

基于图像处理的人眼离焦量的动态补偿系统

张中祥, 许崇祥, 燕卫江, 苏宇锋, 贾志刚*

郑州大学机械与动力工程学院, 河南 郑州 450001

摘要 目前常用的屈光不正的矫正方式都是针对人眼像差的某一静态值进行矫正, 无法对人眼像差的动态变化进行有效矫正。为了解决这一问题, 开发了一种基于图像处理的人眼离焦量的动态补偿系统, 其以红外相机和图像处理程序组成的瞳孔大小动态测量系统、透射式变形镜和控制程序组成的屈光力动态矫正系统为核心。在光学实验平台上搭建出系统原型, 并展开实验。实验结果表明, 所提系统能够在不同光强条件下实现对人眼瞳孔大小的准确测量及对应离焦像差的准确、快速、平滑的矫正, 初步证实了所提系统的有效性。

关键词 人眼像差; 动态矫正; 图像处理; 透射式变形镜

中图分类号 TP272

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230784

Developing Dynamic Compensation System for Eye Defocus Based on Image Processing

Zhang Zhongxiang, Xu Chongxiang, Yan Weijiang, Su Yufeng, Jia Zhigang*

School of Mechanical and Power Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, Henan, China

Abstract The commonly used correction methods of ametropia are all focused on correcting a certain static value of human-eye aberration; however, these methods cannot effectively correct the dynamic changes in human-eye aberration. To solve this problem, a dynamic compensation system is developed to correct the eye's defocusing of humans based on image processing. The system consists of a dynamic measurement system for pupil size composed of an infrared camera and an image processing program, and a dynamic correction system for refractive power composed of a transmission deformable mirror and a control program as the core. The system prototype is built on the optical experimental platform, where the corresponding experiments are performed. The results show that the system can assess the accurate measurement of the pupil size and ensure an accurate, fast, and smooth correction of the corresponding defocus aberration under different light intensities, thereby preliminarily confirming the feasibility and effectiveness of the proposed method and system.

Key words human eye aberration; dynamic correction; image processing; transmissive deformable lens

1 引言

随着各种发光显示设备使用时长的增加, 人类的视力健康问题日益恶化^[1]。我国青少年本就普遍存在的近视问题同样随着电脑、手机的普及而日趋严重^[2]。目前, 矫正各种屈光不正的方法主要有 3 种: 框架眼镜、角膜接触镜及眼科手术^[3]。虽然它们各自的优缺点和适用范围不同, 但都是针对人眼像差某一静态值进行矫正的, 而人眼像差会随着光照环境、生理心理等因素的变化而变化^[4], 其中, 瞳孔大小是决定人眼像差

的最直接因素^[5]。显然, 目前常用的 3 种针对屈光不正的矫正方式不能跟踪人眼像差的动态变化, 也就无法对人眼像差进行实时的、动态的、精确的矫正。因此, 有必要开发一种能够实现屈光力自适应调节的人眼像差动态矫正系统, 它可以动态适配人眼像差的变化, 以实现对人眼像差实时的、动态的、精确的矫正。

在光学系统的像差矫正方面, 许多研究者已经做了大量工作^[6-7], 在人眼像差的矫正方面, 同样已有大量研究。比如, 杨叶城等^[8]制作了一种可用于人眼像差矫正的变焦透镜, Wu 等^[9]利用新型微机电变形镜作

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-04; 录用日期: 2023-05-08; 网络首发日期: 2023-07-12

基金项目: NSFC-河南联合基金项目(U1904169)

通信作者: *jiazhigang@zzu.edu.cn

为波前校正器来矫正人眼像差,但目的是获得视网膜的高清成像,视觉上人眼感受不到矫正效果。他们使用 Shack-Hartmann 波前传感器和反射式变形镜,导致系统体积过大而无法实用化和便携化。与此类似地, Liu 等^[10]同样采用 Shack-Hartmann 波前传感器和反射式变形镜相结合的方式矫正人眼像差。Mompeán 等^[11]对老花眼的实时矫正进行了研究,但是他们的工作只针对中老年人的老视问题,不包含对近视或远视的矫正。Karkhanis 等^[12]所述的自动调节眼镜虽在具体构造上有所不同,但仍是对老花眼的矫正。

针对以上问题,本文提出了一种基于图像处理的人眼离焦量的动态补偿系统,该系统能够实时监测人眼瞳孔大小的状态,并根据瞳孔大小与离焦像差的对应关系,对置于人眼正前方的透射式变形镜进行相应的调节,用以补偿人眼的离焦量,达到对近视或远视等屈光不正矫正的目的,实现对人眼离焦量的动态补偿效果。

2 系统的组成及工作原理

基于图像处理的人眼离焦量的动态补偿系统主要包含 2 个子系统:瞳孔大小动态测量系统和屈光力动态矫正系统。其组成和工作原理如图 1 所示。

瞳孔大小动态测量系统由带有红外 LED 的红外

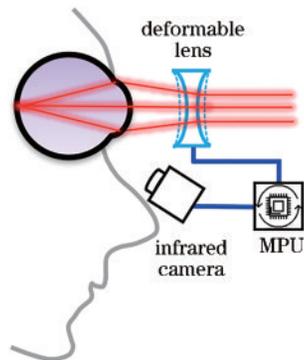


图 1 系统组成及工作原理

Fig. 1 System composition and working principle

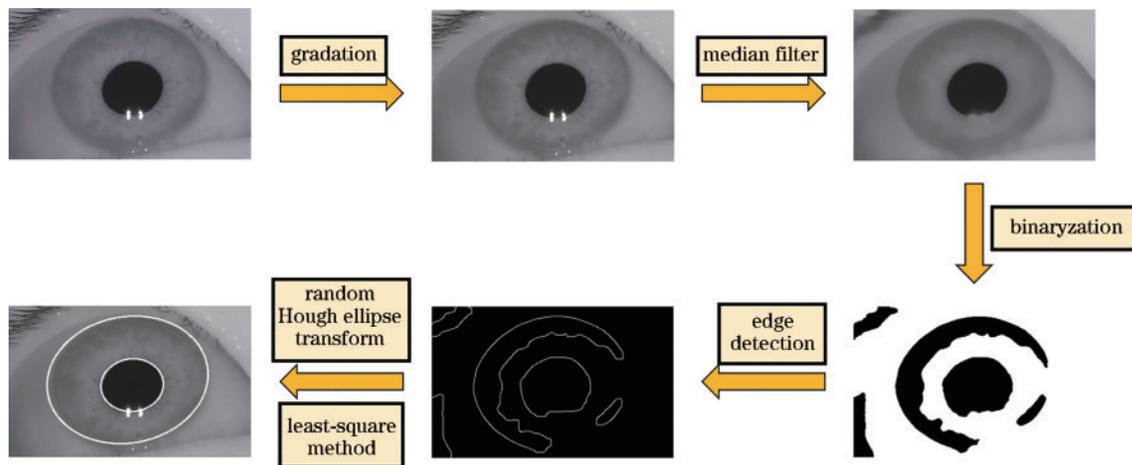


图 2 图像处理流程

Fig. 2 Flow chart of the image processing

相机和图像处理程序组成。红外相机以合适角度倾斜置于人眼下方(角度及距离可调节),并以合适的分辨率和帧率对人眼球的状态进行实时录制。所获图像通过微处理器 MPU 经基于 Python 语言及对应的开源计算机视觉库 OpenCV 所开发的程序得到处理,获得瞳孔大小的实时数据。

屈光力动态矫正系统由透射式变形镜、驱动器和控制程序组成。透射式变形镜如普通框架眼镜一样置于人眼正前方,依据瞳孔大小与人眼离焦量之间的对应关系对变形镜进行相应的调节,以对进入人眼的光线进行像差补偿,使人眼能够感受到像差矫正后的视力效果。使用的透射式变形镜有效孔径为 16 mm,屈光度调节范围为 $-10\text{ D}\sim+10\text{ D}$ 。该可调透镜内部充满了光学流体,外膜由弹性聚合物组成,致动器通过改变光学流体上的压力改变膜的形状,进而改变屈光力。因此,通过控制施加给致动器的电流就可以控制变形镜的屈光力,变形镜的调节可在毫秒内完成。控制程序根据硬件配置,基于 Python 语言及串口通信库 Serial 完成,变形镜的控制由微处理器依据控制程序完成。

系统的整个运行流程如下:红外相机将人眼实时视频传输到微处理器中,在微处理器上完成图像处理,并计算出瞳孔大小;而后根据事先测量好的存储在微处理器中的患者瞳孔大小与离焦像差的对应关系,控制透射式变形镜完成相应的变形,从而实现对人眼离焦量的实时补偿;根据实验数据及患者的主观感受,不断优化实时视频的采样频率及变形镜的调节速率,实现准确、快速、平滑的屈光力调节,以保证患者在视力动态补偿过程中的舒适性。

3 瞳孔大小动态测量系统

瞳孔大小动态测量系统主要包括红外相机及相应的图像处理方法,红外相机实时监控人眼球的状态变化,图像处理方法获得人眼瞳孔大小的动态变化,主要处理流程如图 2 所示。

3.1 图像处理方法

微处理器读取红外相机传输的实时视频流并截帧。在外界环境发生变化时,人眼瞳孔的调节速率因人而异,一般不超过 3.5 mm/s^[13]。因而在本文中,截帧的时间间隔根据患者的主观感受确定,并考虑到实用性和舒适性,设为 200 ms。

针对所获的人眼红外图像,首先进行的是图像预处理工作,这一步是为了消除图像中无关的干扰信息,保留有用的真实信息,最大限度地简化数据^[14]。图像预处理在图像处理过程中非常重要,直接关系到后续处理的复杂度和精度,主要处理步骤包括灰度化、中值滤波、二值化及边缘检测等,如图 2 所示。

其次,由于人眼与相机的相对位置的影响,瞳孔和虹膜所成的像均为不规则的椭圆形状,因此,需要对图像中的椭圆进行检测和拟合。本文采用随机 Hough 椭圆变换的方法,利用椭圆的几何特征,将三维空间的运算转换到二维,从而大大减少了计算量和运行时间^[15];并且结合最小二乘法^[16],在实现对椭圆快速拟合的基础上,提高拟合精度。通过上述处理后,能够快速准确地检测出瞳孔和虹膜的像素值大小,并描绘出图 2 所示的瞳孔和虹膜较为明显的椭圆形边界。

3.2 瞳孔大小的计算

数字图像与真实物体之间存在透视投影的变换过程,透视投影会改变原目标物体的形状和大小,这导致近乎为圆形的瞳孔和虹膜在图像中显示为椭圆。Ahn 等^[17]就圆形物体透视投影前后的中心偏移问题做了理论推导和实验验证,本文循其思路,计算出了圆形目标与其在图像中显示出的椭圆的大小关系,即

$$\frac{r'}{r} = \left| \frac{cd \cos \alpha}{d^2 \cos^2(\omega - \alpha) - r^2 \sin^2 \omega} \right|, \quad (1)$$

表 1 1 角硬币的实际值与测量值

Table 1 Actual and measured values of a dime with different angles

Bevel angle	0°	15°	30°	45°	60°	75°
Actual value /mm	19					
Measured value /mm	19.002	18.994	18.996	18.995	19.007	18.991

表 2 红外瞳孔计与瞳孔大小动态测量系统的测量值

Table 2 Measured pupil diameters by commercial infrared pupil meter and the proposed method

Measurement method	Pupil diameter /mm									
Infrared pupil meter	3.2	3.4	3.7	3.9	4.2	4.5	4.7	4.9	5.2	5.4
Proposed method	3.199	3.401	3.701	3.900	4.202	4.499	4.702	4.898	5.201	5.399

4 屈光力动态矫正系统

屈光力动态矫正系统主要包括透射式变形镜、驱动器及控制程序。根据实时测量的瞳孔大小数据,通过比对存储在微处理器中的患者瞳孔大小与离焦像差的对应关系,控制变形镜对入射光线进行相应的像差补偿,实现对人眼离焦量的动态补偿。

式中: r 为物平面中目标圆的半径; r' 为像平面椭圆的半弦长; c 为相机主距; d 为相机到物平面 x 轴的距离; ω 为相机相对于物平面 x 轴的倾斜角; α 为相机绕物平面 x 轴的旋转角。不难看出,物体在透视投影前后的大小关系是非线性的,其不仅与观测位置和相机自身参数有关,还和目标物体本身的大小有关。依据式(1),可进一步得到

$$\frac{r'_1}{r'_2} = \frac{r_1}{r_2} \left| \frac{d^2 \cos^2(\omega - \alpha) - r_2^2 \sin^2 \omega}{d^2 \cos^2(\omega - \alpha) - r_1^2 \sin^2 \omega} \right|, \quad (2)$$

式中: r_1 和 r_2 分别表示物平面中两个大小不同的圆的半径。

在数字图像中,物体具有一个天然的大小评价尺度,即像素值。经过图像处理,可得到瞳孔和虹膜的像素值大小及它们的比值,也就是式(2)中的 r'_1/r'_2 。一般而言,虽然患者的瞳孔大小会动态变化,但虹膜的大小始终保持恒定,即 r_2 为已知,那么在观测位置和相机自身参数都确定的情况下,依据式(2)可计算出瞳孔的实际大小 r_1 。

3.3 准确度评估

为了评估图像处理程序的准确度,通过两组实验来对检测结果进行评估和校验。首先,对直径已知的硬币按照不同的倾斜角度进行拍照测量,结果如表 1 所示,计算可知,硬币直径的偏差在 0.05% 以内,有效地验证了图像处理方法的准确性。其次,在几组不同光强的条件下,分别采用红外瞳孔计和本文的瞳孔大小动态测量系统对稳定状态下的患者瞳孔大小进行测量,结果如表 2 所示,计算可知,瞳孔直径的偏差在 0.05% 以内,这表明该系统的测量精度良好。两种方法的有效结合能够反过来对前述的图像处理步骤中的参数进行调整优化,以得到最佳的瞳孔测量结果。

4.1 准确度评估

为了评估变形镜屈光力调节的准确度及相应控制程序的有效性,首先通过控制程序将变形镜调到某一标称屈光力,而后使用商用焦度计对屈光力进行测量,结果如表 3 所示。计算可知,屈光力的偏差在 4‰ 以内,证明了变形镜屈光力调节的准确性及控制程序的有效性。

表 3 变形镜标称值与焦度计的测量值

Table 3 Nominal value of the deformable lens and the measured value of the lensometer

Device	Refractive power /D										
	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
Deformable lens	-10	-8	-6	-4	-2	0	2	4	6	8	10
Lensometer	-9.97	-8.02	-6.01	-4.01	-2.00	0.00	2.00	4.01	5.98	8.03	10.04

4.2 快速性与平滑性

如前文所述,为使患者的佩戴感受保持舒适,变形镜的调节在满足准确性的基础上,还要保证快速性和平滑性。虽然瞳孔的大小在不同光照条件下会发生变化,但瞳孔括约肌的收缩和舒张都是连续过程,因此瞳孔大小的变化是渐近缓慢的,并不会快速突变,故而通过实验的比对优化,将变形镜的响应时间控制在 100 ms 以内,满足快速性要求。同时使变形镜的单次变形量控制在 ± 0.1 D 以内,防止变形镜屈光力出现较大范围的突变,这样通过连续而小跨度的渐近变形来实现总体上的较大变形,保证屈光度变化的平滑性。从人眼实时视频流截帧开始到变形镜屈光力从 0 变化到 5 D 直至稳定的整个过程如图 3 所示,通过渐近的屈光力调节,在一定时间范围内达到稳定状态。在调整阶段和稳定阶段之间,经过处理的曲线相较原始曲线更为平滑,带来的视觉感受更为舒适。平滑曲线的斜率可以通过控制参数得到调节,实现对不同患者或不同人眼的特定优化。

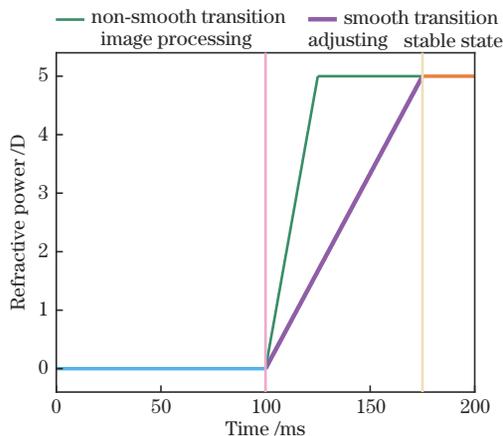


图 3 变形镜屈光力的平滑调节控制

Fig. 3 Smooth adjustment control of deformable lens's refractive power

5 实验与分析

所提人眼离焦量的动态补偿系统是一种个性化的解决方案。在系统运行前,首先需要获取患者瞳孔大小与其人眼离焦像差的对应关系,并将其存储在系统中,以便后续进行动态矫正时调用。为此,首先在眼科医院使用 iTrace 视觉功能分析仪对患者进行不同光照条件下瞳孔大小和人眼像差的相关测量,获取瞳孔直径和所需矫正屈光力的对应关系。检测过程示例图和 3 只屈光不正眼 A、B、C 的测量结果如图 4 和图 5 所示。



图 4 检测过程示例图

Fig. 4 Detection process

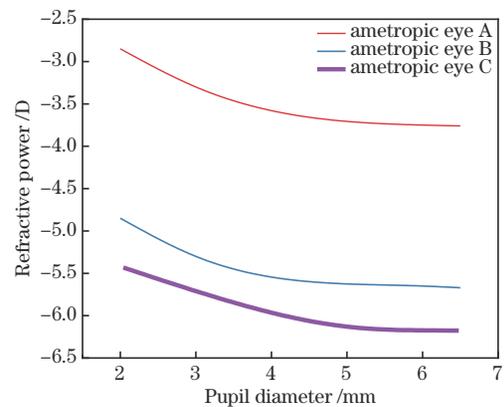


图 5 瞳孔直径与屈光力的关系

Fig. 5 Relationship between pupil diameter and refractive power

接下来,以屈光不正眼 C 为例,应用所提人眼离焦量的动态补偿系统,即通过红外相机拍摄的人眼图像,得到瞳孔大小的数据,然后调用瞳孔直径和所需矫正屈光力的对应关系,控制变形镜进行相应的屈光力调节,实现系统的自动化运行,完成了对人眼离焦量的动态矫正。在室内光源从全部打开到依次关闭后的 7 s 内,患者瞳孔大小变化和相应的变形镜屈光力的调节随时间的变化如图 6 所示。

最后,为了评估整个系统的有效性,在几组不同光强的照明条件下,应用所提人眼离焦量的动态补偿系统,通过标准对数视力表,分别测量 3 只屈光不正眼在系统调节前后的视力,结果如表 4 所示。从表 4 可知,所提人眼离焦量的动态补偿系统可将不同环境光强下及不同视力情况下的 3 只屈光不正眼都矫正到 5.0 的标准视力,这表明应用人眼离焦量的动态补偿系统后患者视

表 4 不同光强下人眼离焦量的动态补偿系统调节前后的视力表读数

Table 4 Visual acuity chart readings of dynamic compensation system for human eye defocus before and after adjustment under different light intensities

Condition	Visual acuity chart reading								
	Ametropic eye A			Ametropic eye B			Ametropic eye C		
Before correction	4.4	4.5	4.6	4.1	4.2	4.3	4.0	4.1	4.2
After correction	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0	5.0
Corresponding pupil diameter /mm	5.341	3.542	2.278	5.041	2.760	2.124	5.521	3.353	2.106

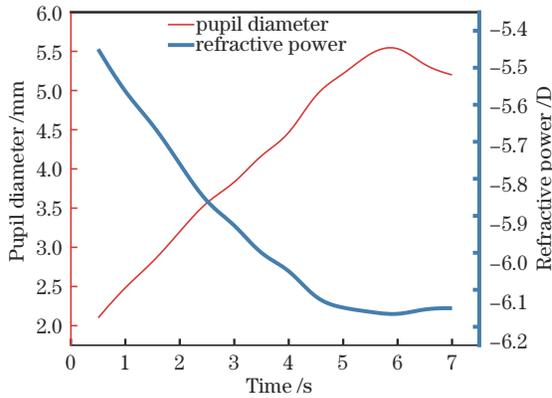


图 6 瞳孔大小与变形镜屈光力的动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of pupil size and refractive power of deformable lens

力得到了极大的提升,证明了所提人眼离焦量的动态补偿系统能够在不同条件下有效工作。需要说明的是,这种对矫正效果进行评价的方法带有一定的主观性。

6 结 论

为解决目前常用的屈光不正的矫正方式不能随着人眼像差的变化而自动调节的问题,提出并开发了一种可动态调节的人眼离焦量的动态补偿方法及系统。该系统采用图像处理技术对离焦像差进行动态测量,使用透射式变形镜作为离焦像差的动态矫正元件,通过软硬件协作,保证了人眼瞳孔大小测量的准确性,及对应离焦像差矫正的准确性、快速性和平滑性。实验结果证明,所提人眼离焦量的动态补偿系统可在不同光强条件下有效工作,实现了对屈光不正的动态矫正,具有一定的理论和实用价值。下一步工作将设计和开发一种客观的矫正效果评价方法和设备,同时开展双目视觉矫正的研究,并对整个系统进行整合、剪裁、定制和优化,实现可佩戴的效果。

参 考 文 献

[1] World Health Organization. World report on vision[EB/OL]. [2023-03-06]. <https://www.who.int/publications/item/9789241516570>.
 [2] 廖洋, 夏雪. 儿童青少年近视防控系统提升科普教育任重道远[N]. 中国科学报, 2022-12-09(3).
 Liao Y, Xia X. Improvement of myopia prevention and control system for children and adolescents popular

science education has a long way to go[N]. China Science Daily, 2022-12-09(3).
 [3] 曹丹. 不同屈光矫正后近视眼调节功能的研究[J]. 重庆医科大学学报, 2010, 35(7): 1089-1091.
 Cao D. Influence of eye adjustment function for different refractive correction of myopia[J]. Journal of Chongqing Medical University, 2010, 35(7): 1089-1091.
 [4] Lee E C, Lee J W, Park K R. Experimental investigations of pupil accommodation factors[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2011, 52(9): 6478-6485.
 [5] Porter J, Guirao A, Cox I G, et al. Monochromatic aberrations of the human eye in a large population[J]. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(8): 1793-1803.
 [6] 解博夫, 赵星, 陶诗诗, 等. 自由曲面补偿飞秒激光成丝系统像差的应用[J]. 光学学报, 2023, 43(8): 0822020.
 Xie B F, Zhao X, Tao S S, et al. Application of freeform surface in aberration compensation of femtosecond laser filamentation system[J]. Acta Optica Sinica, 2023, 43(8): 0822020.
 [7] 曲正, 钟兴, 张坤, 等. 基于联合像差求解的紧凑型大视场光学设计[J]. 光学学报, 2022, 42(21): 2122001.
 Qu Z, Zhong X, Zhang K, et al. Compact optical design with large field of view based on joint aberration solution [J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(21): 2122001.
 [8] 杨叶城, 张昕, 韩小帅, 等. 带像差校正功能的柔性变焦透镜[J]. 光学学报, 2022, 42(4): 0422003.
 Yang Y C, Zhang X, Han X S, et al. Flexible varifocal lens with aberration correction function[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(4): 0422003.
 [9] Wu X T, Yao L, Ou H J. Novel hierarchically dimensioned deformable mirrors with integrated ASIC driver electronics[J]. Proceedings of SPIE, 2012, 8253: 82530A.
 [10] Liu Y, Crowell J A, Kurokawa K, et al. Ultrafast adaptive optics for imaging the living human eye[J]. Investigative Ophthalmology & Visual Science, 2021, 62(8): 16.
 [11] Mompeán J, Aragón J L, Artal P. Portable device for presbyopia correction with optoelectronic lenses driven by pupil response[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 1-9.
 [12] Karkhanis M U, Ghosh C, Banerjee A, et al. Correcting presbyopia with autofocusing liquid-lens eyeglasses[J]. IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering, 2022, 69(1): 390-400.
 [13] 铁兴华, 武兵兵, 李长栋, 等. 全身麻醉前后患者年龄、

- 性别与瞳孔变化临床研究[J]. 临床与病理杂志, 2016, 36(5): 586-590.
- Tie X H, Wu B B, Li C D, et al. Patient age, gender, and pupil changes before and after general anesthesia clinical studies[J]. Journal of Clinical and Pathological Research, 2016, 36(5): 586-590.
- [14] 张慧敏, 罗珮允, 隋建峰. 基于图像处理的瞳孔大小检测算法研究[J]. 半导体光电, 2017, 38(1): 136-141.
- Zhang H M, Luo P Y, Sui J F. Research on pupil size detection algorithm based on image processing[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2017, 38(1): 136-141.
- [15] Basca C A, Talos M, Brad R. Randomized Hough transform for ellipse detection with result clustering[C]//EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool", November 21-24, 2005, Belgrade, Serbia. New York: IEEE Press, 2006: 1397-1400.
- [16] Wong C Y, Lin S C F, Ren T R, et al. A survey on ellipse detection methods[C]//2012 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, May 28-31, 2012, Hangzhou, China. New York: IEEE Press, 2012: 1105-1110.
- [17] Ahn S J, Warnecke H J, Kotowski R. Systematic geometric image measurement errors of circular object targets: mathematical formulation and correction[J]. The Photogrammetric Record, 1999, 16(93): 485-502.