

# 角膜地形图仪图像的边缘检测及形貌重构

徐丹阳<sup>1</sup>, 高建勋<sup>1</sup>, 隋成华<sup>1</sup>, 周明华<sup>2</sup>

<sup>1</sup>浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310023;

<sup>2</sup>浙江工业大学健行学院, 浙江 杭州 310023

**摘要** 为了实现所研制的角膜地形图仪应用于临床检验, 将 Klyce 经典的三维形貌重构模型改成光线逆追踪法进行建模; 获得 24 环每环 256 个点的亚像素级二维数据; 将这些数据由最小二乘法估算出原始假设椭球面; 对该椭球面进行修正, 得到最符合真实角膜的曲面。先采用 Canny 算法得到像素级的二维数据; 然后对数据的灰度进行平滑降噪; 之后对数据的灰度梯度进行 3 次拟合以获得亚像素级数据; 最后, 用标准的角膜地形图仪获得的清晰图片实现三维重构。通过分析两者获得的曲率半径及屈光度数据, 发现其误差小于 0.9%, 表明该方法具有可行性。

**关键词** 图像处理; 边缘检测; 形貌重构; 角膜地形图仪

中图分类号 O439; TH773

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP54.101004

## Image Edge Detection and Shape Reconstruction in Corneal Topography

Xu Danyang<sup>1</sup>, Gao Jianxun<sup>1</sup>, Sui Chenghua<sup>1</sup>, Zhou Minghua<sup>2</sup>

<sup>1</sup>College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China;

<sup>2</sup>Jianxing College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China

**Abstract** In order to achieve the application of corneal topography instrument in clinical examination, the traditional Klyce three-dimensional reconstruction of the surface model is changed into the ray tracing method. 24 rings and 256 sub-pixel data per ring are obtained. The original assumed ellipsoid is estimated by the least squares method. The ellipsoid is corrected to obtain the most realistic corneal surface. First of all, the pixel level data information is obtained by the Canny algorithm. Then, the gray value of the data is smoothed to reduce the noise. And the gray gradient of the data is fitted 3 times to obtain the sub-pixel data. Finally, the clear images obtained by standard corneal topography are used for the three-dimensional reconstruction. By analyzing the curvature radii and diopter data obtained by both methods, the results show that the errors are less than 0.9%, and it proves that the proposed method is feasible.

**Key words** image processing; edge detection; morphology reconstruction; corneal topography

**OCIS codes** 100.2000; 100.2960; 100.3010

## 1 引言

大脑通过人眼接收 90% 的外部信息, 并做出相应处理, 因此, 眼睛对人体来说十分重要<sup>[1]</sup>。从光学角度来说, 人眼由角膜和晶状体两个屈光系统构成<sup>[2]</sup>。角膜位于人眼的最前面, 任何事物的光线必须先通过角膜才能最终到达视网膜; 人眼约 75% 的屈光力被角膜占据, 其形貌的细微变化都有可能引起眼科疾病<sup>[3]</sup>。因此, 探究人眼角膜的形貌, 引起了全球科研工作者的兴趣。随着计算机图像处理技术的不断发展和提升, 能够精确、全面地诊断、分析角膜形貌的角膜地形图仪应运而生<sup>[4]</sup>。国内在该项技术应用方面还没有取得实质性进展, 大都停留于学术研究。因此, 研究一款能够用于临床检测的角膜地形图仪具有现实意义。前期主要

收稿日期: 2017-04-23; 收到修改稿日期: 2017-05-25

基金项目: 浙江省重大科技专项(2011C11048)、浙江工业大学自然科学基金(20100231)

作者简介: 徐丹阳(1983—), 男, 硕士, 实验师, 主要从事光电检测方面的研究。

E-mail: xudanyang@zjut.edu.cn

研究了角膜地形图仪的光学成像系统及图像的清晰度判别,目前正在开展图像的边缘检测及角膜形貌的重构。

图像的边缘往往最能够反映事物的本质特征<sup>[5]</sup>。要想使角膜地形图仪能够准确地实现角膜表面形貌的重构,必须进行图像的边缘检测。目前最常用的检测方法包括:微分算法(Sobel算子、Roberts算子、Canny算子等)、拟合方法(高斯拟合、多项式拟合等)、蚁群算法、小波分析法等<sup>[6-8]</sup>。角膜地形图仪的功能是给予被测量者眼角膜的形态及其屈光度、高度差、三维形貌等各项指标。根据 Klyce 经典模型,要想展现完整的眼角膜表面情况,首先需提取眼角膜表面的一些特定点(即 24 环每环 256 个点,共 6144 个数据),然后再根据眼角膜本身为光滑曲面的特点,对数据进行插值计算,获得一组与原图数据点具有相同排列、相同数据点密度的屈光度和高度差数据。为了保障仪器检测精度为 $\pm 0.5D$ 及中心几环能够获得相应的数据点,在提取图片的边缘特征数据时必须达到亚像素级<sup>[9-10]</sup>。综合考虑系统运行的速度、精度、抗噪性能等因素,首先采用抗噪性能较好的 Canny 算法对目标图像进行像素边缘提取,然后采用 3 次多项式拟合实现该图像数据的亚像素级提取,实现图像中心点的确立,获取 24 环每环 256 点的坐标信息。利用建模的方法将提取的二维数据点坐标信息进行三维形貌重构的模型有:基于分段圆弧法的数学模型、Halstead 样条曲面拟合模型、Klyce 经典模型等<sup>[11-13]</sup>。Klyce 经典模型只对球对称角膜适用,而对其他角膜会产生较大误差。为了减小这种误差,对 Klyce 经典模型采用光线逆追踪法建模,即先假设一个角膜曲面,光线由假设曲面反射与 Placido 盘交于一点,通过不断调整假设曲面,使交点与光源点最贴切的这个假设曲面最符合真实角膜。

对图像的边缘特性信息数据进行提取时,采用分步提取,即先提取图像的像素级数据,再在此基础上实现亚像素级数据的提取。通过这种方法得到的数据可以保证其后续处理时的精度要求。对 Klyce 经典模型采用光线逆追踪法建模设计,利用标准的角膜地形图仪获得的清晰图片用该方法实现三维重构,并与标准仪器获得的曲率半径及屈光度数据相比较,曲率半径误差小于 0.9%,屈光度误差小于 0.5D,表明该方法可行。

## 2 实验条件

角膜地形图仪的功能是测量角膜形貌。医生通过分析角膜形貌来判断眼睛疾病,并为屈光矫正手术和验配硬性透气式隐形眼镜提供参考数据,图 1 为系统示意图。图 1 中 A 为计算机,主要作用为图像处理,运用算法和模型获得屈光度、像差分析、角膜三维形貌等参数。B 为一款 80 万像素的 OEM 板级相机,主要用于获取清晰的数字图像。C 为由两组双胶合透镜组成的光学系统,其焦距为 20 mm,相对孔径为 1/3,视场角为  $8^\circ$ ,主要作用为在 CCD 上成完整清晰的像。D 为由 24 环黑白相间的同心圆环组成的椭球型 Placido 盘,成像于角膜表面使其能够提取边缘特征用于分析角膜形貌。E 为人眼。

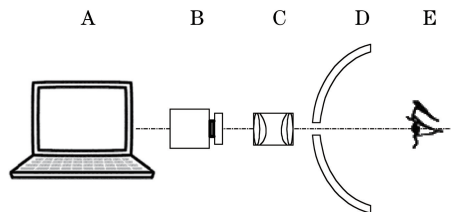


图 1 系统示意图

Fig. 1 System diagram

## 3 边缘亚像素提取

角膜地形图仪的光学成像系统是将 Placido 盘投射到球面,通过对称式消色差物镜成像在 CCD 上。由于成像系统具有一定的景深,拍摄球面时只在中心区域附近成像清晰。选用图像的灰度梯度值表征清晰度,在取清晰度值时引入离中心点的距离权重来判别图像的清晰度,最终拍摄到清晰的黑白图像。

图 2 为图片处理过程。对一幅清晰的角膜模拟眼图片[图 2(a)]进行图像中心点的确立,获取 24 环每环 256 点的坐标信息,即图像数据的像素提取。

Canny 算法对图片进行像素边缘提取过程如下:1) 用高斯滤波去除图片的明显噪声,然后对图片的灰

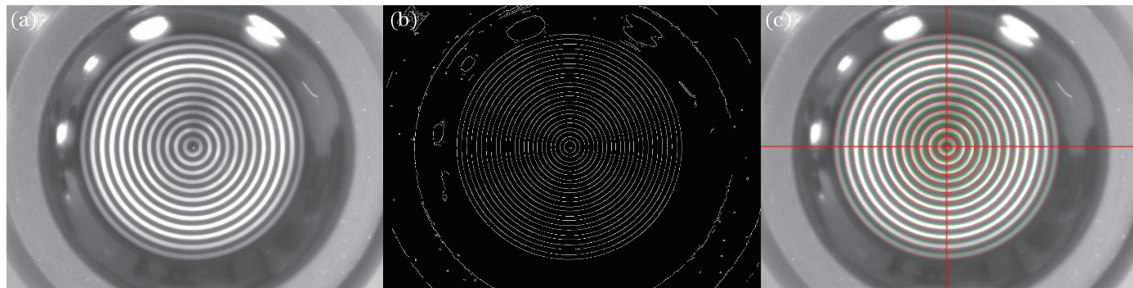


图 2 图片处理过程。(a)清晰图像;(b)Canny 边缘提取;(c)环识别

Fig. 2 Image processing. (a) Clear image; (b) Canny edge extraction; (c) loop identification

度梯度进行计算,计算图片中任意一个像素点与其周围 8 个像素点的灰度幅值、方向以明确其关联程度(图 3);2) 通过非极值点置零的方式再去掉大部分非边缘信息;3) 通过设置两个阈值来确定边缘点,高于阈值认为是边缘点,低于阈值则不是边缘点,若介于两阈值之间,则判断其周围 8 个像素点,若有一个像素高于阈值则认为是边缘点。最终获得的 Canny 边缘提取如图 2(b)所示,算法流程如图 4 所示。

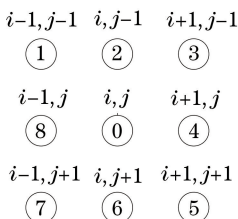


图 3 像素点关联图

Fig. 3 Correlation graph of pixel points

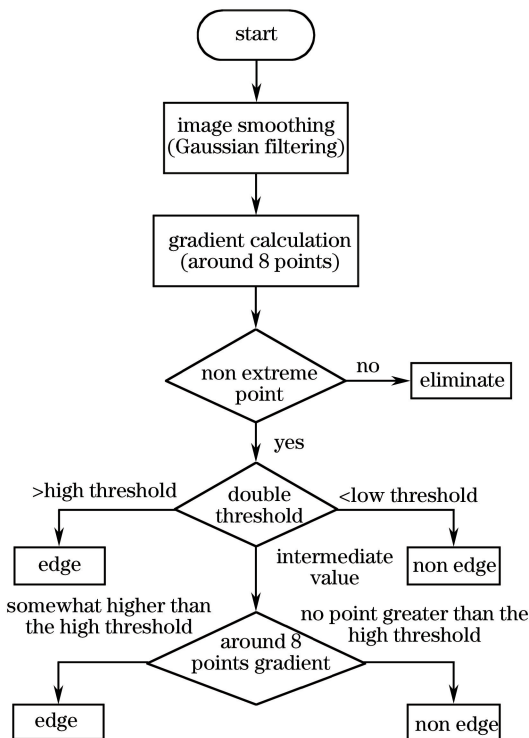


图 4 算法流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed algorithm

理论上,将角膜瞳孔部分设为圆球面,由 Canny 算子得到其中心点,所得圆边缘检测点基本符合标准圆。选取该圆环边缘的 8 个数据点,可得到 1120 个圆心和半径数据,任意 3 点能确定一个圆。分析 1120 个圆心数

据,保留两点之间距离小于 2 pixel 的中心点,舍弃不满足条件的中心点,然后进行平均得到亚像素中心点。

通过该亚像素中心点进行 24 环每环 256 个亚像素边缘数据提取。假设一组圆环的曲线灰度数据为  $x_i$  ( $i=1,2,3,\dots,n$ ),利用灰度梯度得到该曲线的拐点,并在其每个最低点与最高点之间进行数据的 3 次拟合,最终获得该环的亚像素数据点。为了获得精确的亚像素边缘数据点,对灰度数据平滑以降低噪声对灰度梯度数据 3 次拟合过程的影响。对灰度数据平滑处理的方程为

$$\begin{cases} x'_1 = (x_1 + x_2) / 2 \\ x'_2 = (x_1/2 + x_2 + x_3 + x_4 + x_5/2) / 4 \\ x'_i = (x_{i-2}/2 + x_{i-1} + x_i + x_{i+1} + x_{i+2}/2) / 4, & n-1 > i > 2. \\ x'_{n-1} = (x_n/2 + x_{n-1} + x_{n-2} + x_{n-3} + x_{n-4}) / 4 \\ x'_n = (x_n + x_{n-1}) / 2 \end{cases} \quad (1)$$

最终获得的 24 环识别处理图,如图 2(c)所示。

#### 4 形貌重构

采用光线逆追踪法(图 5)实现角膜重构,即先假设一个角膜曲面,光线由假设曲面反射与 Placido 盘交于一点,通过不断调整假设曲面,使交点与光源点最贴近的这个假设曲面最符合真实角膜。

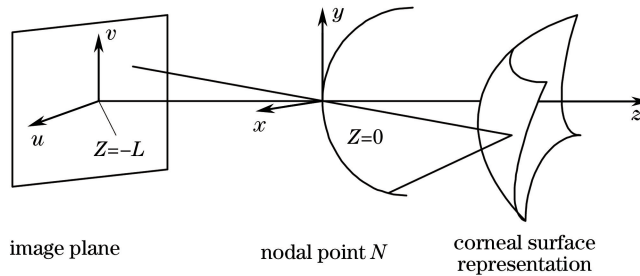


图 5 光线逆向追踪示意图

Fig. 5 Schematic of ray tracing backward

假设角膜曲面为椭球面。医学界认为人眼近似椭球面,方程为

$$g(x, y) = z = -c \sqrt{1 - \frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2}} + \lambda, \quad (2)$$

式中系数  $a, b, c, \lambda$  由最小二乘法进行估算。

为了获得最符合真实角膜的曲面,要对假设曲面进行修正,添加未知参数的修正项,其表达式变为

$$f(x, y) = g(x, y) + a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4y^2 + a_5xy. \quad (3)$$

求得(3)式中  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5$  的合适值,使交点与光源点最贴近。

通过光线逆追踪法实现曲面的三维重构。利用角膜地形图仪(Eye Top 2005,CSO 公司,意大利)获取模拟眼和人眼的清晰图片(图 6),将该清晰图片采用光线逆追踪法获得重构的三维形貌(图 7),并与采用

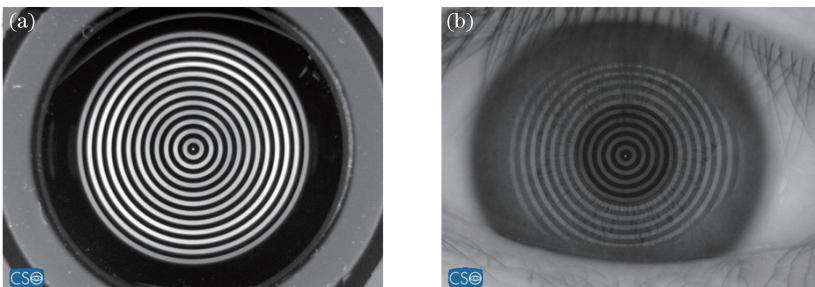


图 6 CSO 清晰图。(a)模拟眼清晰图;(b)人眼清晰图

Fig. 6 Clear images from CSO. (a) Clear image of simulated eye; (b) clear image of human eye

CSO 公司配置的处理软件获得的亚像素级数据实现的三维形貌图(图 8)进行对比,发现其形貌基本一致。另外,比较两种方法在相同坐标下获得的屈光度及曲率半径值,如表 1 所示,CSO 为软件获得的数据,RD 为光线逆追踪法获得的数据。结果表明,该重构方法在标准眼测试上误差要小于真实人眼,测得的人眼曲率半径的误差小于 0.9%,屈光度值的误差小于 0.5D,在误差允许范围内,表明该方法可行。

表 1 数据对比表

Table 1 Comparison table of data

Standard eye					Human eye				
$(x, y)$	R /mm		Diopter /D		$(x, y)$	R /mm		Diopter /D	
	CSO	RD	CSO	RD		CSO	RD	CSO	RD
(0.00, 0.00)	7.98	7.96	42.31	42.39	(0.00, 0.00)	7.96	7.92	42.62	43.00
(1.02, 0.00)	7.99	7.98	42.26	42.28	(1.01, 0.00)	7.98	7.77	43.46	43.16
(0.00, -1.99)	7.98	7.97	42.28	42.33	(0.00, -2.01)	7.97	7.77	43.46	43.68
(3.00, 0.00)	8.00	7.99	42.21	42.24	(3.00, 0.00)	7.99	8.02	42.06	42.13
(0.00, -4.02)	7.99	7.98	42.26	42.31	(0.00, -4.01)	7.98	7.74	43.61	43.36
(-1.52, 1.52)	7.98	7.97	42.29	42.35	(-1.52, 1.52)	7.97	7.90	42.71	42.83
Error /%	0.25		0.14			0.89		0.89	

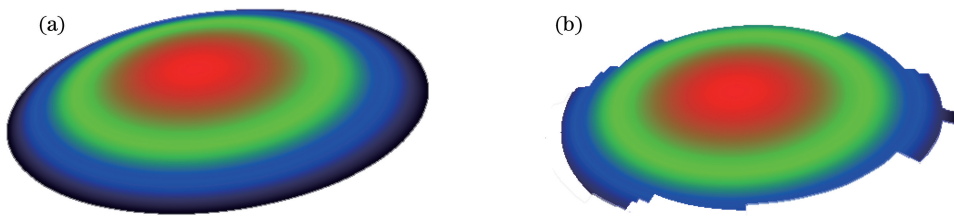


图 7 光线逆追踪法结果。(a)模拟眼三维形貌;(b)人眼三维形貌

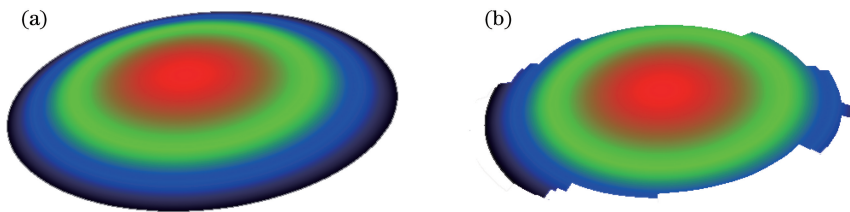
Fig. 7 Results of ray tracing method. (a) Three-dimensional shape of simulated eye;  
(b) three-dimensional shape of human eye

图 8 CSO 获取三维形貌图。(a)模拟眼三维形貌;(b)人眼三维形貌

Fig. 8 Three-dimensional shapes obtained by CSO. (a) Three-dimensional shape of simulated eye;  
(b) three-dimensional shape of human eye

## 5 结 论

利用光线逆追踪法建模重构角膜表面三维形貌:1) 提取眼角膜表面的一些特定点(即 24 环每环 256 个点,共 6144 个数据);2) 根据眼角膜本身是一个光滑曲面的特点,对数据进行插值计算,形成一个假设曲面;3) 对该曲面进行修正,获得最终的角膜形貌。特定点亚像素级数据的获取:1) 利用 Canny 算法对图片进行像素边缘提取;2) 对 Canny 算法得到的灰度数据进行 3 次平滑来降低噪声对后续灰度梯度数据 3 次拟合过程的影响;3) 通过灰度梯度数据 3 次拟合得到建模想要的理想数据。对意大利 CSO 公司生产的角膜地形仪获得的清晰图片实现三维重构,比较两种方法在相同坐标下获得的屈光度及曲率半径值,发现该重构方法在标准眼测试上误差要小于真实人眼,测得的人眼最大误差小于 0.9%,屈光度值的误差小于 0.5D,在误差允许范围内,表明该方法可行。

## 参 考 文 献

- [1] Wan Mingmei. Ophthalmology/Technology for visually handicapped students[M]. Taipei: Wu-Nan Book Company Ltd., 2004: 3-5.  
万明美. 眼科学/视障教育工学[M]. 台北: 五南图书出版股份有限公司, 2004: 3-5.
- [2] 吕帆. 眼球光学(第一讲)[J]. 眼视光学杂志, 2001, 3(1): 53-55.
- [3] Liu Zuguo, Lin Yueheng. Corneal topography[M]. Guangzhou: Guangdong Science and Technology Press, 2001: 1-3.  
刘祖国, 林跃生. 角膜地形图学[M]. 广州: 广东科技出版社, 2001: 1-3.
- [4] 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.
- [5] Huang Hailong, Wang Hong, Ji Li. Order morphology edge detection algorithm based on partial fuzzy enhancement [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(11): 2608-2614.  
黄海龙, 王宏, 纪俐. 基于局部模糊增强的顺序形态学边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11): 2608-2614.
- [6] Zhang Wenjie, Xiong Qingyu, Shi Weiren, *et al.* Weighted neighbor-region based multi-level fuzzy edge detection method[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2015, 45(3): 998-1004  
张文杰, 熊庆宇, 石为人, 等. 基于邻域加权的多层次模糊边缘检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2015, 45(3): 998-1004.
- [7] Shi Wen, Zhu Xuefang, Zhu Guang. Aaptive edge detection algorithm of MRI image based on morphology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(2): 408-414.  
师文, 朱学芳, 朱光. 基于形态学的 MRI 图像自适应边缘检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2013, 34(2): 408-414.
- [8] Zhang Zhilong, Yang Weiping, Li Jicheng. A novel salient image edge detection algorithm based on ant colony optimization[J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2014, 36(9): 2061-2067.  
张志龙, 杨卫平, 李吉成. 一种基于蚁群优化的显著边缘检测算法[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(9): 2061-2067.
- [9] Wang Sheyang, Song Shenmin, Chen Xinglin, *et al.* Improvement spatial moment subpixel edge detection method[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(6): 870-876.  
王社阳, 宋申民, 陈兴林, 等. 改进的空间矩亚像素边缘检测算法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 870-876.
- [10] Wu Peng, Xu Hongling, Song Wenlong, *et al.* A nonlinear quartic image interpolation based subpixel edge detection algorithm[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2015, 36(2): 243-247.  
吴鹏, 徐洪玲, 宋文龙, 等. 基于非线性四阶图像插值的亚像素边缘检测算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2015, 36(2): 243-247.
- [11] Gong D W, Chen J H, Yuan C, *et al.* A new method for reconstruction of corneal topography with Placido disk system [J]. Advanced Materials Research, 2014, 974: 373-378.
- [12] Doss J D, Hutson R L, Rowsey J J, *et al.* Method for calculation of corneal profile and power distribution [J]. Archives of Ophthalmology, 1981, 99(7): 1261-1265.
- [13] Klyce S D. Computer-assisted corneal topography. High-resolution graphic presentation and analysis of keratometry[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 1984, 25(12): 1426-1435.