

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902879

结合区域生长与水平集算法的宫颈癌图像分割*

刘莹¹ 李筠¹ 杨海马¹ 刘瑾² 陈嘉慈¹ 付功³(1. 上海理工大学 光电信息计算机工程学院 上海 200093; 2. 上海工程技术大学
电子工程学院 上海 201620; 3. 上海市第一妇婴保健院 上海 201204)

摘要:针对宫颈图像病灶分割时的初始轮廓敏感问题和图像灰度不明显问题,提出一种新的改进的水平集算法。首先利用各向异性滤波算法等进行图像的去噪;然后在二值图像上使用区域生长算法,提取出粗糙的宫颈病灶区域;最后建立一种基于新的符号压力函数的水平集模型,对初始分割进行细化。该算法可以将局部信息与全局信息结合起来并自动分配局部信息与全局信息的比例。以3种统计指标为标准对该方法进行了评估,该方法在准确性、敏感性和特异性上可分别达到81.11%、63.97%和78.64%,分别比传统水平集算法高30.69%、15.15%和4.37%。因而,这种改进的水平集算法在实际应用中有一定的价值和意义。

关键词: 宫颈癌;区域生长;分割;水平集模型

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Cervical cancer image segmentation based on region growth and level set algorithm

Liu Ying¹ Li Jun¹ Yang Haima¹ Liu Jin² Chen Jiacy¹ Fu Le³

(1. School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 3. Shanghai First Maternal and Infant Health Hospital, Shanghai 201204, China)

Abstract: A new improved level set algorithm is proposed to solve the problem of initial contour sensitivity in cervical image segmentation and the problem of unclear image gray level. Firstly, the image is denoised by anisotropic filtering algorithm. Then the region growth algorithm was used on the binary image to extract the rough cervical lesion area. Finally, a level set model based on the new symbolic pressure function is established to refine the initial segmentation. The algorithm can combine local information with global information and automatically allocate the proportion between them. The accuracy, sensitivity and specificity of this method can reach 81.11%, 63.97% and 78.64% respectively, which are 30.69%, 15.15% and 4.37% higher than the traditional level set algorithm. Therefore, this improved level set algorithm has some value and significance in practical application.

Keywords: cervical cancer; CT images; segmentation; level set model

0 引言

根据世界卫生组织报告显示,宫颈癌是世界上最致命的癌症之一,每年有超过27万人因患宫颈癌死亡,其中85%发生在发展中国家,而缺乏筛查是造成子宫颈癌

负担过重的一个重要因素^[1]。由于宫颈癌从癌前病变发展到宫颈癌需要5~8年以上而且病情发展具有可逆性^[2],因此,及时的、准确的筛查在治愈宫颈癌中起着重要的作用。近年来,图像分割的算法有很多。1979年,为将图像分割为背景和目标两部分,日本学者大津提出了最大类间方差法。该方法指出背景和目标之间的类间

收稿日期:2019-12-30 Received Date: 2019-12-30

* 基金项目:上海理工大学医工交叉项目(USST-GD40)、上海市自然科学基金(17ZR1443500)、上海航天科技创新基金(SAST2017-062)资助项目

方差越大,图像被正确分割的概率越大^[3]。但是,当目标与背景的灰度级差别不是特别大时,该方法效果并不是最好的。在图像边缘提取方面,Roberts、Sobel、Prewitt、Canny等算子的应用也十分广泛,这些算子虽然有一定的效果,但是对噪声干扰十分敏感^[4]。为了分割灰度不均匀的图像,提出了一种基于局部区域信息的局部二值拟合模型(local binary fitting, LBF)模型^[5]。该模型可以有效地分割亮度不均匀的图像,但对轮廓的初始化非常敏感。Zhang等^[6]提出了选择性二进制和高斯滤波正则化水平集(SBGFRLS)模型,该模型对初始化轮廓不敏感,但它只适用于图像中目标区域和背景区域灰度明显的情况。

本文针对上述问题,首先对图像进行有效地滤波与增强,在驱除噪声的基础上有效地保留了边缘,并采用区域生长算法将图像进行初步的粗略分割,为水平集算法

提供了一个良好的基础。为了解决轮廓初始化敏感的问题,本文结合SBGFRLS模型的优点构造了一个新的符号压力函数(signed pressure function, SPF),利用改进的水平集模型算法进行分割细化,获得了较好的分割结果。

1 图像预处理

本文使用各向异性滤波算法对原始核磁共振图像(magnetic resonance imaging, MRI)进行滤波,可以在保留宫颈血管、宫颈边界等结构的同时降噪。此外,使用高斯平滑后的梯度大小代替原始图像的梯度大小以减小强噪声的影响,加快扩散速度^[7]。采用一种基于图像梯度信息的二值化方法^[8],在不需要人为设置参数的情况下,自适应地选择最优阈值,实现二值化处理。原图、各向异性滤波图以及二值化结果如图1所示。

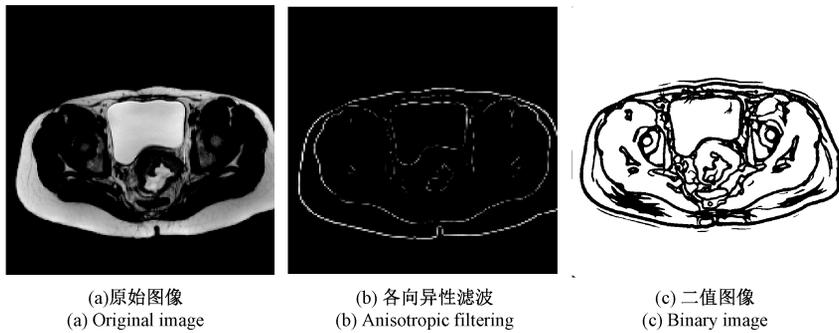


图1 图像预处理

Fig. 1 Image preprocessing

2 改进水平集算法

2.1 区域生长算法

区域生长的基本思想是将具有相似性质的像素集合起来构成区域,先对需要分割的区域找一个像素作为生长起点,然后将种子像素周围邻域中与种子像素有相同或相似性质的像素合并到它所在的区域中,这些像素根据某种事先确定的生长或相似准则来判定^[9]。通过区域生长,可以分割整个宫颈病变区域的大致轮廓,为后续的水平集分割提供一个轮廓基础^[10],其结果如图2所示。

2.2 水平集算法(level set method, LSM)

水平集算法可以有效地描述曲率相关速率演化的曲线,不基于梯度变化,在处理具有弱边缘特征的图像时有着天然的优势^[11]。目前常用的算法有CV水平集模型,该方法是基于Mumford-Shah模型的水平集分割算法,使用一个能量最小化函数寻找最优分割,从而使分割图像与原图像之间的差异最小^[12]。水平集模型是平滑和细

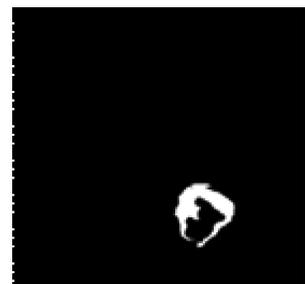


图2 病变区域

Fig. 2 Lesion area

化初始分割的一个很好的选择,它可以处理宫颈的拓扑结构。其中,基于区域的模型具有良好的抗噪声性能和处理弱边缘的能力^[13],与边缘模型相比,它对轮廓初始化不敏感,可以为曲线的演化提供良好的条件。但传统的基于区域的LSM方法往往不能很好地检测宫颈病灶边界,导致过度分割。为了分割灰度不均匀的图像,提出了一种基于局部区域信息的LBF模型^[5],该模型的基本思想是通过引入核函数来定义能量函数,该能量函数定义如下。

$$E^{LBF} = \lambda_1 \int_{\Omega} \left[\int_{in(C)} K_{\sigma}(x-y) |I(y) - f_1(x)|^2 dy \right] dx + \lambda_2 \int_{\Omega} \left[\int_{in(C)} K_{\sigma}(x-y) |I(y) - f_2(x)|^2 dy \right] dx \quad (1)$$

其中:

$$f_1(x) = \frac{\int_{\Omega} K_{\sigma}(y-x) I(y) H_{\varepsilon}(\phi) dy}{\int_{\Omega} K_{\sigma}(y-x) H_{\varepsilon}(\phi) dy} \quad (2)$$

$$f_2(x) = \frac{\int_{\Omega} K_{\sigma}(y-x) I(y) (1 - H_{\varepsilon}(\phi)) dy}{\int_{\Omega} K_{\sigma}(y-x) (1 - H_{\varepsilon}(\phi)) dy} \quad (3)$$

与 CV 模型中的 c_1 和 c_2 不同, f_1 和 f_2 分别为轮廓内外的局部平均亮度, 可以看作是内核窗口中轮廓内外图像亮度的加权平均值。因此, LBF 模型可以有效地分割亮度不均匀的图像。然而, LBF 模型对轮廓的初始化非常敏感。Zhang 等^[6]提出了 SBFRLS (选择性二进制和高斯滤波正则化水平集) 模型, 该模型具有一种新的基于区域的符号压力函数, 表示为:

$$spf(I(x)) = \frac{I(x) - (c_1 + c_2)/2}{\max(|I(x) - (c_1 + c_2)/2|)} \quad (4)$$

式中: c_1 和 c_2 分别为等高线内外平均强度的 2 个常数, 可由 CV 模型导出^[14]。

2.3 构建新的符号压力函数

CV 模型对初始化轮廓不敏感, 计算量小, 迭代速度快。但是, 它只适用于图像中目标区域和背景区域灰度明显的情况^[15]。因此, 为了解决轮廓初始化敏感的问题, 结合 SBFRLS 模型的优点, 本文选择构造一个新的符号压力函数。首先, 本文的新 SPF 结合了局部信息和全局信息来控制曲线在宫颈边界处的演化。与经典 CV 模型一样, 本文采用等高线 C 将图形 I 划分为内部和外部两部分, 分别表示为 Ω_1 和 Ω_2 。本文利用图像的全局灰度分布函数构造一种新的 SPF 函数, 区域的灰度密度函数由 p_1 和 p_2 表示。其中:

$$p_1(I, u_1, \sigma_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_1} e^{-\frac{(1-u_1)^2}{2\sigma_1^2}} \quad (5)$$

$$p_2(I, u_2, \sigma_2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_2} e^{-\frac{(1-u_2)^2}{2\sigma_2^2}} \quad (6)$$

假设 $\Omega_1 = \{\phi > 0\}$, $\Omega_2 = \{\phi < 0\}$, 则对应的轮廓 C 可以用 0 水平集 $\{\phi = 0\}$ 表示。 $u_1, u_2, \sigma_1^2, \sigma_2^2$ 可以通过以下公式计算:

$$u_1 = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) H(\phi) d\Omega}{\int_{\Omega} H(\phi) d\Omega} \quad (7)$$

$$u_2 = \frac{\int_{\Omega} I(x, y) (1 - H(\phi)) d\Omega}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi)) d\Omega} \quad (8)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{\int_{\Omega} (I(x, y) - u_1)^2 H(\phi) d\Omega}{\int_{\Omega} H(\phi) d\Omega} \quad (9)$$

$$\sigma_2^2 = \frac{\int_{\Omega} (I(x, y) - u_2)^2 (1 - H(\phi)) d\Omega}{\int_{\Omega} (1 - H(\phi)) d\Omega} \quad (10)$$

结合上述信息, 为了减少对 w 的手动设置, 本研究提出一种基于图像梯度信息的自适应方法。此符号压力函数和 w 可以定义为:

$$spf^{new} = w \cdot \frac{F^{\varepsilon}(I, \phi)}{\max |F^{\varepsilon}(I, \phi)|} + (1 - w) \cdot \frac{F^l(I, \phi)}{\max |F^l(I, \phi)|} \quad (11)$$

$$w = \varphi \log(1 + g) \quad (12)$$

其中, $0 \leq w \leq 1$ 。

$$F^{\varepsilon}(I, \phi) = I - (p_1 H_{\varepsilon}(\phi) + p_2 (1 - H_{\varepsilon}(\phi))) \quad (13)$$

$$F^l(I, \phi) = I - (f_1 H_{\varepsilon}(\phi) + f_2 (1 - H_{\varepsilon}(\phi))) \quad (14)$$

可以看出, $F^{\varepsilon}(I, \phi)$ 是包含图像全部信息的全局变量, $F^l(I, \phi)$ 是只包含图像局部信息的局部变量。参数 ϕ 通常设置为 0.01, 并保持稳定。

利用式 (11) 的 SPF 函数代替 SBFRLS 模型的水平集函数模型, 即本文提出的新模型的水平集方程。

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = spf^{new}(I(x)) \alpha |\nabla \phi| \quad (15)$$

本文构造了一个新的符号压力函数。它的范围为 $[-1, 1]$, 并且与目标的内外符号相反。当初始化曲线放置在目标区域外时, 可以自动收缩; 当初始化曲线放置在目标区域内时, 可以自动展开, 继承了 CV 模型和 LBF 模型 p_1, p_2 基于全局信息和 f_1, f_2 基于局部信息的优点^[16-18]。使用改进后的水平集算法, 对同一图片进行分割细化, 得到分割的病灶区域如图 3 所示。由图 3 可见, 以区域生长的初始轮廓为基础, 改进后的水平集分割算法将宫颈病灶区域进一步分割细化, 得到了更加细致准确的轮廓。

将本文提出的改进水平集分割结果, 与未使用水平集分割算法和传统水平集分割算法的分割结果进行对比, 如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 未使用水平集分割算法检测出的边缘尽管能够识别宫颈癌病灶的大致轮廓, 但存在许多虚假边缘; 传统水平集分割算法总体分割效果良好, 但存在过度分割的现象; 改进后的水平集分割算法得到的分割结果较清晰且完整。

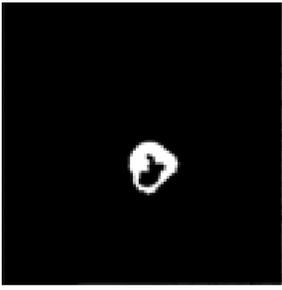
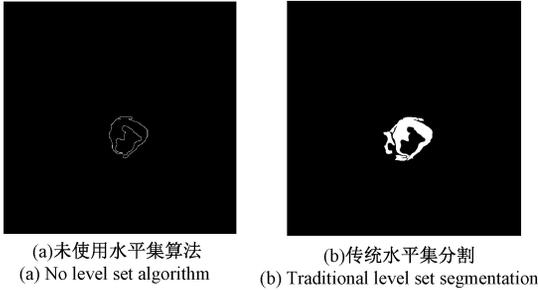


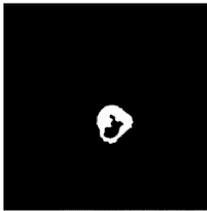
图 3 水平集分割

Fig. 3 Level set segmentation



(a)未使用水平集算法
(a) No level set algorithm

(b)传统水平集分割
(b) Traditional level set segmentation



(c)改进水平集分割
(c) Improved level set segmentation

图 4 分割结果对比

Fig. 4 Comparison of segmentation results

3 实验结果与分析

3.1 实验数据

本文实验数据来自上海市第一妇婴保健院,由 20 套均为 MRI 的 T2 序列图像组成,图片为 DICOM 格式。由 2 名资深医生对数据集中的病变区域进行标注作为本研究的对比标准,对于意见不一的情况则第 3 位医生加入,3 人进行再次校对。算法采用 MATLAB 2017a 编程实现。

3.2 评价标准

对于宫颈癌图像分割算法的评估,本文采用准确性、敏感性和特异性 3 个指标^[19-20],即:

$$\begin{aligned}
 accuracy &= \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \\
 sensitivity &= \frac{TP}{TP + FN} \\
 specificity &= \frac{TN}{TN + FP}
 \end{aligned} \tag{16}$$

式中: TP 和 TN 分别是正确分割为宫颈癌和正常宫颈的数量; FP 和 FN 分别是错误分割为宫颈癌和正常宫颈的数量。

此外,本文分别在同一数据集上使用无水平集分割(A)、传统水平集分割(B)和本文的水平集分割(C) 3 种分割方法对以上 3 个指标做了对比。另外,使用本文提出的改进后的水平集分割算法将以上 3 个特性做了单独对比。针对 3 种评价指标,对 A、B、C 三种方法的最大值、最小值、平均值以及中位数做了统计,统计结果分别如表 1~3 所示。

表 1 准确性指标

Table 1 Accuracy index

分割方法	最大值	最小值	平均值	中位数
A	0.474 7	0.248 1	0.364 5	0.389 9
B	0.641 2	0.392 7	0.504 2	0.513 6
C	0.922 9	0.673 0	0.811 1	0.811 7

表 2 敏感性指标

Table 2 Sensitivity index

分割方法	最大值	最小值	平均值	中位数
A	0.726 4	0.407 2	0.577 3	0.578 0
B	0.693 5	0.362 8	0.488 2	0.471 8
C	0.866 5	0.514 1	0.693 7	0.674 9

表 3 特异性指标

Table 3 Specificity index

分割方法	最大值	最小值	平均值	中位数
A	0.856 1	0.330 6	0.569 8	0.554 0
B	0.929 1	0.587 7	0.742 7	0.749 2
C	0.977 3	0.527 3	0.786 4	0.787 6

此外,针对本文提出的水平集分割算法,将准确性、敏感性和特异性做了统计,以上 3 个指标的最大值、最小值、平均值以及中位数如表 4 所示。

表 4 指标统计

Table 4 Index statistics

统计指标	最大值	最小值	平均值	中位数
准确性	0.922 9	0.673 0	0.811 1	0.811 7
敏感性	0.866 5	0.514 1	0.693 7	0.674 9
特异性	0.977 3	0.527 3	0.786 4	0.787 6

3.3 结果分析

各指标分析图如图 5 所示。由表 1~4 和图 5 可以看出,本文提出的基于改进水平集的分割算法在分割宫颈癌图像的病灶时,其准确性、敏感性、特异性都优于传统的水平集分割算法,更优于未使用水平集分割算法的情况。并且本方法的优势在于其准确性较高,平均值可达到 81.11%。而使用传统的水平集分割算法只可达到 50.42%。使用改进后的水平集分割算法分别将准确性提高了 30.69%。

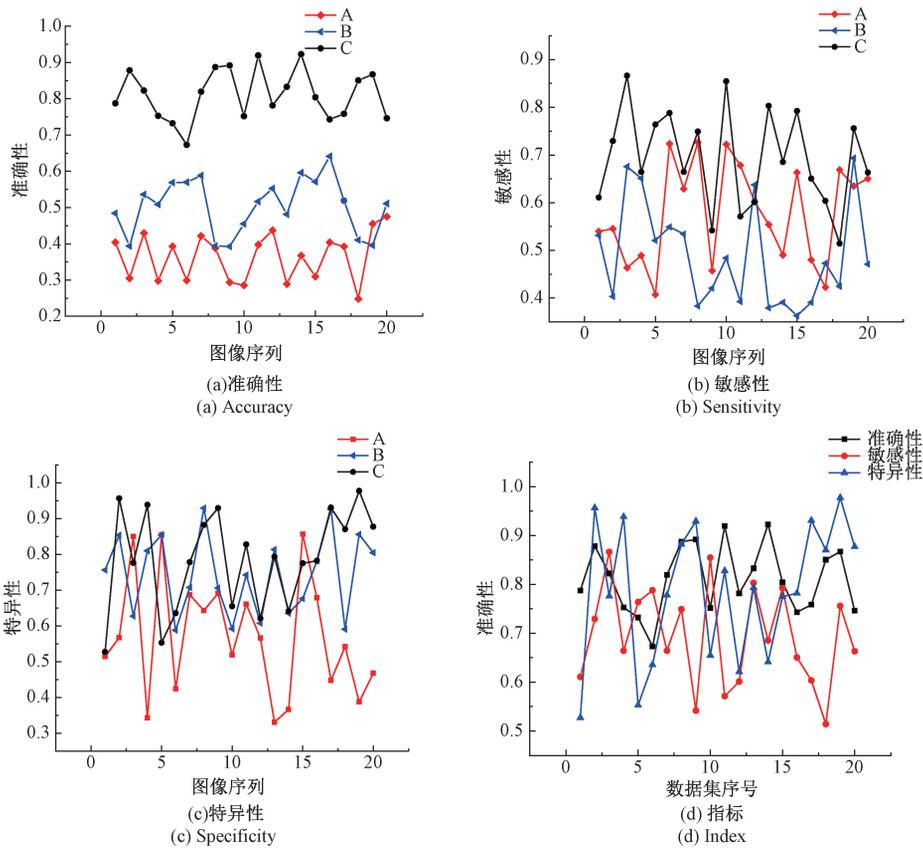


图 5 指标分析

Fig. 5 Index analysis

4 结 论

本文提出的总体方法可以概括为一种三阶段半自动宫颈图像处理方法,该方法有效地抑制了噪声,增强了边缘,并得到了较为清晰的宫颈病灶。由实验结果得出的各项指标可以看出,本文提出的改进方法分割的准确性、敏感性、特异性较高。本文所使用的图像数量还不够大,因而可能对实验结果产生了一定的影响。实验过程中,程序对病灶的分割速度不够快,在后期的研究中可以考虑使用高性能的 CPU 或者精简算法以降低其时间复杂度。

参考文献

[1] SAJEENA T A, JEREESH A S. Automated cervical cancer detection through RGVF segmentation and SVM classification [C]. 2015 International Conference On Computing and Network Communications (COCONET), 2015:663-669.
 [2] 贾超颖,马伟红,王鹤. 稳定表达人乳头瘤病毒 58 型 (HPV58)E6E7 融合基因的人宫颈癌细胞株 C33A 的构建及验证 [J]. 生物医学工程学杂志,2017,34(4):

578-584.

JIA CH Y, MA W H, WANG H. Construction and validation of human cervical cancer cell line C33A with stable expression of human papillomavirus type 58 (HPV58) E6E7 fusion gene [J]. Journal of Biomedical Engineering, 2017,34 (4) :578-584.

[3] 蔡玉芳,贾琳琳,王珏,等. 基于投影图像特征匹配的微纳 CT 焦点漂移校正 [J]. 仪器仪表学报,2019,40(10) :38-46.

CAI Y F, JIA L L, WANG J, et al. Micro-nano CT focus shift correction based on projection image feature matching [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40 (10) : 38-46.

[4] 张艳玲,何鑫驰,李立. 基于最大类间方差与形态学的淋巴结图像分割 [J]. 计算机科学,2013,40(8) : 296-299.

ZHANG Y L, HE X CH, LI L. Segmentation of lymph node image based on maximum variance and morphology [J]. Computer Science, 2013, 40 (8) : 296-299.

[5] JAYA B K, KUMAR S S. Image registration based cervical cancer detection and segmentation using ANFIS

- classifier [J]. *Asian Pacific Journal of Cancer Prevention*, 2018, 19(11): 3203-3209.
- [6] ZHANG K, ZHANG L, SONG H, et al. Active contours with selective local or global segmentation: A new formulation and level set method[J]. *Image and Vision Computing*, 2010, 28(4):668-676.
- [7] 余锦华,汪源源. 基于各向异性扩散的图像降噪算法综述[J]. *电子测量与仪器学报*, 2011, 25(2): 105-116.
- YU J H, WANG Y Y. Review of image noise reduction algorithms based on anisotropic diffusion [J]. *Acta Electronica Metrology & Instrument*, 2011, 25(2): 105-116.
- [8] 曹新容,薛岚燕,林嘉雯,等. 基于匹配滤波和自动阈值的眼底血管分割方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2017,31(1):51-57.
- CAO X R, XUE L Y, LIN J W, et al. Method of retinal vascular segmentation based on matched filtering and automatic threshold [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2017, 31(1): 51-57.
- [9] 彭微. 基于区域生长算法的肝脏 CT 图像分割[J]. *医疗卫生装备*, 2014, 35(9): 49-50.
- PENG W. Liver CT image segmentation based on regional growth algorithm [J]. *Medical and Health Equipment*, 2014, 35(9): 49-50.
- [10] 宋笑语,李艳,张花齐,等. 基于改进区域生长算法的冠脉 OCT 图像钙化斑块分割[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(12): 66-70.
- SONG X Y, LI Y, ZHANG H Q, et al. Coronary OCT image calcification plaque segmentation based on improved regional growth algorithm [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(12): 66-70.
- [11] 刘君,余婷婷,石慧娟,等. 基于配准图像与水平集算法的宫颈荧光多生暗区分割方法[J]. *中国医学影像学杂志*, 2018, 26(9): 695-702.
- LIU J, YU T T, SHI H J, et al. Method of cervical fluorescent polymorph segmentation based on registration image and level set algorithm [J]. *Chinese Journal of Medical Imaging*, 2008, 26(9): 695-702.
- [12] CHAN T, VESE L. Active contours without edges [J]. *IEEE Trans Image Process*, 2000, 16(2): 266-277.
- [13] 刘小燕,吴鑫,孙伟,等. 基于形态学重建和 GMM 的球团颗粒图像分割[J]. *仪器仪表学报*, 2019, 40(3): 230-238.
- LIU X Y, WU X, SUN W, et al. Image segmentation of pellet particles based on morphological reconstruction and GMM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2019, 40(3): 230-238.
- [14] 张艳,张明路,蒋志宏,等. 基于改进的 LIP 算法低照度图像增强算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(11): 147-154.
- ZHANG Y, ZHANG M L, JIANG ZH H, et al. Image enhancement algorithm based on improved LIP algorithm for low illumination [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(11): 147-154.
- [15] 江韬,贾智伟,刘勇,等. 基于滤波器组与中心对称局部二值模式的内窥镜病灶图像检测方法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(2): 161-166.
- JIANG T, JIA ZH W, LIU Y, et al. Image detection of endoscopic lesions based on local binary model with central symmetry and filter bank [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(2): 161-166.
- [16] 段丁娜,张欢,邱陈辉,等. 基于活动轮廓模型的图像分割算法综述[J]. *中国生物医学工程学报*. 2015, 34(4): 445-454.
- DUAN D N, ZHANG H, QIU CH H, et al. Overview of image segmentation algorithms based on active contour model [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2015, 34(4): 445-454.
- [17] 陈尧,冒秋琴,陈果,等. 基于 Omega-K 算法的快速全聚焦超声成像研究[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(9): 128-134.
- CHEN Y, MAO Q Q, CHEN G, et al. Research on fast full-focus ultrasound imaging based on Omega-K algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(9): 128-134.
- [18] 闵永智,岳彪,马宏锋,等. 基于图像灰度梯度特征的钢轨表面缺陷检测[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(4): 220-229.
- MIN Y ZH, YUE B, MA H F, et al. Detection of rail surface defects based on image gray gradient features [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(4): 220-229.
- [19] REAL R, VARGAS J M. The probabilistic basis of Jaccard's index of similarity [J]. *Systematic Biology*, 1996, 45(3): 380-385.
- [20] 魏颖,徐陆,李翔,等. 结合多尺度圆形滤波与 MS 聚类的疑似结节分割[J]. *仪器仪表学报*, 2016, 37(1): 192-199.
- WEI Y, XU L, LI X, et al. Suspected nodule segmentation combined with multi-scale circular filtering and MS clustering [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2016, 37(1): 192-199.

作者简介



刘莹, 2017 年于华北水利水电大学获得学士学位, 现为上海理工大学硕士研究生, 主要研究方向为图像处理。

E-mail: 275910526@qq.com

Liu Ying received her B. Sc. degree from North China University of Water Resources and Electric Power in 2017. Now she is a M. Sc. candidate at Shanghai University of Science and Technology. Her main research interests include image processing.

李筠(通信作者), 2002 年于北京理工大学获得博士学位, 现为上海理工大学副教授, 主要研究方向为信号分析与处理、误差分析以及光电测量等。

E-mail: lijuny@usst.edu.cn

Li Jun (Corresponding author) received Ph. D. degree from Beijing Institute of Technology in 2002. She

is an associate professor at University of Shanghai for Science and Technology. Her main research interests include signal and information processing, error analysis, photoelectric measurement.



杨海马, 2015 年于中国科学院西安光学精密机械研究获得博士学位, 现为上海理工大学副教授, 主要研究方向为数字信号分析与处理、SPR 传感器机理与仿真、模式识别系统开发、符号滑块变结构控制。

E-mail: snowyhm@sina.com

Yang Haima received Ph. D. degree from Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science in 2015. He is an associate professor at University of Shanghai for Science and Technology. His main research interests include digital signal analysis and processing, SPR sensor mechanism and simulation, pattern recognition system development, symbolic slider variable structure control.

