

一种依赖 3D 眼球模型的两级瞳孔定位算法

夏小宝, 李 斌

(中国科学技术大学电子科学与技术系, 安徽合肥 230027)

摘要:瞳孔定位作为头戴式视线跟踪系统的核心模块之一,影响着系统的精度和稳定性,但眼球在正常转动中会发生着眼睑遮挡瞳孔问题.针对该问题,提出了一种两级瞳孔定位算法.第一级采用改进的星射线法提取瞳孔边缘轮廓.接着根据 3D 眼球模型和瞳孔位置提前判断是否存在眼睑遮挡情况,如果不存在,则定位结束,否则进行第二级定位.第二级采用改进的椭圆模板匹配算法,不同于其他椭圆匹配算法,该算法利用 3D 眼球模型的参数提前获取椭圆的长短轴比例和旋转角度,将匹配的空间复杂度由 5 维降为 3 维,提高了匹配的效率.在眼睑遮挡情况下该算法精确检测出瞳孔,并且定位速度较快.

关键词:椭圆模板匹配;3D 眼球模型;瞳孔边缘;眼睑遮挡检测;椭圆拟合

中图分类号:TP391 **文献标识码:**A doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2014.02.011

引用格式: Xia Xiaobao, Li Bin. A two-level pupil location method relying on 3D eyeball model[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2014,44(2):153-159.

夏小宝,李斌.一种依赖 3D 眼球模型的两级瞳孔定位算法[J].中国科学技术大学学报,2014,44(2):153-159.

A two-level pupil location method relying on 3D eyeball model

XIA Xiaobao, LI Bin

(Department of Electronic Science and Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: As a key part of the head-mounted eye tracking system, pupil detection not only affects system accuracy, but also system stability. However, the problem of eyelid occlusions arises when eyeball moves. To solve this problem, a Two-Level pupil detection method was proposed. The first level utilizes the improved starburst method to extract pupil edge points and then check whether the pupil is shaded by eyelid. If it's not the case, pupil detection ends, otherwise the second level detection is conducted. In the second level detection, improved ellipse template matching method is applied. Unlike other ellipse matching methods, this method is based on a 3D eyeball model. With eyeball parameters, this method estimates ellipse minor-major axis rate and angle of rotation in advance, and then decreases the spatial complexity from five dimensions to three, thus improving matching efficiency. With our method, the pupil can be easily rapidly detected under eyelid occlusions.

Key words: match of ellipse template; 3D eyeball model; pupil edge; eyelid occlusions detection; ellipse fit

收稿日期:2013-03-12;修回日期:2013-05-25

基金项目:国家自然科学基金委-广东省联合基金重点项目(U0835002)资助.

作者简介:夏小宝,男,1988年生,硕士生.研究方向:图像处理、模式识别. E-mail:xxb1988@mail.ustc.edu.cn

通讯作者:李斌,博士/教授. E-mail:binli@ustc.edu.cn

0 引言

瞳孔定位是在光照条件下,通过图像处理的手段将瞳孔检测出来.根据光源性质,分为可见光和近红外光.可见光受光照条件影响比较大,检测难度大.近红外光源检测较容易,但硬件成本高.瞳孔定位的算法一直在发展,目前有许多算法被提出,如变形模板法^[1]、圆周差分算法^[2-3]、灰度积分投影算法^[4]、对称变换^[5]、星射线法^[6-8].Li 等^[6]提出了一种基于特征的瞳孔检测算法,在瞳孔内部选取一个起始点,由该点向外发散射线,射线在瞳孔的边缘会出现一个较大的梯度,利用这个特点,收集瞳孔边缘点,并用其拟合出椭圆.但是由于射线也经过眼睑,会将一些眼睑点误加进去,造成拟合不准确.霍夫变换^[9-10]被应用到瞳孔定位里,能够检测出部分被遮挡的瞳孔,尽管该算法精度比较高,但是瞳孔轮廓在一些情况下接近椭圆,它需要在 5 维空间中搜索投票,计算代价高,很难达到实时性.Takegami 等^[11]提出了一个基于眼球模型的瞳孔定位算法,该算法通过改进的 Hough 变换来定位出最佳椭圆,由于只在发生眼睑遮挡时才会表现出优异的性能,因此其他时候效率低于椭圆拟合.

针对眼睑遮挡检测中存在的低效问题,本文提出了一种两级的瞳孔定位算法.首先训练出眼球参数,然后用星射线法对瞳孔进行初步的椭圆拟合,接着用训练好的眼球参数判断初步拟合的瞳孔是否存在遮挡情况,来决定是否进行后面改进的椭圆匹配,从而在保证效率的同时,对眼睑遮挡情况进行精确瞳孔定位.

1 眼球参数训练

1.1 眼部参数估计原理及证明

在头戴式视线交互系统里,由于眼部摄像机和头部间相对位置不变,Takegami 等^[11]提出了一种估算眼球参数的方法,利用此方法,可以估算出瞳孔在某一位置的长短轴比例和旋转角度.由 Takegami 等的理论,椭圆旋转角度和长短轴比例如下:

$$\tan \alpha = \frac{y - y_c}{x - x_c} \quad (1)$$

$$\cos \beta = \frac{b}{a} = \frac{\sqrt{(r_c)^2 - (x - x_c)^2 - (y - y_c)^2}}{r_c} \quad (2)$$

式中, (x, y) 是瞳孔中心在图像中的位置坐标,对应

图 1 中 $P'; (x_c, y_c)$ 是眼部图像中的旋转中心,对应图 1 中 R . r_c 是眼球的虚半径.式(2)中的 a 和 b 对应着椭圆的长轴和短轴. α, β 如图 1 所示,分别是光轴与 x - y 平面的夹角和 z 轴的夹角.

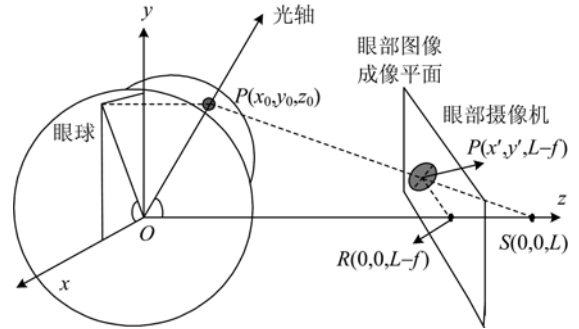


图 1 瞳孔成像原理

Fig. 1 Image-forming principle of pupil

为了证明式(1)和式(2),本文假设眼球是一个两个球体的组合,瞳孔是一个圆.图 1 中的点 P 是瞳孔的中心, P' 是瞳孔 P 在眼部摄像机中的成像点.根据几何关系,有

$$\tan \alpha = \frac{y_0}{x_0} \quad (3)$$

$$\cos \beta = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \quad (4)$$

因为瞳孔是个圆,并且在眼球上,因此可以用如下关系表示:

$$(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2 = r^2 \quad (5)$$

$$(x - x_0)x_0 + (y - y_0)y_0 + (z - z_0)z_0 = 0 \quad (6)$$

合并式(5),(6),

$$(z_0^2 + x_0^2)(x - x_0)^2 + (z_0^2 + y_0^2)(y - y_0)^2 + 2x_0y_0(x - x_0)(y - y_0) - z_0^2r^2 = 0 \quad (7)$$

式(7)是眼部图像中瞳孔成像的表示,并且是一个椭圆.椭圆长短轴比例为

$$\frac{b}{a} = \frac{z_0}{\sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}} \quad (8)$$

由透视关系, P' 和 P 的关系如下:

$$x' = \frac{fx_0}{z_0 - L}, \quad y' = \frac{fy_0}{z_0 - L} \quad (9)$$

所以,代入式(3),(4),(8),有

$$\tan \alpha = \frac{y'}{x'} \quad (10)$$

$$\cos \beta = \frac{b}{a} = \frac{\sqrt{(f * r_0 / L)^2 - x'^2 - y'^2}}{(f * r_0 / L)} \quad (11)$$

令 $x' = x - x_c, y' = y - y_c, r_c = f * r_0 / L$, 有

$$\tan \alpha = \frac{y - y_c}{x - x_c},$$

$$\cos \beta = \frac{b}{a} = \frac{\sqrt{(r_c)^2 - (x - x_c)^2 - (y - y_c)^2}}{r_c}.$$

证毕.

1.2 估计眼球参数

眼部图像由于受到环境条件和传感器自身质量问题影响,在获取和传输过程中容易被噪声污染.为了剔除噪声影响,需要对噪声进行针对性分析.由于眼部图像中的瞳孔区域的灰度分布是均匀的,因此可以用其分析噪声类型.如图 2 所示,在瞳孔区域截取一个小条带,并绘出直方图.

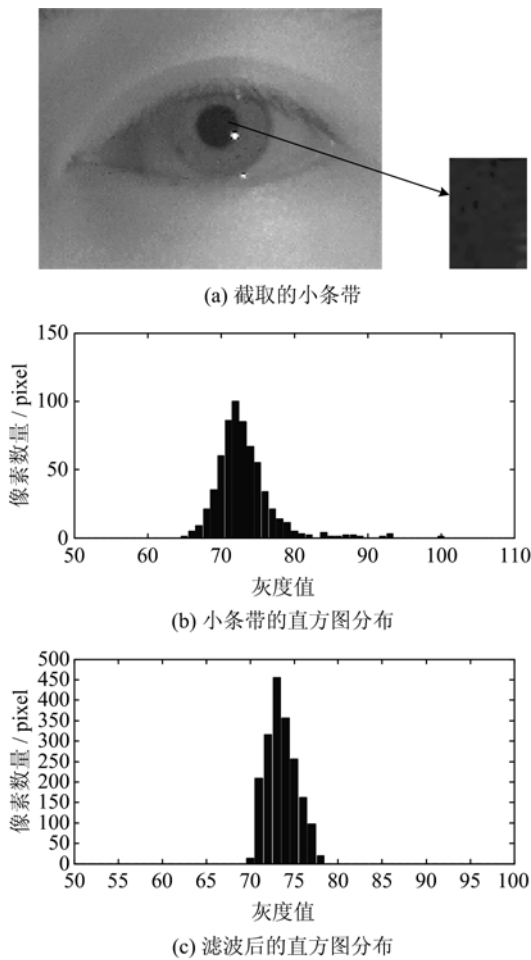


图 2 截取的瞳孔区域小条带分析
Fig. 2 Analysis of cropped pupil area

如图 2(b)所示,将该直方图分布和已有的噪声分布对比发现,该分布类似高斯分布和椒盐分布的叠加.因而可以认为眼部图像主要包含高斯噪声和椒盐噪声.由图 2(b)发现,高斯分布的横轴像素跨度大约从 65 至 85,设高斯核的标准差为 σ ,横轴跨度为 6σ ,标准差 σ 为 3.3 个像素.由于高斯窗口尺寸

为 $n \times n$,核标准差遵循如下规则:

$$\sigma = (n \times n / 2 - 1) \times 0.3 + 0.8 \quad (12)$$

由于高斯窗口尺寸一般取奇数,由式(12)可得高斯窗口最佳大小为 5×5 .针对噪声类型,后面的噪声滤波器采用高斯滤波器和中值滤波器.高斯滤波器窗口大小设为 5×5 ,中值滤波器窗口根据经验选择 7×7 .图 2(c)是经过高斯滤波和中值滤波后的小条带直方图分布,滤波后,椒盐噪声消失了,而且直方图的灰度跨度从 70 至 78,跨度仅为 8,相比以前的跨度 20 减小很多,说明高斯噪声也消减较多,间接证明本文所选滤波器比较有效.

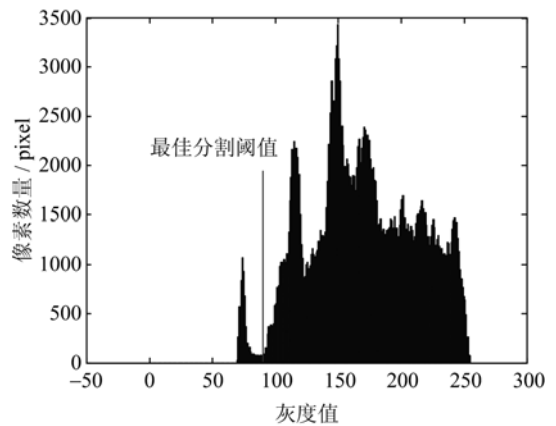


图 3 眼部图像直方图
Fig. 3 Histogram of eye image

为了估算眼球参数 (x_c, y_c, r_c) ,本文采集了一组眼部图像,并对这些图像用改进的星射线法进行瞳孔检测.算法如下:

① 使用 7×7 的中值滤波器和 5×5 的高斯滤波器来先后去除图像噪声.

② 本文采用直方图分割法^[12]和经验阈值法组合方法确定最终的分割阈值.如图 3 所示,根据文献^[12],由于瞳孔的灰度值是最低的,反映在直方图上的最佳阈值是邻接在第一个波峰后面的波谷对应的灰度值.但实际应用中,由于直方图中一些毛刺的影响,导致搜索到的阈值不一定和最佳阈值吻合,所以在阈值选择过程中,确定一个阈值波动范围 range,若搜索到的阈值和经验阈值的差小于 range,则选择搜索的阈值,若大于 range,则选用经验阈值.

③ 使用分割阈值找到瞳孔区域.

④ 以瞳孔中心为起始点,从起始点向四周发散 180 条射线,但是考虑到眼睑和睫毛的影响,射线的角度区域限制在 $[-60^\circ, 60^\circ]$ 和 $[120^\circ, 240^\circ]$ 内.

⑤ 对每条射线经过的像素,搜索出具有最大梯度值的像素作为瞳孔边缘点.

⑥ 对瞳孔边缘点拟合出最佳的椭圆,保存椭圆的信息,包括长短轴比例、椭圆中心、旋转角度.然后使用下列最小二乘法公式计算眼球参数

$$[x_c, y_c] = \operatorname{argmin} \left(\sum_{i=1}^N (x_i \tan \alpha_i - y_c - x_i \tan \alpha_i + y_i)^2 \right) \quad (13)$$

$$[r_c] = \operatorname{argmin} \left[\sum_{i=1}^N \left[r_c^2 \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) - (x_i - x_c)^2 - (y_i - y_c)^2 \right]^2 \right] \quad (14)$$

2 瞳孔检测

如果瞳孔未发生眼睑和睫毛的遮挡,用节 1.2 中的检测算法即可准确拟合出椭圆;然而在遮挡问题下,用星射线拟合的椭圆不准确,需要提前对遮挡情况进行判断.若发生了因遮挡而导致的定位不准确时,本文增加了第二级瞳孔检测.第二级瞳孔检测采用改进的椭圆匹配算法.传统的椭圆匹配变量是椭圆 5 要素:中心坐标 (x, y) ,长短轴比例 ratio,短轴长度 l ,旋转角度 θ .假设搜索空间分别为 $d_x, d_y, d_{\text{ratio}}, d_l, d_\theta$,时间复杂度为 $O(d_x d_y d_{\text{ratio}} d_l d_\theta)$.根据式(1)和(2),本文根据中心坐标 (x, y) 提前估算出长短轴比例 ratio 和旋转角度 θ ,将搜索的空间维数从 5 维缩减为 d_x, d_y, d_l 的 3 维空间,时间复杂度缩减至 $O(d_x d_y d_l)$,明显小于传统椭圆匹配的复杂度 $O(d_x d_y d_{\text{ratio}} d_l d_\theta)$.一般 d_{ratio} 范围为 $1 \sim 2$, d_θ 范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$,因而有下列关系:

$$O(d_x d_y d_{\text{ratio}} d_l d_\theta) = 180 * O(d_x d_y d_l) \quad (15)$$

由式(15),可以发现改进后的模板匹配算法时间复杂度为传统椭圆匹配算法的 $1/180$.

本文定位算法主要的流程如图 4 所示.由图 4,定位算法如下:

- ① 对瞳孔用星射线进行粗定位,定位出的信息包括椭圆中心、长短轴比例 ratio、旋转角度 θ .
- ② 利用式(1)和(2),计算出当前瞳孔的长短轴比例 b/a 、旋转角度 α .
- ③ 比较理论计算出的长短轴比例偏差和旋转角度偏差,若两个偏差分别小于阈值 ξ_2 和 ξ_1 ,则直接获得最终的瞳孔中心.否则进行步骤④.
- ④ 根据步骤②中的长短轴比例和旋转角度,用椭圆匹配法匹配出最佳的椭圆,从而得到最终的瞳

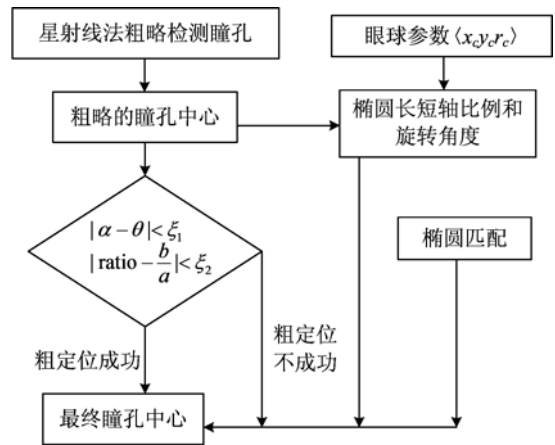


图 4 瞳孔检测流程图

Fig. 4 Flow chart of pupil detection

孔中心信息.

本文中椭圆匹配过程是利用椭圆对瞳孔边缘点进行最佳的匹配,如图 5 所示.匹配出的椭圆方程为

$$g_i = \operatorname{argmin} \xi_j, \xi_j = \sum_{i=1}^M |g_j(x_i, y_i)| \quad (16)$$

式中, $g(x, y) = 0$ 为椭圆方程; M 是边缘点的数目.当匹配到最佳椭圆时,式(16)中的 ξ 值会最小.为了尽快得到最佳椭圆,本文采用了一种迭代搜索方法,在匹配到最佳椭圆时算法收敛.具体流程如下:

- ① 以粗定位的瞳孔中心为起始点,并选择一个合适的步长.以此起始点确定 4 个邻域点.
- ② 对每一个像素点,在通过式(1), (2)事先知道椭圆长短轴比例和椭圆旋转角度的前提下,利用式(16)确定每个点的最小的残差 ξ .
- ③ 比较这 5 个点的残差,如果起始点的残差最小,则进行步骤④;否则将邻域点选为起始点,并重复步骤①, ②, ③.
- ④ 步长除以 2,继续步骤①, ②, ③,直到步长变成一个像素.这样得到匹配到最佳的椭圆.

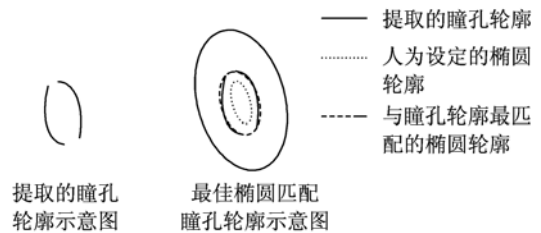


图 5 椭圆匹配示意

Fig. 5 Illustration of ellipse fitting

3 实验结果及分析

本文采集的图片像素大小为 640×480 ; 计算机的配置如下: Pentium Dual-core 的 CPU, 主频 2.7 GHz, 内存大小为 1.99 GB; 使用图像处理库 OpenCV2.1. 为了和其他定位算法比较, 本文算法与椭圆拟合算法、Hough 圆检测算法进行了对比. 图 6 是算法的每一步的结果, 我们的两级瞳孔检测算法在图 6 得到证明. 图 6(a) 是瞳孔的二值化, 由于首先采用固定阈值分割(这里选择的阈值是 90), 导致分割的边缘不完整. 图 6(b) 是在图 6(a) 的基础上进行的自适应阈值分割, 自适应分割找到了最佳的分割阈值, 并且和固定阈值之差在可接受范围内, 这里波动范围设为 15. 图 6(c) 是利用改进的星射线法提取的瞳孔边缘, 由于眼睑遮挡, 导致提取的候选边缘点包含了一部分眼睑边缘. 图 6(d) 是对提取的瞳孔边缘进行椭圆拟合, 由于眼睑遮挡, 第 3 幅图片

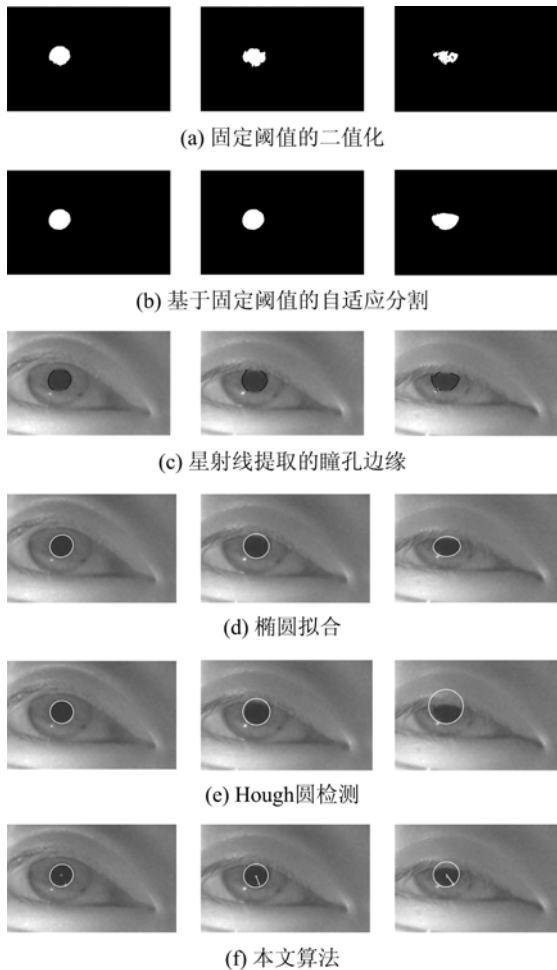


图 6 瞳孔检测效果对比

Fig. 6 Comparison of pupil detection

未能正确拟合出瞳孔边缘. 图 6(e) 是 Hough 圆检测的结果, 第 3 幅图片也是因为眼睑对 Hough 圆的贡献导致未能准确拟合到瞳孔边缘. 图 6(f) 是两级检测算法的检测结果. 结果显示, 在不发生眼睑遮挡或眼睑遮挡轻微的情况下, 3 种算法定位结果相差不大; 但在眼睑遮挡严重时, 其他两种算法未能精确定位出瞳孔, 本文的两级定位算法对眼睑遮挡比较有效. 表 1 是图 6 中 3 幅瞳孔图片应用 3 种算法得到的瞳孔中心的定位结果, 第 1, 2 幅图片的瞳孔中心相差不大, 第三幅由于眼睑遮挡严重导致定位的瞳孔中心差别较大.

表 1 不同算法瞳孔中心定位结果的对比

Tab. 1 Comparison of pupil center with different method

对应的 图像序列	1		2		3	
	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标	X 坐标	Y 坐标
椭圆拟合算法	196	189	200	190	187	192
Hough 圆检测算法	197	189	198	187	184	168
本文算法	196	189	199	190	187	187

为了验证本文提出的算法具有普适性, 分别对两位实验者的瞳孔进行了定位, 如图 7 所示. 左半部分为第一位使用者, 右半部分为第二位使用者. 第一位使用者用于训练的图片数量为 1 929, 定位成功率为 90.7%, 训练出的眼球参数 $\langle x_c, y_c, r_c \rangle$ 为 $\langle 214.03, 224.58, 340.24 \rangle$, 平均每幅图片耗时 0.081 s. 第二位使用者用于训练的图片数量为 1 789, 训练出的眼球参数为 $\langle 278.27, 183.10, 223.51 \rangle$, 定位成功率为 93.3%, 平均每幅图片耗时 0.088 s. 采集的测试集中包含了各种眼睑遮挡瞳孔的情况, 如图 7 所示. 在瞳孔发生遮挡的情况下, 椭圆拟合未能对遮挡的瞳孔进行准确的定位, 这是因为椭圆定位受提取的候选边缘点影响大, 在有睫毛、阴影区域的情况下, 检测的鲁棒性较差. Hough 圆检测算法在对眼睛遮挡情况严重时, 由于周围的眼睑对瞳孔定位有干扰, 导致不能精确定位. 特别是在瞳孔偏离正中位置时, 瞳孔的形状呈椭圆形, Hough 圆检测在此情况下失效. 本文算法首先提取瞳孔边缘, 再对边缘进行椭圆匹配, 有效地逐级定位到最佳椭圆. 图 7 中第 3 行的白色线段连接眼球参数和瞳孔定位中心, 由于改进的模板匹配中忽略掉椭圆上半部分和下半部分各 60° 的候选边缘点, 从而减小了眼睑边缘对模板匹配的影响. 由定位结果可知, 本文算法在两位实验者的瞳孔数据上表现良好.

图 8 是眼球参数 $\langle x_c, y_c, r_c \rangle$ 的训练结果, 在训

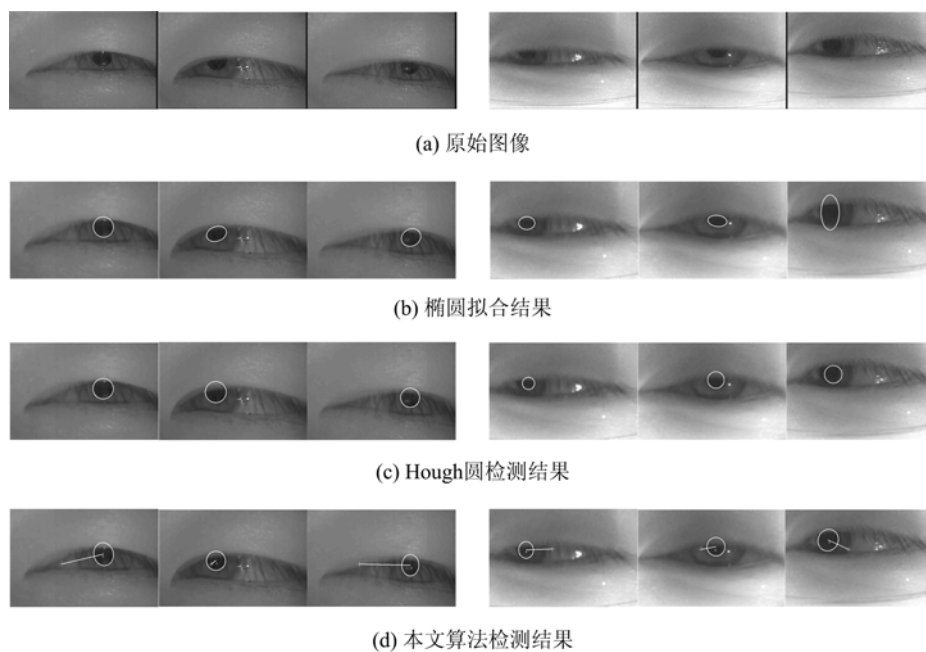
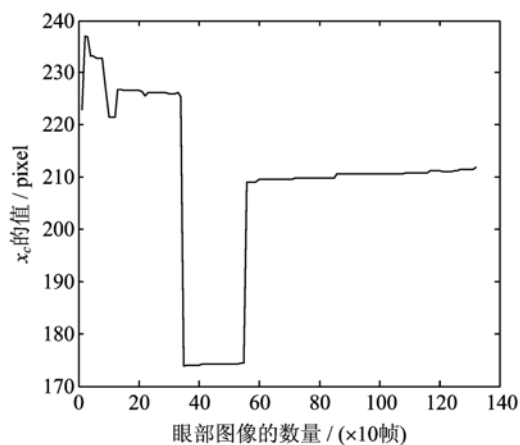
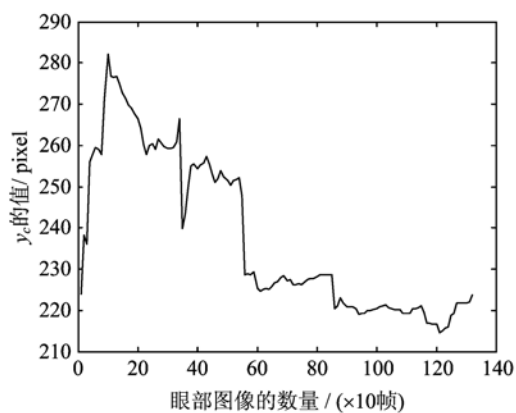


图 7 两位实验者的瞳孔定位结果对比

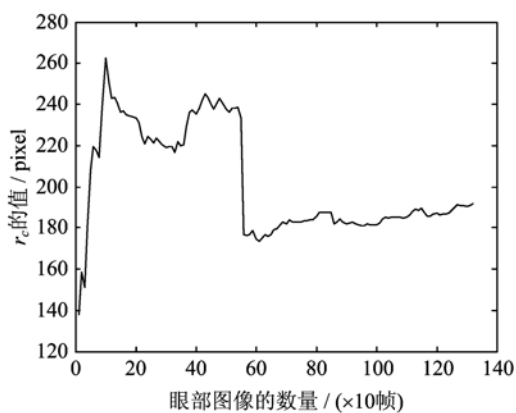
Fig. 7 Comparison of pupil detection of two users



(a) 参数 x_c 随着样本数量的变化



(b) 参数 y_c 随着样本数量的变化



(c) 参数 r_c 随着样本数量的变化

图 8 眼球参数训练结果

Fig. 8 Training results of eyeball parameters

训练样本小于 600 帧时,训练出的参数都未稳定下来,随着训练样本个数的增加,眼球参数 $\langle x_c, y_c, r_c \rangle$ 趋于稳定. 至大约 1 000 帧训练样本时,眼球参数收敛. 在训练眼球参数 $\langle x_c, y_c, r_c \rangle$ 时,首先保证训练样本的数量充足,并且保证样本集中瞳孔在眼部图像中的位置呈均匀分布,以免训练出的眼球参数适用性变差.

表 2 算法性能的对比

Tab. 2 Comparison with other methods

算法	定位成功率/%	迭代次数	平均定位时间/s
椭圆拟合	92.55	—	0.043
Hough 圆检测	89.91	—	0.053
本文算法	93.3	6	0.088

表 2 给出了本文算法与其他算法性能的对比. 表 2 中的数据是在同一组测试集上进行的,这组测试图片共有 1 894 幅. 在定位成功率上,本文算法和椭圆拟合差不多,较 Hough 圆检测占优. 平均定位时间上,本文比前两种算法都要长,这主要是两级算法叠加造成的,但 0.088 s 的处理周期还是能满足一般要求. 在另一组测试集中共有 1 327 幅图片,这些图片中需要第二级椭圆匹配的图片为 118 幅,所占比例约为 8.89%,说明大多数情况下只需要第一级定位算法,并且第二级椭圆匹配的平均迭代次数为 6 次.

4 结论

一种依赖眼球模型的两级瞳孔检测算法被提出,通过使用眼球参数,将椭圆匹配的空间复杂度由 5 维降低到 3 维,提高了定位的速度. 第一级采用改进的星射线法进行瞳孔的粗定位,之后增加了一个检测粗定位结果是否准确的模块,根据这个模块决定是否采用第二级椭圆匹配进行精定位. 实验结果显示,与传统检测算法相比,本文的算法在眼睑遮挡情况下表现良好,并且每幅图像的处理速度较快.

参考文献(References)

- [1] Perez C A, Aravena C M, Vallejos J I, et al. Face and iris localization using templates designed by particle swarm optimization[J]. Pattern Recognition Letters, 2010, 31(9): 857-868.
- [2] Peng Jian, Xiang Jun. Fast iris localization algorithm based on morphology[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(4): 193-196.
彭建, 向军. 一种基于形态学的虹膜定位快速算法[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(4): 193-196.
- [3] Daugman J. How iris recognition works[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2004, 14(1): 21-30.
- [4] Geng Xin, Zhou Zhihua, Chen Shifu. Eye location based on hybrid projection function[J]. Journal of Software, 2003, 14(8): 1 394-1 400.
耿新, 周志华, 陈世福. 基于混合投影函数的眼睛定位[J]. 软件学报, 2003, 14(8): 1 394-1 400.
- [5] Zhang Yongzhong, Liu Fu, Kong Lingming, et al. Pupil precise localization method based on symmetry transform[J]. Journal of Jilin University(Information Science Edition), 2009, 27(3): 268-272.
张勇忠, 刘富, 孙令明, 等. 基于对称变换的瞳孔定位方法[J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2009, 27(3): 268-272.
- [6] Li D H, Winfield D, Parkhurst D J. Starburst: A hybrid algorithm for video-based eye tracking combining feature-based and model-based approaches [C]// IEEE Computer society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, USA: IEEE Press, 2005: 79.
- [7] Ryan W J, Woodard D L, Duchowski A T, et al. Adapting starburst for elliptical iris segmentation[C]// International Conference on Biometrics: Theory, Applications and Systems. Washington, USA: IEEE Press, 2008: 54-60.
- [8] Wang Juning, Liu Tao, He Di, et al. Pupil center localization algorithm used for the IR head-mounted eye tracker[J]. Journal of Xidian University, 2011, 38(3): 7-12.
王军宁, 刘涛, 何迪, 等. 红外头盔式眼动仪的瞳孔中心定位算法[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2011, 38(3): 7-12.
- [9] Liu X M, Bowyer K W, Flynn P J. Experiments with an improved iris segmentation algorithm[C]// Proceedings of the 4th IEEE Workshop on Automatic Identification Advanced Technologies. IEEE Press, 2005: 118-123.
- [10] Hao Minggang, Dong Xiucheng, Huang Yaqin. Precise human eye pupil localization algorithm[J]. Computer Engineering, 2012, 38(8): 141-143.
郝明刚, 董秀成, 黄亚勤. 一种精确的人眼瞳孔定位算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(8): 141-143.
- [11] Takegami T, Gotoh T, Ohyama G. An algorithm for Model-based stable pupil detection for eye tracking system[J]. Systems and Computers in Japan, 2004, 35(13): 21-31.
- [12] Yao Peng, Ye Xueyi, Zhuang Zhenquan, et al. A new algorithm on iris image localization based on circular integrodifferential operators[J]. Journal of Circuits and Systems, 2008, 13(1): 88-92.
姚鹏, 叶学义, 庄镇泉, 等. 一种基于圆周差分法的新颖虹膜定位算法[J]. 电路与系统学报, 2008, 13(1): 88-92.