

doi:10.16652/j.issn.1004-373x.2017.06.026

基于Canny边缘检测和外观特征的微血管瘤检测方法

薛岚燕^{1,2}, 刘杜鹃², 陈艺慧³

(1.福建农林大学 计算机与信息学院, 福建 福州 350002; 2.福州大学 物理与信息工程学院, 福建 福州 350108;
3.厦门大学 信息科学与技术学院, 福建 厦门 361005)

摘要: 糖尿病性视网膜病变进行早期筛查可以减少疾病的发展并且阻止随后的视力损害。微血管瘤是糖尿病性视网膜病变的早期临床症状,可以通过微血管瘤检测对糖尿病性视网膜病变进行早期筛查。针对眼底图像中视网膜血管、视盘、渗出物以及微血管瘤之间的相互关系,在红色通道和绿色通道加权图上定位出视盘,在绿色通道上采用基于简单统计的自适应双阈值Canny算子进行边缘检测,并进行封闭区域的填充。设定阈值消除大面积对象并移除视网膜血管、视盘和渗出物得到微血管瘤的候选区域,最后根据形状特征和颜色特征从候选区域中得到真正的视网膜微血管瘤。实验结果表明,该算法能够有效提取视网膜眼底图像中的微血管瘤,敏感性和阳性预测值分别达到92%和86%,优于现有一些典型的微血管瘤检测方法,能够精确地检测出微血管瘤,可用在糖尿病性视网膜病变早期筛查中。

关键词: 糖尿病性视网膜病变; 微血管瘤; Canny算子; 区域填充

中图分类号: TN911.23-34; TP391.4; TH79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-373X(2017)06-0103-06

Microaneurysm detection method based on Canny edge detection and appearance feature

XUE Lanyan^{1,2}, LIU Dujian², CHEN Yihui³

(1. College of Computer and Information Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China;
2. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;
3. School of Information Science and Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, China)

Abstract: The early screening of the diabetic retinopathy can restrain the development of disease and prevent the subsequent vision impairment. The microaneurysm is the earliest clinical sign of the diabetic retinopathy, and its detection can perform the early screening for the diabetic retinopathy. Considering the interrelation among the retinal blood vessel, optic disc, exudates and microaneurysm in the eye ground image, the optic disc is located in the weighted images of the red channel and green channel. The adaptive dual-threshold Canny operator based on simple statistics is adopted in the green channel to perform the edge detection, and fill the enclosed region. The threshold is set to eliminate the large area objects, and remove the retinal blood vessel, optic disc and exudates to acquire the candidate area of the microaneurysm, in which the real retina microaneurysm is obtained according to the shape feature and color feature. The experimental results show that the method can extract the microaneurysm in the retina eye ground image, the sensitivity and positive predictive values can reach up to 92% and 86% respectively, the method is superior to some typical microaneurysm detection methods, can detect the microaneurysm accurately, and is useful for the early screening of the diabetic retinopathy.

Keywords: diabetic retinopathy; microaneurysm; Canny operator; region filling

0 引言

视网膜是用于研究早期糖尿病微血管并发症的重要窗口,糖尿病性视网膜病变的早期征兆可以用于确认病人存在视力威胁并发症的风险,晚期糖尿病性视网膜

病变是导致成年人失明的主要原因^[1]。因此,糖尿病患者定期检查眼睛可以避免糖尿病性视网膜病变。糖尿病患者的糖尿病性视网膜病变的早期筛查和诊断可以减少50%的失明风险^[2-3]。由国际糖尿病联盟在2013年的统计数据显示在20~79岁年龄段中,全球糖尿病患者已达3.82亿,中国糖尿病患者约为9 840万人,居全球之首。微血管瘤是糖尿病性视网膜病变的早期临床症状,通过对微血管瘤的检测可以对糖尿病性视网膜病变进行早期筛查。在病理学上,微血管瘤是毛细血管壁充血

收稿日期:2016-07-06

基金项目:国家自然科学基金项目(60827002);福建省自然科学基金项目(2012J05116);福建省教育厅项目(JA13037)

膨胀而成,一般认为微血管瘤是较小呈圆形红色的暗斑,其直径小于125 μm ;而出血斑相对来说同为红色病灶但其直径较大,形状不一^[4]。目前国内外学者关于微血管瘤检测的方法大致可以分为3类:

(1) 数学形态学方法。Hipwell等人应用改进的形态学高帽变换算法在不含红色的眼底图像中实现了微血管瘤的检测^[5]。Zhang等人提出了一种基于自适应多尺度形态学技术的眼底图像中点状病灶检测的方法^[6]。

(2) 分类器方法。Quellec等人提出了在小波域上基于模板匹配方法来检测微血管瘤^[7]。作者通过寻求最佳的小波基来区分病变和非病变。微血管瘤采用二维旋转对称性冠以高斯函数来建模,小波基通过使用提升方案框架进行数值优化设计得到。Niemeijer等提出了基于像素分类的检测系统,将红色病变与背景分离,在去除血管后获得红色病变候选区域,并利用所有特征和K近邻分类器对红色病变候选对象进行分类^[8];Bob等利用稀疏表特征分类器,区分MA和非MA^[9];

(3) 滤波器方法。2009年,Mizutani等人采用双环滤波对绿色通道检测微血管瘤^[10],其次消除病变的血管,并利用形状特征对候选病变进行检测,并通过人工神经网络方法对候选点的12个特征进行分类,从候选病变中分离出微血管瘤。2012年,Hatanaka等人将血管移除后^[6],使用主成分分析法选择28个成分,并利用基于规则方法和人工神经网络方法将候选病变分为微血管瘤和非微血管瘤。

本文的工作重点是针对眼底图像中视网膜血管、视盘、渗出物以及微血管瘤之间的相互关系,在红色通道和绿色通道加权图上定位出视盘,在绿色通道上采用基于简单统计的自适应双阈值改进Canny算子进行边缘检测,并进行封闭区域的填充。设定阈值消除大面积对象并移除视网膜血管、视盘和渗出物得到微血管瘤的候选区域,最后根据形状特征和颜色特征从候选区域中得到真正的视网膜微血管瘤。

1 算法实现的关键技术

文中实验眼底图像是采用HEI-MED数据库,该数据库是美国哈密尔顿眼科研究所为训练和测试硬性渗出检测算法和黄斑水肿而设立的数据集,分辨率^[11]为2 196×1 958像素。图1为本文算法的流程图。为了规范视网膜图像并减小计算量,首先把原始彩色图像宽度调整为750,并保持宽高比。

1.1 预处理

1.1.1 通道选取

如图2所示,从数字眼底照相机获得的彩色眼底图

像一般为RGB格式,图像中的每一像素均由R,G,B三个分量组成,且三个分量有着不同的灰度特征。由于蓝色分量包含视盘的信息非常少,且包含较多的噪声,血管、黄斑及红色病灶在绿色分量中对对比度最好。因此,本文的视盘检测在红色分量和绿色分量加权上进行处理^[12],如式(1)所示,微血管瘤检测在绿色通道上进行处理。

$$I = k \cdot I_R + (1 - k) \cdot I_G \quad (1)$$

式中: I_R 和 I_G 分别表示眼底视网膜图像的红色分量和绿色分量; k 为加权系数,在本文中取0.75。

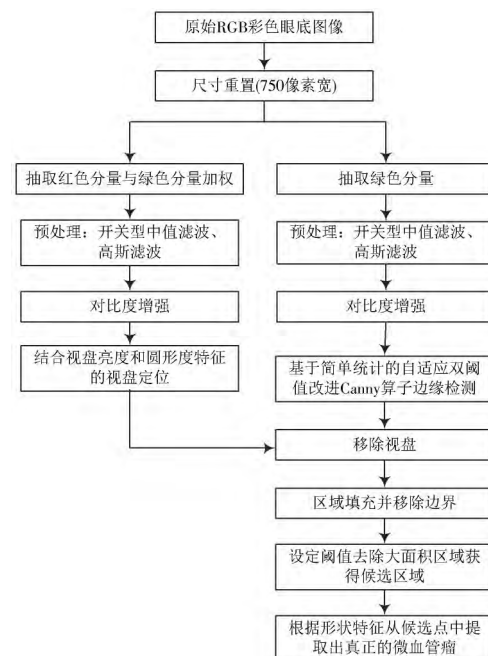


图1 算法流程图

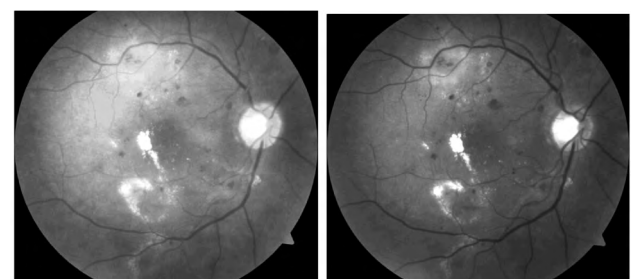


图2 通道选取图

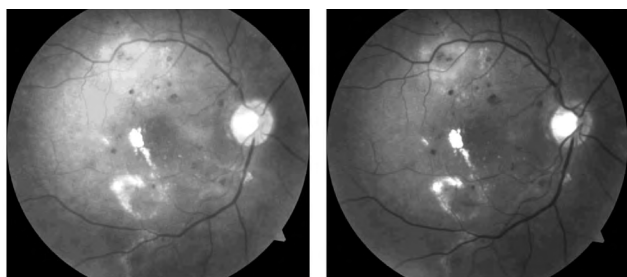
1.1.2 去噪

由于本文采用Canny算子对图像进行边缘检测,在边缘检测中其中一个关键点是图像中的脉冲噪声,而且微血管瘤结构小,容易受到高斯噪声的影响。为了能尽可能得到完整平滑的图像边缘,并且能抑制噪声,综合多种滤波方法,本文首先采用开关型中值滤波对脉冲噪声进行滤除,再采用高斯滤波进行去噪^[13]。

开关型中值滤波器用四个方向分别为0°, 45°, 90°和135°的拉普拉斯算子来检测当前像素点(i, j)是否属于脉冲噪声。将眼底图像与这四个算子进行卷积并取绝对值,设定一个阈值,遍历整幅图像,将绝对值中最小值与阈值进行大小比较,若最小值大于阈值,则判定该像素为脉冲噪声,该坐标点新像素值为中值滤波的结果,否则,像素值不变。具体算法如下:

$$I_{swf}(i, j) = \begin{cases} I_{med}(i, j), & r(i, j) > T \\ I(i, j), & otherwise \end{cases} \quad (2)$$

对眼底图像中值滤波后再采用高斯滤波去除噪声。红色分量与绿色分量加权图以及绿色分量图经过开关型中值滤波和高斯滤波后如图3所示。



(a) 红色与绿色分量加权图滤波效果图 (b) 绿色分量滤波效果图

图3 滤波效果图

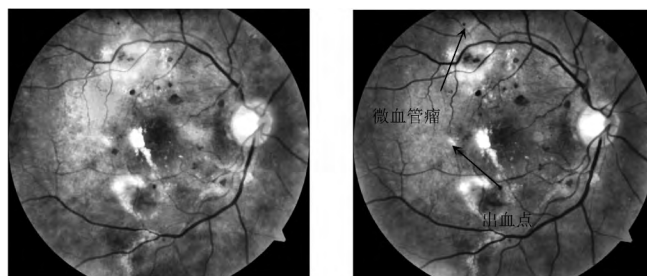
1.1.3 基于灰度级分组的对比度增强

基于灰度级分组法的对比度增强方法的基本思想是,首先对直方图上的分量根据幅度先分组,将分组后的数据平均分配在灰度级上,根据一定的评判准则(如像素间平均距离最大)选出最合适的分组方法,相应就能够得到最好的灰度级分配方式。从而使得图像中集中在直方图某段的像素灰度级得到扩展,这样就能够增大像素灰度级分布范围。这种方法可以实现灰度级上均匀的充分平铺,而不会像经典均衡法会在灰度级上留下过多的空白区域从而导致的对图像过增强或增强不够^[4]。灰度级分组法将图像的像素点在256个灰度级上进行像素点的个数统计。选择像素点的个数最少的两个灰度级,对它们进行合并分组,根据分组后的结果进行灰度级映射并且记录下来。重复上述过程,直至分组的个数为2。选择使像素点间距最大的分组方式所对应的映射完成灰度级映射,实现图像增强。红色分量与绿色分量加权图以及绿色分量图经过对比度增强后如图4所示:

1.2 视盘检测

视盘位于视网膜由黄斑向鼻侧约3.5 mm处,直径约1.5 mm,在视网膜眼底图像中表现为圆形亮黄色区域。由于在视盘区域中或视盘轮廓附近区域可能会存在一些暗色斑块而影响到微血管瘤的检测,因此在检测

微血管瘤病灶前需要去除视盘区域。



(a) 红色和绿色加权图对比度增强效果图

(b) 绿色分量对比度增强图

图4 对比度增强图

视盘自动检测的步骤如下^[15]:

(1) 由于分割视盘时会受到血管干扰,因此采用了形态学操作来擦除视网膜眼底图像中的血管。

(2) 视盘相对于眼底图像中的其他区域亮度更高,所以在此根据视盘亮度特征,选取合适阈值进行分割。

(3) 阈值分割后的眼底图像中将呈现多个视盘候选区域,由于视盘直径约为眼底图像ROI区域的1/7,因此,对候选区域设置上下限阈值,分别为50×50像素与100×100像素,将不满足该范围的区域去除。

(4) 最后利用视盘近似圆形特征,采用质心距离法从候选区域找到圆形度最大的区域中定位出真正视盘。

视盘检测图如图5所示。

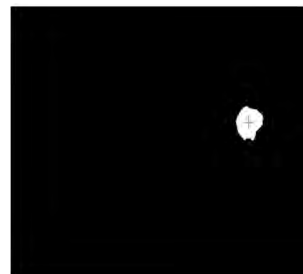


图5 视盘检测图

1.3 病灶检测

由于在免散瞳眼底图像中微血管瘤检测容易受到血管及其交叉或者背景纹理等因素的干扰,本文提出了一种基于Canny边缘检测和形状特征的微血管瘤检测算法,首先利用Canny算子对眼底图像进行边缘提取,然后填充封闭区域,通过面积阈值得到包含微血管瘤候选点的眼底图像,最后根据微血管瘤的形状特征从候选点中提取真正的微血管瘤。

1.3.1 基于简单统计的自适应双阈值改进Canny算子边缘检测

传统的Canny边缘检测算子具有较好的边缘检测和边缘定位能力,与其他的边缘检测方法相比,已经能够较好地检测出边缘了。传统的Canny算子虽然可以

较好地进行边缘检测,但需要人为设定阈值,并且阈值设定得过高或过低都会大大影响到检测精度。因此,本文采用一种基于简单的图像统计的阈值选取方法^[16],该方法通过图像自身的像素灰度特点来选择合适的阈值进行边缘检测。

简单统计法是一种基于简单的图像统计的阈值选取方法,可以直接计算出一幅图像 $I(i,j)$ 的阈值,如下:

$$T = \frac{\sum_i \sum_j e(i,j)I(i,j)}{\sum_i \sum_j e(i,j)} \quad (3)$$

式中: $e(i,j) = \max\{|e_i|, |e_j|\}$, $e_i = I(i-1,j) - I(i+1,j)$, $e_j = I(i,j-1) - I(i,j+1)$; $I(i,j)$ 为像素点的灰度值; e_i 为水平方向的灰度差值, e_j 为垂直方向的灰度差值, $e(i,j)$ 为水平和垂直方向最大的灰度差值。

改进后的Canny算子能够自适应选取合适阈值使得边缘检测准确度大大提高。检测结果如图6所示。

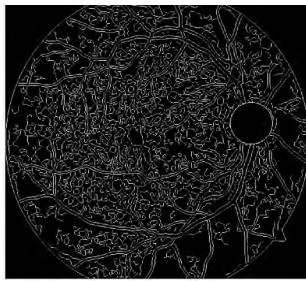


图6 边缘检测图

1.3.2 区域填充并确定候选点

通过边缘检测之后的眼底图像,可以把眼底图像中的血管边缘还有微血管瘤等病灶的边缘都检测出来,然后通过区域填充将封闭的区域进行填充。由于微血管瘤是较小呈圆形红色的暗斑,且直径小于 $125 \mu\text{m}$,通过边缘检测能够将微血管瘤的边缘检测出来,对边缘检测之后的眼底图像上的封闭区域进行区域填充。区域填充采用基于边界跟踪的填充算法,算法如下^[17]:

对封闭曲线的跟踪采用逆时针方向:

(1) 该方法在进行封闭曲线跟踪前需要先确定跟踪的起始点和终止点,按照从上往下,从左到右的顺序,从眼底图像的第1行开始,确定出第1个顶点作为起始点,并标记为第1点,将该像素点设为0;

(2) 将第1点作为中心取8邻域,在该 3×3 模板的第3行按先中间后左右的顺序搜索非零点,搜到的第1个点为顶点左下方的点,标记为第2点,将该像素点设为0;

(3) 重新搜索该模板,在剩余6个像素点中找到第1个非零点作为顶点右侧点,即为边界跟踪的终止点,并将该像素点设为0;

(4) 对第2点也按照第1点的操作步骤,取8邻域,在模板中进行搜索找到非零点并作为第3点,将该像素

点设为0;

(5) 如此反复,将第3点,第4点, ..., 第 n 点都按照步骤(2)~步骤(4)操作,直到搜索完毕;

(6) 对眼底图像求和,当像素值和为0,即代表图像中所有封闭曲线都跟踪完毕,否则重新寻找封闭曲线跟踪的起始点,重复上述步骤。

在眼底图像中确定出各个封闭曲线,对其填充,沿封闭曲线逆时针方向跟踪的顺序,根据前后两点坐标值,判断出相对左向的方向,从后点向左向的点进行直线填充,填充值设为1,若遇到边界值则停止填充。将填充图减去边缘检测图,剩下的即为通过区域填充的区域。在该区域图上为包含有较大面积的血管、渗出物以及微血管瘤等候选点。移除较大面积对象后得到有微血管瘤候选点的图像。为了尽可能地防止微血管瘤被移除,此处同样需要慎重选择阈值。在HEI-MED库中 750×841 分辨率下,最大微血管瘤的直径约为8像素,其圆形面积约为50像素。因此候选斑点尺寸的大小可以选择50个像素作为获取微血管瘤候选点的阈值。区域填充去除边缘并确认微血管瘤候选点图如图7所示。



图7 确认微血管瘤候选点过程图

1.4 候选点的确认

通过区域填充并移除较大面积的斑点后,在图像上包含了微血管瘤以及与微血管瘤面积大约相同的出血点和硬性渗出等封闭区域,还需要进一步从候选点中提取真正的微血管瘤。根据眼底图像中各病灶所具有的特征,如亮度、对比度、尺寸、形状等,本文选择了微血管瘤所具备的近似圆形的形状特征和红色特征从候选点中提取出真正的微血管瘤。

1.4.1 基于形状特征的候选点的确认

在形状上,选取微血管瘤候选点的水平和垂直径向长度的比值为依据。首先选取候选点矩形窗口,如图8(a)所示;计算此候选点最长径向距离 CD ,并以此径向方向用矩形拟合,如图8(b)所示;最后计算水平与垂直径向比例: $R = AB/CD$ 。当候选病灶的 $R \leq 2$ 时,则认为是真正的微血管瘤点^[18]。

1.4.2 基于颜色特征的候选点的二次确认

由于Canny边缘检测算子,可能检测出一些形状大小和微血管瘤几乎一样的结构,通过上述基于形状特征

的候选点确认方法筛选出的结果可能包含了其他的非微血管瘤结构,为了能更加精确得到微血管瘤,将对候选点进行二次确认,利用微血管瘤为红色病灶的特点,找到原彩色图中候选点坐标的位置,判断其颜色是否为红色,若为红色,确认为微血管瘤,否则剔除该候选点。本文按照微血管瘤的形状特征从候选点中最终确认出真正的微血管瘤,如图9所示。

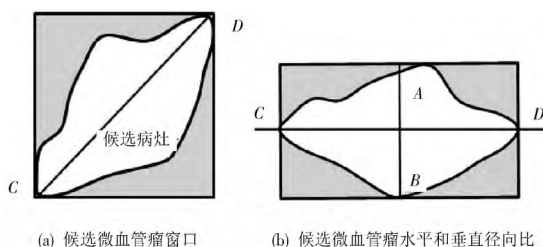


图8 候选微血管瘤形状描述



图9 真正的微血管瘤点

2 实验结果与讨论

为了验证本文所提出的算法能否从眼底图像中快速可靠的检测出微血管瘤,以分别从基于病灶区域水平和图像水平两个方面的指标来验证算法的性能,一般选用敏感性(Sensitivity)、特异性(Specificity)和阳性预测值(Positive predictive value)来评价,具体评价式子如下:

敏感性:

$$Sen = TP / (TP + FN)$$

特异性:

$$Spec = TN / (TN + FP)$$

阳性预测值:

$$Posi = TN / (TP + FP)$$

式中,TP为真阳性,FP为假阳性,即对于算法检测为微血管瘤或为含微血管瘤的眼底图像,与眼科医生人工判断结果的一致和不一致,分别表示真阳和假阳;TN为真阴性,FN为假阴性,即对于算法检测为正常眼底图像,与眼科医生人工判断结果一致和不一致,分别为真阴和假阴。敏感性,又称真阳性率,反映算法能正确判断病变的能力,敏感性越高,漏诊的可能性越小。特异性,又

称真阴性率,反映算法能正确排除病变的能力,特异性越高,误诊的可能性就越小。阳性预测值,即预测阳性结果的正确率。

当算法对病灶区域的检测结果与眼科医生的人工判断结果对比时,算法给出的均是判断为病灶区域,因此只存在真阳、假阳以及漏检的假阴,而不存在真阴。因此,选用病灶区域水平的敏感性和阳性预测值来评价算法检测病灶的性能。

经合作单位福建省附属第一医院眼科中心眼科医生DR诊断,HEI-MED库169幅眼底图像中呈阳性(发生DR)60幅。60幅中人工识别微血管瘤743个。对此60幅存在DR病变的图像进行实验,检测微血管瘤真阳674个,假阳102个。检测结果与眼科医生人工判读进行对比,获得的敏感性和阳性预测值如表1所示,同时表1中还列出近期具有代表性文献[7,18-19]的检测结果。

表1 病灶检测结果对比

方法	病灶	敏感性 /%	阳性预测值 /%
文献[7]方法	微血管瘤	89.62	89.50
文献[19]方法	微血管瘤	88.70	83.10
文献[18]方法	微血管瘤	84.31	—
本文方法	微血管瘤	91.92	86.35

从表1的数据可以看出,本文所提出的方法取得较好的检测结果,由于某些微细血管交叉点引起的亮度突变或微血管瘤就依在血管上,仅单一依靠本文所采用的边缘检测和形状颜色特征并不足以清晰分辨,因此还不能达到最好的效果。

3 结论

针对免散瞳眼底图像中微血管瘤容易受到血管及其交叉或者背景纹理等因素的干扰,本文提出了一种基于Canny边缘检测和形状特征的微血管瘤检测算法,首先在红色通道和绿色通道加权图上定位出视盘,在绿色通道上采用基于简单统计的自适应双阈值改进Canny算子进行边缘检测,并进行封闭区域的填充。然后设定阈值消除大面积对象并移除视网膜血管、视盘和渗出物得到微血管瘤的候选区域,最后根据形状特征和颜色特征从候选区域中得到真正的视网膜微血管瘤。该算法不但实现了视盘的准确定位,并且充分考虑视网膜血管、渗出物、视盘与微血管瘤之间的相互关系,有效精确地检测出了微血管瘤。

参 考 文 献

[1] CHEUNG C Y, IKRAM M K, KLEIN R, et al. The clinical implications of recent studies on the structure and function of

- the retinal microvasculature in diabetes [J]. *Diabetologia*, 2015, 58(5): 871-885.
- [2] RAJA D S S, VASUKI S. Automatic detection of blood vessels in retinal images for diabetes retinopathy diagnosis [J]. *Computational and mathematical method in medicine*, 2015(6): 279-291.
- [3] World Health Organization. About diabetes [EB/OL]. [2010-03-14]. <http://www.who.int/diabetes/facts/en/index.html>.
- [4] 郑绍华,潘林,陈健,等.微动脉瘤与出血自动检测的NPDR图像分型方法[J].*仪器仪表学报*,2014,35(1):59-67.
- [5] HIPWELL J H, STRACHAN F, OLSON J A, et al. Automated detection of microaneurysms in digital red-free photo-graphs: a diabetic retinopathy screening tool [J]. *Diabetic medicine*, 2000, 17(8): 588-594.
- [6] ZHANG B, KARRAY F, ZHANG L, et al. Microaneurysm (MA) detection via sparse representation classifier with MA and non-MA dictionary learning [C]// *Proceedings of 2010 20th IEEE International Conference on Pattern Recognition*. Waterloo: IEEE, 2010: 277-280.
- [7] QUELLEC G, LAMARD M, JOSSELINE P M, et al. Optimal wavelet transform for the detection of microaneurysms in retina photographs [J]. *IEEE transactions on medical imaging*, 2008, 27(9): 1230-1241.
- [8] MICHAEL N, GINNEKEN B V, MEINDERT N, et al. Automatic detection of red lesions in digital color fundus photographs [J]. *IEEE transactions on medical imaging*, 2005, 24(5): 584-592.
- [9] ADAL K, ALI S, SIDIBÉ D, et al. Automated detection of microaneurysms using robust blob descriptors [J]. *SPIE proceedings*, 2013(8670): 185-192.
- [10] MIZUTANI A, MURAMATSU C, HATANAKA Y, et al. Automated microaneurysm detection method based on double ring filter in retinal fundus images [J]. *SPIE proceedings*, 2009(7260): 378-386.
- [11] Hamilton Eye Institute. Macular edema [EB/OL]. [2012-10-24]. <http://vibot.u-bourgogne.fr/luca/heimed.php>.
- [12] LU Shijian. Accurate and efficient optic disc detection and segmentation by a circular transformation [J]. *IEEE transactions on medical imaging*, 2011, 30(12): 2126-2133.
- [13] ZHANG Shuqun. A new impulse detection for switching median filters [J]. *IEEE signal processing letters*, 2002, 9(11): 360-363.
- [14] CHEN Z Y, ABIDI B R, PAGE D L, et al. Gray-level grouping (GLG): an automatic method for optimized image contrast enhancement: part I: the basic method [J]. *IEEE transactions on image processing*, 2006, 15(8): 2290-2302.
- [15] 刘杜鹃,余轮,郑绍华,等.视网膜眼底图像中视盘的检测方法[J].*中国医疗设备*,2014(11):29-32.
- [16] 段军,高翔.基于统计滤波的自适应双阈值改进Canny算子边缘检测算法[J].*激光杂志*,2015,36(1):10-13.
- [17] 张毅,李昌华.基于边界跟踪的任意形状区域填充算法[J].*计算机工程与设计*,2015,36(3):725-728.
- [18] SALEH M D, ESWARAN C. An automated decision-support system for non-proliferative diabetic retinopathy disease based on MAs and Has detection [J]. *Computer methods and programs in biomedicine*, 2012, 108(1): 186-196.
- [19] 高玮玮,沈建新,王玉亮.免散瞳眼底图像中微动脉瘤的高效自动检测[J].*中国生物医学工程学报*,2012,31(6):839-845.

作者简介:薛岚燕(1982—),讲师,博士研究生。主要研究方向为图像处理及其应用。

(上接第102页)

参 考 文 献

- [1] 景晓军,蔡安妮,孙景鳌.一种基于二维最大类间方差的图像分割算法[J].*通信学报*,2001,22(4):72-76.
- [2] 吴成茂,田小平,谭铁牛.二维Otsu阈值法的快速迭代算法[J].*模式识别与人工智能*,2008,21(6):747-756.
- [3] 李寒,王库,曹倩,等.基于机器视觉的番茄多目标提取和匹配[J].*农业工程学报*,2012,28(5):168-172.
- [4] 毛罕平,徐贵力,李萍萍.番茄缺素叶片的图像特征提取和优化选择研究[J].*农业工程学报*,2003,19(2):133-136.
- [5] 吕宏明.基于机器视觉的番茄图像匹配算法研究[D].南京:南京农业大学,2008.
- [6] 陈树人,戈志勇,王新忠.基于Matlab的番茄采摘机械手运动学仿真研究[C]//*农业机械化与新农村建设—中国农业机械学会2006年学术年会论文集(上册)*.镇江:中国农业机械学会,2006:460-463.
- [7] 周颜军,王双成,王辉.基于贝叶斯网络的分类器研究[J].*东北师大学报(自然科学版)*,2003,35(2):22-27.
- [8] 赖军臣,汤秀娟,谢瑞芝.基于G-MRF模型的玉米叶斑病害图像的分割[J].*中国农业科学*,2010,43(7):1363-1369.
- [9] BOISSARDA P, MARTIN V, MOISAN S. A cognitive vision approach to early pest detection in greenhouse crops [J]. *Computers and electronics in agriculture*, 2008, 62(2): 81-93.
- [10] 柴阿丽,李宝聚,石延霞,等.基于计算机视觉技术的番茄叶部病害识别[J].*园艺学报*,2010,37(9):1423-1430.
- [11] 王克如.基于图像识别的作物病虫害诊断研究[D].北京:中国农业科学院,2005.

作者简介:孟祥佳(1988—),女,河北沙河人,硕士研究生。研究方向为人工智能。

籍 颖(1977—),女,河北保定人,副教授,研究生导师。研究方向为图像处理。