

## • 新技术与新方法 •

# 基于角膜地形图的泪膜视频预处理



陈延平, 刘孟珂, 颜黄苹, 方正

厦门大学 航空航天学院 (福建厦门 361102)

**【摘要】** 在基于角膜地形图的泪膜稳定性评估中, 针对眼动、睫毛反射和背景干扰, 本文提出了一种泪膜视频的预处理算法。首先, 利用索贝尔算子 (Sobel operator) 进行模糊图像检测, 然后对灰度图像进行形态学开运算以获取环状图样凸显的目标图像, 再通过霍夫圆检测以及快速傅里叶变换提取目标图像的环状图样频率, 依据环状图样频率对目标图像进行带通滤波。最后, 二值化及形态学闭运算用于确定环状图样区域。本文从数据库中随机选取 10 段泪膜视频, 应用上述算法逐帧进行泪膜图像处理。实验结果表明, 该算法有效地去除了视频序列中的无效图像, 并实现了环状图样的定位, 为后续泪膜稳定性的评估奠定了基础。

**【关键词】** 角膜地形图; 泪膜稳定性; 图像预处理; 模糊检测; 形态学运算

## Pretreatment of tear film video in corneal topography

CHEN Yanping, LIU Mengke, YAN Huangping, FANG Zheng

College of Aerospace Engineering, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361102, P.R.China

Corresponding author: YAN Huangping, Email: [hpyan@xmu.edu.cn](mailto:hpyan@xmu.edu.cn)

**【Abstract】** In the evaluation of tear film stability based on corneal topography, a pretreatment algorithm for tear film video was proposed for eye movement, eyelash reflection and background interference. First, Sobel operator was used to detect the blur image. Next, the target image with highlighted ring pattern was obtained by the morphological open operation performed on the grayscale image. Then the ring pattern frequency of the target image was extracted through the Hough circle detection and fast Fourier transform, and a band-pass filter was applied to the target image according to the ring pattern frequency. Finally, binarization and morphological closed operation were used for the localization of the ring pattern. Ten tear film videos were randomly selected from the database and processed frame by frame through the above algorithm. The experimental results showed that the proposed algorithm was effective in removing the invalid images in the video sequence and positioning the ring pattern, which laid a foundation for the subsequent evaluation of tear film stability.

**【Key words】** corneal topography; tear film stability; image pretreatment; blur detection; morphological operation

## 引言

角膜地形图是一种常见的眼科诊断技术, 常用于确定屈光度、泪膜稳定性等眼表疾病参数, 其中泪膜稳定性是临床上诊断干眼的关键标志<sup>[1-2]</sup>。角膜地形图评估泪膜稳定性的原理是普拉西多盘 (Placido disk) 结构光成像<sup>[2-3]</sup>, 即通过环状结构光从角膜前表面反射, 再经过光学系统, 最终成像于电荷耦合元件等光学传感器。

角膜地形图图像采集过程中往往会受到眼睛

运动、眼睑狭窄、睫毛浓长以及眼球震颤等不良条件的干扰和影响<sup>[4-5]</sup>。比如说, 眼睛运动 (简称: 眼动) 虽然对静态采集单张图像影响很小, 但在角膜视频的动态拍摄中, 即便是微弱的眼动, 也会引起测量期间眼坐标的移动<sup>[6-7]</sup>, 瞬目反射或幅度大的眼球运动往往会导致个别图像出现模糊, 甚至失去大部分环状信息, 如果再加上背景和睫毛的干扰, 将会严重影响后续泪膜图像处理中有效信息的提取和匹配<sup>[8]</sup>。

泪膜视频预处理目的在于去除无效图像以及定位环状图样。现有的泪膜稳定性研究中<sup>[4-14]</sup>, 针对泪膜视频的预处理尚存在一些问题。比如, Schack 等<sup>[9]</sup>和 Morelande 等<sup>[10]</sup>分别拟合眼睑位置和

DOI: [10.7507/1001-5515.201804033](https://doi.org/10.7507/1001-5515.201804033)

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61571381)

通信作者: 颜黄苹, Email: [hpyan@xmu.edu.cn](mailto:hpyan@xmu.edu.cn)



<http://www.biomedeng.cn>

角膜边缘确定坐标参考点,但是拟合和迭代增加了预处理工作的复杂度,且得到的结果中仍然存在睫毛干扰信息。Iskander 等<sup>[11]</sup>利用泽日尼克多项式拟合高度表面残差的平方根,虽然降低了对眼动和视轴的依赖性,但只适合瞬目后泪膜的形成过程,无法观察后续的泪膜稳定性状况。Alonso-Caneiro 等<sup>[12]</sup>通过角膜图像中心下方  $200 \times 75$  的长方形区域八邻域的平均一致性来检测图像模糊,然而这种方法并不稳定,因为眼动引起的模糊是随机而不均匀的。隋成华等<sup>[13]</sup>采用索贝尔算子(Sobel operator)与坎尼算子(Canny operator)相结合的方法进行图像检测,但是这种方法主要是依据灰度值确定 8 张初选图像中最清晰的一张,容易受到光照不均的影响。基于 Iskander 等<sup>[11]</sup>的方法,Downie 等<sup>[14]</sup>从原始图像数据计算泪膜质量的局部特征,却仍然存在模糊检测和环心定位等问题。

感兴趣区域的定位,例如肝脏分割,是医疗图像分析中最基本的步骤<sup>[15-16]</sup>。对于自然器官,模型法已经基本实现了精准而稳定的分割,但基于统计模型和基于水平集的方法并不适合角膜地形图预处理。与肝脏或者肺部图像存在自然边缘不同,角膜图像属于结构光成像,主要是由规则的明暗相间的圆环组成,再加上泪膜动态变化的随机性以及睫毛分布的特异性,不存在形状模型和图谱分割的概念。

鉴于以上问题,且依据泪膜图像的固有特点,本文首先通过 Sobel 算子检测图像的模糊程度,剔除模糊图像后,再运用形态学运算和带通滤波去除睫毛和背景带来的干扰,最终实现了环状图样区域的定位。综上所述,本文提出的泪膜视频预处理算法,利用全局图像信息,简单有效,无需迭代,且不受光照均匀度的影响,适用于真实泪膜图像的预处理。

### 1 数据来源

本文使用的所有泪膜视频均由厦门大学眼科研究所提供,利用三维全自动角膜分析仪(SIRIUS-antares, Costruzione Strumenti Oftalmici Inc., 意大利)进行图像采集。受试者选取年龄在 21~51 岁之间的 10 名志愿者(5 男、5 女)作为研究对象,受试者均无隐形眼镜佩戴史。相同的条件下,由同一位眼科医师对每位受试者进行 3 次泪膜视频的拍摄,每次拍摄之间休息放松 5 min,所有受试者均已签署知情同意书。本课题组获得厦门大学眼科研究所授权可使用以上数据,研究符合赫尔辛基宣

言的相关伦理要求,且已经通过厦门大学医学院伦理委员会的审查。

图像的处理分析在仿真软件 MATLAB R2013a (8.1) (MathWorks Inc., 美国)中进行。

### 2 预处理算法

本文的预处理算法主要分为三个步骤:图像模糊检测、形态学处理和带通滤波。预处理算法流程图如图 1 所示。其中,中心行灰度分布的快速傅里叶变换(fast fourier transform, FFT)简称为“中心行 FFT”。

#### 2.1 模糊检测

正常情况下,人一般每 5 秒眨眼一次<sup>[11]</sup>。如果在图像采集时出现眼动,往往会造成图像模糊失真,如图 2 子图“出现眼动”所示,这一部分图像对泪膜稳定性的研究没有价值,需要从视频序列中剔除。

现有的检测算法对自然图像的模糊评价已经比较成熟<sup>[17-19]</sup>,但作为结构光成像的非自然图像,泪膜图像本身就存在着灰度分布不均匀等特点。综合考虑算法复杂度并结合泪膜图像特征,本部分采用 Sobel 算子进行模糊检测。

Sobel 算子边缘检测算法比较简单,广泛应用于医学图像处理<sup>[20]</sup>。泪膜稳定和出现眼动时的角膜图像分别如图 2 上方两幅子图所示。矩阵  $I$  代表角膜图像,大小为  $M \times N$ 。矩阵  $S_h$  代表水平方向算子,矩阵  $S_v$  代表竖直方向算子,大小均为  $3 \times 3$ ,

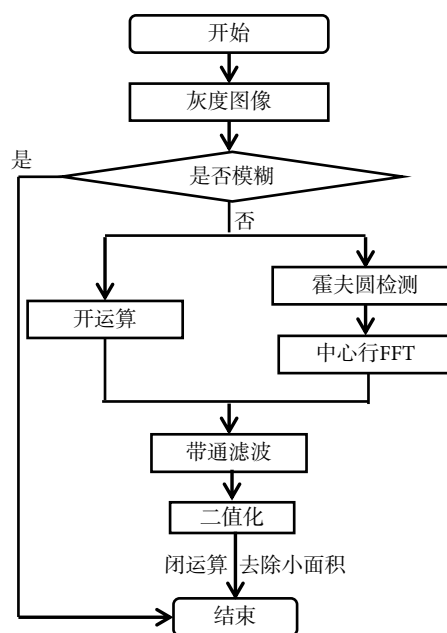


图 1 预处理算法流程图

Fig.1 Flow diagram of pretreatment algorithm

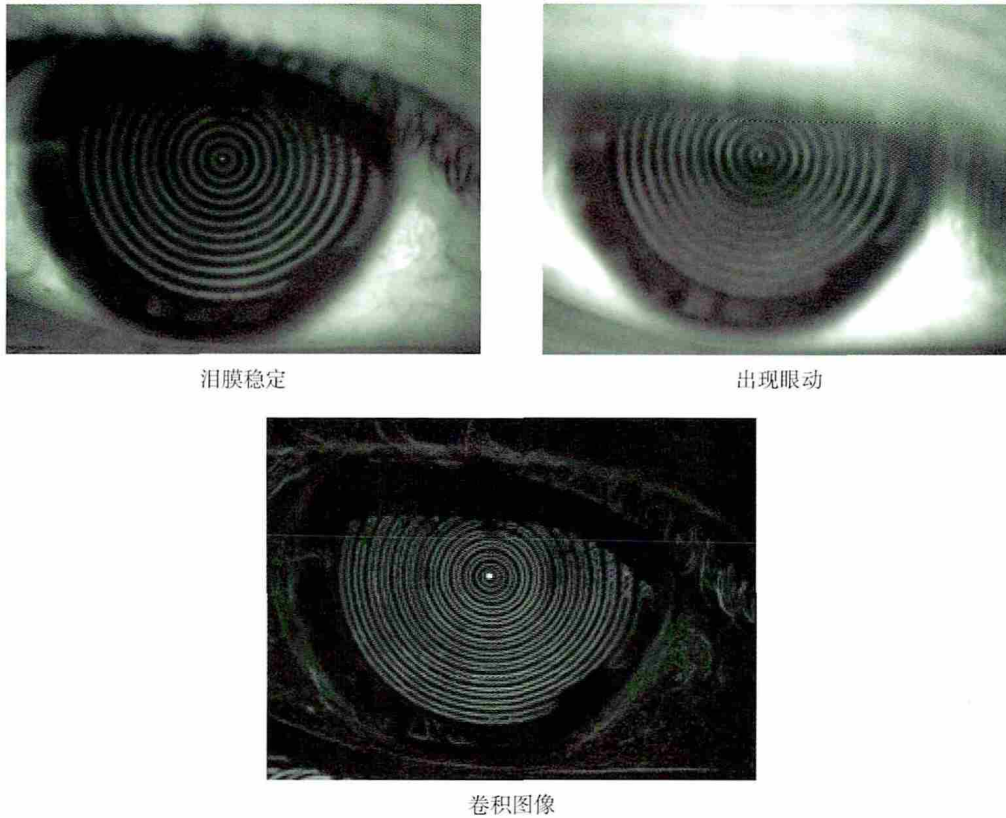


图2 角膜图像  
Fig.2 Cornea images

如式(1)、(2)所示。首先将矩阵  $Sh$  和  $Sv$  与矩阵  $I$  卷积得到矩阵  $C$ , 该矩阵代表卷积图像, 如图2下方子图所示; 然后再将 MATLAB R2013a (8.1) (MathWorks Inc., 美国) 中的边缘检测函数应用于角膜图像  $I$  (其中算子类型为 Canny 算子) 后可以得到边缘图像, 利用矩阵  $E$  表示。Canny 算子具有低错误率、定位最优以及单像素的特点, 增加了边缘检测的可靠性, 提高了后续环状图样边缘中心计算的准确率。

$$Sh = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$Sv = \begin{bmatrix} -1 & -2 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

图像的模糊程度与边缘数目呈现负相关。对于泪膜图像, 中央环状图样相比边缘区域包含了更多有意义的信息, 因此本部分提出一种距离加权的边缘强度法来评价图像模糊, 主要分为以下两个步骤:

(1) 边缘像素中心计算; 为了减小计算量, 此处仅计算了水平方向的边缘像素中心。边缘图像  $E$  中所有边缘像素点的列索引的平均值即为边缘像素中心  $x_{center}$ 。

(2) 距离加权模糊指数计算; 首先计算出卷积图像  $C$  中边缘像素与中心  $x_{center}$  的距离。由于有用的环状图样信息多在中央, 而睫毛等其他干扰多在外围, 利用距离作为卷积图像  $C$  边缘强度的权重, 距离加权边缘强度总和的倒数即为角膜图像的模糊指数, 其值越大, 泪膜图像的模糊程度越高。

进行眼部成像时, 眼球的生理状况差异可能会给图像带来不同程度的干扰。如图2子图“泪膜稳定”中右边眼白部分的亮斑和血丝。边缘检测后, 由于考虑了所有边缘像素点的统计特性, 亮斑和微弱的血丝干扰对环状图样中心计算的影响很小。个别严重的局部血丝可能会导致最终的模糊指数出现一定偏差, 但不影响整个视频序列中模糊图像的剔除。

通过上述算法, 图2上方两幅子图的模糊指数分别为 0.086、0.396, 与主观感知结果一致。

## 2.2 形态学处理

经过前述的模糊检测将模糊图像排除后, 需要进一步去除图像中睫毛和背景的影响。

对一个图像先腐蚀再膨胀的操作称为开运算, 它可以起到消除细小的物体、在纤细点处分离物

体、平滑较大物体的边界时不明显改变其面积的作用。开运算的数学表示如式(3)所示:

$$I_o = (I \ominus S_o) \oplus S_o \quad (3)$$

其中,矩阵  $I_o$  表示开运算图像,集合  $S_o$  代表结构元素,  $\ominus$  和  $\oplus$  分别表示腐蚀操作运算符和膨胀操作运算符。

选择两个半径分别为 9 像素和 3 像素的圆盘结构元素,表示为集合  $S_{oa}$ 、 $S_{oc}$ , 利用  $S_{oa}$ 、 $S_{oc}$  对矩阵  $I$  各进行一次开运算得到矩阵  $I_{oa}$ 、 $I_{oc}$ , 然后再将  $I_{oa}$  和  $I_{oc}$  相减后得到矩阵  $T$ , 该矩阵代表背景和睫毛干扰减弱且环状图样突出的目标图像。图 2 中“泪膜稳定”子图的形态学处理结果如图 3 所示。

### 2.3 带通滤波

观察如图 3 所示的目标图像  $T$  可知, 相对变化缓慢的背景干扰和变化剧烈的睫毛干扰, 环状信息具非常明显的周期性, 通过带通滤波可以将其对应的分量提取出来。

为了确定环状图样的频率分量, 选取目标图像  $T$  同心环中心所在行进行 FFT, 因此首先需要检测中心。

标准的泪膜图像基本都满足良好的居中条件, 划定灰度图像的中央子图, 通过霍夫圆变换即可确定同心环中心。再对目标图像  $T$  的中心行进行 FFT, 其中环状图样频率  $f$  对应于频谱图峰值所在位置。设置频率下限  $f_1$  以去除背景的干扰, 设置频率上限  $f_2$  以防止噪声的影响, 根据实际处理效果,  $f_1$  和  $f_2$  被确定为如式(4)、(5)所示:

$$f_1 = f - 25 \quad (4)$$

$$f_2 = f + 25 \quad (5)$$

最后, 将巴特沃斯带通滤波应用于目标图像  $T$ , 进一步减弱图像中睫毛和背景的干扰。

## 3 模糊检测与环状图样定位实验

### 3.1 模糊检测

从前述角膜分析仪数据库中随机取出 10 段视频, 视频编号为 1~10, 首先选取视频 1 进行模糊检测, 并将模糊指数归一化到 0~1, 检测结果如图 4 所示。

由图 4 中的数据可知, 模糊指数在平均水平以上的位置代表眼动引起了模糊失真, 峰值突出的位置对应于眨眼时刻。

如果视频序列中的某一帧是模糊图像, 那么该帧前后很大程度上也会出现模糊<sup>[12]</sup>, 常见的处理方

法为去除包含模糊帧在内的连续 3 帧图像。接着对视频 2~10 进行处理, 结果如表 1 第 4 列数据所示。观察表 1 可以看出, 本文选取的 10 段视频共有 861 帧图像, 距离加权的 Sobel 算子边缘强度法一共判定出 157 帧模糊图像, 去除了环状图样信息不足的模糊干扰。

### 3.2 环状图样区域定位

通过全局大津法对带通滤波图像进行二值化

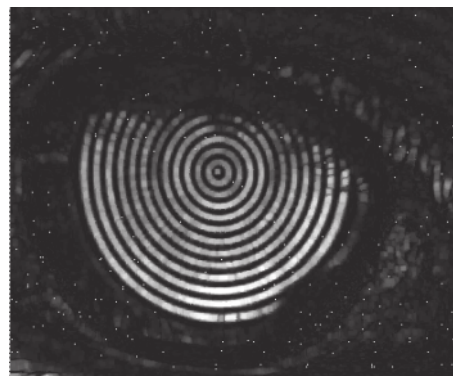


图 3 目标图像

Fig.3 Target image

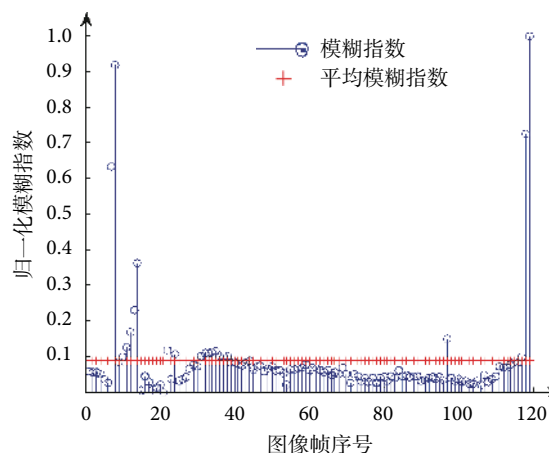


图 4 归一化模糊指数

Fig.4 Normalized blur index

表 1 模糊检测与环状图样定位结果

Tab.1 Blur detection and ring pattern localization results

序号	总帧数	模糊帧数	清晰帧数	A 定位成功帧数
1	119	22	97	96
2	93	15	78	78
3	68	17	51	51
4	69	10	59	54
5	63	14	49	49
6	79	18	61	58
7	135	16	119	118
8	90	17	73	70
9	70	16	54	54
10	75	12	63	63
总计	861	157	704	691

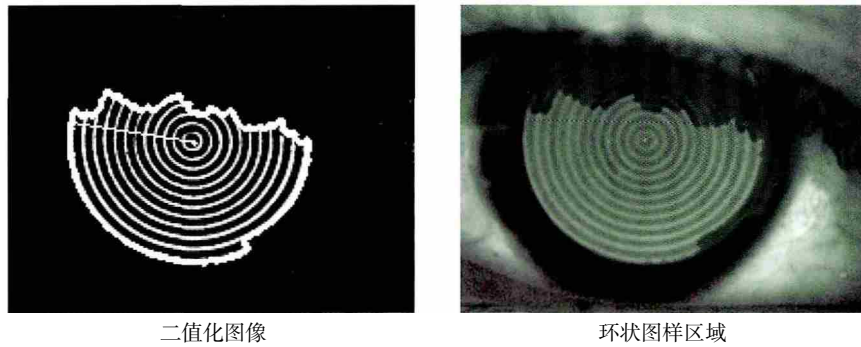


图5 环状图样定位结果

Fig.5 Ring patter localization result

操作,再去除面积小于100的连通域后得到如图5所示的二值化图像,表示为矩阵 $B$ 。

闭运算是先膨胀再腐蚀的形态学处理操作,用于去掉目标内的孔,平滑对象的轮廓<sup>[21]</sup>。与开运算不同的是闭运算一般会将狭窄的缺口连接起来形成细长的弯口,并填充比结构元素小的洞。

选择半径为9的圆盘结构元素对二值化图像 $B$ 进行闭运算操作,再对所得闭运算图像寻找最大外轮廓,处理结果如图5所示,子图“二值化图像”中的中央星型标记为环状图样同心环中心,使用点集 $Co$ 表示,白色直线段则代表该轮廓的最大半径 $r$ 。

以 $Co$ 为圆心, $r$ 为半径做圆,可以确定角膜图像的环状图样区域,表示为集合 $A$ ,如图5右侧子图所示的浅透明圆形区域,环状图样区域 $A$ 的定位结果参考表1第5列数据。再将闭运算图像中的白色区域映射到角膜图像后得到如图5右侧子图所示的深透明不规则区域。

### 3.3 实验结果分析

如表1所示,本文的预处理算法对泪膜视频1~10中98%以上的图像均适用。个别图像的环状图样区域 $A$ 定位失败。经分析,原因主要有以下两点:

(1)模糊检测失效,即模糊图像没有被识别出来。对于环状信息严重缺失的图像,霍夫圆变换无法找到同心环中心。

(2)角膜表面粘液反射。角膜表面分布的粘液反射出白色亮斑,与环状图样边缘黏接在一起,形态学开闭运算皆无法消除,导致检测出的区域 $A$ 过大。

## 4 结论

围绕泪膜视频中的眼动、睫毛和背景干扰,本文提出了一种相应的预处理算法,并将其运用于真

实的泪膜视频。由于边缘加权模糊检测方法简单易行,能够将模糊图像从泪膜视频中识别出来,形态学结合带通滤波操作减弱了背景和睫毛的干扰,增强了有用的环状图样信息,最终实现了模糊图像的检测和环状图样区域的定位,继而也为后续的环状图样变形分析提供了条件。

本文提出的算法基本完成了泪膜视频的预处理,但需要在以下几个方面进行改进:

(1)预处理算法中,模糊图像检测将个别环状图样信息丰富但对比较低度的图像判断为模糊,使得有用信息减少,需要设计准确度更高的模糊检测算法。

(2)泪膜视频中,随着时间的推移,泪膜质量下降,中心行灰度分布周期性会下降。曲线拟合中心以及多个方向分析环状图样的频率可以增加环状图样区域定位的稳定性。

模糊检测中,增加特征参数后可以提高检测准确率,但复杂度也必然随之增加,因此需要做进一步研究。本文实验部分通过10段视频进行验证,未来可以通过大样本训练集提取泪膜图像的特征向量来进行环状图样的变形分析,进而为干眼的临床诊断提供一定依据。

**利益冲突声明:** 本文全体作者均声明不存在利益冲突。

### 参考文献

- 1 Nelson J D, Craig J P, Akpek E K, et al. TFOS DEWS II introduction. *Ocul Surf*, 2017, 15(3): 269-275.
- 2 Sweeney D F, Millar T J, Raju S R. Tear film stability: a review. *Exp Eye Res*, 2013, 117(12): 28-38.
- 3 Alonso-Caneiro D, Szczesna-Iskander D H, Iskander D R, et al. Application of texture analysis in tear film surface assessment based on videokeratography. *J Optom*, 2013, 6(4): 185.
- 4 Buehren T, Lee B J, Collins M J, et al. Ocular microfluctuations and videokeratography. *Cornea*, 2002, 21(4): 346-351.
- 5 Alonso-Caneiro D, Iskander D R, Collins M J. Estimating corneal surface topography in videokeratography in the presence of strong

- signal interference. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2008, 55(10): 2381-2387.
- 6 Iskander D R, Collins M J. Applications of high-speed videokeratometry. *Clin Exp Optom*, 2005, 88(4): 223-231.
- 7 Espinosa J, Roig A B, Mas D, *et al.* Corneal topography reinterpretation through separate analysis of the projected rings//Biophotonics: Photonic Solutions for Better Health Care III, Brussels, Belgium: International Society for Optics and Photonics, 2012, 8427(2): 741-770.
- 8 Carpente A, Ramos L, Barreira N, *et al.* On the automation of the tear film non-invasive break-up test//2014 IEEE 27th International Symposium on Computer-Based Medical Systems, New York, USA: IEEE Computer Society, 2014, 41(5): 185-188.
- 9 Schack T, Muma M, Weam A, *et al.* A procedure to locate the eyelid position in noisy videokeratometric images. *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, 2016(1): 136.
- 10 Morelande M R, Iskander D R, Collins M J, *et al.* Automatic estimation of the corneal limbus in videokeratometry. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2002, 49(12): 1617-1625.
- 11 Iskander D R, Collins M J, Davis B. Evaluating tear film stability in the human eye with high-speed videokeratometry. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2005, 52(11): 1939-1949.
- 12 Alonso-Caneiro D, Iskander D R, Collins M J. Assessment of tear film surface quality using dynamic-area high-speed videokeratometry. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56(5): 1473-1481.
- 13 隋成华, 韩勇浩, 徐丹阳, 等. 角膜地形图仪中实时图像检测. *光学学报*, 2017(6): 72-78.
- 14 Downie L E. Automated tear film surface quality breakup time as a novel clinical marker for tear hyperosmolarity in dry eye disease. *Invest Ophthalmol Vis Sci*, 2015, 56(12): 7260-7268.
- 15 Shi Changfa, Cheng Yuanzhi, Wang Jinke, *et al.* Low-rank and sparse decomposition based shape model and probabilistic atlas for automatic pathological organ segmentation. *Med Image Anal*, 2017, 38: 30-49.
- 16 Wang Jinke, Cheng Yuanzhi, Guo Changyong, *et al.* Shape-intensity prior level set combining probabilistic atlas and probability map constrains for automatic liver segmentation from abdominal CT images. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2016, 11(5): 817-826.
- 17 Marziliano P, Dufaux F, Winkler S, *et al.* Perceptual blur and ringing metrics: application to JPEG2000. *Signal Processing: Image Communication*, 2004, 19(2): 163-172.
- 18 Javaran T A, Hassanpour H, Abolghasemi V. Automatic estimation and segmentation of partial blur in natural images. *Visual Computer*, 2017, 33(2): 151-161.
- 19 Vu C T, Phan T D, Chandler D M. S3: a spectral and spatial measure of local perceived sharpness in natural images. *IEEE Trans Image Process*, 2012, 21(3): 934-945.
- 20 吴剑, 丁辉, 王广志, 等. 边缘检测微分算子的分析及在医学图像中的应用. *生物医学工程学杂志*, 2005, 22(1): 82-85.
- 21 Alkhalidi W, Iskander D R, Zoubir A M, *et al.* Enhancing the standard operating range of a Placido disk videokeratoscope for corneal surface estimation. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2009, 56(3): 800-809.

收稿日期: 2018-04-20 修回日期: 2019-09-21  
本文编辑: 陈咏竹