

基于改进 SymRG 算法的腹主动脉瘤分割及自动定位方法

张娟¹, 杨子立², 袁克虹¹

1. 清华大学生物医学工程系深圳研究生院, 广东 深圳 518055; 2. 常州工学院电子信息与电气工程学院, 江苏 常州 213002

【摘要】腹主动脉瘤是腹主动脉的局限性退化扩张, 是一种高危致死性疾病。CTA 是临床诊断腹主动脉疾病的首选方式。腹主动脉瘤的准确快速提取和定位对于腹主动脉瘤的诊断、预后评估以及手术计划的制定有重要意义。因此, 本文提出了一种能够准确有效地实现腹主动脉内腔分割和瘤区层片自动定位的算法。首先, 对 CTA 图像进行滤波预处理; 其次, 应用改进的快速对称区域生长算法, 分别对单像素和合并的一维和二维区域进行判别和生长, 标定连通区域; 然后, 用种子点提取目标三维连通区域, 即为腹主动脉内腔; 最后, 计算腹主动脉内腔的横截面面积分布, 自动定位瘤体位置。通过 4 例由 GE64 排容积螺旋 CT 扫描采集的胸部到左右髂动脉的 CTA 数据验证, 本算法能实现腹主动脉内腔的准确分割和瘤区层片自动定位, 自动分割结果和手动分割结果重合率达到 95% 以上, 自动定位瘤区层片与手工标定的瘤区层片重合率达到 96% 以上。本文中提出的算法能够准确有效实现腹主动脉内腔的分割和瘤区层片的自动定位。

【关键词】腹主动脉瘤; 分割; 定位

【DOI 编码】doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.01.015

【中图分类号】R318.04

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)01-61-04

Segmentation and Automatic Localization Method for Abdominal Aortic Aneurysm Based on the Improved SymRG Algorithm

ZHANG Juan¹, YANG Zi-li², YUAN Ke-hong¹

1. Department of Biomedical Engineering, Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, China; 2. Changzhou Institute of Technology, Changzhou 213002, China

Abstract: Objective Abdominal aortic aneurysm (AAA), a kind of highly fatal disease, is the local degeneration expansion of abdominal aortic. CT angiography (CTA) is the first choice in clinical diagnosis of abdominal aortic diseases. Efficient and accurate localization of abdominal aortic lumen and AAA is of great significance for the diagnosis, evaluation of prognosis and surgical plan. Therefore, an algorithm which can effectively, accurately and automatically localize the abdominal aortic lumen and the tumor layers from the AAA CTA data is proposed in this paper. **Methods** Firstly, anisotropic diffusion filter was used in the pre-processing of CTA images. Secondly, an improved fast symmetry region growing algorithm was applied for the abdominal aortic lumen localization. Discrimination and growth were put into use for single pixel and 1D and 2D merged region. And the connected area were marked. Then, a seeds point selected artificially was used to extract the target 3D connected region, which was the abdominal aortic lumen. Finally, the distribution of the crosssection area of abdominal aortic lumen was calculated to localize the tumor layers automatically. **Results** Four cases of AAA CTA data from chest to the left and right iliac artery by GE 64 multi-detector helical CT were used for verification. The coincidence rate of automatical segmentation and artificial segmentation of abdominal aortic lumen was above 95% and the coincidence rate of automatical location and artificial tagging of the tumor layers was above 96%. **Conclusion** The method proposed in this paper can automatically and accurately localize the abdominal aortic lumen and the tumor layers from the AAA CTA data.

Key words: abdominal aortic aneurysm; segmentation; localizing

【收稿日期】2014-08-17

【基金项目】广东科技计划项目(2011B050500006); 院交叉基金(JC20140001)

【作者简介】张娟(1989-), 女(汉族), 硕士研究生

【通讯作者】袁克虹(1965-), 男(汉族), 副教授, 主要研究方向: 医学图像处理。E-mail: yuankh@sz.tsinghua.edu.cn

前言

腹主动脉瘤 (Abdominal Aortic Aneurysm, AAA) 是腹主动脉局限性退化扩张, 是临床上一种较为常见的致死性主动脉疾病。根据欧洲血管外科协会的定义, 腹

主动脉前后径或横截面直径超过 3 cm 即可确诊为腹主动脉瘤^[1]。在超过 55 岁的人群中患病率高达 5.5%,发病率超过了其他恶性肿瘤^[2]。腹主动脉瘤进一步发展可导致破裂,称之为腹主动脉瘤破裂(Ruptured Abdominal Aortic Aneurysm, RAAA)。腹主动脉瘤破裂是血管外科最为凶险的疾病之一,如不及时进行外科修复治疗,病死率高达 100%,急诊手术病死率仍为 40%~60%。目前,血管介入修复治疗是腹主动脉瘤病人的主要治疗手段,但远期的治疗效果尚未可知。而且,并非所有的腹主动脉瘤都一定会发生破裂,因此,对腹主动脉瘤进行有效的早期诊断和预测其破裂的风险,并辅助制定手术计划,是 AAA 诊疗中的实际问题。

在 AAA 的 CT 扫描成像中,医疗人员采用静脉注射的方式给患者注射造影剂,CTA 图像的血管内腔灰度值会达到 1200 以上,血管内腔与周围组织的对比度显著增强,通过阈值可以将两者区分开来,然后通过区域生长可以提取血管信息。区域生长是一种已经受到广泛关注的图像分割方法,不同的区域生长算法主要针对生长特征、生长准则和停止条件进行了研究。阈值自适应区域生长算法在分割 CTA 图像时,存在严重的过分割现象,并且无法将血管与粘连的骨骼区域分开。另外,阈值自适应种子区域生长算法在运算的过程中始终需要把全部的 CTA 图像保存在内存中,而且算法递归不能并行运算,因此内存和时间消耗都很大,无法满足临床应用需求。

1 改进的快速对称区域生长算法简介

传统三维区域生长算法由于种子点的选择不同,导致分割结果存在差异,而且计算过程中内存和时间消耗过大。文献^[4]中提出了对称区域生长算法(SymRG)理论。其基本思想是从图像的任意一个种子点开始进行区域生长,所得到的最后结果是一致的。对称区域生长算法是基于合并区域与种子区域的连通性实现分割。将 SymRG 算法应用在 CTA 图像中的腹主动脉分割中,计算速度和效率可以满足临床需求,但血管与骨骼区域粘连的问题仍旧没有得到解决。医学图像分割区别于其他图像分割的一个重要特点就是分割中结合了解剖学先验知识。从临床解剖学知识可知,骨骼的结构分为骨皮质和骨松质,骨松质在螺旋 CT 扫描后呈现较低的 CT 值,而骨密质呈现较高的 CT 值,远远高于血管内腔的 CT 值。经 CT 造影成像后的部分血管区域与骨骼区域虽然在 CT 值上很接近,但他们的空间几何形态却存在明显的不同。在 CTA 横断面图

像中,骨骼区域和血管区域的几何特征,包括区域的面积和周长、区域的均值和方差、区域的圆形度、偏心率等存在很大的差异。因此,本文将 CTA 横断面图像中区域的灰度特征和几何特征作为分类的特征之一,加入快速对称区域生长的判别标准中,实现腹主动脉的自动分割,并实现瘤区的自动定位。

在对称区域生长算法中,分割的目标是将三维数字图像 I 分割为 M 个区域 $R_i, i=1,2, \dots, M$ 其中,与种子点 A 相连通的区域,即为最终的分割目标:

$$S(I, \text{SymRG}(\tau, \phi), A) = \cup R_i, R_i \text{ connect to } A$$

SymRG 算法中的重点在于生长准则和合并准则的确定。传统 SymRG 算法中的相关准则定义如下:

(1) 生长准则:对区域内的当前点 p 的邻域点 q 进行判断,当 q 满足以下两个条件之一时将点 q 标记为生长区域内的一点,并将点 q 作为新的种子点,即当前点。

$$f_{\min} < f(q) < f_{\max} \text{ 且 } |f(p) - f(q)| < \sigma$$

(2) 合并准则:对于当前扫描的任意一个种子点,当此点与其他的生长区域内点有邻接关系时,将之合并为一个子区域。

本文将 CTA 横断面图像中区域的灰度特征和几何特征作为分类的特征,加入到对称区域生长算法中,具体步骤如下:

(1) 读取第 k 层 CTA 图像;

(2) 扫描第 j 行像素点灰度值,并标记为 $F(x,y)$,标记规则如下:

$$F(x,y) = \begin{cases} 1 & (G(x,y) \leq \theta_h \text{ \& \& } G(x,y) \geq \theta_l) \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

其中, θ_h 为高阈值, θ_l 为低阈值。将第 j 行标记值相同的像素点合并为一个集合,标记为目标一维条目。标记结果如图 1 所示。

(3) 逐行扫描线型排布的像素点集,即一维条目,当相邻行之间的像素点集空间位置 8 邻接时,将一维条目合并为二维区域。过程如图 2 所示。

(4) 计算二维区域的几何特征,将不符合特征规则的二维区域删除,符合特征规则的二维区域,则根据层间的连续性合并为三维区域。二维区域的灰度特征主要包括区域的均值和方差,几何特征主要包括区域的面积和周长、区域圆形度、区域质心与几何中心距离和区域偏心率。

(5) 完成二维区域的筛选后,根据层间的连续性,

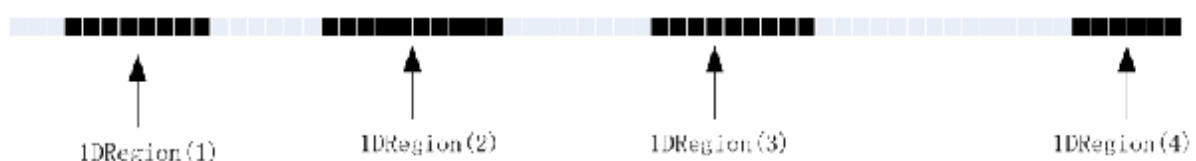


图 1 一维区域分割示意图

Fig.1 Diagram of One Dimensional Region Segmentation

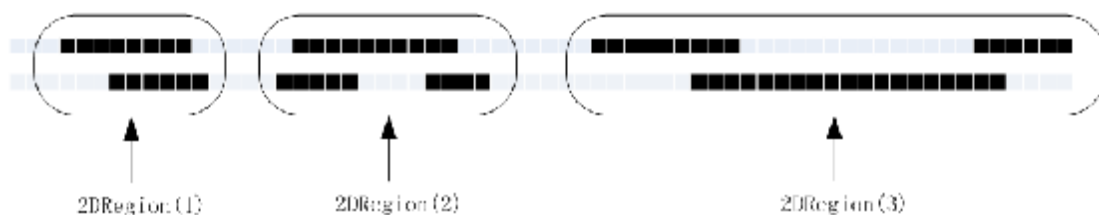


图2 二维区域分割示意图

Fig.2 Diagram of Two-Dimensional Region Segmentation

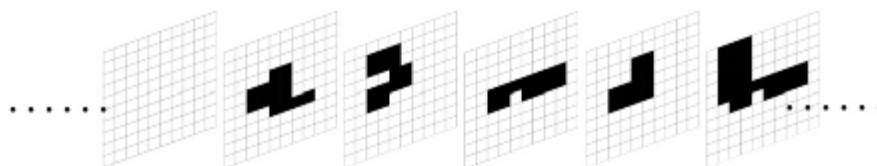


图3 二维区域合并示意图

Fig.3 Diagram of Two-Dimensional Region Merge

将二维区域合并为三维区域,如图3所示。

(6) 提取与种子点连通的三维区域,即为血管内腔提取结果。算法流程如图4所示。

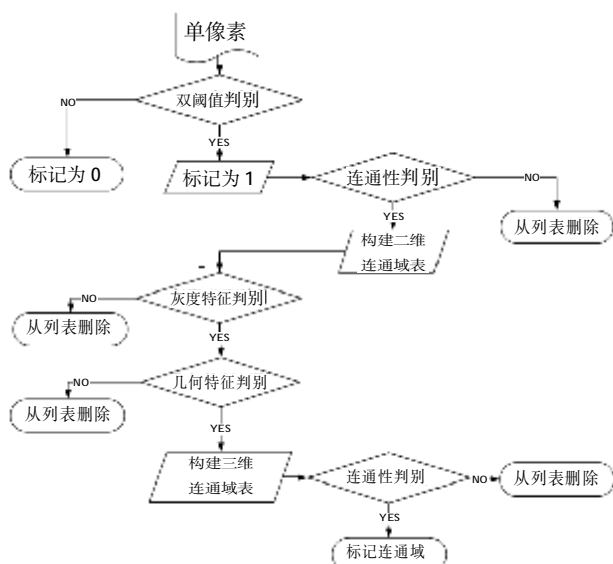


图4 分割算法流程图

Fig.4 Diagram of the Segmentation Algorithm

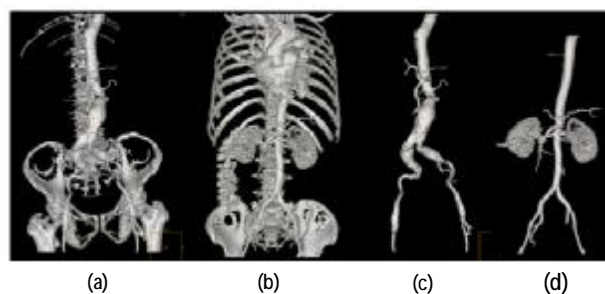
2 实验结果

为了验证本文算法的准确性和有效性,实验采用了桂林医学院提供的来自 GE 的 64 排容积螺旋 CT 扫描图像,检查范围为主动脉至髂内外动脉,增强造影方式为静脉团注。实验程序运行的硬件环境是 i5-3470, 3.2 GHz 四核处理器, 8 G 内存。

2.1 腹主动脉内腔提取

我们在 23 个病例的共计 16 000 余幅 CTA 图像中抽取若干,对图像中的血管内腔区域和骨骼区域进行统计分析,从而获取灰度特征和几何特征的判别标准。实验对比了对称区域生长算法和改进的对称区域

生长算法对 CTA 图像进行分割的效果,其中,在采用传统对称区域生长算法对 CTA 图像进行分割处理时,灰度阈值采用最大类间方差(OTSU)的方法计算获得。实验结果图 5 所示。



(a) Segmentation results of case 1 using traditional SymRG algorithm.
(b) Segmentation results of case 2 using traditional SymRG algorithm.
(c) Segmentation results of case 1 using the method proposed in this paper.
(d) Segmentation results of case 2 using the method proposed in this paper

图5 传统对称区域生长算法和本文算法分割结果

Fig.5 Examples of Segmentation Results

分割的结果显示,由于对称区域生长算法的区域相似性准则仅仅采用了像素值的灰度信息,而 CTA 图像中造影增强的血管内腔和骨骼的灰度值范围近似,造成了区域粘连。而改进的对称区域生长算法,可以获得完整的腹主动脉分割结果。对自动分割结果和手动分割结果进行对比,重合率均值为 95.7%。

2.2 腹主动脉瘤区定位

在分割出腹主动脉内腔之后,为了实现对腹主动脉瘤的分析和参数测量,需要准确定位腹主动脉瘤瘤区层片。在临床上,一套病例的 CTA 图像通常为 500 (层厚 1.3 mm)~900 (层厚 0.6 mm),其中腹主动脉瘤所在的层片约为 100 层,本文根据已分割的腹主动脉内腔信息,对瘤区层片进行自动定位。统计标记的内腔区域的像素信息,作为腹主动脉横截面的面积定量

值,当区域面积曲线峰值超过正常值的 125%时,即认为存在腹主动脉瘤。对每个点向上向下各取 5 个点,进行直线拟合,拟合直线的斜率值分别为 k_b 和 k_r ,当 $|k_b - k_r| > K$ 时,即出现区域面积的突变点。统计相邻的正向曲率突变点之间的区域面积计数值均值,当相邻的正向曲率突变点之间的区域面积计数值均值高于正常值的 125%,即确定为瘤区层片的定位点。如图 6 所示:

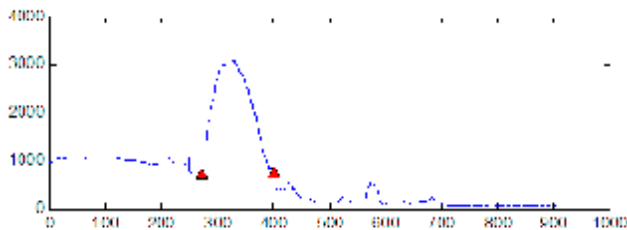


图 6 瘤区层片自动定位

Fig.6 Automatic Positioning of Tumor Layers

对病例数据进行分析,计算手动定位瘤区范围和自动定位的瘤区范围,瘤区范围的重合率定义为:

$$AO = \frac{2L(M \cap A)}{L(M) + L(A)}$$

其中, $L(M)$ 表示手动定位的瘤区层片, $L(A)$ 表示自动定位的瘤区层片, $L(M \cap A)$ 表示手动定位和自动定位的层片重合区域的范围。层片的误差定义为自动定位层片相对于手动定位层片,沿人体垂直轴向正向偏移的层数。统计结果如表 1 所示。

统计结果显示,根据内腔的分割结果自动定位的瘤区层片和手动定位的瘤区层片重合率很高,平均重合率达到了 96.175%,能够实现瘤区层片的有效定位。

3 讨论

节 3 中的实验分析结果证明了本文提出的算法的有效性,而对实验中误差较大的图像进行分析可知,参数的选择直接影响到分割结果的准确性。实验中发现,二维区域几何特征和灰度特征判别的参数选择对于分割结果存在较大的影响。当内腔分割的二维区域几何特征和灰度特征判别参数设置出现误差,将

表 1 瘤区定位结果统计

Tab.1 Results of the Automatic Tumor Layer Locating

	病例 1	病例 2	病例 3	病例 4
峰值/正常值(%)	295.89	219.41	352.92	138.75
自动定位	274-401	253-402	216-266	136-211
手动定位	280-397	257-403	211-268	134-215
AO(%)	95.90	98.31	94.34	96.15
层片误差(层)	(6, -4)	(4, 1)	(-5, 2)	(-2, 4)

会产生层片的缺失,从而影响分割结果的空间连续性。因此,本文在 23 例病例数据的图像中,截取典型的骨骼和血管区域,进行统计分析,从而确定几何特征和灰度特征的判别阈值。另外,对于直接用快速对称区域生长算法分割内腔未出现粘连的病例,不加入几何特征和灰度特征的判别,节省了计算时间。

4 结论与展望

腹主动脉瘤的内腔分割和瘤区定位在临床诊断中具有重要意义,本文提出一种改进的快速对称区域生长算法,实现腹主动脉内腔的自动分割,并根据分割结果实现瘤区层片的自动定位。不同于 SymRG 算法,本文中提出的改进算法将解剖学先验知识加入生长准则中,包括单像素的灰度分布特性,已标记二维区域的灰度特征和几何特征等。实验结果显示,算法能很好地解决骨骼和血管粘连出现的欠分割。同时,基于分割结果的瘤区自动定位结果显示,本文算法能准确定位瘤区层片,为医生提供定量分析的参考,具有临床应用价值。

【参考文献】

- [1] Moll FL, Powell JT, Fraedrich G, et al. European Society for Vascular Surgery. Management of abdominal aortic aneurysms clinical practice guidelines of the European Society for Vascular Surgery [J]. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2011, 41: S1-S58.
- [2] Lindholt JS, Norman P. Screening for abdominal aortic aneurysm reduces overall mortality in men: A meta-analysis of the mid and long-term effects of screening for abdominal aortic aneurysms [J]. European Journal of Vascular and Endovascular Surgery, 2008, 36: 167-171.
- [3] Ernst CB. Abdominal aortic aneurysm [J]. 1993, 328(16): 1167-1172.
- [4] Conway KP, Byrne J, Townsend M, et al. Prognosis of patients turned down for conventional abdominal aortic aneurysm repair in the endovascular and sonographic era: Szilagyi revisited [J]. Journal of Vascular Surgery, 2001, 33(4): 7522-7571.
- [5] Wan SY, Higgins WE. Symmetric region growing [J]. Image Processing, 2003, 12(9): 1007-1015.
- [6] Xiang JB, Liu QY. Diagnosis of abdominal aortic aneurysm with mural thrombus by echography: a case report [J]. Chin J Med Imaging Technology, 2001, 17(10): 933.
- [7] 王胜军, 王梦然, 黄艳, 等. 基于特征和层间相关性的 CTA 体数据自动去骨算法 [J]. 中国生物医学工程学报, 2010, 6: 818-823.
- Wang SJ, Wang MR, Huang Y, et al. Automatic bone removal based on feature and interlayer correlation from CTA volume data [J]. Chinese Journal of Biomedical Engineering, 2010(6): 818-823.
- [8] 张萍, 单筱筱, 巴成贺. 主动脉图像分割的研究与实现 [C]. 第十二届中国电视学与图像分析学术年会论文集, 2008.
- Zhang P, San XY, Ba HC. Research and application of aortic image segmentation [C]. The 12th Chinese Stereology and Image Analysis Conference, 2008.
- [9] Ye Z, Lin ZM, Lu CC. A fast 3D region growing approach for CT angiography applications [C]. Medical Imaging, 2004: 1605-1657.
- [10] Rolf A, Leanne B. Seeded Region Growing [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1994, 16(6): 641-647.