

基于肤色特征和遗传算法的人眼瞳孔定位算法*

郝明刚, 董秀成

(西华大学 四川省信号与信息处理重点实验室, 成都 610039)

摘要: 提出了一种单目摄像头下定位人眼瞳孔的方法,分为人脸区域检测、人眼区域检测、瞳孔中心定位三个阶段。在人脸区域检测阶段,利用人脸的肤色和唇色在不同色度空间下的特性,结合区域增长的方法分割出人脸区域;在人眼区域检测阶段,利用定位出的人脸区域,根据先验知识缩小搜索区域,再结合遗传算法搜索眼部区域;最后利用圆的几何性质定位瞳孔中心。实验结果证明了本算法在复杂背景和头部偏转情况下的有效性。

关键词: 人脸区域; 色度空间; 区域增长; 眼部区域; 遗传算法; 定位瞳孔

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)07-2754-04

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.097

Location algorithm for eye pupil based on skin color features and genetic algorithm

HAO Ming-gang, DONG Xiu-cheng

(Provincial Key Laboratory on Signal & Information Processing, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: This paper presented a location method for the human eye pupil with single camera, which was divided into three stages, face region detection, eye region detection and pupil center location. In the face region detection stage, combining the method of regional growth, it separated the face region by the space character of face's skin color and lip color under different chromaticity. In the eye region detection stage, using the face region positioned, according to prior knowledge, it narrowed the search area, and then searched the eye area with the genetic algorithm. Finally, it positioned pupil center by the geometrical properties of round. Simulation results indicate this algorithm is effective in complex background and circumstances of head deflection.

Key words: face region; chromaticity space; regional growth; eye area; genetic algorithm(GA); positioning pupil

0 引言

人脸识别技术作为计算机视觉和模式识别领域一个重要的研究课题,近年来一直是一个非常活跃的研究方向,人脸识别中一个最重要的过程就是特征的提取与检测。人眼作为人脸特征的重要组成部分,是包含人脸部特征信息最多的器官,因此,人眼的检测与定位显得尤为重要^[1,2]。而对于人脸识别中的特征提取来说,不仅要检测出人眼,而且要准确地定位出人眼。人眼的检测与精确定位对于自动人脸检测和识别起着重要的作用,一个快速、精确和有效的人眼定位算法是非常重要的。

本文采用由粗到细的人眼瞳孔定位方法,首先利用 YIQ 和 YUV 色度空间下人脸区域的色度特性分割出人脸区域,再利用人眼瞳孔的灰度特点,结合遗传算法搜索最优解定位人眼区域,最后对眼部区域的图像进行处理以定位瞳孔中心。通过现场的测试结果表明,本文算法具有优越的检测性能。

1 图像的预处理

自然条件下,由图像传感器采集到的图像由于电荷耦合器

件及其环境因素的影响等,使得采集到的图像含有噪声而失真,因此需要将输入图像进行简单的预处理。本文算法涉及到的图像预处理包括图像的平滑和光照补偿处理。

1.1 图像的平滑

本文应用的平滑滤波算法采用 5×5 的高斯模板 S 与原图像进行加权邻域平均以消除系统的噪声。设在原图像中以任意一点 (m, n) 为中心,取出一个 5×5 的邻域,输入图像在该点的像素值为 $f(m, n)$,经过高斯平滑滤波后的图像在该点的像素值为 $F(m, n)$,图像的加权邻域平均可以用式(1)表示。

$$F(m, n) = \frac{1}{5 \times 5} \sum_{i=-2}^2 \sum_{j=-2}^2 f(m+i, n+j) \times S(2+i, 2+j) \quad (1)$$

1.2 光照补偿

待检测图像过亮、过暗和阴影都会造成整个系统的识别率和检测率下降。为了消除面部光照对整个系统的影响,需要对经过高斯平滑滤波处理后的图像再次进行图像的光照补偿处理,本文选用“参考白”的方法^[3]对输入图像进行光照补偿处理。该方法的主要步骤如下:

a) 将输入图像首先变换为 YCbCr 颜色空间。

b) 设灰度值为 $G(x, y)$ 、灰度级为 256、总像素为 N , 令 B 、

收稿日期: 2011-11-27; **修回日期:** 2011-12-29 **基金项目:** 四川省信号与信息处理重点实验室基金资助项目(SGXZD0101-10-1);西华大学研究生创新基金资助项目(YCJJ201169)

作者简介: 郝明刚(1984-),男,甘肃庆阳人,硕士,主要研究方向为数字图像处理、模式识别(haominggang0708@126.com);董秀成(1963-),男,教授,硕士,主要研究方向为基于视觉的智能控制与智能信息处理、复杂非线性控制系统建模与控制、工业自动化技术及系统、虚拟现实技术及应用。

W 分别为参考黑与参考白的分界点,第 k 级灰度含有的点数为 β_k ,其中 $\sum_{i=0}^B \alpha_k = N \times 5\%$, $\sum_{i=W}^{255} \beta_k = N \times 5\%$,非线性变换函数的定义如式(2)所示。

$$F(x,y) = \begin{cases} \frac{255(\ln G(x,y) - \ln B)}{\ln W - \ln B} & B \leq G(x,y) \leq W \\ 0 & G(x,y) < B \\ 255 & G(x,y) > W \end{cases} \quad (2)$$

c)按照非线性变换公式对各帧图像进行处理,最后将 YCbCr 颜色空间还原为 RGB 颜色空间。利用上述光照补偿方法得到的图像和原图像的效果比较如图 1 所示。



图1 光照补偿处理后的图像效果

2 基于彩色信息的人脸区域分割算法

图像的彩色信息作为一种有效特征,在图像分割技术中通常得到较为广泛的应用。在 HSV 表色系模型中,色调和饱和度通常称为图像的色度,在不同的光照条件下,物体的亮度虽然会有很大的变化,但是物体的色度在该表色系下却是恒定的^[4]。人脸的肤色在颜色空间中都对对应着一定的肤色分布区域,因此可以利用人脸的肤色特征进行肤色分割。本文是在 YIQ 和 YUV 表色系中进行人脸肤色的特性分析。

将颜色空间从 RGB 颜色空间转换到 YIQ 颜色空间,可以把彩色图像中的亮度通道分量与色度通道分量分开,人脸的肤色在色度 I 通道分量上表现出较好的聚集紧凑性^[5]。在 YIQ 色彩空间中,色度 I 的取值范围为 $[-152, 152]$ 。选取 80 张不同肤色的人脸图像样本,包括实验室利用 500 万像素的摄像头拍摄的 50 张图像和网络上下下载的 30 张图像,将这些人脸样本图像的分辨率首先缩放至 120×80 像素的图像,再处理为只包含人脸肤色的图像作为皮肤样本集,大概 70 万个肤色像素点。在 YIQ 颜色空间中,利用 MATLAB 对这些包含人脸肤色像素点的图像的 I 通道分量的数据分析统计可得,肤色信息主要分布在 $40 \sim 100$ 之间。图 2 为人脸肤色像素点在 YIQ 色度空间下的 I 通道分量的分布图,从图中可以看出, I 通道分量大致分布在 $40 \sim 100$ 这个范围之间。

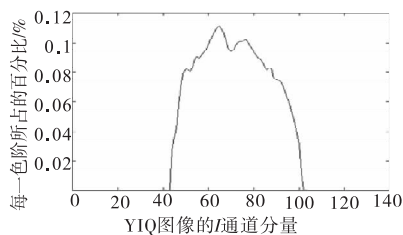


图2 人脸图像 I 通道分量的肤色分布

人脸的嘴唇部位的颜色与人脸的颜色有很大的差别,人的嘴唇的色度在 YIQ 色度空间下分布在一定的范围之内。选取 50 张不同肤色的包含人的嘴唇的图像样本,包括实验室利用 500 万像素的摄像头拍摄的 35 张图像和网络上下下载的 15 张图像,将这些图像样本缩放至 38×24 像素的只包含嘴唇部位的图像样本,大概 4 万多个唇色像素点。在 YIQ 颜色空间下,

利用 MATLAB 对这些像素点的各通道分量的数据进行分析 and 统计发现,各通道分量的最佳分割阈值分别是 $Y \in [90, 210]$, $I \in [20, 80]$, $Q \in [10, 28]$,以 YIQ 色度空间中的肤色的 I 通道分量和唇色信息的各通道分量的分布范围作为脸部区域分割算法的一个判据。

在 YUV 色度空间上,亮度信号 (Y) 和色度信号 (U, V) 是相互独立的,也就是说, Y 信号构成的灰度图像与 U, V 信号构成的另外两幅单色图是相互独立的。色度信号 U 和 V 之和是一个二维矢量,称之为色度信号矢量,每一个色度信号矢量都对应着一种颜色。饱和度由模值 Ch 决定,色调由其相位角 θ 表示^[6,7],如式(3)所示。

$$Ch = (|U|^2 + |V|^2)^{1/2}, \theta = \arctan(V/U) \quad (3)$$

利用上述提取的包含人脸肤色区域图像的 80 张样本图像中的 70 多万个肤色像素点,在 YUV 色度空间下利用 MATLAB 对人脸肤色像素点的 θ 值的数据分析可得,人脸肤色的色调分布的相位角 θ 分布在 $110 \sim 155$ 之间。再利用上述提取的 50 张不同肤色的包含人的嘴唇的图像样本的 4 万多个唇色像素点,在 YUV 色度空间下利用 MATLAB 进行分析统计发现,唇色分布的相位角 θ 在 $80 \sim 100$ 之间,以 YUV 空间中的肤色和唇色的相位角 θ 的分布范围作为脸部区域分割算法的另外一个判据,结合 YIQ 色度空间中的脸部区域分割阈值用于人脸检测。人脸区域检测算法步骤如下:

a)将摄像头采集到的经过预处理后的各帧图像缩放至 320×240 像素的待检测图像,预处理后的图像分别转换为 YIQ 和 YUV 色度空间,在 YIQ 色度空间下分别计算各个像素点的亮度 Y 、色度 I 和 Q 的色度值,取肤色的色度 $I_1 \in [40, 100]$ 与唇色的色度 $I_2 \in [20, 80]$ 的交集 $I_1 \cap I_2 = [40, 80]$ 作为 I 分量的分割阈值, Q 分量的分割阈值取 $[10, 28]$,亮度 Y 分量的分割阈值取 $[90, 210]$ 。在 YUV 色度空间下,分别计算原图像中每个像素点的色调分布的相位角大小 θ ,肤色色调分布相位角的分割阈值取为 $[110, 155]$,唇色色调分布相位角的分割阈值取为 $[80, 100]$ 。

b)利用步骤 a)中肤色分割阈值对输入图像序列中的像素点分别进行最优阈值判断,将满足上述阈值范围内的像素点确定为肤色点或者唇色点,分离出图像中的人脸肤色区域,得到粗略包含人脸候选区域(灰度值是 255)和背景(灰度值是 0)的二值分割图。

c)由于粗略包含人脸候选区域的图像通常存在孤立的小块,因此利用形态学的闭运算和开运算分别进行处理,除去孤立的小块使人脸候选区域成为连通区域,同时利用区域增长^[8]的方法进行人脸区域矫正,具体为:将步骤 b)中扫描到的满足步骤 a)中的分割阈值的前五个单连通区域像素点作为种子区域,计算这些种子区域的像素点的灰度值,以此种子区域点的灰度值的大小开始向外填充,如果相邻的点具有和种子区域灰度值相同的点,则认为这个点也是本区域的点,并以这个新得到的点作为新的种子点继续向四周填充,直到种子周围所有满足该灰度值的点被遍历过为止,对于不满足该灰度值的点,则认为该种子点已扩展到边缘。

d)将矫正后的人脸区域用矩形框进行标记。图 3 是基于肤色特征的人脸区域分割算法的结果,白色矩形框表示人脸候选区域。

e)根据先验知识,步骤 d)中肤色分割之后的标记的矩形

框的最下边部位的肤色区域通常情况下含有人体的脖子,而矩形框最上边部分则为人脸部区域的上边缘,因此保持矩形框最上边缘部位矩形框位置不变,缩小矩形框下边缘位置,其宽度不变,高度缩放至与宽度相等。

f) 输出人脸部区域的检测结果。

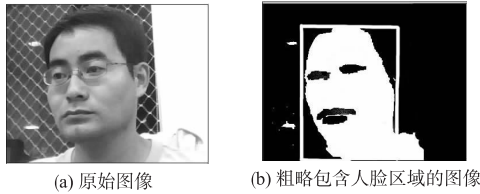


图3 基于肤色特征的人脸区域分割结果

选取 80 个被测试对象,在 Camshift 算法^[9]、基于 YCbCr 的肤色分割算法^[10]和本文算法下对人脸检测的结果进行比较。图 4 为本文算法下随机抽取检测的人脸(检测结果限于篇幅,选取部分图像展示)。表 1 为 Camshift 算法、基于 YCbCr 的肤色分割算法和本文算法下三种算法进行的人脸检测结果的比较。

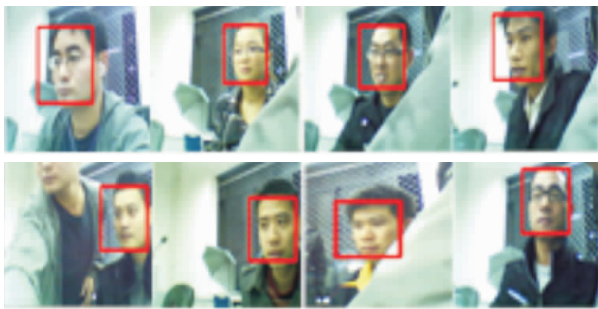


图4 本文算法实现的人脸检测结果

表1 三种人脸检测算法的结果比较

检测方法	误检数/个	正确率/%
Camshift 算法	8	90
基于 YCbCr 的肤色分割算法	12	85
本文的肤色分割算法	5	93.75

与 Camshift 算法、基于 YCbCr 色度空间的肤色分割算法相比,本文的人脸检测算法有效地提高了检测的精确性,将嘴唇的色调分布信息用来构建人脸检测判据,提高了人脸区域检测的鲁棒性。

3 人眼检测

3.1 利用遗传算法搜索人眼所在的面部区域

遗传算法^[11]利用简单的编码技术和繁殖机制提供了一种有效的随机搜索和优化方法。由于不同人的眼睛个体之间的差异性,单纯利用匹配度函数很难满足不同人眼区域搜索的需求;同时,在人头偏转情况下利用匹配度函数搜索人眼区域,难以达到系统的要求。本文采用 GA 搜索人眼区域,在划定的包含人眼区域的人脸子区域图像中,利用遗传算法寻找匹配度函数最优解的思想搜索人眼区域,脸部图像子区域中的眼部区域就被精确地划定出来了。

人眼在人脸的面部器官中与嘴、鼻等其他器官相比具有丰富的特征信息,眼睛在人脸的上半部分区域中在一个确定的椭圆之内,为了更快速、精确地搜索出人眼区域,将之前标记的脸部区域矩形框从中间部分划分为三个子区域,如图 5 所示。其中 $W_1 = W_2$, $H_1 = H_2$, 在子区域 R_a 中包含了人眼的左眼特征信

息,右眼的特征信息出现在子区域 R_b 中。

对粗略检测到的人脸图像包含左眼特征信息的 R_a 区域,根据彩色图像和灰度图像的转换关系将其变换为灰度图像,将变换后的图像利用 Sobel 边缘提取算法进行边缘提取处理,以进一步排除一般不含检测目标的区域。为了确保遗传算法的匹配度函数获得最优解,减小误差,利用最大类间方差阈值分割法,将边缘提取后的图像变为二值图像,为下一步遗传算法搜索人眼区域做好准备工作。图 6 为经过上述处理后包含人眼的 R_a 区域的二值图像,利用遗传算法就是要搜索出图中的包含人眼的白色小区域。



图5 脸部区域划分的三个子区域 图6 包含左眼区域的二值图像

在人眼部区域搜索阶段,定义一个与人眼大小类似、灰度值为 255 的人眼模板,当人眼模板像素最优匹配人眼区域的像素特征时,GA 被用来搜索全局最优解。本文选用最常用的二进制编码,其中像素点的坐标 i 和 j 的位置分别用 8 bit 二进制字符串表示,GA 将这两个参数编码作为种群的个体,这样每条染色体就是一个 16 bit 的二进制字符串,其中 i 和 j 代表了图像中任意一点的横坐标和纵坐标。

在子区域 R_a 中利用 GA 搜索人眼区域,根据人眼瞳孔的像素信息,寻求人眼瞳孔的匹配度函数的最优解,寻求的最优解对应的区域即为人眼的候选区域。定义模板图像和目标图像的像素之差为 D_{ij} ,如式(4)所示:

$$D_{ij} = |p_{ij}^* - p_{ij}| \quad (4)$$

其中: p_{ij} 是模板图像中 P 坐标 (i,j) 处的像素值, p_{ij}^* 是目标图像中点 p 坐标 (i,j) 处的像素值。

目标值 O 为

$$O = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h D_{ij} \quad (5)$$

其中: O 是模板图像和目标图像的像素之差 D_{ij} 的像素累积值。模板尺寸大小为 $w \times h$,当模板图像和目标图像的匹配程度最高时,像素累积值 O 为零。

将 GA 应用于实际问题时,匹配度函数的定义往往是 GA 最为困难的部分,并且其计算复杂度对整个 GA 的搜索时间具有很大的影响,在人眼区域搜索中,为了减小计算量,定义的匹配度函数如式(6)所示:

$$\text{fitness} = 1.0 - \frac{O}{w \times h \times p_{\max}} \quad (6)$$

其中: $w \times h$ 代表模板尺寸大小, $p_{\max}$ 是模板图像中像素最大值。分析式(6)可知,在正常情况下,匹配度函数越接近 1,表明匹配度达到最优解。

人眼区域检测算法的步骤如下:

a) 将检测到的人脸区域划分为三个子区域,本文只检测左眼区域,因此将划定的 R_a 区域通过前文所述的边缘提取和图像二值化处理之后将其变换为如图 6 所示的二值图像。

b) 定义一个大小为 12×12 、灰度值为 255 的人眼模板,利用式(4)~(6)在 R_a 区域内用 GA 搜索最优解思想,以左下角作为初始位置进行搜索,并用该方法在脸部子区域搜索眼部区域。对于 GA 的几个参数设置:种群规模为 20,杂交率为 0.5,突变率为 0.006,演化代数为 18 代时匹配度函数达到最优解。

c)对检测到的人眼区域进行标记。选取实验室80个测试对象,结合人脸检测算法,利用GA搜索的人眼左眼区域的搜索结果如图7中矩形框所示(检测结果限于篇幅,选取部分图像罗列)。



图7 人脸左眼区域搜索结果

3.2 利用圆的几何性质定位人眼瞳孔中心

Hough(霍夫)变换检测圆心是定位瞳孔中心的方法之一,但是传统的霍夫变换计算量大,且对图像边缘的要求也很严格。本文通过分析圆的几何性质^[12],在眼睛区域的边缘图像内寻找圆,确定圆心位置,即为瞳孔中心,如图8所示。

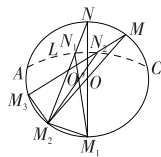


图8 近似眼球结构的圆

弧线段 L 表示眼睑的边缘(图8中虚线所示),沿逆时针寻找相隔 n 个像素点的点 M_1, M_2, M_3 ,连接点 M_1M_2, M_2M_3 ,分别过点 M_2, M_3 作垂线,交弧线段于点 N_1, N_2 ,延长 M_2N_1, M_3N_2 相交圆边缘点为 N, M ,连接 M_1N, M_2M 相交于点 O 、连接 M_1N_1, M_2N_2 相交于点 O' ,这时 O' 不是绝对的圆心 O 。由于 O' 与真正的圆心 O (眼球中心)偏差很小,因此 O' 可近似地看成瞳孔的中心。

利用圆的几何性质定位瞳孔中心的具体步骤如下:

a)在上述利用GA搜索的包含人眼左眼区域的二值图像中(图6)为每一个像素点设置访问标志位 $\text{flag}=0$,在该区域内寻找第一个像素点 $\text{Pixel}(i, j)=0$ 和相邻像素点 $\text{Pixel}(i \pm m, j \pm n) \neq 0$ 的点,记为 P_1 , flag 置1。以此点为起点,沿该点所在的边缘沿顺时针方向间隔 n 个像素点在该区域内继续搜索满足式 $\text{Pixel}(i, j)=0, \text{Pixel}(i \pm m, j \pm n) \neq 0, \text{flag}=0$ 的边缘点 P_2 。

b)连接 P_1P_2 ,同时根据 P_1, P_2 点的坐标求线段 P_1P_2 的斜率 k_1 ,取其负倒数为 $-\frac{1}{k_1}$,同时求出与 P_1P_2 垂直的直线的位移,记为 b_1 ;沿顺时针方向继续在 P_1, P_2 点所在的边缘位置上寻找满足 $y = -\frac{1}{k_1}x + b_1$ 和 $\text{Pixel}(i, j)=0, \text{Pixel}(i \pm m, j \pm n) \neq 0, \text{flag}=0$ 的点 P_3 。

c)以 P_2 点为起点,按照寻找 P_2 点的方法寻找 P_4 ;连接 P_2P_3 ,按照步骤b)中寻找 P_3 的方法寻找边缘点 P_5 。

d)寻找到这些点之后,由以上步骤可知 $P_1P_2 = P_2P_4$,若边界为规则的圆,则 $P_1P_3 = P_2P_5$ 为圆的直径,同时, $\triangle P_1P_2P_3 \cong \triangle P_2P_4P_5$,在实际求眼球中心的应用中,只需判断 $||P_1P_3| - |P_2P_5|| \leq \varepsilon_1, ||P_1P_3| - |P_2P_5|| \leq \varepsilon_2$, (其中, $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ 为趋近于零的变量);若不等式成立,则线段 P_1P_3 和 P_2P_5 的交点 O 为瞳孔中心,否则跳至步骤a)重新开始定位。

e)以交点 O 为圆心、半径为3 mm画圆标记瞳孔。图9给出了实验室80个测试对象利用本文算法对左眼瞳孔定位的结

果(检测结果限于篇幅,选取部分图形罗列)。

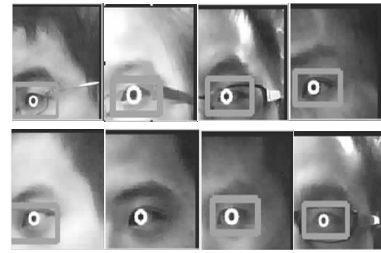


图9 利用本文算法实现的左眼瞳孔的定位结果

4 实验结果与分析

本文算法测试环境在奔腾双核3.0 GHz、1 GB内存的台式机、WindowsXP操作系统下,采用一个利用USB 2.0接口与电脑连接的500万像素的单目摄像头,在VC++ 6.0下,利用MFC、结合OpenCV实现本文的算法。从摄像头采集到的每一帧的图像大小均被缩放至 320×240 像素的待处理图像,拍摄环境背景复杂,光照有实验室的日光灯,也有白天的自然光,人脸允许一定的均匀侧光照,人脸可以上下左右倾斜或者偏转一定角度,允许佩戴黑色眼镜框的眼镜。在满足上述条件下,选取实验室的60个被测试对象,每个测试者在不同背景脸部上、下、左、右偏转,实验室日光灯依次开2、4、6、8个,戴眼镜(包括黑色眼镜框)在10种不同条件下进行测试,利用模板匹配算法^[10]、支持向量机算法^[13]、本文算法三种人眼定位算法进行比较。表2给出了待检测图像分辨率为 320×240 像素大小时的三种测试算法的检测结果比较。图10给出了人头左右 60° 和上下 30° 偏转时的定位结果。表3给出了将输入图像缩放至不同分辨率下利用本文算法定位的结果比较。

表2 样本数600时三种算法下的人眼定位结果比较

人眼定位算法	定位正确数	正确率/%
模板匹配算法	568	94.67
支持向量机算法	575	95.83
本文瞳孔定位算法	586	97.67



图10 头部左右和上下偏转时的定位结果

表3 样本数600时不同分辨率下的定位结果比较

分辨率	检测率/%	平均定位时间/ms
120 × 80	93.78	221
160 × 120	95.62	253
200 × 160	96.59	295
320 × 240	97.67	342
360 × 280	97.89	486

从检测结果来看,本文算法的准确率较高,在人脸有表情、复杂背景、头部偏转情况下均具有较高的鲁棒性,并且在光照变化条件下具有较好的定位效果。本文算法的检测率随着待处理图像分辨率的增加而增加,平均定位时间与分辨率的大小成正比,但是在分辨率为 320×240 时随着图像分辨率的增加,检测率提高不是很大,平均定位时间反而增加,这是本文算法选择在该分辨率下进行处理的原因。但是本文算法对于戴有黑色眼镜框的测试对象,会由于部分黑框被框入眼部区域,对瞳孔检测造成干扰引起误判。

(下转第2762页)

5 结束语

本文算法具有简单、准确、对光照不敏感的特点,并且该算法具有相对较低的复杂度,可以和一些现成的算法结合,进行更为精确的人眼定位。另外,本文测试图像中的瞳孔颜色较深、对比度较高,对于非洲人瞳孔较透明、对比度较低的人眼图像,算法的适用性和定位精度还有待分析,这将是下一步研究的重点之一。

参考文献:

- [1] VENERI G, FEDERIGHI P, ROSINI F, *et al.* Influences of data filtering on human-computer interaction by gaze-contingent display and eye-tracking applications [J]. *Computers in Human Behavior*, 2010, 26(2): 1555-1563.
- [2] 刘鹏, 江朝晖, 熊进, 等. 用于驾驶疲劳检测的人眼定位及状态判别算法[J]. *计算机工程与应用*, 2010, 46(24): 185-188.
- [3] HSU R L, ABDEL-MOTTALEB M, JAIN A K. Face detection in color images [J]. *Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 696-706.
- [4] 荆其成, 焦书兰, 喻柏林, 等. 色度学[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
- [5] LIU L, SANG N, YANG S, *et al.* Real-time skin color detection under rapidly changing illumination conditions [J]. *Consumer Electronics*, 2011, 57(3): 1295-1302.
- [6] 张洪明, 赵德斌, 高文. 基于肤色模型、神经网络和人脸结构模型的平面旋转人脸检测[J]. *计算机学报*, 2002, 25(11): 1250-1256.
- [7] 沈荻帆, 滕晓龙, 刘重庆. 基于肤色信息的人脸检测和人眼定位方法[J]. *计算机工程与应用*, 2004, 40(36): 93-95.
- [8] PALOMERA-PEREZ M A, MARTINEZ-PEREZ M E, BENITEZ-PEREZ H, *et al.* Parallel multiscale feature extraction and region growing: application in retinal blood vessel detection [J]. *Information Technology in Biomedicine*, 2010, 14(2): 500-506.
- [9] 黄亚勤, 董秀成, 李郝, 等. 改进的 Camshift 人脸跟踪算法[J]. *计算机工程*, 2011, 37(2): 180-182.
- [10] 舒梅, 董秀成. 基于肤色和模板匹配的人眼定位[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(2): 237-239.
- [11] 刘勇, 康立山, 陈毓屏. 非数值并行算法——遗传算法[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [12] 张丹丹, 张凌燕, 彭延军. 一种基于圆检测的眼睛定位方法[J]. *山东科技大学学报*, 2007, 26(3): 95-97.
- [13] HUANG Ya-qin, DONG Xiu-cheng, HAO Ming-gang. Eye gaze calibration based on support vector regression machine [C]//Proc of World Congress on Intelligent Control and Automation. 2011: 1212-1215.