

# 角膜地形图仪中实时图像检测

隋成华<sup>1,2,3</sup>, 韩勇浩<sup>1,2,3</sup>, 徐丹阳<sup>1,2,3</sup>, 高楠<sup>4</sup>, 高建勋<sup>1,2,3</sup>, 沃圣杰<sup>1,2,3</sup>, 杜春年<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学光学与光电子研究中心, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>浙江工业大学生物与医学物理信息技术协同创新中心, 浙江 杭州 310023;

<sup>3</sup>浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023;

<sup>4</sup>浙江工业大学计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310023

**摘要** 为实现角膜地形图仪中实时图像检测,找到一种图像清晰度评价函数对实时角膜图像进行快速、稳定、精确的判别至关重要。基于角膜地形图仪中光学成像系统,分析系统离焦对图像清晰度的影响,并提出一种关于图像清晰度的评价方法。该方法选择拉普拉斯函数作为全局图像粗调的评判参数,通过霍夫圆变换及亚像素边缘检测来确定图像的中心点,并采用 Sobel 算子与 Canny 算子相结合的边缘检测方法根据中心点找出最清晰边缘,从而实时获得最清晰的角膜图像。实验表明,该方法具有很好的稳定性和抗噪性,能够准确、有效地评价角膜图像的清晰度,可用于角膜地形图仪中实时图像的精准检测。

**关键词** 成像系统; 实时图像检测; 角膜地形图仪; 图像清晰度评价方法; 边缘检测方法

**中图分类号** TP391 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0611001

## Real-time Image Detection in Corneal Topography

Sui Chenghua<sup>1,2,3</sup>, Han Yonghao<sup>1,2,3</sup>, Xu Danyang<sup>1,2,3</sup>,

Gao Nan<sup>4</sup>, Gao Jianxun<sup>1,2,3</sup>, Wo Shengjie<sup>1,2,3</sup>, Du Chunnian<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Center for Optics and Optoelectronics Research, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup>Collaborative Innovation Center for Information Technology in Biological and Medical Physics, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>3</sup>College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>4</sup>College of Computer Science and Technology, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** In order to realize real-time image detection in corneal topography, it is a key step to find an image sharpness evaluation function for fast, stable and accurate identification of real-time corneal images. For the optical imaging system of corneal topography, the defocusing effect on image sharpness is analyzed and a new image sharpness evaluation method is proposed. In the method, the Laplace function is selected as the coarse tuning evaluation parameter of a global image. Through Hough circle transform and sub-pixel edge detection, the center of the image is determined. With the center of the image, the clearest edge is found by the edge detection method based on the combination of Sobel operator and Canny operator. Based on that, the clearest corneal image is got in real-time. The experimental results verify that the proposed method has good stability and noise immunity, can evaluate the image sharpness accurately and effectively, and is suitable for real-time image detection in corneal topography.

**Key words** imaging systems; real-time image detection; corneal topography; image sharpness evaluation method; edge detection algorithm

**OCIS codes** 110.2970; 040.1520; 170.0110

收稿日期: 2017-01-11; 收到修改稿日期: 2017-01-19

基金项目: 浙江省重大科技专项(2011C11048)、浙江省教育厅自然科学类项目(Y201636360)

作者简介: 隋成华(1956—),男,教授,博士生导师,主要从事新型光电信息处理系统开发及应用方面的研究。

E-mail: suich@zjut.edu.cn

## 1 引 言

眼睛是人类获取外部光学信息的重要感官器官。由于眼睛的结构非常复杂,一旦眼睛发生了病变,需要依靠视光学仪器来对其进行检查。角膜地形图仪作为检测人眼病变的视光学测量仪器<sup>[1]</sup>,可以对人眼角膜表面形貌进行定量检测,同时用数据或经过处理的图像的方式给出眼角膜表面的形貌信息<sup>[2-3]</sup>,其检测结果对角膜的光学病变诊断、治疗及预后都具有十分重要的意义。目前市场上已存在多种型号的角膜地形图仪<sup>[4-5]</sup>,其中基于 Placido 盘的角膜地形图仪能精确展示角膜表面形貌,得到了广泛应用。但国内尚无自主研发的成型产品,而从国外引进的角膜地形图仪价格昂贵,国外厂商也未对其内部算法进行详细报道,且现有基于 Placido 盘的角膜地形图仪在实时图像清晰度判别稳定性(对后期图像处理精度有较大影响)方面有待提高。因此研制具有我国自主知识产权的高精度角膜地形图仪意义重大。

目前基于 Placido 盘的角膜地形图仪对图像的检测是通过面阵 CCD 将 Placido 盘上的黑白条纹投射在人眼角膜的像作为成像系统的物,经过透镜系统成像于面阵 CCD<sup>[6-7]</sup>,并将 CCD 采集到的图像传输到上位机,利用上位机中的算法对图像进行实时动态检测,并通过对实时图像的后续处理实现人眼角膜表面形貌的重构及各种数据处理。由于实时图像清晰度的检测与判断对后续处理有非常大的影响,因此找出一种与实际需求匹配的清晰度评价函数是非常关键的。目前常用的图像清晰度评价函数一般分为灰度梯度函数、频域函数、统计学函数及信息学函数这四大类。然而这些函数在实时采集图像的过程中,抗噪及稳定性较差,对最终清晰图片的选取造成了很大的影响。为此,本文提出了一种提高角膜地形图仪清晰度函数检测的实时性及稳定性的方法。该方法选择了一种灰度梯度函数,并引入霍夫圆变换定中心,利用 Canny 算子与 Sobel 算子相结合的边缘提取方法找出最清晰的图像。该方法能有效地弥补了单一评价函数的不足,可以快速、稳定、精确地评价数字图像的清晰度,满足了角膜地形图仪对实时图像检测的要求。

## 2 角膜地形图仪成像原理与成像清晰度关系

角膜地形图仪的成像原理如图 1 所示:Placido 盘是由一系列黑白相间的同心圆环组成,且中央开有一小孔,可以放置成像元件;LED 背光源发出的光经漫反射后,照亮在一定距离外的眼球上,并将 Placido 盘上的黑白条纹投射到角膜上,经角膜反射后再通过透镜系统成像在面阵 CCD 上。

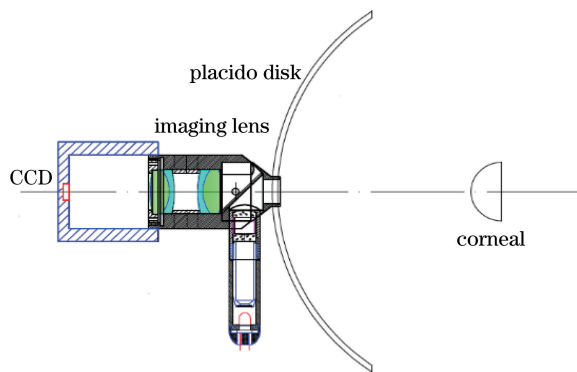


图 1 基于 Placido 盘的光学系统

Fig. 1 Optical system based on Placido disk

由该光学系统可知,当入射光瞳尺寸一定时,在物空间只能使一定深度范围内的物体在景象平面上成清晰的像,该深度范围即为景深<sup>[8]</sup>。景深的计算公式为

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 = \frac{F\delta L^2}{f^2 + F\delta L} + \frac{F\delta L^2}{f^2 - F\delta L}, \quad (1)$$

式中  $\Delta L_1$  为前景深,  $\Delta L_2$  为后景深,  $f$  为焦距,  $\delta$  为容许弥散圆直径,  $F$  为镜头  $F$  数,  $L$  为对焦距离。

该系统对应的  $\delta = 0.035 \text{ mm}$ ,  $f = 20.729 \text{ mm}$ ,  $F = 3.189$ ,  $L = 114.5 \text{ mm}$ , 由(1)式计算可得  $\Delta L = 0.676 \text{ mm}$ 。由此可知,该系统的景深非常小,因此可通过改变物距,在正确对焦的情况下拍摄出较清晰的图像。该图像所包含的细节信息丰富,边缘提取后信息量大。

### 3 图像清晰度评价函数

目前基于灰度梯度法的数字图像清晰度评价函数应用较广,常见的有梯度平方函数、绝对方差函数、Roberts 函数和拉普拉斯函数等<sup>[9]</sup>,各种函数在计算速度和对图像清晰度的敏感程度上各不相同,其中拉普拉斯函数运算速度快,适合用于大范围的快速聚焦。由于利用角膜地形图仪在对图像进行检测的过程中,图像的清晰度并不是呈现出一种理想单峰性,且图像检测受外部环境及人眼睫毛等因素影响较大,考虑到角膜地形图仪对人眼测量的稳定性及对图像检测的实时性要求,因此首先选择拉普拉斯函数作为全局图像粗调的评判参数,进而引入霍夫圆变换找出图像的中心,根据中心点通过 Canny 算子与 Sobel 算子相结合的边缘提取方法找出最清晰边缘,从而找出最清晰的图像。

#### 3.1 拉普拉斯算子

拉普拉斯算子是最简单的各向同性微分算子,具有旋转不变性<sup>[10]</sup>。拉普拉斯算子方程离散形式为

$$\nabla^2 f = [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y)。 \quad (2)$$

由于拉普拉斯算子是一种微分算子,它的应用可增强图像中灰度突变的区域,减弱灰度缓慢变化的区域。拉普拉斯算子还可以表示成模板的形式,如图 2 所示。从模板形式容易看出,如果在图像较暗的区域出现了一个亮点,那么运用拉普拉斯运算后,这个亮点会变得更亮。此外,因为图像的边缘为灰度发生跳变的区域,所以拉普拉斯锐化模板在边缘检测中效果显著。

0	1	0
1	-4	1
0	1	0

图 2 拉普拉斯运算模板

Fig. 2 Laplacian operation template

由于利用该系统在对图像进行检测的过程中,整个光学系统处于运动状态,图像的清晰度变化并非呈现出一种理想的单峰性,因此由拉普拉斯算子作为全局图像粗调的评判参数,然后选择其中较清晰的 8 幅图像,为下一步定中心进而选择出最清晰的图像做准备。

#### 3.2 局部的霍夫圆变换及亚像素边缘提取法确定中心

霍夫变换是图像处理中的一种特征提取技术,它是在一个参数空间中通过计算累计结果的局部最大值得到一个符合该特定形状的集合作为霍夫变换结果<sup>[11]</sup>。在该系统中,对 Placido 盘图像中心点的准确定位关系到最终图像的清晰度,因此十分重要。由于 Placido 盘投射在人眼上所采集到的图像是一组由 24 环组成的等间距同心圆环,因此可采用截取图像中前几环进行局域霍夫变换来确定图像中心。然而在实际处理中,霍夫圆变换定中心的误差往往较大,不能满足最终要求。因此须再对霍夫圆变换后的图像进行一次灰度矩亚像素边缘检测。灰度矩算子以近似构成的单位圆作为算子的输入,其归一化模型为

$$E(x, y, \rho, \theta) = \begin{cases} h_1, x \cos \theta + y \sin \theta \leq \rho \\ h_2, x \cos \theta + y \sin \theta > \rho \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $h_1$  和  $h_2$  分别代表边缘两侧的灰度值,  $\rho$  和  $\theta$  分别为边缘位置和边缘方向。在得到归一化模型的参数以后,得到的亚像素坐标  $(x_s, y_s)$  的计算公式为

$$\begin{bmatrix} x_s \\ y_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \rho \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix}。 \quad (4)$$

最后根据检测到的边缘点以及轮廓面积进行调整,删除与其他中心点差距较大的,并根据边缘点进行圆拟合,最终确定精确的中心点。其整个流程如图 3 所示。

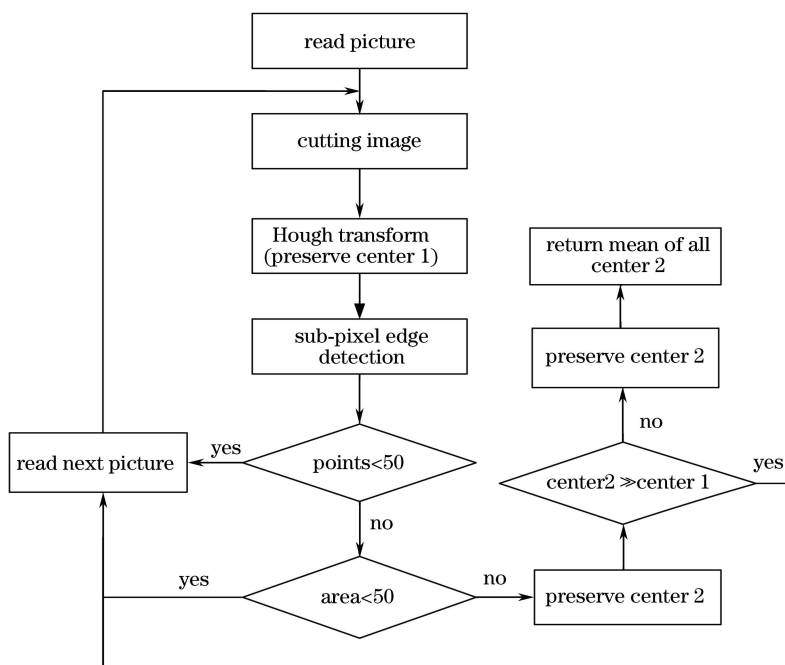


图 3 定中心流程图

Fig. 3 Flow chart of center determination

### 3.3 基于 Sobel 算子与 Canny 算子获得最清晰图像

Sobel 算子与 Canny 算子作为微分算子都可用于图像的边缘检测。然而在选用单一的 Sobel 算子或者 Canny 算子进行图像边缘检测时,会出现边缘点误判、弱边缘输出效果差以及提取轮廓不够清晰等情况<sup>[12-14]</sup>,因此需要在边缘检测前对图像进行去噪处理。本文系统采用高斯滤波对图像进行平滑处理。然后根据中心点,分别利用 Sobel 算子与 Canny 算子检测图像边缘,利用累计直方图统计边缘强度的分布状况,将经 Canny 变换后的点灰度值大于 5 及经 Sobel 变换后的点灰度值小于 0 的点灰度值设置为 0,并判定该点为边缘点,然后对相应边缘各个像素点在 12 pixel×12 pixel 区域内差分求平均,找出最清晰边缘。这时边缘的清晰度有着明显的单峰性,因此可以找出最清晰的图像。其整个流程如图 4 所示。

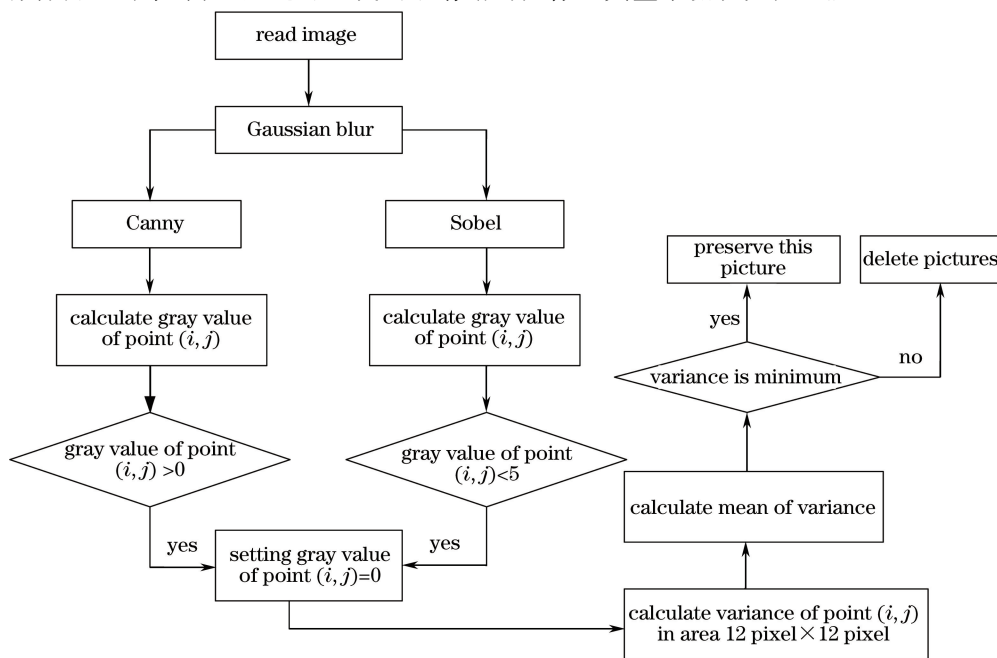


图 4 寻找最清晰图像流程图

Fig. 4 Flow chart of clearest picture determination

## 4 实验结果及分析

针对角膜地形图仪对图像实时检测的要求,选择拉普拉斯函数作为全局图像粗调的评判参数,获得了从离焦到准焦再到离焦的 20 幅图像序列(每隔 1.00 mm 拍摄一幅),图 5 分别给出了不同位置处所拍出的模拟眼的图像( $L=5.00, 12.00, 15.00, 17.00$  mm)。对图 5 进行拉普拉斯检测,结果如图 6 所示。可以看出,离焦下图像清晰度较差。因此该系统的设计以拉普拉斯检测后前 8 幅较清晰图像作为下一步检测的前提。

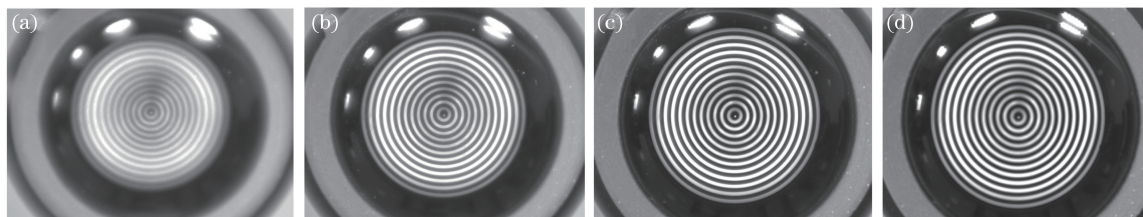


图 5 不同位置处模拟眼图像。(a)  $L=5.00$  mm;(b)  $L=12.00$  mm;(c)  $L=15.00$  mm;(d)  $L=17.00$  mm

Fig. 5 Images of simulated eye in different positions. (a)  $L=5.00$  mm; (b)  $L=12.00$  mm;  
(c)  $L=15.00$  mm; (d)  $L=17.00$  mm

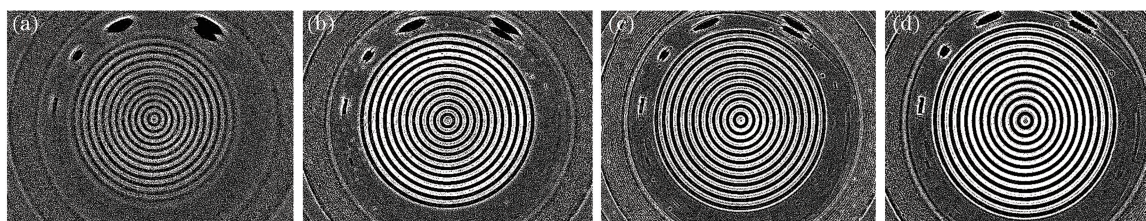


图 6 经过拉普拉斯检测后的边缘提取图像。(a)  $L=5.00$  mm;(b)  $L=12.00$  mm;(c)  $L=15.00$  mm;(d)  $L=17.00$  mm

Fig. 6 Obtained images of edge detection through Laplacian detection. (a)  $L=5.00$  mm; (b)  $L=12.00$  mm;  
(c)  $L=15.00$  mm; (d)  $L=17.00$  mm

根据中心点,通过 Canny 算子与 Sobel 算子相结合的边缘提取方法,获得最清晰边缘,进而获得最清晰图像,如图 7 所示。可以看出,图 7(a)和图 7(b)背景依然存在许多未消除的点,大大降低了边缘检测的质量,而图 8(c)边缘轮廓更加清晰。

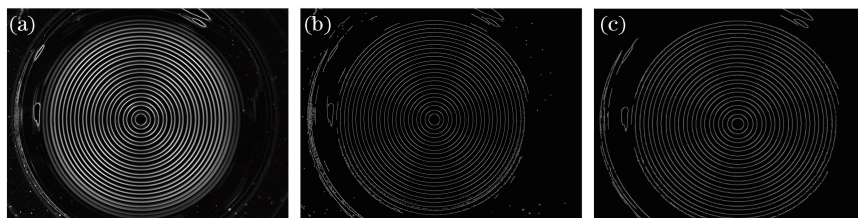


图 7 采用不同方法获得最清晰图像结果对比。(a) Sobel 算子;(b) Canny 算子;(c) Sobel 算子与 Canny 算子相结合

Fig. 7 Comparision of clearest images using different edge detection operators.

(a) Sobel operator; (b) Canny operator; (c) Sobel operator compared with Canny operator

像素比是每一环像素值与半径的比值。在理想状态下,相同曲率半径的标准眼每一环的像素比是不变的。选取一组曲率半径分别为  $R=6.000, 7.948, 8.000$  mm 标准模拟眼(具有标准曲率半径的球面)验证算法的抗噪性及稳定性,图 8 所示为不同曲率半径的模拟眼分别在 5 次实验中的前 23 环像素比折线图。结果表明,在不同曲率半径的模拟眼下的 5 组数据重合度误差小于 1%,像素比误差小于 0.1%,可见,该方法具有高重复精度,能够满足实时图像检测中抗噪性及稳定性的要求。

通过所搭建的整个角膜地形图仪系统,采集到的模拟眼及真实人眼图像如图 9 和图 10 所示,从图中可以看出,所采集到的 Placido 盘投射在模拟眼及人眼角膜的黑白条纹图像清晰,边缘界限锐利。

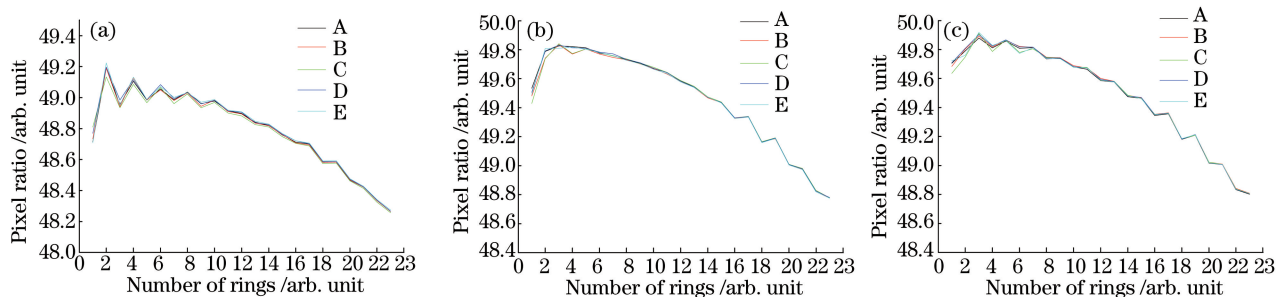


图 8 不同曲率半径的标准模拟眼每环像素比。(a)  $R=6.000$  mm; (b)  $R=7.948$  mm; (c)  $R=8.000$  mm

Fig. 8 Ring pixel ratios of model eyes with different radius of curvature.

(a)  $R=6.000$  mm; (b)  $R=7.948$  mm; (c)  $R=8.000$  mm



图 9 模拟眼拍摄效果图

Fig. 9 Shooting effect of model eye

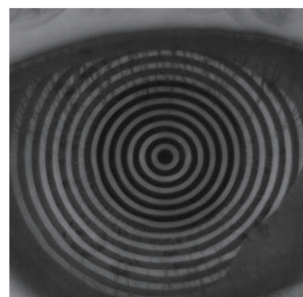


图 10 人眼拍摄效果图

Fig. 10 Shooting effect of human eye

## 5 结 论

针对角膜地形图仪的实时图像采样的要求,提出了一种图像清晰度判别方法。该方法利用拉普拉斯函数作为全局图像粗调的评判参数,通过引入中心点,并采用 Sobel 算子与 Canny 算子相结合的边缘检测方法来评价图像的清晰度,再引入阈值将边缘点与非边缘点分开,有效地抑制了噪声干扰。实验表明,该方法具有很好的稳定性和抗噪性,对图像边缘检测的精度高,能够准确有效地评价角膜图像的清晰度,满足角膜地形图仪对实时图像精准检测的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Liu Ming, Wang Zhaoqi, Wang Yan, *et al.* Aberrations compensation of cornea and crystalline lens based on individual eye model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(10): 1977-1982.  
刘 铭, 王肇圻, 王 雁, 等. 基于个体眼光学结构的角膜与晶状体的像差补偿[J]. *光学学报*, 2008, 28(10): 1977-1982.
- [2] Karnowski K, Kaluzny B J, Szkulmowski M, *et al.* Corneal topography with high-speed swept source OCT in clinical examination[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(9): 2709-2720.
- [3] 刘祖国, 林跃生. 角膜地形图学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2001: 8-13.
- [4] Li Rui, Wang Zhaoqi, Liu Yongji, *et al.* Design of corneal contact lens by wavefront technology[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(s1): s116001.  
李 蕊, 王肇圻, 刘永基, 等. 波前角膜接触镜的设计[J]. *中国激光*, 2011, 38(s1): s116001.
- [5] Zheng Shaolin, Liu Yongji, Wang Zhaoqi, *et al.* Design of optical system for a novel imaging keratometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(5): 0522004.  
郑少林, 刘永基, 王肇圻, 等. 新型成像角膜曲率仪的光学系统设计[J]. *光学学报*, 2013, 33(5): 0522004.
- [6] Shi Yaqin, Zhang Yunhai, Xiao Yun. Optimization of lateral resolution in confocal microscopic imaging with CCD as a detector[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(11): 111801.  
师亚琴, 张云海, 肖 昀. CCD探测型共聚焦显微成像横向分辨率优化[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(11): 111801.

- [7] Xu Shaoxiong, Chen Changzheng, Sun Bin, *et al.* High-resolution imaging by bi-linear CCD shifting sampling[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(9): 0908002.  
徐少雄, 陈长征, 孙 斌, 等. 双线阵 CCD 错位采样高分辨成像[J]. 中国激光, 2015, 42(9): 0908002.
- [8] Sui Chenghua, Wo Shengjie, Gao Nan, *et al.* Design and implementation of imaging system for corneal topography based on Placido disk[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(12): 1222001.  
隋成华, 沃圣杰, 高 楠, 等. 基于 Placido 盘的角膜地形图仪成像系统设计与实现[J]. 光学学报, 2016, 36(12): 1222001.
- [9] Wang Hongnan, Zhong Wen, Wang Jing, *et al.* Research of measurement for digital image definition[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(7): 828-831.  
王鸿南, 钟 文, 汪 静, 等. 图像清晰度评价方法研究[J]. 中国图像图形学报, 2004, 9(7): 828-831.
- [10] Hong Yuzhen, Ren Guoqiang, Sun Jian. Analysis and improvement on sharpness evaluation function of defocused image [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(12): 3401-3408.  
洪裕珍, 任国强, 孙 健. 离焦模糊图像清晰度评价函数的分析与改进[J]. 光学 精密工程, 2014, 22(12): 3401-3408.
- [11] Onishi H, Suzuki H. Detection of rotation and parallel translation using Hough and Fourier transforms[C]. IEEE International Conference on Image Processing, 1996: 827-830.
- [12] Li Junshan, Ma Ying, Zhao Fangzhou, *et al.* A novel arithmetic of image edge detection of Canny operator[J]. Acta Photonica Sinica, 2011, 40(s1): 50-54.  
李俊山, 马 颖, 赵方舟, 等. 改进的 Canny 图像边缘检测算法[J]. 光子学报, 2011, 40(s1): 50-54.
- [13] Chen Hao, Ma Caiwen, Chen Yuecheng, *et al.* Fast template matching arithmetic based on image gray statistic[J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(6): 1586-1590.  
陈 皓, 马彩文, 陈岳承, 等. 基于灰度统计的快速模板匹配算法[J]. 光子学报, 2009, 38(6): 1586-1590.
- [14] Raafat H, Taboun S. An integrated robotic and machine vision system for surface flaw detection and classification[J]. Computers and Industrial Engineering, 1996, 30(1): 27-40.