

## 基于主动轮廓的三维气管树自动分割方法

何瑞华<sup>1</sup>, 陆建峰<sup>1</sup>, 唐立钧<sup>2</sup>

1. 南京理工大学计算机科学与工程学院, 江苏 南京 210094; 2. 南京医科大学第一附属医院放射科, 江苏 南京 210029

**【摘要】**在计算机辅助手术领域,对CT图像中肺部区域的气管和支气管进行准确分割和提取具有重要意义。气管和支气管的分割提取有助于手术的导航参考,准确的提取结果有助于避免手术中对支气管的损伤。本文设计了一种全自动的三维肺气管分割算法:首先,将基于主动轮廓的GCS方法引入到肺气管分割当中,在三维图像中得到粗分割结果;然后,利用灰度重建的方法将粗分割结果中分离的部分变得连通;最后利用三维区域生长提取支气管树。实验结果表明,本文方法能够稳定地分割出不同病例的支气管树,与自动阈值区域生长分割结果相比较,本文结果在支气管分叉数上有很大的提升,最少提升有28%,最多达86%。

**关键词:**气道树;主动轮廓模型;形态学灰度重建;三维分割

**【中图分类号】**R318;TP391.4

**【文献标识码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2016)01-0068-04

## Automatic segmentation method for three-dimensional bronchial tree based on active contour model

HE Rui-hua<sup>1</sup>, LU Jian-feng<sup>1</sup>, TANG Li-jun<sup>2</sup>

1. School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China; 2. Department of Radiology, First Affiliated Hospital of Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China

**Abstract:** Accurate segmentation and extraction of trachea and bronchus from CT image is important in computer-aided surgery. The result of segmentation and extraction is a significant reference for surgery. The accurate extraction results help to avoid possible injuries on bronchus. An automatic segmentation algorithm for three-dimensional (3D) pulmonary bronchus was designed. A globally convex segmentation method based on an active contour model was firstly applied to obtain initial segmentations. The grayscale reconstruction algorithm was applied to improve the initial segmentation. A complete bronchial tree was finally obtained by using a 3D region growing method. Results showed the proposed method always segments the bronchial trees of different cases. Compared with automatic threshold region growing method, the proposed method has a great improvement in the number of bronchi branches, with 28%-86% improvement.

**Key words:** bronchial tree; active contour model; morphological grayscale reconstruction; three-dimensional segmentation

### 前言

随着医学成像、图像处理、数据可视化技术的发展,越来越多的图像分析技术被应用到医学领域。在胸部疾病的手术治疗中,基于CT图像的精确的肺

气管树分割对手术方案的制定起着重要的作用,有助于区分气管和支气管的解剖细节,也能避免手术中对支气管可能造成的伤害。近年来,有很多分割肺气管树的文献。Tschrren等<sup>[1]</sup>提出保持柱状物体的活动区域方法,通过跟踪柱状物体的拓展方向,进而确定候选气管。Ginneken等<sup>[2]</sup>提出用多阈值方法改进区域生长方法的性能。Lo等<sup>[3]</sup>通过计算从最初分割点到一定搜索范围内的最短路径来确定细小支气管。BISCHOF等<sup>[4]</sup>则提出使用梯度向量流确定区域的生长方向。Lo等<sup>[5]</sup>提出基于K最近邻分类方法和血管引导的肺气管树分割方法(MVG),MVG利用

**【收稿日期】**2015-08-24

**【基金项目】**南京理工大学研究生教育创新计划校立省培育项目

**【作者简介】**何瑞华(1991-),男,硕士,主要研究方向:图像处理。E-mail: 805323859@qq.com。

**【通信作者】**陆建峰(1969-),男,博士,教授、博士生导师,主要研究方向:智能系统、数据挖掘。Tel: 025-84315751; E-mail: lujf@mail.njust.edu.cn。

肺血管与细支气管伴行的特点对细气管进行筛选。李翠芳等<sup>[6]</sup>通过全方向进行区域生长以避免漏分割来提取大气管,并结合形态学方法最终提取出肺气管树。高德志等<sup>[7]</sup>提出形态学灰度梯度引导的最优阈值肺气管树分割方法,该方法在最优阈值生长法的基础上加以改进,并引入泄漏检测和阈值递增法则。王雷等<sup>[8]</sup>提出形态膨胀的三维区域生长方法,该方法利用形态膨胀来融合肺气管的管壁管腔,并结合区域生长法进行分割,以其中中心线来引导肺气管树的细分割。

主动轮廓模型主要用于解决图像中目标物体的分割操作,可以解决二维乃至多维的情况,是目前比较流行的一种分割方法,但是在肺气管分割方面很少有涉及。本文设计了一种基于主动轮廓模型的肺气管自动分割方法,该方法是直接在三维肺实质上进行分割。

## 1 方法

本文提出的方法分为4个步骤:(1)分割提取感兴趣的肺实质区域;(2)引入基于主动轮廓的分割方法,采用全局凸分割方法(GCS)得到粗分割结果;(3)采用灰度重建方法得到更多气管区域;(4)采用三维区域生长方法得到最后的气管树结果。

### 1.1 肺实质分割

肺气管树的提取是在肺实质中进行的,首先进行肺实质的分割能够大大减少后续工作的计算量。在这里,本文采用了一种简单有效的方法<sup>[9]</sup>。通过对每一个切面进行肺实质分割,最后将所有层的分割结果在三维上重建就得到最终的肺实质分割结果。假定当前切片,  $Mb = M \geq T_1$  将得到阈值分割结果,其中  $T_1$  为-200 HU,是当前切片的灰度值矩阵。然后根据公式  $\overline{Mb} \times M \geq T_2 \times Mb$ ,得到大致的肺实质区域,其中  $T_2$  为-500 HU。最后通过形态学处理,将得到最终的肺实质分割结果。

### 1.2 基于主动轮廓模型的肺气管分割

**1.2.1 GCS方法** 经典的主动轮廓模型,如CV模型<sup>[10]</sup>、GAC模型<sup>[11]</sup>等,都是非凸的,容易陷入局部最小值。Chan等<sup>[12]</sup>提出了将非凸模型凸化的全局凸分割方法,即是GCS方法。Chan提出,对于任意固定的  $c_1, c_2 \in R$ , CV模型的能量泛函:

$$F^{CV}(c_1, c_2, C) = \lambda_1 \int_{inside(C)} |u_0(x, y) - c_1|^2 dx dy + \lambda_2 \int_{outside(C)} |u_0(x, y) - c_2|^2 dx dy + v \frac{|C|}{2} \quad (1)$$

其中的  $F^{CV}(c_1, c_2, C)$  的一个全局极小解可以通过解决如下凸的极小化问题:

$$\min_{0 \leq \phi \leq 1} \int_{\Omega} |\nabla \phi(x)| dx + \int_{\Omega} [\lambda_1 (u_0(x) - c_1)^2 - \lambda_2 (u_0(x) - c_2)^2] \phi(x) dx \quad (2)$$

得到全局极小解  $\phi(x)$ , 然后对于某一个  $a \in (0, 1)$ , 取  $\Omega = \{x: \phi(x) > a\}$ , 则  $C = \partial\Omega_1$  为上式  $F^{CV}(c_1, c_2, C)$  的全局极小解。

**1.2.2 三维肺气管分割** GCS方法将非凸极小化问题转化为凸的极小化问题,然后通过标准的凸的极小化格式寻找凸问题的全局极小解,进而找到原非凸问题的全局极小解。由于能够有效避免陷入局部最小,凸分割已经越来越多的利用在图像分割的领域。Tom等<sup>[13]</sup>提出采用S-plitBregman方法对GCS方法进行优化,使其运行速度得到极大提升,并推导了解决L1正则化问题的SplitBregman迭代式:

$$\begin{aligned} (u_1^{k+1}, \vec{d}_1^{k+1}) = \min_{u_1 \in [0, 1], \vec{d}_1} \left\{ \vec{d}_1 - \lambda \langle r_1 - r_2, u_1 \rangle + \frac{\mu}{2} \left\| \vec{d}_1 - \nabla u_1 - \vec{b}_1 \right\|_2^2 \right\} \\ \vec{b}_1^{k+1} = \vec{b}_1^k + \nabla u_1^{k+1} - \vec{d}_1^{k+1} \end{aligned} \quad (3)$$

本文将该方法运用到三维肺气管分割上。为了得到最后的分割结果  $u$ , 我们先求(3)式的Euler-Lagrange方程,采用变分原理得到:

$$\Delta u_1 = \frac{\lambda}{\mu} (r_1 - r_2) + \nabla \cdot (\vec{d}_1^k - \vec{b}_1^k), u_1 \in [0, 1] \quad (5)$$

为了求得上式的结果,采用GaussianSeidel迭代以及投影算法求得  $u_1^{k+1}$ :

$$a_{i,j} = \left( \vec{d}_1 \right)_{i-1,j}^{x,k} - \left( \vec{d}_1 \right)_{i,j}^{x,k} - \left( \vec{b}_1 \right)_{i-1,j}^{x,k} + \left( \vec{b}_1 \right)_{i,j}^{x,k} + \left( \vec{d}_1 \right)_{i-1,j}^{y,k} - \left( \vec{d}_1 \right)_{i,j}^{y,k} - \left( \vec{b}_1 \right)_{i-1,j}^{y,k} + \left( \vec{b}_1 \right)_{i,j}^{y,k} \quad (6)$$

$$\beta_{i,j} = \frac{1}{4} \left[ (u_1)_{i-1,j}^{k,n} + (u_1)_{i+1,j}^{k,n} + (u_1)_{i,j-1}^{k,n} + (u_1)_{i,j+1}^{k,n} - \frac{\mu}{\lambda} (r_1 - r_2) + a_{i,j} \right] \quad (7)$$

$$(u_1)_{i,j}^{k+1,n+1} = \max \{ \min \{ \beta_{i,j}, 1 \}, 0 \} \quad (8)$$

$\vec{d}_1^{k+1}$  由软阈值方法求得:

$$\vec{d}_1^{k+1} = \max \left\{ \left\| \vec{b}_1^k + \nabla u_1^{k+1} \right\| - \lambda, 0 \right\} \frac{\vec{b}_1^k + \nabla u_1^{k+1}}{\left\| \vec{b}_1^k + \nabla u_1^{k+1} \right\|} \quad (9)$$

通过迭代到达稳定状态,最终获取的  $u_1$  值便是最后的分割结果。

### 1.3 灰度形态学重建方法的气管截面分割

灰度形态学重建可以用来检测图像中局部极小区域。因此,本文采用灰度形态学重建方法来进一步分割肺气管。在这一步骤中,将更多的潜在气管区域分割出来,在第二步的分割结果基础之上,将得

到更好的分割效果。图1显示了一维形态学灰度重建的示意图,其中红线表示掩模图像,蓝线代表标记图像,黑线表示重建图像,掩模图像与重建图像的差值即可得到峰值区域。

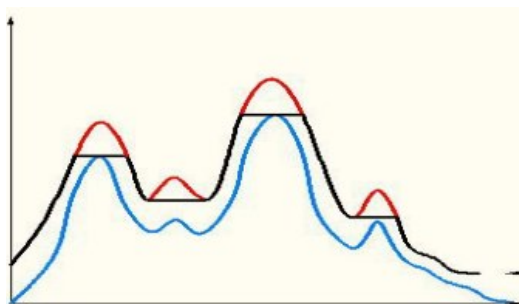


图1 一维形态学灰度重建示意图

Fig.1 One-dimensional morphological grayscale reconstruction

Note: Red line represents mask image; blue line represents maker image; black line represent reconstructed image.

针对肺气管区域属于肺实质的谷值部分,本文采用对偶灰度重建的形式来实现。在掩模图像为  $I(x,y)$ , 标记图像为  $J(x,y)$ , 即  $J(x,y) \geq I(x,y)$  的情况下,可以通过对  $J(x,y)$  反复进行测地腐蚀直至稳定来实现。

测地腐蚀定义:

$$\delta(J) = (J \ominus B) \vee I \quad (10)$$

其中  $\ominus$  表示结构元素为  $B$  的形态学腐蚀操作,  $\vee$  表示将腐蚀结果与  $I$  进行逐点比较取最大值。假设  $J$  经过反复测地腐蚀达到稳定状态后,则最终对偶灰度重建图像  $\delta(J)$  可以表示为:

$$\delta(J) = \wedge \delta^n(J) \quad (11)$$

其中  $\wedge$  表示对多次测地腐蚀结果之间进行逐点比较取最小值。

#### 1.4 肺气管的最终提取

本文利用全局凸方法对肺气管进行分割,并采用灰度重建方法进一步分割之后,肺实质中的气管区域已经被提取出来了,但是也会提取出一些灰度值小的伪气管区域。为了去除这些噪声,这里我们对前两步分割得到二值矩阵采用三维区域生长的方法,将整个连通的气管树区域提取出来。我们的区域生长方法避免了人工选择种子点,程序自动设置气管树顶端切面的中心为种子点,最终实现气管树的自动分割。

## 2 实验结果

本文实验使用的CT数据是由双源CT机器

(Somatom Definition, Siemens)采集。下面3例中的断层图像数量依次为311、258、346张,其中断层图均为  $512 \times 512$  像素,每个像素大小为  $0.563 \text{ mm} \times 0.563 \text{ mm} \times 0.700 \text{ mm}$ 。

对比两种方法的肺气管树分割结果,其中一种是自动阈值的三维区域生长法,一种是本文方法。因为自动阈值的区域生长方法稳定,并被广泛使用,所以我们采用它作为本实验的对比。在演示最终分割结果对比(图2)的基础上,将进一步对比分析气管分割级数(表1)。气管树级数的多少决定了分割结果的优劣,越多的级数表明气管树的细节越丰富<sup>[8]</sup>。我们用分叉数量级数的多少,来定量分析本文算法和自动阈值区域生长法的性能,结果表明相比于使用自动阈值区域生长法,本文方法使得a、b、c分割结果的分叉数量都大大增加。这就表明本文方法能够分割出更多的气管树细节。

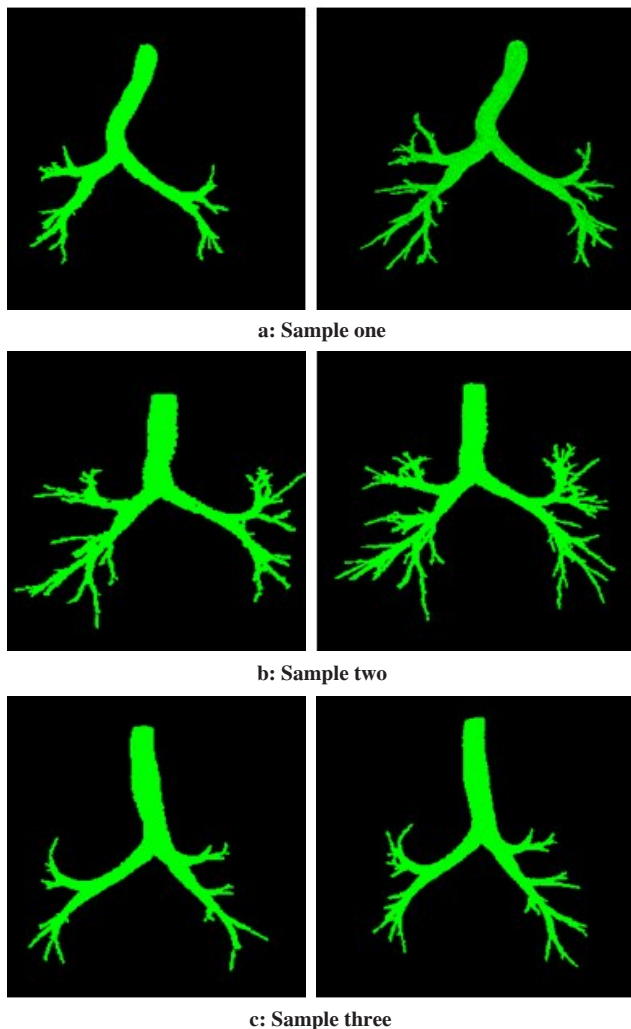


图2 两种方法气管树分割结果对比图

Fig.2 Segmentation results of bronchial tree by using two methods

Note: Left: Automatic threshold region growing method; Right: Automatic segmentation algorithm for 3D pulmonary bronchus based on active contour model

表1 本文方法与自动阈值区域生长法结果的分叉数比较

Tab.1 Comparison of automatic segmentation algorithm based on active contour model and automatic threshold region growing method

Order of branches	Case a		Case b		Case c	
	O	A	O	A	O	A
1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	2	2	2
3	4	4	4	4	4	4
	8	8	8	8	8	8
5	16	14	16	16	14	14
6	28	16	30	24	22	18
	28	12	44	24	18	6
8	14	4	46	20	6	6
	8	0	24	6	4	4
9	0	0	16	4	2	0
	0	0	10	0	0	0
	0	0	2	0	0	0
Total	109	61	203	109	81	63

Note: O: Automatic segmentation algorithm based on active contour model; A: Automatic threshold region growing method

3 总结

本文提出了一种基于主动轮廓模型的肺气管树自动分割算法,得到了很好的分割效果。根据实验结果,可以看到本文提出的方法相比于自动阈值区域生长方法,性能有很大的提升。由于使用了 Split-Bregman 方法进行算法优化,基于活动轮廓方法的运行速度也是很快的。所有病例图像的分割都在 5 min 内完成,运行平台是 i3 处理器,4G RAM。因此,本文方法能够有效、快速地进行肺气管树分割。

【参考文献】

[1] TSCHIRREN J, HOFFMAN A E, MCLENNAN G, et al. Intrathoracic airway trees: segmentation and airway morphology analysis from low-dose ctscans[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2005, 24(12): 1529-1539.

[2] VAN GINNEKEN B, BAGGERMAN W, VAN RIKXOORT E M.

Robust segmentation and anatomical labeling of the airway tree from thoracic CT scans [J]. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2008, 11(Pt1): 219-226.

[3] LO P, SPORRING J, PEDERSEN J H, et al. Airway tree extraction with locally optimal paths [C]. Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention MICC- AI2009. Berlin: Springer, 2009: 51-58.

[4] BISCHOF H. Segmentation of airways based on gradient vector flow [C]. Second International Workshop on Pulmonary Image Analysis. 2009: 191-201.

[5] LO P, SPORRING J, deBRUIJNE M, et al. Multiscale vessel-guided airway tree segmentation [C]. Proceedings of the Second International Workshop on Pulmonary Image Analysis. London: Create Space Independent Publishing Platform. 2009: 323-332.

[6] 李翠芳, 任彦华, 王远军, 等. 基于CT图像的肺气管树3D分割方法的研究[J]. 中国医学物理学杂志, 2011, 28(5): 2867-2871.

LI C F, REN Y H, WANG Y J, et al. Three-dimensional pulmonary airway three segmentation from CT images [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2011, 28(5): 2867-2871.

[7] 高德志. 在CT图像中肺气管树分割方法研究[D]. 长春: 长春光学精密机械与物理研究所, 2011.

GAO D Z. Extraction method of airway tree from lung CT image [D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011.

[8] 王雷, 高欣, 张桂芝. 形态膨胀的3D区域生长气管分割算法[J]. 生物医学工程学杂志, 2013, 30(4): 679-683.

WANG L, GAO X, ZHANG G Z, et al. 3D region growing algorithm driven by morphological dilation for airway tree segmentation in image guided therapy [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2013, 30(4): 679-683.

[9] 刘军伟, 冯焕清. 基于主动轮廓模型的肺纹理自动提取新方法[J]. 自动化学报, 2009, 35(4): 345-349.

LIU J W, FENG H Q. A novel automatic extraction method of lung texture three from HRCT images [J]. Acta Automatic Sinica, 2009, 35(4): 345-349.

[10] CHAN T F, VESEL A. Active contours without edges [J]. IEEE Trans Image Process, 2001, 10(2): 266-277.

[11] CASELLES V, KIMMEL R, SAPIRO G, et al. Geodesic active contours [J]. Int J Comput Vis, 1997, 22(1): 61-79.

[12] CHAN T F, ESEDOGLU S, NIKOLOVA M. Algorithms for finding global minimizers of image segmentation and denoising models [J]. SIAM J Appl Math, 2006, 66(5): 1632-1648.

[13] TOM G, XAVIER B, STANLEY O, et al. Geometric applications of the split bregman method: segmentation and surface reconstruction [J]. J Sci Comput, 2010, 45: 272-293.