

# 眼底血管病理改变特征提取方法研究进展

蒋鹏飞<sup>1</sup>, 李翔<sup>1</sup>, 彭清华<sup>1,2</sup>

引用:蒋鹏飞,李翔,彭清华.眼底血管病理改变特征提取方法研究进展.国际眼科杂志 2019;19(4):582-585

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(No.30772824, 81574031);湖南省科学技术厅项目(No.2017TP1018);长沙市科技计划项目(No.kc1704005)

作者单位:<sup>1</sup>(410208)中国湖南省长沙市,湖南中医药大学;  
<sup>2</sup>(410007)中国湖南省长沙市,湖南中医药大学第一附属医院眼科

作者简介:蒋鹏飞,毕业于湖南中医药大学,在读硕士研究生,研究方向:中医药防治眼表疾病。

通讯作者:彭清华,毕业于湖南中医药大学,博士,教授,博士研究生导师,研究方向:中医药防治眼底病、青光眼、眼表疾病。pqh410007@126.com

收稿日期:2018-09-11 修回日期:2019-02-28

## 摘要

眼底血管是活体能唯一观察到的人体终末血管,许多疾病在眼底血管的病理改变可通过多种手段进行观察,如检眼镜、眼底血管照相、激光共聚焦扫描眼底成像、荧光素眼底血管造影、光学相干断层扫描、多普勒眼底血管成像等,如何将观察到的病理改变准确提取,一直是学术界的难题,本文总结了眼底血管病理学改变的主要观察手段及病理改变的多种提取方法,包括眼底血管追踪法、像素分类法、匹配滤波法、阈值分割法等,并对眼底血管提取后的图像处理方法进行了总结,希望可以促进眼底血管病理特征提取方法的进一步发展,以利于临床疾病的诊断。

关键词:眼底血管;诊断;病理学;视网膜血管;提取方法

DOI:10.3980/j.issn.1672-5123.2019.4.12

## Advances in extraction methods of fundus pathological changes

Peng-Fei Jiang<sup>1</sup>, Xiang Li<sup>1</sup>, Qing-Hua Peng<sup>1,2</sup>

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (No.30772824, 81574031); Key Laboratory of Hunan Provincial Key Laboratory for Preventing and Treating Five Diseases of Obstetrics and Gynecology (No. 2017TP1018); Science and Technology Plan of Changsha City (No.kc1704005)

<sup>1</sup>Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, Hunan Province, China; <sup>2</sup>Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Hunan University of Traditional Chinese Medicine, Changsha 410007, Hunan Province, China

Correspondence to: Qing-Hua Peng. Hunan University of Chinese Medicine, Changsha 410208, Hunan Province, China; Department of Ophthalmology, the First Affiliated Hospital of Hunan University of Traditional Chinese Medicine, Changsha 410007, Hunan Province, China. pqh410007@126.com

Received:2018-09-11 Accepted:2019-02-28

## Abstract

• The fundus vessels are the only blood vessels that can be observed in the living body. The pathological changes of many diseases in the fundus can be observed by various means, such as ophthalmoscopy, fundus angiography, laser confocal scanning fundus imaging, fluorescein fundus angiography, optical coherence tomography, Doppler fundus angiography, etc. How to accurately extract the observed pathological changes has been a difficult problem in academia. This paper summarizes the main observation methods of pathological changes of fundus vessels and various extraction methods of pathological changes. Including fundus vascular tracking method, pixel classification method, matching filtering method, threshold segmentation method, etc. And generalized the image processing methods after fundus vascular extraction, hope to promote the further development of fundus vascular pathological feature extraction method, in order to facilitate diagnosis of clinical disease.

• KEYWORDS: fundus blood vessels; diagnosis; pathology; retinal vessels; extraction method

Citation: Jiang PF, Li X, Peng QH. Advances in extraction methods of fundus pathological changes. *Guoji Yanke Zazhi (Int Eye Sci)* 2019;19(4):582-585

## 0 引言

眼底血管是活体能唯一观察到的人体终末血管,是全身血管相关性疾病的观察窗口,眼底血管观察是目诊最重要的内容之一。一些初期的血管性疾病可能使其形态结构发生变化,如糖尿病视网膜病变<sup>[1-2]</sup>、高血压、肝硬化等,所以可将视网膜血管作为疾病诊断的一个重要指标。因此快速、准确、可靠的眼底血管病理特征提取方法在医学诊断领域有着重要的应用价值。然而,由于在成像和传输过程中受到光照及噪声的影响使得图像质量有所降低,有效的分析十分困难。如何在对比度极低的眼底血管图像中对宽度错综复杂的血管实现自动提取<sup>[3]</sup>,一直是一个难题,本文综述了以往眼底血管病理特征提取的方法,并对其作了述评。

### 1 眼底血管病理改变的观察手段

1.1 检眼镜 检眼镜是眼科观察眼底血管的最常用也是最方便的手段,具有方便、价廉的优点,但由于医生水平差异,往往对于同一血管异常有不同诊断,尤其是一些细微的眼底血管病理改变,此外,此种观察方法不便于记录,也不便于左右眼、治疗前后的对比。

1.2 眼底血管照相 眼底血管照相可对眼底表面的血管

进行直接照相观察,比检眼镜检查更客观,也更便于保存,也便于患眼与正常眼底血管对比以及治疗前后的对比。但眼底血管照相仅能反映眼底视网膜表层的血管情况,无法获得视网膜深层的血管病理表现。

**1.3 激光共聚焦扫描眼底成像** 激光共聚焦扫描眼底成像(CSLO)是通过不同波长的激光对眼底进行快速扫描,从而实现眼底血管形态的展示,即使瞳孔较小( $>1.5\text{mm}$ )也不影响图像质量,眼底血管图像的对比度也较高,其穿透力较强,对于一些屈光间质混浊的患者,也可以使用<sup>[4]</sup>。此外,CSLO还可拍摄眼底视网膜浅层与深层血管,分别进行显示<sup>[5]</sup>,CSLO中的绿激光可在眼底视网膜浅层反射,所呈现的眼底血管比眼底血管照相更加清晰,对于一些微小的出血点更能清楚的显示出来。

**1.4 荧光素眼底血管造影** 荧光素眼底血管造影(FFA)所看到的是动态的、内在的眼底血管图像,且可以看到眼底毛细血管的细微结构变化,如毛细血管扩张、毛细血管闭塞、侧枝管道、动静脉短路和新生血管等。此外,FFA还可以看到眼底血管的功能改变,如血管渗透性增加,在FFA表现为荧光素从血管壁外渗,渗漏的部位与程度也可以在FFA中表现出来。这都是检眼镜与眼底照相不具备的优点。

**1.5 吲哚菁绿脉络膜血管造影** 吲哚菁绿脉络膜血管造影(ICGA)提供与FFA相似的数据,但ICGA提供可视化眼底血管系统而不仅仅是眼底表面的血管<sup>[6]</sup>。吲哚菁绿(ICG)的特性与荧光素不同,在最大吸收光谱、最大荧光波长、与血浆蛋白结合率方面均高于荧光素,但ICG的荧光效应只有荧光素的1/25左右。由于ICG与血浆蛋白结合率高,故能很快的从肝脏中清除,仅需几分钟就可从循环中消失,故重复造影可在短时间内进行,由于ICG主要从肝脏排泄,对于一些肾功能不好的患者可以使用此种造影方法。

**1.6 光学相干断层扫描** 光学相干断层扫描(OCT)利用眼内不同组织对近红外光反射性的不同,通过低相干性光干涉测量仪比较反射光波和参照光波来测定反射光波的延迟时间和反射强度,分析出不同组织的结构和距离,经计算机处理成像,并以伪彩或灰度形式显示组织的断面结构<sup>[7-8]</sup>。相对于眼底血管照相,OCT能反映眼底不同组织血管的病变情况,有其对区分神经上皮、色素上皮与脉络膜,但其对神经上皮层间的结构区分度不够。

**1.7 en-face OCT 冠状面(分层)OCT** en-face OCT是在OCT的基础的重大发展,en-face OCT的图像与视网膜表面平行,因此相对于OCT上只能看到局部的截面的变化,en-face OCT可以从熟悉的角度清楚的呈现与视网膜平行的大面积且全面的眼底血管三维图像<sup>[9]</sup>,en-face图像的外观与选定的表面轮廓和计算en-face图像强度的厚度范围都有关系,因此不能孤立的对en-face图像进行解读<sup>[10]</sup>,而要联合显示受累层的OCT及en-face OCT图像的深度与厚度<sup>[11]</sup>。

**1.8 多普眼底血管成像** 多普眼底血管成像利用多个LED光源分别投射入眼底不同深度的组织,利用不同组织吸收光谱的差异,将眼底不同深度的单色谷阳反射图像进行采集,从而形成单色光谱图像。此图像是以en-face形式显现,与en-face OCT互补,对于一部分疾病的检查可以起到代替血管造影的效果<sup>[12]</sup>。多光谱成像仪中主要用于眼底血管成像的光谱为黄光(580nm)、琥珀光

(590nm)与红光(620~740nm)。

**1.9 相干光断层扫描血管成像** 相干光断层扫描血管成像(OCTA)是一种快速、无创的新型血管成像技术,不需要注射染料,可实现眼底血管分层成像,显示眼底毛细血管结构,量化病灶血流面积和指定区域血流指数。FFA检查时,中央新生血管会有渗漏,不利于观察,OCTA可避免此种情况,而且可以看清新生血管的构造,且肉眼及眼底照相只能观察眼底表面血管,OCTA可以观察到眼底各层面的血管,还可以提取特定的视网膜层来进行血管病变的分层显示,尽可能不包括周围组织的屏蔽效应。因此,OCTA对血管异常更加敏感,并且影像保持更清晰<sup>[13]</sup>。

**1.10 眼底炫彩OCT** 眼底炫彩OCT相较于传统OCT与OCTA,给予眼底更多的色彩,在直接观察上更容易发现一些细微的病理改变。

**1.11 眼部超声** 当屈光间质混浊时,检眼镜、眼底血管照相、造影与COT都难以看清眼底血管,超声可以不受屈光间质的影响,是屈光间质混浊的必备检查手段。其操作便捷,对于眼底血管瘤的诊断意义重大,在超声下眼底血管瘤边界清楚,极具特征。

## 2 眼底血管病理改变的提取方法

在眼底血管病理特征提取之前,首先要确定患者有无用药或各种情况导致的对眼底血管产生的干扰影响,排除这些影响后方可对眼底血管病理特征进行观察、提取、分析。即辨别真病理还是假病理。

目前,数字图像处理系统有一个完整的图像采集、存储、处理、分析和比较功能,眼底图像是利用眼底照相机不同角度对视网膜内壁拍摄图像,并以数字图像的形式存储在计算机中<sup>[14]</sup>,医生可以使用提供的眼底图像分析各种疾病。眼底血管提取方法主要有血管跟踪、像素分类、匹配滤波(matched filter response, MFR)、阈值分割等,但在实际的应用中,通常采用多种方法结合起来提取眼底图像中的血管。

**2.1 眼底血管追踪法** 该方法通过在视网膜视盘处挑选种子点,依照视网膜血管横截面对血管的边缘进行追踪,最终通过对所有种子点的分类来完成血管的提取<sup>[15]</sup>。此方法将血管看作一条线并利用局部信息去追踪血管边缘,可以较为完整的提取出视网膜血管的网络。但是种子点的选取对于该方法的提取性能影响非常大,且对于细小血管的分叉点处理效果较差,对于一些对比度较低的视网膜图像,这种提取方法的准确度不够。

**2.2 眼底血管分类器法** 由于大血管具有较好的对比度,所以先对大血管进行分割,然后对剩余图像中的细小血管进行特征提取,最后将提取出的特征向量整合从而完成分类<sup>[16]</sup>。该方法避免了对每个像素点分类<sup>[17]</sup>,降低了提取复杂度,且能够取得较高的分割准确率,但分类器法对于噪声十分敏感,可能会影响到最终的结果<sup>[18]</sup>。

**2.3 眼底血管匹配滤波法** 视网膜血管的横截面具有高斯曲线型灰度分布,若将建立好的高斯滤波器模板与视网膜血管图像进行不同方向的匹配滤波<sup>[19]</sup>,当滤波器的尺度与血管的宽度在一定范围内相吻合时,相应宽度的血管就得以增强,产生很大的卷积响应<sup>[20]</sup>,生成的响应具有较高的输出信噪比。但是不论是血管结构还是非血管结构均对高斯匹配滤波器有很强的响应,这样会导致错误分割像素点的出现。

针对此种提取方法的弊端,多种多尺度匹配滤波方案

相继被提出,旨在利用不同尺度的滤波器对不同宽度的血管进行增强,并在后续步骤中将其准确提取。有研究发现使用 Gabor 滤波器提取血管的视网膜眼底图像来评估青光眼检测,以形态学操作和阈值处理来提取血管,提高了准确性<sup>[21]</sup>。

**2.4 眼底血管阈值分割法** 眼底图像在传输过程中极易受到光照等外界环境的影响,将会导致视网膜图像具有较低的对比度。而且部分血管存在中央反射现象,会将两根相互靠近的血管错误分割为一根血管,降化了血管分割的准确度。除此之外视网膜中存在的视神经盘、视网膜边界和病变区域等复杂非血管结构,使得视网膜血管的检测难度极大<sup>[22]</sup>。眼底血管阈值分割法<sup>[23]</sup>是基于图像的灰度直方图进行动态的尺度分配和动态的阈值处理。首先将眼底血管分为20个分区(分为4行5列区),并编号(编号从上到下,从左到右依次为1~20),根据位置的不同将20个分区分为三大类,第一类为处于原图像四角的分区,编号为1、4、17、20;第二类为处于原图像中央的分区,编号为6、7、10、11、14、15;第三类为处于原图像边缘的子图像,编号为2、3、5、8、9、12、13、16、18、19。对各大类分区图像的灰度直方图进行分析,以得到有用的特征性信息,然后对眼底血管各大类分区图像进行动态的阈值处理,对提取到的视网膜血管网络进行一系列的后处理操作,完成最终的血管提取。对各个分区图像的灰度直方图进行分析,判断出其对比度高低以及是否含有非血管结构,并依据此结果采用不同的阈值对血管进行分割提取<sup>[24]</sup>。最后将完成分割的各个子图像重新拼接起来,得到完整的视网膜血管网络图。

**2.5 眼底血管迭代分割法** 首先通过全局阈值化血管增强图像来提取分割的眼底血管系统<sup>[25]</sup>,然后通过对手血管增强图像中掩蔽的残留图像的自适应阈值处理来迭代地识别新血管像素,新血管像素区域嵌入到现有血管中,从而导致分段血管结构的迭代增强。随着迭代的进行,与实际血管像素的数量相比,被识别为新血管像素的假边缘像素的数量增加。Roychowdhury 等<sup>[26]</sup>采用一种新的停止标准,适时终止了迭代过程,从而提高了血管分割的准确性,其在眼底血管病理改变图像上的准确度达到93.2%~95.35%。

### 3 眼底血管图像提取后的处理方法

**3.1 去除噪声** 眼底血管的病理图像常常存在噪声,这些噪声会被错误的提取出来,可利用目标物体与噪声点所在区域的几何特征差别,消除图像中的噪声点<sup>[27-28]</sup>。

**3.2 平滑血管边缘** 由于眼底血管图像局部对比度较低,导致部分与血管相邻的背景像素点被错误分割出来,并附着在血管边缘形成了毛刺。为了使提取出的血管网络具有较好的视觉效果并且尽量减少错误分割点,常需要平滑血管边缘。开运算可使物体的轮廓得到平滑,可以断开一些不必要的狭窄连接,还可将物体边缘附着的毛刺去除<sup>[29-30]</sup>。

**3.3 修补眼底血管断点** 眼底部分血管的交叉点和分支点会被当作噪声删除,使血管的连通性遭到破坏。所以需要对这些断点进行修补,以提高血管网络分割的准确度<sup>[31]</sup>。

### 4 总结和展望

目诊是通过观察眼睛各部位的神、色、形态变化来诊断疾病的一种方法,是中医望诊中的一项重要内容。《原

机启微》曰:“目,窍之一也。光明视见,纳山川之大,及毫芒之细,悉云霄之高,尽泉沙之深。”眼底观察是目诊最重要的内容,也最能客观反映机体的生理病理状况<sup>[32-34]</sup>。而眼底诊察中最具鲜明特色的就是眼底血管诊察,临床上眼底血管用于多种疾病诊断,如糖尿病视网膜病变<sup>[35]</sup>。对眼底血管病理特征提取的意义重大,提取出的眼底血管病理图像可以更好的保存,对于一些经验性的眼底血管改变能更好的教学,使初学者或者年轻医师将眼底血管改变与全身性疾病对应起来,若能在大数据、多中心的临床实践中积累足量的眼底血管病理特征图像,在此基础上建立眼底血管诊断方法平台,此平台中包含眼底血管诊断数据库、各类眼底血管病理改变、眼底血管病理改变与疾病的一一对应联系,可将眼底血管诊断发展为一种新颖的、建立于计算机大数据上的科学的诊断方法,这对于各类疾病的诊断、治疗有不可估量的巨大作用。且可通过与大型医院眼科数据库的合作,充分利用眼科所拥有的大量眼部图片资源,与图像处理等现代技术手段相结合,借助信息挖掘技术建立数学模型,可以实现视网膜血管图像特征点自动提取<sup>[36]</sup>,建立基于形态学、基于中心线以及基于海森矩阵的视网膜血管的精确提取方法<sup>[37]</sup>。探讨全身疾病与眼部表现(如眼底颜色、色素多少,血管改变,包括血管管径、血管弯曲度、微血管瘤、新生血管、视网膜分形维数等图像改变,视网膜血氧分析等)的相关性,形成一个如舌诊、脉诊一样的有系统理论和临床支持的研究成果,为疾病预防和诊断服务,应该具有重要的实践价值和良好的开发前景,这些的前提都是一种准确率高的眼底血管图像提取方法。当然,这也将是一个工作量巨大的系统工程,需要包括计算机、中医眼科学、中医诊断学在内的多学科学者共同努力。

### 参考文献

- 1 Nivetha C, Sumathi S, Chandrasekaran M. Retinal blood vessels extraction and detection of exudates using wavelet transform and pnn approach for the assessment of diabetic retinopathy. *International Conference on. IEEE* 2017; 1962-1966
- 2 Jose C, Aju D. A Hybrid Method for Diabetic Retinopathy Diagnosis through Blood Vessel Extraction and Exudates Identification from 2D Fundus Image. *Res J Pharmacy Tech* 2018; 11(3): 1147-1152
- 3 Hassan M, Amin M, Murtza I, et al. Robust Hidden Markov Model based intelligent blood vessel detection of fundus images. *Comput Methods Programs Biomed* 2017 ;151: 193-201
- 4 Ho JH, Liu JH, Chang Y, et al. A Technique for Real-Time Overlap of a Reflection Image and an Autofluorescence Image Using cSLO. *J Med Biological Engineering* 2018; 38(1): 55-62
- 5 Tee TSL, Murray I, Aslam T, et al. Detection of peak fundus autofluorescence (FAF) signals and hyperautofluorescent spots using confocal scanning laser ophthalmoscope (cSLO) with 30° and 55° lenses. *Invest Ophthalmol Vis Sci* 2014; 55(13): 3428
- 6 Berry M, Lucas LJH. Circumscribed choroidal hemangioma: A case report and literature review. *J Optometry* 2017; 10(2): 79-83
- 7 Fenner BJ, Tan GSW, Tan ACS, et al. Identification of imaging features that determine quality and repeatability of retinal capillary plexus density measurements in OCT angiography. *Br J Ophthalmol* 2018; 102(4): 509-514
- 8 Schlegl T, Waldstein SM, Bogunovic H, et al. Fully automated detection and quantification of macular fluid in OCT using deep learning. *Ophthalmology* 2018; 125(4): 549-558

- 9 Arndt C, Costantini M, Chiquet C, *et al.* Comparison between multifocal ERG and C-Scan SD-OCT (“en face” OCT) in patients with a suspicion of antimalarial retinal toxicity: preliminary results. *Doc Ophthalmol* 2018; 136(2): 97-111
- 10 Ginner L, Schmoll T, Kumar A, *et al.* Holographic line field en-face OCT with digital adaptive optics in the retina *in vivo*. *Bio Opt Exp* 2018; 9(2): 472-485
- 11 Eissa MGAM, Abdelhakim MASE, Macky TA, *et al.* Functional and structural outcomes of ILM peeling in uncomplicated macula-off RRD using microperimetry & en-face OCT. *Graefes Arch Clin Exp Ophthalmol* 2018;256(2): 249-257
- 12 Song Y, Tani T, Omae T, *et al.* Retinal blood flow reduction after panretinal photocoagulation in Type 2 diabetes mellitus: Doppler optical coherence tomography flowmeter pilot study. *PloS One* 2018; 13(11): e0207288
- 13 Lyu S, Zhang M, Wang RK, *et al.* Analysis of the characteristics of optical coherence tomography angiography for retinal cavernous hemangioma: A case report. *Medicine* 2018; 97(7):e9940
- 14 Salazar-Gonzalez AG, Kaba D, Li Y, *et al.* Segmentation of the blood vessels and optic disk in retinal images. *IEEE* 2014; 18(6): 1874-1886
- 15 Alam M, Son T, Toslak D, *et al.* Combining ODR and Blood Vessel Tracking for Artery-Vein Classification and Analysis in Color Fundus Images. *Trans Vis Sci Tech* 2018; 7(2): 23
- 16 Orlando JI, Prokofyeva E, Blaschko MB. A discriminatively trained fully connected conditional random field model for blood vessel segmentation in fundus images. *IEEE* 2017; 64(1): 16-27
- 17 Jadhav AS, Patil PB. Classification of diabetes retina images using blood vessel area. *IJCI* 2015; 4(2):251-257
- 18 Patwari MB, Manza RR, Rajput YM, *et al.* Classification and Calculation of Retinal Blood vessels Parameters. IEEE’s International Conferences For Convergence of Technology, Pune, India. 2016
- 19 Roychowdhury S, Koozekanani DD, Parhi KK. Blood vessel segmentation of fundus images by major vessel extraction and subimage classification. *IEEE* 2015; 19(3): 1118-1128
- 20 Maji D, Santara A, Mitra P, *et al.* Ensemble of deep convolutional neural networks for learning to detect retinal vessels in fundus images. *arXiv* 2016;1603-1606
- 21 Balasubramanian T, Krishnan S, Mohanakrishnan M, *et al.* HOG feature based SVM classification of glaucomatous fundus image with extraction of blood vessels. India Conference (INDICON) 2016; 1-4
- 22 Liskowski P, Krawiec K. Segmenting retinal blood vessels with deep neural networks. *IEEE* 2016; 35(11): 2369-2380
- 23 Dash J, Bhoi N. A thresholding based technique to extract retinal blood vessels from fundus images. *Future Computing Inf J* 2017; 2(2): 103-109
- 24 Kromer R, Shafin R, Boelefahr S, *et al.* An automated approach for localizing retinal blood vessels in confocal scanning laser ophthalmoscopy fundus images. *J Med Bio Eng* 2016; 36(4): 485-494
- 25 Neto LC, Ramalho GLB, Neto JFSR, *et al.* An unsupervised coarse-to-fine algorithm for blood vessel segmentation in fundus images. *Exp Sys App* 2017; 78: 182-192
- 26 Roychowdhury S, Koozekanani DD, Parhi KK. Iterative vessel segmentation of fundus images. *IEEE* 2015; 62(7): 1738-1749
- 27 Soorya M, Issac A, Dutta MK. An automated and robust image processing algorithm for glaucoma diagnosis from fundus images using novel blood vessel tracking and bend point detection. *Int J Med Inf* 2018; 110: 52-70
- 28 Arora S, Hanmandlu M, Gupta G. Filtering impulse noise in medical images using information sets. *Pattern Recognition Letters* 2018
- 29 Sarathi MP, Dutta MK, Singh A, *et al.* Blood vessel inpainting based technique for efficient localization and segmentation of optic disc in digital fundus images. *Bio Signal Pro Control* 2016; 25: 108-117
- 30 Roychowdhury S, Koozekanani DD, Kuchinka SN, *et al.* Optic disc boundary and vessel origin segmentation of fundus images. *IEEE* 2016; 20(6): 1562-1574
- 31 Calivá F, Aletti M, Al-Diri B, *et al.* A new tool to connect blood vessels in fundus retinal images. Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2015 37th Annual International Conference of the IEEE 2015: 4343-4346
- 32 彭清华.目诊研究概况.浙江中医杂志 1987; 8 : 337-339
- 33 彭清华,朱文锋.中国民间局部诊法.长沙:湖南科学技术出版社 1995: 66-115
- 34 黄惠勇,胡淑娟,彭清华.中医目诊的研究进展与评述.中华中医药学刊 2013;31(7) : 1479-1483
- 35 Jadhav AS, Patil PB. Detection of blood vessels in retinal images for diagnosis of diabetics. 2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC). 2018
- 36 赵晓芳,林土胜.视网膜血管图像特征点自动提取和分类.计算机工程与应用 2011;47(8):14-17
- 37 郭博书.视网膜图像中血管提取及相关技术的研究.北京工业大学 2013