

# 快速边界行进算法：一种 CT 图像 肺实质自动分割策略 \*

张 林, 何中市, 张杰慧  
(重庆大学 计算机学院, 重庆 400044)

**摘 要:** 提出了快速边界行进算法分割 CT 图片中的肺实质, 解决常用分割方法不能正确分割出与胸膜和纵膈相连肺结节的问题。本算法首先通过高斯平滑、阈值分割等方法预处理 CT 图片, 获取肺实质区域; 然后采用 Douglas-Peucker 算法提取边缘的关键点以压缩肺实质边缘; 最后, 采用自适应边界行进算法修补肺实质边缘。实验结果证明了本算法能有效地分割出与胸膜和纵膈相连的肺结节, 并减小了时间开销。

**关键词:** 肺实质分割; 肺结节; 快速边界行进算法; D-P 算法

**中图分类号:** TP391      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1001-3695(2011)09-3556-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2011.09.101

## Fast border marching algorithm: automatic lung segmentation on chest CT images

ZHANG Lin, HE Zhong-shi, ZHANG Jie-hui  
(College of Computer, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** This paper presented an automatic lung segmentation algorithm called fast border matching algorithm to extract lung parenchyma, revising the segmentation defects caused by juxtaleural nodules. Fast border matching algorithm firstly used some typical methods to extract lung parenchyma, such as Gaussian smoothing, gray-level thresholding, FloodFill non-lung region, etc. Then, introduced Douglas-Peucker algorithm to extract key points from the border of the lung parenchyma. Lastly, it employed adaptive border marching algorithm to smooth the lung border and reliably included juxtaleural nodules. Experimental results show fast border marching algorithm can extract juxtaleural and mediastinal nodules, and reduce the time overhead.

**Key words:** lung segmentation; lung nodule; fast border marching algorithm; D-P algorithm

实现基于 CT 图像的计算机辅助诊断, 一个关键步骤就是将肺实质从 CT 图像中准确、快速地分割出来。许多方法已经被用来自动地分割肺部 CT 图像, 由于临床上没有有效的影像设备可以区分与胸膜相连的结节、肺门的软组织与胸壁软组织, 这些分割方法都存在一定的局限性。改善与胸膜相连的肺结节分割对肺结节检测和特征化是十分重要的。不幸的是, 受与胸膜相连的结节形状、大小、强度及位置等各种因素的影响, 设计一个高效、强大的分割算法是有挑战性的。此外, 一个好的算法, 不仅要准确地分割出结节, 同时也要使欠分割和过分割最小化。

基于阈值的区域填充方法<sup>[1]</sup>往往错误地排除一些非常重要的地区, 如与胸膜相连的结节。在文献[2]中, 滚雪球方法被应用于修补肺边境上的结节, 但是很难找到一个适当大小的球对结节进行修补。Kim 等人<sup>[3]</sup>利用轮廓跟踪方法, 在肺边界上根据纹理特征确定一些肺结节区域。然而, 纹理特征不能用来判断是否是结节。Wiemker 等人<sup>[4]</sup>提出了沿着肺边缘搜索圆形或半圆形结构来修补肺边缘的方法, 但肺结节的形状差别很大, 从圆形、椭圆到圆锥, 三角形到平面各不相同。文献[5]使用曲率修补肺结节边界, 但是曲率不能成为判断是否肺结节的标准, 形状的小变化可能造成曲率的迅速变化, 肺底部和顶

部有较高的曲率。而且, 不存在一个适合所有情况单一的曲率阈值。Pu 等人<sup>[6]</sup>提出了自适应边界行进算法, 它采用了完整的边缘信息, 其时间开销大, 且容易受到局部噪声的影响。

为了减少自适应边界行进算法的时间开销, 本文提出了快速边界行进算法用来分割肺实质, 其主要工作在于采用 Douglas-Peucker 算法(D-P 算法)<sup>[7]</sup>压缩肺实质边缘, 降低了自适应边界行进算法的计算规模, 从而减少分割算法的时间开销。快速边界行进算法首先通过高斯平滑、阈值分割等方法预处理 CT 图片, 获取肺实质区域; 然后采用 D-P 算法提取边缘的关键点以压缩肺实质边缘; 最后采用自适应边界行进算法修补肺实质边缘。实验结果证明了快速边界行进算法能有效地分割出与胸膜和纵膈相连的肺结节, 并减小了时间开销。

### 1 基于快速边界行进算法的 CT 图片肺实质分割

快速边界行进算法的基本步骤包括: 预处理; 采用 D-P 算法提取边缘的关键点以压缩肺实质边缘; 用自适应边界行进算法修补肺实质边缘。快速边界行进算法流程如图 1 所示。

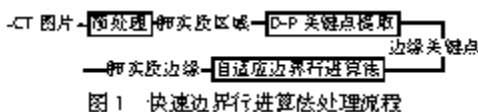


图 1 快速边界行进算法处理流程

**收稿日期:** 2011-02-21; **修回日期:** 2011-04-15      **基金项目:** 国家科技重大专项资助项目(2008ZX07315-001); 重庆市重大科技专项资助项目(CSTC, 2008AB5038); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJXS11180019)

**作者简介:** 张林(1986-), 男, 重庆人, 硕士研究生, 主要研究方向为医疗图像处理、机器学习(walter-zhang@163.com); 何中市(1965-), 男, 教授, 博导, 博士, 主要研究方向为机器学习、数据挖掘、自然语言处理; 张杰慧(1982-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为数字图像处理。

1.1 预处理

预处理步骤包含三步:a) 高斯滤波,即在 CT 图片的成像过程中会受到不同来源噪声的干扰,这些噪声在后面的边缘提取过程中可能形成许多小轮廓,为了避免这些小轮廓被错误地当成肺实质边缘进行处理,首先采用高斯平滑处理过滤这些噪声;b) 灰度阈值分割,即在 CT 图片中不同的组织密度不同,胸壁、血液和骨质的密度一般大于 -100 HU,而肺实质的密度在 -600 HU -400 HU,本文选择 -350 HU 作为阈值分割肺实质区域;c) 泛洪算法 (FloodFill) 填充非肺部区域,即阈值分割后采用泛洪算法对非肺实质区域进行填充,排除非肺实质区域的干扰,本文沿着图片边缘选择种子点进行填充。

1.2 D-P 算法提取边缘关键点

经过预处理后,需要对肺实质区域作轮廓跟踪处理,提取肺实质区域的边缘,以待下一步计算使用。本文采用逆时针方向边缘,肺实质区域有向边缘集合为

$$\text{LungBoundary} = \{L_i | (P_1, P_2, \dots, P_{n_i}), i \in [1, m]\}$$

其中: $m$  代表肺实质有向边缘的个数; $L_i$  表示第  $i$  个有向边缘; $P_i$  表示边缘上的点。

使用完整的轮廓信息一方面加大了边界行进处理的数据量;另一方面对所有轮廓边界一视同仁地处理,不仅容易受到局部噪声的影响,更掩盖了关键点对肺实质形状特征的描述作用。因此,快速边界行进算法首先利用 D-P 算法提取肺实质边缘的关键点,不仅保持了边缘形状信息,同时也压缩了计算数据量,大大降低后续计算的数据处理规模。

实验中就 50 张肺结节图像分析,取各自轮廓边界直径的 0.002 作为设定的阈值,从原轮廓边界点数与关键点提取后点数压缩比来看,最大压缩比为 6.795 6,最小压缩比为 2.120 2,平均压缩比为 3.504 8。关键点提取算法压缩率分布如图 2 所示。

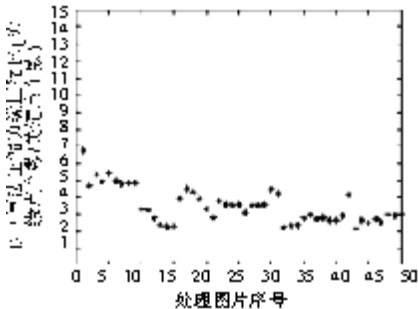


图 2 关键点提取算法压缩率分布

1.3 自适应边界行进算法修补肺实质

本节把 D-P 算法提取的肺实质边界关键点作为输入,采用自适应边界行进算法修补肺实质。在灰度阈值分割时,与纵膈和胸膜相连的肺结节不能正确地分割出来,因此自适应边界行进算法计算肺实质的边缘,重新包含与纵膈和胸膜相连的肺结节。与纵膈和胸膜相连的肺结节会在提取出的边缘上形成凹槽,自适应边界行进算法的思想是沿着肺实质的边缘寻找凹槽,用直线连接凹槽的开始点和结束点,从而达到重新包含与胸膜相连的肺结节的目的是。

自适应边界行进算法如下:

输入:肺实质逆时针方向边缘。

输出:重新计算的肺实质边缘。

a) 选取前两点  $P_1$ 、 $P_2$  的连线作为参考线  $V_1$ 。

b) 依次取步长  $L$  内的点  $P_i (i \in [3, L])$ , 判断  $P_i$  是否在参考线  $V_1$  的右边,若是,连接从起始点  $P_1$  到  $P_i$  的有向线段作为新参考线  $V_2$ 。

c) 动态改变步长  $L$

$$L = \begin{cases} \delta \times L & \text{if } (\lambda < \lambda_0) \\ L & \text{else others} \end{cases}$$

其中: $\lambda = H_{\max}/W$ ,  $W$  为线段  $P_1P_i$  的长度,  $H_{\max}$  为  $P_2 \dots P_{i-1}$  到线段  $P_1P_i$  的最大垂距;  $\lambda_0$  为自适应阈值;  $\delta \in [0, 1]$  为惩罚因子。

d) 重复 b) c) 操作,直到遍历步长内的所有点  $P_i$ ,取参考线结束端点作为最右点。

e) 重复 a) d),直到遍历边缘线上所有的点,链接所有的最右点,作为新边缘。

判断点  $P_i$  是否在参考线右边的方法:设参考线向量为  $(x, y)$ ,作参考线向量的垂直向量  $(y, -x)$ ,计算参考线起点到待判断点的向量与垂直向量的夹角余弦值,若余弦值为正,则待判断点在参考线的右边;反之,判断点在参考线的左边。

步长  $L$  的大小将影响分割的效果,  $L$  的大小与肺结节的大小相当时,与纵膈和胸膜相连的肺结节能被正确地重新包含;如果  $L$  太大,会导致过分割,分割结果会包含非肺实质区域;相反,  $L$  过小则会导致欠分割,一些肺实质区域被错误地排除。因此通过自适应调整步长  $L$ ,使得算法具有更好的健壮性和适应性。 $\lambda_0$  被用来控制步长  $L$  的自适应变化,  $\lambda < \lambda_0$  时,步长  $L$  按  $\delta$  倍缩小,相反则不作变化。图 3 显示了不同惩罚因子下的分割结果,实验证明:惩罚因子  $\delta$  越小,  $L$  的变化也快,不能够分割出结节;  $\delta$  越大,  $L$  的变化也慢,导致过分割。通过调整阈值  $\lambda_0$  和惩罚因子  $\delta$  来优化算法的性能,本文中阈值  $\lambda_0 = 0.33$ 。

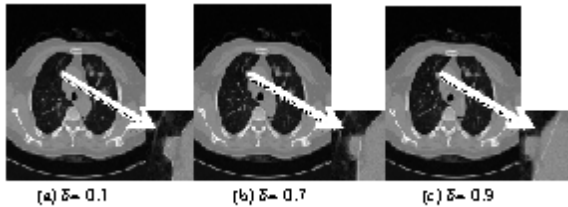


图 3 不同惩罚因子的分割结果

图 4 是快速边界行进算法的基本实验步骤实验结果。在预处理步骤中,CT 图片作为输入,输出肺实质区域,操作结果如图 4(b) (c)。第二步中,采用 D-P 算法提取边缘的关键点以压缩肺实质边缘,结果如图 4(d) (e)。最后,采用自适应边界行进算法修补肺实质,使与胸膜相连和纵膈相连的肺结节包含在肺实质边界内,操作结果如图 4(f)。实验结果显示,快速边界行进算法修补肺实质边缘的效果明显。

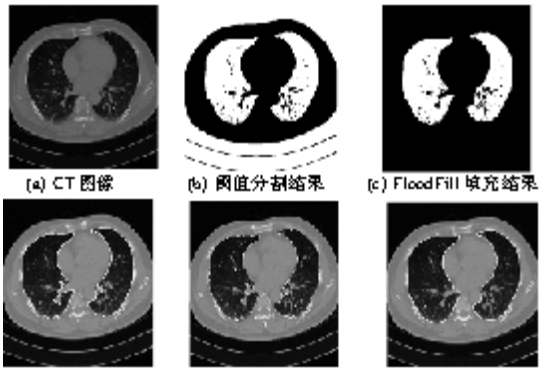


图 4 快速边界行进算法基本步骤

2 实验结果分析

2.1 实验数据

实验数据来源于重庆西南医院放射科,共选取 20 例患者

的肺部 CT 临床数据构建实验数据集。每层数据均为  $512 \times 512$  像素,层厚 2 mm,像素间距 0.682 5 mm。在数据集中,CT 层数最少 30,最多 64,平均每位患者 48 层 CT 数据。

2.2 实验结果比较

本节对快速边界行进算法和自适应边界行进算法的实验结果进行了比较。图 5 是快速边界行进算法和自适应边界行进算法的实验结果,共选择了三组实验结果(第一组(a)(d)、第二组(b)(e)、第三组(c)(f))进行比较。其中(a)(c)是自适应边界行进算法的实验结果,(d)(f)是快速边界行进算法的实验结果。实验中设置步长  $L=750$ ,自适应阈值  $\lambda_0=0.33$ ,惩罚因子  $\delta=0.75$ 。

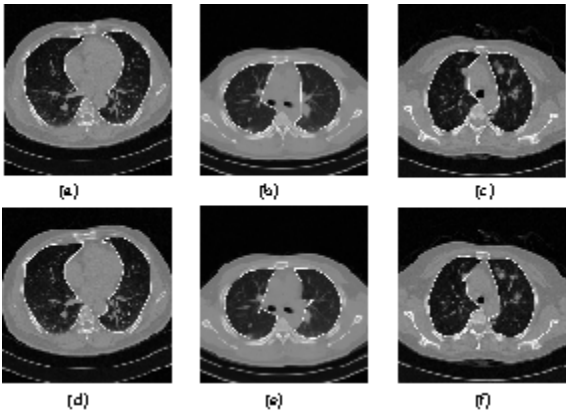


图 5 自适应边界行进算法和快速边界行进算法比较

实验结果表明,快速边界行进算法和自适应边界行进算法都能准确地分割出肺实质,并且修补后的边缘更贴近真实的肺实质边缘,如图 5(a)和(d)所示。快速边界行进算法相对于自适应边界行进算法而言,采用了边缘关键点而不是完整的边缘信息,在局部区域内对同一段曲线段,快速边界行进算法计算的点更少,并且只需要计算边缘上的关键点,更能排除局部噪声的影响,自适应边界行进算法是用完整的边缘信息,需要计算所有的点,容易受到局部噪声的影响。实验结果图 5(b)与(e)、(c)与(f)的对比显示,快速边界行进算法分割结果(e)和(f)的边缘更贴近于实际边缘。

2.3 时间性能比较

本节对快速边界行进算法和自适应边界行进算法时间性能进行了比较。自适应边界行进算法的时间复杂度为  $O(n \times l)$ ,  $n$  为边缘点个数,  $l$  为步长。D-P 关键点提取算法压缩边缘前边缘点数量为压缩边缘后的 26 倍。因此,理论上自适应边界行进算法每张 CT 图片平均计算时间为快速边界

行进算法时间的 26 倍。表 1 中可以看到对每张 CT 图片,自适应边界行进算法平均计算时间为快速边界行进算法时间的 1.836 8 倍,这个值略小于理论值,这是因为 D-P 关键点提取算法需要一定的时间开销。

表 1 时间性能比较

| 算法        | CT 图片数/张 | 总时间/s    | 平均时间/s/张 |
|-----------|----------|----------|----------|
| 自适应边界行进算法 | 50       | 58.750 1 | 1.175 0  |
| 快速边界行进算法  | 50       | 31.984 7 | 0.639 7  |

3 结束语

肺部 CT 图像的肺实质分割是肺部图像预处理的关键步骤。从已实现的《孤立肺结节智能检测和辅助诊断系统》来看,肺实质分割占用时间开销占到处理整个图像时间的 50%-80%。因此,改善肺实质分割算法的分割性能,降低其时间开销对于医疗图像处理领域的进步能具有非常重要的意义。

本文提出的快速边界行进算法结合了 D-P 算法和自适应边界行进算法,不仅有效地分割出了与胸膜和纵膈相连的肺结节,同时又大大降低了肺部分割的时间开销。快速边界行进算法具有人机交互少、速度快的优点,更能准确有效地分割出与纵膈和胸膜连接的肺结节。快速边界行进算法还可以被应用到一切需要通过几何桥接方式平滑边缘的应用上来。

参考文献:

[1] 陈兆学,赵晓静,聂生东.一种基于 CT 图像的肺实质自动分割的简易方法[J]. 计算机应用与软件,2010,27(3):78-79,113.

[2] BAE K T,KIM J S,NA Y H,*et al.* Pulmonary nodules: automated detection on CT images with morphologic matching algorithm-preliminary results [J]. *Radiology*,2005,236(1):286-294.

[3] KIM D Y,KIM J H,NOH S M,*et al.* Pulmonary nodule detection using chest CT images [J]. *Acta Radiologica*,2003,44(3):252-257.

[4] WIEMKER R,ROGALLA P,ZWARTKRUIS A,*et al.* Computer-aided lung nodule detection on high-resolution CT data[C]//Proc of the SPIE on Image Processing, Medical Imaging. 2002:677-688.

[5] YIM Y,HONG H. Correction of segmented lung boundary for inclusion of pleural nodules and pulmonary vessels in chest CT images [J]. *Computers in Biology and Medicine*,2008,38(8):845-857.

[6] PU J,ROOS J,YI C A,*et al.* Adaptive border marching algorithm: automatic lung segmentation on chest CT images [J]. *Computerized Medical Imaging and Graphics*,2008,32(6):452-462.

[7] 詹自然.基于凸包的线状要素简化的一种改进算法[J]. 河南科学,2009,27(12):1555-1558.

(上接第 3555 页)

4 结束语

本文在 HSV 颜色空间实现了结合分段对数变换饱和度分量增强和基于边缘保持的色调增强( $S_{\log-V\_edge}$ )的低照度彩色图像增强算法。该方法主观上能有效地提高低照度图像的对比度,丰富图像的细节信息,色彩效果更加自然;客观上提高了图像的亮度、细节和对比度,效果优于 MSRCR 方法,为低照度图像在特定场合的应用奠定了基础。

参考文献:

[1] 宋岩峰,邵晓鹏,徐军.基于双平台直方图的红外图像增强算法

[J]. 红外与激光工程,2008,37(2):308-311.

[2] 毛伟民,赵勋杰.基于神经网络的低照度彩色图像增强算法[J]. 光学技术,2010,36(2):225-228.

[3] RAHMA Z A,JOBSON D J,WOODELL G A. Retinex processing for automatic image enhancement [J]. *Journal of Electronic Imaging*, 2004,13(1):100-110.

[4] 李学明.基于 Retinex 理论的图像增强算法[J]. 计算机应用研究,2005,22(2):235-237.

[5] 陈雾.基于 Retinex 理论的图像增强算法研究[D]. 南京:南京理工大学,2006.

[6] 乔香磊,宋刚.基于人眼视觉特性的彩色图像增强算法[J]. 电子技术应用,2007,33(10):63-65.