

嗜酸性粒细胞胃肠炎病理切片的计算机辅助诊断

万真真^{1*}, 李春雪¹, 刘芳^{2,3}, 张绍永¹, 韩帅¹

¹河北大学电子信息工程学院, 河北 保定 071002;

²保定市儿童医院病理科, 河北 保定 071000;

³保定市儿童呼吸消化疾病临床研究重点实验室, 河北 保定 071000

摘要 嗜酸性粒细胞胃肠炎(EG)是一种以外周血嗜酸性粒细胞(EOS)增多为特征的胃肠道疾病,其主要诊断依据为消化道黏膜标本病理切片中嗜酸性粒细胞的数目是否超标。利用计算机图像分析算法对病理切片图像中的嗜酸性粒细胞进行识别并计数,旨在辅助病理医生人工计算 EOS 的数目,减少医生的工作量,提高工作效率。采用鲁棒性较强的分水岭算法作为识别 EOS 的核心算法,并通过距离变换和前后景标记的改进算法解决传统分水岭算法中的过分割问题,提高识别计数的准确性。采用改进分水岭算法对 EG 病理图像中的 EOS 进行识别计数,并将其与病理医生的金标准进行比对。改进分水岭算法的平均准确率为 95.0%。与传统算法相比,改进算法准确率的相对标准方差由 5.8% 提高到 2.2%,过分割率由 13.4% 降低为 3.7%,算法的运行时间由 40 s 缩短为 27 s 左右。

关键词 医用光学; 计算机辅助诊断; 病理切片; 嗜酸性粒细胞; 分水岭; 过分割; 前后景标记

中图分类号 R573

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP57.201701

Computer-Aided Diagnosis of Pathological Section for Eosinophilic Gastroenteritis

Wan Zhenzhen^{1*}, Li Chunxue¹, Liu Fang^{2,3}, Zhang Shaoyong¹, Han Shuai¹

¹College of Electronic Information Engineering, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China;

²Department of Pathology, Baoding Children's Hospital, Baoding, Hebei 071000, China;

³Key Laboratory of Clinical Research on Children's Respiratory Digestive Diseases in Baoding City, Baoding, Hebei 071000, China

Abstract Eosinophilic gastroenteritis (EG) is a gastrointestinal disease characterized by an increase in peripheral blood eosinophil (EOS). The main diagnosis of EG is based on whether the number of eosinophils in the pathological section of a digestive tract mucosa specimen exceeds the standard. In this study, a computer image analysis algorithm was used to identify and count eosinophils in pathological section images, with the aim to assist pathologists to manually calculate the number of EOS and reduce the workload and improve the work efficiency of doctors. A robust watershed algorithm was used as the core algorithm for identifying EOS, and the over-segmentation problem in the traditional watershed algorithm was solved using an improved distance transform algorithm and foreground and background markers. The accuracy of the watershed algorithm for recognition and counting was improved. The improved watershed algorithm was used to identify and count EOS, and its results were compared with a pathologist's standard. The average accuracy of the algorithm is 95.0%. Compared with the traditional watershed algorithm, the relative standard deviation of the improved algorithm improved from 5.8% to 2.2%, the over-segmentation rate reduced from 13.4% to 3.7%, and the running time of the algorithm reduced from 40 s to about 27 s.

Key words medical optics; computer-aided diagnosis; pathological section; eosinophil; watershed; over-segmentation; foreground and background markers

OCIS codes 170.3880; 100.3008; 150.1135

收稿日期: 2020-01-06; 修回日期: 2020-01-15; 录用日期: 2020-02-10

基金项目: 河北省硕士研究生创新资助项目(CXZZSS2020010)

* E-mail: wanzhenzhen@126.com

1 引言

计算机辅助诊断技术作为应用于病理学领域的一种新工具,近年来得到了快速发展。各类图像分析算法均可有效地对病理信息进行采集和分析,自动识别病理切片中的病变区域,给出各种评价指标,辅助病理医生进行快速、准确的病理诊断。

目前,新的图像识别算法不断被提出,而且对病理切片图像进行处理的研究也逐渐增多。嗜酸性粒细胞胃肠炎(EG)是一种胃肠道疾病,其诊断标准为嗜酸性粒细胞(EOS)在胃肠黏膜中的含量是否超标^[1]。EG的临床表现各异,无独特的表现症状,不易在病发早期发现。对EG进行诊断的传统方法是病理医生在光学显微镜下对消化道黏膜活检标本病理切片进行观察,并对EOS进行计数。人工计数是一项高重复性的工作,且高度依赖于医生的经验。

本研究采用改进型分水岭算法自动识别消化道黏膜病理切片中的EOS并进行计数,辅助病理医生进行诊断,旨在减少医生的工作量,提高医疗诊断的效率。

分水岭算法具有良好的边缘检测能力,是一种精准快速的图像分割方法,多年来在病理切片图像处理中得到了广泛应用。1992年,Soille等^[2]提出了分水岭算法,并将其用于图像分割。2017年,González-Betancourt等^[3]先提取细胞的部分边缘,然后利用Radon变换与正弦投影来检测、分割红细胞。2018年,Koyuncu等^[4]提出了一种迭代的h-minima变换,并用它来获取荧光图像上的细胞核标记。郭晶晶等^[5]结合梯度信息从显微镜图像中分割出了红细胞与白细胞。在病理图像分析中,由于噪声或其他干扰因素的存在,分水岭算法很容易识别伪极小值点,常出现过度分割的现象。鉴于此,本文在处理EG病理切片图像时,在传统分水岭算法的基础上加入了距离及前景标记的改进算法,以降低对EOS细胞的过分割现象,提高细胞识别的准确率和算法的稳定性。

2 病理图像的采集和预处理

2.1 病理图像的采集

本研究由河北大学与保定市儿童医院合作共同完成。图1为保定市儿童医院病理科采用光学显微镜及医学病理图像分析管理仪采集EG病理切片的过程。①为载物台,用以调节消化道黏膜标本的切

片,选择EOS区域多的视野,并在400倍视野下对EOS进行计数;②为观察目镜,它可通过放大、缩小视野找寻最佳观察区域;③为医学病理图像分析管理仪,它可将光学显微镜采集的病理图像显示在计算机屏幕上。

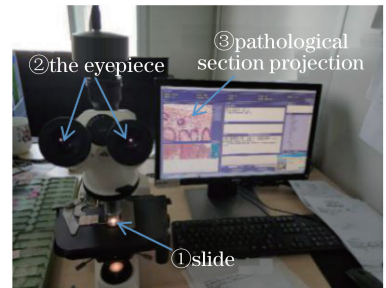


图1 病理切片制作图

Fig. 1 Pathological section drawing

图2为采集的消化道黏膜病理切片显微图像,其显示的细胞种类包括嗜酸性粒细胞(EOS)、淋巴细胞、浆细胞、组织细胞、中性粒细胞以及腺体等。其中:①为EOS,其为深水红色,细胞核为分叶状和杆状,形状不一;②为淋巴细胞,其为圆形;③为组织细胞,其为椭圆形;④为浆细胞,其呈浅水红色,为椭圆形,与EOS相比颜色较浅且为单核细胞,但与EOS具有一定的相似性;⑤为腺体组织,其颜色不一,有月牙白以及水红色等,体积较大。

对EOS识别的难点在于将各类背景细胞与之分离。本文主要在颜色、形状、面积、周长等方面对EOS进行特征提取,以实现EOS的高效、准确识别。

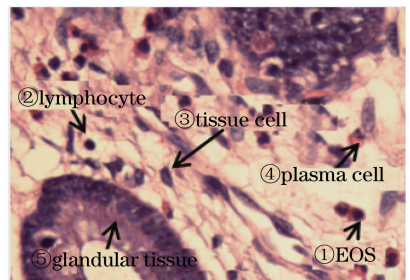


图2 细胞分类图

Fig. 2 Cell classification diagram

2.2 病理图像的预处理

为了增强EOS在病理切片图像中的对比度,削弱噪声和背景细胞,并去除病理切片染色时引入的背景和杂质,本文采用YCbCr变换和梯度幅值滤波等算法对EG病理图像进行预处理。

光学显微镜获取的病理切片图像是三维真彩色图像,占用空间较大,会降低算法的运行速度。本文

应用彩色空间 YCbCr, 只需占用极少的频宽, 可以提高算法的运行速度。RGB 彩色图像转变为 YCbCr 的公式为

$$Y = 0.257 \times R + 0.504 \times G + 0.098 \times B + 16, \quad (1)$$

$$C_b = -0.148 \times R - 0.291 \times G + 0.439 \times B + 128, \quad (2)$$

$$C_r = 0.439 \times R - 0.368 \times G - 0.071 \times B + 128, \quad (3)$$

式中: R 、 G 、 B 分别为彩色图像的红、绿、蓝三色通道; C_b 和 C_r 分别为彩色图像中红色和蓝色的偏移量。

将真彩色图像转换为 YCbCr 图像的效果图如图 3 所示。

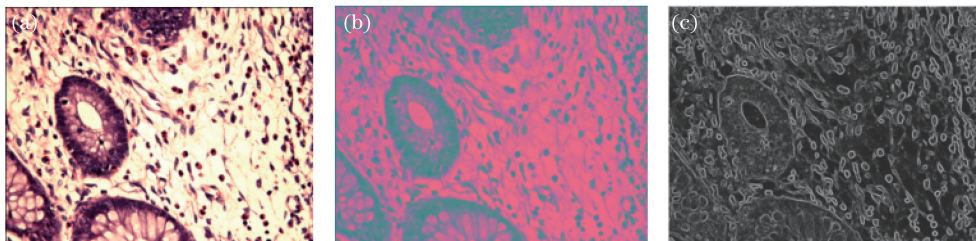


图 3 YCbCr 和滤波效果图。(a) 样本原图; (b) YCbCr 空间图; (c) 梯度幅值滤波

Fig. 3 YCbCr and filtering effect diagrams. (a) Original diagram; (b) YCbCr diagram; (c) gradient amplitude filtering

梯度幅值滤波通过计算 4 个方向的极值点来判断噪声点和非噪声点。噪声在 4 个方向上有极大值, 而边缘仅在一个方向上有极大值, 通过梯度幅值滤波可以很好地分割噪声与边缘^[6]。梯度幅值及梯度方向的计算公式如下:

$$d_x(i, j) = I(i + 1, j) - I(i, j), \quad (4)$$

$$d_y(i, j) = I(i, j + 1) - I(i, j), \quad (5)$$

$$G(x, y) = d_x(i, j) + d_y(i, j), \quad (6)$$

$$M(x, y) = \text{sqrt}[d_x(i, j) \cdot d_x(i, j) + d_y(i, j) \cdot d_y(i, j)], \quad (7)$$

$$\text{Theta}(x, y) = \text{atan2}[d_x(i, j), d_y(i, j)], \quad (8)$$

式中: d_x 、 d_y 分别为 x 、 y 方向的导函数; $I(\cdot)$ 为原图函数; $G(x, y)$ 为图像梯度; $M(x, y)$ 为梯度幅值; $\text{Theta}(x, y)$ 为方向角。

3 病理图像的特征提取

嗜酸性粒细胞(EOS)的外形为圆形, 细胞核的形态特征为叶状和杆状, 如图 4 所示, ①为叶状, ②为杆状。对 EOS 特征进行提取的主要算法为分水岭算法, 辅助算法有阈值分割算法、数学形态学算法等。

3.1 阈值分割

阈值分割是基于区域的基础算法, 它将像素合并后加以区分, 具有实现简单、计算量小、性能较稳定等特点。当前景与背景的像素相差很大时, 应用阈值分割算法可以很好地去除背景, 从而压缩数据量, 简化分析和处理的步骤。

本文根据 EOS 与背景细胞像素的差异性, 在

YCbCr 的三个维度下设置最佳阈值, 在识别 EOS 的同时, 去除更多的背景细胞。阈值分割后的效果如图 5(a)所示, 可见, 病理切片中仅有 EOS 和少量的腺体组织及浆细胞存在。

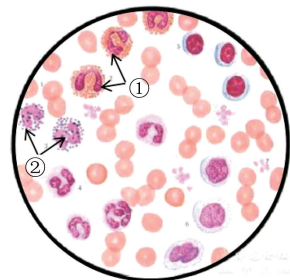


图 4 嗜酸性粒细胞特征图

Fig. 4 Eosinophil characteristics

3.2 数学形态学图像处理

数学形态学算法通过描述和定义图像中前景(面积、周长、连通度等)的几何参数和特征进行分割和提取, 主要包括腐蚀、膨胀以及开闭运算等^[7-11]。

腐蚀运算的作用是消除物体的边界点, 使边界向内部收缩, 去除物体间的细小元素。膨胀运算与腐蚀运算为对偶运算, 有扩充图像边界、合并物体间细小连接并填充孔洞的效果。腐蚀运算和膨胀运算的公式分别为

$$E(X) = \{a | B_a \subset X\} = X \ominus B, \quad (9)$$

$$E(X) = \{a | B_a \uparrow X\} = X \oplus B, \quad (10)$$

式中: $E(X)$ 为运算后的图像; B_a 为结构元素; X 为原图; B 为结构元素; \ominus 和 \oplus 分别为腐蚀与膨胀。

开运算是先腐蚀后膨胀算法, 其作用是消除细

小杂质,分离 EOS 细胞间的细小连接,平滑 EOS 的边界。闭运算为先膨胀后腐蚀的算法,其作用是填充 EOS 间的细小孔洞,连接 EOS 细胞间的细小间断,平滑边界^[8-13]。通常可以根据开闭运算的特点处理病理切片,解决细胞黏连和孔洞问题,公式为

$$S = X \circ B = (X \ominus B) \oplus B, \quad (11)$$

$$S = X \cdot B = (X \oplus B) \ominus B, \quad (12)$$

式中: S 为数学形态学算法处理后的图像。

数学形态学算法对图像的处理过程如图 5 所示。图 5(a)为阈值分割图,图中仍存在着较多的细小杂质,需要进行开闭运算将其消除;图 5(b)是开闭运算后的重建图像,细小的杂质被消除,但 EOS 还没有明显呈现出来;图 5(c)是经数学形态学变换后的效果图,可见,EOS 清晰地呈现出来。



图 5 数学形态图。(a)二值化图像;(b)开闭运算重建图;(c)孔洞填充

Fig. 5 Mathematical morphology diagrams. (a) Binarization; (b) reconstruction of open and closed operation; (c) filling of holes

4 分水岭算法分割病理图像

4.1 分水岭算法的原理

分水岭算法是一种基于数学形态学的分割算法,其思想来源于地理学,即图像像素高低类似于地面高低。在地理中,水会由高山流至盆地,在图像中高低像素分别汇集,从而形成分水线(分割线)^[13-17]。本文采用分水岭算法对消化道黏膜活检标本病理切片图像进行细胞分割,并采用标记前景(即标记开闭运算后 EOS 的局部极大值)对算法进行改进,改善传统分水岭算法的过分割现象。

4.2 改进型分水岭算法实验

标记前景即标记开闭运算后 EOS 的局部极大值,降低伪极小值,改善过分割现象。采用提取局部极大值标记 EOS 后,有些 EOS 并没有被标记出来,并且还有多余的标记点,如图 6(a)所示,因此需要清理标记斑点的边缘后再进行标记。图 6(b)是通过 MATLAB 的 `bwareaopen` 函数以及改进后提取的局部极大值得到的结果,可见,多余的标记点被清除,细胞间的桥梁被腐蚀掉,标记效果更好。图 6(b)中的红色标记区域为前景,通过计算“骨架影响范围”来细化背景或对前景进行 SKIZ 或 BW 运算即可降低伪极小值。计算欧几里得距离使其仅在背景和前景标记范围内识别局部极小值,降低伪极小

值的范围,提高分割的准确率。

二维图像中欧几里得距离的计算公式为

$$d = \text{sqrt}[(x_1 - x_2)^2 - (y_1 - y_2)^2], \quad (13)$$

式中: x_1, x_2, y_1, y_2 分别为图像中两点的横纵坐标值。

三维图像中欧几里得距离的计算公式为

$$d = \text{sqrt}[(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2], \quad (14)$$

式中: $x_1, x_2, y_1, y_2, z_1, z_2$ 为图像中两点的坐标值。

n 维图像中欧几里得距离的计算公式为

$$d = \text{sqrt} \left[\sum_{i=1}^n (x_{i1} - x_{i2})^2 \right], \quad (15)$$

式中: x_{i1}, x_{i2} 分别为坐标值。

距离变换结果如图 6(c)所示。

4.3 改进型分水岭算法的分割效果

标记前后景以及对距离变换进行改进后,本文采用分水岭算法对消化道黏膜标本病理切片中的 EOS 进行分割,分割效果如图 7 所示。在图 7(a)、(b)中,EOS 已经与背景形成了分水岭脊线,背景已被滤除。为了验证分割效果,本文给出了分水岭脊线与原图叠加的效果图,即图 7(c)。由图 7(c)可见,EOS 已与背景进行了分割。

本文采用改进型分水岭算法对病理切片进行了 200 组实验,以验证改进型算法的稳定性。

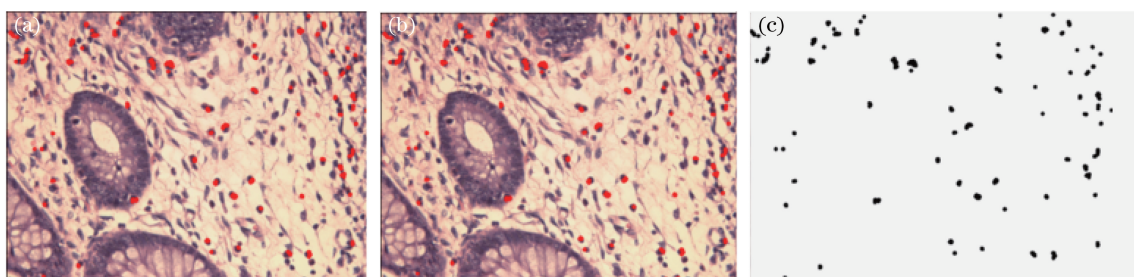


图6 前景标记后的结果。(a)提取局部极大值的结果;(b)改进后提取局部极大值的结果;(c)距离变换
Fig. 6 Results after foreground marking. (a) Result after extracting local maximum;
(b) result after extracting local maximum after improvement; (c) distance transformation

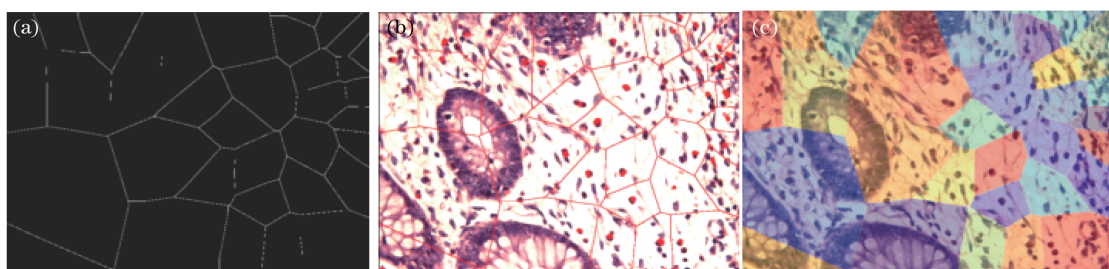


图7 改进分水岭算法的结果。(a)分水岭脊线;(b)对象边缘叠加原图后的图像;(c)标记矩阵叠加原图
Fig. 7 Results of improved watershed algorithm. (a) Watershed ridge line; (b) image by overlaying
original image on object edge; (c) marker matrix overlay original image

5 改进分水岭算法与传统分水岭算法的对比实验

5.1 EG病理图像分割效果对比

本研究对嗜酸性粒细胞胃肠炎(EG)病理图像

分别使用改进分水岭算法与传统分水岭算法进行了200组实验,并从中随机选取三组进行说明,以验证改进分水岭算法的稳定性。EG病理图像细胞分割效果对比图如图8所示。可见:传统分水岭算法存

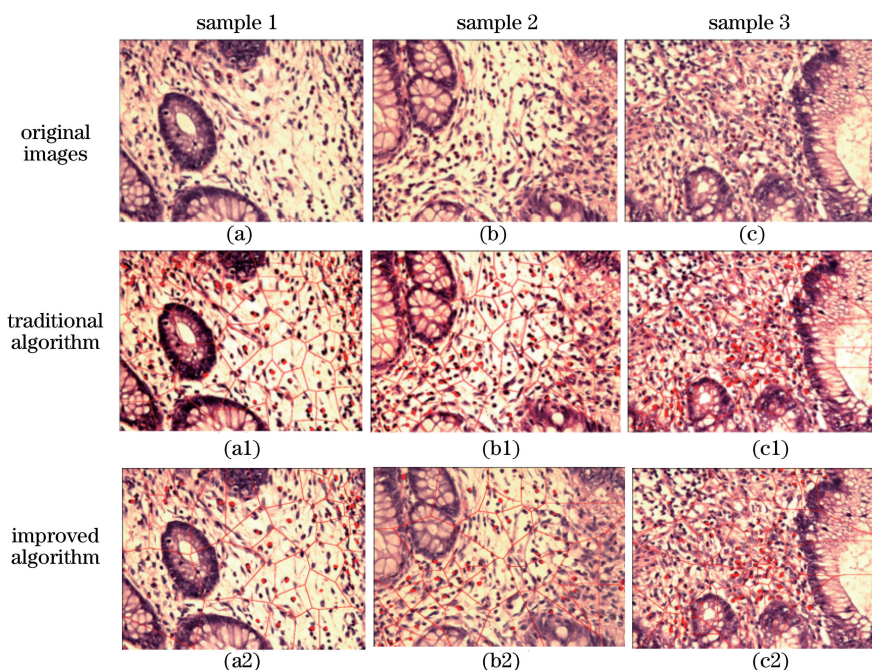


图8 改进分水岭算法与传统分水岭算法的分割效果
Fig. 8 Segmentation of improved and traditional watershed algorithms

在过分割、伪极小值识别和分割效果杂乱的现象;改进分水岭算法对 EOS 的识别更加精确,降低了对伪极小值的识别,分水岭脊线更加清晰。

5.2 EG 病理图像分割准确率的对比

本文在实验过程中分别记录了改进分水岭算法与传统分水岭算法对 EOS 的计数结果,并将其与病理医生的金标准进行了对比。此外,本文还计算了改进分水岭算法和传统分水岭算法的准确率及过分割率,实验结果如表 1 所示。EOS 的频数直方图如图 9 所示。表 1 和图 9 中的数据是在 200 组数据中随机抽取的 8 组实验数据。在表 1 中,改进分水岭算法对 EOS 的分割准确率为 95.0%,较传统分水岭算法有了明显提升,平均过分割率也由 10.7%降低为 2.6%。

图 9 为 8 组数据的分布直方图,可见:传统分水

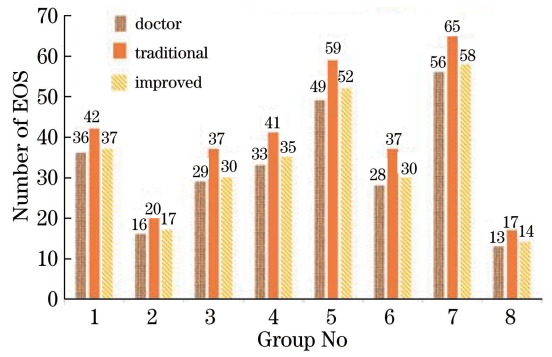


图 9 EOS 频数分布直方图

岭算法对 EOS 的计数与医生的读数相差较大,改进型分水岭算法对 EOS 的计数与医生的计数相近。表 1 和图 9 均表明改进分水岭算法不但提高了准确率,也降低了过分割现象。

表 1 改进分水岭算法与传统分水岭算法的实验数据

Table 1 Experimental data of improved and traditional watershed algorithms

Cell image	EOS number from doctors	Traditional algorithm			Improved algorithm		
		EOS number	Accuracy rate /%	Over divided rate /%	EOS number	Accuracy rate /%	Over divided rate /%
1	36	42	83.3	7.7	37	97.2	1.4
2	16	20	80.0	11.1	17	94.1	3.0
3	29	37	72.4	12.1	30	96.6	1.7
4	33	41	75.8	10.8	35	94.0	2.9
5	49	59	79.6	9.3	52	93.9	3.0
6	28	37	67.9	13.8	30	93.0	3.4
7	56	65	83.9	7.4	58	96.4	1.8
8	13	17	69.2	13.3	14	92.9	3.7

对 200 组实验结果进行了统计,得到了 EG 病理图像分割准确率和过分割率的频率折线图,如图 10、11 所示。可见:改进分水岭算法的平均分割准确率由传统分水岭算法的 84.1%提高到 95.0%,平均过分割率由 13.4%降为 3.7%。在图 10 和图 11

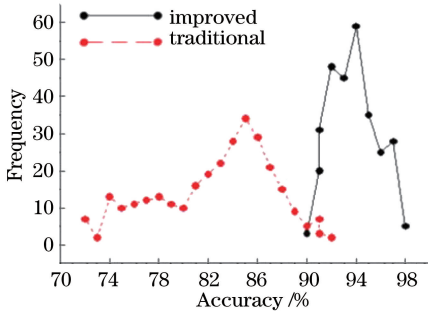


图 10 改进分水岭算法与传统分水岭算法的准确率频数对比图

Fig. 10 Accuracy frequency of improved and traditional watershed algorithms

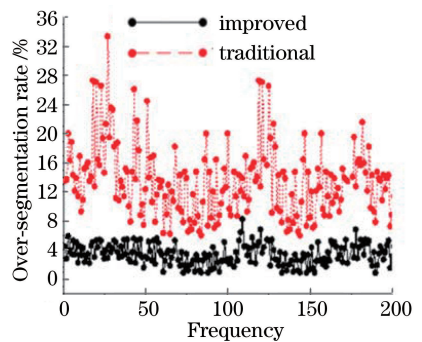


图 11 改进分水岭算法与传统分水岭算法的过分割率对比图

Fig. 11 Over-segmentation rate of improved and traditional watershed algorithms

中还可以看出:改进分水岭算法的准确率和过分割率较传统分水岭算法更加稳定,准确率的相对标准方差由 5.8%降为 2.2%,程序运行时间也有所下降(由传统分水岭算法的 40 s 降低至改进分水岭算法的 27 s 左右)。

6 结 论

EG 的诊断依据为 EOS 在胃肠黏膜标本病理切片中的数量是否超标。为提高医疗诊断的效率和准确率,本文利用计算机图像分析算法,对消化道黏膜标本病理切片图像中的 EOS 进行了自动识别。本文采用鲁棒性较强的分水岭算法作为识别 EOS 的核心算法,并通过距离变换和前后景标记的改进算法,解决了传统分水岭算法中的过分割问题,提高了识别计数的准确性和稳定性。

本文分别采用传统分水岭算法和改进分水岭算法对病理切片进行了 200 组比对实验,并记录了病理医生以及传统、改进分水岭算法对 EOS 的计数。将实验结果与病理医生的金标准进行比对,结果发现,与传统分水岭算法相比,改进分水岭算法的准确率有明显提升(平均准确率由 84.1% 提高为 95.0%),系统稳定性也有所改善(平均准确率的相对标准方差由 5.8% 降低到 2.2%,平均过分割率由 13.4% 降低为 3.7%),病理切片处理系统的运行时间由 40 s 降低为 27 s 左右。

本研究团队与保定市儿童医院病理科进行了长期合作,研究结果可以作为参考值辅助病理医生对 ES 进行诊断,有较高的实际应用价值。在后续研究中,本团队拟通过加入聚类算法等进一步提高分水岭算法的性能。

参 考 文 献

- [1] Chen F. Research on the typing and parallelization of pathological tissue section images [D]. Guiyang: Guizhou University, 2019: 1-7.
陈凡. 病理组织切片图像的分型识别及其并行化研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2019: 1-7.
- [2] Soille P J, Ansoult M M. Automated basin delineation from digital elevation models using mathematical morphology [J]. Signal Processing, 1990, 20(2): 171-182.
- [3] González-Betancourt A, Rodríguez-Ribalta P, Meneses-Marcel A, et al. Automated marker identification using the Radon transform for watershed segmentation [J]. IET Image Processing, 2017, 11(3): 183-189.
- [4] Koyuncu C F, Akhan E, Ersahin T, et al. Iterative h-minima-based marker-controlled watershed for cell nucleus segmentation [J]. Cytometry. Part A : the journal of the International Society for Analytical Cytology, 2016, 89(4): 338-349.

- [5] Guo J J, Xu M, Kong L A. People counting algorithm based on improved HOG features [J]. Information Technology and Informatization, 2019 (3): 81-84.
郭晶晶, 许萌, 孔令爱. 基于改进 HOG 特征的人数统计算法 [J]. 信息技术与信息化, 2019(3): 81-84.
- [6] Riggle K M, Wahbeh G, Williams E M, et al. Perforated duodenal ulcer: an unusual manifestation of allergic eosinophilic gastroenteritis [J]. World Journal of Gastroenterology, 2015, 21(44): 12709.
- [7] Zhao Q H, Wang Y H, Gao X Y, et al. Filtering evaluation method of phase images based on smooth spline fitting [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(8): 0815020.
赵琪涵, 王永红, 高新亚, 等. 基于平滑样条拟合的相位图像滤波评价方法 [J]. 光学学报, 2018, 38(8): 0815020.
- [8] Zhang J G, Feng W Z, Hu C H, et al. Image segmentation method for forestry unmanned aerial vehicle pest monitoring based on composite gradient watershed algorithm [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 93-99.
张军国, 冯文钊, 胡春鹤, 等. 无人机航拍林业虫害图像分割复合梯度分水岭算法 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 93-99.
- [9] Gush T, Bukhari S B A, Haider R, et al. Fault detection and location in a microgrid using mathematical morphology and recursive least square methods [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2018, 102: 324-331.
- [10] Yu W H. A mathematical morphology based method for hierarchical clustering analysis of spatial points on street networks [J]. Applied Soft Computing, 2019, 85: 105785.
- [11] Stringhini R M, Welfer D, Dornellas M C, et al. A mathematical morphology-based filter for noise reduction and detail preservation in low-dose dental CT images [J]. Studies in health technology and informatics, 2019, 264: 253-257.
- [12] Das J K, Choudhury P P, Chaturvedi N, et al. Ranking and clustering of *Drosophila olfactory* receptors using mathematical morphology [J]. Genomics, 2019, 111(4): 549-559.
- [13] Shirazi S H, Umar A I, Naz S, et al. Efficient leukocyte segmentation and recognition in peripheral blood image [J]. Technology and Health Care, 2016, 24(3): 335-347.

- [14] Anter A M, Hassenian A E. CT liver tumor segmentation hybrid approach using neutrosophic sets, fast fuzzy c-means and adaptive watershed algorithm [J]. Artificial Intelligence in Medicine, 2019, 97: 105-117.
- [15] Gamarra M, Zurek E, Escalante H J, et al. Split and merge watershed: a two-step method for cell segmentation in fluorescence microscopy images [J]. Biomedical Signal Processing and Control, 2019, 53: 101575.
- [16] Pang C Y, Liu J K. Improved LFP algorithm on leukocyte image texture feature extraction and recognition [J]. Acta Photonica Sinica, 2013, 42 (11): 1375-1380.
庞春颖, 刘记奎. 改进的 LFP 算法在白细胞图像纹理特征提取与识别中的应用 [J]. 光子学报, 2013, 42(11): 1375-1380.
- [17] Hou H, Shi Y X. Application of the improved watershed algorithm based on distance transform in white blood cell segmentation [J]. Computing Technology and Automation, 2016, 35(3): 81-84.
侯慧, 石跃祥. 基于距离变换的改进分水岭算法在白细胞图像分割中的应用 [J]. 计算技术与自动化, 2016, 35(3): 81-84.