

文章编号 1004-924X(2019)06-1370-08

## 瞳孔中心点自动定位与对准装置

王 晶<sup>1,2</sup>, 高 峰<sup>2</sup>, 李婉越<sup>1,2</sup>, 史国华<sup>2\*</sup>

(1. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026;

2. 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所 江苏省医用光学重点实验室, 江苏 苏州 215163)

**摘要:**为了辅助无人值守式眼底筛查设备在不同光照环境下自动进行眼底成像, 搭建了瞳孔中心点自动定位与对准装置, 并提出了一种基于圆近似模型的算法来实现瞳孔中心点的自动定位。首先, 使用二值化、轮廓提取与填充等方法对图像进行了预处理, 以消除噪声和光斑对后续处理的影响; 接着, 使用本文提出的新型的圆近似算法来实现瞳孔中心点的精准定位; 最后, 根据定位的瞳孔中心点位置, 来控制步进电机移动平移台, 从而实现图像采集视场中心和瞳孔中心的对准。为验证有效性, 将文中算法、传统 Hough 圆算法及改进的 Hough 圆算法在定位精度、平均定位时间上进行了比较。本文算法的定位精度为 93.33%, 平均定位时间为 95.67 ms, 比传统 Hough 圆检测定位精度提高了约 3.5 倍, 定位时间减少了约 68.86%, 比改进的 Hough 圆算法检测定位精度提高了约 2 倍, 定位时间减少了约 63.11%。实验结果表明, 该系统在光照参量无法严格控制的拍摄环境下, 对瞳孔自动定位与对准的准确度和计算效率均有显著地提升。基本满足无人值守式眼底筛查设备的实时性、精确性、鲁棒性要求, 有助于无人值守式眼底筛查设备的推广。

**关键词:**眼底筛查; 瞳孔识别; 圆近似; 自动对准

**中图分类号:** TP23; TH752.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192706.1370

## Device for automatic pupil center location and alignment

WANG Jing<sup>1,2</sup>, GAO Feng<sup>2</sup>, LI Wan-yue<sup>1,2</sup>, SHI Guo-hua<sup>2\*</sup>

(1. *University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

*2. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics,*

*Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology,*

*Chinese Academy of Sciences, Suzhou 215263, China)*

*\* Corresponding author, E-mail: ghshi\_lab@126.com*

**Abstract:** To assist unattended fundus examination equipment in automatically performing fundus examinations under different lighting environments, an automatic pupil center location and alignment device was developed and a circle approximation algorithm was proposed to automatically locate the pupil center. First, an image was preprocessed by binarization and contour extraction, and a filling algorithm was used to eliminate the influence of noise and speckle for follow-up processing. The circle approximation algorithm proposed in this study was subsequently utilized to accurately locate the pupil center. Finally, the identified location of the pupil center was used to control the stepper motor to move the two-dimensional platform and align the image acquisition and pupil centers. To evaluate the

**收稿日期:** 2019-03-13; **修订日期:** 2019-04-16.

**基金项目:** 科技部重点研发计划资助项目 (No. 2017YFC0108200); 科技部重大科学仪器设备开发专项资助项目 (No. 2016YFF0102000); 中国科学院前沿科学重点研究项目资助 (No. QYZDB-SSW-JSC03); 中国科学院先导专项资助 (No. XDB02060000); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61605210)

efficiency of the proposed algorithm, the location accuracy and calculation rate were compared with those of the traditional and improved Hough circle algorithms. The precision and average consumption time of the proposed algorithm are 93.33% and 95.67 ms, respectively. Compared to that of the traditional and improved Hough circle algorithms, the precision of the proposed method improve 3.5 and 2 times, respectively, and the average consumption time is reduced by 68.86% and 63.11%, respectively. Experimental results indicate that the proposed system significantly improved the accuracy and calculation rate of automatic pupil location and alignment under conditions in which the illumination parameters cannot be strictly controlled. In summary, the proposed system is able to meet the real-time, accuracy, and robustness requirements of unattended fundus examination equipment, which has great significance for its popularization.

**Key words:** fundus examination; pupil recognition; circle approximation; automated alignment

## 1 引言

眼底检测是观测眼底血管、视盘形态的直接方法<sup>[1]</sup>。对家族腺瘤性息肉病等遗传病<sup>[2-3]</sup>、白内障、青光眼、老年黄斑变性等疾病的预防和早期治疗具有重要作用<sup>[4]</sup>。眼底相机、眼底相干层析成像<sup>[5-6]</sup>是临床常用的眼底检测方式,在对眼底视网膜成像的过程中,需要将图像采集装置的成像视场对准瞳孔中心,使成像光穿过瞳孔投射到眼底才能实现眼底成像<sup>[7]</sup>。实际操作中,由于被检测者的身高、体型以及眼睛的位置各不相同,为保证被测者瞳孔中心与图像采集装置的成像视场对准,可采取手动对准和自动对准两种方式。前者在检测过程中,需要被检测者高度配合,保持相对稳定的姿势,且对操作者的熟练度有很高的要求,需要专业医护人员辅助检测者进行操作;后者通过识别相机采集到的眼部图像中的瞳孔位置,来调节图像采集装置或托头架的位移台,从而实现快速地自动瞳孔对准,具有调节速度快、调节精度高、操作简单等优点,适用于无人值守式眼底筛查设备。

无人值守式眼底筛查设备进行正确筛查的核心是进行准确地瞳孔自动对准,而此过程中对瞳孔中心点地精确定位起着至关重要的作用。对于瞳孔中心点的定位算法,国内外已有很多的相关研究<sup>[9-14]</sup>。目前,瞳孔识别算法可大致分为如下3类:(1)Hough变换圆检测<sup>[13]</sup>,是目前使用最广泛的方法之一,其原理是利用圆参数空间与极坐标空间的映射关系来进行圆检测。该方法对局部缺损不明显,抗干扰性强<sup>[14]</sup>。但是传统的Hough圆检测计算量大,检测速度慢。Zhang等人<sup>[9]</sup>对传统Hough变换圆检测方法进行了改进,采用

Canny算子提取边缘并在Hough圆识别时限制了搜索半径,改进后检测的精度和速度得到了提升,但仅在一种光照环境下采集的图片上进行了测试。(2)椭圆拟合检测,余罗等人<sup>[15]</sup>提出的基于椭圆拟合的瞳孔中心点精确定位算法现了对眼睛完全睁开和不完全睁开状态下的瞳孔中心点定位;椭圆拟合的缺点是当瞳孔被部分遮挡时,准确性会下降<sup>[16]</sup>。(3)形态学检测,苑玮琦<sup>[17]</sup>等提出了基于形态学与支持向量机的虹膜检测方法,该方法能对光斑在虹膜和瞳孔部分产生的坑洞进行检测,避免了坑洞对瞳孔识别的影响。该方法缺点是计算冗杂,计算时间长。综上所述,这3类方法均不适用于无人值守式眼底筛查设备。

针对无人值守眼底筛查检测的实时性、精确性、鲁棒性要求,本文提出了一种基于圆近似瞳孔识别算法(Circle approximation)的瞳孔中心点自动定位与对准装置。该系统可在多种照明环境下对人眼进行非接触式的快速精确瞳孔中心点定位,并通过机械控制的方式进行图像采集装置的中心与瞳孔中心点的对准操作,可作为无人值守式眼底筛查设备的辅助装置,能有效提高眼底筛查的效率、准确率和客观性,同时减少医护资源的投入。

## 2 系统组成

如图1所示,为用于瞳孔中心点对准的移动图像采集装置系统结构,该系统包括托头架、CCD相机、步进电机(宇辉2M542-N)和二维位移平台。其中,托头架用于托载被检测者的头部,尽可能减少头部移动带来的影响;CCD相机固定在装有电机的二维移动平台上,用于采集图像并根据系统指令进行图像采集装置的移动。

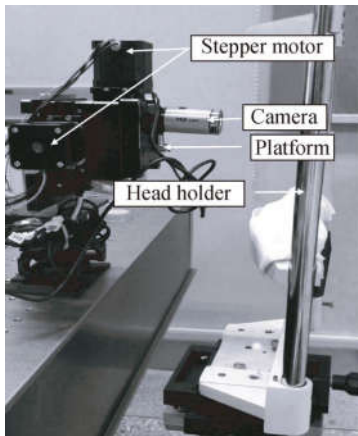


图 1 移动图像采集装置系统结构

Fig. 1 Structure of mobile image acquisition system

### 3 瞳孔定位原理

提取自然光照条件下采集的单帧图像,对自动对准算法进行分析,由于拍摄环境的光照不均匀,眼睑、眼皮、眉毛和睫毛等原因会导致无法精确定位瞳孔的中心点。首先需要对图像进行预处理,去除部分噪声影响;随后采用了图像二值化处理对眼睛图像的噪声进行了初步剥离,然后通过轮廓提取和轮廓填充将瞳孔图像与背景图像分离开来并消除光斑影响;最后通过圆近似算法对瞳孔中心点进行定位。瞳孔中心点定位的流程如图 2 所示。

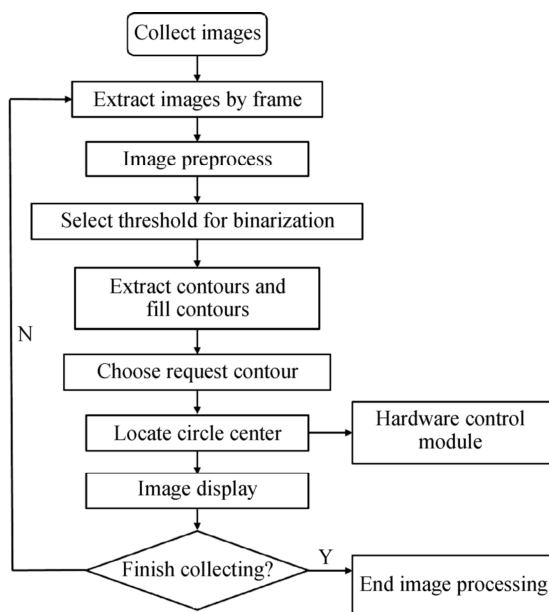


图 2 瞳孔中心点定位流程图

Fig. 2 Flow chart of pupil center location

#### 3.1 轮廓提取与填充

为快速精确地进行后续处理,需要先将瞳孔图像从背景和噪声中分离出来。本系统中先采用二值化处理对像素值进行归一化;然后基于像素的连通性,采用轮廓提取<sup>[18]</sup>的方法对图像中的轮廓进行提取,得到原图的轮廓边界信息。最后根据边界的分割情况,对目标区域中存在的少量像素点缺失的位置进行填充。

本实验中对图片进行轮廓提取(图 5(a))和填充后的图像(图 5(b))如图 3 所示,可见通过轮廓提取与填充后,瞳孔部分被分离出来,环境光在瞳孔区域造成的光斑也被填充。

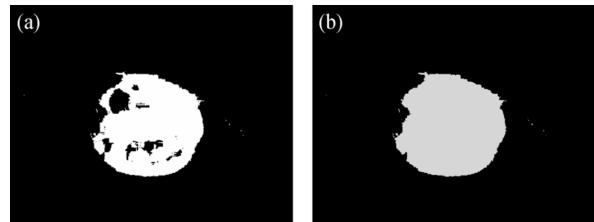


图 3 轮廓提取与填充

Fig. 3 Contour extraction and filling

#### 3.2 圆近似算法

轮廓提取和填充时,由于环境光或遮挡等原因,会造成图片背景部分的灰度值与瞳孔部分的接近,所以会提取出瞳孔之外的其他轮廓,本系统采用圆近似算法将瞳孔轮廓从这些轮廓中提取出来。圆近似算法原理如下:根据瞳孔的解剖学特性,可认为瞳孔轮廓近似为圆形。通过式(1)来表示瞳孔形状:

$$(x-a)^2 + (y-b)^2 = r^2, \quad (1)$$

其中: $(a, b)$ 表示瞳孔轮廓的中心, $r$ 表示瞳孔轮廓的半径。

用式(2)来表示瞳孔的轮廓面积。

$$A = \pi r^2. \quad (2)$$

图片进行轮廓提取后,对每个轮廓求外切矩形,不失一般性,假定矩形的长、宽分别为 $a, b$ ,则其面积可表示为 $S = ab$ 。

当外切矩形满足以下 3 个条件时,认为该轮廓为所求的瞳孔的轮廓:

$$(1) \frac{a}{b} \approx 1;$$

$$(2) S = ab \approx \frac{b^2 \pi}{2};$$

(3)  $S \geq S'$  ( $S'$ 为瞳孔的实际面积,本文中设置为 50 个像素点)。

其中,条件(1)和条件(2)是用来判断该外切矩形是否外切于圆,若外切于圆,根据圆的性质,其长宽应相等,且外切矩形的面积近似等于圆的面积。但是由于本实验中图像的噪声较多,可能会导致提取到的瞳孔轮廓存在变形而非标准的圆形,所以取近似即可,增加一定容错率。条件(3)中  $S'$ 设置为瞳孔实际面积,取检测到轮廓的面积大于实际面积可排除一些圆形小光斑造成的干扰,提高检测精度。

上述选取的轮廓即为瞳孔轮廓,随后采用最小包围圆算法<sup>[19]</sup>来定位瞳孔中心,算法流程如下:

遍历轮廓内的所有点,找出上、下、左、右 4 个边缘点,分别用 A, B, C, D 来表示。

(1)对这 4 个点求最小包围圆  $C_1$  及其圆心和半径;

(2)第 1 次迭代( $k=0$ ),遍历所有点,检查是

否有既不在  $C_1$  内也不在边界上的点,如果没有,则  $C_1$  即为所求的圆;如果有,则转到第(4)步;

(3)假设出界点中距离圆  $C_1$  的圆心最远的点为 E,则将 E 分别替换 A, B, C, D 点,组成(a) A/B/C/D; (b) A/B/C/E; (c) A/B/D/E; (d) B/C/D/E 4 种组合,求出每种组合中 4 个点的最小包围圆。设组合(a)的最小包围圆为  $C_2$ ,检测点 D 是否在  $C_2$  内,若不在,则计算组合(b)的最小包围圆为  $C_3$ ,检测 C 点是否在  $C_3$  内,若在,则记下点 E 和  $C_3$  的圆心、半径;

(4)第 2 次迭代( $k=1$ ),重复(3)、(4)步,直到遍历所有点的结果都在求出的最小包围圆界内,退出迭代,得到最小包围圆  $C_n$ 。示意图如图 4 所示(彩图见期刊电子版),其中黑色部分表示需要最小包围圆的区域。A, B, C, D 分别表示上、右、下、左边缘点,图中红色字母代表该点表示未被包含在最小包围圆内,红色圆圈表示最小包围圆。

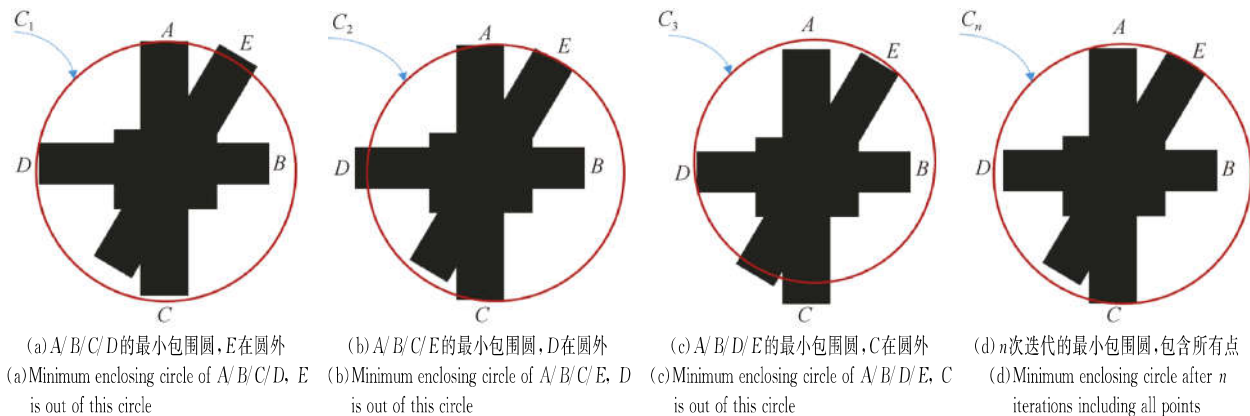


图 4 最小包围圆计算过程  
Fig. 4 Minimal enclosing circle

经过以上处理后,实现了对瞳孔中心点的精确定位,如图 5 所示。

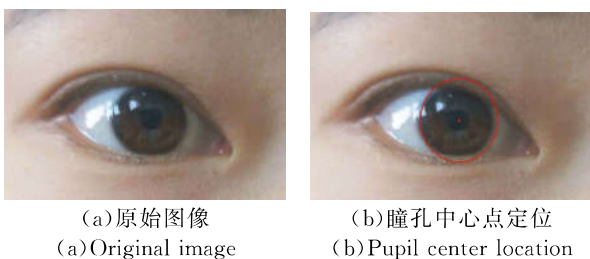


图 5 瞳孔中心点定位结果图像  
Fig. 5 Pupil center location result

#### 4 瞳孔对准

在确定瞳孔中心点位置之后,进行瞳孔中心点位置与成像区域的中心点对准。本实验中设置图像采集区域的为  $640 \times 480$  大小,图像采集区域中心点坐标:  $(x_0, y_0) = (320, 240)$ ,瞳孔中心点在图像坐标系中的绝对坐标  $(x, y)$  用式(3)表示:

$$(x, y) = \frac{\sum i \cdot I(i, j)}{\sum I(i, j)}, \frac{\sum j \cdot I(i, j)}{\sum I(i, j)}, \quad (3)$$

其中  $i$  和  $j$  是以像素为单位的图像坐标。系统通

过计算瞳孔中心点坐标  $(x, y)$  相对于  $(x_0, y_0)$  的相对坐标通过式(4)表示:

$$(x', y') = (x - x_0, y - y_0). \quad (4)$$

根据  $(x', y')$  对平移台进行移动。平移台的移动是借助电机转动实现的,移动时需先将移动的距离转变为电机的步进位移;设定一个像素点对应的实际距离为  $a$ ,步进电机转动单位角度为  $\theta$ ,则当相对位置为  $(x', y')$  时,电机转动的参数通过式(5)和式(6)表示:

$$offsetX = |x'| \cdot a \cdot \frac{\pi}{\theta}, \quad (5)$$

$$offsetY = |y'| \cdot a \cdot \frac{\pi}{\theta}. \quad (6)$$

移动过程中,图像采集区域的中心坐标随移动开始改变,移动过程中图像的中心点坐标  $(x'_0, y'_0)$  用式(7)表示:

$$(x'_0, y'_0) = (x_0 + x', y_0 + y'). \quad (7)$$

直到瞳孔中心坐标和图像采集区域坐标的相对坐标满足式(8)时,判定瞳孔中心和图像采集区域中心重合,平移台停止移动:

$$(x', y') \leq (\Delta x, \Delta y), \quad (8)$$

其中  $(\Delta x, \Delta y)$  表示允许的两中心点偏移误差范围,本实验中设置为 0。其运行过程如图 6 所示。

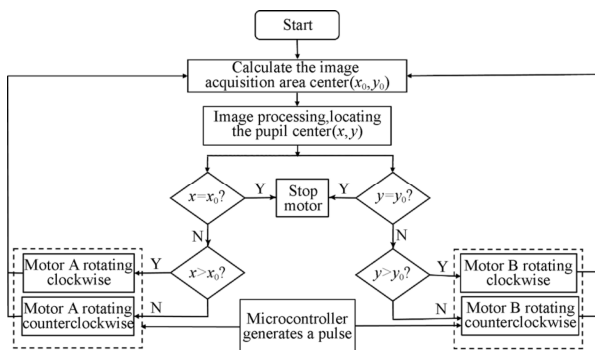


图 6 电机控制流程图

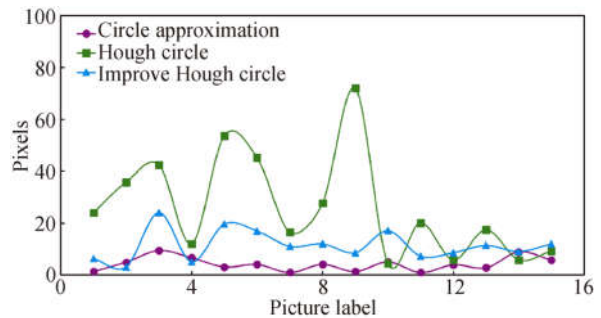
Fig. 6 Flowchart of motor control

### 5 实验结果

为验证本文方法的有效性和准确性,将本文提出的圆近似方法(Circle approximation)与传统的 Hough 圆检测(Hough circle)方法<sup>[13]</sup>和改进的 Hough 圆检测(Improved Hough circle)<sup>[9]</sup>方法对 15 幅在不同光照环境下拍摄的图片(包括单点和多点人造光源光照环境、自然光源光照环境)进行瞳孔中心点识别效果对比。图 7(a)显示了在 15 幅图片中 3 种方法定位到的瞳孔中心点位

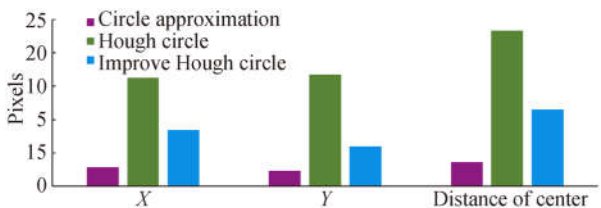
置与人工标定的标准瞳孔中心点位置(使用 MATLAB 2013 搭建的手工瞳孔中心点标记系统,两次标记后取平均值,两次标记互不干扰)的误差,图 7(b)分别显示了两中心的直线误差平均值和 X,Y 坐标误差的平均值。由图 7(a)可见本文提出的方法检测出的误差距离基本稳定在小于 10 pixel 的范围,改进的 Hough circle 误差稳定在小于 20 pixel 的范围,较本文方法略大,但是优于传统的 Hough circle;传统的 Hough circle 方法误差起伏最大,误差值也偏大,说明该方法对环境噪声非常敏感,识别精度低。

由图 7(b)也可以看出本文方法识别的圆心坐标与标定的圆心坐标偏离的误差远小于其他两种方法,圆心的 X,Y 坐标和圆心距的平均距离误差都在 0~5 pixel 内,检测精度高。综上,本文提出的方法能有效克服光照影响,在不同的光照环境下均能准确检测瞳孔中心。



(a) 3 种算法识别的瞳孔中心与人工标定瞳孔中心的误差比较

(a) Location error comparison between Pupil center recognized by three algorithms and pupil center marked manually



(b) 3 种算法识别的瞳孔中心与人工标定的瞳孔中心平均中心距离误差和中心 X,Y 坐标平均误差比较

(b) Average error of centers' X, Y coordinates and center distance comparison between Pupil center recognized by three algorithms and pupil center marked manually

图 7 3 种算法自动识别的瞳孔中心与人工标定的瞳孔中心的误差比较

Fig. 7 Comparison between pupil center recognized by three automatic recognition algorithms and pupil center marked manually

表 1 显示了 3 种方法在相同的硬件条件下通过 VC++2013 进行瞳孔中心点定位所需时间的平均值以及 3 种方法的检测精度,由表可见:(1)由于本文提出方法的计算量和计算复杂度都较小,所以该方法所需计算时间少于其他两种方法,能满足实时定位的需求;(2)本文提出的方法精度远高于其他两种方法。定义精度时,由于瞳孔面积在 50~100 pixel 范围内,且人工标定瞳孔中心点存在标定误差,所以设定当检测到的圆心位置与标定的圆心位置的距离小于 10 pixel(3 mm)的时候,认为正确检测到瞳孔中心。本文通过轮廓提取与填充和圆识别的方法能极大的抑制外界噪声影响,保留瞳孔较为完整的轮廓,识别精度高于另外两种方法,能满足精确定位需求。

表 1 3 种算法的平均计算时间和检测精度比较  
Tab. 1 Consuming time and detection accuracy of three algorithms

Method	Circle approximation	Hough circle <sup>[13]</sup>	Improved Hough circle <sup>[9]</sup>
Time/ms	95.67	307.27	259.33
Accuracy/%	93.33	26.67	46.67

将本文提出的圆近似算法应用于瞳孔自动定位与对准装置中,其部分实验结果如图 8 所示。实验数据包括在自然光情况下采集的反射光斑分布集中的图像,如图 8(a)~图 8(c);在实验光照明情况下采集的反射光斑较多且分布分散的图像,如图 8(d),图 8(e);以及在完全黑暗的环境下打开单一点光源采集的图像,如图 8(f)。图像来源于实验室的 4 位志愿者,包含了瞳孔部分被遮挡(眼睑遮挡或眼球转动到眼角处)、眉毛影响、光斑复杂、离焦等多种情况。图像中红色的实心圆点表示检测到的瞳孔中心点,红色的圆圈表示检测到的包含瞳孔的范围(彩图见期刊电子版)。如图 8 所示,本方法对各种情况下的瞳孔都能实现精确地定位,说明本方法对环境噪声有较强的抑制能力,适用于多种光照环境下的瞳孔中心点定位。

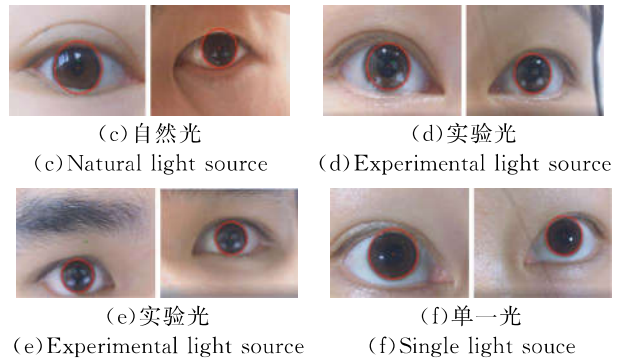
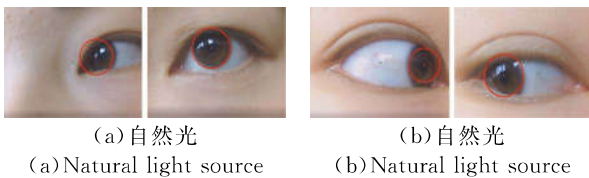


图 8 对不同光源下拍摄的图片进行瞳孔中心点识别,检测算法鲁棒性

Fig. 8 Recognizing pupil center from pictures captured under different light source to verify robustness of proposed algorithm

瞳孔定位后,根据定位位置计算出瞳孔中心点偏离固定的图像采集区域的中心点的位移,将位移转化为步进电机需要移动的距离,通过步进电机的移动,实现瞳孔中心点与图像采集区域中心点的对准。如图 9 所示,红色的点是检测到的瞳孔中心,绿色的点是图像采集区域的中心点,经过实时定位与对准调节,最终两中心点重合(彩图见期刊电子版)。

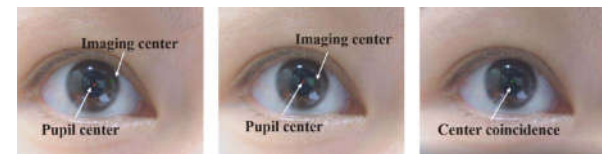


图 9 瞳孔对准  
Fig. 9 Pupil alignment

## 6 结 论

本文提出了一种基于圆近似瞳孔识别算法的瞳孔中心点自动定位与对准装置。该装置通过圆识别算法对采集到图像的瞳孔中心进行定位,再根据瞳孔中心位置调整图像采集装置的位置,最终实现瞳孔中心点与图像采集装置的中心点对准。

通过实验证明,本文提出的方法可有效地识别多种环境下拍摄的眼部图像中的瞳孔,检测精度为 93.33%,平均检测消耗时间为 95.67 ms,相比于 Hough 圆检测方法,检测精度提高了约 3.5 倍,检测时间减少了约 68.86%,相较改进的

Hough 圆方法,检测精度提高了约 2 倍,检测时间减少了 63.11%。由实验结果可知:本系统计算速度快,识别精度高,对复杂光照鲁棒性好,相比于其他传统的圆识别算法,具有较好的识别效

果。搭配移动电机,可以保证瞳孔始终处于成像区域的中心,能作为无人值守眼底筛查设备的前端辅助装置,有助于无人值守眼底筛查设备的推广使用。

### 参考文献:

- [1] 邹北骥,张思剑,朱承璋. 彩色眼底图像视盘自动定位与分割[J]. 光学精密工程, 2015, 23(4): 1187-1195.  
ZOU B J, ZHANG S J, ZHU CH ZH. Automatic localization and segmentation of optic disk in color fundus image [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(4):1187-1195. (in Chinese)
- [2] TIRET A, TAIELSARTRAL M, TIRET E, et al.. Diagnostic value of fundus examination in familial adenomatous polyposis [J]. *British Journal of Ophthalmol.*, 1997, 81(9):755-758. 2015, 23(4):1187-1195.
- [3] ONADIM Z, HYKIN PG, HUNGERFORD JL, et al.. Genetic counselling in retinoblastoma; importance of ocular fundus examination of first degree relatives and linkage analysis [J]. *British Journal of Ophthalmology*, 1991, 75(3):147.
- [4] 黄文博,王珂,燕杨. 彩色视网膜眼底图像血管自动检测方法[J]. 光学精密工程, 2017, 25(5): 1378-1386.  
HUANG W B, WANG K, YAN Y. Automatic detection method of blood vessel for color retina fundus images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(5):1378-1386. (in Chinese)
- [5] 孙延奎. 光学相干层析医学图像处理及其应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(4): 1086-1104.  
SUN Y K. Medical image processing techniques based on optical coherence tomography and their applications [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(4): 1086-1104. (in Chinese)
- [6] ONUMA Y. Optical coherence tomography [J]. *Science*, 1991, 254(5035):1178-1181.
- [7] 李瑞峰. 眼底荧光血管造影及光学影像诊断[M]. 北京:人民卫生出版社, 2010:2-3.  
LI R F. *Fundus Fluorescein Angiography and Optical Imaging Diagnosis* [M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2010:2-3. (in Chinese)
- [8] CHEN D, BAI J, QU Z. Research on Pupil center location based on improved hough transform and edge gradient algorithm [C]. *Information Technology and Computer Science—Proceedings of 2012 National Conference on Information Technology and Computer Science*. 2012.
- [9] ZHANG H W, WANG S Y, XIAN-LONG L I, et al.. Research and implementation of pupil recognition based on Hough transform [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals & Displays*, 2016, 31(6): 621-625.
- [10] HUANG L, FAN Y, WANG D, et al.. Pupil location method based on improved OTSU algorithm [J]. *Computer Engineering & Applications*, 2013, 49(23):137-140.
- [11] LIN ZH H, HONGFEI, et al.. The Pupil location based on the OTSU method and hough transform [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 8(1):352-356.
- [12] LIN Z, LU B. The pupil location based on the Laplace operator and region-growing [C]. *International Conference on Multimedia Technology*. IEEE, 2011:5170-5172.
- [13] WILDES R P. Iris recognition; an emerging biometric technology [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1997, 85(9):1348-1363.
- [14] ZHU Y, CARRAGHER B, MOUCHE F, et al.. Automatic particle detection through efficient Hough transforms [J]. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 2003, 22(9):1053-1062.
- [15] 余罗,刘洪英,皮喜田,等. 基于椭圆拟合的瞳孔中心精确定位算法研究[J]. 中国医疗器械杂志, 2017, 41(3):170-174.  
YU L, LIU H Y, PI X T, et al.. Research on exact location algorithm of pupik center based on Ellipse Fitting [J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2017, 41(3):170-174. (in Chinese)
- [16] 赵彦涛,聂向荣,罗军,等. 基于选择性阈值取反和径向对称的瞳孔中心定位[J]. 光电子·激光, 2016(11):1208-1213.  
ZHAO Y T, NIE X R, LUO J, et al.. Pupil center location based on radial symmetry combined with selective threshold [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2016(11):1208-1213. (in Chinese)
- [17] 苑玮琦,朱立军,张波. 基于形态学与支持向量机

的虹膜坑洞纹理检测[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(3):664-671.

Yuan W Q, ZHU L J, ZHANG B. Iris crypt texture detection based on morphology and SVM [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2017, 38(3):664-671. (in Chinese)

[18] SUZUKI S, BE K. Topological structural analysis

of digitized binary images by border following [J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1985, 30(1):32-46.

[19] WELZL E. *Smallest Enclosing Disks (Balls and Ellipsoids)* [M]. Berlin: New Results and New Trends in Computer Science, Springer Berlin Heidelberg, 1991:359-370.

#### 作者简介:



王 晶(1995—),女,云南昆明人,硕士研究生,2017年于北京交通大学获得学士学位,主要从事图像处理 and 自动控制方面的研究。E-mail: crysking\_wj@163.com

#### 导师简介:



史国华(1981—),男,浙江湖州人,研究员,博士生导师,2011年于中科院光电技术研究所获得博士学位,主要从事生物光子学成像的研究。E-mail: ghshi\_lab@126.com