

非接触眼压计的人眼瞳孔定位算法研究^{*}

宋保全 杜文华 段能全 李 献

(中北大学机械工程学院 太原 030051)

摘要: 为了提高非接触眼压计自动化程度,加快人眼瞳孔定位效率,提出了一种采用基于XLD轮廓的多模板匹配算法,可实现对人眼瞳孔快速精确定位,并增加了非接触眼压计瞳孔定位检测范围,提高了自动化水平。同时对误检图像,采用了双边滤波、阈值分割和腐蚀膨胀处理,再通过设定参数得到瞳孔区域,最后使用Hough变换实现对误检图像的重新定位。实验结果表明,所提出的方法的定位成功率在99%以上,误差在5 pixel以内,平均定位为0.121 s,能够精准、快速的得到人眼瞳孔的中心坐标,可以满足非接触眼压计对瞳孔精确定位和快速定位的要求,同时对个体瞳孔差异、姿态差异、瞳孔部分被遮挡、边缘光斑影响等干扰因素有较强的鲁棒性和泛化性。

关键词: 非接触眼压计;瞳孔定位;XLD椭圆拟合;多模板创建;最小均方误差匹配法

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.4050

Research on pupil location algorithm of non-contact tonometer

Song Baoquan Du Wenhua Duan Nengquan Li Xian

(School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: In order to improve the automation degree of non-contact tonometer and speed up the efficiency of human eye pupil location, a multi template matching algorithm based on XLD contour is proposed, which can realize the rapid and accurate location of human eye pupil, increase the detection range of non-contact tonometer pupil location and improve the automation level. At the same time, for the false detection image, bilateral filtering, threshold segmentation and corrosion expansion processing are adopted, and then the pupil region is obtained by setting parameters. Finally, Hough transform is used to reposition the false detection image. The experimental results show that the positioning success rate of the proposed method is more than 99%, the error is within 5 pixel, and the average positioning is 0.121 s. It can accurately and quickly obtain the central coordinates of the human eye pupil, and can meet the requirements of the non-contact tonometer for accurate and rapid pupil positioning. At the same time, it has strong robustness and generalization to interference factors such as individual pupil difference, posture difference, partial occlusion of pupil, influence of edge spot and so on.

Keywords: non contact tonometer; pupil localization; XLD ellipse fitting; multi template creation; least mean square error matching method

0 引 言

眼球内部的压力叫做眼内压,简称眼压,眼压的测量在临床应用上有着不可或缺的重要意义,是早期诊断和治疗青光眼及其他眼科疾病的重要判断依据之一^[1]。眼压计是一种测量人眼眼压的仪器,已经得到了相当的普及,而非接触眼压计作为眼压计的一种,以它操作简单、测量方便、重复性好、无需触碰眼睛、无需使用角膜麻醉、降低了眼角膜损伤和感染的机率等优势,而被广泛使用^[2]。

非接触眼压计测量眼压的第一步便是对人眼瞳孔中心进行定位,这也是最重要的一步,人眼定位精度的高低将会直接影响测量出的眼压值的准确性。由于市面上的非接触眼压计都是半自动化,在实际操作中,需要操作者手动进行对准,其定位过程较为耗时繁琐。因此加快定位速度,提高非接触眼压计自动化水平,在市场竞争中变得尤为重要。由于人眼对红外光感知较弱且人眼红外图像对比度较高,对瞳孔定位较为容易,因此,非接触眼压计一般都采用红外光源或近红外光源。

收稿日期:2021-11-04

^{*} 基金项目:国家自然科学基金(51905496)项目资助

对于人类来说,在一幅人眼图片中定位瞳孔中心是一件非常容易的事情,但对于计算机而言,这却是一件非常困难的任务。首先,人眼是一个三维物体且表面结构非常复杂,将其映射到二维图像上也会产生非常大的差异变化。并且当存在一些内在或外在因素,如姿态变化、所处光照条件变化、眼睛表面结构差异时,人眼图像的差别是非常大的。其次,瞳孔周围环境较为复杂,有眼睫毛、眼皮等因素的干扰,对于提取瞳孔边缘轮廓、瞳孔相关特征、分割瞳孔图像有较大的影响。

根据模式识别原理以及最后的检测结果,可将人眼瞳孔定位算法分为基于数据的方法和基于知识的方法^[3]。基于数据的方法需要足够的训练样本和复杂的学习过程,从而获取人眼瞳孔的相关特征,实现瞳孔定位。常用的方法有多层感知器(multilayer perceptron, MLP)、卷积神经网络(convolutional neural networks, CNN)、支持向量机(support vector machine, SVM)、AdaBoost等。Zhang等^[4]提出一种基于AdaBoost和区域特征的眼睛定位方法,先是通过基于Harr特征和AdaBoost提取眼睛区域特征,然后根据区域特征来定位人眼。Rusek等^[5]通过两个级联的前反馈多层感知器(MLP)来完成人眼的自动定位。王娟等^[6]提出了一种检测瞳孔参数的新方法,该方法首先是利用Faster-RCNN深度学习网络实现瞳孔区域检测,然后再通过阈值分割的方法实现瞳孔定位。基于数据的方法对人眼定位的速度较快、有较高鲁棒性和较强的泛化能力,但其只能粗略的找到人眼瞳孔的大致位置,定位精度较低,无法满足非接触眼压计的精度要求。

基于知识的方法需要依靠先验知识设定人眼定位准则,来指导瞳孔定位。这类方法定位结果更加精确,在需要人眼精确定位的场合和设备中被广泛使用。瞳孔的灰度信息、边缘信息、形状信息是瞳孔定位中常用的先验知识,依此使用的方法有灰度投影法、Hough变换、基于形状或灰度的模板匹配等。Yang等^[7]提出了一种新的有效的人眼瞳孔定位方法,首先,利用梯度函数、积分图像和Hough变换获得人眼瞳孔区域,其次,利用Canny算子和直接最小二乘法的椭圆拟合算法得到瞳孔的椭圆方程。将椭圆的中心视为瞳孔的中心,拟合椭圆的边缘被视为瞳孔的边缘,实现人眼瞳孔的定位。刘源^[8]提出了一种基于灰度阈值算法和模板匹配算法结合起来的人眼定位方法,此方法先是对人眼图像进行预处理,利用灰度阈值法得到人眼的大致位置,再使用模板匹配,设置相应的匹配权值进行匹配,实现人眼瞳孔的精确定位,由于使用的是单模板匹配,易受个体瞳孔差异的影响,鲁棒性和泛化能力不高。陈静瑜等^[9]提出一种基于几何形状特征的实时瞳孔定位追踪技术,首先是结合两种不同定义的连通域外接矩形,通过面积阈值、角度差进行初步筛选,其次再利用外接矩形长宽比进行二次筛选,最终实现瞳孔的精确定位,该方法定位速度较快,但遇到瞳孔图像趋于椭圆时,定位精度较差,稳定性不高。李

攀等^[10]提出一种新的由粗及精的瞳孔定位方法,该方法首先利用瞳孔区域的直方图,采用改进的最大类间方差法自适应地分割瞳孔区域,实现粗略定位,然后利用瞳孔灰度的梯度特性来精确定位瞳孔边缘点,最后采用亚像素边缘(extended line descriptions, XLD)定位方法,更精确地求得瞳孔XLD轮廓,并通过椭圆拟合的方法来精确定位瞳孔的中心位置,但当瞳孔图像灰度直方图出现两个或两个以上峰时,该算法会无法分割出瞳孔区域,需要人工调整参数,鲁棒性不高。基于知识的方法缺点在于易受个体差异的影响,鲁棒性和泛化能力不高,需要人工调整参数。

综合上述情况,以及非接触眼压计的人眼瞳孔定位要求——对瞳孔的定位误差在5 pixel以内,定位速度在0.5 s以内。本文结合基于数据的方法训练样本来获取人眼瞳孔相关特征的思想,以及文献[9]利用外接矩形长宽比进行筛选的思路和文献[10]采用XLD轮廓和椭圆拟合的定位思路,提出了一种基于XLD轮廓的多模板匹配算法。算法采用XLD轮廓和椭圆拟合的方法来定位瞳孔边缘以实现瞳孔的精确定位,再通过训练多个瞳孔样本图像来创建数个XLD轮廓匹配模板,得到模板集合,最后对目标人眼瞳孔图像进行匹配,并反馈相关参数。解决了基于知识的方法易受个体差异影响的缺点,可实现算法的高鲁棒性和泛化性。

1 基于XLD轮廓的多模板匹配算法概述

图1所示为基于XLD轮廓的多模板匹配算法的总体流程,先选取训练样本图像,经过亚像素Blob分析、瞳孔边缘轮廓拟合等图像预处理,得到XLD椭圆轮廓,创建基于边缘轮廓的匹配模板,重复上述流程,得到多个匹配模板,使用创建好的模板集合对待测图像进行匹配,并输出模板匹配得到的瞳孔像素坐标。

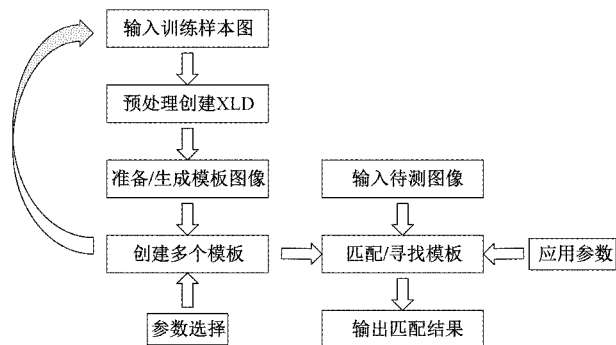


图1 基于XLD轮廓的多模板匹配算法的总体流程

1.1 亚像素Blob分析

Blob是指图像中一块像素相同的连通域,Blob分析就是对已分割后的二值图像进行连通域的提取和标记,然后可以计算已标记的连通域的一些相关特征,如面积、圆度、凸性、坐标等^[11]。

亚像素Blob分析方法是将被输入的图像视为灰度值曲

面,通过设定的阈值来分割图像,获得图像 XLD 轮廓,其中这个设定的阈值是为了返回将灰度值小于阈值的区域与灰度值大于阈值的区域分开的轮廓线。此方法较传统的 Blob 分析方法速度提高了 50%,并且提取出来的边缘轮廓比较完整,圆度和凸性较好。图 2 所示为人眼图像经过亚像素 Blob 分析后提取出来的人眼亚像素灰度边缘图像,通过设定的阈值提取出了较为完整的人眼瞳孔轮廓线。

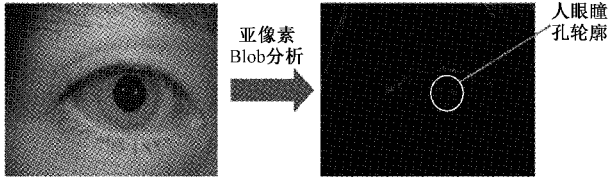


图 2 亚像素 Blob 分析人眼图像

1.2 XLD 椭圆轮廓拟合

椭圆轮廓拟合利用的最小二乘法,将轮廓上的点到拟合椭圆的距离最小化,也就是要求拟合出来的椭圆与轮廓上的每个点最近。由于最小二乘法对于远离椭圆的离群值没有很好的鲁棒性,使用最小二乘拟合椭圆时,到椭圆很远的点在计算过程中会占有很大的权重,所以需要把离群值消掉或者在计算时赋予很小的权重。

本文使用的是 Huber 权重函数^[12],设权重函数 $\omega(\delta)$,其中参数 δ 表示边缘点到拟合椭圆的距离,其中参数 τ 表示距离阈值,其定义如式(1)所示。

$$\omega(\delta) = \begin{cases} 1, & |\delta| \leq \tau \\ \frac{\tau}{|\delta|}, & |\delta| > \tau \end{cases} \quad (1)$$

这个权重函数意思是:当边缘点到拟合椭圆的距离小于等于一个阈值 τ 时,赋予权重为 1;当边缘点到拟合椭圆的距离大于阈值时,权重函数等于距离的倒数乘以阈值,这样就是距离越远,值越小。

采用 XLD 特征检测算法提取人眼亚像素灰度边缘图像中各连通域的特征参数,如面积、圆度、凸性等。通过各连通域特征参数之间的对比,选取了凸性和面积作为提取瞳孔轮廓的特征参数,来得到瞳孔轮廓区域,再对该区域进行椭圆轮廓拟合。如图 3 所示,图中的椭圆曲线为人眼瞳孔椭圆拟合后的 XLD 椭圆轮廓曲线。

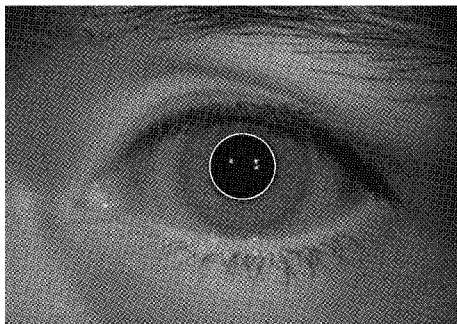


图 3 人眼瞳孔拟合的 XLD 椭圆轮廓

1.3 基于 XLD 轮廓的多模板匹配算法

1) 边缘轮廓模板匹配处理思路

XLD 轮廓模板匹配的处理思路^[13]有如下几种:(1)直接使用边缘轮廓模板与待测图像中的边缘进行比较,计算相似度;(2)将训练样本图中提取到的边缘轮廓分割成多个几何基元,然后在待测图像中匹配这些基元,计算相似度;(3)获取模板中边缘轮廓的突出点或者关键点等,然后在待测图像中进行匹配,计算相似度。由于瞳孔边缘轮廓曲线呈椭圆,无突出点,也无需进行分割,所以采用思路(1)较为合适,用提取到的瞳孔边缘轮廓模板与待测人眼图像进行比较,计算相似度。在计算模板与待测图像的相似度时,采用待测图像边缘点与模板边缘点之间的距离作为相似度。距离的表达式有多种,一般是模板所有边缘点与离它最近的图像边缘点之间的均方距离最小,然后计算相似度的局部最小值。对待测图像,依此匹配模板集合中的各个边缘轮廓模板,记录各个模板中的相似度的局部最小值,通过比较,得出最佳匹配模板以及最佳匹配位置。

2) 最小均方误差匹配法

最小均方误差匹配方法^[14]中的边缘点构造矩阵 \mathbf{X} ,图像子图的边缘点构造矩阵 \mathbf{Y} ,然后求解矩阵 \mathbf{X} 到矩阵 \mathbf{Y} 的变换矩阵,均方误差最小的位置为最佳匹配位置。

对于图像间的仿射变换如式(2)所示。

$$(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \rightarrow (\mathbf{X}', \mathbf{Y}') \quad (2)$$

变换方程如式(3)所示。

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = s \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} tx \\ ty \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} x & y & 1 & 0 \\ y & -x & 0 & 1 \end{bmatrix} [s\cos\theta \quad s\sin\theta \quad tx \quad ty]^T \quad (3)$$

其中,仿射变换参数由式(4)中向量 $\boldsymbol{\theta}$ 表示:

$$\boldsymbol{\theta} = [s\cos\theta \quad s\sin\theta \quad tx \quad ty]^T \quad (4)$$

根据给定的 n 对相应边缘点,构造点坐标矩阵如式(5)和(6)所示。

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_1 & y_1 & 1 & 0 \\ y_1 & -x_1 & 0 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_n & y_n & 1 & 0 \\ y_n & -x_n & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{Y} = [x'_1 \quad y'_1 \quad \cdots \quad x'_n \quad y'_n]^T \quad (6)$$

仿射变换参数向量的求解方程如式(7)所示。

$$\boldsymbol{\theta} = (\mathbf{X}^T \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

最小均方误差的公式如式(8)所示。

$$\mathbf{E}^2 = (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta})^T (\mathbf{Y} - \mathbf{X}\boldsymbol{\theta}) \quad (8)$$

$\boldsymbol{\theta}$ 解出后,便可以计算得出最小均方误差 \mathbf{E}^2 ,从而得到最佳的匹配位置。

3) 图像金字塔分层搜索加速策略

多模板匹配算法实现过程需要用创建好的模板集合依此对待测图像进行匹配,计算相似度,因此算法运行时间会

较长。为了提高算法速度,加快模板匹配过程,需减少待测图像的像素点数以及模板中的像素点数,而金字塔分层搜索能够减少这两部分,以加快算法运算速度。

模板匹配算法复杂度^[15]是: $O(whn)$;其中 wh 表示图像的宽高, n 表示模板中的点数,如果想提高算法速度,就要减少这3个数值,而图像金字塔可以减少图像的宽高,以及图像分辨率,进而减少待测图像中的像素点数和模板中的像素点数。

2 人眼定位实验结果及分析

本实验采用的是 CASIA-Iris-Lamp 数据库中的 1 970 张待测人眼图像,其中共 983 张左眼图像,987 张右眼图像。经过筛选,选择 92 张训练样本图像,其中左眼图像为 17 张,右眼图像为 45 张,用来创建左右眼 XLD 椭圆轮廓匹配模板集合,再使用创建好的模板对待测图像进行匹配,记录反馈结果。图 4 所示为右眼的经过筛选的 45 张训练样本图像,这些图像的瞳孔周围干扰都很少,瞳孔比较完整,没有遮挡,提取瞳孔相关特征较为简单,得到的瞳孔边缘轮廓比较完整。图 5 所示为根据 45 张右眼训练样本图像中提取到的瞳孔边缘轮廓,创建的 45 个匹配模板的集合。由于 45 张样本图像瞳孔大小不同、边缘轮廓形状有差别,所以拟合出的椭圆轮廓各有差异,模板也就有一定的差异。

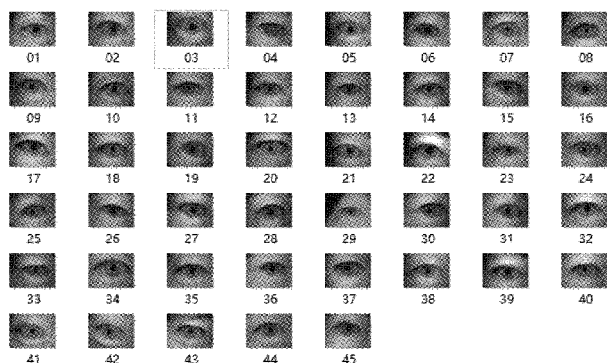


图 4 右眼的 45 张训练样本图像

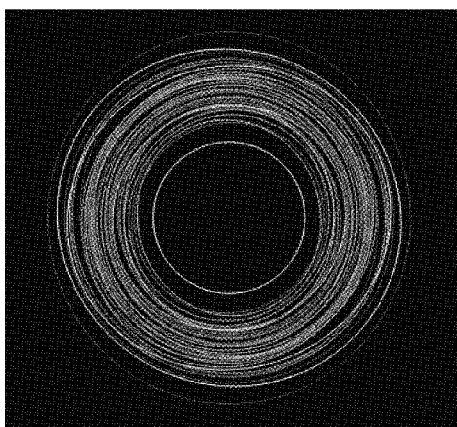


图 5 右眼 45 个匹配模板集合

2.1 匹配结果

图 6 所示为通过本文提出的基于 XLD 轮廓的多模板匹配算法,在 Halcon 联合 C# 平台上编程实现的人眼瞳孔正确定位的部分图像,各图中的椭圆曲线是匹配成功的边缘轮廓模板曲线。其中图 6(a)为瞳孔周围毫无干扰的人眼图像,图 6(b)为瞳孔被眼睑遮挡的人眼图像,图 6(c)为瞳孔被睫毛遮挡的人眼图像,图 6(d)为瞳孔边缘轮廓受光斑影响的人眼图像。从图像匹配结果可以看出,该算法针对瞳孔受眼睫毛、眼睑的遮挡,以及瞳孔边缘光斑影响等现象有较好的鲁棒性。

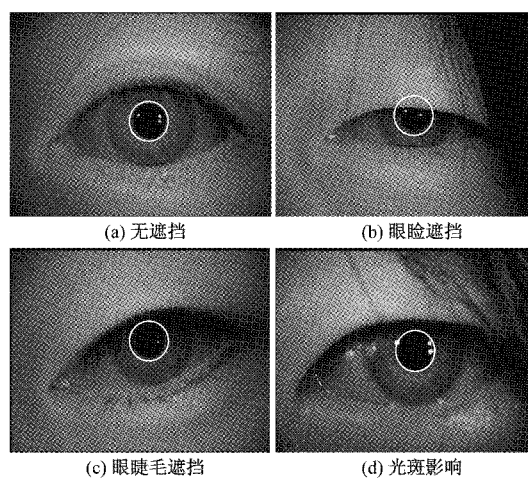


图 6 人眼瞳孔正确定位的部分图像

基于 XLD 轮廓的多模板匹配算法的人眼定位结果为,982 张左眼样本图中,误检数为 4 张,瞳孔定位准确率为 99.59%;987 张右眼样本图中,误检数为 5 张,瞳孔定位准确率为 99.49%,如表 1 所示。

表 1 检测人眼定位结果

名称	样本数	正确数	误检数	准确率/%
左眼	983	979	4	99.59
右眼	987	982	5	99.49

2.2 误检图像分析

图 7 所示为人眼瞳孔错误定位的部分图像,其中图 7(a)定位错误的原因是图像中出现了较为明显的由杂光形成的亮斑区域,在匹配时可能会将此区域边缘视为搜索对象而导致搜索错误。而图 7(b)中定位错误的原因是由于光照角度的问题使得瞳孔与上眼睑之间的区域光线过暗,对比不足,导致瞳孔和上眼皮局部灰度值过小,从而发生灰度粘连现象,使得模板在匹配搜索过程中不能准确的找到瞳孔边缘。图 8 所示为图 7(b)的 3D 灰度值图像,其中 X 轴和 Y 轴表示图 7(b)的横纵坐标,Z 轴表示图 7(b)中每个像素点的灰度值,从图中可以看出瞳孔上边缘与上眼睑灰度值最低,且发生了灰度粘连,从而导致模板匹配过程中可能会将两者视为同一区域而导致搜索错误。

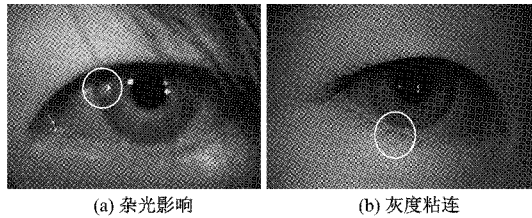


图 7 人眼瞳孔错误定位的部分图像

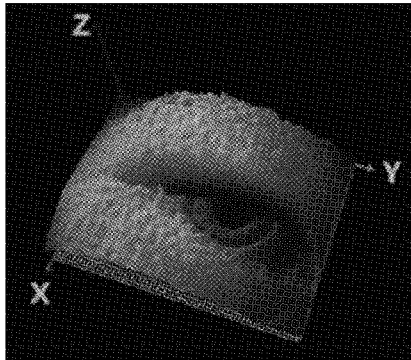


图 8 3D 灰度值图像

2.3 对误检图像的重新定位

针对误检的人眼图像,要对其重新定位,需要用到其它基于知识的方法,并且要避免因个体差异而需要人工调整参数的缺点。

考虑到误检图像都为光线过暗或过亮的情况,采用图 9 所示的程序流程,先是输入误检图像,对误检图像使用双边滤波进行平滑处理,然后使用阈值分割算子分割图像,再对分割后的区域使用圆膨胀腐蚀操作,接着提取此时区域特征,通过比较,选择了面积、圆度和最小外接矩阵长宽比作为提取瞳孔区域的特征参数,并设定参数范围。其中面积范围设定为 4 500~6 500;圆度的范围是 0~1 之间,形状越接近圆,圆度值越接近 1,所以设定圆度范围为 0.8~1;而最小外接矩阵的长宽比越接近 1,形状越接近圆,所以设定最小外接矩阵长宽比范围为 0.95~1.15。接下来再使用 Hough 变换,对提取到的瞳孔区域进行定位,得到瞳孔中心坐标。

2.4 定位精度结果

为检验本文算法对人眼瞳孔位置的定位精度是否满足需求,在虹膜库中随机选取 300 张人眼图像进行定位精度测量,并对比文献[9]和文献[10]的定位方法。本文实验所用 PC 机处理器为 Core i7-10700F。由表 2 的实验结果可以表明,本文算法对比文献[9]的方法,降低了最大误差,解决了该方法因个体瞳孔形状的差异而对定位精度的影响,从而导致稳定性不高的问题。对比文献[10]的方法定位速度较快,平均误差较高,且避免了该方法由于部分瞳孔图像灰度直方图分布与设定的模型差异较大,需要人工调整参数,鲁棒性不高的缺陷。满足了人眼瞳孔定位的要求,并实现了算法的高鲁棒性和泛化性。

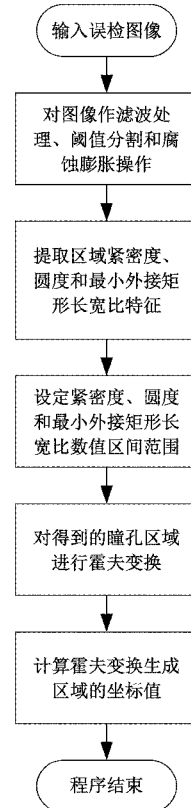


图 9 误检图像重新定位流程

表 2 瞳孔定位方法精度对比

算法	平均误差/ pixel	最大误差/ pixel	时间/ s
文献[9]方法	0.536	10.268	0.014
文献[10]方法	0.650	4.363	0.276
本文方法	0.644	4.780	0.121

3 结 论

针对非接触眼压计人眼瞳孔定位的需求,本文结合基于数据的方法和基于知识的方法两者的各自优势,提出了一种基于 XLD 轮廓的多模板匹配算法,即避免了基于知识的方法在瞳孔定位时因个体差异而需要人工调参的缺陷,又相较于基于数据的方法提高了瞳孔的定位精度。同时针对误检图像,使用双边滤波、阈值分割和腐蚀膨胀处理,再通过设定参数得到瞳孔区域,最后采用 Hough 变换实现误检图像的重新定位。实验结果表明,本文算法针对红外人眼图像的瞳孔定位精度、准确度,以及定位时间都满足非接触眼压计人眼瞳孔定位要求。由于非接触眼压计在定位人眼瞳孔过程中,其测量头是要做空间移动的,需要人眼瞳孔的空间 XYZ 三个轴的位置坐标,而不仅仅只是 XY 平面上的位置坐标,所以下一步的研究方向是在不增加非接触眼压计内部复杂性和满足安全性的基础上如何又快又准的得到瞳孔 Z 轴坐标。

参考文献

- [1] 魏滨,张从华,王尧君,等.非接触式眼压计测试技术研究[J].计量与测试技术,2019,46(8):49-53.
- [2] BANG S P, LEE C E, KIM Y C. Comparison of intraocular pressure as measured by three different non-contact tonometers and goldmann applanation tonometer for non-glaucomatous subjects [J]. BMC Ophthalmology,2017,17(1): 1-6.
- [3] 蔡怀宇,史玉,娄世良,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.
- [4] ZHANG X D, TANG Q S, JIN H, et al. Eye location based on adaboost and region features [J]. Applied Mechanics and Materials,2012,1548(287):731-736.
- [5] RUSEK K, GUZIK P. Two-stage neural network regression of eye location in face images [J]. Multimedia Tools and Applications, 2016, 75 (17): 10617-10630.
- [6] 王娟,刘嘉润,李瑞瑞.基于深度学习的红外相机视力检测算法[J].电子测量与仪器学报,2019,33(11):36-43.
- [7] YANG D L, BAI Q C, ZHANG Y L, et al. Eye location based on Hough transform and direct least square ellipse fitting [J]. Journal of Software, 2014, 9(2): 319-323.
- [8] 刘源.基于模板匹配算法的人眼定位方法[J].火力与指挥控制,2014,39(5):124-126.
- [9] 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.
- [10] 李擎,胡京尧,迟健男,等.视线追踪中一种新的由粗及精的瞳孔定位方法[J].工程科学学报,2019,41(11):1484-1492.
- [11] 梁雄,张舞杰,李听听.一种基于 Blob 分析的摄像头模组缺陷检测方法[J].电子设计工程,2015,23(15):19-22.
- [12] 岑誉,高健,曾友,等.面向 PCB 圆形基准点的权重式椭圆拟合定位方法[J].组合机床与自动化加工技术,2015(4):19-23,28.
- [13] 李超.基于 Zynq-7000 平台的边缘特征匹配算法研究与实现[D].江苏:南京邮电大学,2018.
- [14] 刘畅.基于匹配定位的口标尺寸测量算法[J].控制工程,2018,25(5):729-732.
- [15] 倪健,白瑞林,李英,等.采用轮廓向量特征的嵌入式图像匹配方法[J].计算机工程与应用,2014,50(13):168-172.

作者简介

宋保全,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:1336107295@qq.com

杜文华(通信作者),博士,教授,主要研究方向为机械视觉、图像处理技术等。

E-mail:281279276@qq.com

段能全,硕士,讲师,主要研究方向为装备设计。

E-mail:443050416@qq.com

李献,硕士研究生,主要研究方向为机器视觉。

E-mail:2497893884@qq.com