

心脏核磁共振图像左心室底层组织分割方法

徐礼胜^{1,2}, 郭增智¹, 覃文军², 王璐³
(1. 东北大学 中荷生物医学与信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学 医学影像计算教育部重点实验室, 辽宁 沈阳 110169; 3. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169)

摘 要: 提出了一种基于局部灰度聚类(LIC)模型和分水岭算法的心脏核磁共振成像(MRI)图像左心室底层组织分割方法. 首先,使用 LIC 模型对图像进行初步分割,提取出图像中的组织和器官;然后,使用分水岭算法弥补粘连的不同组织或器官之间缺失的边界,将其分开,人工选取种子点进行区域生长初步提取左心室;最后,利用左心室形状特征的先验知识判断提取的左心室中是否包含主动脉,若包含则去除主动脉,得到精确的左心室分割结果. 实验结果表明,该方法能有效去除心脏 MRI 图像上左心室底层存在的弱边界和边缘泄露的影响,得到准确的左心室底层组织分割结果.

关 键 词: 心脏核磁共振图像;左心室;图像分割方法;LIC 模型;分水岭算法
中图分类号: TP 391 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2017)10-1383-05

Segmentation Method of Base of Left Ventricle in Cardiac Magnetic Resonance Images

XU Li-sheng^{1,2}, GUO Zeng-zhi¹, TAN Wen-jun², WANG Lu³
(1. School of Sino-Dutch Biomedical & Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. Key Laboratory of Medical Image Computing, Ministry of Education, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 3. School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China. Corresponding author: XU Li-sheng, professor, E-mail: xuls@bmie.neu.edu.cn)

Abstract: A novel method was proposed for segmenting the base of the left ventricle in cardiac magnetic resonance imaging (MRI) images based on local intensity clustering (LIC) model and watershed algorithm. First, the cardiac MRI images were segmented by LIC model to detect the tissues and organs. Then, the connected tissues and organs were separated by using watershed algorithm to make up for the missing edges. The seed points were artificially selected to carry growing for the preliminary extraction of left ventricle. Finally, whether the preliminary extraction of the left ventricle contains the aorta will be judged by priori knowledge of the shape features of the left ventricle, if the preliminary extraction of the left ventricle contain the aorta, the effect of the missing edge caused by the aorta will be removed to get an accurate segmentation result of the base of left ventricular. Experimental results demonstrated that the proposed method can effectively remove the effect of weak edges and edge leakage of the base of the left ventricle in MRI images to obtain an accurate segmentation result of the base of left ventricular.

Key words: cardiac magnetic resonance images; left ventricle; image segmentation method; LIC model; watershed algorithm

心血管疾病早期定量诊断对延长人类预期寿命和提高生存质量十分重要. 在众多的成像技术中,核磁共振成像 MRI (magnetic resonance imaging) 是心脏功能评估和疾病诊断的重要工具与辅助手段. 但在左心室成像过程中,血液流动形成的伪影会造成图像灰度不均;肺部呼吸、乳突肌

及其他因素则会导致目标边界不清晰,甚至断裂;左心室与主动脉及其他周围组织和器官灰度相近会导致弱边界或者边界泄露的情况^[1-2]. 心脏 MRI 图像上左心室底层(二尖瓣和主动脉瓣的位置)的弱边界及边界泄露的情况尤其严重,导致分割难度较大. 而主动脉是左心室血液流动的进出口,左心室底层的分割对获得左心室的各种参数及对左心室进行三维重建都尤为重要.

为了解决左心室分割问题,学者们提出了多种图像分割方法^[3-13]. 这些算法对左心室的分割都取得了较好的效果,但是对左心室底层的分割仍未达到理想的效果. 其中,MICO 算法^[7]具有很好的鲁棒性,对弱边缘的分割效果比较好,心脏 MRI 图像中左心室底层的弱边缘较多,MICO 算法对左心室的分割结果比较理想,故本文将选用此算法与本文所提算法进行对比.

针对上述情况,本文将 LIC 模型^[5]与分水岭算法^[14]进行结合,首先使用 LIC 模型对图像进行分割,去除掉灰度不均匀和噪声的影响,将图像中的组织和器官分离出来,再使用分水岭算法将相粘连的组织和器官分开,对 LIC 模型未能处理的弱边界造成的边界缺失或不存在边界的情况进行处理,最后用左心室形状特征的先验知识将相连的主动脉与左心室分隔开,从而得到理想的左心室分割结果.

1 LIC 模型

Li 等^[5]提出了 LIC 模型,通过在图像的局部邻域内使用局部灰度聚类准则,得到一种局部区域型模型,能够很好地克服灰度不均匀的影响. 其具体的能量泛函定义为

$$E=\int(\int K(y-x)(I(x)-b(y)c_1)^2H(\varphi(x))dx)dy + \int(\int K(y-x)(I(x)-b(y)c_2)^2(1-H(\varphi(x)))dx)dy. \tag{1}$$

式中: $K(y-x)$ 表示高斯内核函数; $I(x)$ 表示图像; $b(y)$ 为逼近图像的灰度不均匀特征; $b(y)c_1$ 和 $b(y)c_2$ 可以用来描述图像的局部灰度聚类中心; H 代表 Heaviside 函数.

LIC 模型可以很好地克服图像噪声和灰度不均匀的影响,将心脏 MRI 图像中的组织和器官分割出来,但是无法处理左心室底层组织边界模糊或者边界缺失的情况.

2 融合 LIC 模型和分水岭算法的分割方法

为了解决 LIC 模型无法处理的边界模糊或者边界缺失情况的问题,本文使用分水岭算法弥补其缺点. 分水岭算法可以根据各个组织和器官已有边界对其缺失的边界进行补全,从而形成闭合的轮廓边缘线,将不同的组织和器官分开. 但由于主动脉与左心室相连太过紧密且主动脉相对左心室来说面积太小,分水岭算法也无法将其识别出来,需要通过左心室形状特征的先验知识来进行判断和分割. 本文选取了 5 个病人的 400 张心脏 MRI 图像分析左心室与主动脉相连时左心室的形状特征和左心室不与主动脉相连时左心室的形状特征,获得相关先验知识. 基本过程如图 1 所示.

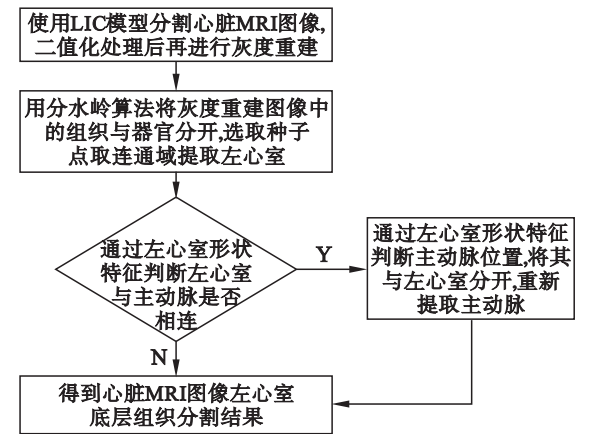


图 1 分割方法示意图
Fig. 1 Schematic of segmentation method

融合 LIC 模型和分水岭算法分割方法的具体步骤如下.

步骤 1 首先使用 LIC 模型对左心室底层 MRI 图像进行分割,设置一个初始轮廓,通过对式(1)能量泛函的迭代求最优解,使其能量最小化,从而不断修正轮廓线和偏移场,去除偏移场造成的灰度不均匀及噪声的影响,并用轮廓线将心脏 MRI 图像中组织和器官划分出来;然后对分割后的图像进行二值化处理,轮廓线内阈值为 1,轮廓线外阈值为 0;最后通过欧氏距离变换^[15]进行灰度重建,使轮廓线内组织和器官的灰度中心最低并向边缘递增,从而在不同的组织和器官内形成灰度极小值区域.

步骤 2 使用分水岭算法对灰度重建的图像进行分割时,不同组织和器官内的极小值区域逐

渐向外扩展,最终在不同的组织和器官之间筑建分水岭,将相互粘连的不同组织和器官分割开,从而解决弱边界和边界不存在的问题.

步骤 3 通过手动选取种子点进行区域生长提取左心室,计算出左心室质心坐标并计算出左心室轮廓质心到各边缘点的距离 P_i ,找出距离最大值 M_a 和距离最小值 M_i ,并根据距离最大值和距离最小值分析和判断左心室是否与主动脉相连:如果 $M_a < 30$ 像素且 $(M_a - M_i) / M_a > 0.50$,或者 $M_a > 30$ 像素且 $(M_a - M_i) / M_a > 0.38$,则左心室与主动脉相连,需要进一步处理,否则提取出的左心室轮廓即作为最终结果(本步骤中的判断条件均来自于先验知识).

步骤 4 找出左心室轮廓中质心到边缘点的所有满足 $(P_i - M_i) / (M_a - M_i) < 0.3$ 的极小值点,若距离最大值 M_a 的位置在两个相邻的极小值点之间,则以这两个极小值点为分割点作直线将左心室轮廓与主动脉轮廓分开,重新确定左心室的质心,在两个分割点与该质心相连所成角度的中线方向取两个分割点到质心的距离平均值作第三个分割点,以这三个分割点作曲线补全左心室轮廓,得到最终的左心室轮廓(本步骤中的判断条件均来自于先验知识).

3 实验结果分析

实验中使用的心脏 MRI 图像来源于 MICCAI 2009 公开数据库^[16],该数据库被国内外的学者广泛应用,对心脏 MRI 图像左心室进行研究.其中,图像的分辨率为 256×256 .实验环境为 Matlab 2015a, CPU2.60 GHz, RAM 3.0 GB, Windows7 Professional.

3.1 对比实验

图 2 为 LIC 模型、MICO 算法和本文所提算法对分别来自 9 个病人的每人 1 张具有代表性的心脏 MRI 图像左心室底层的分割结果及手工分割结果.其中第 3,4,7,8 张图像为心脏收缩期图像,第 1,2,5,6,9 张图像为心脏舒张期图像.

由图 2a 可知,LIC 模型可以克服图像噪声和灰度不均匀的影响,将左心室及与其相粘连的组织分割出来,但是无法处理边界模糊或者边界缺失的情况,导致分割结果不理想.

由图 2b 可知,MICO 算法不仅可以克服图像噪声和灰度不均匀的影响,对弱边界的处理效果也比较好的,但是无法处理边界缺失的情况,无法去除主动脉对左心室分割结果的影响.

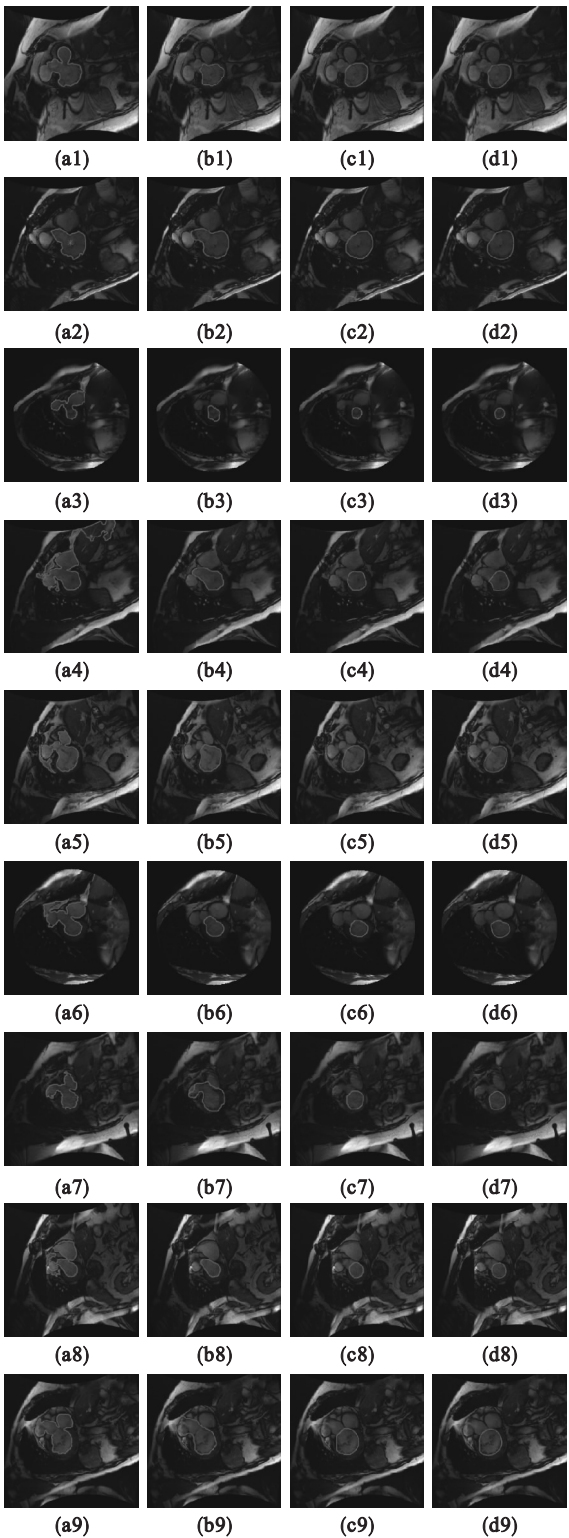


图 2 三种方法和手工分割的分割结果
Fig. 2 Segmentation results of three methods and manual segmentation

(a)—LIC 模型;(b)—MICO 算法;
(c)—本文方法;(d)—手工分割.

由图 2c 可知,本文所提出方法可以很好地克服心脏 MRI 图像上存在的各种问题,尤其是可以很好地去除主动脉对左心室底层分割的影响,从而得到准确的左心室分割结果.

3.2 定量分析

采用平均绝对距离 MAD^[6]、最大绝对距离 MAXD 和 Dice 系数 DM^[7]度量不同算法之间的性能差异.用 MAD 和 MAXD 度量自动分割结果与数据库中给定的手工分割结果之间的差异:

$$MAD(S,M)=\frac{1}{2}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^nd(s_i,M)+\frac{1}{k}\sum_{j=1}^nd(m_j,S)\right),$$
(3)

$$MAXD(S,M)=MAX\left(\frac{1}{2}(d(s_i,M)+d(m_j,S))\right).$$
(4)

式中: $d(s_i,M)=\min\|s_i-m_j\|$; $d(m_j,S)=\min\|m_j-s_i\|$, $S=\{s_1,s_2,\cdots,s_n\}$ 为自动分割的轮廓上的点, $M=\{m_1,m_2,\cdots,m_n\}$ 为手工分割的轮廓上的点. MAD 值越小,表明自动分割结果与手工分割结果的平均差异越小;MAXD 值越小,表明自动分割结果与手工分割结果的最大差异越小.

用 DM 测量自动分割结果与手工分割结果的相似度:

$$DM=\frac{2A_{am}}{A_a+A_m}.$$
(5)

式中: A_a 为自动分割结果的区域面积; A_m 为手工分割结果的区域面积; $A_{am}=A_a\cap A_m$ 为二者的共有区域. DM 的值在 0~1 之间,DM 值越接近 1,表示自动分割结果与手工分割结果的相似度越高.

分别采用 LIC 模型、MICO 算法与本文所提方法对 9 个人的具有代表性的 21 张心脏 MRI 图像左心室底层进行了分割,并采用上述评估方法对分割结果进行了评估,其平均值和标准差如表 1 所示.

表 1 本文方法与 MICO 算法和 LIC 模型性能对比
Table 1 Performance comparison of the proposed method, MICO method and LIC model

算法	MAD/像素	MAXD/像素	DM/%
LIC 模型	17.80±11.03	61.97±32.71	0.31±0.24
MICO 算法	3.21±2.32	13.01±11.91	0.71±0.17
本文方法	0.89±0.17	2.73±0.85	0.92±0.03

由表 1 可知:本文所提方法的 MAD 平均值为 0.89,标准差为 0.17;MAXD 平均值为 2.73,标准差为 0.85,小于 LIC 模型和 MICO 算法的 MAD 与 MAXD 的平均值和标准差.表明本文方法的分割结果与手工分割结果差异极小,且鲁棒性强;本文方法的 DM 平均值为 0.92,比 LIC 模型和 MICO 算法的 DM 的平均值更接近 1,且标准差为 0.03,小于 LIC 模型和 MICO 算法的 DM 的标准差,表明本文方法的分割结果与手工分割

结果相似度更高.

4 结 论

1) 将 LIC 模型和分水岭算法进行结合,解决了心脏 MRI 图像左心室底层存在的噪声、灰度不均匀、弱边界及边界缺失的问题,可粗提取出左心室轮廓.

2) 选取了 5 个病人的 400 张心脏 MRI 图像分析左心室与主动脉相连时左心室的形状特征和左心室不与主动脉相连时左心室的形状特征,获得相关先验知识.

3) 通过左心室形状特征的先验知识,判断左心室与主动脉是否相连,并找到主动脉的位置将其与左心室分开,提高左心室分割精度.

4) 本文方法能有效地解决分割心脏左心室底层 MRI 图像存在的各种问题,得到准确的左心室底层分割结果.

参考文献:

[1] Petitjean C,Dacher J N. A review of segmentation methods in short axis cardiac MR images[J]. *Medical Image Analysis*, 2011, 15(2):169-184.

[2] Hu H, Liu H, Gao Z, et al. Hybrid segmentation of left ventricle in cardiac MRI using Gaussian-mixture model and region restricted dynamic programming [J]. *Magnetic Resonance Imaging*,2013,31(4):575-584.

[3] 周寿军,梁斌,陈武凡. 心脏序列图像运动估计新方法:基于广义模糊梯度矢量流的形变曲线运动估计与跟踪[J]. 计算机学报,2003,26(11):1470-1478.

(Zhou Shou-jun,Liang Bin,Chen Wu-fan. A new approach to the motion estimation of cardiac image sequences; active coutour motion tracking based on the generalized fuzzy gradient vector flow [J]. *Chinese Journal of Computers*, 2003,26(11):1470-1478.)

[4] 王元全,贾云得. 一种新的心脏核磁共振图像分割方法[J]. 计算机学报,2007,30(1):129-136.

(Wang Yuan-quan, Jia Yun-de. A novel approach for segmentation of cardiac magnetic resonance images [J]. *Chinese Journal of Computers*,2007,30(1):129-136.)

[5] Li C M,Huang R, Ding Z, et al. A level set method for image segmentation in the presence of intensity inhomogeneities with application to MRI [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(7): 2007 - 2016.

[6] 刘利雄,马忠梅,赵恒博,等. 一种基于主动轮廓模型的心脏核磁共振图像分割方法[J]. 计算机学报, 2012,35(1): 146-153.

(Liu Li-xiong, Ma Zhong-mei, Zhao Heng-bo, et al. A method for segmenting cardiac magnetic resonance images using active contours [J]. *Chinese Journal of Computers*,

