

基于自适应阈值和区域生长的 SD-OCT 糖网图像亮斑分割

俞晨琛 陈 强 范 雯 袁松涛 刘庆淮

(南京理工大学计算机科学与工程学院 南京 210094) (南京医科大学 南京 210029)

摘 要 硬性渗出是糖尿病性视网膜病变的一个比较显著的症状,频域光学相干断层视网膜图像中的高信号亮斑与渗出有着密切的联系。为了研究渗出与病变的关系,有必要找到一种提取亮斑的方法。但是,目前关于糖网图像亮斑提取的研究还非常少。首先运用层分割算法限制亮斑所在区域,然后采用自适应阈值法确定种子集合,最后使用基于人类视觉特性的区域生长方法提取出亮斑。实验结果表明,本方法可以较准确地分割出糖网图像中的亮斑。

关键词 频域光学相干断层,糖网,硬性渗出,层分割,自适应阈值,区域生长

中图分类号 TP391 **文献标识码** A

Segmentation of Bright Speckles in SD-OCT Diabetic Retinal Images Based on Self-adaption Threshold and Region Growing

YU Chen-chen CHEN Qiang FAN Wen YUAN Song-tao LIU Qing-huai

(School of Computer Science and Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(Nanjing Medical University, Nanjing 210029, China)

Abstract Hard exudation is one of obvious symptoms in diabetic retinopathy. The bright speckles in SD-OCT(Spectral Domain Optical Coherence Tomography) have close relation with exudation. In order to research the relation between retinopathy and exudation, it is necessary to extract the bright speckles. However, there are few studies about the segmentation of bright speckles. In this paper, we first limited target regions by layer segmentation methods, then determined the seeds sets by self-adaption threshold and finally extracted bright speckles by region growing based on human vision feature. Experiments demonstrate that our method can accurately segment the bright speckles in diabetic retinal images.

Keywords Spectral domain optical coherence tomography, Diabetic retina, Hard exudation, Layer segmentation, Self-adaption threshold, Region growing

1 引言

光学相干断层(Optical Coherence Tomography, OCT)是一种新的生物组织成像技术。由于该技术能够提供微米级的成像模式^[1],并且具有无接触、无侵害的优点,因此被广泛运用于医学领域,特别是在眼科方面的成功运用对眼科疾病的诊断和治疗起到了重要的作用。目前出现的频域光学相干断层技术(SD-OCT)在轴向分辨率上已经达到 $3\mu\text{m}\sim 7\mu\text{m}$,可以清楚显示 10 层视网膜结构^[2],这给医生诊断病变区域提供了极大方便。

糖尿病性视网膜病变(Diabetic Retinopathy, DR)是糖尿病的高度特异性血管并发症。该病变早期一般无明显症状,等病人出现视力下降等症状时已失去最佳治疗时机^[3]。硬性渗出是糖尿病性视网膜病变的一个明显的症状,其主要是视网膜毛细血管渗漏物慢慢吸收以后残留的脂质,大小不一^[3]。

硬性渗出对光具有高反射率,在频域光学相干断层(SD-OCT)成像时表现为高信号亮斑,但是亮斑不一定是渗出,其中很少一部分亮斑可能是血管壁或者棉绒斑,需要根据眼底图像来确定^[4],本文暂不考虑亮斑的判断,着重考虑亮斑的提取。目前,渗出对于糖尿病的诊断还停留在定性意义上的指导,为了能够定量研究其与病变的关系,需要提取出亮斑,而人工提取又比较繁琐,所以有必要寻找一种自动提取亮斑的方法。国内外的研究大多是提取眼底图像中的硬性渗出,有基于支持向量机的方法^[5]、有阈值法^[6]等。类似的研究还有通过随机森林分类器分割出 SD-OCT 视网膜图像中的微囊性黄斑水肿^[7]及根据偏振度一致图像结合阈值法在偏振敏感型光学相干断层(PS-OCT)图像中分割出亮斑^[4],但是在 SD-OCT 图像上自动提取亮斑的研究几乎还没有。

本文提出了一种适用于 SD-OCT 糖网图像的亮斑提取方法。首先使用双边滤波^[8,9]对图像进行去噪处理,然后使

本文受中央高校基本科研业务费专项基金(30920140111004),江苏省六大人才高峰项目(2014-SWYY-024),江苏省“青蓝工程”优秀青年骨干教师项目(D040201),重点病种规范化诊疗研究(BL2014089)资助。

俞晨琛(1992-),男,硕士生,主要研究方向为图像处理, E-mail: 530456099@qq.com; 陈 强(1979-),男,教授,博士生导师, CCF 高级会员,主要研究方向为模式识别、图像处理与分析; 范 雯(1986-),女,讲师,主要研究方向为玻璃体视网膜疾病、眼表疾病; 袁松涛(1974-),男,博士后,主要研究方向为视网膜疾病; 刘庆淮(1963-),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为眼底病。

用基于图论的层分割算法^[10]限制亮斑所在区域,区域的上边界是神经纤维层—神经节细胞层(NFL-GCL)边界,下边界是感光细胞层内节—感光细胞层外节(IS-OS)边界;限制区域后,再运用基于自适应阈值法^[11]确定种子集合;最后根据人类视觉特性得到相似性准则并运用区域生长的方法^[12]分割出亮斑。图1是一幅SD-OCT糖网图像的主要部分,NFL-GCL所指线条和IS-OS所指线条所夹部分是高信号亮斑所在区域,红色标记处为较大的亮斑。

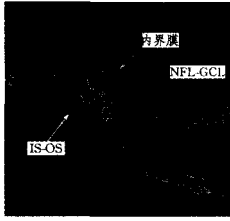


图1 SD-OCT糖网图像中高信号亮斑所在区域示意图

2 糖网图像亮斑分割

通过观察部分糖网图像可知,高信号亮斑一般都处于NFL下方,OS层上方,而NFL和OS层在OCT图像中大部分都表现为较亮的区域,因此,如果采用阈值的方法进行提取,首先必须把这两层之间的区域分割出来,这样既避免了其它层的干扰,又提高了提取的效率。因此,本文分割糖网图像中高信号亮斑的算法的主要流程如图2所示。

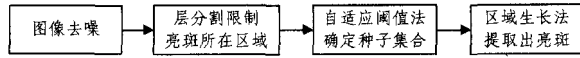


图2 高信号亮斑提取流程

2.1 基于自适应阈值法确定种子集合

由于不同糖网图像的整体灰度和亮斑灰度并不相同,对于不同图像要采用不同的阈值。本文主要参考了文献^[11]中的算法。该算法主要基于最大类间方差法,即大津法,并在此基础上进行了优化。该算法通过不断迭代大津法逐步逼近最佳阈值、不断缩小目标区域的方法来分割出最终目标。

设图像的灰度范围在0到L-1之间,灰度为j的像素个数为 n_j ,则图像总的像素个数为 $N = \sum_{j=0}^{L-1} n_j$,灰度为j的像素出现的概率为

$$p_j = n_j / N, p_j \geq 0, \sum_{j=0}^{L-1} p_j = 1 \quad (1)$$

若选择某一阈值 t ,将图像的像素划分为两类: $C_0 = \{0, 1, \dots, t\}$; $C_1 = \{t+1, t+2, \dots, L-1\}$,则 C_0 和 C_1 类的概率分别为

$$P_0(t) = \sum_{j=0}^t p_j, P_1(t) = \sum_{j=t+1}^{L-1} p_j \quad (2)$$

它们的均值分别为

$$\mu_0(t) = \sum_{j=0}^t j p_j / P_0(t), \mu_1(t) = \sum_{j=t+1}^{L-1} j p_j / P_1(t) \quad (3)$$

图像的总灰度均值为

$$\mu_T = \sum_{j=0}^{L-1} j p_j \quad (4)$$

两类像素的类间方差为

$$\phi(t) = P_0(t) [\mu_0(t) - \mu_T]^2 + P_1(t) [\mu_1(t) - \mu_T]^2 \quad (5)$$

当 $\phi(t)$ 取得最大值时所对应的 t 为最佳阈值,即取最大类间方差时,图像中目标和背景能较好地分开,以上为大津法的主要原理。

对于糖网图像,亮斑可以看作目标,而剩下的就是背景部

分。对于只由背景和背景组成的图像,它的灰度直方图可以看作背景和背景像素灰度的混合分布的概率密度函数。假定该混合分布的两个分量背景和背景都服从正态分布,它们的均值、标准差和先验概率分别 $\mu_0, \mu_1, \sigma_0, \sigma_1, P_0$ 和 P_1 。其中 μ_0 和 μ_1 由式(3)给出, P_0 和 P_1 由式(2)给出, σ_0 和 σ_1 定义如下:

$$\sigma_0(t) = \left(\sum_{j=0}^t [j - \mu_0(t)]^2 p_j / P_0 \right)^{1/2} \quad (6)$$

$$\sigma_1(t) = \left(\sum_{j=t+1}^{L-1} [j - \mu_1(t)]^2 p_j / P_1 \right)^{1/2}$$

不失一般性,当目标和背景分得足够开时,应该满足下式:

$$\mu_1 - \mu_0 > \lambda(\sigma_0 + \sigma_1) \quad (7)$$

式中,参数 λ 是目标和背景灰度分布特性系数,一般在2~3之间取值,本文取2.0。

自适应阈值法的具体实现过程如图3所示,其中输入图像为层分割限制亮斑区域后的图像,并将其灰度范围变换到0到255,流程图中 $L=256$ 。本文修改了原算法菱形框内的判断条件,使得当 λ 过大时算法不陷入死循环,对待处理图像的适应性更强。

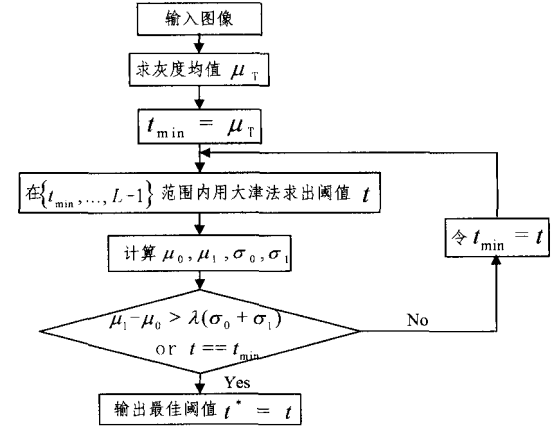


图3 基于自适应阈值法的图像分割流程

2.2 基于人类视觉特性的区域生长

经过对糖网图像中亮斑的观察,亮斑的灰度并不是均一的,其中也有一些灰度较低的像素存在,这些像素并不能在上小节中的阈值分割中提取出来。为了解决这个问题,首先对阈值分割后的图像进行膨胀处理,膨胀窗口为 $[1, 1, 1; 1, 1, 1; 1, 1, 1]$,这也利于排除孤立的异常亮点。

人类视觉对亮度差的敏感程度随着背景亮度呈非线性变化。假设目标亮度为 $I + \Delta I$,背景亮度为 I ,只有当 ΔI 大于某个阈值时,人眼才能将目标从背景中区分出来。这个阈值是由背景的亮度决定的, ΔI 和 I 之间的非线性关系称为阈值亮度比(TVD), ΔI 称为刚可分辨亮度差。本文参考文献^[12]中对 ΔI 的定义:

$$\Delta I = \begin{cases} C, & I \leq a \\ \alpha I, & a < I \leq b \\ \beta I^{\frac{10}{256-I}}, & I > b \end{cases} \quad (8)$$

其中, ΔI 是关于图像灰度 I 的分段函数,其中, α, β, C 为待定参数, α 在 $[0.01, 0.3]$ 之间取值,中间区间的起始灰度值 a 和终止灰度值 b 可以分别在 $[45, 81]$ 和 $[180, 210]$ 之间取值。本文取 $\alpha=0.05, a=50, b=200$;根据在函数间断点取值相等可得到等式 $C=\alpha a$ 和 $\beta I_0^{\frac{10}{256-I}}=ab$,从而计算出 C 和 β 。

当人眼能够识别出目标在背景中的边缘时,边缘上的梯度差必定会大于刚可分辨亮度差 ΔI ,以此作为区域生长的相似性准则,既可以自适应调整相似性条件,又能达到边缘限制的效果,使得生长后的区域锁定在目标边界之内。

下面给出区域生长的具体算法流程:

(1)根据 2.1 小节的自适应阈值分割法分割图像,得到种子集合,并标记。将种子集合排列成一个种子队列。

(2)从种子队列队首取出一个像素点 p ,根据 p 点灰度值计算刚可分辨亮度差 ΔI ,寻找以 p 为中心、 r 为半径的窗口范围内未被标记的像素点集合 Q 。

(3)对于 Q 中的每个元素 q ,统计 q 的邻域内与 p 亮度差小于 ΔI 的像素点的个数 num ,如果 $num > n$,就把 q 加入种子队列队尾并标记;否则丢弃。遍历结束后将种子 p 移出队列。

(4)判断当前种子队列是否为空,若为空,则算法结束;否则继续第(2)步。

为了减少分割误差,本文剔除了亮斑灰度与其边缘外 5×5 范围像素平均灰度差小于 d 的假亮斑。边缘外 5×5 范围像素是指以边缘的每一个像素为中心,5 为半径的窗口所覆盖的且不属于亮斑的像素。参数 r, n 和 d 的取值会影响亮斑的分割效果。本文经过实验验证,发现 r 取 1~3、 n 取 6~7、 d 取 20 时分割效果比较好。具体的分析过程将在下一节的实验结果分析中给出。

3 实验结果分析

本实验运行的环境为 Matlab 2014a。本文总共选取了 40 幅具有高信号亮斑的糖网图像作为实验对象。然后对 2.2 小节的区域生长算法中影响分割效果的参数 r 取值为 1, 2, 3, n 取值为 5, 6, 7, d 取值为 10, 20, 30, 共产生 27 个组合进行实验。由于亮斑一般都不太大,因此区域生长的窗口大小 r 取值小点即可。一般如果某个像素邻域内与亮斑像素灰度差较小的像素越多,该像素就越可能属于亮斑,考虑属于亮斑的最低条件, n 取 5~7 即可,过小会过分割,过大会欠分割。所有实验完成后,选择效果较好的一组定性和定量地评价分割的精度。本文不考虑面积小于 80 个像素单位的亮斑。

3.1 定性分析

下面分别给出当 r 取 2, n 取 6、 d 取 20 时 3 组人工分割和本文自动分割亮斑的对比图,如图 4 所示。

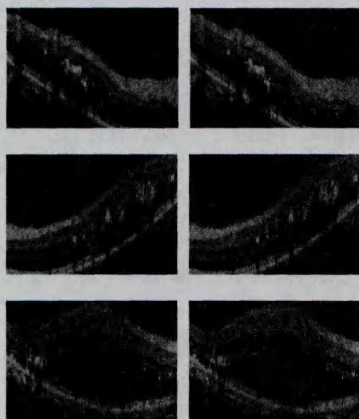


图 4 3 组人工分割与自动分割的对比

从人工分割和自动分割对比发现,本文采用的方法基本能够分割出面积较大的亮斑,对于面积较小或者灰度相对较

小的亮斑还不能很好地分割。图 4 中的分割误差主要是过分割以及小部分漏分割。

3.2 定量分析

本文主要参照文献[13]中的评价准则来衡量本文分割算法的准确性。下面 3 个公式分别定义了 3 个评价准则。

$$Undest = (P \cap H) / (P \cup H) \quad (9)$$

$$Overlap = (P \cup H - H) / (P \cup H) \quad (10)$$

$$Overrest = (P \cup H - P) / (P \cup H) \quad (11)$$

其中, P 和 H 分别表示人工分割和自动分割的亮斑区域。 $Undest$ 表示面积覆盖率, $Overlap$ 表示欠分割率, $Overrest$ 表示过分割率。

通过式(8)~式(10)计算出的 27 组实验的评价结果如图 5 所示。图中每个球代表一组参数对应的实验结果,球的颜色代表结果均值,半径代表标准差,值都为百分比。观察图 5 可以发现,根据本文实验参数的取值, r 和 n 对最终的亮斑分割效果的影响并不是很大,而 d 则对实验效果的影响较大。当 $d=10$ 时,过分割率较大,原因是 d 过小而没有排除假的亮斑;当 $d=30$ 时,欠分割率较大,是由于 d 过大导致部分正确的亮斑也被剔除了;当 $d=20$ 时,分割效果相对较好,不过欠分割率和过分割率都略偏高。表 1 给出了当 $d=20$ 时的实验结果。为了分析分割误差较大的原因,对图 4 的三组人工和自动分割图像分别进行叠加,并通过不同颜色进行标注。叠加的结果如图 6 所示,图中与①颜色相同区域表示人工分割区域,与②颜色相同区域表示自动分割区域,与③颜色相同区域表示两者的重叠区域。

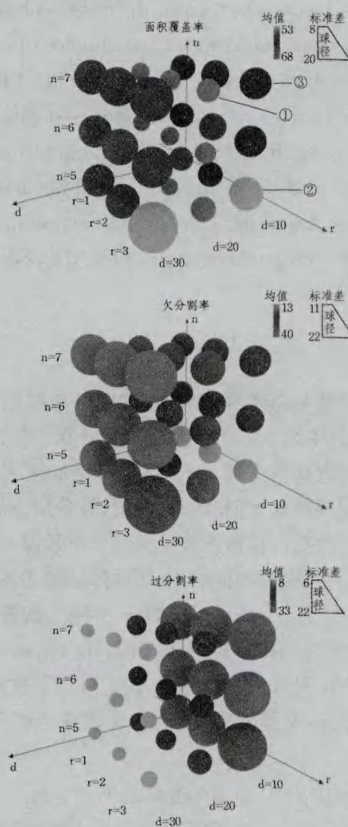


图 5 自动分割亮斑方法评价参数结果(%)

(下转第 139 页)

[3] 刘瑞祯,于仕琪. OpenCV 教程[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007:406-421

[4] 陈林. 一种基于卡尔曼滤波的运动目标跟踪方法[J]. 舰船电子对抗,2011,34(3):67-70

[5] 龚声蓉,刘纯平,季怡. 复杂场景下图像与视频分析[M]. 北京:人民邮电出版社,2013:367-373

[6] 张宏志,张金换,岳卉,等. 基于 Camshift 的目标跟踪算法[J]. 计算机工程与设计,2006,27(11):2012-2014

[7] 邹小东,于海洋,张萍. 基于 Camshift 与 Kalman 滤波算法的动

态目标跟踪[J]. 电视技术,2012,36(15):120-123

[8] 孙凯,刘士荣. 多目标跟踪的改进 Camshift/卡尔曼滤波组合法[J]. 信息与控制,2009,38(1):9-14

[9] 贾茜,谢勤岚. 高速球型摄像机 PTZ 跟踪策略设计及实现[J]. 计算机工程及应用,2011,47(31):197-200

[10] 张雪波,路晗,方勇纯,等. 室外环境下 PTZ 摄像机全自动标定技术及其应用[J]. 机器人,2013,35(4):385-393

[11] 杨亮,周勇,刘歆浏. 基于 PTZ 摄像机的运动目标跟踪控制[J]. 兵工自动化,2014,33(3):65-68

[12] 李宁. Android 开发权威指南[M]. 北京:人民邮电出版社,2013

(上接第 125 页)

表 1 自动分割亮斑方法评价参数结果($d=20$)

参数组合	面积覆盖(%) (均值±标准差)	欠分割率(%) (均值±标准差)	过分割率(%) (均值±标准差)
r=1,n=5	68.19±7.92	16.25±11.85	15.56±9.77
r=2,n=5	67.71±7.96	15.92±11.69	16.37±9.72
r=3,n=5	66.30±10.51	17.07±14.03	16.63±10.49
r=1,n=6	68.44±8.48	16.65±12.48	14.91±9.47
r=2,n=6	68.50±8.37	16.57±12.33	14.93±9.48
r=3,n=6	68.54±8.46	16.57±12.31	14.89±9.57
r=1,n=7	68.34±8.72	16.92±12.94	14.74±9.50
r=2,n=7	68.33±8.72	16.92±12.94	14.76±9.51
r=3,n=7	68.32±8.72	16.91±12.94	14.77±9.52



图 6 人工分割和自动分割叠加图

从图 6 可以看出,造成欠分割率偏高的主要原因是在亮斑边界处的分割有较大的差异和漏分割,前者可能是由于亮斑边界区域比较模糊且灰度较低,人工分割会有一定误差,而自动分割在区域生长过程中将该区域识别为背景,因此造成欠分割。后者可能是由于漏分割的亮斑灰度相比于其他亮斑较小,自动分割是根据阈值法来确定种子集合的,因此在自动分割时未被分割出来。造成过分割率偏高的其中一个原因是在亮斑边界区域存在差异;另一个原因可能就是亮斑本身较小,人工分割没有考虑它或者人工分割出的面积小于本文设定的最小面积值 80,而自动分割出的亮斑面积却大于 80,结果造成误分割。由于亮斑较小,微小的差异也会产生大的误差。综上,本文方法在一定程度上能较准确地分割出亮斑的区域。

结束语 本文主要在视网膜层分割限制亮斑所在区域的基础上,采用自适应阈值结合基于人类视觉特性的区域生长算法来分割出亮斑;同时通过重复实验确定了区域生长算法较好的参数组合来获得较好的分割效果。实验表明本文方法基本能实现自动分割亮斑的功能,但还存在许多需要改进的

地方,特别是在区域生长边界的控制上,可以结合亮斑的边缘特点及其背景信息作进一步改进;也可以适当调整关于视觉特性的相关参数,使得实验结果更加准确。

参考文献

[1] Wojtkowski M, Bajraszewski T, Targowski P, et al. Real-time in vivo imaging by high-speed spectral optical coherence tomography[J]. Optics Letters, 2003, 28(19): 1745-1747

[2] Xu S Z, Huang S H, Ma Q K, et al. Study on intra-retinal layers imaged with ultra-high resolution optical coherence tomography [J]. International Eye Science, 2014, (8): 1494-1497

[3] 周从容,刘波,葛秦,等. 糖尿病视网膜病变与硬性渗出位置相关因素的探讨[J]. 中国医师杂志,2003,5(12):1663-1663

[4] Lammer J, Bolz M, Baumann B, et al. Detection and analysis of hard exudates by polarization-sensitive optical coherence tomography in patients with diabetic maculopathy[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2014, 55: 1564-1571

[5] 潘燕红,潘林. 基于 SVM 的眼底图像硬性渗出检测[J]. 计算机与现代化,2014(4):33-37

[6] Walter T, Klein JC, Massin P, et al. A contribution of image processing to the diagnosis of diabetic retinopathy: Detection of exudates in color fundus images of the human retina [J]. IEEE Transactions on Medical Imaging, 2002, 21(10): 1236-1243

[7] Lang A, Carass A, Swingle E K, et al. Automatic segmentation of microcystic macular edema in OCT. [J]. Biomedical Optics Express, 2014, 6(1): 155-169

[8] Manduchi R, Computer A, Inc. Bilateral Filtering for Gray and Color Images[C]//IEEE International Conference on Computer Vision. Narosa Publishing House, 1998

[9] 王玉灵. 基于双边滤波的图像处理算法研究[D]. 西安电子科技大学, 2010

[10] Chiu S J, Li X T, et al. Automatic segmentation of seven retinal layers in SDOCT images congruent with expert manual segmentation[J]. Optics Express, 2010, 18(18): 19413-19428

[11] 王茜,彭中,刘莉. 一种基于自适应阈值的图像分割算法[J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(4): 521-524

[12] 谭洪波,侯志强,刘荣. 基于人类视觉模型的区域生长图像分割[J]. 中国图象图形学报, 2010, 15(9): 1352-1356

[13] 时佳佳. 视网膜症状性渗出液相关紊乱的自动化分割与定量分析研究[D]. 南京:南京理工大学, 2014