

# 一种青光眼快速检测系统的开发及应用

沈超<sup>1</sup>, 王斌<sup>2</sup>, 孙继成<sup>3</sup>, 惠铎铎<sup>3</sup>, 林杉<sup>1</sup>

(1. 长安大学 电子与控制工程学院, 陕西 西安 710064;

2. 第四军医大学 航空航天医学系临床教研室, 陕西 西安 710032;

3. 第四军医大学 航空航天医学教育部重点实验室, 陕西 西安 710032)

**摘要:**青光眼是一种常见疑难眼病,是导致人类失明的三大致盲眼病之一。青光眼治疗的关键在于早期发现。但是,医学上检测青光眼步骤复杂繁琐,不适于普通人在日常生活中进行自我检查。因此,文中开发了一种适于普通人自我检查的青光眼快速检测系统。系统首先采用闭运算对瞳孔图像进行预处理;其次,使用基于 $K$ 均值聚类的Canny边缘检测算法提取瞳孔边缘并获得瞳孔横径;接着,通过光刺激下瞳孔横径变化间接得到被检测者瞳孔的运动状况;最后,结合青光眼临床表现判定被检测者是否患有青光眼。实验结果表明,文中检测系统准确、高效且无创。

**关键词:**青光眼;闭运算; $K$ 均值聚类;Canny边缘检测

中图分类号:TP311.5

文献标识码:A

文章编号:1673-629X(2016)04-0191-04

doi:10.3969/j.issn.1673-629X.2016.04.042

## Development and Application of a Rapid Detection System in Glaucoma

SHEN Chao<sup>1</sup>, WANG Bin<sup>2</sup>, SUN Ji-cheng<sup>3</sup>, HUI Duo-duo<sup>3</sup>, LIN Shan<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Control Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China;

2. Clinical Department of Aerospace Medicine of Ministry of Education, the 4th Military Medical University, Xi'an 710032, China;

3. Key Laboratory of Aerospace Medicine of Ministry of Education, the 4th Military Medical University, Xi'an 710032, China)

**Abstract:** Glaucoma is a common stubborn eye disease, which is also one of the three diseases leading to human blindness. The key to prevention of glaucoma diagnosis is early treatment. However, complex and cumbersome step for glaucoma detection in medical is not suitable for ordinary people check in their daily lives. Therefore, a rapid detection system adapted for ordinary self-examination in glaucoma is proposed. Firstly, the system adopts closing operation in the pretreatment process of pupil image. Secondly, it takes the measure of Canny edge detection algorithm based on  $K$ -means clustering to extract the pupil edge and get diameter of the pupil. Then, the movement of the detected pupil could be got indirectly through the changes of pupil diameter under the condition of light stimuli. Finally, a judgment is made whether it is glaucoma combining with clinical manifestation or not. The experimental results show the system is accurate, effective and noninvasive in the detection of glaucoma.

**Key words:** glaucoma; closing operation;  $K$ -means clustering; Canny edge detection

## 0 引言

青光眼是指眼内压间断或持续升高的一种常见疑难眼病<sup>[1]</sup>,该病是引起人类失明的三大眼病之一,占总人群1%,45岁以后为2%。此外,该眼病发病迅速、危害性大,随时可导致失明。长时间的高血压<sup>[2]</sup>可以给眼球各部分组织和视觉功能造成损害,导致视神经萎缩、视野缩小、视力减退。如不及时治疗,视野将全

部丧失而至失明。

青光眼防治的关键在于早期诊断,然而多数青光眼患者早期无任何特异性症状。据Sommer等对美国巴尔地摩的人群普查,有半数以上的青光眼是在普查中发现,所以在人群中进行有效的青光眼筛查是青光眼早期诊断的关键。但是,医学上检测青光眼需要通过眼压、前房、视野及眼底视神经4个方面的检查才能

收稿日期:2015-05-18

修回日期:2015-08-20

网络出版时间:2016-03-22

基金项目:国家自然科学基金-民航总局联合资助项目(U133101);国家自然科学基金青年基金(81202178)

作者简介:沈超(1989-),男,硕士研究生,研究方向为模式识别、图像分割;林杉,讲师,通信作者,研究方向为嵌入式硬件设计。

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1450.TP.20160322.1518.034.html>

得知病人是否患有青光眼,步骤复杂繁琐,需要在专业的眼科机构完成,不利于普通人在日常生活中进行自我检查。此外,医学青光眼检测中前房检查主要是检查前房的结构、大小等,不能作为判定青光眼损害的指标;视野检查只是一个半客观检查方式,容易受到主观影响,需要受检者的主观配合,而一些患者难以保持固视,因此常常出现假阴性和假阳性的检查结果;眼底检查受检查者的主观影响较大,具有一定的主观性偏倚,且评价标准较为粗糙;眼压检查虽然重要,但是仅能由专业的眼科医生才能完成该检查。

关于青光眼的检查仍然在探索和研究当中,近些年来关于光反射辅助诊断青光眼的方法和理论得到广泛关注。文中系统运用此理论,通过使用图像处理技术,并结合正常人与青光眼患者瞳孔对光反射的收缩恢复状况的差异来检测青光眼。该检查方法准确、客观、无创,适用于个人日常的自我检查,以便及早发现并治疗。

## 1 系统概况

文中主要运用了数字图像处理技术,结合光反射辅助诊断的理论开发了一种青光眼快速检测系统。即利用青光眼早期患者的瞳孔在受到光刺激时,收缩后恢复运动与正常瞳孔表现不一致的特点,通过摄像头采集瞳孔图像并分析瞳孔的运动状况,从而判断被测者是否患有青光眼。系统框图如图 1 所示。

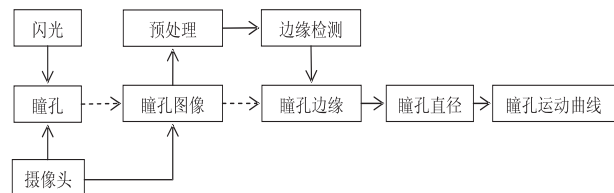


图 1 系统框图

## 2 图像预处理

通过摄像头采集到的瞳孔图像,会受到睫毛对瞳孔的干扰,如图 2(a)所示。这种干扰主要会对瞳孔边缘产生凹陷,影响对瞳孔的提取。采用形态学<sup>[3]</sup>的方法能够有效填补凹陷,使瞳孔图像恢复完整,以减少该种干扰对提取瞳孔精度的影响。

形态学运算是一种非线性图像处理方法和分析理论,它是从集合的角度来刻画和分析图像,它的运算由(如并、交、补等)集合运算来定义。形态学运算主要定义了两种基本的运算:膨胀(Dilation)和腐蚀(Erosion)。

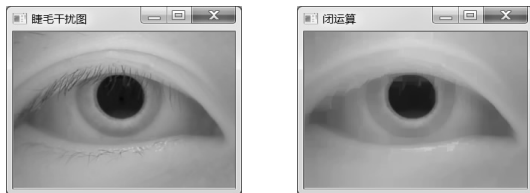
对于一幅灰度图像  $F = f(x, y)$  而言,其膨胀和腐蚀的定义如下:

$$D = F \oplus B = \{x, y \mid B[x, y] \subseteq F\}$$

$$D = F \ominus \{x, y \mid B[x, y] \subseteq F\}$$

其中,  $(x, y) \in R^2$ ,  $(x, y)$  为图像上任意一点坐标,  $f(x, y)$  为  $(x, y)$  处的灰度值。

在实际运用中,需要通过膨胀和腐蚀的复合运算才能达到预期效果。文中采用先膨胀后腐蚀的方法(闭运算),如图 2 所示。该方法有效地填充了由睫毛干扰产生的小凹陷,平滑地连接了瞳孔的边缘,并且未改变瞳孔的大小和形状。



(a) 睫毛干扰图 (b) 闭运算结果图

图 2 灰度图像闭运算结果对比

## 3 瞳孔检测

系统通过瞳孔在光刺激下的运动变化状况来判断被测者是否有患青光眼的潜在危害。瞳孔边缘的提取对整个系统检测准确度至关重要。文中主要使用 Canny 边缘检测算法<sup>[4]</sup>,由  $K$  均值聚类对 Canny 算法的输入参数进行自动提取,从而有效地提取出瞳孔。

### 3.1 Canny 边缘检测

Canny 边缘检测实际上是求信号函数的极大值问题<sup>[5]</sup>来判定图像中物体的边缘像素点。该检测算法具有检测性好、定位性好和响应次数少的特点。Canny 算法的基本过程如图 3 所示。

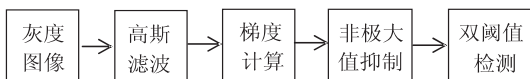


图 3 Canny 边缘检测基本过程

Canny 算法在计算梯度时需要对图像进行导数运算,但导数对噪声很敏感,因此必须采用滤波器来改善图像的质量,降低噪声的影响。文中的 Canny 算法采用高斯滤波器<sup>[5-6]</sup>进行滤波。高斯滤波是一种线性平滑滤波,适用于滤除高斯白噪声,已广泛应用于图像处理。对图像进行高斯滤波就是对高斯函数进行离散化,以离散点上的高斯函数值为权值,对图像每个像素点的灰度值做一定范围邻域内的加权平均。高斯滤波器用像素邻域的加权均值来代替该点的像素值,而每一邻域像素点的权值随着该点与中心点距离单调递减。高斯滤波函数的一般式如下:

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

针对数字图像而言,采用高斯滤波即采用高斯滤波模板对图像进行卷积。文中采用的高斯模板如图 4 所示。

0.075 1	0.123 8	0.075 1
0.123 8	0.204 2	0.123 8
0.075 1	0.123 8	0.075 1

图4 3×3 高斯滤波模板

任何边缘检测算法的最终目的都是通过一种计算方式将边缘像素凸显出来。Canny 算法采用一阶差分卷积模板计算梯度,用梯度幅值作为边缘凸显的量化值。Canny 算法的梯度模板如图 5 所示。通过卷积后(见式(2)、(3)),能够进一步得到图像的梯度幅值(见式(4))。

$$H_1 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$$

(a) 水平方向

$$H_2 = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

(b) 垂直方向

图5 一阶差分卷积模板

$$\varphi_1(x,y)=f(x,y)*H_1(x,y)$$

(2)

$$\varphi_2(x,y)=f(x,y)*H_2(x,y)$$

(3)

$$\varphi(x,y)=\sqrt{\varphi_1(x,y)^2+\varphi_2(x,y)^2}$$

(4)

通过一阶差分卷积能够得到图像的全局梯度信息,但是用全局梯度值不能准确定位图像的边缘。因此,Canny 算法通过非极大值抑制确定局部最大值,从而得到图像的边缘。可是,通过极大值抑制处理后的图像,仍然存在许多虚假边缘<sup>[7]</sup>。传统的 Canny 算法通过固定阈值<sup>[8]</sup>滤除虚假边缘,并且阈值参数需经大量图片验证<sup>[9]</sup>后得到,这种方法显然不能灵活地应用于视频图像。对于连续变化的瞳孔视频图像,固定阈值的 Canny 算法不能有效地去除瞳孔周围受到眼皮、虹膜等影响产生的虚假边缘。因此,文中算法在双阈值检测时,采用由图像梯度值经  $K$  均值聚类后得到的参数作为阈值,通过这种方法不仅能够有效去除假边缘,连接真实边缘,而且能够针对瞳孔视频图像在不同时段的不同特征自适应选取阈值参数。

3.2 K 均值聚类

由 MacQueen 提出的  $K$  均值算法是划分聚类中使用最广泛的一种聚类算法。该算法认为:两个样本之间的距离值较小相似性就越大<sup>[10]</sup>,因此越有可能属于同一类。

假设  $K$  均值算法将样本空间  $X = \{x_1, x_2, \cdots, x_i, \cdots, x_n\}$  中的样本划分成  $K$  类,聚类中心为  $C = \{c_1, c_2, \cdots, c_j, \cdots, c_k\}$ ,用  $d_{ij}(x_i, c_j)$  表示  $x_i$  与其对应的聚类中心  $c_j$  之间的距离。则  $K$  均值算法的目标函数为  $\sum_{j=1}^K \sum_{i,j \in c_i} d_{ij}(x_i, c_j)$ ,表示样本空间中的所有数据点与所属聚类中心距离的总和。目标函数直接反映聚类效果的好坏,其值越小,则表示该聚类越紧凑、越独立<sup>[11]</sup>。因此,通过不断减小目标函数的值来改善和优化聚类方案,当目标函数取极小值时的聚类,即为最优聚类

方案。

文中  $K$  均值算法采用欧氏距离<sup>[12]</sup>(见式(5))作为相似度的度量指标,对目标函数<sup>[13]</sup>(见式(6))不断优化,直到其值最小,进而得到各个类的聚类中心(见式(7))。

$$d(x_i, x_j) = \|x_i - x_j\|_2 = \left( \sum_{l=1}^p |x_{il} - x_{jl}|^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$
$$\forall x_i, x_j \in X$$

(5)

$$J = \sum_{j=1}^K J_i = \sum_{j=1}^K \left( \sum_{i,j \in c_j} \|x_i^{(j)} - c_j\|^2 \right)$$

(6)

$$c_j = \frac{1}{n_j} \sum_{i=1}^{n_j} x_i^{(j)}$$

(7)

3.3 基于 K 均值聚类的双阈值边缘检测

使用  $K$  均值聚类算法将图像梯度值只分为 A、B 两类。由  $K$  均值聚类的特点可知,A、B 两类梯度的类内差异较小,类间差异较大,能够自适应地将强弱边缘分割开。假设 A 类中心为  $C_A$ ,B 类中心为  $C_B$ , $C_A > C_B$ 。选用 A 类的中心  $C_A$  作为 Canny 算法粗划分参数,将梯度大于  $C_A$  的强边缘选取出来,确定瞳孔的大致边界,最大可能地滤除干扰边缘。在连接边缘时,用 B 类中最大梯度值( $\max\{B\} < C_A$ )作为 Canny 算法边缘连接参数,将强边缘点 8 领域中梯度介于粗划分参数与连接参数之间的点,作为对粗划分后得到的边缘点的补充<sup>[14]</sup>,以此递推,直到所有强边缘点(包括补充进来的点)的 8 领域内不再有符合连接条件的点。

如图 6 所示,其中图 6(b)使用固定阈值(大量实验的经验值)进行分割。由图可见,使用该方法虽然能够去除眼部周围皮肤的干扰,但是不能有效去除眼皮和虹膜的干扰。图 6(c)采用文中基于  $K$  均值聚类的双阈值 Canny 边缘检测算法,该算法可以在不用人为指定输入参数的情况下,对瞳孔图像进行有效的分割。算法对抑制假边缘的能力较强,并且通过高阈值有效地去除了瞳孔周围由眼皮和虹膜产生的弱边缘,同时在连接边缘阶段,有效地保全了整个瞳孔边缘。

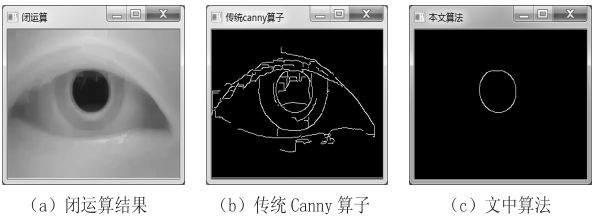


图6 算法对比

4 系统应用

4.1 数据显示

由 3.3 节得到瞳孔边界后,选用横向最大直径作为瞳孔的横径,用瞳孔直径变化比(直径变化比=(实时瞳孔直径÷瞳孔直径基值)×100%)作为瞳孔运动过

程的描述指标。瞳孔直径基值指开始采集前瞳孔较为稳定的一段时间内,瞳孔直径的平均值。

4.2 数据分析

系统采用二维曲线对瞳孔运动进行描述。横轴为时间轴(单位为 s),纵轴为瞳孔直径变化比。

青光眼在一定运动负荷下,眼压明显下降<sup>[15]</sup>,使瞳孔在收缩后很难在短时间内(5 s)恢复到原大小。因此,系统采用点光源对瞳孔进行刺激,强迫其运动收缩,观察在恢复阶段瞳孔的运动表现,从而判断被检测者是否患有青光眼。青光眼患者瞳孔在恢复阶段会呈现一段持续收缩状态,而正常瞳孔会较快(5 s 内)地恢复到基值的 93% 左右。

采用文中系统对 25 名青光眼患者(某医院提供)和 25 名无青光眼病症者进行检测(判断无青光眼病症的标准为:瞳孔在开始恢复后 5 s 内,其横径大小能够达到基值的 93% 及以上)。实验数据统计如表 1 所示(其中误检表示无青光眼病症者被检为青光眼患者,漏检表示青光眼早期患者未被系统检出)。

表 1 系统检测实验数据

类别	人数 /名	检出 /名	误检 /名	漏检 /名	检出率 /%
青光眼患者	25	24	-	1	96
无青光眼病症者	25	25	0	-	100

注:- 代表无此定义。

实验数据表明,系统检出率高,误检率低。

5 结束语

文中根据近些年来众多学者提到的使用光反射辅助诊断青光眼的方法和理论,使用数字图像技术,设计开发了一种青光眼快速检测系统。实验证明,系统判断准确度较高,并且能够移植到移动载体上,方便人们在日常生活进行自检,为青光眼患者做到早发现提供可能。

系统在应用时,当被检测者在检测过程中不配合,极易产生漏检现象(实验数据中存在 1 名漏检患者,该名被测者在检测过程中频繁眨眼)。因而,青光眼的

检测技术仍需继续研究和探索,以开发出检出率更高的检测设备。

参考文献:

[1] 李建军. 在人群中筛查青光眼的意义及实施方案[J]. 眼科,2014,23(1):71-72.

[2] 陈 婷,张绍阳,韩光杰,等. 可疑青光眼患者清晨起床前后的体位变化和日常活动对眼压的影响[J]. 国际眼科杂志,2014,14(5):970-972.

[3] 余龙华,王 宏,钟洪声. 人眼检测及瞳孔定位[J]. 计算机工程与应用,2013,49(3):186-189.

[4] 陈 蒙. 基于 canny 算子的边缘检测算法应用研究[J]. 电子技术与软件工程,2013(21):100-101.

[5] 陈若珠,薛 彪. 基于 MATLAB 的改进 Canny 算子的图像边缘检测研究[J]. 工业仪表与自动化装置,2014(4):113-116.

[6] 付博研,卢振洋,白立来,等. 一种改进的 Canny 算法及其仿真验证[J]. 现代电子技术,2014,37(18):11-14.

[7] 郭慧鑫,牛竹云,郭会兵,等. 一种基于 Canny 算子的红外图像边缘检测算法[J]. 火力与指挥控制,2014,39:95-97.

[8] 宗露艳,吴 陈. 一种改进的 Canny 算子边缘检测算法[J]. 现代电子技术,2011,34(4):104-106.

[9] 焦圣喜,杨文明,王以纯,等. 改进 Canny 边缘检测算法研究[J]. 电子制作,2015(5):40-40.

[10] 王 千,王 成,冯振元,等. K-means 聚类算法研究综述[J]. 电子设计工程,2012,20(7):21-24.

[11] 孙 卓. K-均值聚类算法及其应用[J]. 农业网络信息,2013(7):41-44.

[12] 孔 锐,张国宣,施泽生,等. 基于核的 K-均值聚类[J]. 计算机工程,2004,30(11):12-13.

[13] 张雪凤,张桂珍,刘 鹏. 基于聚类准则函数的改进 K-means 算法[J]. 计算机工程与应用,2011,47(11):123-127.

[14] 张 震,马驯良,张忠波,等. 一种改进的基于 Canny 算子的图像边缘提取算法[J]. 吉林大学学报:理学版,2007,45(2):244-248.

[15] Rüfer F,Schiller J,Klettner A,et al. Comparison of the influence of aerobic and resistance exercise of the upper and lower limb on intraocular pressure[J]. Acta Ophthalmol, 2013, 1(7):1-4.