

文章编号 1004-924X(2015)10-2919-08

## 正常角膜和圆锥角膜的特征提取

余锦华<sup>1,2\*</sup>, 季春红<sup>1</sup>, 李添捷<sup>3</sup>, 田磊<sup>4</sup>, 黄一飞<sup>5</sup>, 汪源源<sup>1,2</sup>, 郑永平<sup>3</sup>

- (1. 复旦大学 电子工程系, 上海 200433; 2. 医学影像计算及计算机协助介入重点实验室 上海 200433;  
3. 香港理工大学 跨学科生物医学工程部门, 香港; 4. 首都医科大学 附属北京同仁医院 北京市  
眼科研究所, 北京 100005; 5. 中国人民解放军总医院 眼科系, 北京 100853)

**摘要:** 基于角膜测量仪器 Corvis ST 采集的图像视频, 提出提取新特征参数以便准确区分正常角膜和圆锥角膜。首先对图像进行滤波、分割等预处理, 检测角膜上下边界, 并计算前角膜曲率值; 用小波变换分析角膜曲率变化, 获取与角膜运动趋势相关的特征, 包括角膜运动的整体趋势和角膜振动的范数和标准差。然后, 基于均方误差最小化法, 提取特征参数, 构建最优参数。最后, 用支持向量机(SVM)对正常角膜和圆锥角膜进行分类。从频率的角度实施的实验显示角膜在基本运动趋势上存在着振动过程。此外, 提出的参数优于形变幅度(DA)、峰值距离(PD)等传统参数, 使准确度、灵敏度和特异性分别提高了 10.2%, 5.7% 和 6.9%。受试者工作特征曲线(ROC)下面积为 0.948, 接近于 1。结果显示本文方法自动提取的特征参数可提高正常角膜和圆锥角膜区分的准确性, 对临床诊断有辅助作用。

**关键词:** 角膜; 圆锥角膜; 特征提取; 最小均方误差算法; Corvis ST; 小波变换

**中图分类号:** R722.21; TP391 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152310.2919

## Extracting features from normal corneas and keratoconus based on wavelet analysis

YU Jin-hua<sup>1,2\*</sup>, JI Chun-hong<sup>1</sup>, LI Tian-jie<sup>3</sup>, TIAN Lei<sup>4</sup>,  
HUANG Yi-fei<sup>5</sup>, WANG Yuan-yuan<sup>1,2</sup>, ZHENG Yong-ping<sup>3</sup>

- (1. *Department of Electronic Engineering, Fudan University, Shanghai 200433, China;*  
2. *Key Laboratory of Medical Imaging Computing and Computer Assisted Intervention of Shanghai, Shanghai 200433, China;*  
3. *Interdisciplinary Division of Biomedical Engineering, Hong Kong Polytechnic, Hong Kong, China;*  
4. *Beijing Institute of Ophthalmology, Tongren Hospital, Capital Medical University, Beijing 100005, China;*  
5. *Department of Ophthalmology, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)*

\* *Corresponding author, E-mail: jhyu@fudan.edu.cn*

**Abstract:** On the basis of video image captured by the cornea measuring instrument Corvis ST, this paper proposes an idea to improve the accuracy of distinguishing normal corneas from keratoconic corneas by extracting new feature parameters. Firstly, the original images were preprocessed by filtering and segmenting to detect the upper and lower boundaries of the cornea and calculate the curvature of

**收稿日期:** 2015-05-21; **修订日期:** 2015-07-20.

**基金项目:** 国家 973 重点基础研究发展计划资助项目 (No. 2015CB755500); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61471125, No. 81271052); 香港理工大学内地联合监督计划资助项目 (No. G-UB58)

anterior cornea. Then, the change of corneal curvature was analyzed by wavelet transformation method to obtain features related to the trend of corneal movement, including the trend of the whole corneal motion as well the norm and the standard deviation of corneal vibration. Furthermore, the feature parameters were extracted in succession and the optimal parameter was obtained by the minimum mean square error algorithm. The Support Vector Machine (SVM) was finally applied to distinction of normal corneas from keratoconic corneas. The experiment results on the frequency indicate that there are corneal vibrations along with the basic movement process. Besides, the proposed parameters are better than traditional parameters such as Deformation Amplitude (DA), Peak Distance (PD) at the highest concavity, which improves the accuracy, sensitivity and specificity by 10.2%, 5.7% and 6.9%, respectively. Moreover, the area under the receiver operating characteristic curve (ROC) is 0.948, close to unity. The automatic extracted feature parameters in this paper are able to improve the accuracy of classification between normal and keratoconic corneas and contribute to the clinical diagnoses.

**Key words:** cornea; keratoconic cornea; feature extraction; minimum mean square error algorithm; Corvis ST; wavelet transform

## 1 引言

圆锥角膜(Keratoconic Corneas, KC)是角膜中央变薄并扩张,呈圆锥形特征的眼类疾病,多为双侧性发病,会导致不规则散光和视力下降<sup>[1]</sup>。它是一种逐步扩展的角膜疾病<sup>[2]</sup>,治疗的方法主要取决于严重程度,较轻时可进行屈光治疗,严重时则需进行角膜移植手术。早期发现有助于更好地选择治疗方式,也可以最大程度地避免并发症的产生和发展,有效保护视觉功能。

近年来,许多新技术用于测量角膜。主要包括光学相干层析成像(Optical Coherence Topography, OCT)<sup>[3,4]</sup>、眼前节分析诊断系统 Pentacam<sup>[5,6]</sup>、眼反应分析仪(Ocular Response Analyzer, ORA)<sup>[7,8]</sup>等。最近,德国 Oculus 公司结合诱导位移的空气脉冲和高速 Sheimpflug 照相机,推出新的角膜测量仪器 Corvis ST<sup>[9]</sup>。利用其实施测量时,先以恒定压力的空气脉冲对着角膜吹,使角膜逐渐向内凹陷到达最低点,然后移除空气脉冲,角膜逐渐反弹恢复到正常状态。在此过程中,Sheimpflug 照相机以 4 300 frame/s 的速度记录角膜的移动过程,并在内置控制面板上实时显示<sup>[10]</sup>。整个形变过程可以分为吹气前、吹气中和吹气后 3 个状态。除了记录角膜的形变进程,Corvis ST 也用于测量一些有利于分析 KC 的生物力学参数。本文的研究就是基于 Corvis ST 仪

器的。

Corvis ST 仪器可计算出角膜中心厚度、眼内压、第一扁平时间、峰值距离、最大凹陷时间等参数<sup>[11]</sup>。已有研究报道指出,最大凹陷时刻角膜中心的形变幅度(DA)<sup>[12]</sup>、峰值距离(PD)和中心曲率(CC<sub>HC</sub>)<sup>[13]</sup>在区分正常角膜和 KC 时最具准确性。

近期研究表明,前角膜曲率的测量在屈光手术<sup>[14,15]</sup>、角膜硬度和眼内压的评估中<sup>[12,16]</sup>具有重要意义。此外,前角膜曲率还反映了角膜形变度,在区分正常角膜和 KC 时具有关键作用<sup>[17]</sup>。然而,Corvis ST 没有直接提供角膜曲率变化参数,故对有关角膜曲率变化参数在区分正常角膜和 KC 中的作用也未进一步展开研究。

因此,本文通过计算整个形变过程中的前角膜曲率半径和离散小波分析<sup>[18]</sup>来获取角膜中心曲率半径信号的高低频成分并将其作为特征参数;然后,基于均方误差最小化方法提取特征,构建最优参数。最后,用支持向量机(Support Vector Machine, SVM)<sup>[19-21]</sup>对角膜进行分类,测试提出参数的有效性。

## 2 前角膜曲率半径的计算

### 2.1 角膜边界的分割

Corvis ST 仪器采集的角膜图像中不仅存在斑点噪声,而且有眼睫毛、眼泪等引起的杂质噪

声。针对这一特征,本文主要利用杂质和角膜边界间的位置和大小关系进行去噪,然后采用基于相位的分割方法进行边界的自动检测<sup>[22,23]</sup>,算法流程如图 1 所示。首先,运用线性结构元素对角膜图像进行膨胀学闭运算,将由于光照不均匀引起的角膜断裂连接起来。接着,考虑杂质的面积远小于角膜,故用面积阈值将其滤除。然后,生成相位对称和反对称图像<sup>[24]</sup>。最后,利用相位对称图像拟合中心线,基于中心线和相位反对称图像获得角膜的上下边界。

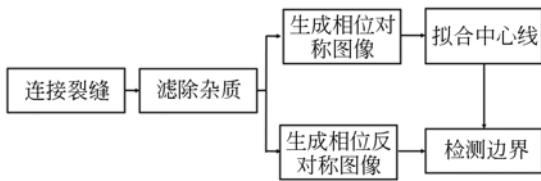


图 1 角膜边界分割流程图

Fig. 1 Flow chart of corneal boundary segmentation

### 2.2 曲率半径的估计

由于前角膜边界点是离散的,如果采用定义的方法计算曲率,则小的波动将导致较大误差。因此,本文采用 Thomas 提出的基于面积误差最小的方法估计圆弧中心和半径<sup>[25]</sup>。假设属于一段圆弧上点的坐标为 $(x_1, y_1) \dots (x_i, y_i) \dots (x_N, y_N)$ ;圆弧中心为 $(x_c, y_c)$ ;半径为  $R$ ,则目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^N [\pi R^2 - \pi \{ (x_i - x_c)^2 + (y_i - y_c)^2 \}]^2. \quad (1)$$

通过函数  $J$  对  $R, x_c, y_c$  分别求偏微分,获得  $R, x_c, y_c$  的表达式。这种方法不仅不需要设定初始值,而且不用迭代算法,很大程度地节省了计算时间。

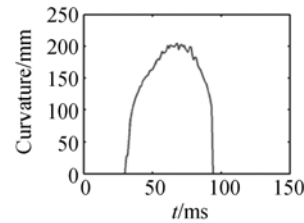
## 3 最优参数提取

### 3.1 离散小波分析

小波滤波器是一种多尺度、多分辨率的信号分析工具,能够提取角膜时变运动的动态特征。为了观察角膜运动,对中心点曲率半径随时间变化的信号进行小波分析,来检测角膜振动的快速变化<sup>[18,26,27]</sup>。

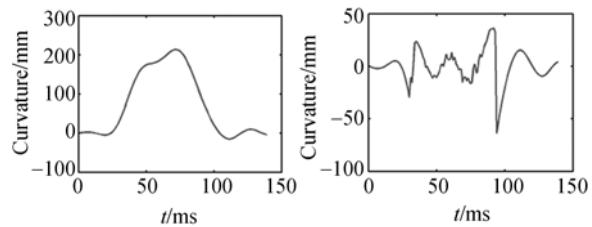
首先通过一组高通和低通滤波器 ( $H, L$ ) 将

原始信号分解成高频和低频成分。再将低频成分通过高通和低通滤波器分解成高低成分,以此类推,经过 4 组高低通滤波器后,原始信号将被分解成 5 个重要成分  $s_1, s_2, s_3, s_4, s_5$ 。然后,对各个节点进行重构,获得重构信号  $sr_1, sr_2, sr_3, sr_4, sr_5$ 。再将信号进行重组,构成  $S\_high = sr_1 + sr_2 + sr_3 + sr_4$ ;  $S\_low = sr_5$ ,如图 2 所示。从图中可以看出,低频成分  $S\_low$  基本反映了角膜受空气脉冲作用先往下凹陷,到达最低点后再往上弹起恢复到自然状态的整体运动趋势;高频成分则反应了角膜受空气脉冲、弹力、粘黏性等相互作用的振动过程。这一发现与 Zhaolong Han 等研究者的研究结果相一致<sup>[29]</sup>,后文从频率的角度对其进行了解释。



(a)原始信号

(a)Original signal



(b)低频成分

(c)高频成分

(b)Low-frequency component (c)High-frequency component

图 2 信号重组

Fig. 2 Signal recombination

### 3.2 基于最小均方误差的特征选择

为了减少特征维数且使特征更具鲁棒性,特征选择和提取是必需的步骤<sup>[30]</sup>。本文基于最小均方误差,提出新的特征选择方法。设样本个数为  $N$ ;统计的特征个数为  $M$ ;第  $j$  个特征第  $i$  个值为  $x_{i,j}$ 。由于不同特征具有不同的单位和范围,需要各自进行归一化,即:

$$x_{i,j} = \frac{x_{i,j} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)}, \quad (2)$$

其中  $i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, M$ 。

假设  $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M$  代表特征的权重, 提取的特征为:

$$y_i = \alpha_1 x_{i1} + \alpha_2 x_{i2} + \dots + \alpha_M x_{iM}. \quad (3)$$

已知正常角膜的标签为  $-1$ ; 圆锥角膜的标签为  $1$ , 则分类后的标签为  $E(y_i) \in \{-1, 1\}$ , 目标函数为:

$$J = \sum_{i=1}^M (E(y_i) - \text{label}(y_i)), \quad (4)$$

计算使目标函数  $J$  最小化的  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)$ 。

本文采用优化的基于共轭方向的 Powell 算法<sup>[31]</sup> 评估  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_M)$ 。将所有的特征都用于计算联合参数, 特征权重小于  $0.000 1$  时, 则设置为零。

基于共轭方向的 Powell 算法通过比较目标函数值的大小, 在  $n$  个(本文取 3 个)线性无关的方向上移动迭代点求出极值, 从而得到最优参数。具体步骤如下:

(1) 给定允许误差  $\epsilon = 0.01$ , 初始点和 3 个线性无关的方向为  $d^{(1,1)}, d^{(1,2)}, d^{(1,3)}$ ;

(2) 从初始点出发, 依次沿着(1)中 3 个方向进行一维搜索, 本文采用黄金分割法, 得到 3 个点;

(3) 比较(2)中 3 个点的目标函数值, 选择最优的点替代初始点, 接着更新方向, 使得共轭;

(4) 重复步骤(2)、(3), 计算本轮迭代与上一轮迭代初始点的欧拉距离, 若小于  $\epsilon$ , 则停止搜索, 得到的最优点即是所求参数。

## 4 支持向量机(SVM)

SVM 常用于分类<sup>[19-21]</sup>。对于两类问题  $\{x^p, d_p\}_{p=1}^N$ , 其中  $d_p$  为教师及分类号,  $d_p \in \{1, -1\}$ ,  $x^p$  为样本集,  $N$  为样本数, 若训练样本是线性可分的, SVM 就是找到一个超平面, 使得两类中最靠近的点的距离最大, 此时该超平面为最优分界面, 最优边界上的样本称为支持向量。对于线性不可分的样本作非线性变换, 使其转化为线性可分。在映射后的空间内, 最优平面为:

$$w_0^T \phi(x^p) + b = 0, \quad (5)$$

其中:  $w_0$  及  $b$  为最优分界面对应的权及偏差;  $\phi(x^p)$  为映射函数。

求最优平面时, 应在约束条件下进行:

$$d^p (w^T \phi(x^p) + b) \geq 1, \quad (6)$$

引入拉格朗日乘子  $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)^T$ , 则目标函数  $J$  为:

$$J(w, b, \alpha) = \frac{1}{2} w^T w - \sum_{p=1}^N \alpha_p (d^p (w^T \phi(x_p) + b) - 1), \quad (7)$$

决策函数  $g$  为:

$$g(x) = \text{sgn}(\sum_{p=1}^N \alpha_p d^p \phi(x^p)^T \phi(x) + b), \quad (8)$$

其中核函数为:

$$k(x^p, x) = \phi(x^p)^T \phi(x). \quad (9)$$

常用的核函数有线性核函数、多项式核函数、Guassian 核函数和 Sigmoid 核函数等。本文采用多项式核函数。

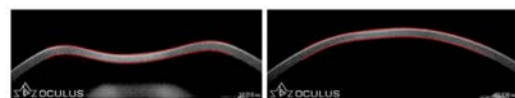
## 5 实验结果与讨论

### 5.1 实验数据和平台

本文评估了 70 例正常角膜, 28 例正常圆锥角膜。正常群体年龄从 19 到 45 岁, 圆锥角膜患者年龄从 16 到 40 岁。数据采集于中国人民解放军总医院(2012 年 8 月到 2013 年 12 月)。本文采用 Matlab R2011b 和 SPSS 16.0 软件进行数据分析。

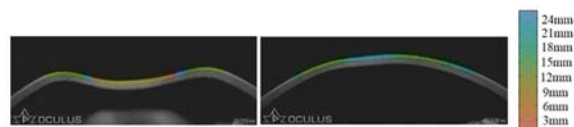
### 5.2 曲率半径的动态显示

为了方便、直观地观察角膜曲率半径在整个进程中的变化趋势, 本文将上角膜曲率半径值与彩色图像进行融合, 观察动态效果。图 3(彩图见期刊电子版)显示了同一病人的两帧曲率半径的估计结果。其中, 图 3(a)为对应的角膜边界分割结果。



(a) 分割结果

(a) Segmentation results



(b) 融合结果

(b) Fusion results

图 3 曲率估计结果

Fig. 3 Estimation results of curvature radius

5.3 特征提取结果

首先,计算出具有良好分类性能的参数,形变幅度(DA)<sup>[12]</sup>、中心曲率(CC<sub>HC</sub>)<sup>[13]</sup>和峰值距离(PD),用于比较。

DA:角膜下降到最低处时,角膜中心点位置与吹气前位置的距离。

CC<sub>HC</sub>:角膜中心点到达最低处时的中心曲面半径,如图 4 所示。

PD:角膜中心点到达最低处时两个峰之间的距离。

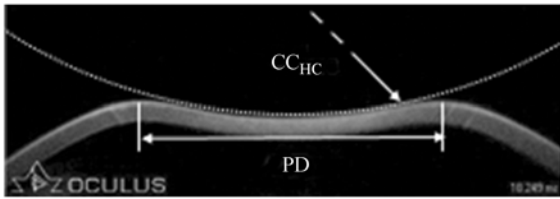


图 4 参数描述

Fig. 4 Description of parameters

此外,本文还获取了以下具有分类能力的特征用于特征选择:

T<sub>s</sub>:从扁平时刻到达最大凹陷时的时间;

Cur\_B:从开始吹气到第一扁平时刻,角膜中心点曲率半径的均值;

Cur\_D:两次扁平时刻之间,角膜中心点曲率半径的均值;

V<sub>s</sub>:两次扁平时刻之间,角膜中心点曲率变化速率序列;

V<sub>m</sub>:两次扁平时刻之间,角膜平均变化速度;

H\_norm, H\_std:V<sub>s</sub> 经小波变换后高频成分范数和标准差;

L\_norm, L\_std:V<sub>s</sub> 经小波变换后低频成分范数和标准差;

然后,基于最小均方误差方法,从以上特征中提取出两个新的特征参数:

$$Com1 = 0.5285H_{norm} + 0.1656H_{std} + 0.602Vm + 0.263Ts, \quad (10)$$

$$Com2 = 0.5Cur_B - 1.8368Cur_D. \quad (11)$$

5.4 分类结果

为了定量比较分类结果,本文计算了准确度(accuracy)、灵敏度(sensitivity)、特异性(specificity)、阳性预测值(Positive Predictive Value, PPV)和阴性预测值(Negative Predictive Value, NPV)<sup>[32]</sup>。

$$accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}, \quad (12)$$

$$sensitivity = \frac{TP}{TP + FN}, \quad (13)$$

$$specificity = \frac{TN}{TN + FP}, \quad (14)$$

$$PPV = \frac{TP}{TP + FP}, \quad (15)$$

$$NPV = \frac{TN}{TN + FN}, \quad (16)$$

其中:TP, TN 分别为真阳性和真阴性;FP, FN 分别为假阳性和假阴性。

由于样本数相对较少,所以采用留一法分配样本,即进行 10 次试验取平均值,分类结果如表 1 所示。

表 1 各个特征用于分类的结果

Tab. 1 Results of various features for classification (%)

Feature	accuracy	sensitivity	specificity	PPV	NPV
DA	79.6	91.4	50.0	82.1	70.0
CC <sub>HC</sub>	81.6	80.0	85.7	93.3	63.1
PD	46.9	45.7	50.0	69.6	26.9
Com1	87.8	91.4	92.6	96.8	76.9
Com2	91.8	97.1	78.6	91.9	91.7

从表中可以看出,本文所提出参数的各个指标都比较接近于 1。Com2 的准确度、灵敏度和阴性预测值较其它参数都最优,上述三项指标比最优传统参数分别提高了 10.2%,5.7%和 21.7%。Com1 的特异性和阳性预测值较其它参数都最优,上述两项指标比最优传统参数分别提高了 6.9%和 3.5%。

表 2 各个特征的 ROC 曲线分析结果

Tab. 2 Analysis results of ROC curve for various features

parameter	Area	Cutoff point	Sensitivity / (%)	Specificity / (%)
DA	0.857	1.215	67.9	87.1
CC <sub>HC</sub>	0.918	6.255	95.9	88.6
PD	0.631	5.405	53.6	71.4
Com1	0.830	0.545	67.9	92.9
Com2	0.948	-0.551	78.6	95.7

为进一步比较分类结果,进行了受试者工作特征(ROC)曲线分析,表 2 显示了 ROC 曲线下

面积(Aera)、截点(Cutoff point)等参数。从表中可以看出,Com2 对应的曲线下面积达到最大,为 0.948,此时对应的截点为-0.551。截点对应的灵敏度和特异性分别为 78.6%和 95.7%。

## 6 结 论

本文首先利用杂质和角膜边界的位置、大小等先验关系,基于相位分割方法检测出整个运动过程中的角膜边界,并计算出了前角膜曲率半径值;然后根据角膜受空气脉冲和弹力等作用的运动特征,运用小波变换提取出高低频成分。从频

率的角度,论证了角膜基本运动趋势存在着振动过程。此外,还提取了其他的特征参数,包括形变幅度、峰值距离、中心曲率半径等;接着,以最小均方误差为目标函数,利用基于共轭方向的 Powell 算法求解系数,提取出最优特征参数;最后,基于 SVM 算法对正常角膜和圆锥角膜进行分类。

与已提出的经验证过的传统参数相比,本文所提出参数的特征分类准确率、灵敏度、特异性、阳性预测值和阴性预测值分别提高了 10.2%、5.7%、6.9%、3.5%和 21.7%。ROC 曲线下的面积为 0.948。实验结果验证了本文参数对于圆锥角膜和正常角膜分类的有效性。

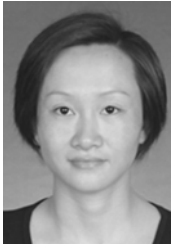
## 参考文献:

- [1] DUDAKOVA L, LISKOVA P, JIRSOVA K. Is copper imbalance an environmental factor influencing keratoconus development? [J]. *Medical Hypotheses*, 2015, 84(5): 518-524.
- [2] KRACHMER J H, FEDER R S, BELIN M W. Keratoconus and related non-inflammatory corneal thinning disorders [J]. *Surv Ophthalmol*, 1994, 28: 293-322.
- [3] SULL A C, VUONG L N, PRICE L L, et al.. Comparison of spectral/Fourier domain optical coherence tomography instruments for assessment of normal macular thickness [J]. *Retina-The Journal of Retinal and Vitreous Diseases*, 2010, 30(2): 235-245.
- [4] 王立科,张佳莹,田磊,等. 基于光学相干层析气冲印压技术研究角膜生物力学特性 [J]. *光学精密工程*, 2015, 23(2): 325-333.  
WANG L K, ZHANG J Y, TIAN L, et al.. OCT based air jet indentation for corneal biomechanical assessment[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 325-333. (in Chinese)
- [5] ANAYOL M A, GULER E, YAGCI R, et al.. Comparison of central corneal thickness, thinnest corneal thickness, anterior chamber depth, and simulated keratometry using galilei, pentacam, and sirius devices [J]. *Cornea*, 2014, 33(6): 582-586.
- [6] AMBROSIO R, CAIADO A L C, GUERRA F P, et al.. Novel pachymetric parameters based on corneal tomography for diagnosing keratoconus [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2011, 27(10): 753-758.
- [7] LUCE D A. Determining in vivo biomechanical properties of the cornea with an ocular response analyzer [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2005, 31(1): 156-162.
- [8] LUCE D, TAYLOR D. Reichert ocular response analyzer measures corneal biomechanical properties and IOP [J]. *Reichert Ophthalmic Instruments*, 2006.
- [9] AMBROSIO R, RAMOS I, LUZ A, et al.. Dynamic ultra high speed Scheimpflug imaging for assessing corneal biomechanical properties [J]. *Revista Brasileira de Oftalmologia*, 2013, 72(2): 99-102.
- [10] HONG J X, XU J J, WEI A J, et al.. A new tonometer-the Corvis ST tonometer: clinical comparison with noncontact and Goldmann applanation tonometers [J]. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 2013, 54(1): 659-665.
- [11] AMBRÓSIO JR R, NOGUEIRA L P, CALDAS D L, et al.. Evaluation of corneal shape and biomechanics before LASIK [J]. *International Ophthalmology Clinics*, 2011, 51(2): 11-38.
- [12] TIAN L, HUANG Y F, WANG L Q, et al.. Corneal biomechanical assessment using corneal visualization scheimpflug technology in keratoconic and normal eyes [J]. *Journal of Ophthalmology*, 2014, 2014:147516.

- [13] AMBROSIO JR R, CALDAS D, RAMOS I, *et al.*. Corneal biomechanical assessment using dynamic ultra high-speed Scheimpflug technology non-contact tonometry (UHS-ST NCT): preliminary results [C]. *American Society of Cataract and Refractive Surgery-American Society of Ophthalmic Administrators ( ASCRS-ASOA ) Symposium and Congress, San Diego, CA, 2011.*
- [14] ROBERTS C. Biomechanical customization: the next generation of laser refractive surgery [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2005, 31(1): 2-5.
- [15] TANG M L, LI Y, AVILA M, *et al.*. Measuring total corneal power before and after laser in situ keratomileusis with high-speed optical coherence tomography [J]. *Journal of Cataract & Refractive Surgery*, 2006, 32(11): 1843-1850.
- [16] LANZA M, CENNAMO M, LACCARINO S, *et al.*. Evaluation of corneal deformation analyzed with scheimpflug based device in healthy eyes and diseased ones [J]. *BioMed Research International*, 2014, 2014:748671.
- [17] HON Y, LAM A K C. Corneal deformation measurement using Scheimpflug noncontact tonometry [J]. *Optometry & Vision Science*, 2013, 90(1): e1-e8.
- [18] 张浩, 袁怡宝, 张峰. 巴特沃思小波在表面形貌信号分离中的应用 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7): 1661-1667.  
ZHANG H, YUAN Y B, ZHANG F. Application of Butterworth wavelet to surface topography signal separation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1661-1667. (in Chinese)
- [19] 高恒振, 万建伟, 粘永健, 等. 组合核函数支持向量机高光谱图像融合分类 [J]. *光学精密工程*, 2011, 19(4): 878-883.  
GAO H ZH, WAN J W, NIAN Y J, *et al.*. Fusion classification of hyperspectral image by composite kernels support vector machine [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(4): 878-883. (in Chinese)
- [20] MELGANI F, BRUZZONE L. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2004, 42(8):1778-1790.
- [21] 谭熊, 余旭初, 张鹏强, 等. 基于多核支持向量机的高光谱影像非线性混合像元分解 [J]. *光学精密工程*, 2014, 22(7): 1912-1920.  
TAN X, YU X CH, ZHANG P Q, *et al.*. Non-linear mixed pixel decomposition of hyperspectral imagery based on multiple kernel SVM [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(7): 1912-1920. (in Chinese)
- [22] JI C H, YU J H, WANG Y Y, *et al.*. Automatic phase-based edge detection of corneal Scheimpflug images [C]. *2014 IEEE Workshop on Electronics, Computer and Applications*, 2014: 840-843.
- [23] JI CH H, YU J H, LI T J, *et al.*. Dynamic curvature topography for evaluating the anterior corneal surface change with Corvis ST [J]. *Biomedical Engineering Online*, 2015, 14, Doi:10.1186/s12938-015-0036-2. (Accepted)
- [24] KOVESI P. Symmetry and asymmetry from local phase [C]. *Tenth Australian Joint Conference on Artificial Intelligence*, 1997, 190.
- [25] THOMAS S M, CHAN Y T. A simple approach for the estimation of circular arc center and its radius [J]. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 1989, 45(3): 362-370.
- [26] MALLAT S G. A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, 11(7): 674-693.
- [27] MISITI M, MISITI Y, Oppenheim G, *et al.*. Wavelet toolbox [J]. *The MathWorks Inc.*, Natick, MA, 1996.
- [28] THAYAPARAN T, ABROL S, RISEBOROUGH E, *et al.*. Analysis of radar micro-Doppler signatures from experimental helicopter and human data [J]. *IET Radar, Sonar & Navigation*, 2007, 1(4): 289-299.
- [29] HAN Z L, TAO C, ZHOU D, *et al.*. Air puff induced corneal vibrations: theoretical simulations and clinical observations [J]. *Journal of Refractive Surgery*, 2014, 30(3): 208-213.
- [30] CHEN K. A connectionist method for pattern classification

- cation with diverse features [J]. *Pattern Recognition Letters*, 1998, 19(7): 545-558.
- [31] 陈显毅. 图像配准技术及其 MATLAB 编程实现 [M]. 北京:电子工业出版社,2009.
- CHEN X Y. *Image Registration Technique and MATLAB Programming*[M]. Beijing: Electronic Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [32] 刘欣悦,黄廉卿. 利用多分辨率直方图特征分类数字 X 光乳腺图像 [J]. *光学精密工程*, 2006, 14(2):327-332.
- LIU X Y, HUANG L Q. Using multi-resolution histogram feature to classify digital X-ray mammography [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(2):327-332. (in Chinese)

作者简介:



余锦华(1978—),女,云南昆明人,副研究员,主要从事医学超声成像、医学信号处理、计算机辅助诊断方面的研究。  
E-mail: jhyu@fudan.edu.cn



季春红(1991—),女,江苏南通人,硕士研究生,主要从事超声、磁共振等医学图像处理方面的研究。E-mail: 13210720112@fudan.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)