

人脸图像中眼镜检测与边框去除方法

陈文青¹, 王佰玲²

CHEN Wenqing¹, WANG Bailing²

1. 绍兴职业技术学院信息工程学院, 浙江绍兴 312000

2. 哈尔滨工业大学计算机科学与技术学院, 黑龙江哈尔滨 150090

1. College of Information Engineering, Shaoxing Vocational & Technical College, Shaoxing 312000, China

2. School of Computer Science and Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

CHEN Wenqing, WANG Bailing. Methods of eyeglasses detection and frame removal for face image

Abstract: The eyeglasses frame is one important factor affecting the accuracy of face features extraction, so a method of detecting and removing the eyeglasses frame is proposed. The method is composed of glasses detection, frame location and restoral of the occluded images. First, the edge features of eyes region are extracted and the glasses are detected based on neural network. Then, the eyeglasses frame is located based on binarization and morphology. Finally, the image is restored by interpolation method. Experimental results show that compared with the method based on PCA (Principle Component Analysis), the removal eyeglasses face images processed by the proposed method are more natural and can achieve better face recognition performance.

Key words: eyeglasses detection; eyeglasses frame removal; face recognition; skin model

摘要: 眼镜边框是影响精确提取人脸图像特征的因素之一, 为此提出了一种眼镜检测和边框去除的方法。该方法由眼镜检测、眼镜边框定位和被遮挡图像修复三部分构成。首先, 提取眼睛估计区域的边缘特征并基于神经网络的方法检测眼镜; 然后, 利用二值化和数学形态学的方法定位眼镜边框; 最后, 通过插值的方法修复被眼镜边框遮挡的图像。实验结果表明, 该方法与传统基于 PCA 的方法相比, 眼镜去除后的人脸图像更加自然。同时, 实验结果也表明本文方法有助于人脸识别性能的提升。

关键词: 眼镜检测; 眼镜边框去除; 人脸识别; 肤色模型

doi:10.3778/j.issn.1002-8331.1510-0265

文献标志码: A

中图分类号: TP391.41

1 引言

人脸识别是一项重要的生物特征识别技术, 在金融、公共安全、人机交互等领域均有广泛的应用。当前, 人脸识别技术已经取得了极大进步, 在图像质量较好的情况下机器自动识别人脸的性能甚至优于人眼^[1]。然而, 自然条件下人脸识别技术性能仍然受光照、姿态、饰物等多种因素影响。其中饰物的影响主要体现为饰物遮挡了待识别人脸图像的面部区域, 因此掩盖了不同个体之间面部真实特征并增加了一致性较高的虚假特征, 从而降低了识别的准确率。眼镜是面部佩戴最为广泛的饰物, 经

过实验发现眼镜边框对人脸识别的准确率影响极为严重。为此, 本文对检测和去除人脸图像中眼镜边框的方法进行研究。

检测和去除人脸图像中的眼镜边框是指利用图像处理方法判断待识别的图像中面部是否佩戴有眼镜, 若有则定位并消除眼镜的边框。目前为止, 针对该问题的研究还较少, 其中基于主成分分析 (Principle Component Analysis, PCA) 的方法较为经典。该类方法的主要思路是首先利用大量未佩戴眼镜的人脸图像训练人脸特征空间, 然后将佩戴眼镜的人脸图像在事先训练的特征空间中投影重建, 从

基金项目: 浙江省教育厅科研项目 (Y201431964, 基于 Radon 变换的低质量车牌识别关键技术研究)。

作者简介: 陈文青(1978—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究领域为图形图像处理、计算机基础课程教育研究; 王佰玲(1978—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究领域为网络安全、Web 计算、多媒体计算、数据挖掘。E-mail: cwq7771@163.com

而去除图像中的眼镜。文献[2]提出利用单次 PCA 重建的方式去除人脸图像中的眼镜,是最早的基于 PCA 的眼镜去除方法。虽然该方法去除了部分眼镜信息,但重建误差被扩散到整幅重建人脸图像中,并且残留眼镜痕迹较多。文献[3]则在该基础上进行了改进,利用重建图像与原图像的差值获得眼镜区域,并利用原图像对重建后的图像进行补偿,然后再对补偿图像进行 PCA 重建,迭代至相邻补偿图像的差异小于门限,从而较好地去除眼镜边框,并对其他区域进行保真。文献[4]则在迭代 PCA 的基础上利用 GVF Snake 模型准确定位眼镜边框,并利用图像块匹配的方法对边框位置信息进行补偿,从而达到眼镜去除的效果。文献[5]利用主动外观模型(Active Appearance Model, AAM)方法定位眼镜位置,并基于迭代 PCA 方法对眼镜区域进行重构。另外,文献[6]利用 PCA 与独立分量分析(Independent Component Analysis, ICA)相结合的方法去除眼镜,文献[7]则利用二维广义主成分分析方法获取无眼镜图像,均取得了较好效果。

除此之外,文献[8]建立了同一人戴眼镜和不戴眼镜人脸图像的联合分布模型,并利用该模型去除输入人脸图像中的眼镜。文献[9]利用事先预留的未戴眼镜的人脸图像对输入图像进行眼镜检测和去除。文献[10]则针对热红外人脸图像中的眼镜遮挡问题,利用核主成份分析方法将热红外图像与可见光下的人脸图像融合,从而去除眼镜影响。

基于 PCA 的人脸图像眼镜去除方法对图像配准要求较高,实际应用中会受到光照、人脸姿态、表情等的影响,并且重建后的图像丢失了部分具有个体鉴别力的高频信息,不利于后期识别应用。其他的非 PCA 类方法大都需要事先搜集和建立大量的戴眼镜和未戴眼镜成对的图像库,建库的环境和规模对眼镜检测与去除效果影响较大。另外,当前眼镜去除方法研究大都侧重于对戴眼镜人脸图像的重建或融合方法进行研究,而检测人脸图像中是否佩戴眼镜的研究较少。为此,本文提出了一种新的人脸图像眼镜检测和去除方法,包括眼镜检测、眼镜边框定位和眼镜边框去除等三个主要步骤。首先利用神经网络方法检测人脸图像中是否有眼镜;然后,利用二值化和数学形态学方法定位眼镜边框;最后,利用图像中面部像素的分布规律修复眼镜边

框遮挡位置的图像,从而达到去除眼镜的目的。

本文提出方法与传统的 PCA 方法相比创新性在于以下 2 点:1)具有独立的眼镜检测步骤,能够快速判断输入的人脸图像中是否有眼镜,仅对戴眼镜的人脸图像进行后续处理;2)眼镜边框定位和去除直接基于单幅图像进行,避免了图像配准、数据采集和训练等过程,与基于 PCA 方法相比更加简单,鲁棒性和实用性更强。

2 本文方法

2.1 基本流程

本文方法的基本流程如图 1 所示,首先需要输入的图像进行人脸检测,基于人脸检测结果再进一步检测图像中人脸是否佩戴有眼镜,如果存在眼镜则定位眼镜的边框,并修复边框遮挡处的图像信息,最终获得眼镜去除后的人脸图像。

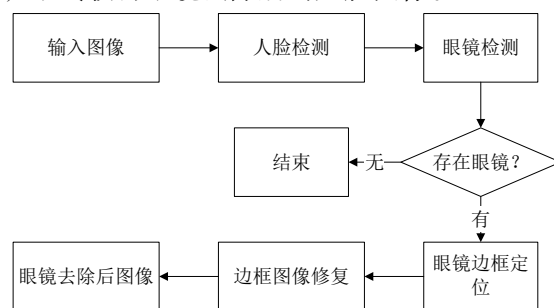


图 1 基本流程框图

当前人脸检测技术已有较多研究:文献[11]提出了基于类 Haar 特征方法,奠定了实时人脸检测的基础;文献[12]则在该方法的基础上提出参数加权优化的方法;文献[13]提出基于肤色特征和类人脸特征的方法等。由于人脸检测方法已较为成熟,本文直接基于 OpenCV 采用文献[11]的方法检测输入图像中的人脸位置,具体方法和步骤不再赘述。判断人脸图像中是否佩戴眼镜、定位眼镜边框、眼镜边框遮挡位置处的图像修复等三个步骤是本文方法的重点,接下来将详细介绍。

2.2 眼镜检测方法

眼镜检测问题目前研究较少,大都通过 PCA 重建图像与原图像对比,或者利用 AAM、Snake 等方法直接提取眼镜边框^[2,3,6,7]。考虑到眼镜边框与周围像素对比度明显,本文提取眼睛区域的边缘特征,

并基于该特征提出一种基于神经网络的眼镜检测方法, 基本流程分为离线训练和在线检测两部分, 如图 2 所示。

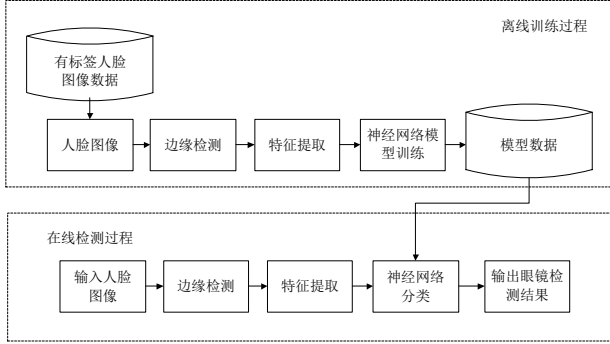


图 2 眼镜检测流程框图

离线训练过程首先采集佩戴眼镜和无眼镜的人脸图像, 形成有标签的人脸图像数据, 然后对人脸图像进行边缘检测和特征提取, 基于提取的数据特征训练神经网络, 最终获得眼镜检测的神经网络模型。在线检测过程为: 对输入的人脸图像首先进行边缘检测和特征提取, 然后利用已训练好的模型进行计算, 最终判断输入的人脸图像是否佩戴眼镜。

为了简化算法, 边缘检测部分本文采用了水平和垂直梯度进行检测, 基本方法如式 1 所示, 其中 $I(i, j)$ 为输入图像 (i, j) 位置的像素值, $E(i, j)$ 为 (i, j) 位置的边缘强度, 图像边界处边缘强度设置为 0。

$$E(i, j) = \frac{|I(i+1, j) - I(i-1, j)| + |I(i, j+1) - I(i, j-1)|}{2} \quad (1)$$

本文边缘检测方法效果示例如图 3 所示, 其中人脸图像来自网络。



图 3 边缘检测示例图

特征提取和神经网络训练是本文眼镜检测方法的重点, 介绍如下。

2.2.1 特征提取

观察人脸图像的边缘图像可获知 2 个事实: (1) 通常眼睛区域位于人脸图像的上半部分; (2) 眼镜边框的边缘信息较丰富。基于以上两点, 本

文方法在人脸图像的边缘图的基础上提取了 7 维特征, 具体特征提取方法为:

1) 在边缘图中提取眼睛先验区域。假设人脸图像的左上角坐标为 $(0, 0)$, 人脸图像的高度为 h , 宽度为 w , 则眼睛先验区域左上角位于图像的 $(w/4, h/4)$ 处, 该区域的宽度为 $w/2$, 高度为 $h/4$ 。示意图如图 4(a) 所示;

2) 利用自适应阈值的方法对提取的眼睛先验区域边缘图进行二值化处理;

3) 计算眼睛先验区域边缘点的比例, 作为特征 1;

4) 参照示意图 4(b) 将眼睛先验区域划分为 6 个子区域;

5) 计算每个子区域的边缘点比例, 作为特征 2~7。

至此共提取了能够表达眼睛周围区域边缘情况的 7 维特征, 这些特征将用于模型的训练和眼镜检测的在线判别。

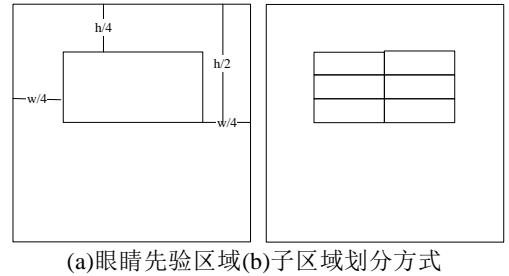


图 4 特征提取区域示意图

2.2.2 模型训练

BP 神经网络可以实现从输入到输出的非线性映射, 是经典的模式识别方法, 有着大量的成功应用^[14], 因而本文采用该方法进行模型训练。本文采用的 BP 神经网络输入层节点数为 7, 输出层节点数为 2, 中间隐含层节点数根据经验设置为 15。

从网络中收集了 500 幅基本正面的佩戴眼镜的人脸图像和 500 幅无眼镜的人脸图像对模型进行交叉训练和识别测试。最终得到的模型对有眼镜的人脸图像判断准确率为 96.4%, 对无眼镜的人脸图像误检率为 0。经观察发现对无框和浅色边框眼镜的判断准确率较低, 但考虑到该类型的

眼镜对人脸识别效果影响较小,因而认为模型达到了预期效果。

2.3 眼镜边框定位方法

确认输入的人脸图像中有眼镜后需要定位眼镜边框,然后再修复边框遮挡处的图像。本文主要采用二值化处理和数学形态学方法定位眼镜边框。具体方法为:

1)针对输入的有眼镜的原始人脸图像的边缘图像E,采用最大类间差的方法进行二值化处理,得到二值图像 I_B ;

2)在二值化的基础上采用数学形态学的开运算消除部分未连接的较小图像边缘,然后利用连通域的方法去除孤立的边缘点;

3)随后根据边缘连通域的位置去除重心处于图像高度 1/2 以下的边缘,也即去除了嘴巴和鼻子区域的边缘,得到去噪图像 I_C ;

4)采用 2 次迭代闭运算的方法连接剩余边缘。然后横向扫描图像,将边缘断裂长度低于 1/6 图像宽度的边缘进行连接,形成眼镜边框掩膜图像 I_M ,完成眼镜边框定位。

眼镜边框定位过程中间结果示例如图 5 所示,其中图 5(a)为输入的样图,图 5(b)为利用水平和垂直梯度方法获得的边缘图像,图 5(c)为利用最大类间差方法获得的二值图像,图 5(d)为综合利用开运算、连通域方法去噪后的边缘图像,图 5(e)中白色像素部分为利用闭运算最终定位到的眼镜边框。

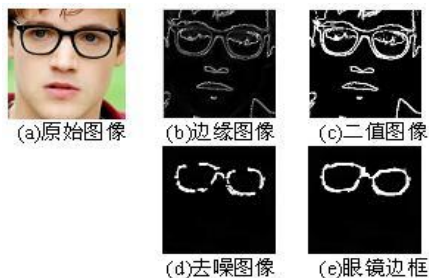


图 5 眼镜边框定位流程例图

2.4 眼镜边框图像修复方法

眼镜边框定位后,如何修复边框遮挡处的面部图像信息,使边框位置图像显示更加自然,是一个具有挑战性的问题。考虑到同一幅图像中光照环境固定,本文利用边框局部面部像素进行插值的方法修复眼镜边框遮挡位置的图像。该方法的主要特点是先基于输入的彩色图像建立肤色模型,然后利用肤色检测方法获取眼镜边框周围面部的像素点,再利用这些像素点对边框位置进行线性插值,最后对处理完的图像进行中值滤波,最终获得去除眼镜边框后的图像。具体流程框图如图 6 所示。

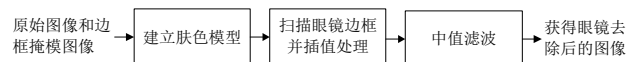


图 6 眼镜边框图像修复流程框图

图 6 中中值滤波的目的是针对眼镜边框定位不精确,可能会有部分残留边框的问题进行处理,减少边框残留程度,使图像更加自然。建立肤色模型和眼镜边框位置插值是本文图像修复方法的两个重点步骤,接下来详细介绍。

2.4.1 在线肤色建模

当前肤色检测方法研究已较为成熟,从肤色模型中是否使用参数方面考虑可划分为参数模型方法和非参数模型方法两类。参数模型方法主要包括高斯模型、混合高斯模型、椭圆模型等,非参数模型方法包括贝叶斯方法、SOM 方法、数据挖掘方法、神经网络方法等^[15,16]。

虽然不同人种、不同光照下肤色分布具有聚集性特点,但同一幅图像中同一人的肤色分布更为集中。因此,本文选取人脸图像中面部的部分像素,在线建立有参的高斯肤色模型,用于后续面部像素点的检测。高斯肤色模型的建立方法参见文献[15],本文不再赘述。

面部像素点的选取是本文建立高斯肤色模型的关键,此处选取左右眼镜底部边框位置下方的部分像素作为面部像素。具体面部肤色点选取过程如下:

1)针对眼镜边框掩膜图像,将眼镜边框进行纵向投影,定位眼镜边框左右边界;

2)根据眼镜边框左右边界将边框掩模图像从中间划分为左右两部分,并分别对左右两部分进行横向投影,定位左右眼镜边框上下边界;

3)分别在左右眼镜边框下方 5 个像素外,靠左右眼镜中心线外侧取宽度为左右眼镜宽度的 1/3,高度为面部图像高度 1/6 的矩形框内的像素为面部像素,示意图如图 7 所示。

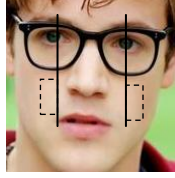


图 7 眼镜边框定位流程例图

选取面部肤色像素点后,将其转换至 YCbCr 颜色空间,并建立高斯肤色模型。

2.4.2 眼镜边框位置图像插值

在修复人脸图像中被遮挡区域的图像时,本文提出利用边框周围像素对遮挡区域的图像进行线性插值的图像修复方法。与传统的 PCA 方法相比,该方法仅针对输入图像进行处理,不需要进行人脸配准和训练,减少了中间计算环节,增强了算法的鲁棒性。

本文插值方法具体介绍如下:

1)将眼镜边框掩模图像纵向投影,统计竖直方向眼镜边框像素点的均值,记为 N_μ ;

2)纵向扫描眼镜边框掩模图,统计连续边框的像素数目,若连续边框像素数目低于 N_μ ,则将该像素标记为水平眼镜边框;

3)标记眼镜边框掩模图中其他眼镜边框像素为垂直眼镜边框;

4)将原始图像转换至 YCbCr 颜色空间,然后针对所有标记为水平眼镜边框的位置进行插值,具体为:

① 纵向扫描图像,假设竖直方向连续的标记为水平眼镜边框的像素点个数为 n ,将各像素点自上而下分别记为 $Y_1 \sim Y_n$,然后对 $Y_1 \sim Y_n$ 进行插值处理。

在扫描到的连续眼镜边框两端外分别设置 5×3 的区域,作为像素插值参考区域,如图 8(a)所示。

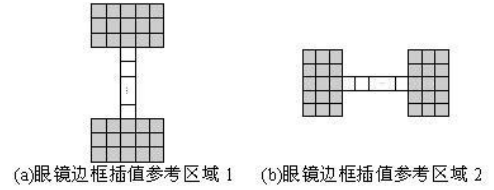


图 8 眼镜边框定位流程例图

根据建立的肤色模型分别在设定的区域内检测肤色像素,并计算上下两个区域的肤色像素均值,分别记为 (Y_s, Cb_s, Cr_s) 和 (Y_x, Cb_x, Cr_x) 。若在设定的区域内未找到肤色像素点,则用建立的肤色模型中三个分量的均值代替。眼镜边框像素点的插值方法如式(2)~式(4)所示,其中 i 为待插值的像素点位置,取值为 $[1, n]$ 。

$$Y_i = \frac{n+1-i}{n+1} Y_s + \frac{i}{n+1} Y_x \quad (2)$$

$$Cb_i = \frac{n+1-i}{n+1} Cb_s + \frac{i}{n+1} Cb_x \quad (3)$$

$$Cr_i = \frac{n+1-i}{n+1} Cr_s + \frac{i}{n+1} Cr_x \quad (4)$$

②对所有标记为水平眼镜边框的像素点插值完成后,再横向扫描整幅图像,对其他眼镜边框图像采取上述类似步骤进行插值处理。其中,设置的像素插值参考区域如图 8(b)所示。

3 实验分析

为了测试本文方法的效果,构建了 2 个测试库。库 A 是网络中收集的戴有眼镜的 100 幅正面人像照片;库 B 是在 CAS-PEAL 数据库^[17]中挑选的 100 对正面戴黑色眼镜和不戴眼镜的照片。库 A 中眼镜种类较多,主要用于测试本文方法的眼镜去除效果。库 B 是实验室条件下拍摄的人脸图像库,眼镜类型较单一,本文主要用于测试眼镜去除后对人脸识别算法性能的影响。

3.1 眼镜去除效果

在对眼镜去除效果进行测试时,本文方法与基于 PCA 的方法进行了对比。基于 PCA 方法的实现参考了文献[2],由于训练集和诸如人脸检测、眼镜定位等步骤实现细节不同,本文 PCA 方法的结果并不能等同于文献[2]实验结果。本文实现的基于 PCA 的方法,训练时采用了 CAS-PEAL 人脸数据库中 100 幅正面无眼镜人脸图像,并且通

过眼睛中心点进行人脸对齐和眼睛局部区域裁剪。实验过程中人脸检测步骤采用了 OpenCV 中实现的类 Haar 特征的方法,眼睛中心位置则人工进行标定。

图9示出了本文方法与基于PCA方法处理的样图,其中PCA方法是基于灰度图像进行训练和去除眼镜的。从图9中可以看出本文方法对于黑色眼镜边框的图像处理效果明显好于基于PCA的方法,处理后的眼镜边框残留更少,图像更加自然。然而对于浅颜色边框的人脸图像本文处理效果较差,究其原因还是眼镜边框颜色过浅时,难以准确定位边框位置。

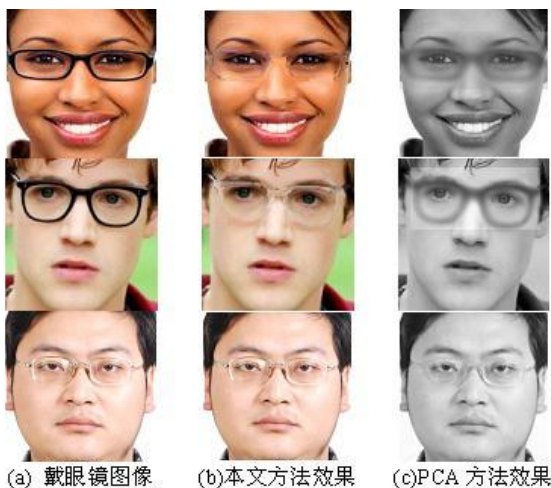


图9 眼镜边框去除效果部分样图

3.2 人脸识别性能影响效果

为了测试提出的去除眼镜边框的方法对人脸识别性能的影响,本文利用建立的数据库B和典型的人脸识别算法进行了实验。实验时测试数据分别为数据库B中的原始数据和去除眼镜边框后的数据。特征脸^[18]、Fisher脸^[19]和LBP描述^[20]等是三种典型的人脸识别方法,在OpenCV中已有相关实现,本文利用该三类方法进行人脸识别性能测试。训练时均采用了CAS-PEAL-R1数据集,测试时利用戴眼镜或者去除眼镜后的图像,在剩余图像中进行检索,并用检索结果中第1位命中的概率评价识别性能。

测试结果如表1所示,训练和测试应用的人脸图像均经过裁剪并归一化至 32×32 大小。从表

1中可以看出本文眼镜去除方法对提升人脸识别性能有较大的影响。

表1 眼镜边框去除对人脸识别性能影响情况

	特征脸	Fisher 脸	LBP 方法
原图像库	26%	33%	48%
本文方法处理后图像	31%	37%	55%

4 结论

眼镜是影响人脸识别性能的一个重要问题。传统基于PCA的方法眼镜去除效果与训练集关系较大,并且需要精确的图像配准。为此本文提出一种新的眼镜检测和眼镜边框去除的方法。眼镜检测过程中提取了眼睛周围区域的7维边缘特征,并利用神经网络进行学习和识别戴眼镜图像;在眼镜边框定位和去除过程中,本文方法仅针对输入的彩色图像进行处理,不需要预先训练和人脸对齐等步骤,该方法的鲁棒性和适应性更强。通过实验也证明了本文方法去除黑色眼镜边框的效果明显优于传统的基于PCA的方法,同时本文方法也有助于人脸识别性能的提高。

参考文献:

- [1] Lu C, Tang X. Surpassing human-level face verification performance on LFW with GaussianFace [C]. In Proceedings of the 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence, Austin, Texas, USA 2015:1-13.
- [2] Saito Y, Kenmochi Y, and Kotani K. Estimation of eyeglassless facial images using principal component analysis[C]. International Conference on Image Processing, Kobe, Japan, 1999:197-201.
- [3] 杜成, 苏光大. 用于人脸识别的正面人脸图像眼镜摘除[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005.45(7):928-934.
- [4] Guo P, Su F. Enhanced PCA reconstruction method for eyeglass frame auto-removal[C]. In Proceedings of International Conference on Network Infrastructure and Digital Content, Beijing, China, 2014:359-363.
- [5] Wang Y K, Jang J H, Tsai L W, et al. Improvement of face recognition by eyeglasses removal[C]. In Proceedings of the Sixth Conference on Intelligent Information Hiding and Multimedia Signal Processing, Harbin, China, 2010: 228-231.
- [6] 刘仲民, 李战明, 王亚运, 等. 基于PCA/ICA和误差补偿算法的眼镜摘除研究[J]. 光学技术, 2014.40(5): 429-433.

- [7] 李战明, 赵勇, 胡文瑾. 一种去除人脸图像中的眼镜的方法[J]. 工业仪表与自动化装置, 2014.3:51-53.
- [8] Wu C, Liu C, Shum H Y, et al. Automatic eyeglasses removal from face images [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004.26(3):322-336.
- [9] 胡郭靖, 娄震. 一种基于遮挡区域补偿的眼镜去除方法[J]. 计算机应用研究, 2013.30(12):3863-3865.
- [10] 李伦清, 张会林, 张杰武. 基于可视信息眼镜摘除的热红外人脸识别方法[J]. 计算机工程与应用, 2014.50(20): 182-186.
- [11] Viola P, Jones M. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features[C]. In Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Kauai, HI, USA, 2001: 511-518.
- [12] 缪丹权, 郑河荣, 顾国民. 基于优化加权参数的 Ada-Boost 人脸检测算法[J]. 计算机工程与应用, 2014,50 (19):173-177.
- [13] 陈章乐, 蔡茂国, 刘凡秀. 一种结合肤色及类人脸特征的人脸检测[J]. 计算机工程与应用, 2013,49(3):194-197.
- [14] 陈思思, 万晓霞, 孙鹏等. 基于神经网络的覆盖产品颜色预测研究[J]. 计算机工程与应用, 2015.51(40):240-243.
- [15] Hossain M F, Shamsi M, Alsharif M R, et al. Automatic facial skin detection using Gaussian mixture model under varying illumination[J]. International Journal of Innovative Computing, Information and Control, 2012.8(2):1135-1144.
- [16] Kakumanu P, Makrogiannis S, and Bourbakis N. A Survey of Skin-Color Modeling and Detection Methods[J]. Pattern Recognition, 2007.40:1106-1122.
- [17] Wen G, Cao B, Shan S, et al. The CAS-PEAL Large-Scale Chinese Face Database and Baseline Evaluations[J]. IEEE Transactions on System Man and Cybernetics(Part A), 2008.38(1):149-161.
- [18] Turk M, Pentland A. Eigenface for recognition[J]. Journal of Cognitive Neuroscience, 1991.3:71-86.
- [19] Belhumeur P N, Hespanha J, and Kriegman D. Eigenfaces vs. Fisherfaces: recognition using class specific linear projection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1997.19(7):711-720.
- [20] Ahonen T, Hadid A, and Pietikäinen M. Face description with local binary patterns: application to face recognition[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2006,28(12):2037-2041.