

基于各向异性高斯滤波器的视网膜新生血管增强算法

黄河¹, 任超²

1. 辽宁医学院基础医学院物理学教研室, 辽宁 锦州 121001; 2. 锦州市教师进修学院, 辽宁 锦州 121000

【摘要】目的:视网膜新生血管是区分糖尿病视网膜病变非增殖期和增殖期的重要特征, 视网膜图像中新生血管结构的增强可以帮助医生更准确地诊断糖尿病视网膜病变。本研究分析高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器对视网膜图像中新生血管的增强效果。**方法:**高斯线状滤波器在检测血管拐点时会出现部分截断, 因此本文采用在 x 和 y 方向标准差不相同的高斯函数所构成的呈椭圆形的各向异性高斯滤波器。选取带有新生血管的图像片段, 使用高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器对新生血管进行增强, 比较分析高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器的增强效果。**结果:**与高斯线状滤波器相比, 各向异性高斯滤波器对新生血管有更好的增强作用。**结论:**对于正常血管, 高斯线状滤波器与各向异性高斯滤波器都有明显的增强作用。但对于新生血管, 各向异性高斯滤波器具有更明显的增强作用。

【关键词】视网膜; 新生血管; 增强; 各向异性高斯滤波器

【中图分类号】Q334

【文献标识码】A

【文章编号】1005-202X(2015)06-0887-05

Retinal neovascularization enhancement algorithm based on anisotropic Gaussian filters

HUANG He¹, REN Chao²

1. Department of Physics, College of Basic Medical Sciences, Liaoning Medical University, Jinzhou 121001, China;
2. Jinzhou Continuing Education College for Teachers, Jinzhou 121000, China

Abstract: Objective Retinal neovascularization is an important feature to distinguish non-proliferative diabetic retinopathy and proliferative diabetic retinopathy. The enhancement of neovascularization structure in retinal images can help doctors to diagnose diabetic retinopathy more accurately. The enhancement effects of retinal neovascularization respectively enhanced by Gaussian-line filters and anisotropic Gaussian filters are analyzed in this paper. **Methods** Gaussian-line filters would partially truncate when they were detecting the inflection points. So the anisotropic Gaussian filter with oval shape consisting Gaussian functions with different standard deviations in x and y directions was applied to improve the shortcoming of Gaussian-line filters. Several images containing neovascularization were selected to be respectively enhanced by Gaussian-line filters and anisotropic Gaussian filters. The enhancement results of Gaussian-line filters and anisotropic Gaussian filters were analyzed and compared. **Results** Compared with Gaussian-line filter, anisotropic Gaussian filter had a better enhancement effect on the neovascularization. **Conclusion** Both Gaussian-line filters and anisotropic Gaussian filters have obvious enhancement effects on normal blood vessels. However, compared with the Gaussian-line filter, anisotropic Gaussian filter has a better enhancement effect on the neovascularization.

Key words: retina; neovascularization; enhancement; anisotropic Gaussian filter

前言

视网膜新生血管是区分糖尿病视网膜病变非增殖期和增殖期的重要特征。对糖尿病视网膜病变进行筛查, 尽早诊断和治疗, 是一种低成本、有效的干预措施^[1-2]。目前视网膜病变筛查主要采用眼底相机

拍照, 根据拍摄得到的彩色图像进行糖尿病性视网膜病变的病灶诊断。但由于视网膜的新生血管与一般血管相似度高, 而且一般比较细小, 有的甚至在图片中往往只有1像素宽, 同时还会呈现出伞状、花状、珊瑚状的结构, 如图1所示^[3]。因此很难通过检测一般血管结构的增强算法来进行增强, 但利用一定的增强算法增强视网膜图像中血管结构后可以提高图像分析识别率。

眼底血管结构是视网膜图像分析的一个重要研究领域, 如何对视网膜图像中血管结构进行增强也

【收稿日期】2015-06-10

【基金项目】辽宁省教育厅项目(UPRP20140501)

【作者简介】黄河(1986-), 男(满族), 硕士。Tel: 13840656105; E-mail: lnmuhuanghe@qq.com。

【通信作者】任超(1959-), 男, 副教授, 从事计算机教学与网络管理。

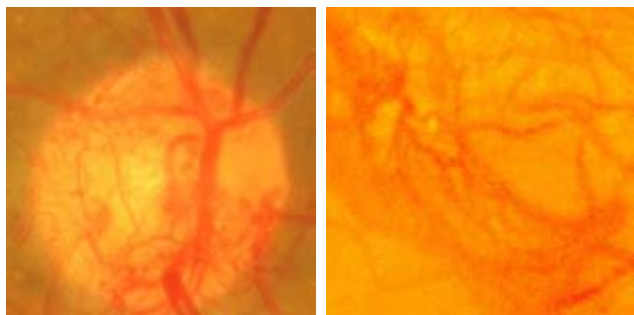


图1 典型的视网膜新生血管病灶
Fig.1 Typical retinal neovascularization lesions

成为了研究者关注的领域。Zwiggelaar等^[4]采用了12个方向的1像素宽的线状滤波器,并选取这12个方向的最大方向作为这个滤波器组的输出,但这种检测滤波器并没有获得较好的增强结果。Chaudhuri等^[5]在大量的血管结构横截面分析的基础上,提出血管结构的横截面轮廓与高斯函数相似,因此可以用横截面为一维高斯函数的高斯线状滤波器进行匹配,已成为视网膜血管增强的常用方法之一。但文献[5]中的算法同时也会对锐利的边缘进行增强,因此Zhang等^[6]对文献[5]中算法进行改进并使用双阈值对增强的结果进行处理,这种处理是基于血管结构增强后只有一个峰值,而对于锐利的边缘则不只是一个峰值。Verma等^[7]则采用基于二值化感知的方法来改善和检测不连续的情况,在高斯线状滤波器输出时,不同方向所占的权重根据阈值的选取而有所不同。然而上述的血管增强算法仅对正常的血管结构有较明显的增强效果,对于新生血管结构增强的研究还处于空白。本文使用各向异性高斯滤波器对视网膜图像新生血管结构进行增强。

1 材料与方法

本文选取了MESSIDOR^[8]视网膜图像数据库作为研究对象。该数据库的视网膜图像采用Topcon TRC NW6 3CCD非散瞳相机进行拍摄,拍摄时采用45°视场。所有图像都具有高分辨率,采用TIFF格式存储。每一张图像都由权威专家根据其病情给出了诊断及评分。从数据库中各选取10张具有新生血管及无新生血管的图像作为研究对象,并从图像中分别截取部分具有新生血管和具有正常血管图片片段进行处理。采用高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器对视网膜图像中的新生血管进行增强。

1.1 高斯线状滤波器

高斯线状滤波器如公式(1)所示^[5],其中 A 为高

斯函数的振幅, x 为匹配模板中匹配血管横截面的方向, y 为匹配血管长度的方向。通过修改参数 σ 及 L , 可以分别修改高斯线状滤波器的尺度及形状。

$$K(x, y) = -A \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right), \text{ for } |y| \leq L/2 \quad (1)$$

图2是一组不同方向的高斯线状滤波器,不同方向的滤波器可以匹配不同方向的血管结构,通过取这组滤波器输出的最大值,即可以获得所匹配的血管结构。



图2 各方向的高斯线状滤波器
Fig.2 Gaussian-line filters with several directions

高斯线性滤波器有一定不足的地方。模板在 x 方向上是连续的,但在 y 方向上却是截断的,因此高斯线状滤波器在检测血管拐点时会出现部分截断。

1.2 各向异性高斯滤波器

为了改进高斯线状滤波器的不足,在 x 方向和 y 方向都使用高斯函数,两个方向标准差不相同的高斯函数,构成呈椭圆形的各向异性高斯滤波器。Leung等^[9]和Geusebroek等^[10]介绍了运用各向异性的高斯滤波器对图像进行处理的快速算法。

为了方便描述各向异性的高斯滤波器,定义了图3的高斯核坐标系。 u 、 v 分别表示各向异性高斯函数的长、短轴方向; x 、 y 表示滤波器矩阵的坐标系; θ 表示两坐标系之前逆时针方向的夹角。

由图3可知这两个坐标系只存在旋转的关系,因此这两个坐标系之间的坐标满足公式(2)。

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos[\theta] & \sin[\theta] \\ -\sin[\theta] & \cos[\theta] \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} \quad (2)$$

在高斯核坐标系中,二维的高斯函数定义为公式(3),其中 A 是高斯函数的幅度, (u, v) 是高斯核坐标系的坐标, σ_u 和 σ_v 分别为二维高斯中长轴和短轴方向的标准差。如果 σ_u 与 σ_v 相等,此时的高斯函数是圆形的各向同性的滤波器。因为血管是管状结构,血管长度一般大于血管的直径,所以本文使用的 σ_u 与 σ_v 并不相等 ($\sigma_u = 3\sigma_v = 3\sigma$), 从而形成各向异性的高斯滤波器。

$$G(u, v) = A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma_u^2} + \frac{v^2}{\sigma_v^2}\right)\right) \quad (3)$$

对公式(3) v 方向求偏导数时,可得一阶各向异

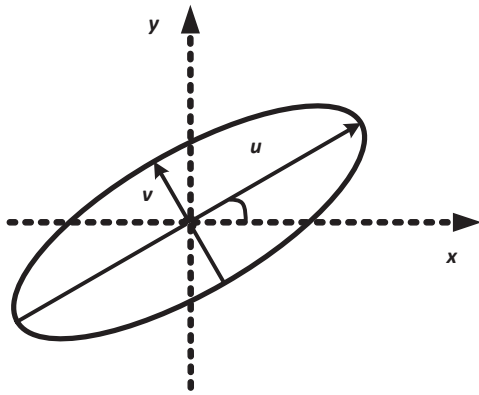


图3 高斯核坐标系

Fig.3 Gaussian ellipse coordinate system

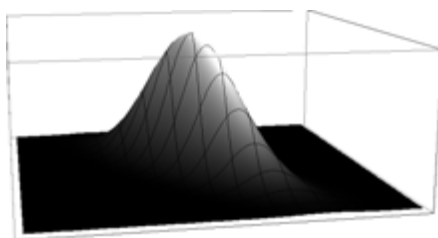
性的高斯函数,如公式(4),如对公式(3) v 方向求二阶偏导数时,即对公式(4) v 方向求导,可得二阶各向异性高斯函数,如公式(5)。通过公式(4)和公式(5),可

以计算视网膜图像中血管结构中沿血管壁的一阶与二阶边缘。

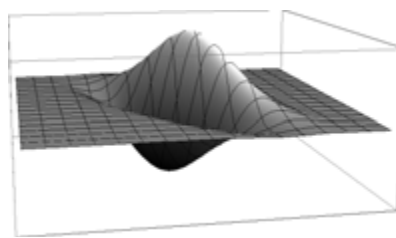
$$G_{1st}(u,v) = \frac{\partial G}{\partial v} = \left(-\frac{v}{\sigma v^2}\right)A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma u^2} + \frac{v^2}{\sigma v^2}\right)\right) \quad (4)$$

$$G_{2nd}(u,v) = \frac{\partial^2 G}{\partial v^2} = \left(-\frac{v^2 - \sigma v^2}{\sigma v^4}\right)A \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{u^2}{\sigma u^2} + \frac{v^2}{\sigma v^2}\right)\right) \quad (5)$$

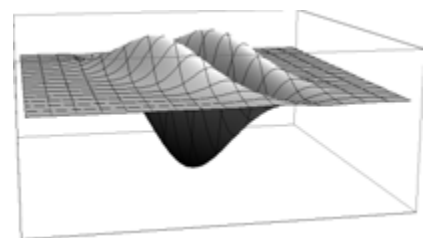
图4中的a、b、c分别展示了各向异性高斯滤波器沿 v 方向零阶(不对公式(3)求导数)、一阶、二阶导数的包络图形。从图中可以看出,一阶各向异性的高斯滤波器可以匹配检测血管边缘,而二阶各向异性的高斯滤波器可以匹配检测二阶结构。通过调整函数的旋转角度,可以令其匹配不同方向的血管结构。通过求出各个方向所响应的最大值,即可增强血管结构。通过改变尺度参数 σ ,可以改变滤波器的尺度,使其匹配不同粗细的血管。



a: Two-dimensional anisotropic Gaussian function



b: First order derivative of Gaussian function



c: Second order derivative of Gaussian function

图4 各向异性高斯函数的包络

Fig.4 Envelopes of anisotropic Gaussian functions

1.3 处理流程

基于各向异性高斯滤波器的视网膜新生血管增强主要有以下几个步骤:(1)取绿色通道。因为在视网膜图像的绿色通道上,血管和其他组织的对比度较高,易于增强血管结构;(2)去除不均光照影响。在拍摄视网膜图像时,闪光灯的效应会在图像上产生不均匀的光照效果。因此在对视网膜血管进行增强前,需要去除不均匀光照以避免其对增强效果的影响。在本文中,使用大模板的均值滤波器作用于视网膜图像可以估计不均匀光照,然后通过绿色通道的图像减去估计的不均匀光照,避免不均匀光照产生的影响;(3)使用各向异性高斯滤波器对图像处理。由于新生血管可向各个方向扩展,因此本文使用12个不同方向的各向异性高斯滤波器,各个滤波器分别取 0° 、 15° 、 45° 360° 作用于图像上。这12个方向的滤波器会分别匹配并增强在这12个方向上的血管结构。计算出这12个方向上滤波器输出的最

大值,并把输出最大值作为最终结果输出,从而很好地突出各个方向上新生血管的特征。

2 结果与讨论

图5中的图像a、b、c分别为原彩色图像、绿色通道图像、运用大模板均值滤波器估计的不均匀光照效果。图5b与图5c相减得到图5d,可以看到图5d中不均匀光照效果已被去除。

图6列出了高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器增强后的视网膜图片。对比高斯线状滤波器增强后的视网膜图片可以看出高斯线状滤波器对于主要血管有所增强,然而对于细小的新生血管不但没有增强,反而对其有一定的模糊作用。这是由于高斯线状滤波器在血管横断面方向具有模糊作用。较小尺度参数的滤波器的作用不会对较粗血管有影响,然而对于较细的新生血管,高斯线状滤波器会在横截面方向起到模糊作用。

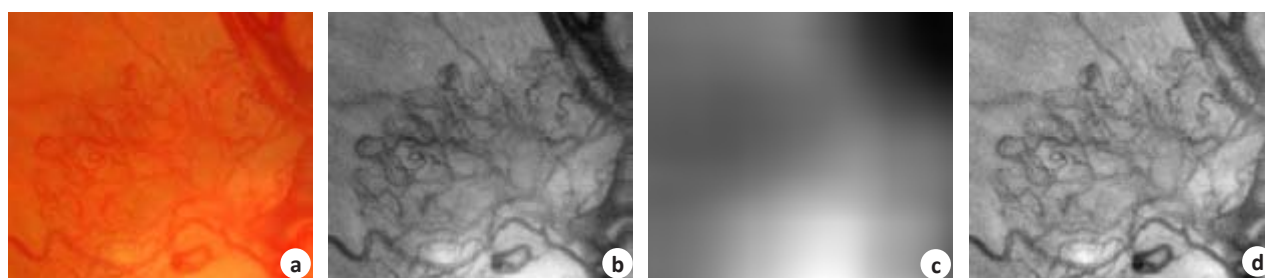


图5 视网膜图像去除不均匀光照效果

Fig.5 Removing uneven illumination of retinal images

a: Original image; b: Green channel; c: Uneven illumination; d: Image after removing the uneven illumination

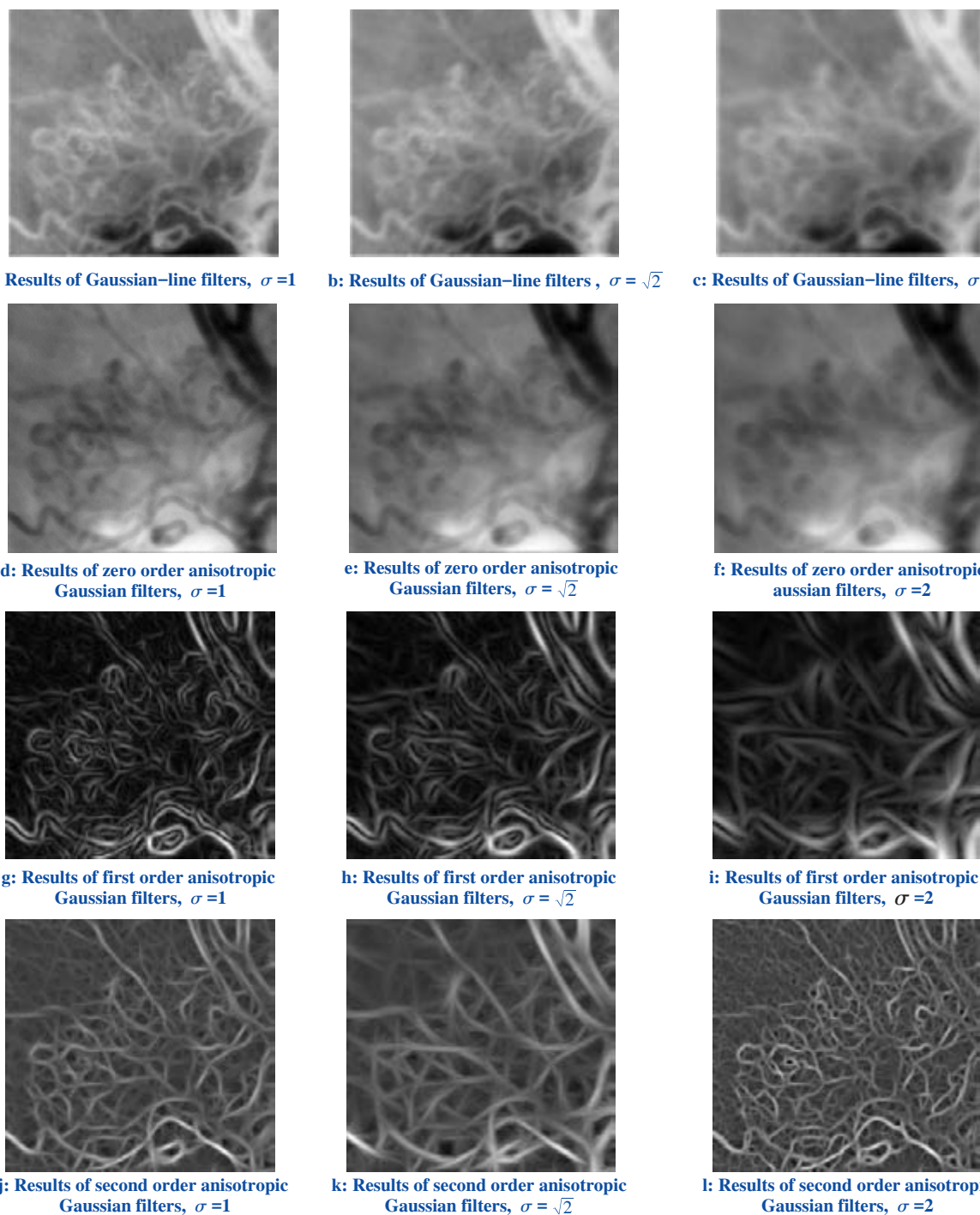


图6 高斯线状滤波器与各向异性高斯滤波器的输出结果对比

Fig.6 Results of Gaussian-line filters and anisotropic Gaussian filters

横向对比图6中的各图像可以看出选取不同的尺度参数 σ 可以不同程度地增强不同粗细的血管结构。较小的 σ 会增强细小的血管结构;较大的 σ 会增强较粗的血管结构。这是由于小尺度参数的滤波器会更好地匹配细小的血管结构,而大尺度参数的滤波器会更好地匹配粗大的血管结构。

纵向对比图6中各图像可以看到不同阶数的各向异性高斯滤波器对血管结构增强的影响。零阶的各向异性高斯滤波器一定程度上增强了血管结构;一阶各向异性高斯滤波器增强了血管结构的边缘;二阶各向异性高斯滤波器很好地增强了新生血管。这是由于二阶各向异性高斯滤波器的拓扑结构可以更好地匹配细小的血管结构。

3 结论

本文研究了高斯线状滤波器和各向异性高斯滤波器对视网膜图像中新生血管的增强效果。结果显示,高斯线状滤波器与各向异性高斯滤波器对于正常血管都有明显的增强作用,而相比于高斯线状滤波器,各向异性高斯滤波器对于新生血管有更明显的增强效果。

【参考文献】

- [1] World Health Organization Media Centre. Fact sheet No 312[EB/OL]. (2013-03-30) [2013-12-01]. <http://www.who.int/mediacentre/fact-sheets/fs312/zh/>.
- [2] Steele C, Steel D, Waine C. Eye essentials: Diabetes and the eye [M]. Beijing: Elsevier Butterworth Heinemann, 2008.
- [3] Hassan SS, Bong DB, Premseenthil M. Detection of neovascularization in diabetic retinopathy[J]. J Digit Imaging, 2012, 25(3): 437-444.
- [4] Zwiggelaar R, Parr TC, Taylor CJ. Finding orientated line patterns in digital mammographic images[C]. Proceedings of the British Machine Vision Conference, 1996: 715-724.
- [5] Chaudhuri S, Chatterjee S, Katz N, et al. Detection of blood vessels in retinal images using two-dimensional matched filters[J]. IEEE Trans Med Imaging, 1989, 8(3): 263-269.
- [6] Zhang L, Li Q, You J, et al. A modified matched filter with double-sided thresholding for screening proliferative diabetic retinopathy [J]. IEEE Trans Inf Technol Biomed, 2009, 13(4): 528-534.
- [7] Verma K, Deep P, Ramakrishnan AG. Detection and classification of diabetic retinopathy using retinal images[C]. 2011 Annual IEEE India Conference, Hyderabad, 2011: 1-6.
- [8] MESSIDOR Database [EB/OL]. (2008-05-20) [2014-04-30]. <http://messidor.crihan.fr/>.
- [9] Leung T, Malik J. Representing and recognizing the visual appearance of materials using three-dimensional textons[J]. Int J Comput Vision, 2001, 43(1): 29-44.
- [10] Geusebroek JM, Smeulders AW, Weijer J. Fast anisotropic Gauss filtering[J]. IEEE Trans Image Process, 2003, 12(8): 938-943.
- [11] Huang GB, Zhu QY, Siew CK. Extreme learning machine: Theory and applications[J]. Neurocomputing, 2006, 70(1-3): 489-501.
- [12] Niemeijer M, Abràmoff MD, Ginneken B. Image structure clustering for image quality verification of color retina images in diabetic retinopathy screening[J]. Med Image Anal, 2006, 10(6): 888-898.
- [13] Saranya K, Ramasubramanian B, Kaja MS. A novel approach for the detection of new vessels in the retinal images for screening Diabetic Retinopathy[C]. 2012 International Conference on Communication and Signal Processing, 2012: 57-61.
- [14] Vatanparast M, Harati A. A feasibility study on detection of Neovascularization in retinal color images using texture[C]. 2012 2nd International Conference on Computer and Knowledge Engineering (ICCKE), 2012: 221-226.
- [15] Marin D, Aquino A, Gegundez AM, et al. A new supervised method for blood vessel segmentation in retinal images by using gray-level and moment invariants- based features[J]. IEEE Trans Med Imaging, 2011, 30(1): 146-158.