

应用于眼底成像的可见光瞳孔定位与对准方法

邢利娜 孔文 唐宁 陈一巍 史国华 何益

Visible light pupil localization and alignment method for fundus imaging

XING Li-na, KONG Wen, TANG Ning, CHEN Yi-wei, SHI Guo-hua, HE Yi

引用本文:

邢利娜, 孔文, 唐宁, 陈一巍, 史国华, 何益. 应用于眼底成像的可见光瞳孔定位与对准方法[J]. *中国光学*, 2024, 17(6): 1368–1376. doi: 10.37188/CO.2024–0065

XING Li-na, KONG Wen, TANG Ning, CHEN Yi-wei, SHI Guo-hua, HE Yi. Visible light pupil localization and alignment method for fundus imaging[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(6): 1368-1376. doi: 10.37188/CO.2024-0065

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2024–0065>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

应用于红外眼科疾病检测的瞳孔定位算法

Pupil location algorithm applied to infrared ophthalmic disease detection

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 605 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0170>

紫外偏振敏感的CsPbBr₃纳米薄膜的可见光发射

Visible light emission of ultraviolet polarization sensitive CsPbBr₃ nano-films

中国光学 (中英文). 2023, 16(1): 202 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0152>

可见光通信中正交频分复用调制技术

Orthogonal frequency division multiplexing modulation techniques in visible light communication

中国光学 (中英文). 2021, 14(3): 516 <https://doi.org/10.37188/CO.2020–0051>

基于视觉显著性加权与梯度奇异值最大的红外与可见光图像融合

Fusion of infrared and visible light images based on visual saliency weighting and maximum gradient singular value

中国光学 (中英文). 2022, 15(4): 675 <https://doi.org/10.37188/CO.2022–0124>

运动探测及可见光通信一体化氮化物光电子芯片

Integrated Nitride optoelectronic chip for motion detection and visible light communication

中国光学 (中英文). 2023, 16(5): 1257 <https://doi.org/10.37188/CO.2023–0028>

可见/近红外实时成像光谱仪控制系统设计

Design of a control system for a visible/near-infrared real-time imaging spectrometer

中国光学 (中英文). 2022, 15(2): 348 <https://doi.org/10.37188/CO.2021–0119>

文章编号 2097-1842(2024)06-1368-09

应用于眼底成像的可见光瞳孔定位与对准方法

邢利娜^{1,2}, 孔文¹, 唐宁¹, 陈一巍², 史国华^{2*}, 何益^{2*}

(1. 中国科学技术大学生物医学工程学院(苏州), 江苏苏州 215163;

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: 为了降低眼底成像过程对操作人员水平的依赖, 提出了一种采用可见光瞳孔成像的人眼瞳孔自动快速定位与对准方法。采用可见光摄像模组和三维电动位移台, 在实验室眼底成像系统上搭建瞳孔对准装置。用霍夫梯度法提取图像的有效区域, 得到眼底成像系统的中心。利用最大类间方差法和图像直方图特征得到了瞳孔区域后, 利用最小圆拟合方法确定瞳孔中心。通过反馈控制电动位移台的移动, 实现眼底成像系统中心与瞳孔中心对准。实验结果表明: 人眼瞳孔的平均识别速度为 0.11 s, 瞳孔中心的识别平均准确率达 98.7%, 中心偏差的平均欧氏距离为 4.3 个像素。上述结果满足眼底成像系统的实时性和准确性要求, 为眼底成像系统提供了一种高效的自动瞳孔对准解决方案。

关键词: 眼底成像; 瞳孔定位; 自动对准; 可见光

中图分类号: TP23; TH786

文献标志码: A

doi: 10.37188/CO.2024-0065

CSTR: 32171.14.CO.2024-0065

Visible light pupil localization and alignment method for fundus imaging

XING Li-na^{1,2}, KONG Wen¹, TANG Ning¹, CHEN Yi-wei², SHI Guo-hua^{2*}, HE Yi^{2*}

(1. School of Biomedical Engineering (Suzhou), University of Science and Technology of China, Suzhou, Suzhou, 215163, China;

2. Jiangsu Key Laboratory of Medical Optics, Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Science, Suzhou, 215163, China)

* Corresponding author, E-mail: shigh@sibet.ac.cn; heyi@sibet.ac.cn

Abstract: To mitigate reliance on operators during fundus imaging, an automated rapid localization and alignment method for the human pupil using visible light pupil imaging was proposed. Initially, the pupil alignment device was constructed on a laboratory fundus imaging system using a visible light camera module and a three-dimensional electric displacement stage. Subsequently, the effective area of the image was extracted using the Hough gradient method to determine the center of the fundus imaging system. The pupil region was identified through the maximum inter-class variance method and image histogram feature, while the

收稿日期: 2024-04-07; 修订日期: 2024-04-30

基金项目: 国家重点研发计划(No. 2021YFC2401401); 国家自然科学基金项目(No. 62075235); 中国科学院青年创新促进会(No. 2019320); 中国科学院战略性先导科技专项(No. XDA16021304)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2021YFC2401401); National Natural Science Foundation of China (No. 62075235); Youth Innovation Promotion Association, CAS (No.2019320); Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA16021304)

center of the pupil was ascertained via the minimum circle fitting method. Ultimately, the electric displacement stage's movement is regulated through feedback mechanisms, ensuring that the center of the fundus imaging system aligns precisely with the pupil's center. The experimental results show that the average recognition speed of human pupil is 0.11 s, the average recognition accuracy of the pupil center is 98.7%, and the average Euclidean distance of the center deviation is 4.3 pixels. It can satisfy the system requirements of the real-time and accuracy, and provides an efficient automatic pupil alignment solution for fundus imaging system.

Key words: fundus imaging; pupil localization; automatic alignment; visible light

1 引言

眼底成像是眼科中用于观察和评估视网膜、脉络膜等眼底结构的重要方法。在进行眼底成像时,必须确保照明光线能够透过患者的瞳孔并照亮眼底区域,以便获得清晰的眼底图像。因此,医护人员在使用眼底成像设备进行诊断前,通常需要仔细调整设备光路使其对准患者的瞳孔。为了减少这一过程对医护人员操作技能的依赖,并提升设备的使用便捷性和普适性,许多学者开展了人眼瞳孔的自动定位与对准技术的研究^[1-4]。汪路涵^[1]等人搭建了应用于眼科测量仪器的人眼自动对焦及瞳孔中心自动对准系统,采用融合卷积神经网络智能感兴趣区域窗口实现了瞳孔中心定位。王鹏^[2]等针对近眼红外图像存在遮挡等的情况,提出了高精度的瞳孔中心定位方法。蔡怀宇^[3]等提出一种改进径向对称变换的瞳孔中心点定位算法。以上方法均是针对采用近红外光、具有较高对比度瞳孔图像开展的研究,不适用于存在较多噪声干扰的可见光瞳孔成像。王晶^[4]等人搭建了瞳孔中心点自动定位与对准装置,采用基于圆近似模型的算法实现了瞳孔中心点的自动定位,该算法在定位时会出现以虹膜区域作为基准进行定位的情况,导致瞳孔定位精确度不高。相对于红外成像,可见光成像具有分辨率高、成本低的优势,图像更自然,便于大规模的推广使用。因此,本文开展了应用于眼底成像系统的针对可见光图像的瞳孔自动定位与对准技术研究。

瞳孔定位是指在图像处理过程中,通过特定算法识别并精确找出瞳孔的位置,从而确定其中心坐标。目前瞳孔识别方法大致可分为三大类:第一类是基于机器学习或深度学习的人工智能方法^[5-8],例如采用U-Net网络^[5]、可变形卷积YOLO

网络^[7]进行瞳孔识别,这一类方法需要有大量的数据进行训练学习,易受数据库特征的影响,对数据集的依赖性较强;第二类是基于瞳孔形态学特征的方法^[9-15],例如基于瞳孔的轮廓特征的霍夫变换^[9]以及改进的蛇形活动轮廓^[10],这类方法需要的时间长;第三类是基于图像的直方图/阈值^[4, 16-21]等方法,这类方法算法简单,识别速度快,对噪声敏感。在眼底成像中,考虑到眼球运动等因素的影响,瞳孔中心的快速定位和良好的鲁棒性至关重要。基于图像直方图/阈值的瞳孔定位方法在实际应用中成为首选。然而,这种方法对噪声敏感,无法满足可见光图像的使用需求。因此,需要一种能够快速识别瞳孔位置、满足实时性要求,同时对噪声不敏感,能适用于可见光瞳孔图像的方法。

本文采用可见光摄像头模组和三维电动位移台,在实验室眼底成像系统上搭建瞳孔对准装置。在不损失眼底成像的光能量的同时,实现瞳孔对准装置与眼底成像系统共轴成像。融合运用霍夫梯度法、最大类间方差法、直方图特征及形态学运算,开发了一种高准确率、快速且鲁棒性强的瞳孔中心定位算法,成功定位了眼底成像系统和人眼瞳孔的中心。通过移动反馈控制电动位移台,使眼底成像系统中心与瞳孔中心对准,实现了人眼瞳孔自动快速定位与对准。本文方法降低了眼底成像过程中对操作人员的依赖,为建立无需人工监控的眼底筛查系统提供技术基础。

2 瞳孔对准装置

瞳孔对准装置由眼底成像系统的成像物镜、二向色镜、瞳孔相机、机械镜筒、分光镜等组成,如图1所示。眼底成像模块整体和瞳孔对准装置一同放置在三维电动平移台上,瞳孔相机通过转

接件固定在成像物镜的机械镜筒上。为了提高装置的通用性并降低成本,系统中的瞳孔相机采用可见光摄像模组,通过均布的黄色发光二极管为瞳孔进行侧面照明。

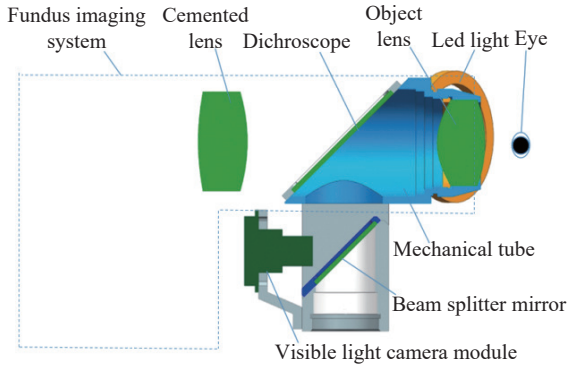


图 1 瞳孔对准装置

Fig. 1 The pupil alignment device

为了确保瞳孔定位装置能够有效引导眼底成像系统,将瞳孔相机放置在与眼底成像系统受试眼睛同光轴的位置。考虑到眼底成像系统采用红外光成像,为了不损失眼底成像的光能量,采用二向色镜实现眼底成像系统与瞳孔对准装置的分光。二向色镜设置在眼底成像系统的成像物镜与胶合透镜之间,使得瞳孔对准装置能够与眼底成像系统共用成像物镜。该二向色镜可以透过红外光,同时反射可见光,从而实现瞳孔定位装置与眼底成像系统共光路,便于进行瞳孔对准。系统中,二向色镜反射的可见光用于瞳孔相机成像。

3 瞳孔对准方法

瞳孔对准的思路是首先找到眼底成像系统和人眼瞳孔的中心,然后通过运动机构使它们重合,从而实现瞳孔对准。由于采集到的瞳孔图片尺寸较大(2560 pixel×1440 pixel),影响人眼瞳孔中心定位的运算速度,因此,在得到眼底成像系统中心后对图像进行初步分割,保留图像中的有效区域,并将其作为瞳孔中心定位的图像输入。瞳孔对准流程如图 2 所示。首先,瞳孔相机采集一张照片,作为瞳孔对准的原始图像输入。通过成像系统中心定位算法,得到成像系统中心,若未能定位到成像系统的中心,则返回重新采集图像进行运算。提取原始图像的有效区域作为瞳孔中心定位的输入图像。通过瞳孔中心定位算法得到瞳孔的中心,若未能计算出瞳孔的中心,则返回,重新采集

图像进行运算。最后,根据眼底成像系统的中心与人眼瞳孔中心的偏移量,控制三维电动平移台运动,实现人眼瞳孔的自动对准。

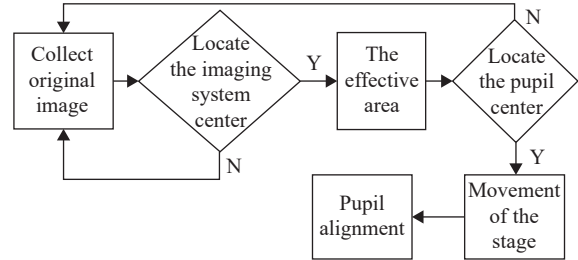


图 2 瞳孔对准流程图

Fig. 2 Flow chart of pupil alignment

3.1 成像系统中心定位

由于瞳孔相机的成像视场比眼底成像系统大,因此采集到的瞳孔图像包含了机械镜筒的内边缘轮廓。忽略装配误差的影响,可将机械镜筒的中心轴作为眼底成像的系统光轴,成像系统的中心定位问题即为求出图像中机械镜筒的圆形轮廓的圆心。考虑到镜筒尺寸是固定的,图像中轮廓圆的半径值接近于定值,采用霍夫梯度法识别镜筒边缘的圆形轮廓并确定中心坐标。当对一个圆形轮廓求梯度时,圆形轮廓上点的梯度方向都会朝向圆心。霍夫梯度法首先使用边缘检测(Canny)算子检测图像的边缘,得到图像的二值图,再利用索贝尔(Sobel)算子计算所有像素一阶梯度来寻找可能的圆心,并依据半径进行筛选。Canny算子通过高斯滤波、像素梯度计算、非极大值抑制、滞后阈值处理和孤立弱边缘抑制,能够有效抑制噪声,提高了边缘检测的准确性和稳定性。Sobel算子把图像中每个像素的上下左右四邻域的灰度值做加权差,获得图像的一阶梯度,可表示为两个 3×3 的矩阵模板,如图 3 所示。

-1	0	1	1	2	1
-2	0	2	0	0	0
-1	0	1	-1	-2	-1

图 3 Sobel 算子矩阵

Fig. 3 The Sobel operator matrix

图像的梯度值 G 可表示为:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} = \sqrt{(S_x * I)^2 + (S_y * I)^2} \quad (1)$$

式中, G_x 和 G_y 是图像水平和垂直方向上的梯度矩阵, I 为图像的灰度矩阵, S_x 和 S_y 表示图像水平

和垂直方向上的 Sobel 算子矩阵。

成像系统中心定位流程如图 4 所示, 首先将原始图像转换成灰度图像, 通过中值滤波抑制噪声和消除孤立的噪声点。接着, 通过霍夫梯度法识别出镜筒的圆形轮廓, 计算镜筒边缘的圆形轮廓的中心坐标, 作为眼底成像系统的中心位置。最后, 提取镜筒内区域图像, 作为瞳孔中心定位图像的有效区域。从测试图片中随机选取 4 张图片, 编号分别为 4、10、12、250, 其成像系统中心、原始图像及有效区域如图 5(彩图见期刊电子版) 所示。图 5(a)~5(d) 分别代表编号 4、10、12、250 的结果。

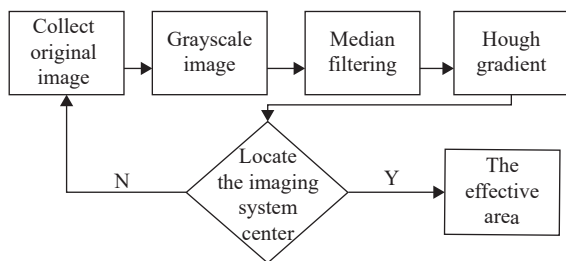


图 4 成像系统中心定位的流程图

Fig. 4 Flow chart of imaging system center localization

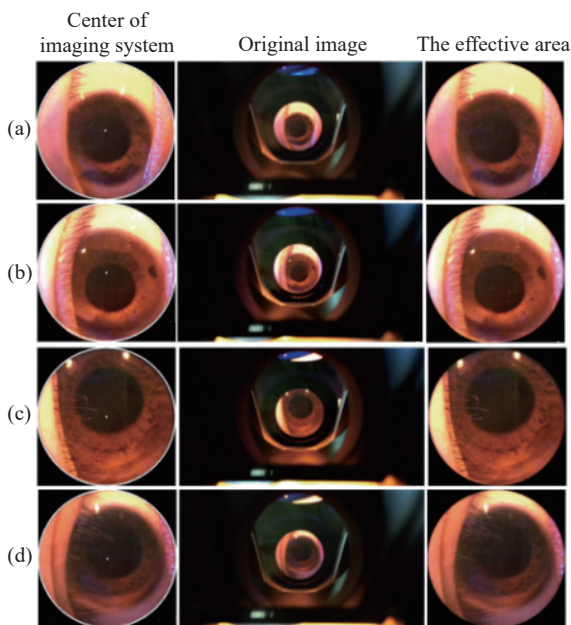


图 5 随机选取的 4 张图片的成像系统中心、原始图像及有效区域

Fig. 5 The center of the imaging system, the original image, and the effective region for four randomly selected images

3.2 瞳孔中心定位

由于睫毛、眼睑遮挡等因素, 图像中存在噪声, 这会影响瞳孔中心定位方法的效果。为了解

决这个问题, 需要对图像进行平滑处理, 以提高定位的准确性。滤波是实现图像平滑处理的最常用方法之一。其中, 中值滤波是一种非线性滤波方法, 它通过对像素周围邻域中的像素值进行排序, 然后选择中间值作为该像素的新值, 从而达到去除椒盐噪声和脉冲噪声的效果。由于眼球运动会导致瞳孔位置发生变化, 因此瞳孔定位必须要速度快。针对这一问题, 本文提出了先采用最大类间方差法提取图像的核心区域, 再基于图像核心区域的直方图确定图像的二值化阈值, 通过形态学运算确定瞳孔区域, 通过最小封闭圆确定瞳孔中心的方法。

观察图像及直方图, 可以发现人眼的眼睑和巩膜对应图像灰度高的区域, 虹膜对应的灰度居中, 而瞳孔对应灰度值低的区域。采用最大类间方差法搜索得到图像的第一阈值, 对图像进行第一次二值化处理, 去除高灰度值的眼睑等区域, 进一步提取图像的核心区域。最大类间方差法是一种自动计算图像二值化阈值的方法, 其将图像分成前景和背景两部分, 基于图像的灰度直方图, 通过寻找一个阈值, 使得前景和背景之间的类间方差最大化, 从而实现最佳的图像分割效果。该方法具有计算简单, 速度快的优点。图 6(a)~6(d) 展示了成像中心定位中随机选取的 4 组图像的有效区域和核心区域图像的直方图。

如何得到理想的二值化阈值是识别瞳孔区域的关键。部分图像的核心区域直方图呈双峰特性, 可以再次使用最大类间方差法计算得到最佳分割阈值。然而, 其对于噪声较多的图像处理效果较差, 易出现过度分割或欠分割现象。在运算过程中有部分图像, 再次采用最大类间方差法分割时, 不能实现准确分割, 故本文采用基于直方图谷值阈值的方法进行分割。人眼瞳孔的颜色通常较深, 一般呈现为黑色, 是人眼图像中像素最低的部分, 并且分布较为集中。将核心区域的直方图中所有大于 3 的谷值像素, 按照从小到大的顺序排列, 作为待选二值化阈值, 将其中第一个阈值, 即最小的阈值, 作为初始阈值。

本文提出的瞳孔中心定位流程如图 7 所示, 具体包括: (1) 将通过成像系统定位得到的有效区域图像转化为灰度图像; (2) 通过最大类间方差法对图像进行二值化处理以提取图像的核心区域;

(3)根据核心区域的直方图特征,确定待选二值化阈值范围,并选择初始阈值;(4)对核心区域图像进行二值化分割;(5)对二值化处理后的图像进行形态学运算,先用开运算去除图像中的小型噪声、平滑图像边缘和细节,再用闭运算填充图像中的小型空洞、平滑图像边缘和细节,同时保留图像中的整体形状和结构。(6)通过边缘检测方法提取形态学运算后的图像轮廓;(7)取其中包络面积最大的轮廓进行判定,当轮廓满足以下条件时,认为该轮廓为瞳孔区域轮廓:(a) $Area > Area_0$ ($Area$ 为轮廓面积, $Area_0$ 为初始设定值,本文中设置为 1000);(b) $0.8 < w/h < 1.2$ (w 、 h 为该轮廓最小包络矩形的长和宽);(8)当判定轮廓满足条件时,用最小封闭圆拟合计算得到圆心坐标 (x_1, y_1) ,即为瞳孔中心。若未筛选出符合以上两个条件的轮廓,则从待选二值化阈值中选择下一个谷值作为阈值,重复步骤(4)~(8)。当待选二值化阈值全部循环结束仍未找到符合条件的轮廓时,退出程序重新拍照处理。对于瞳孔存在较大遮挡的图像,在设定轮廓条件时,应调整轮廓的最小包络矩形的长宽比值范围。最终得到的形态学运算后的图像和瞳孔中心图像见图 8(彩图见期刊电子版)。

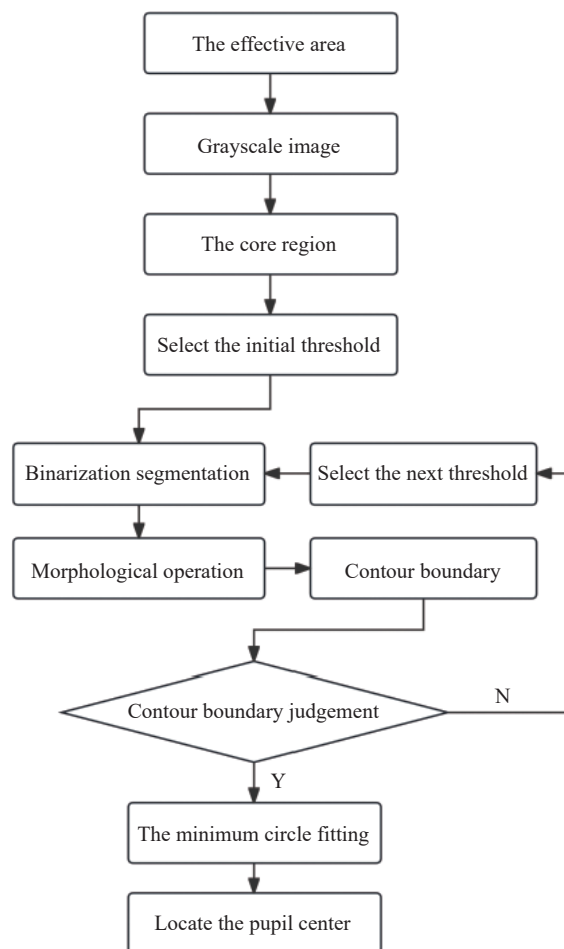


图 7 瞳孔中心定位的流程图

Fig. 7 Flow chart of pupil center localization

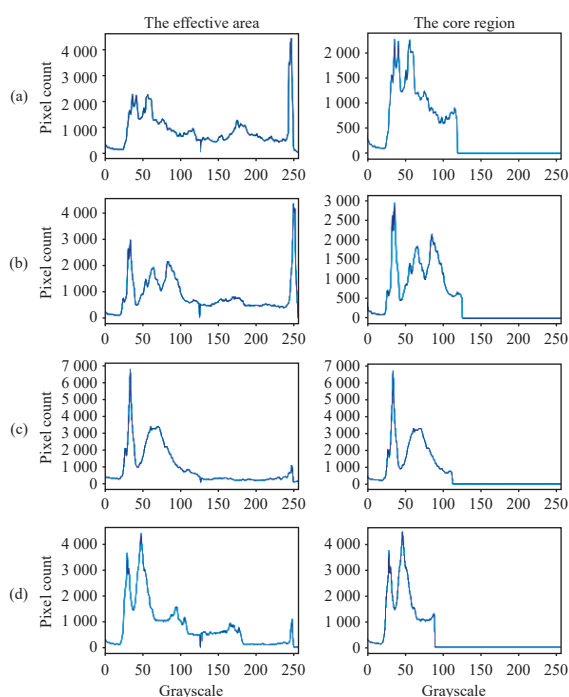


图 6 4 组图像的有效区域和核心区域图像的直方图

Fig. 6 The histograms of the effective area and the core region for the four images

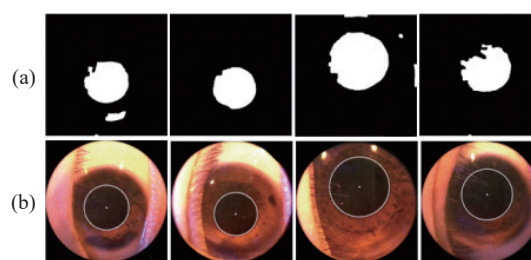


图 8 (a)形态学运算和(b)瞳孔中心的图像

Fig. 8 Images of (a) morphological operations and (b) pupil center

3.3 瞳孔对准实现

在成像系统的中心定位中,通过霍夫梯度法得到眼底成像系统的中心坐标和圆形轮廓半径的像素值。圆形轮廓对应为镜筒的结构,其尺寸是固定值(直径为 36 mm),则每幅图像中的镜筒轮廓的像素对应的距离(dp)可表示为

$$dp = \frac{a}{2r}, \quad (2)$$

式中, a 表示镜筒结构的直径值, r 表示预处理图

像的圆形轮廓对应的像素值。

由于本装置的瞳孔相机采用可见光摄像模组,其在镜筒位置和瞳孔位置对应的放大因子不同。可通过比例计算或拟合得到瞳孔所在位置相对于镜筒位置的放大因子。

在实际调整过程中,人眼目视视标,相对静止。将得到的眼底成像系统的中心移动至瞳孔中心,实现眼底成像系统与人眼瞳孔自动对准。眼底成像系统中心移动距离可表示为

$$\begin{cases} x = (x_1 - x_0) \times dp \times \beta \\ y = (y_1 - y_0) \times dp \times \beta \end{cases}, \quad (3)$$

式中, x_1, y_1 分别为人眼瞳孔中心在水平和垂直方向上的像素值, x_0, y_0 分别为眼底成像系统中心在水平和垂直方向上的像素值, dp 为图像中镜筒轮廓的像素距离, β 为人眼瞳孔相对于镜筒的放大因子(本文示例中 β 为 0.41)。将计算得到的眼底成像系统中心的移动距离,发送给相应的电动位移台进行调整,实现人眼瞳孔与眼底成像系统中心的对准。

4 实验结果

为了验证本方法的有效性和可靠性,利用此系统采集 17 名受试者的 252 张图像(图像大小为 2560×1440)开展测试。测试图像中包含照明情况不理想的图像、存在睫毛等遮挡的图像以及存在离焦的图像。本方法采用的计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i7-13700F, 2.10 GHz 主频, 16 G 内存, Windows11 操作系统,采用 python 语言, Anaconda3 平台进行测试。

采用最大类间方差法进一步提取图像的核心区域后,发现当再次采用最大类间方差法得到图像的二值化阈值进行瞳孔中心定位时,仅少部分图像能够有效识别瞳孔。图 9(彩图见期刊电子版)展示了编号 12 的图像采用最大类间方差法得到的瞳孔中心识别结果,包含成像系统中心定位图像、最大类间方差法提取的图像核心区域、二值化处理后的图像、为形态学处理后的图像、标记瞳孔中心的图像。对核心区域采用最大类间方差法识别瞳孔失败的图像,通过本文方法可以成功识别瞳孔。图 10(彩图见期刊电子版)展示了编号 250 的图像在对核心区域用最大类间方差法

识别瞳孔失败后通过直方图谷值成功识别瞳孔的处理过程及结果,包含:成像系统中心定位图像、最大类间方差法提取的图像核心区域、再次采用最大类间方差法阈值处理后的图像、直方图谷值阈值处理后的图像、形态学处理后的图像、标记瞳孔中心的图像。

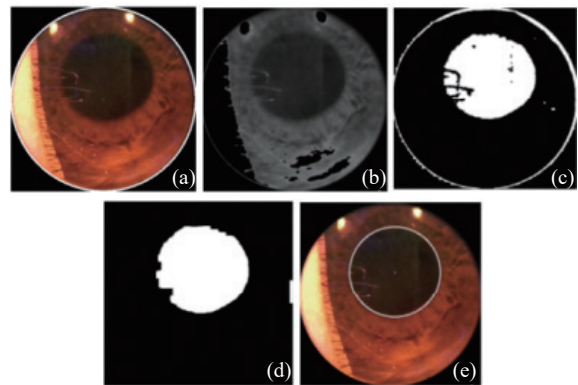


图 9 采用最大类间方差法的图像。(a)成像系统中心;(b)核心区域;(c)二值化;(d)形态学;(e)瞳孔中心

Fig. 9 Images obtained by maximum inter-class variance method. (a) The center of imaging system; (b) core region; (c) binarization results; (d) morphological results; (e) pupil center

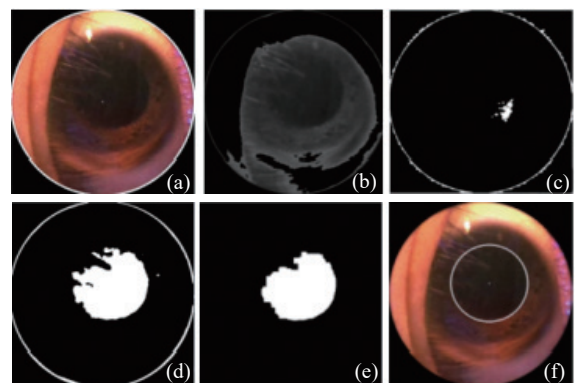


图 10 采用直方图谷值识别瞳孔中心。(a)成像系统中心;(b)核心区域;(c)再次采用最大类间方差法得到结果;(d)二值化;(e)形态学;(f)瞳孔中心

Fig. 10 Pupil center determined by histogram valley method. (a) The center of the imaging system; (b) core region; (c) using twice maximum between-cluster results; (d) binarization results; (e) morphological results; (f) pupil center

通过本文方法,本次测试的所有图像均能够有效识别成像系统中心和瞳孔中心,完成成像系统中心和瞳孔中心识别的平均用时为 0.11 s。本方法识别的瞳孔中心相对于手工标记的瞳孔中

心的在水平和垂直两个方向上的平均准确率达 98.7%, 平均偏差在 3 个像素以内。图 11(a)~图 11(d) 展示了成像中心定位中随机选取的 4 组图像的成像系统中心和瞳孔中心的定位结果, 图 11(e)~11(j)

分别对应图像编号为 27、41、131、180、210、226 的结果, 展示了照明情况不理想的图像、存在离焦的图像以及存在睫毛等遮挡图像成像系统中心和瞳孔中心的定位结果。

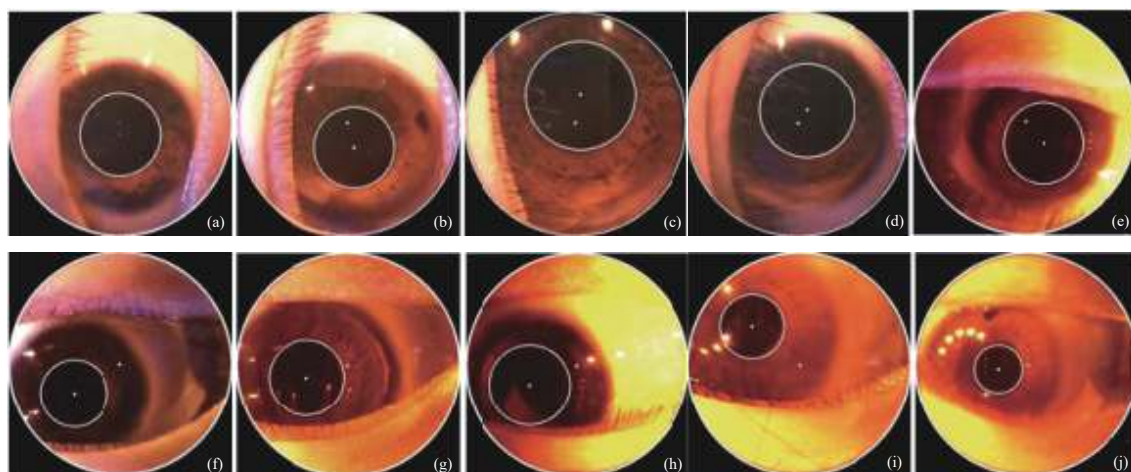


图 11 成像系统中心和瞳孔中心的定位结果

Fig. 11 Localization results of imaging system center and pupil center

将本文方法和文献 [2] 中采用圆近似模型算法识别的瞳孔中心位置与手工标记的瞳孔中心进行对比, 通过圆近似模型算法能识别 98% 的图像中心 (识别中心偏差在 50 像素以上, 认定为不能识别)。由于其中部分图像识别的为虹膜中心, 导致瞳孔定位精度偏低, 其识别中心在水平和垂直方向上的平均准确率为 96.5%。为了更直观地进行比较, 将中心像素在水平和垂直方向的偏差值转换成欧式距离值。图 12 展示了本文方法和圆近似方法相对于手工标记瞳孔中心像素偏差的欧式距离值。可见, 通过本文方法识别的瞳孔中心与手工标记瞳孔中心的欧式距离偏差平均值为 4.3 像素, 明显优于通过圆近似模型算法识别中心的欧式距离偏差平均值 9.6 像素。本文方法识别的瞳孔中心准确度优于采用圆近似模型算法识别的中心, 其与手工标记的瞳孔中心偏差的欧式距离均在 10 个像素以内, 换算为空间距离, 偏差在 0.35 mm 以内, 满足设备成像对准的使用需求。

将本方法得到的像素偏差按照式 (3) 计算得到系统中心在两个方向上的移动距离, 控制位移台运动, 从而实现瞳孔中心的对准。图 13 (彩图见期刊电子版) 展示了本装置采集的原始图像及瞳孔对准后的图像, 其包含瞳孔对准装置采集的原始图像、瞳孔中心定位后的图像、瞳孔对准后

装置采集的原始图像、对准后瞳孔中心定位的图像。在本例中, 从识别成像系统中心、识别瞳孔中心到实现成像系统中心和瞳孔中心的对准的总用时为 2.2 s (包含电动位移台的启动和移动时间)。

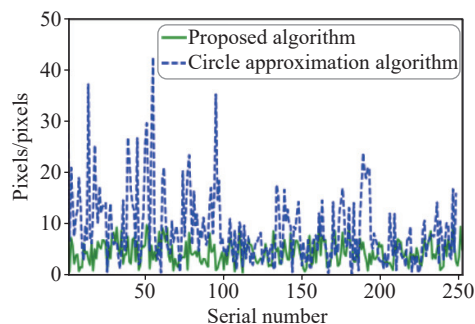
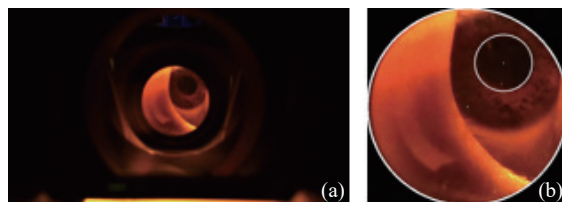


图 12 两种方法与手工标记的瞳孔中心像素偏差的欧式距离

Fig. 12 Euclidean distance of deviation of pupil center located by the proposed algorithm and circle approximation algorithm from manually marked pupil center



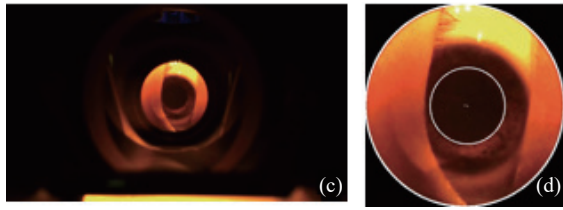


图 13 原始图像及瞳孔对准后的图像结果。(a)原始图像及(b)其瞳孔定位结果;(c)对准后的原始图像及其(d)瞳孔定位结果

Fig. 13 The original image and the pupil-aligned images. (a) The original image and (b) it's pupil localization results; (c) the aligned original image and (d) it's pupil localization results

5 结 论

本文针对眼底成像系统的瞳孔快速精确对准需求,提出了一种基于可见光成像的瞳孔中心定

位方法。该方法采用可见光摄像模组,使其与眼底成像系统共光轴,融合使用霍夫梯度法、最大类间方差法和图像直方图特征,并结合三维电动位移台,实现了眼底成像系统的人眼瞳孔中心快速定位及对准。

实验结果表明,本文提出的方法对噪声不敏感,可用于可见光瞳孔图像,满足眼底成像系统的实时性要求,平均在 0.11 s 完成眼底成像系统中心和瞳孔中心的识别,识别的瞳孔中心相对于手工标记的瞳孔中心在水平和垂直两个方向上的平均准确率达 98.7%,平均偏差在 3 个像素以内,平均欧式距离偏差为 4.3 像素,相对于圆近似模型算法平均欧式距离偏差量缩小了一半。

本文搭建的瞳孔对准装置可实现自动对准,降低眼底成像过程中对操作人员的依赖,为建立无需人工监控的眼底筛查系统提供技术基础。

参考文献:

- [1] 汪路涵, 巩岩, 张艳微, 等. 人眼自动对焦及瞳孔中心自动对准系统[J]. *光学学报*, 2023, 43(5): 0511002.
WANG L H, GONG Y, ZHANG Y W, *et al.*. Human eye autofocus and pupil center auto-alignment system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(5): 0511002. (in Chinese).
- [2] 王鹏, 温宏韬, 王世龙. 基于近眼红外图像的高精度瞳孔中心定位方法[J]. *哈尔滨理工大学学报*, 2022, 27(5): 38-46.
WANG P, WEN H T, WANG SH L. High-precision pupil center positioning method based on near-eye infrared image[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2022, 27(5): 38-46. (in Chinese).
- [3] 蔡怀宇, 史玉, 姜世良, 等. 应用于红外眼科疾病检测的瞳孔定位算法[J]. *中国光学*, 2021, 14(3): 605-614.
CAI H Y, SHI Y, LOU SH L, *et al.*. Pupil location algorithm applied to infrared ophthalmic disease detection[J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 605-614. (in Chinese).
- [4] 王晶, 高峰, 李婉越, 等. 瞳孔中心点自动定位与对准装置[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(6): 1370-1377.
WANG J, GAO F, LI W Y, *et al.*. Device for automatic pupil center location and alignment[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(6): 1370-1377. (in Chinese).
- [5] CHEN G ZH, DONG ZH H, WANG J, *et al.*. Pupil localization algorithm based on improved U-Net network[J]. *Electronics*, 2023, 12(12): 2591.
- [6] XUE P X, WANG CH Y, HUANG W B, *et al.*. Pupil Centre's localization with transformer without real pupil[J]. *Multimedia Tools and Applications*, 2023, 82(16): 25467-25484.
- [7] 王鉴, 张荣福. 基于可变形卷积的单帧图像眼球定位追踪[J]. *光学仪器*, 2021, 43(6): 26-31.
WANG J, ZHANG F R. Single-frame image eyeball tracking based on deformable convolution[J]. *Optical Instruments*, 2021, 43(6): 26-31. (in Chinese).
- [8] 张贺童, 姚康, 裴融浩, 等. 基于 ADEU-Net 分割网络的瞳孔精确分割方法[J]. *计算机工程与应用*, 2023, 59(2): 212-221.
ZHANG H T, YAO K, PEI R H, *et al.*. Accurate pupil segmentation based on ADEU-Net segmentation network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2023, 59(2): 212-221. (in Chinese).
- [9] 张宏薇, 王仕洋, 李宪龙, 等. 基于 Hough 变换的瞳孔识别方法研究与实现[J]. *液晶与显示*, 2016, 31(6): 621-625.
ZHANG H W, WANG SH Y, LI X L, *et al.*. Research and implementation of pupil recognition based on Hough transform[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(6): 621-625. (in Chinese).
- [10] ABDULLAH M A M, DLAY S S, WOO W L. Fast and accurate pupil isolation based on morphology and active

- contour[J]. *International Journal of Information and Electronics Engineering*, 2014, 4(6): 418-422.
- [11] JAN F, USMAN I, AGHA S. Iris localization in frontal eye images for less constrained iris recognition systems[J]. *Digital Signal Processing*, 2012, 22(6): 971-986.
- [12] 陈静瑜, 林丽媛, 刘冠军, 等. 一种基于几何形状特征的实时瞳孔定位追踪技术[J]. 天津科技大学学报, 2021, 36(3): 65-71.
CHEN J Y, LIN L Y, LIU G J, *et al.*. A real-time pupil positioning and tracking technology based on geometric shape features[J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2021, 36(3): 65-71. (in Chinese).
- [13] WAN ZH H, XIONG C H, CHEN W B, *et al.*. Robust and accurate pupil detection for head-mounted eye tracking[J]. *Computers & Electrical Engineering*, 2021, 93: 107193.
- [14] 童言, 穆平安, 林玉莹. 基于圆形滑动窗口的瞳孔定位算法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(2): 99-103.
TONG Y, MU P A, LIN Y Y. Pupil location algorithm based on circular sliding window[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2021, 44(2): 99-103. (in Chinese).
- [15] MIN-ALLAH N, JAN F, ALRASHED S. Pupil detection schemes in human eye: a review[J]. *Multimedia Systems*, 2021, 27(4): 753-777.
- [16] JAN F, USMAN I, AGHA S. Reliable iris localization using Hough transform, histogram-bisection, and eccentricity[J]. *Signal Processing*, 2013, 93(1): 230-241.
- [17] KHAN T M, KHAN M A, MALIK S A, *et al.*. Automatic localization of pupil using eccentricity and iris using gradient based method[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2011, 49(2): 177-187.
- [18] LIN ZH H, YU H F. The pupil location based on the OTSU method and Hough transform[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, 8: 352-356.
- [19] ZHOU W J, LU X Y, WANG Y. A robust pupil localization via a novel parameter optimization strategy[J]. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 2022: 2378911.
- [20] 刘诗瑜, 赵夏冬, 温盼, 等. 基于 FPGA 的分段近似双边滤波算法设计与实现[J]. 液晶与显示, 2024, 39(10): 1341-1349.
Liu S Y, Zhao X D, Wen P. Design and implementation of piecewise approximation bilateral filtering algorithm based on FPGA[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2024, 39(10): 1341-1349.
- [21] 黎明清, 王宇庆, 孙海江. 基于侧窗滤波改进的神经网络非均匀性校正算法[J]. 液晶与显示, 2023, 38(11): 1567-1579.
Li M Q, Wang Y Q, Sun H J. Improved neural network nonuniformity correction algorithm based on side window filter[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2023, 38(11): 1567-1579.

作者简介:



邢利娜(1985—), 女, 河南洛阳人, 博士研究生, 副研究员, 2010年于重庆大学获得硕士学位, 主要从事光学成像、高分辨率眼科成像与检测等方面的研究。E-mail: xingln@sibet.ac.cn



史国华(1981—), 男, 浙江湖州人, 博士研究生, 研究员, 博士生导师, 2011年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位, 主要从事高分辨率眼科成像与检测、在体光学超分辨成像、活体视觉神经网络等方面的研究。E-mail: shigh@sibet.ac.cn



何益(1984—), 男, 四川营山人, 博士研究生, 研究员, 博士生导师, 2013年于中国科学院光电技术研究所获得博士学位, 主要从事波前处理、眼科光学、生物光子学、基于智能计算的精准医疗等方面的研究。E-mail: heyi@sibet.ac.cn