{mark}$  中不为零的地方对应有强制局部极小值。极小值修改后的梯度图像用  $I_c^w$  代表,即  $I_c^w = IMMIN(I_c, I_{mark})$ , 其中  $IMMIN()$  代表形态学极小值标定运算。于图像  $I_c^w$  上运行分水岭分割算子,最终得到理想的区域分割结果,记作  $I_w$ , 分水岭算法分割算子以  $WTS()$  代表,即

$$I_w = WTS(I_c^w) \quad (4)$$

通过基于标记的分水岭分割算法,得到了 SPN 分割图像,经 SPN 轮廓线提取以及交互式填充 SPN 外区域后,得到了 SPN 区域图像。

### 1.3 提取感兴趣区域(ROI)

由于 SPN 区域图像与预处理图像像素矩阵大小是一致的,因此我们将两张图像重合进行数字减影运算,得到初级 SPN 图像。此时的 SPN 图像黑色背景过于繁多,经交互式剪切后,得到了可进行纹理特征提取的 SPN 图像,即 ROI 图像。

### 1.4 提取 ROI 纹理特征

纹理是由散布在空间位置上的灰度反复出现而形成的,因此图像中两像素存在某距离,二者之间会存在一定的灰度关系,即图像的灰度空间相关性。灰度共生矩阵通过研究灰度空间相关性,常用来描述纹理。

根据 SPN 的 CT 征象,提取有效的 ROI 纹理特征参数对下一步良恶性判断至关重要,因此通过灰度共生矩阵提取 ROI 的纹理特征。经过理论分析和反复实践,选取了如下 5 个特征参数<sup>[14-15]</sup>:

①对比度  $CON$  :它是对图像的清晰度和纹理沟

纹深浅程度的度量。纹理沟纹越浅,其对比度越小,视觉效果越模糊;反之,对比度大,则沟纹深,视觉效果清晰。

$$CON = \sum_i \sum_j (i-j)^2 P(i,j) \quad (5)$$

②相关性  $COR$  :它反映了灰度共生矩阵元素在行或列方向上的相似度。因此,相关值大小对应图像中局部灰度相关性。当矩阵元素值相差很大时,相关值就小;相反,如果矩阵元素值均匀相等,则相关值大。

$$COR = \frac{\sum_i \sum_j (i - \bar{x})(j - \bar{y}) P(i,j)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (6)$$

其中,

$$\bar{x} = \sum_i i \sum_j P(i,j)$$

$$\bar{y} = \sum_j j \sum_i P(i,j)$$

$$\sigma_x^2 = \sum_i (i - \bar{x})^2 \sum_j P(i,j)$$

$$\sigma_y^2 = \sum_j (j - \bar{y})^2 \sum_i P(i,j)$$

③熵  $ENT$  :它描述了图像所具有的信息量。纹理信息属于图像信息,具有随机性,当空间共生矩阵中所有元素具有最大的随机性、值几乎相等或分散分布时,熵比较大。它反映了图像中纹理的复杂程度或非均匀程度。

$$ENT = - \sum_i \sum_j P(i,j) \lg P(i,j) \quad (7)$$

④平稳度:它度量灰度共生矩阵元素分布到对角线的紧密程度。

⑤二阶矩  $ASM$  :灰度共生矩阵元素值的平方和即二阶矩,也称为能量,度量了图像灰度的纹理粗细程度和分布均匀程度。当共生矩阵中元素分散分布时,此时能量值小。能量值小表明一种较紊乱和不规则变化的纹理模式。

$$ASM = \sum_i \sum_j P(i,j)^2 \quad (8)$$

通过多次实验结果比对,我们发现对比度  $CON$ 、相关性  $COR$  和二阶矩  $ASM$  能够很好地区分 SPN 的良恶性。

### 1.5 统计处理判断良恶性

使用美国 GE 公司宝石 Discovery CT750 HD 高



清晰度CT机收集病例, 采用SPSS 21.0统计软件, 对本实验收集的60例病人(实验集)良性组与恶性组图像的对比度、相关性、熵、平稳度和二阶矩纹理特征参数分别进行 $t$ 检验, 比较良性组与恶性组的5项纹理特征参数有无显著性差异。剔除差异不显著的参数后, 对保留下的参数进行分析, 得出良性组和恶性组的区间范围, 将区间范围应用于系统中, 从而可以对SPN做良恶性分析, 最后在原始图像上为SPN添加颜色以提醒医师。

## 2 系统运行结果

依旧使用美国GE公司宝石Discovery CT750 HD高清晰度CT机来验证本系统的实用性与有效性。对扫描的50例病人(验证集)图像进行实验, 图像分辨率是 $512 \times 512$ , 格式为JPG格式。实验平台为i7-4710MQ CPU、8G内存。针对一张HDCT图像, 本系统整个诊断时间平均约为2 s, 其实用性一目了然。本系统对SPN的诊断中各步算法运行结果如图2所示。由图2可知, 本系统对SPN的诊断结果较令人满意。

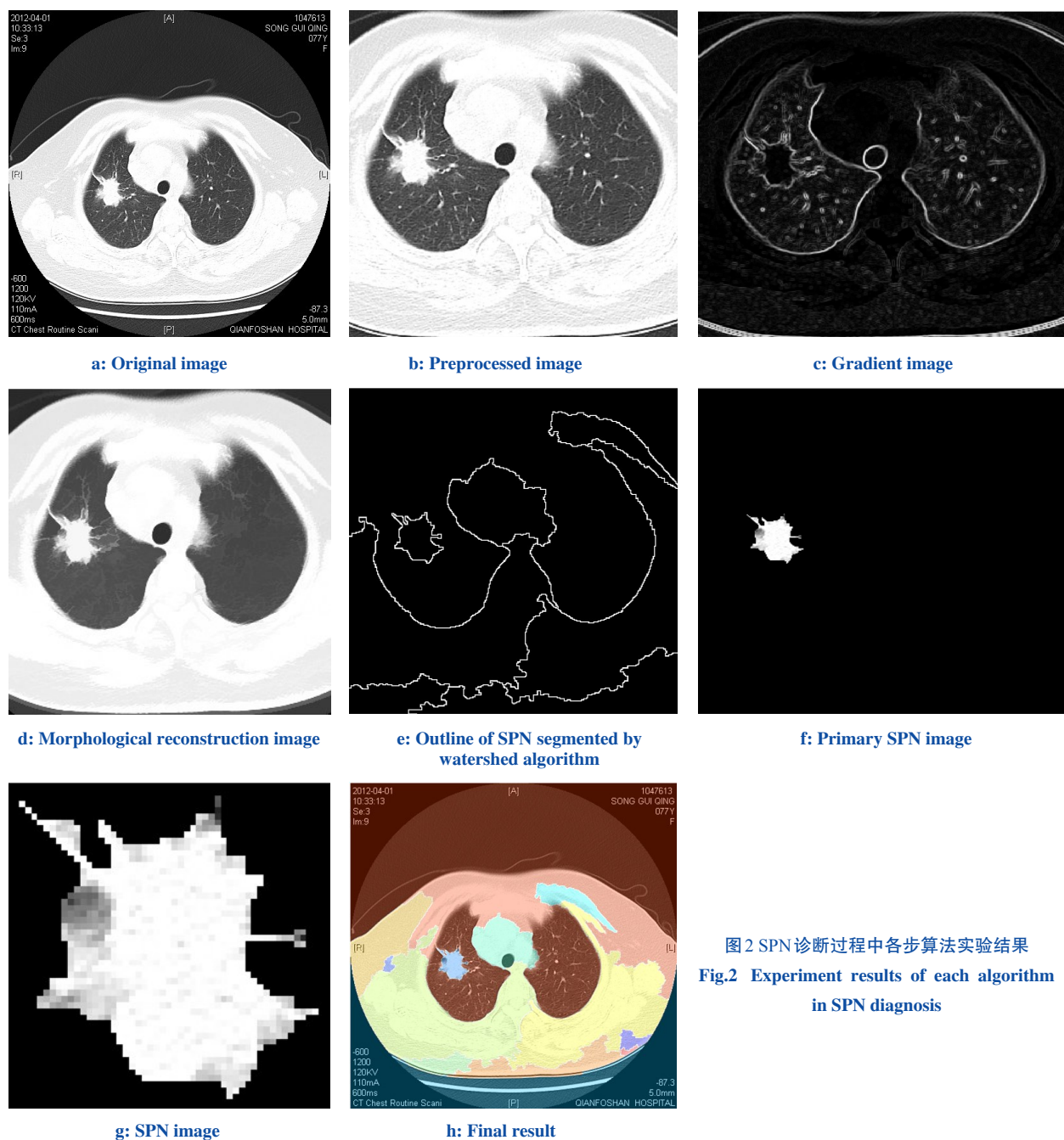


图2 SPN诊断过程中各步算法实验结果  
Fig.2 Experiment results of each algorithm  
in SPN diagnosis

### 3 结 语

本系统运行于 Windows 8.1 系统, 采用 Matlab 2014b 编程实现, 操作简便, 用户界面简洁实用, 真正意义上实现了对 SPN 的计算机辅助诊断, 从而降低了医生主观因素带来的诊断误差, 提高了恶性 SPN 的检出率, 使诊断更加客观、科学。

### 【参考文献】

- [1] Tuddenham WL. Glossary of terms for thoracic radiology; recommendations of the nomenclature committee of the fleischner society[J]. AJR Am J Roentgenol, 1984, 43: 509-517.
- [2] Martine RJ, Jzcques R, Frederic G, et al. Pulmonary nodules: detection with thin section spiral CT versus conventional CT[J]. Radiology, 1993, 187: 513-520.
- [3] Lin DT, Yan CR, Chen WT. Autonomous detection of pulmonary nodules on CT images with a neural network-based fuzzy system[J]. Computerized Med Imaging Graphics, 2005, 29: 447-458.
- [4] Shingo I, Naoki M, Mitsuru I. Solitary pulmonary nodules: optimal slice thickness of high resolution CT in differentiating malignant from benign[J]. Clin Imaging, 2004, 28: 322-328.
- [5] Kanazawa K, Kawata Y, Niki N, et al. Computer-aided diagnosis for pulmonary nodules based on helical CT images[J]. Computerized Med Imaging Graphics, 1998, 22(2): 157-167.
- [6] Sahiner B, Chan HP, Hadjiiski LM, et al. Effect of CAD on radiologists' detection of lung nodules on thoracic CT scans: analysis of an observer performance study by nodule size[J]. Acad Radiol, 2009, 16: 1518-1530.
- [7] Campadelli P, Casiraghi E, Artioli D. A fully automated method for lung nodule detection from postero- anterior chest radiographs[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2006, 25: 1588-1603.
- [8] 章毓晋. 图像分割[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 60-63.  
Zhang YJ. Images Segmentation[M]. Beijing: Science Press, 2001: 60-63.
- [9] Novianto S, Suzuki Y. Near optimum estimation of local fractal dimension for image segmentation[J]. Pattern Recogn Lett, 2003, 24 (1): 365-374.
- [10] Yaakov T, Amir A. Automatic segmentation of moving objects in video sequences: A region labeling approach[J]. IEEE Trans Circuits Systems Video Tech, 2002, 12(7): 597-612.
- [11] Xu HF, Akmal AY, Mansur RK. Automatic moving object extraction for content- based applications[J]. IEEE Trans Circuits Systems Video Tech, 2004, 14(6): 796-812.
- [12] O'Callaghan RJ, Bull DR. Combined morphological-spectral unsupervised image segmentation[J]. IEEE Trans Image Processing, 2005, 14(1): 49-62.
- [13] Gonzalez RC, Woods RE. Digital image processing[M]. 2nd ed Electronics Publishing House, 2002: 268-387.
- [14] 杨 丹, 赵海滨, 龙 哲, 等. MATLAB 图像处理实例详解[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013: 317-329.  
Yang D, Zhao HB, Long Z, et al. Images processing examples with MATLAB[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013: 317-329.
- [15] Bisoi AK, Mishra J. On calculation of fractal dimension of images [J]. Pattern Recogn Lett, 2001, 22(6): 631-637.