



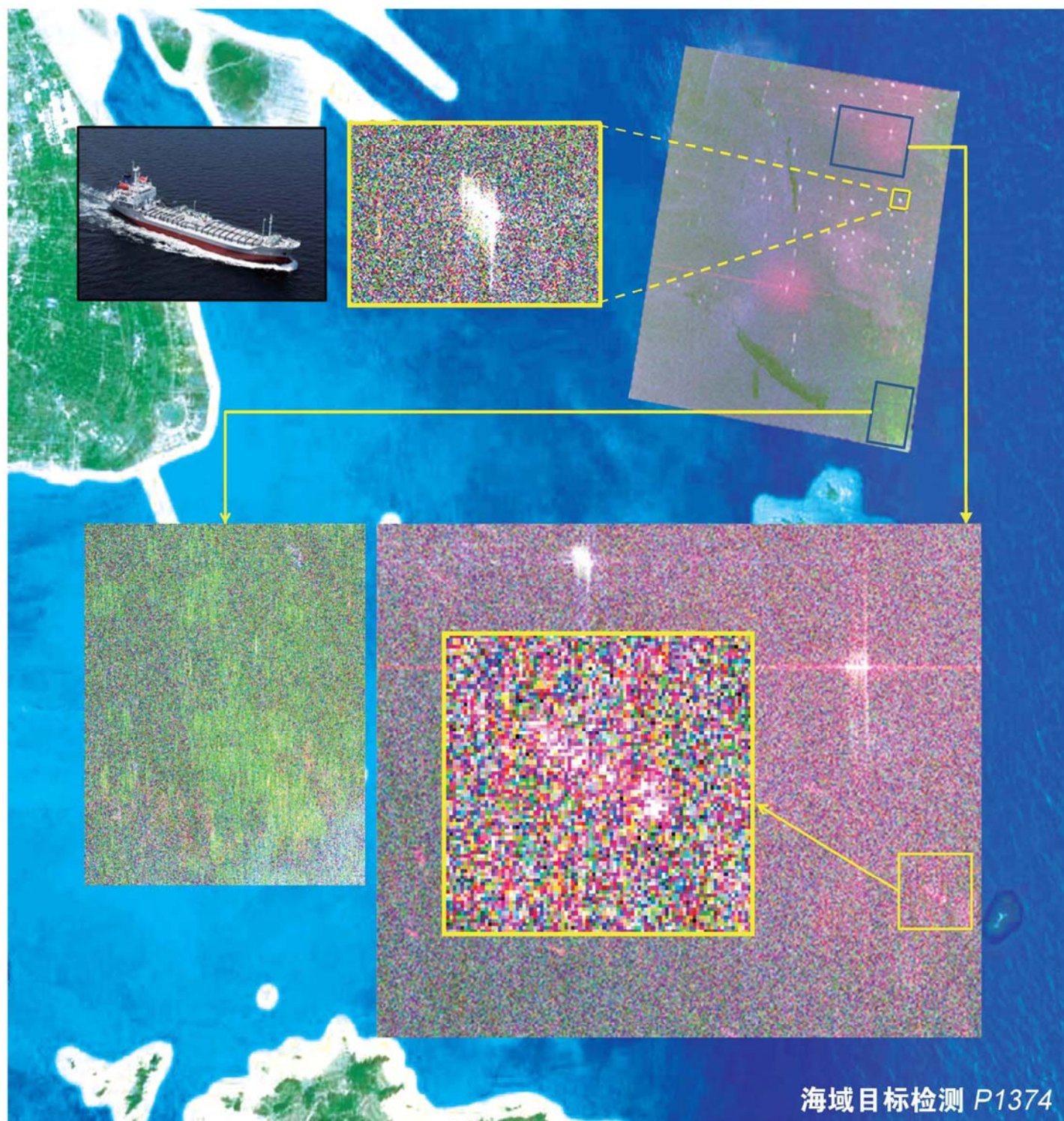
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

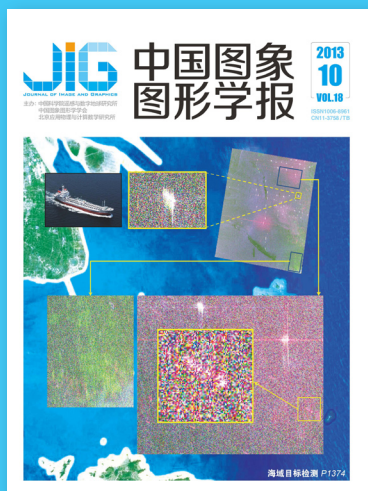
中国图象图形学报

2013
10
VOL.18

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



海域目标检测 P1374



第18卷第10期（总第210期）

2013年10月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

2013 all rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院

主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文

编辑出版《中国图象图形学报》编辑出版委员会

邮政信箱 北京9718信箱

邮 编 100101

电子信箱 jig@irsa.ac.cn

电 话 010-64807995 010-82614429

网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号

总 发 行 北京报刊发行局

订 购 全国各地邮局

海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)

印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian

Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences

Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics

Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen

Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of
Image and Graphics

P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China

Zip code 100101

E-mail jig@irsa.ac.cn

Telephone 010-64807995 010-82614429

Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals

Domestic All Local Post Offices in China

Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China))

Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

CN 11-3758/TB

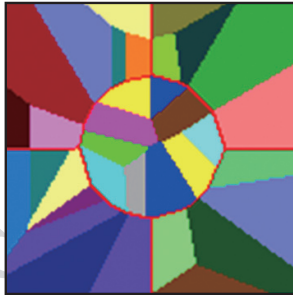
ISSN 1006-8961

CODEN ZTTXFZ

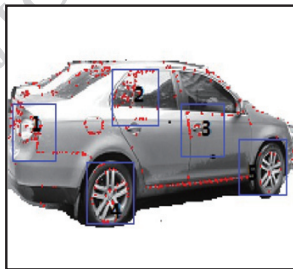
国外发行代号 M1406

国内邮发代号 82-831

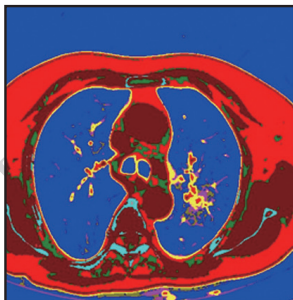
国内定价 50.00元



结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割(第1270页)



联合生成与判别模型的目标检测与跟踪(第1293页)



聚类核值相似区特征点的医学影像分类(第1322页)

综述

手掌静脉图像识别技术综述

吴微, 苑玮琦 1215

视频检测烟雾的研究现状

罗胜, Jiang Yuzheng 1225

图像处理和编码

自适应分数阶微分的复合双边滤波算法

胡伏原, 姒绍辉, 张艳宁, 孙瑾秋 1237

曲波域高斯混合尺度模型的图像压缩重构

纪建, 李晓, 许双星 1247

结合图像信号显著性的自适应分块压缩采样

王瑞, 余宗鑫, 杜林峰, 万旺根 1255

四阶各向异性扩散方程在图像放大中的应用

李鹏, 邹杨, 姚正安 1261

图像分析和识别

结合几何划分技术和最大期望值/最大边缘概率算法的彩色图像分割

赵泉华, 李玉, 何晓军 1270

自适应加权完全局部二值模式的表情识别

胡敏, 许艳侠, 王晓华, 黄忠, 朱弘 1279

面向局部光照突变的时间和空间中心对称局部二值模式算子

卞紫涵, 房胜, 徐田帅 1285

联合生成与判别模型的目标检测与跟踪

刘倩, 侯建华, 牟海军, 赵巍, 笪邦友 1293

目标不同视角下观察信息的迁移和再利用

张索非, 吴海洋, 吴镇扬 1302

图像理解和计算机视觉

张量分析在视差图生成中的应用

赵戈, 蔺兰, 唐延东, 王耀南 1307

采用旋转匹配的二进制局部描述子

卢鸿波, 孙愿, 张志敏 1315

医学图像处理

聚类核值相似区特征点的医学影像分类

李博, 曹鹏, 栗伟, 赵大哲 1322

异常宫颈细胞核的自适应局部分割

张灵, 李静立, 陈思平, 汪天富, 江少锋, 刘少雄 1329

地理信息技术

Hilbert填充曲线与空间分布模式探测的点数据集空间划分方法

吴明光 1336

采用案例归纳推理进行道路网智能选取

郭敏, 钱海忠, 黄智深, 刘海龙, 王骁 1343

遥感图像处理

红外目标抗干扰跟踪算法

褚桐, 马惠敏 1354

MSTAR图像的矩特征分析与多阈值分割

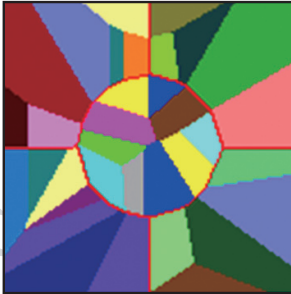
倪维平, 严卫东, 吴俊政, 郑刚, 芦颖 1364

改进Notch滤波的全极化SAR数据船舶检测方法

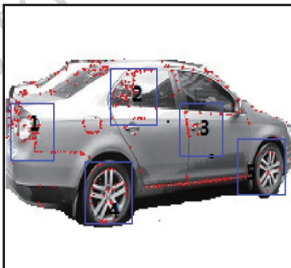
孙渊, 王超, 张红, 张波, 吴樊 1374

CONTENTS

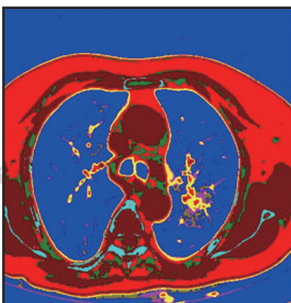
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm(P1270)



Object detection and tracking combining generative and discriminative model(P1293)



Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature point(P1322)

Review

- A survey of palm-vein image recognition
Wu Wei, Yuan Weiqi 1215
- State-of-art of video based smoke detection algorithms
Luo Sheng, Jiang Yuzheng 1225

Image Processing and Coding

- Multi-bilateral filtering algorithm based on adaptive fractional order differentiation
Hu Fuyuan, Si Shaohui, Zhang Yanning, Sun Jinqiu 1237
- Image reconstruction algorithm based on the curvelet gaussian scale mixture model
Ji Jian, Li Xiao, Xu Shuangxing 1247
- Saliency-based adaptive block compressive sampling for image signals
Wang Rui, Yu Zongxin, Du Linfeng, Wan Wanggen 1255
- Fourth-order anisotropic diffusion equations for image zooming
Li Peng, Zou Yang, Yao Zheng'an 1261

Image Analysis and Recognition

- Color image segmentation using geometry tessellation technique and EM/MPM algorithm
Zhao Quanhua, Li Yu, He Xiaojun 1270
- Facial expression recognition based on AWCLBP
Hu Min, Xu Yanxia, Wang Xiaohua, Huang Zhong, Zhu Hong 1279
- TSCS-LBP operator oriented to the local illumination mutation
Bian Zihan, Fang Sheng, Xu Tianshuai 1285
- Object detection and tracking combining generative and discriminative model
Liu Qian, Hou Jianhua, Mou Haijun, Zhao Wei, Da Bangyou 1293
- Transfer and reusing of object view information
Zhang Suofei, Wu Haiyang, Wu Zhenyang 1302

Image Understanding and Computer Vision

- Disparity map generation with tensor analysis
Zhao Ge, Lin Lan, Tang Yandong, Wang Yaonan 1307
- Binary local descriptor based on rotative matching
Lu Hongbo, Sun Yuan, Zhang Zhimin 1315

Medical Image Processing

- Medical image classification based on cluster univalue segment assimilating nucleus feature points
Li Bo, Cao Peng, Li Wei, Zhao Dazhe 1322
- Segmentation of abnormal cervical nuclei using an adaptive and local approach
Zhang Ling, Li Jingli, Chen Siping, Wang Tianfu, Jiang Shaofeng, Liu Shaoxiang 1329

Geoinformatics

- Hilbert space-filling curve and spatial pattern detection-based spatial partitioning approach to point geospatial data
Wu Mingguang 1336
- Intelligent road network selection method based on cases inductive reasoning
Guo Min, Qian Haizhong, Huang Zhishen, Liu Hailong, Wang Xiao 1343

Remote Sensing Image Processing

- Study of infrared anti-jamming tracking algorithm
Chu Tong, Ma Huimin 1354
- Moment feature analysis of MSTAR image and multiple thresholds based segmentation
Ni Weiping, Yan Weidong, Wu Junzheng, Zheng Gang, Lu Ying 1364
- Polarimetric SAR ship detection using improved notch filter
Sun Yuan, Wang Chao, Zhang hong, Zhang bo, Wu Fan 1374

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2013)10-1329-07

论文引用格式: 张灵,李静立,陈思平,汪天富,江少锋,刘少雄. 异常宫颈细胞核的自适应局部分割[J]. 中国图象图形学报,2013,18(10): 1329-1335. [DOI:10.11834/jig.20131015]

异常宫颈细胞核的自适应局部分割

张灵¹, 李静立², 陈思平^{1,2,3}, 汪天富³, 江少锋², 刘少雄⁴

1. 浙江大学生物医学工程与仪器科学学院, 杭州 310027; 2. 南昌航空大学测试与光电工程学院, 南昌 330063;
3. 深圳大学医学院广东省生物医学信息检测和超声成像重点实验室, 深圳 518060; 4. 深圳市南山区人民医院病理科, 深圳 518052

摘要: 为实现宫颈液基细胞图像中异常细胞核的准确分割,提出一种新的自适应局部细胞核分割方法。在自适应阶段,采用一种利用灰度和纹理信息的快速自适应阈值算法大致检测出细胞核区域;在局部阶段,对每一个粗分割得到的连通区域,在其局部邻域内,使用一种利用边界和区域信息的、基于泊松概率分布的图割法修正分割结果。将此方法用于苏木素 & 伊红染色的宫颈液基细胞图像,结果显示,本文方法的平均计算时间为 1.6 s/幅,且比 2012 年 Li 等人提出的宫颈细胞分割方法在细胞核检测率、和异常细胞核分割精度上均提高了 19.7%。

关键词: 宫颈液基细胞;图像;H&E 染色;异常细胞核;分割;自适应局部分割;图割法

Segmentation of abnormal cervical nuclei using an adaptive and local approach

Zhang Ling¹, Li Jingli², Chen Siping^{1,2,3}, Wang Tianfu³, Jiang Shaofeng², Liu Shaoxiong⁴

1. College of Biomedical Engineering & Instrument Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
2. College of Testing and Optoelectronic Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China;
3. Guangdong Key Lab of Biomedical Information Detection and Ultrasound Imaging, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China;
4. Department of Pathology, People's Hospital of Nanshan District, Shenzhen 518052, China

Abstract: For accurate segmentation of abnormal nuclei in liquid-based cervical cell images, a new nuclei segmentation method is proposed, which uses adaptive and local strategies. The adaptive stage detects each nucleus region approximately by applying an efficient adaptive thresholding algorithm that uses intensity and texture information. The local stage refines each coarse segment within its local neighborhood by using a Poisson distribution based graph cuts, which utilizes boundary and region information. The proposed method is applied to Hematoxylin & Eosin stained liquid-based cervical cell images. The results show that the proposed method achieves a speed of 1.6 s per image, and significantly outperforms a state-of-the-art method by Li et al in 2012 in terms of nuclei detection rate and abnormal nuclei segmentation accuracy, both with a 19.7% improvement.

Key words: liquid-based cervical cell; image; hematoxylin & eosin staining; abnormal nuclei; segmentation; adaptive local segmentation; graph cuts

收稿日期:2012-09-17;修回日期:2013-02-25

基金项目:国家自然科学基金重点项目(61031003);国家自然科学基金项目(60772147,60871060)

第一作者简介:张灵(1983—),男,2008年浙江大学生物医学工程专业在读博士研究生,主要研究方向为医学图像处理、模式识别。

E-mail:zhangling0722@163.com

通讯作者:陈思平,E-mail:chensiping@szu.edu.cn

0 引言

宫颈癌是最常见的妇科恶性肿瘤,而细胞学筛查能大大降低其发病率和死亡率。在美国有一半以上的宫颈癌患者是从未做过细胞学筛查的妇女^[1],中国由于部分地区医疗条件落后,这一比例比美国更高。因此,无论发达国家还是发展中国家都必须加大筛查的比例。然而,筛查宫颈细胞学涂片工作强度大、需要病理医生长时间保持高度集中力,故漏诊(假阴性结果)时有发生。计算机辅助判读不仅能大大提高筛查效率,也有望降低判读错误率。然而,国际权威医学杂志《柳叶刀》于2011年发表了对自动判读和人工判读宫颈细胞学涂片的对比临床测试报告,认为对于宫颈上皮内瘤变(CIN)2级和CIN3级病变,自动判读的敏感性不及人工^[2]。因此,为进一步推动宫颈细胞学计算机辅助判读技术在临床上的应用,需要对计算机辅助判读技术作更深入的研究。

计算机辅助判读技术主要包括两个任务:分割、识别,其中精确分割是关键和前提。迄今为止,对于细胞核的分割已有较多文献报道。其中,对宫颈细胞核的分割方法有:文献[3]使用K-means来对细胞质、细胞核及背景进行粗分割,然后使用改进的梯度矢量流模型(RGVF)进行精分割;文献[4]首先利用大津法(Otsu)提取细胞质,再使用均值移位(Mean-shift)和Canny算子分割细胞核;文献[5]则使用自适应阈值(AT)分割细胞核。此外,在其他细胞的细胞核分割方面,图割(GC)^[6-7]和基于区域的水平集模型(ACWE)^[8]也是常用方法。

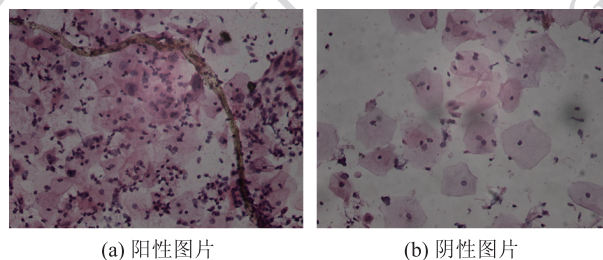
上述方法虽然有其独到的见解,但都存在着不足:1)尚未对应用于宫颈细胞核的各种分割算法进行定量评价;2)尚未考虑对异常细胞核的分割效果进行评价,而异性细胞核的分割效果对系统敏感性十分关键,也决定着对样本的判读。而且,在上述方法中的绝大部分只能适用于边缘清晰的细胞核,甚至只针对单个细胞核,对于类似于图1的复杂细胞图像,上述方法的准确率将大大降低。

为实现对细胞核尤其是异常细胞核的准确分割,提出一种自适应地、局部地应用图割法的方式, (LAGC)。此方法能够在复杂背景下处理图像对比度变化、核染色较浅、染色质不均匀等问题,准确分割出细胞核。同时,将LAGC和另外6种常见分割

算法以及文献[3]对宫颈液基细胞图像的分割结果进行评价和分析,以证明LAGC的有效性。

1 材料与方法

实验中所有样本均由深圳市南山区人民医院病理科提供,样本制作时间为2011年1月—12月,采样时间为2011年10月—12月,为该院进行宫颈涂片检查的女性患者所属。将样本放入Olympus BX41的平台下,选用20倍物镜,并进行自动采图197幅,每张原始扫描图像为bmp格式,其大小为1360×1024,共采集158个样本。该宫颈涂片采用手工液基制片,并进行H&E染色。如图1中所示,宫颈图像较为复杂,且由于聚焦等原因,样本库中有部分图像模糊不清,故先除去不合格者,再随机挑选该样本库中的21幅图,其中15幅含有异常细胞核,6幅全为阴性细胞核。



(a) 阳性图片 (b) 阴性图片

图1 宫颈液基细胞图像

Fig. 1 Two frames of cervical liquid-based cell images

1.1 分割算法

1.1.1 常用分割算法

在文献[3,5-6]和文献[9-11]中分别介绍了常用的分割算法,包括Otsu、K-means聚类、Mean-shift、ACWE、AT、RGVF和GC。对图像分别采用这7种分割方法进行分割,并得到统一的二值化分割结果。

1.1.2 LAGC

对于杂质较多、粘连严重且胞核染色不均匀的图像,如图1(a)所示,采用自适应阈值法易导致欠分割,但其分割出的前景却能定位出胞核。而定位后的局部细胞核区域相对整图而言,其光照较为均匀。但若该细胞核周围含有比其染色更深的其他杂质或胞核,则对分割产生影响。因此将该干扰部分填充为背景灰度后,利用细胞核区域的前景、背景信息,使用GC进行再次分割处理,最终得到整图的分割结果,即为LAGC,如图2所示。该方法综合了灰

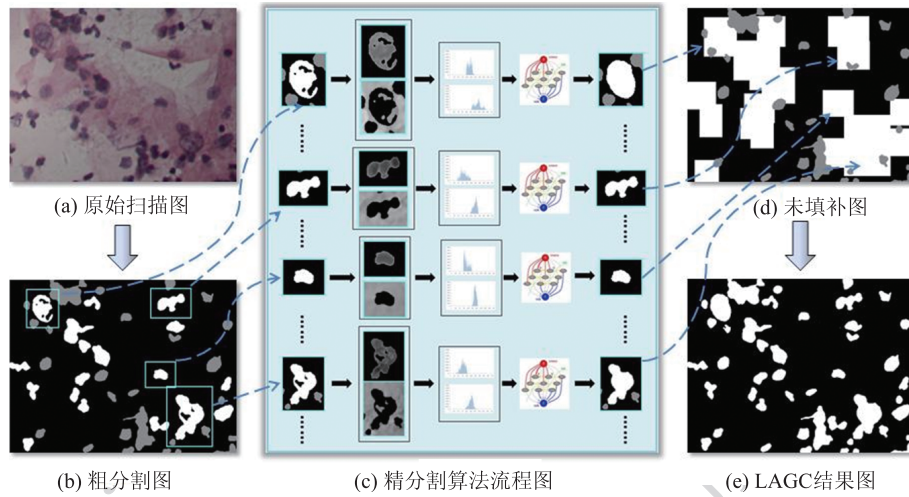


图 2 LAGC 示意图

Fig. 2 Diagram depicting the LAGC

度、纹理、区域和边界信息,降低了光照不均带来的干扰,既能将灰度变化较大的细胞核准确提取,又能将核质差别较小者区分开来,对异常细胞核具有较高的敏感性。

1) 自适应阶段

由于光照不均匀,首先采用自适应阈值法对图像进行粗分割,将得到的分割图作为模板图,提取细胞核区域,如图 2(b)所示。将采用由 Sauvola 和 Pietikainen 提出的自适应阈值算法^[12],如式(1)所示。该方法同时利用了灰度和纹理信息,因此,在文档图像分割中该方法明显优于其他阈值算法。此外,该算法可采用积分图像进行快速计算。

$$t(x, y) = m(x, y) \left[\left[1 + k \left(\frac{s(x, y)}{R} - 1 \right) \right] \right] \quad (1)$$

式中, $t(x, y)$ 为图像中每一个像素点 $I(x, y)$ 对应的阈值, $m(x, y)$ 和 $s(x, y)$ 是以该点为中心、 $w \times w$ 窗口内像素的均值和标准差, w 的取值与图像中最大细胞核的尺寸相关,在对一批图像中细胞核尺寸统计的基础上,设置 71×71 的大小, R 为标准差的最大值,由于图像转化为灰度图后,其范围为 $0 \sim 255$,故取为 128。常数 k 的取值范围对粗分割的结果并不太敏感,经多次实验后,为确保分割效果的最佳,将其定为 0.2。

2) 局部阶段

由于部分胞核染色较浅,而其周围的胞核或者杂质等染色较深,若直接对该细胞核区域使用 GC,难以得到准确的分割。因此,在对需要进行精分割的细胞核区域使用灰度拉伸后,标记该细胞核为前

景。若细胞核区域中存在除了该细胞核之外的其他前景,则标记为干扰区域。在进行直方图统计时,只统计标记的前景和未标记的背景,得出泊松混合参数

$$\begin{aligned} P_{obj} &= \sum_{I(x, y) \in obj} h(i) \\ \mu_{obj} &= \frac{1}{P_{obj}} \sum_{I(x, y) \in obj} i \times h(i) \\ P_{bkg} &= \sum_{I(x, y) \in bkg} h(i) \\ \mu_{bkg} &= \frac{1}{P_{bkg}} \sum_{I(x, y) \in bkg} i \times h(i) \end{aligned} \quad (2)$$

式中, i 为像素点 $I(x, y)$ 的灰度值。obj 代表前景, bkg 代表背景, P_{obj} 、 P_{bkg} 分别为前景、背景的概率, μ_{obj} 、 μ_{bkg} 则为前景、背景的灰度均值。 $h(i)$ 表示在前景或背景中,灰度值为 i 的像素个数占前景和背景的总像素个数的比例,即

$$h(i) = \frac{N_i}{N_{obj} + N_{bkg}} \quad (3)$$

式中, N_{obj} 、 N_{bkg} 分别是前景和背景的像素个数。为降低干扰区域的影响,对其使用 μ_{bkg} 进行填充。

在 GC 算法中,利用基于泊松分布的最小误差阈值算法来确定前景、背景泊松概率密度分布,而在本方法中,由于模板的存在,可得到前景、背景的泊松概率密度分布为

$$\begin{aligned} Pr_{obj}(I(x, y)) &= \frac{\mu_{obj}^i e^{-\mu_{obj}}}{i!} \\ Pr_{bkg}(I(x, y)) &= \frac{\mu_{bkg}^i e^{-\mu_{bkg}}}{i!} \end{aligned} \quad (4)$$

对于粗分割得到的每一个连通区域,通过能量

函数式(5)来构建网络流图。

$$E(L(x, y)) = \sum_{(x, y)} R(L(x, y)) + \sum_{I(x, y)I(x', y') \in N(x, y)} B(L(x, y), L(x', y')) \quad (5)$$

式中, $L(x, y)$ 是 $I(x, y)$ 在构建的网络流图中对应的像素标号, $N(x, y)$ 为 $I(x, y)$ 的邻域。等号右边第1项是数据项, 即像素点自身的能量

$$\begin{aligned} R_{\text{obj}}(L(x, y)) &= -\ln Pr_{\text{obj}}(I(x, y)) \\ R_{\text{bkg}}(L(x, y)) &= -\ln Pr_{\text{bkg}}(I(x, y)) \end{aligned} \quad (6)$$

式中, $R_{\text{obj}}(L(x, y))$ 、 $R_{\text{bkg}}(L(x, y))$ 分别描述了该像素 $I(x, y)$ 对前景、背景灰度模型的拟合度。式(5)中等号右边第2项是像素连续性项, 它指示相邻像素间连接能量的总和, 即

$$B(L(x, y), L(x', y')) = w \exp\left(-\frac{(I(x, y) - I(x', y'))^2}{2\sigma^2}\right) \quad (7)$$

式中, w 为比例系数, 多次测试后定为2。 σ 是尺度因子, 当核染色质较平滑时 σ 取较小值, 反之取较大值, 本文中的 σ 定为30。 $I(x', y')$ 是像素点 $I(x, y)$ 的临近像素点, $L(x', y')$ 为其对应的像素标号。

图割法将上述能量函数表达为一个图结构, 使用最大流最小割方法得到图像的最优分割^[11]。整个精分割的算法过程如图2(c)所示。

3) 得到最后分割结果

对每一个粗分割得到的连通区域使用图割法修正之后, 只保留与粗分割得到的前景目标重叠面积最大的结果。将这些修正后的分割结果与未进行精分割的结果合并, 最终得到对整幅图像的精确分割, 如图2(c)一(e)所示。

1.2 评价方法

评价分为两大部分, 即针对像素和针对目标的评价。

1.2.1 针对像素的评价

在针对像素的评价中, 从参考文献[4, 7]和文献[13-15]可以看出, 查准率 r_p 和查全率 r_R 是最为常见的评价方法。

$$\begin{aligned} r_p &= \frac{T_p}{T_p + F_p} \\ r_R &= \frac{T_p}{T_p + F_b} \end{aligned} \quad (8)$$

式中, T_p 表示自动分割图中正确分割的前景像素个数, F_p 表示误分割为前景的背景像素个数, F_b 则为

误分割为背景的前景像素个数。

由于查准率和查全率在很多情况下是矛盾的, 为综合两者, 选用它们的调和平均数 F_{measure} 作为另外一个评价标准^[4], 即

$$F_{\text{measure}} = \frac{2r_p r_R}{r_p + r_R} \quad (9)$$

式(8)(9)既能用于对整图中每个目标的评价, 又能单独用于异常细胞核的评价。同时为了说明各分割法对异常细胞核特征值的影响, 计算出每个异常细胞核的特征值相对金标准的误差, 即

$$\sigma = \frac{|G - S|}{G} \quad (10)$$

式中, G 代表金标准中异常细胞核的特征值, S 代表与之对应的自动分割图中异常细胞核的特征值。

1.2.2 针对目标的评价

在针对像素评价的基础上, 对 r_R 大于60%的细胞核判为检测到该目标, 得出该自动分割法的总体目标检测率

$$r_{\text{all}} = \frac{N_{r_R > 60\%}}{N_{\text{all}}} \quad (11)$$

式中, N_{all} 为金标准中细胞核的总数, $N_{r_R > 60\%}$ 为自动分割图中 r_R 大于60%的细胞核个数。

另外, 还专门对异常细胞核进行评价。由于异常细胞核对癌变程度判断具有重要的依据, 对其评价的标准应该更为仔细和严格。因此采用式(12)所示的异常细胞核检测率, 即

$$R_{\text{positive}} = \frac{N_{F_{\text{measure}} > 60\%}}{N_{\text{all}}} \quad (12)$$

式中, N_{all} 为金标准中异常细胞核的总数, $N_{F_{\text{measure}} > 60\%}$ 为自动分割图中对应异常细胞核的 F_{measure} 大于60%的个数。

2 实验

2.1 参数设置

在8种分割方法中, Mean-shift 在 EDISON 中完成, LAGC、GC 和 AT 在 VC++9.0 中完成, 其余均在 Matlab 中实现。为达到最佳效果, 本实验中各模型的参数均是经过多次测试后择优而定的。

2.1.1 常用分割方法

首先对所选图片进行灰度转换、图像拉伸以及中值滤波, 然后, 使用调整好的参数进行 Otsu、Kmeans、Mean-shift 分割。其中, Mean-shift 是直接

对封闭曲线内部进行填充,得到分割图。Otsu 采用多阈值法将图像分成3类,再将胞核内部进行填充即为分割图。而在使用 K-means 的过程中,由于选取的3个初始聚类中心的灰度值对结果影响很小,故采用最常见的64、128和192作为初始的聚类中心。在 EDISON 工具中使用 Mean-shift,其参数分别为空间波段宽度 $W_{SB} = 10$, 颜色波段宽度 $W_{CB} = 6.5$, 最小区域面积 $A_{MR} = 130$ 。经过像素拉伸后的 ACWE 效果不佳,故对灰度图像进行中值滤波后直接使用 ACWE 得到分割图,其迭代次数经多次实验后确认为15,其余参数为 $\mu = \lambda_1 = \lambda_2 = \nu = \varepsilon = h = 1, \Delta t = 0.1$ 。AT 采用文献[5]中的参数。GC 采用文献[6]的参数设置。而在 RGVF 分割过程中,文献[3]的原始方式将漏掉大量细胞核,故对其进行了改进,即不考虑细胞核的几何信息,提取出所有分割出的物体,参数为 $\alpha = \mu = 1, \beta = 5.0, \delta = 0.5, \gamma = 10, \theta = 2$ 。

2.1.2 LAGC

在使用自适应阈值分割法得到模板图后,利用链码定位每一个目标前景,向四周扩展10个像素,复制出该细胞核区域的灰度图,并计算出圆形度和面积等特征值。通过对30幅细胞核区域进行实验,得出向外扩展3、5、10、15个像素的平均准确率分别为75.10%、79.05%、83.10%和83.13%,其计算的复杂度和时间也随之增加,故最终选取10个像素。

对于圆形度小于1.2或大于3.0,或圆形度大于2.5且面积大于2000者,即形状不规则或面积过大者,认定为杂质及粘连成片的物体,不作后续操作。

通过对细胞核区域的灰度图进行精分割,将得到的分割图中的核取代之模板图中对应的核,最终得到整幅图像的精确分割。

对所选的21幅图像使用8种分割方法进行处理,图3为其中1幅图像截取部分区域后的分割对比图。由于 LAGC 是在自适应阈值的基础上使用图

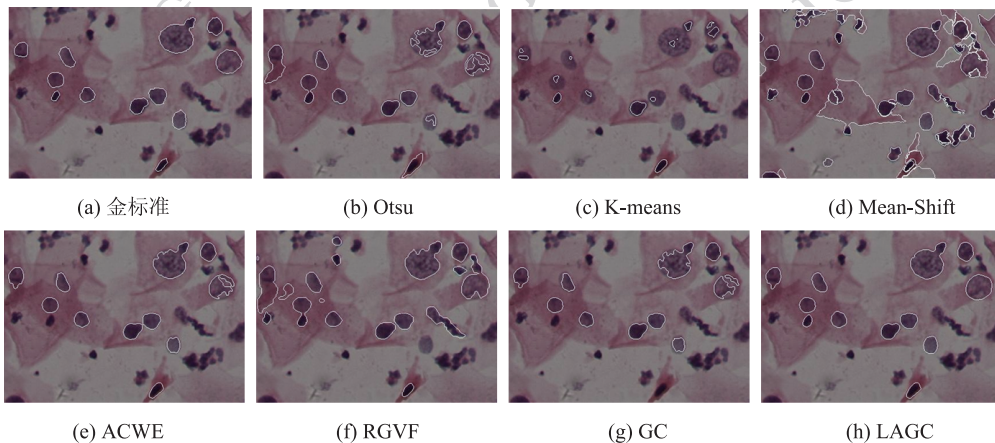


图3 图像分割比较

Fig. 3 Comparison of segmentation results

割法进行分割,为对比两者效果,选取其中具有代表性的4组细胞核,如图4所示。

2.2 实验结果

手动勾出21幅图像的细胞核,作为金标准。由于样本图像的复杂性,所有分割图都未进行粘连分割,金标准中的目标前景为人眼能够识别出边界的细胞核,对于少量粘连者,也以粘连轮廓为准。

2.2.1 针对像素的评价

在各分割图中,根据式(8)(9)计算整图和异常细胞核的 r_P 、 r_R 及 $F_{measure}$,并得出各自的均值 μ_i 和方差 $\delta_i, i = P, R, F$ 。同时,统计各分割方法的处理时间后得出耗时均值,如表1所示。

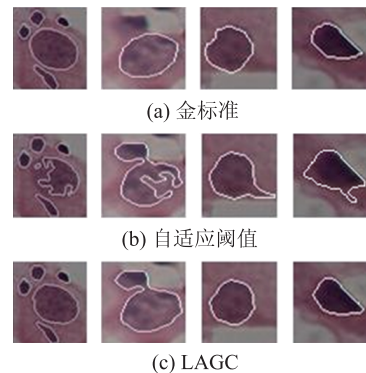


图4 金标准、自适应阈值和 LAGC 分割比较

Fig. 4 Comparison of segmentation results about Gold standard, adaptive threshold and LAGC

表 1 各分割法对像素的评价

Table 1 Pixel-based evaluation of segmentation results

分割方法	整图评价			异常细胞核评价			耗时/ (s/幅)
	$\mu_P \pm \delta_P$	$\mu_R \pm \delta_R$	$\mu_F \pm \delta_F$	$\mu_P \pm \delta_P$	$\mu_R \pm \delta_R$	$\mu_F \pm \delta_F$	
Otsu	0.507 3 ± 0.029 2	0.683 7 ± 0.028 4	0.562 2 ±0.020 2	0.685 4 ± 0.100 0	0.691 1 ± 0.139 7	0.589 6 ±0.082 9	0.779 7
K-means	0.808 0 ± 0.039 9	0.517 8 ± 0.053 5	0.569 5 ±0.022 1	0.721 8 ± 0.172 9	0.378 3 ± 0.139 9	0.408 3 ±0.129 6	1.344 2
Mean-shift	0.938 2 ± 0.004 3	0.739 1 ± 0.002 6	0.825 7 ±0.002 3	0.796 1 ± 0.122 8	0.695 1 ± 0.103 6	0.722 1 ±0.108 4	32.442 7
ACWE	0.699 4 ± 0.023 2	0.710 1 ± 0.032 1	0.682 6 ±0.031 2	0.836 8 ± 0.040 9	0.750 1 ± 0.103 8	0.714 6 ±0.073 4	37.817 3
AT	0.832 9 ± 0.004 4	0.897 2 ± 0.000 7	0.861 9 ±0.001 2	0.877 1 ± 0.018 6	0.855 4 ± 0.010 5	0.853 3 ±0.008 0	0.112 7
RGVF	0.520 4 ± 0.037 7	0.769 8 ± 0.054 3	0.598 0 ±0.035 1	0.623 9 ± 0.055 1	0.860 1 ± 0.039 1	0.687 8 ±0.037 2	1 840.000 0
GC	0.7891 ± 0.023 7	0.674 5 ± 0.017 7	0.709 9 ±0.011 5	0.771 5 ± 0.116 8	0.605 7 ± 0.132 8	0.626 5 ±0.112 4	1.062 0
LAGC	0.849 7 ± 0.004 7	0.901 6 ± 0.000 4	0.873 2 ±0.001 5	0.883 6 ± 0.018 7	0.907 0 ± 0.004 4	0.884 3 ±0.006 8	1.560 2

在得出金标准和分割图中每个异常细胞核的特征值(面积、灰度均值和方差)后,由式(10)计算出各特征误差,其均值和方差如表 2 所示。

2.2.2 针对目标的评价

在每种分割结果中,根据式(11)得出整体目标

检测率,算出均值和方差,如表 3 所示。在其中一幅图像中,原本在 LAGC 粗分割图中的两个粘连细胞核,在精分割过程中将核质差别较小的一个胞核分割为背景而被遗漏,致使表 3 中 LAGC 的均值略低于自适应阈值的结果。

表 2 对异常细胞核特征的评价

Table 2 Evaluation of positive cells' features

分割方法	μ 面积误差 ± δ 面积误差	μ 均值误差 ± δ 均值误差	μ 方差误差 ± δ 方差误差
Otsu	0.908 8 ±0.594 1	0.207 7 ±0.068 4	0.825 1 ±0.421 1
K-means	0.718 3 ±0.143 5	0.363 3 ±0.125 8	0.808 2 ±0.180 8
Mean-shift	0.459 8 ±0.212 3	0.194 2 ±0.111 9	0.518 2 ±0.158 8
ACWE	0.513 8 ±0.330 4	0.101 1 ±0.020 9	0.516 0 ±0.193 8
AT	0.223 3 ±0.110 7	0.061 1 ±0.016 3	0.389 7 ±0.170 6
RGVF	0.398 5 ±0.078 8	0.078 0 ±0.008 3	0.527 6 ±0.081 7
GC	0.492 3 ±0.200 8	0.212 8 ±0.108 3	0.555 7 ±0.084 7
LAGC	0.174 5 ±0.078 0	0.035 8 ±0.001 0	0.343 5 ±0.062 8

表 3 整体目标检测率的均值和方差

Table 3 Mean and variance of the overall target detection rate

	Otsu	K-means	Mean-shift	ACWE
均值	0.741 3	0.577 5	0.932 9	0.761 9
方差	0.035 8	0.064 9	0.003 2	0.031 2
	AT	RGVF	GC	LAGC
均值	0.996 6	0.798 2	0.776 1	0.995 2
方差	0.000 1	0.122 1	0.018 4	0.000 1

为说明各分割方法对异常细胞核分割效果较差、分割较好和分割理想的 3 种情况,统计 F_{measure} 值在 0%~75%、75%~90% 和 90%~100% 3 个范围内的细胞核个数,表 4 为排序后的结果。

3 结 论

本文提出了一种自适应局部图割法 LAGC,这种由粗到精的基于局部的分割方法既考虑了强度、纹理

表4 各分割结果中异常细胞核的 F_{measure}
Table 4 F_{measure} of positive cells about segmentation results

分割方法	0% ~ 75%	75% ~ 90%	90% ~ 100%
K-means	47	11	6
Otsu	44	14	6
RGVF	29	24	11
GC	31	20	13
ACWE	25	23	16
Mean-shift	16	26	22
AT	9	32	23
LAGC	4	27	33

等图像底层特征,又考虑了边缘和区域等属性,且能克服整幅图像光照不均的影响。虽然改进后的RGVF保留了所有细胞核,其查全率大大提高,但效率非常低。由于本文所选图像的复杂度较大,在边缘模糊、染色不规律的细胞核中,RGVF难以接近真实的边界。相反,LAGC能够准确地分割核染色质不均匀和染色较浅的病变细胞核,也能修正阈值分割可能产生的过分割现象,此为本文方法优于其他分割方法的所在之处。

在对8种不同分割方法的结果进行基于像素和基于目标的定量评价时,不仅评价整图的分割结果,更首次对异常宫颈细胞核的分割进行细致的评价,由这一评价体系得出的数据充分证明了LAGC在对宫颈液基细胞核的分割中准确率高、稳定性强。同时LAGC耗时较短,若对其进行并行优化处理,则会进一步提高效率。

为提高效率,LAGC并未对粗分割后的所有前景进行精分割,故会遗漏少量细胞核的再次修复。因此,我们下一步工作的主要目标便是在保证效率的基础上,改进需要进行精分割的细胞核筛选条件,以保证每个细胞核,尤其是异常细胞核,得到准确的分割。

整个分割算法全自动且准确率高,是进一步进行自动识别宫颈癌细胞的基础,可用于辅助病理医生筛查宫颈癌,具有较高的实用价值和社会意义。

参考文献 (References)

[1] Saslow D, Solomon D, Lawson H W, et al. American cancer society, American society for colposcopy and cervical pathology,

and American society for clinical pathology screening guidelines for the prevention and early detection of cervical cancer [J]. CA Cancer Journal for Clinicians, 2012, 62(3): 147-172.

- [2] Kitchener H C, Blanks R, Dunn G, et al. Automation-assisted versus manual reading of cervical cytology: a randomised controlled trial [J]. The Lancet Oncology, 2011, 12(1): 56-64.
- [3] Li K, Lu Z, Liu W, et al. Cytoplasm and nucleus segmentation in cervical smear images using radiating GVF snake [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(4): 1255-1264.
- [4] Bergmeir C, Silvente M G, Benítez J M. Segmentation of cervical cell nuclei in high-resolution microscopic images: a new algorithm and a web-based software framework [J]. Computer Methods and Programs in Biomedicine, 2012, 107(3): 497-512.
- [5] Zhang L, Chen S, Wang T, et al. A practical segmentation method for automated screening of cervical cytology [C] // Proceedings of the 2011 International Conference on Intelligent Computation and Bio-Medical Instrumentation. Wuhan, Hubei: IEEE Computer Society. 2011: 140-143.
- [6] Al-Kofahi Y, Lassoued W, Lee W, et al. Improved automatic detection and segmentation of cell nuclei in histopathology images [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(4): 841-852.
- [7] Lou X, Koehe U, Wittbrodt J, et al. Learning to segment dense cell nuclei with shape prior [C] // Proceedings of the 2012 IEEE Conference on Computer vision and Pattern Recognition. Providence RI: IEEE Computer Society. 2012: 1012-1018.
- [8] Nath S K, Palaniappan K, Bunyak F. Cell segmentation using coupled level sets and graph-vertex coloring [C] // Proceedings of Med Image Comput Comput Assist Interv. Copenhagen, Denmark; PMC. 2006: 101-108.
- [9] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms [J]. IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.
- [10] Comaniciu D, Meer P. Mean-shift: a robust approach toward feature space analysis [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 603-619.
- [11] Boykov Y, Veksler O, Zabih R. Fast approximate energy minimization via graph cuts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1222-1239.
- [12] Sauvola J, Pietikäinen M. Adaptive document image binarization [J]. Pattern Recognition, 2000, 33(2): 225-236.
- [13] Estrada F J, Jepson A D. Benchmarking image segmentation algorithms [J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 85(2): 167-181.
- [14] Genctav A, Aksoy S, Önder S. Unsupervised segmentation and classification of cervical cell images [J]. Pattern Recognition, 2012, 45(12): 4151-4168.
- [15] Dima A A, Elliott J T, Filliben J J, et al. Comparison of segmentation algorithms for fluorescence microscopy images of cells [J]. Cytometry. 2011, 79A(7): 545-595.