

# 人脸签名在智能化办公系统中的身份认证应用

邓文红<sup>1</sup>, 周忠丽<sup>2\*</sup>

(1. 西南交通大学 智能控制开发中心, 成都 610031; 2. 四川大学 图形图像研究所, 成都 610064)

(\*通信作者电子邮箱 soiet@163.com)

**摘要:**为了提高基于网络的智能化办公系统特别是敏感系统的安全性,提出使用人脸识别作为智能化办公系统的身份认证方法。采用多部件融合的人脸识别算法,将人脸图像分成一系列基元部件,从中选取选择出具有统计最优的部件集合,提取其局部二值模式(LBP)直方图特征,通过对应的线性判别分析(LDA)变换矩阵得到LDA变换后的特征,作为每个部件的最终特征,并用求和的方式实现部件的相似度融合。将此算法应用于智能化办公系统的身份注册与识别,实验结果表明具有较高的精度与安全性。

**关键词:**人脸识别;身份认证;多部件融合;智能化;办公系统

**中图分类号:** TP391.41 **文献标志码:** A

## Face recognition using as authentication in intelligent office systems

DENG Wenhong<sup>1</sup>, ZHOU Zhongli<sup>2\*</sup>

(1. Intelligent Control Development Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China;

2. Institute of Image and Graphics, Sichuan University, Chengdu Sichuan 610064, China)

**Abstract:** Face recognition was proposed to use as the authentication method to improve the security of the intelligent network-based office systems, especially security-sensitive systems. Using multi-component fusion algorithm, the proposed algorithm divided the face image into a series of primitive components, selected a statistically optimal parts from it, extracted the Local Binary Pattern (LBP) histogram feature, obtained the Linear Discriminant Analysis (LDA) transformation characteristics through the corresponding LDA transformation matrix, as the final characteristics of each component, and used a summing means to achieve the integration of the similarity of parts. This algorithm was used for user registration and identification of intelligent office systems. The experimental results show that the application of multi-component fusion face recognition has high precision and safety.

**Key words:** face recognition; authentication; multi-component integration; intelligence; office system

## 0 引言

智能化的办公系统通过先进的人工智能技术、网络技术等将各个部门之间,各个成员之间甚至和用户之间形成有效的组织;使他们能够通过网络渠道访问其所需要的个性化信息,从而实现组织信息的高度集成和业务的快速响应,大大提升运作效率。

然而,在享受先进技术带给我们的高效工作模式的同时,智能化的办公系统所面临的安全方面的挑战也是不容忽视的。特别是敏感系统中对用户的身份认证和管理是一大难题。传统的身份认证技术大多存在一定的缺陷,例如口令认证机制存在对外泄露、口令被破解等安全隐患;基于地址的认证存在媒体访问控制(Media Access Control, MAC)地址和互联网协议(Internet Protocol, IP)地址被假冒的危险。

由于传统身份认证技术存在的缺陷可能给智能化办公系统带来安全隐患,造成巨大的损失,本文提出了使用人脸签名作为智能化办公系统的身份认证。人脸作为一种生物特征,与人体的其他生物特征(如指纹、虹膜等)都具备了唯一性和不易复制性,为身份验证提供了必要的前提;同其他生物特征

相比,人脸识别技术具有操作简单、结果直观、隐蔽性好的优越性。特别是近些年来发展起来的基于近红外光源的人脸识别技术<sup>[1-3]</sup>,有效地解决了光照变化对人脸识别的不利影响。由于采用近红外光源照射,人脸在图像中表现为特定的模式,有效地杜绝了人脸照片、视频或三维模型的冒充欺骗,提高了身份验证的安全性。

人脸识别大致可以分为基于整体和基于部件的方法。对于采用整体进行人脸识别的方法,相关的研究和文献较多,如早期的基于灰度图像子空间的方法<sup>[4-6]</sup>,近些年来比较关注的基于特征密集采样的方法<sup>[7-10]</sup>、特征提取结合子空间分析的方法<sup>[11-13]</sup>。而对于基于部件的人脸识别方法的研究,相关的文献还很少。文献[14-15]通过精确定位面部的眼、鼻、嘴区域,通过对各部件区域建立子空间模型完成人脸识别。文献[16-17]将整个面部区域划分为大小相等、互不重叠的子块,将单独的一个子块视为一个部件,对每个部件实施子空间分析或频域分析。这些文献通过实验都证明了基于部件的方法优于基于整体的方法,对于脸部的表情变化、光照的变化及局部区域的遮挡有更强的鲁棒性。

基于部件的人脸识别方法需要解决以下技术关键点:

收稿日期:2013-11-14;修回日期:2014-01-16。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61175055)。

作者简介:邓文红(1969-),男,湖北安陆人,博士研究生,主要研究方向:智能信息处理;周忠丽(1973-),女,四川成都人,讲师,博士研究生,主要研究方向:图形与图像处理。

1) 部件的划分; 2) 部件的特征提取; 3) 部件特征的融合。本文在部件划分方面, 采用了基于统计学习的部件划分及部件选择方法, 选择出最具识别能力的部件, 做到统计最优, 解决传统的依靠经验进行部件划分及选择, 得到的部件不一定是识别最优的问题。在部件特征提取方面, 考虑到计算效率和特征分类能力, 选用了局部二值模式 (Local Binary Pattern, LBP) 特征<sup>[7]</sup>。为了进一步提升部件特征的分类识别能力, 将 LBP 特征与线性判别分析 (Linear Discriminant Analysis, LDA) 子空间学习结合起来。最后采用求和的方式实现特征融合。

## 1 部件及部件特征

本文定义基元部件为人脸图像中的一小块正方形区域, 是对整个人脸图像的最小划分, 是组成部件的最小单位。基元部件之间允许部分空域重叠, 这样一幅人脸图像将产生海量的基元部件, 为后续基于统计分析的部件选择提供充足的数据支持。部件由空域相邻或相交的一个或多个基元部件构成, 这样部件可以是矩形或不规则的多边形。由于基元部件的数量已经较大, 按照空域相邻或相交原则进行排列组合形成的部件数目将会非常大, 为了使得后续的部件选择算法实际可操作, 这里限定部件仅为矩形。

基元特征选用了 LBP 直方图特征, 其中 LBP 算子辨别能力强, 计算复杂度低, 具有图像的单调灰度变化不变性。这里采用了  $3 \times 3$  邻域的统一模式 LBP 算子, 长度为 59 维。提取基元区域内所有像素点的 LBP 特征, 形成 LBP 直方图, 基元的 LBP 直方图特征长度为 59 维。采用直方图技术可以增强特征对于基元部件区域内局部变化的适应性。部件特征由基元部件特征首尾串接而成。假设部件包含 16 个基元, 每个基元特征长度为 59 维, 则部件特征为 16 个基元特征串接形成 944 维特征。为了进一步提升部件特征的鉴别能力, 通过有监督的统计学习得到 LBP 直方图的 LDA 变换特征。

## 2 基于贪婪搜索算法的部件选择

给定一张人脸图像, 按照上一章关于部件的定义, 可以得到海量的部件特征, 这其中包含了大量的冗余特征及识别能力较弱的特征, 如果不加筛选全部用于人脸识别, 不仅计算复杂度高, 识别效果也不理想。这里采用贪婪搜索算法, 从中选出一部分最具识别能力的部件。

贪婪搜索算法作为启发式搜索方法中的一种, 每一步的

选择都是当前状态下的最优选择, 即局部最优, 通过多步迭代, 逐步简化求解问题的规模, 以期达到问题求解的整体最优或最佳。

本文假设需要选择  $T$  个部件, 每一轮选择一个最佳的部件, 需要  $T$  轮选择。选择标准为识别正确率的增量, 即选择的部件能够最大限度地提升当前状态下的识别正确率。部件选择的流程如下:

给定样本集  $D$  由  $N$  个人、每个人  $M$  张人脸图片构成, 将每个人的  $M$  张图片随机拆分为两部分: 一部分用于部件选择和训练 LDA 变换矩阵; 另一部分用于测试部件的识别性能。这样原始样本集被拆分为训练子集和测试子集。通过样本集的拆分, 能够提高选出部件特征的泛化能力, 防止出现过度拟合的情况。

假设总的候选部件集合为  $P = \{p_1, p_2, \dots\}$ , 选出的部件集合为  $SP$ 。

初始化:  $SP = \emptyset$ , 在测试子集上的识别正确率  $\varphi_0 = 0$

$T$  轮贪婪搜索  $t = 1 : T$ :

1) 对于每一个候选部件  $p_i \in P$  在训练子集上计算对应的 LDA 变换矩阵, 计算  $SP \cup p_i$  在测试子集的识别正确率  $\varphi_i$ 。

2) 从中选择一个部件, 使得识别正确率的增量最大, 即

$$\arg \max_{p_i \in P} (\varphi_i - \varphi_{i-1}).$$

3) 更新  $SP = SP \cup p_i, \varphi_t = \varphi_i$ , 并将  $p_i$  从  $P$  中剔除。

最终得到一个包含  $T$  个部件的集合  $SP = \{p_1, p_2, \dots, p_T\}$  及对应的 LDA 变换矩阵集合  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_T\}$ 。

其中测试部件在测试子集的识别正确率  $\varphi_i$  采用标准的人脸认证测试方法: 从测试子集中选择一张人脸图片, 将该图片作为探测集, 剩余图片作为原型集, 图片之间通过计算特征相似度进行匹配, 选择相似度最大的一张图片对应的类别为该图片的预测类别, 判断是否正确, 这样遍历测试子集中的所有人脸图像, 就可以得到识别正确率  $\varphi_i$ 。

上面提到的图片之间的相似度计算具体方法如下: 对于选出的每一个部件来说, 根据 LDA 变换矩阵, 分别计算两幅图片对应的 LBP-LDA 特征, 通过余弦距离计算特征之间的相似度, 将每个部件的相似度通过求和的方式实现决策层面的融合, 作为两张图片之间的相似度。

## 3 算法的具体流程

算法的具体流程如图 1 所示。

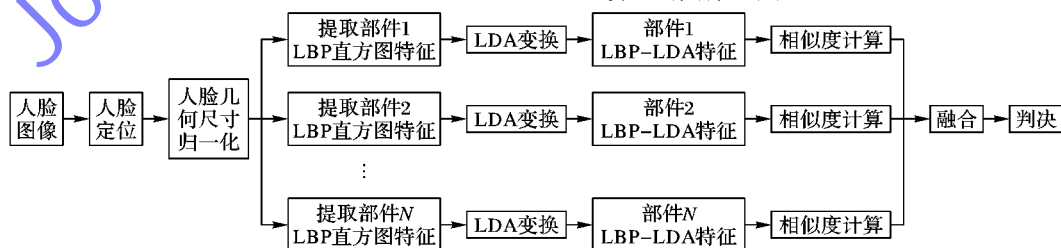


图1 算法流程

首先在图像中完成人脸定位, 找到人脸在图像中的位置; 接下来进行人脸尺寸归一化, 修正位置, 角度带来的偏差, 这里首先定位双眼, 根据双眼坐标通过仿射变换实现人脸尺寸归一化。在归一化后的人脸图像上提取  $N$  个部件的区域 LBP

直方图特征, 进行对应的 LDA 变换, 得到 LBP-LDA 特征, 其中区域数目、区域位置及对应的 LDA 变换矩阵是通过上述训练方法得到的。两张人像图片经过上述步骤得到了各部件的 LDA 变换特征, 采用余弦距离衡量相应部件之间的相似度;

最后通过求和的方式实现相似度融合。当融合后的相似度大于设定阈值时,两张图片中的人为是同一个人,否则为不同的人。

#### 4 本文系统在智能办公系统中的应用

本文将上述基于多部件融合的人脸识别算法用于智能化办公系统的身份认证。采用的人脸识别身份验证系统硬件原理框如图2所示。



图2 系统硬件原理框图

CMOS(Complementary Metal Oxide Semiconductor)摄像头采集视频图像,PC(Personal Computer)机通过通用串行总线(Universal Serial Bus, USB)接口获取CMOS采集的视频图像,部署在PC机上的智能办公系统权限管理软件完成人脸的注册及识别。其中CMOS摄像头选用4 mm镜头,加装940 nm带通滤光片,保证只有波长为940 nm的近红外光能够在图像传感器上成像。在CMOS摄像头周围加装940 nm补光灯,实现主动补光。

智能化办公系统的身份认证与权限管理软件包括人脸注册和人脸识别两部分,如图3~4所示。

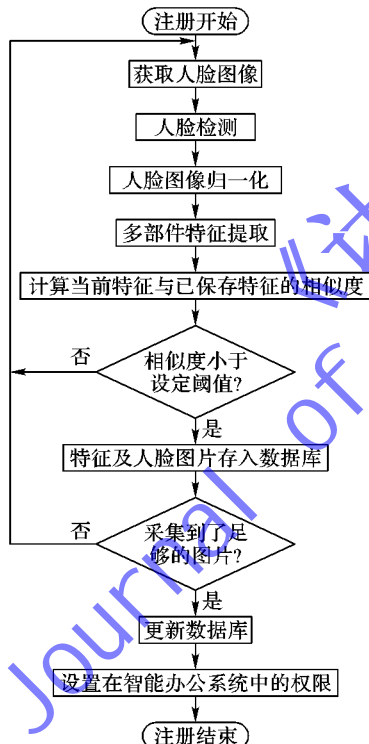


图3 人脸注册流程

人脸注册时要求人脸距离摄像头约50 cm处,人脸尽量和成像平面平行,要求注册人员表情自然,在语音提示下,上下左右轻微转动头部,保证注册程序能够采集到有效的不同角度的图片,以保证后面识别的准确性和对角度的适应性。算法中增加了对采集图片有效性的判断,如果采集的图片与已保存的图片特征相似度较高,说明该图片是冗余的,应该去除;反之则应该保存。

人脸识别同人脸注册的要求基本一致,如果人员已经注册,在人员主动配合的情况下,大约在1 s之内人脸识别成功,

系统将会提示用户登录成功;否则如果5 s内人脸识别未成功,系统将会提示登录失败。

人脸注册成功后,在智能办公系统中为其设置相应权限与资源。当用户想登录智能化办公系统时,只需要启动智能化办公系统,系统的权限管理软件自动快速通过摄像头对人脸进行识别,识别成功后则允许用户登录办公系统,并通过身份信息为用户提供相应的权限和个性化的资源。在用户离开办公电脑后,若忘记退出系统,身份认证定时监控功能将发现用户已离开,自动锁定系统功能,直至用户重新回到电脑前通过人脸认证。

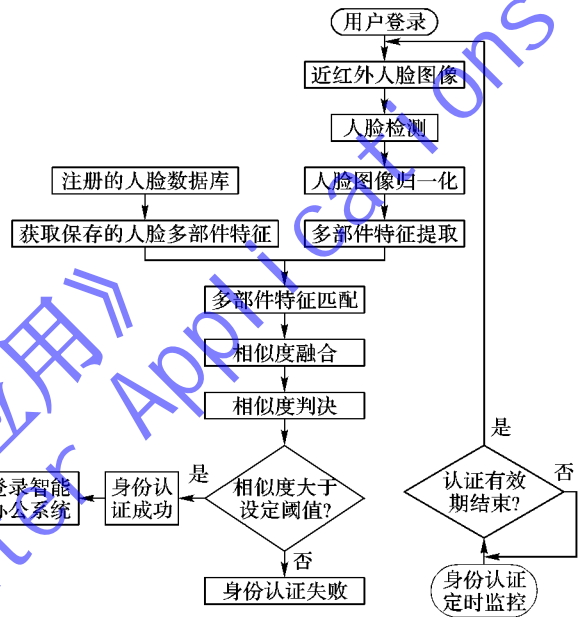


图4 人脸识别流程

#### 5 实验结果

本文设计了三个实验,包括算法参数选择、测试算法在数据库上的性能及测试在智能化办公系统中进行身份验证的性能。

##### 5.1 算法参数选择实验

本文提出的算法涉及到的参数包括人脸图像尺寸、基元部件的尺寸和部件的数目。数据库采用了香港理工大学的PolyU近红外数据库<sup>[18]</sup>。采用了文献[18]中实验二的训练集,该数据集中包含了150个人的1876张图片,将该数据集大致等分为训练子集和测试子集。

##### 1) 图像尺寸的选择。

设定基元部件的尺寸为图像尺寸的1/16,基元部件之间允许50%的重叠,部件的数目固定为15个,部件的最大尺寸为图像尺寸的1/2,对比不同分辨率的图像对识别率的影响,实验结果如图5所示。

图5横轴表示图像尺寸,纵轴表示识别率,从图5中可以看出总体上随着图像尺寸的增大识别率逐渐增加,表明图像尺寸对识别率的影响是较大的,较小的图像尺寸使得基元部件所包含的纹理信息太少,这样组成的部件对细节纹理的描述不够充分,导致识别率下降。但是当图像尺寸大于96×96像素后,继续增加图像尺寸,识别率的提高已经非常有限了,这里选定最佳的图像尺寸为128×128像素。

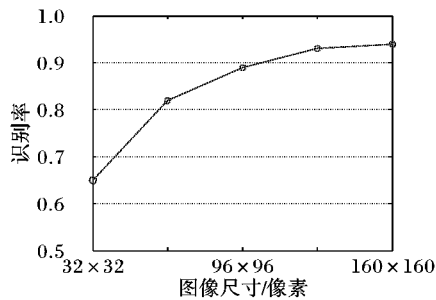


图5 图像尺寸对识别率的影响

## 2) 基元部件尺寸的选择。

设定图像尺寸为  $128 \times 128$  像素, 部件的数目固定为 15 个, 部件的最大尺寸为图像尺寸的  $1/2$ , 基元部件之间允许 50% 的重叠, 对比基元部件的不同尺寸对图像识别率的影响, 实验结果如图 6 所示。

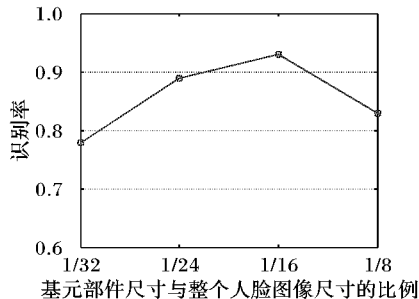


图6 基元部件尺寸对识别率的影响

图 6 中横轴表示基元部件尺寸与整个人脸图像尺寸的比例, 纵轴表示识别率, 从图中可以基元部件的尺寸对识别率的影响也是较大的, 因为基元部件特征采用了直方图统计特征, 如果基元部件尺寸较小, 则包含的纹理信息较少, 对图像局部细小的变化很敏感, 失去了直方图统计的优势; 如果基元部件尺寸太大, 基元部件的 LBP 直方图特征的鉴别能力将减弱, 从图 6 可以看出最优的基元部件尺寸为人脸图像的  $1/16$ 。

## 3) 部件数目的选择。

设定图像尺寸为  $128 \times 128$  像素, 基元部件尺寸为图像的  $1/16$ , 基元部件之间允许 50% 的重叠, 部件的最大尺寸为图像尺寸的  $1/2$ , 分析图像识别率随部件数目增加的变化关系, 实验结果如图 7 所示。

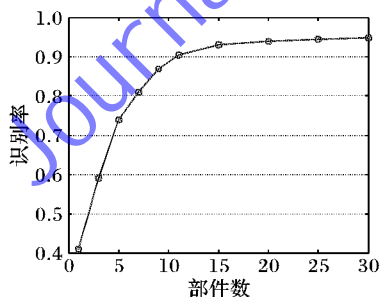


图7 识别率随部件数目增加的变化曲线

图 7 中横轴表示部件的数目, 纵轴表示识别率, 从图中可以看出随着部件数目的增加识别率单调上升, 这是因为本文采用贪婪搜索算法进行部件的选择, 选出的部件总是能够提升当前状态下的识别率。当部件数目大于 20 之后, 识别率趋于稳定。考虑到识别率和计算效率的折中, 选定最佳的部件数目为 20。

## 4) 部件的空间分布。

本文方法选出的前 5 个部件在平均脸上的分布如图 8 所示, 可以看出选出的部件主要集中在眼眉、鼻、嘴部区域, 说明这些区域具备较强的辨别能力。

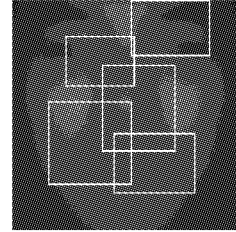


图8 前5个部件的空域分布

## 5.2 算法性能验证实验

为了验证算法的性能, 本文在两个数据库上进行了测试: 一个是上一节用到的香港理工大学的 PolyU 近红外数据库; 另一个是自制的近红外数据库。其中 PolyU 数据库仍然采用了文献[18]中提到的实验二的协议作为测试协议, 实验二的训练集中包含了 150 个人的 1876 张图片, 原型集和探测集分别包含 1159 张和 4747 张图片。自制的近红外数据库包含了 100 个人, 每人 10 张, 共 1000 张图片, 每人的 10 张图片中包含了拍摄距离、表情、光照、角度的变化。将其中的 80 个人, 每人 10 张作为训练集, 共 800 张。在剩余的 20 人中, 每个人随机抽取 4 张图片作为原型集, 共 80 张, 剩余的 6 张图片作为探测集, 共 120 张。其中图片通过预先标定的双眼坐标位置按照比例关系截取人脸区域, 对人脸区域进行尺寸归一化, 归一化后的人脸图像大小为  $128 \times 128$  像素。算法参数设定按照上一节的实验配置。本文选用了文献[11]和文献[15]提出的算法作为对比算法, 文献[11]采用全图像 Gabor 特征结合 LDA 变换, 是典型的基于整体的识别算法, 为了方便后面描述, 简称为 GFC (Gabor Fisher Classifier)。文献[15]通过人脸固定的比例尺寸截取裸脸、眼眉、眼、鼻、嘴五个部件, 每个部件采用 Gabor 特征结合主成分分析 (Principal Component Analysis, PCA) 变换, 由于作者没有给出特征加权求和的权值, 这里采用和本文类似的简单求和的方式, 该方法简称为 GMMP-PCA (Gabor MultiModal Part face recognition method based on Principal Component Analysis)。为了测试部件固定方式划分和统计方式划分的性能差异, 本文增加了一套算法作为对比测试, 该算法和本文提出的算法类似, 但是采用固定方式划分部件, 将图像等分为  $8 \times 8$  个子块, 每个子块视为一个部件, 其他部分保持一致, 该方法简称为 FPC-LDA (Fixed Partitioning Component face recognition method based on Linear Discriminant Analysis)。

得到实验结果如表 1 所示。

表 1 不同识别方法的识别率 %

测试算法	PolyU 数据库	自制数据库
GFC	92.7	85.9
GMMP-PCA	93.5	83.7
FPC-LDA	94.2	88.2
本文方法	97.3	91.2

从表 1 中可以看出, 本文的方法明显优于基于整体的方

法,同时优于固定分块和手工选定部件的方法。由于数据库中的图片包含了人脸表情、姿态的变化,因此多部件融合的方法对人脸表情、姿态变化的容忍性更强。

### 5.3 应用验证实验

该实验由20个人参与,其中10个人进行人脸注册,作为身份合法人员,另外10个人没有进行人脸注册,充当冒名顶替者。测试时间为一个星期,每天不同的时段(早、中、晚),20个人轮流进行2~3次测试。在人员主动配合的情况下如果5s内系统能够完成人脸匹配,则说明身份验证成功,否则身份验证失败,得到实验数据如表2所示。

表2 应用验证实验

测试人员	人员数目	身份验证成功次数	身份验证失败次数	判断正确率/%
合法人员	10	455	5	98.9
冒名顶替者	10	1	635	99.8

从表2可以看出,该身份验证系统具有较高的识别精度。

## 6 结语

本文在智能化办公系统的工作流中引入人脸签名身份认证技术,提出使用基于多部件融合的人脸识别算法对智能化办公的参与者进行基于人脸识别的身份认证技术。实验证明该算法在实际应用中有较好的识别精度,能够有效确保工作流中信息传输的机密性和安全性,防止使因电脑遭受木马、密码被盗、用户密码泄漏或用户忘记登出系统而对整个办公系统造成安全隐患。

### 参考文献:

- [1] LI S, CHU R, LIAO S, *et al.* Illumination invariant face recognition using near-infrared images [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2007, 29(4): 627–639.
- [2] ZHAO S, GRIGAT R R. An automatic face recognition system in the near infrared spectrum [C]// *Proceedings of the 4th International Conference on Machine Learning and Data Mining in Pattern Recognition*. Berlin: Springer-Verlag, 2005: 437–444.
- [3] SHEN L, HE J, WU S, *et al.* Face recognition from visible and near-infrared images using boosted directional binary code [C]// *Proceedings of the 7th International Conference on Advanced Intelligent Computing Theories and Applications*. Berlin: Springer-Verlag, 2011: 404–411.
- [4] TURK M, PENTLAND A. Eigenfaces for recognition [J]. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1991, 3(1): 71–86.
- [5] BELHUMEUR P N, HESPERANHA J P, 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.
- [6] MOGHADDAM B, JEBARA T, PENTLAND A. Bayesian face recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2000, 33(11): 1771–1782.
- [7] AHONEN T, HADID A, PIETIKÄINEN A. Face recognition with local binary patterns [C]// *Proceedings of the 8th European Conference on Computer Vision*. Berlin: Springer-Verlag, 2004: 469–481.
- [8] ZHANG W, SHAN S, GAO W, *et al.* Local Gabor Binary Pattern Histogram Sequence (LGBPHS): a novel non-statistical model for face representation and recognition [C]// *ICCV '05: Proceedings of the 10th International Conference on Computer Vision*. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2005, 1: 786–791.
- [9] MATURANA D, MERY D, SOTO A. Learning discriminative local binary patterns for face recognition [C]// *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition and Workshops*. Piscataway: IEEE Press, 2011: 470–475.
- [10] LEI Z, LIAO S, PIETIKÄINEN M, *et al.* Face recognition by exploring information jointly in space, scale and orientation [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2011, 20(1): 247–256.
- [11] LIU C, WECHSLER H. Gabor feature based classification using the enhanced Fisher linear discriminant model for face recognition [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2002, 11(4): 467–476.
- [12] SU Y, SHAN S, CHEN X, *et al.* Patch-based Gabor Fisher classifier for face recognition [C]// *Proceeding of the 2006 18th International Conference on Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2006, 2: 528–531.
- [13] LEI Z, LIAO S, LI S Z. Efficient feature selection for linear discriminant analysis and its application to face recognition [C]// *Proceedings of the 2012 21st International Conference on Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 2012: 1136–1139.
- [14] PENTLAND A, MOGHADDAM B, STARNER T. View-based and modular eigenspaces for face recognition [C]// *Proceedings of the 1994 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway: IEEE Press, 1994: 84–91.
- [15] SU G. Face recognition system designed to integrate multiple techniques [J]. *CAAI Transactions on Intelligent Systems*, 2009, 4(6): 471–474. (苏光大. 多技术合力的人脸识别系统设计[J]. *智能系统学报*, 2009, 4(6): 471–474.)
- [16] EKENEL H K, STIEFELHAGEN R. Local appearance based face recognition using discrete cosine transform [C]// *Proceedings of the 13th European Signal Processing Conference*. New York: Curran Associates, 2005: 2484–2488.
- [17] GOTTUMUKKAL R, ASARI V K. An improved face recognition technique based on modular PCA approach [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2004, 25(4): 429–436.
- [18] ZHANG B, ZHANG L, ZHANG D, *et al.* Directional binary code with application to PolyU near-infrared face database [J]. *Pattern Recognition Letters*, 2010, 31(14): 2337–2344.
- [14] KIM J-K, ZHANG B-T. Evolving hypernetworks for pattern classification [C]// *Proceedings of the 2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway: IEEE Press, 2007: 25–28.
- [15] LIU L, WONG A K C, WANG Y. A global optimal algorithm for class-dependent discretization of continuous data [J]. *Intelligent Data Analysis*, 2004, 8(2): 151–170.
- [16] TANG Y, ZHANG Y-Q, CHAWLA N V, *et al.* SVMs modeling for highly imbalanced classification [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, 39(1): 281–288.
- [17] WU G, CHANG E Y. KBA: kernel boundary alignment considering imbalanced data distribution [J]. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 2005, 17(6): 786–795.
- [18] LIU X-Y, WU J, ZHOU Z-H. Exploratory undersampling for class-imbalance learning [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 2009, 39(2): 539–550.

(上接第1340页)