

## 基于肺部CT图像中肺实质分割的研究进展

张文莉<sup>1</sup>, 吕晓琪<sup>1,2</sup>, 谷宇<sup>1,2</sup>, 吴凉<sup>1</sup>, 张信雪<sup>1</sup>

1. 内蒙古科技大学信息工程学院/内蒙古自治区模式识别与智能图像处理重点实验室, 内蒙古 包头 014010; 2. 上海大学计算机工程与科学学院, 上海 200444

**【摘要】**肺部CT图像中肺实质的精确分割是肺部疾病诊断和治疗的一个重要步骤,也是制约计算机辅助检测技术广泛应用于肺部疾病诊断领域的主要瓶颈之一。基于近年来肺部CT图像中肺实质分割的研究进展,对其分割过程中的5个步骤进行综述,包括预处理、初分割、精分割、左右肺分离、边缘修补。最后展望了肺部CT图像中肺实质分割的发展方向。

**【关键词】**肺部;CT图像;肺实质;分割;综述

**【中图分类号】**TP391.41

**【文献标志码】**A

**【文章编号】**1005-202X(2017)09-0902-06

## Advances in pulmonary parenchyma segmentation based on computed tomography image

ZHANG Wenli<sup>1</sup>, LÜ Xiaoqi<sup>1,2</sup>, GU Yu<sup>1,2</sup>, WU Liang<sup>1</sup>, ZHANG Xinxue<sup>1</sup>

1. Inner Mongolia Key Laboratory of Pattern Recognition and Intelligent Image Processing/School of Information Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China; 2. School of Computer Engineering and Science, Shanghai University, Shanghai 200444, China

**Abstract:** The precise segmentation of pulmonary parenchyma in chest-computed tomography image, an important step for the diagnosis and treatment of pulmonary diseases, restricts the wider application of computer-aided detection in the diagnosis of lung diseases. In recent years, pulmonary parenchyma segmentation has been greatly improved. Herein, we summarize the advances in the 5 processes of lung segmentation, including preprocessing, coarse segmentation, accurate segmentation, separation of left and right lung, border correction, and finally provide a prospect for the development of pulmonary parenchyma segmentation.

**Keywords:** lung; computed tomography image; pulmonary parenchyma; segmentation; review

### 前言

目前,肺癌已成为我国癌症的头号杀手,肺癌死亡率正在以年均4.4%的速度上升。肺癌的早期诊断与治疗可有效降低肺癌死亡率,然而肺癌的早期症状并不明显,80%以上的肺癌患者被发现时已是晚期,失去最佳治疗时间。肺癌的早期诊断是研究肺部疾病的热点和难点之一,已引起社会各领域的广泛关注。

随着电子计算机断层扫描(CT)技术的飞快发

展,CT影像已能提供高清晰度的肺部图像,且肺部各组织间具有较高的对比度<sup>[1]</sup>。因此,临床上逐渐将高分辨率的CT图像用于肺部疾病的检查和诊断。计算机辅助检测(Computer Aided Detection, CAD)技术能从肺部CT图像中有效检测到各类肺结节,从而为肺癌的早期诊断及治疗奠定基础。基于CT图像的CAD技术所采用的方法多种多样,但主要流程均包括:图像预处理、肺实质分割、候选结节分割、特征提取与优化选择、分类识别肺结节等。其中,最为重要的步骤是肺实质分割,且肺实质分割也是影响CAD的稳定性、精确性的关键环节。快速准确地从肺部CT图像中分割肺实质,是实现肺癌早期诊断的关键所在,具有非常重要的现实意义与临床价值<sup>[2]</sup>。

肺部CT图像中各组织结构复杂、形态各异,且肺部与周围组织(肌肉、血管等)的灰度对比差,这些因素均增加了肺实质分割的难度。在肺部CT图像中实现肺实质分割的步骤主要包括5个方面:预处

**【收稿日期】**2017-04-23

**【基金项目】**国家自然科学基金(61179019);内蒙古自治区自然科学基金(2015MS0604);内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY145);包头市科技计划项目(2015C2006-14)

**【作者简介】**张文莉,硕士研究生,研究方向:智能信息处理、医学图像处理,E-mail:zwlsxd@163.com

**【通信作者】**吕晓琪,教授,博士,研究方向:智能信息处理、医学图像处理,E-mail:lxiaoqi183@126.com

理、初分割、精分割、左右肺分离、边缘修补。基于近年来对肺部CT图像中肺实质分割的研究,综述了上述5个方面对肺实质分割的影响,并展望了未来肺实质分割的发展趋势。

## 1 预处理

受CT成像设备与周围环境的影响,肺部CT图像在采集和传输过程中会受伪影(锥形伪影、射束硬化伪影、周围间隙现象伪影、部分容积效应伪影等)和噪声的干扰,进而影响肺部CT图像中的肺实质分割<sup>[3]</sup>。为了减少伪影及噪声对临床诊断的影响,在肺实质分割前要对肺部CT图像进行预处理。

传统滤波器(同态滤波、中值滤波、低通滤波、空域滤波、频域滤波等)用于滤除伪影与噪声时效果并不理想,会使CT图像模糊、丢失细节信息等,进而影响肺实质分割的效果。李纪成等<sup>[4]</sup>针对医学图像边界模糊和细节不清晰等问题,提出用曲波算法对图像进行增强,以此达到抑制噪声的效果。该算法用于二维肺部图像预处理时,能有效提高图像质量。然而,将该算法用于三维肺部图像的预处理时,会明显降低图像的处理速度。因此,曲波算法仍需进一步优化,以提高算法的鲁棒性。Chawla等<sup>[5]</sup>提出了一种混合滤波的方法来滤除CT图像中的噪声,该方法主要包括预处理、训练及测试。在预处理阶段用小波变换对噪声进行转换,之后通过训练获得多尺度小波变换,最后进行测试。该方法可很好去除高斯白噪声,但针对其它类型的噪声并没有较理想的去除效果。肺部CT图像中含有多种类型的混合噪声,单一的滤波算法并不能达到很好的去噪效果。目前,去除混合噪声的常用方法是将多种去噪算法相融合,以达到优势互补的目的。

## 2 初分割

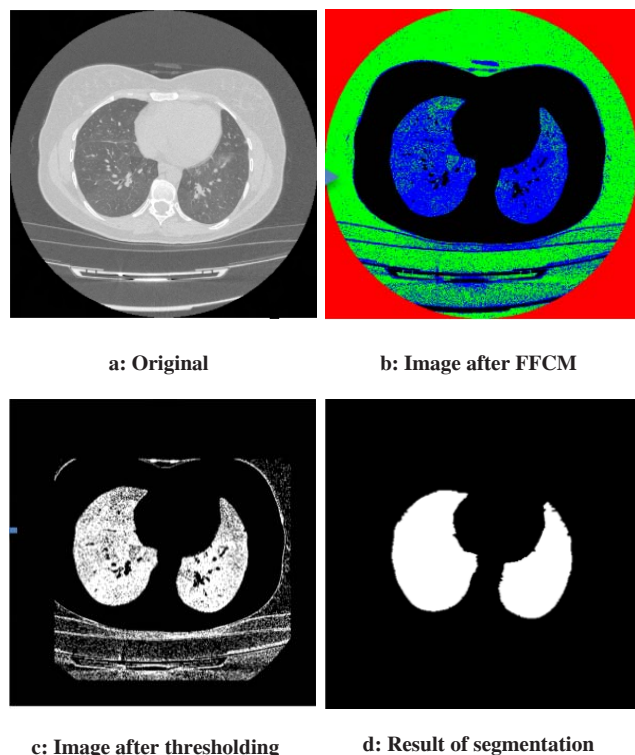
基于肺部区域的CT图像具有灰度不均、结构复杂等特点,分割算法的选取将直接影响肺实质的分割精度和速度。肺部CT图像中肺实质的初分割包括粗分割和肺气管树去除。肺部CT图像中肺实质的初分割方法主要包括:基于区域的分割方法、基于边缘检测的分割方法、基于模式识别的分割方法、基于人工神经网络的分割方法等。基于区域的分割方法主要有阈值方法<sup>[6-9]</sup>、聚类方法<sup>[10]</sup>、区域生长方法<sup>[11-13]</sup>等。基于区域的分割方法可在先验概率的条件下对较为复杂的CT图像进行分割,但这类算法易出现欠分割或过分割现象,且算法计算较复杂。基于边缘检测法的分割步骤:首先用边缘检测算子检

测出感兴趣区域的边缘,然后进行分割。传统的边缘检测算子有Laplacian算子、Sobel算子、Robert算子、Canny算子等<sup>[14-17]</sup>。基于边缘检测的分割方法的计算量较小且边缘检测速度较快,但分割过程中易产生伪边界、不连续边界及错误边界点,甚至出现边界丢失的现象。基于模式识别的分割方法有模糊C均值法、K均值法、最大期望值(Expectation Maximization, EM)法等<sup>[18-19]</sup>,该类型算法具有较高的分割精度,但算法运行速度较慢、复杂度较高。

近年来,针对肺部CT图像的初分割不再局限于一种单一的分割方法,而将多种分割方法相结合,并对其进行相应的优化,使肺部CT图像的分割精度得到了很大的提高<sup>[20]</sup>。肖雪等<sup>[21]</sup>提出了多阈值和标记分水岭相融合的算法对肺部CT图像进行初分割。该算法的分割步骤如下:首先用多阈值法对肺部CT图像进行粗分割;然后用数学形态学法去除左右支气管;最后用标记分水岭法进行精分割。该算法可有效抑制过分割现象,进而提高了肺部CT图像的分割精度。但分割过程中易导致肺实质内的一些细节信息丢失,未来还需对此算法做进一步的优化。龚敬等<sup>[22]</sup>提出一种灰度积分投影与模糊C均值聚类算法相结合的肺实质全自动快速分割方法。首先对肺部CT图像的边界使用灰度积分投影算法进行快速定位;之后选用平滑样条曲线拟合平滑原始图像的积分投影曲线,并提取拟合平滑曲线前后的极大值点,大致确定肺实质的初始边界;再利用模糊C均值聚类算法进行分割,得到肺实质区域;最后利用形态学方法去除左右支气管。该算法具有较高的分割精度,但计算复杂度较高,算法运行时间较长,分割的结果与聚类中心的位置有关。Doganay等<sup>[23]</sup>提出了将快速模糊C均值聚类(Fast Fuzzy C-Means clustering, FFCM)与阈值结合的算法来分割肺部低剂量CT影像。该算法首先用FFCM对肺部CT图像进行粗分割,之后通过多阈值算法和形态学算法去除左右支气管。FFCM与阈值相结合的方法对肺实质的初分割结果如图1所示,该方法运行速度较快,且能有效提高肺实质的分割精度。

随着医学影像技术的不断发展,迄今为止已有多种肺实质的分割算法。其中,深度学习作为一种新型算法,在医学图像处理领域具有非常重要的发展前景。深度学习的概念起源于人工神经网络<sup>[24]</sup>,其典型模型有卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)、深度信任网络模型(Dynamic Bayesian Network, DBN)、堆栈自编码网络模型(Stacked Auto-Encoder network, SAE)等,其在处理复杂的医





FFCM: Fast fuzzy C-means clustering

图1 FFCM算法与阈值算法相结合的分割结果  
Fig.1 Images after FFCM and thresholding

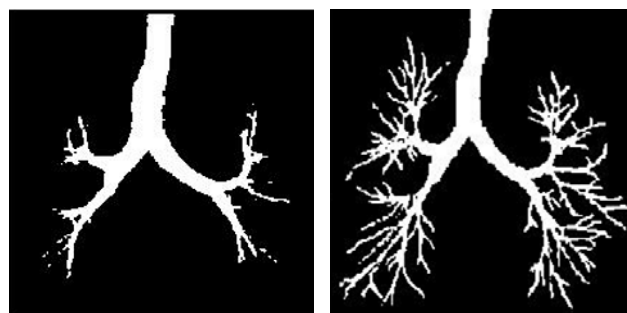
学图像时不易陷入局部最优,具有优异的特征学习能力。在医学图像处理领域,目前已有研究人员将深度学习算法与其它算法相融合用于肺部CT图像中的肺实质分割,取得了很好的分割效果。Kalinovsky等<sup>[25]</sup>先使用ED-CNN算法对肺部CT图像进行分类,然后采用深度学习算法对肺实质进行分割,该方法具有分割精度高、鲁棒性强等优点。此外,该方法对心脏与肺血管的分割也具有较好的分割效果。目前,针对深度学习的研究还处于起步阶段,此领域尚未形成系统的理论,有众多的问题待解决。

### 3 精分割

肺气管树不属于肺实质,如不将其去除则会影响肺实质的分割结果。肺实质的初分割过程中,对肺气管树的去除一般采用的是数学形态学、区域生长等单一算法。当肺气管树中的分支粘连肺实质时,需要将肺气管树完整的分割并去除。三维图像分割<sup>[26-27]</sup>是肺组织手术模拟、三维可视化、定量分析、图形引导手术等后继操作的前提与基础。近年来,越来越多的研究者致力于肺气管树的精确分割和三维重建,较常用的分割方法包括三维区域生长法<sup>[28-31]</sup>、三维多种子点模糊连接方法<sup>[32]</sup>等。肺气管树分割的难点在于分割过程中易发生边界泄露现象,

如边界泄露过于严重,医生在诊断的过程中易误诊或漏诊,进而延误病情。

近年来,已出现多种肺气管树的自动分割、手动分割及半自动分割方法<sup>[33-35]</sup>。Charbonnier等<sup>[36]</sup>针对肺气管树分割过程中的边界泄露问题提出了一种新算法,首先利用卷积网络监督方式检测边界泄露,然后结合现有的算法对肺气管树进行分割。该方法将深度学习和其它算法相结合,提高了肺气管树的分割精度。王昌等<sup>[37]</sup>针对部分容积效应和污染导致支气管断裂和分割泄露的问题提出了将最优阈值生长和形态学结合的算法对肺气管树进行分割,首先使用最优阈值生长算法对肺气管树进行粗分割,然后结合灰度重加的形态学算法提取精细的肺气管树区域,该算法可有效避免泄漏现象。王雷等<sup>[38]</sup>利用形态膨胀3D区域生长算法对肺气管树进行三维分割,该算法首先使用形态学膨胀法选取阈值,然后用三维区域生长算法分割肺气管树,分割结果如图2所示。由图2可知,该方法只分割出9阶细支气管,并没有分割出更为细小的支气管,分割精度较低。彭双等<sup>[39]</sup>针对肺气管树在分割过程中由于灰度分布不均、边界泄露等原因导致分割不精确的问题,提出了区域生长和模糊连接相结合的分割方法,该方法取得了很好的分割效果,且具有较好的鲁棒性。目前,肺部左右支气管的分割方法以区域生长算法和改进的区域生长算法为主,算法较单一,且分割精度较低。



a: Result of morphological expansion 3D region growing  
b: Result of manual segmentation

图2 形态学膨胀3D区域生长与手动分割的结果

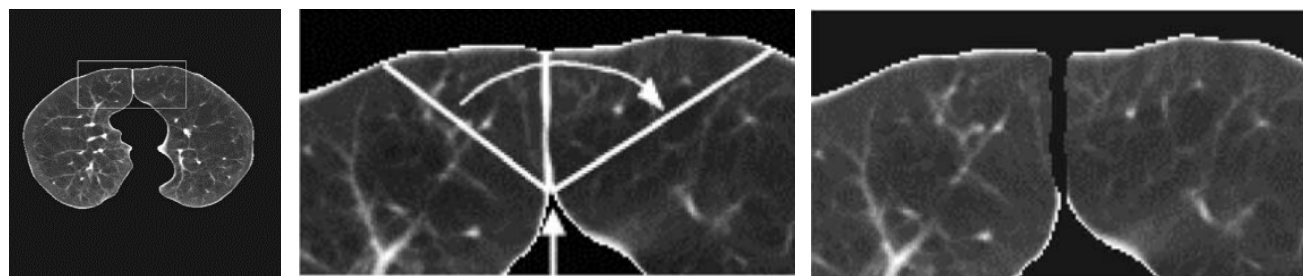
Fig.2 Results of morphological expansion 3D region growing and manual segmentation

### 4 左右肺分离

受部分容积效应的影响,肺实质经初分割后,左右肺的近距离区域易出现粘连现象。但由于左右肺体积不同,进行肺部疾病诊断与肺功能评估时,实现左右肺分离是非常必要的<sup>[40-41]</sup>。

左右肺的分割步骤为:先判断左右肺是否粘连,若粘连则确定左右肺粘连的位置,并将左右肺分离。谷宇等<sup>[42]</sup>用连通区域的面积大小来判断左右肺是否粘连。首先对连通区域进行标记,并求出所有连通区域的面积,当给定阈值大于最大的两个连通区域的面积时则判定左右肺粘连,反之则判定左右肺分离;然后用灰度积分投影算法快速定位左右肺的粘连区域;最后通过行扫描和列扫描实现左右肺

分离。但此算法在肺部出现肺不张的情况时易出现错判的情况。耿欢等<sup>[43]</sup>通过扫描粘连定位和动态规划的方法实现了前后粘连的定位及左右肺的分离,但是该方法对左右肺的分割精度较低,对后期肺实质的三维重建、临床诊断等均有不利影响<sup>[45]</sup>,该算法的分割结果如图3所示。目前,针对左右肺的分离算法较少,且分离不精确。要实现左右肺的精确分离,对其算法进行更为深入的研究是必不可少的。



a: Adhesion of left and right lung

b: Position of adhesion site

c: Result of left and right lung separation

图3 肺部CT的左右肺分离

Fig.3 Left and right lung separation in computed tomography image

## 5 边缘修补

当肺部CT影像中存在与肺壁粘连的肺结节、胸膜相连的血管时,由于他们的灰度值与肺实质的周围组织非常相似,肺实质初分割时易丢失这些部位,进而影响医生的诊断结果。因此需要对肺实质缺失的边缘进行修补。

常用的边缘修补方法有滚球法<sup>[44]</sup>、滚圆法<sup>[45]</sup>、数学形态学法<sup>[46-47]</sup>、凸包算法<sup>[48-49]</sup>、Snake算法<sup>[50-51]</sup>等。黄雪艳等<sup>[52]</sup>利用欧式距离变换对肺实质边缘进行修补,首先利用欧式距离变换提取肺实质的缺失部分,然后对肺实质缺失部分利用凸包算法修补。这种算法对小面积病变肺实质边缘修补时具有计算量小、准确率高等优点。但当肺部包含的结节过大或肺部病变区域较大时,该算法的修补效果并不理想。Lou等<sup>[53]</sup>利用滚圆法修补肺实质边界,取得了较好的修补效果。但用滚圆法或滚球法对肺实质边界进行修补时,如果半径选取较小,则滚圆或滚球可能会进入缺陷区域,而达不到修补的目的;如果半径选取过大,就会将肺实质以外的组织包含至肺实质内,进而影响肺实质的分割精度。冯昌利等<sup>[54]</sup>为了快速有效的修补肺实质边缘,提出最小凸包与分形集合相结合的方法,该方法对肺边缘的修补精度较高,但计算量较大,且无法修补血管型凹陷。Wei等<sup>[55]</sup>针对粘连肺壁结节易导致肺部边缘缺失的问题,提出了一种改进链码算法和Bresenham算法相结合

的方法来修补肺实质的边缘,首先用改进的链码法检测和标记肺实质边缘缺失的位置,然后用Bresenham算法来修补缺失的边缘。相比于滚球法,该方法对肺实质边缘的修补效果较好。

边缘修补在肺部CT图像的肺实质分割中具有重要的研究意义,它直接影响肺实质分割的精度及后期的处理。近年来,针对肺实质的边缘修补算法较少,鲁棒性较差。未来还需对算法的适用性进行改进,以实现精确的肺实质边缘修补。

## 6 结语

基于近年来肺部CT图像中肺实质分割的研究进展,对肺实质分割过程中的预处理、初分割、精分割、左右肺分离、边缘修补等5个方面进行了综述,以期探索肺实质分割的最佳方法。以上提及的各方面并不是孤立的影响条件,而是彼此间交互影响,要结合具体的目标图像,系统的考虑上述因素。虽然肺部CT图像中肺实质分割的研究时间较短,但其飞速的发展已吸引了社会各领域的广泛关注。目前,肺实质分割的精度和速度都得到了较大的提升,为肺结节的有效检测奠定了基础,有望实现肺癌的早期诊断,以降低其死亡率。但对于肺实质分割过程中的灰度不匀、噪声影响、边界模糊等问题尚未彻底解决,且尚未形成一种可适用于各种病变及正常组织的肺实质分割方法。因此,肺部CT图像的肺实质分割依然是制约CAD及其它相关技



术发展和应用的瓶颈,依然是近期的研究热点。

对于肺部CT图像而言,未来肺实质分割的发展空间主要包括以下4方面:(1)降低算法复杂度,以提高其运行速度;(2)提高算法的分割精度;(3)提高算法的自动化程度,尽可能排除或减少人工干扰;(4)提高算法的鲁棒性。

基于CT图像的肺实质分割大多结合使用多种理论,以充分利用各分割方法的优势。将不同的分割方法相结合,以达到优势互补的目的,依然是肺实质分割的主要发展趋势。此外,将深度学习广泛应用于肺实质分割领域也是未来的一个重要发展趋势。

## 【参考文献】

- [1] REBOUÇAS FILHO P P, CORTEZ P C, DA SILVA BARROS A C, et al. Novel and powerful 3D adaptive crisp active contour method applied in the segmentation of CT lung images[J]. Med Image Anal, 2017, 35: 503-516.
- [2] 张辉, 朱家明, 陈静, 等. 结合分水岭算法的水平集医学图像分割方法[J]. 计算机科学, 2016, 43(S2): 193-196.  
ZHANG H, ZHU J M, CHEN J, et al. Level set medical image segmentation method combining watershed algorithm[J]. Computer Science, 2016, 43(S2): 193-196.
- [3] 曾羽璐, 陈明辉. 肺部模糊区域的实质自动图像分割方法研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(3): 376-379.  
ZENG Y J, CHEN M H. Research on the automatic image segmentation method in fuzzy region of lung parenchyma [J]. Computer Simulation, 2014, 31(3): 376-379.
- [4] 李纪成, 谢凯, 阮宁君, 等. 基于曲波变换的医学图像增强算法[J]. 计算机工程与设计, 2017, 38(1): 187-191.  
LI J C, XIE K, RUAN N J, et al. Medical image enhancement based on curvelet transform[J]. Computer Engineering and Design, 2017, 38(1): 187-191.
- [5] CHAWLA P, MITTAL R, GREWAL K. Hybrid filtering technique for image denoising using artificial neural network[J]. Int J Eng Adv Technol, 2012, 1(3): 36-40.
- [6] KARTHIKEYAN A, VALLIAMMAI M. Lungs segmentation using multi-level thresholding in CT images[J]. Int J Electroni Comput Sci Eng, 2012, 1(3): 1509-1513.
- [7] WAN A W, ZAKI W M, AHMAD FAUZI M F. Lung segmentation on standard and mobile chest radiographs using oriented Gaussian derivatives filter[J]. Biomed Eng Online, 2015, 14(1): 14-40.
- [8] CORTEZ P C, DE ALBUQUERQUE V H. 3D segmentation and visualization of lung and its structures using CT images of the thorax [J]. J Biomed Sci Eng, 2013, 6(11): 1099-1108.
- [9] KUMAR D I, GANESH B S. Segmenting the lung nodule image and classification by K-NN[J]. Int J Appl Eng Res, 2015, 10(20): 19614-19617.
- [10] CHEN L, CHEN C L, LU M. A multiple- kernel fuzzy C- means algorithm for image segmentation [ J ]. IEEE Trans Syst Man Cybern B Cybern, 2011, 41(5): 1263-1274.
- [11] HASHEMI A, PILEVAR A H, RAFEH R. Mass detection in lung CT images using region growing segmentation and decision making based on fuzzy inference system and artificial neural network[J]. Int J Image Graph Signal Process, 2013, 5(6): 16-24.
- [12] BAGHERIEH H, HASHEMI A, PILEVAR A H. Mass detection in lung CT images using region growing segmentation and decision making based on fuzzy systems [J]. Int J Image Graph Signal Process, 2013, 6(1): 68-73.
- [13] ABBAS Q. Segmentation of differential structures on computed tomography images for diagnosis lung-related diseases [J]. Biomed Signal Process Control, 2017, 33: 325-334.
- [14] GEHRKE C, OATES R, RAMACHANDRAN P, et al. Automatic tracking of gold seed markers from CBCT image projections in lung and prostate radiotherapy[J]. Phys Med, 2015, 31(2): 185-191.
- [15] GONZALEZ C I, MELIN P, CASTRO J R, et al. An improved sobel edge detection method based on generalized type-2 fuzzy logic[J]. Soft Comput, 2016, 20(2): 773-784.
- [16] GUPTA S, MAZUMDAR S G. Sobel edge detection algorithm[J]. Int J Comput Sci Manage Res, 2013, 2(2): 1578-1583.
- [17] EL-ZAART A, EL-ARWADI T. A new edge detection method for CT-scan lung images[J]. J Biomed Eng Med Imaging, 2015, 2(5): 1-9.
- [18] KHAN Z F, KANNAN A. Intelligent approach for segmenting CT lung images using fuzzy logic with bitplane[J]. J Electron Eng Technol, 2014, 9(4): 1426-1436.
- [19] NITHILA E E, KUMAR S S. Segmentation of lung nodule in CT data using active contour model and fuzzy C-mean clustering[J]. Alex Eng J, 2016, 55(3): 2583-2588.
- [20] 张利红, 梁英波, 吴定允. 改进的分水岭算法在医学图像分割中的应用[J]. 电视技术, 2013, 37(9): 196-197.  
ZHANG L H, LIANG Y B, WU D Y. Application of improved watershed algorithm in image of medical image segmentation [J]. Video Engineering, 2013, 37(9): 196-197.
- [21] 肖雪, 龚恒, 陈钟. 多阈值和标记分水岭相融合的肺部CT图像分割方法[J]. 激光杂志, 2014(9): 74-78.  
XIAO X, GONG H, CHEN Z. Segmentation method of CT lung image based on multi-threshold and marker watershed algorithm[J]. Laser Journal, 2014(9): 74-78.
- [22] 龚敬, 王丽嘉, 王远军, 等. 基于灰度积分投影与模糊C均值聚类的肺实质分割[J]. 中国生物医学工程学报, 2015, 34(1): 109-113.  
GONG J, WANG L J, WANG Y J, et al. Segmentation of lung parenchyma based on gray-level integrated projection and Fuzzy C-Means clustering algorithm [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2015, 34(1): 109-113.
- [23] DOGANAY E, KART L, ÖZCELIK H K, et al. A robust lung segmentation algorithm using fuzzy C-means method from HRCT scans[J]. Eur Respir Soc, 2016, 48 (Suppl 60): 750-760.
- [24] LECUN Y, BENGIO Y, HINTON G. Deep learning[J]. Nature, 2015, 521(7553): 436-444.
- [25] KALINOVSKY A, KOVALEV V. Lung image segmentation using deep learning methods and convolutional neural networks[J]. Pattern Recogn Inform Process, 2016, 49(20): 21-24.
- [26] PENG B, ZHANG L, ZHANG D. A survey of graph theoretical approaches to image segmentation[J]. Pattern Recognit, 2013, 46(3): 1020-1038.
- [27] 周芹, 茹国宝, 余绍德, 等. 基于GrabCut的三维医学图像分割[J]. 电视技术, 2016, 40(2): 27-32.  
ZHOU Q, RU G B, YU S D, et al. Medical volume segmentation approach based on GrabCut[J]. Video Engineering, 2016, 40(2): 27-32.
- [28] FABIJANŠKA A. Segmentation of pulmonary vascular tree from 3D CT thorax scans[J]. Biocybern Biomed Eng, 2015, 35(2): 106-119.
- [29] MILITELLO C, VITABILE S, RUNDO L, et al. An edge-driven 3D region-growing approach for upper airway morphology and volume evaluation in patients with Pierre Robin sequence[J]. Int J Adapt Innovat Syst, 2015, 2(3): 232-253.
- [30] MASOOD S, SHARIF M, MASOOD A, et al. A survey on medical

- image segmentation[J]. *Curr Med Imaging Rev*, 2015, 11(1): 3-14.
- [31] 李艳波, 于翔. 基于区域增长法的三维支气管树分割算法[J]. *计算机科学*, 2015, 42(b11): 192-194.
- LI Y B, YU X. Three dimensional airway trees segmentation algorithm based on region growing method[J]. *Computer Science*, 2015, 42 (b11): 192-194.
- [32] RIZI F Y, AHMADIAN A, REZAIE N, et al. Leakage suppression in human airway tree segmentation using shape optimization based on fuzzy connectivity method[J]. *Int J Imaging Syst Technol*, 2013, 23 (1): 71-84.
- [33] QI L, HUANG S, HEIDARI A E, et al. Automatic airway wall segmentation and thickness measurement for long-range optical coherence tomography images[J]. *Opt Express*, 2015, 23(26): 33992-34006.
- [34] LEE L K, LIEW S C, WENG J T. A review of image segmentation methodologies in medical image[J]. *Lect Notes Electri Eng*, 2015, 315: 1069-1080.
- [35] QI S L, YUE Y, ZHU C K, et al. Algorithm design for fast automatic segmentation of airway tree[J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)*, 2013, 34(2): 186-190.
- [36] CHARBONNIER J P, RIKXOORT E M, SETIO A A, et al. Improving airway segmentation in computed tomography using leak detection with convolutional networks[J]. *Med Image Anal*, 2017, 36: 52-60.
- [37] 王昌, 黄煜峰, 王兴家, 等. 最优阈值生长和形态学结合的肺气道树分割方法[J]. *北京生物医学工程*, 2010, 29(3): 241-244.
- WANG C, HUANG Y F, WANG X J, et al. Pulmonary airway tree segmentation by combining optimal threshold region grow and morphology[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2010, 29(3): 241-244.
- [38] 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(4): 679-683.
- WANG L, GAO X, ZHANG G Z. 3D region growing algorithm driven by morphological dilation for airway tress segmentation in image guided therapy[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2013(4): 679-683.
- [39] 彭双, 肖昌炎. 结合区域生长与模糊连接度的肺气管树分割[J]. *计算机工程与应用*, 2016, 52(13): 201-205.
- PENG S, XIAO C Y. Segmentation of pulmonary airway tree by combining region growing and fuzzy connectedness[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2016, 52(13): 201-205.
- [40] 司广磊, 齐守良, 岳勇, 等. 基于重采样的胸部CT图像肺实质自动分割[J]. *北京生物医学工程*, 2012, 31(4): 349-355.
- SI G L, QI S L, YUE Y, et al. Automatic segmentation of lung parenchyma from thoracic CT based on image resampling[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2012, 31(4): 349-355.
- [41] 崔颖, 王小鹏, 于挥, 等. 肺实质CT图像分割方法[J]. *计算机工程与设计*, 2015, 36(5): 1274-1278.
- CUI Y, WANG X P, YU H, et al. Segmentation method for image of lung parenchyma[J]. *Computer Engineering and Design*, 2015, 36(5): 1274-1278.
- [42] 谷宇, 吕晓琪, 赵建峰, 等. 基于三维区域增长和灰度积分投影法的肺实质分割[J]. *科学技术与工程*, 2016, 16(32): 93-100.
- GU Y, LÜ X Q, ZHAO J F, et al. Based on the three-dimensional regional growth and the gray-scale integral projection of lung parenchyma segmentation[J]. *Science Technology and Engineering*, 2016, 16(32): 93-100.
- [43] 耿欢, 章文军, 杨金柱, 等. 基于CT影像的肺组织分割及其功能定量分析[J]. *小型微型计算机系统*, 2016, 37(3): 581-587.
- GEN H, QIN W J, YANG J Z, et al. Pulmonary tissue segmentation and quantitative function analysis based on CT image[J]. *Journal of Chinese Mini-Micro Computer Systems*, 2016, 37(3): 581-587.
- [44] 刘乐, 李阳, 侯阿临, 等. 基于CT图像的肺实质分割[J]. *长春工业大学学报(自然科学版)*, 2015, 36(1): 72-76.
- LIU L, LI Y, HOU A L, et al. Lung parenchyma segmentation on CT image[J]. *Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition)*, 2015, 36(1): 72-76.
- [45] 赖均, 解梅. 基于PCNN与主动轮廓的肺CT候选结节的分割方法[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(4): 1588-1591.
- LAI J, XIE M. PCNN and active contour based candidate pulmonary nodule segmentation method for CT images[J]. *Application Research of Computers*, 2011, 28(4): 1588-1591.
- [46] 孟亚州, 马瑜, 白冰, 等. 基于粒子群优化的Otsu肺组织分割算法[J]. *液晶与显示*, 2015, 28(6): 1000-1007.
- MENG Y Z, MA Y, BAI B, et al. Improved lung segmentation algorithm based on 2D Otsu optimized by PSO [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2015, 28(6): 1000-1007.
- [47] SRIDHAR B, REDDY K, PRASAD A M. Mammographic image analysis based on adaptive morphological fuzzy logic CAD system[J]. *Int J Biomed Eng Technol*, 2015, 17(4): 341-355.
- [48] 李金, 郑冰, 梁洪, 等. 基于改进凸包算法的肺实质分割研究[J]. *中国生物医学工程学报*, 2013, 32(4): 484-490.
- LI J, ZHENG B, LIANG H, et al. Segmentation research of pulmonary parenchyma based on improved convex hull algorithm[J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2013, 32(4): 484-490.
- [49] 代双凤, 吕科, 翟锐, 等. 基于3D区域增长法和改进的凸包算法相结合的全肺分割方法[J]. *电子与信息学报*, 2016, 38(9): 2358-2364.
- DAI S F, LÜ K, ZAI R, et al. Lung segmentation method based on 3D region growing method and improved convex hull algorithm [J]. *Journal of Electronics and Information Technology*, 2016, 38(9): 2358-2364.
- [50] 石锐, 黄向娟. 基于改进Snake模型的肺部图像分割[J]. *计算机工程与应用*, 2014, 50(15): 164-167.
- SHI R, HUANG X J. Lung segmentation based on improved Snake model[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2014, 50(15): 164-167.
- [51] DEVAKI K, BHASKARAN V M, SUPHALAKSHMI A. Fast water snakes: an improved image segmentation frame work[J]. *Imaging Sci J*, 2014, 62(6): 303-312.
- [52] 黄雪艳, 张莉. 基于欧氏距离变换的肺实质修补[J]. *计算机与数字工程*, 2014, 42(3): 491-494.
- HUANG X Y, ZHANG L. Lung parenchyma repairing based on Euclidean distance transformation [J]. *Computer and Digital Engineering*, 2014, 42(3): 491-494.
- [53] LOU S, JIANG X, SCOTT P J. Geometric computation theory for morphological filtering on freeform surfaces[J]. *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, 2013, 469: 65.
- [54] 冯昌利, 张建勋, 梁睿, 等. 基于分形几何和最小凸包法的肺区域分割算法[J]. *天津大学学报(自然科学与工程技术版)*, 2015(10): 937-946.
- FENG C L, ZHANG J X, LIANG R, et al. A lung region segmentation method based on the fractal theory and the minimal convex hull method[J]. *Journal of Tianjin University (Science and Technology)*, 2015(10): 937-946.
- [55] WEI Y, SHEN G, LI J J. A fully automatic method for lung parenchyma segmentation and repairing[J]. *J Digit Imaging*, 2013, 26(3): 483-495.

(编辑:薛泽玲)