

色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的彩色人脸识别

崔法毅

(燕山大学 河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 色彩提供了比灰度更为丰富的信息, 鉴于彩色人脸图像所包含的鉴别信息远多于灰度人脸图像, 将色度马氏距离图引入彩色人脸识别中。基于 YCbCr 颜色空间, 分离彩色人脸图像的色度与亮度信息, 构建出基于色度信息的马氏距离图, 同时分离出基于亮度信息的灰度图。提出一种色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的人脸识别算法。分别构造出色度马氏距离图与灰度图的基于小波包结点能量的归一化特征向量, 采用多种融合策略进行特征融合, 并根据融合效果自适应地选取特征融合参数, 构造出最佳的鉴别特征向量, 实现色度与亮度特征的互补。使用基于方差相似度的分类器获得人脸识别结果。实验表明: 该算法识别率高、鲁棒性好。

关键词: 彩色人脸识别; 色度马氏距离图; YCbCr 颜色空间; 小波(包)变换; 自适应特征融合
中图分类号: TP391.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)04-1382-08

Color face recognition using adaptive feature fusion based on chroma mahalanobis distance map and gray map

Cui Fayi

(Hebei Province Key Laboratory of Measurement Technology and Instrumentation, Yanshan University,
Qinhuangdao 066004, China)

Abstract: The color provides much more information than the gray. Considering that the color facial image contains much more identification information than the gray facial image, the chroma Mahalanobis distance map was introduced into color face recognition. Based on the YCbCr color space, the information of chroma and brightness for one color facial image can be separated. Then Mahalanobis distance maps based on chroma information were constructed, at the same time, gray maps based on brightness information can be extracted by original color facial images. An algorithm for color face recognition using adaptive feature fusion based on chroma Mahalanobis distance map and gray map was presented. Based on energy values of wavelet packet sub-nodes, normalized feature vectors of chroma Mahalanobis distance maps and gray maps were constructed, respectively. Then identification feature vectors were constructed using several feature fusion methods, and fusion parameters were selected adaptively according to fusion effects. So feature complementation of chroma and brightness was achieved. Results of face recognition were obtained by the classifier based on the variance similarity degree. Experiments show that the algorithm has the characteristics of high recognition rate and good

收稿日期: 2014-08-05; 修订日期: 2014-09-15

基金项目: 秦皇岛市科学技术研究与发展计划(2012021A004)

作者简介: 崔法毅(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事计算机视觉、模式识别、嵌入式系统设计方面的研究。Email: fayi2001@sina.com

robustness.

Key words: color face recognition; chroma Mahalanobis distance map; YCbCr color space; wavelet (packet) transform; adaptive feature fusion

0 引言

当前,全球恐怖主义势力日益蔓延,跨国恐怖组织制造的恶性事件不断发生,极大地破坏了地区稳定和社会经济发展,并对世界和平与安全带来恶劣影响。鉴于人脸图像识别技术在反恐等公共安全领域中的重大现实意义以及现有人脸图像识别算法与实际应用要求之间的较大现实差距,文中从人脸识别特征选取和多特征自适应融合策略两个方面展开研究,提出一种色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的人脸识别算法。

诸多人脸识别技术都是依据生物视觉系统发展起来的,而人的视觉系统恰恰利用了颜色信息。现实世界中,人眼能够分辨的颜色至少有数千种,而鉴别绝对亮度的能力大约只有 10~15 级灰度^[1],可见彩色人脸图像所包含的鉴别信息要远多于灰度人脸图像。Yip 等曾指出当图像的其他特征(如分辨率)衰退时,颜色信息对于人脸识别的意义更加突显^[2]。事实上,在实际环境中所获取的人脸图像通常是彩色的,这些色彩提供了比灰度更为丰富的信息。如果在利用人脸图像反映其形状结构特征的灰度信息的同时充分利用其彩色信息,则可以获取更多反映不同人脸间差异性的鉴别信息,是进一步提高识别系统性能的关键。具体到彩色人脸图像的识别特征选取问题,肤色特征是一种很好的人脸识别特征,它不依赖于面部细节特征,不受人脸部分遮挡等影响,对于旋转、姿态、表情等变化具有相对的稳定性,并且和大多数背景物体的颜色相区别。肤色在某些颜色空间中具有良好的类聚性,即只聚集在整个颜色空间很小的一块空间内,满足一定的分布律,比如高斯分布。不同肤色的人种,或者同一个人不同亮度的光线下得到的彩色图像,虽然看起来肤色差别很大,但研究表明差别主要由亮度信息的不同所引起,而不是色度信息,即色度上的差异远小于亮度上的差异^[3]。使用肤色特征前,首先要选择特定的颜色空间,不同的颜色空间,人的皮肤可能表现出不同的特征。在

YCbCr 颜色空间中,明确区分了色度与亮度信息,皮肤颜色具有良好的类聚性,肤色分布受亮度变化影响小,能较好的区分肤色区域^[4]。

彩色信息的描述方式是阻碍其用于人脸识别的重要原因之一。早期的彩色人脸识别方法多数并不是直接对彩色人脸图像进行处理,而是采取以下 3 种方式处理:(1)认为一幅彩色图像的各个分量之间是相互独立的,对各个彩色分量分别进行处理,最后综合 3 个分量上的结果;(2)利用某种变换将彩色图像转换为灰度图像,再对灰度人脸图像进行处理;(3)将彩色图像的 3 个分量各自组成列矢量,再以首尾相连的方式排列成长矢量进行处理。然而,这三种处理方式均在一定程度上缺乏理论依据,人为地将 3 个彩色分量分开处理势必会对图像本身的信息结构造成影响。

事实上,对于实际图像而言,不同彩色分量之间具有较强的相关性。1996 年,Pei 首次提出了彩色图像的四元数模型^[5],用四元数来表示 1 个像素,由于四元数空间中的 3 个虚轴相互正交,而且并没有实质上的不同,Pei 在 RGB 颜色空间中将 1 个像素的 R、G、B 值赋给一个纯四元数的 3 个虚部,这样就用 1 个三维向量很好地表示了彩色像素,解决了如何从数学上同时利用灰度信息和彩色信息的问题,且充分考虑了 R、G、B 三分量之间的相关性。2003 年,Pei 又给出了对四元数矩阵奇异值分解的方法,并成功提取了彩色图像的奇异值特征向量^[6]。此后,四元数模型算法不断得以改进,算法的识别率与鲁棒性得到一定程度的提高,但对于彩色像素的四元数处理方式,并没有从统计学意义上清楚地解释组合量的物理含义,也未能从理论上证明该方法较传统方法的优越性。

文中基于 YCbCr 颜色空间,对 Essex 大学 faces94 人脸图像库中的彩色图像实现了色度与亮度信息的分离,构建出基于色度信息的马氏距离图,同时分离出基于亮度信息的灰度图。鉴于色度与亮度分量具有不同的特性(如分布特性,对光照、姿态、表

情变化的鲁棒性等),包含着不同的人脸信息,将二者分离能够避免两类信息的相互干扰;同时,由色度与亮度分量分别构造特征向量再进行特征融合,能够实现特征互补,有利于提高算法的识别精度与鲁棒性。文中通过对色度马氏距离图与灰度图特征的自适应融合来构造人脸识别特征。对色度马氏距离图与灰度图均进行小波包分解,分别构造基于小波包结点能量的归一化特征向量,并采用多种融合策略进行特征融合,实现特征互补。根据融合效果自适应地选取特征融合参数,构造出最佳鉴别特征向量。采用基于方差相似度的模式分类器获得人脸识别结果。

1 色度马氏距离图

1.1 马氏距离

马氏距离(Mahalanobis Distance)是多元数理统计理论中一种常用的判别分析方法,也是模式识别中一种有效的相似性测度,具有平移不变性、旋转不变性和仿射不变性。其定义为:

若总体 G 可分为 k 类,即 G_1, G_2, \dots, G_k , 假设 G_i 类的均值和协方差分别为 μ_i 和 C_i , 设 $X=(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 是从 G_i 中抽取的样本, 记

$$D^2(X, \mu_i) = (X - \mu_i)^T C_i^{-1} (X - \mu_i) \quad (1)$$

若定义 X 与 G_i 类的距离 $D^2(X, G_i)$ 为 X 与均值 μ_i 的距离 $D^2(X, \mu_i)$, 则 $D^2(X, \mu_i)$ 即为马氏距离。有时, 也记为:

$$D(X, \mu_i) = \sqrt{(X - \mu_i)^T C_i^{-1} (X - \mu_i)} \quad (2)$$

由定义可以看出: 马氏距离是在多变量正态分布概率密度函数的假设下推导出来的。因此, 如果样本的分布服从多变量正态分布, 马氏距离被认为是一个合适的测度指标。与欧式距离相比, 马氏距离使用了向量之间的协方差, 消除了向量之间各个指标间的相互影响, 其数值反映了点集分布的相关信息, 常用于多属性的综合评价。

由于肤色图像的各个特征参数可能具有不同的量纲, 采用传统的欧氏距离判别会导致变差大的特征量在距离中的贡献大, 影响肤色图像识别的正确性。而马氏距离与各变量所用单位无关, 适用于具有不同类型特征参数的分类问题。因此采用马氏距离作为距离度量标准, 以此构建彩色人脸图像的色度马氏距离图。

1.2 色度马氏距离图的构建

日常生活中采集的数码照片多为 RGB 格式, 在 RGB 颜色空间中, 三基色 R、G、B 不仅代表颜色, 还表示亮度, 由于彩色人脸图像中皮肤的色彩表现对亮度较为敏感, 所以, RGB 颜色空间不适合作为肤色模型。

在亮度和色度信息分离的 YCbCr 颜色空间中, Y 表示亮度分量, Cb、Cr 分别表示蓝色与红色的色度分量。RGB 空间到 YCbCr 空间的转换公式为:

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.2990 & 0.5870 & 0.1140 \\ -0.1687 & -0.3313 & 0.5000 \\ 0.5000 & -0.4187 & -0.0813 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $R, G, B \in [0, 255]$, $Y \in [0, 255]$, $Cb, Cr \in [-128, 127]$ 。

在 YCbCr 颜色空间中, 由色度分量 Cb 与 Cr 构成的二维平面上, 肤色分布相对比较集中, 可用高斯分布函数来描述。设 $C=[Cb \ Cr]^T$ 为输入像素的色度向量, 则肤色的概率分布为:

$$\begin{cases} P(C|\text{skin}) = \frac{e^{-Z}}{2\pi|C_s|^{1/2}} \\ Z = -\frac{1}{2}(C - \mu_s)^T C_s^{-1} (C - \mu_s) \\ \mu_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N C_i \\ C_s = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (C_i - \mu_s)(C_i - \mu_s)^T \end{cases} \quad (4)$$

式中: μ_s 为均值向量; C_s 为协方差矩阵; N 表示输入像素的总数。概率值 $P(C|\text{skin})$ 可直接作为皮肤色度的可能性度量, 也可以将从色度向量 C 到均值向量 μ_s 的马氏距离作为皮肤色度的可能性度量, 即

$$D(C, \mu_s) = (C - \mu_s)^T C_s^{-1} (C - \mu_s) \quad (5)$$

由公式(5)得到的图像各像素点的马氏距离 $D(C, \mu_s)$ 构成的图像称为该图像的马氏距离图。

2 彩色人脸图像识别特征的构造

2.1 基于小波包结点能量的特征向量提取

假设共有 N 幅 $m \times n$ 的彩色人脸图像, 分别转化为基于色度信息的马氏距离图 D_1, D_2, \dots, D_N 与基于亮度信息的灰度图 Y_1, Y_2, \dots, Y_N 。若直接使用 D_i 或 Y_i 作为特征矩阵用于人脸识别, 由于矩阵规模过大使得算法耗时很长。文中采用参考文献[7]提出的基于小波包结点能量的特征向量构造方法, 对 D_i 与 Y_i

分别进行小波包分解,以各尺度下的不同频率分量子结点的能量作为各个频率分量子结点的特征。将色度马氏距离图 D_i 的归一化特征向量表示为 T_{D_i}' , 灰度图 Y_i 的归一化特征向量表示为 T_{Y_i}' 。

2.2 色度马氏距离图与灰度图的特征融合策略及自适应权值选取方案

理论上,由于色度马氏距离图去除了照度分量而充分利用了色度信息,相对于灰度图而言,可减小外界光照的影响;而灰度图富含着人脸表情信息及结构特征;若将二者有效的融合,充分利用两种信息的优势,能够实现特征互补,有利于提高算法的识别精度与鲁棒性。因此,以下重点讨论色度马氏距离图与灰度图特征的自适应融合问题。

如公式(6)~(8)所示,提出三种特征融合策略对 T_{D_i}' 与 T_{Y_i}' (均为列向量)进行融合,并根据后续实验对每种策略进行验证与分析。

$$T_{\text{fuse}}' = \frac{N(T_{D_i}')}{\alpha \cdot N(T_{D_i}') + (1-\alpha) \cdot N(T_{Y_i}')} \quad (6)$$

$$T_{\text{fuse}}' = \frac{N(T_{D_i}')}{\text{norm}(\alpha \cdot N(T_{D_i}') + (1-\alpha) \cdot N(T_{Y_i}'))} \quad (7)$$

$$T_{\text{fuse}}' = \frac{N(T_{D_i}')}{\text{norm}(\alpha \cdot N(T_{D_i}') \cdot (N(T_{D_i}'))^T + (1-\alpha) \cdot N(T_{Y_i}') \cdot (N(T_{Y_i}'))^T)} \quad (8)$$

式中: α 为权值参数, $0 \leq \alpha \leq 1$; $N(\cdot)$ 表示归一化算子,强调 T_{D_i}' 与 T_{Y_i}' 为归一化特征向量; $\text{norm}(\cdot)$ 表示求解范数。

权值参数 α 可根据实验自适应地选取。 α 将从 0 开始,以 h 为步长一直增加到 1,每一个 α 值对应一组融合特征向量 T_{fuse}' 。可根据实验自适应地选取峰值识别率所对应的 α 值或 α 值区间。

3 实验结果与分析

实验采用 Essex 大学彩色人脸图像库的 faces94 子库用于实验,共 3 060 幅图像,由 153 个人,每人 20 幅 200×180 的正面彩色人脸图像构成;图像库中的人脸图像在人脸位置、光照和表情方面有一定的变化,其中一些人戴有眼镜或留有胡须。使用基于方差相似度的分类器^[7],将某测试人脸图像归类于与其方差相似度值最大且超过某一设定阈值的人脸类中,获得人脸正确识别率。

3.1 色度马氏距离图的获取实验

由公式(5)构建色度马氏距离图时,均值向量 μ_c 与协方差矩阵 C_c 有两种计算方式:(1) 根据一幅人

脸图像自身像素色度向量进行计算;(2) 根据训练样本集中一类人脸所有图像像素色度向量进行计算。

图 1 给出了 faces94 人脸库中的一类人脸原始图像及其色度马氏距离图,第 1 行为原始图像,第 2、3 行分别为由方式(1)、方式(2)获得的色度马氏距离图。

由图 1 可以看出:色度马氏距离图有效去除了背景无用信息,突显了面部区域,且不依赖于面部细节特征,对光照、姿态、表情等变化的鲁棒性好,具有相对的稳定性;由方式(1)和方式(2)计算得到的 T_{D_i}' 与 T_{Y_i}' 虽然有所差别,但由此构建的两种色度马氏距离图从视觉上基本分辨不出差异,而对于人脸识别结果的影响由后续实验进行分析。

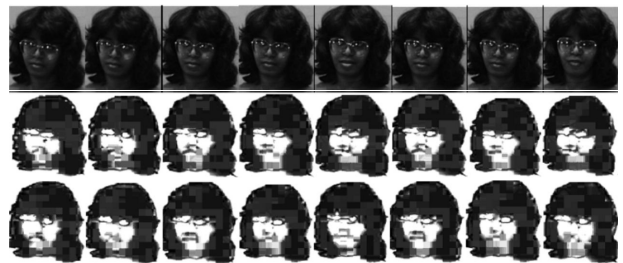


图 1 一类人脸的原始图像及其色度马氏距离图

Fig.1 One class of original facial images and their chroma Mahalanobis distance maps

然而,在上述直接使用高像素原始图像构建色度马氏距离图的过程中,由于基于像素点与均值点之间马氏距离的计算过程,计算量太大。因此,在构建色度马氏距离图之前,可先采用小波分析法对原始图像进行压缩。小波压缩过程为:对彩色索引图像矩阵进行二进小波多层分解后,将低频近似的系数矩阵作相应的截取处理,并优化索引图像的颜色图^[8]。

图 2 给出了 faces94 人脸库中的部分原始图像



图 2 原始图像及其色度马氏距离图所对应的小波压缩图像

Fig.2 Original images, chroma Mahalanobis distance maps and their compressed images

及其色度马氏距离图所对应的小波压缩图像,第 1、2 行分别为原始图像及其小波压缩图像,第 3、4 行分别为由方式 1 获得的色度马氏距离图及其小波压缩图像。显然,小波压缩图像在像素明显降低的同时最大程度地保留了人脸的原始特征。

3.2 仅使用色度马氏距离图特征的人脸识别实验

重点考察样本/测试图像集的选取、相似度阈值的大小、原始图像是否经过小波压缩以及色度马氏距离图的构建方式对正确识别率的影响,结果如表 1 所示。实验采用交叉选取的方式确定样本/测试图像集,即对于每个人,以偶数幅图像作为训练样本图像而奇数幅图像作为测试图像(简称方案 1),或者以奇数幅图像作为训练样本图像而偶数幅图像作为测试

图像(简称方案 2)。前面提到:由方式 1 和方式 2 计算得到的与虽然有所差别,但构建的两种色度马氏距离图从视觉上基本分辨不出差异。本实验则验证了两种方式对人脸识别率的影响。

由表 1 可以看出:当使用未经压缩的原始图像用于构建色度马氏距离图以及后续识别过程时,图像集的两种选取方案以及色度马氏距离图的两种构建方式对识别率影响不大,人脸的正确识别率普遍较高,只是当相似度阈值大于 0.99 后,识别率有明显降低的趋势;当使用小波压缩图像用于构建色度马氏距离图以及后续识别过程时,图像集的两种选取方案以及色度马氏距离图的两种构建方式对识别率有一定影响,而相似度阈值对识别率影响较

表 1 样本集与相似度阈值的选取对人脸识别率的影响

Tab.1 Face recognition rates using different sets of sample images and threshold values of variance similarity degree, respectively

Sample/test image set selection	Option 1					Option 2				
	All the even images as the training sample image		All the odd images as the test image			All the odd images as the training sample image		All the even images as the test image		
Threshold values of similarity degree	0.90	0.95	0.97	0.99	0.999	0.90	0.95	0.97	0.99	0.999
Recognition rate(uncompressed+mode1)	100%	100%	99%	92%	71%	100%	100%	100%	93%	66%
Recognition rate(uncompressed+mode2)	100%	100%	100%	96%	64%	100%	100%	100%	99%	54%
Recognition rate (wavelet compressed+mode1)	97%	91%	81%	45%	7%	94%	86%	80%	47%	11%
Recognition rate (wavelet compressed+mode2)	100%	93%	83%	50%	1%	96%	87%	77%	40%	4%

注:(1)“uncompressed”、“wavelet compressed”分别表示使用未经压缩的原始图像或经过小波压缩的压缩图像用于人脸识别实验。

(2)“mode1”、“mode2”分别表示构建色度马氏距离图时采用方式 1 或方式 2 计算均值向量与协方差矩阵。

(3)本实验中,色度马氏距离图的归一化特征向量维数,即采用尺度 1 下的 4 个小波包结点能量值构造特征向量。

大,识别率随相似度阈值的增大不断下降。

需要说明的是:实验中色度马氏距离图的归一化特征向量维数,即采用尺度 1 下的 4 个小波包结点能量值按顺序构造特征向量。由于尺度 1 下超过 98% 的能量集中于第 1 个低频子结点,剩余能量分布于后 3 个子结点,因此特征向量中的特征值区分度好,而且低维数(4 维)特征向量有利于提高算法的识别效率,算法的识别率也不错,说明这种基于尺度 1 下的小波包结点能量值构造出的特征向量鉴别性较好。

实验结果表明,使用色度马氏距离图特征的人脸识别算法对人脸姿态和光照变化具有很好的鲁棒性,完全消除了背景影响,有效克服了眼镜、头发、胡须等面部遮挡对人脸识别的影响。图 3 给出了 faces94 人脸库中一些配戴眼镜的人脸图像示例。



图 3 配戴眼镜的人脸图像示例

Fig.3 Facial images wearing glasses

由于色度马氏距离图的构建过程基于像素点与均值点之间马氏距离的计算,直接使用原始图像的算法耗时是使用小波压缩图像算法耗时的 10 倍左右;但使用小波压缩图像用于构建色度马氏距离图以及后续的识别工作时,在较高的相似度阈值条件下正确识别率一般,而且稳定性不好。综合考虑算法的实时性与实用性,需要使用压缩图像,同时需要研究提高基于彩色压缩图像算法识别率的方法——色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的人脸识别算法。

3.3 色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的人脸识别实验

色度马氏距离图与灰度图特征的自适应融合关键在于提出合理的融合策略。下面采用三种特征融合策略,并自适应选取融合参数 α ,最终确定出峰值识别率所对应的 α 值区间。实验中,均采用方式(1)构建色度马氏距离图,均采用方案1选取样本/测试图像集。

(1) 采用如公式(6)所示的特征融合方法

$$T_{\text{fuse}}' = \frac{\alpha \cdot N(T_D')}{\alpha \cdot N(T_D') + (1-\alpha) \cdot N(T_Y')}$$

最初公式(6)考虑的是 $T_{\text{fuse}}' = \frac{\alpha \cdot N(T_D')}{\alpha \cdot N(T_D') + (1-\alpha) \cdot N(T_Y')}$ 形式,但发现当 $\alpha=0$ 时 $T_{\text{fuse}}' = 0$,产生端点误差。随后修正为 $T_{\text{fuse}}' = \frac{(\alpha+\varepsilon) \cdot N(T_D')}{\alpha \cdot N(T_D') + (1-\alpha) \cdot N(T_Y')}$ (ε 表示非常小、并趋近于0的正值常数),但实验发现该修正形式在 α 趋于1附近发生识别率突降现象,还是存在端点误差。又考虑仅当 $\alpha=0$ 时,令 $\alpha=\varepsilon$,当 $\alpha \neq 0$ 时, α 保持原值,虽然 $\alpha \sim r$ 曲线没有端点误差,但 $\alpha=0$ 处的点实际不存在,而且 T_{fuse}' 随 α 值波动很大。最后直接将公式(6)修正为 $T_{\text{fuse}}' = \frac{N(T_D')}{\alpha \cdot N(T_D') + (1-\alpha) \cdot N(T_Y')}$,实验发现不但 $\alpha \sim r$ 曲线端点处不失真,而且 T_{fuse}' 相对稳定,不会随 α 值有太大的波动。

图4给出了相似度阈值 door 取不同值时所对应的 $\alpha \sim r$ 曲线。总体上,识别率随着 door 值的增加明显降低,而且随着 α 值由0~1变化逐步上升至100%,并能够在比较宽的 α 值区间内稳定在100%。

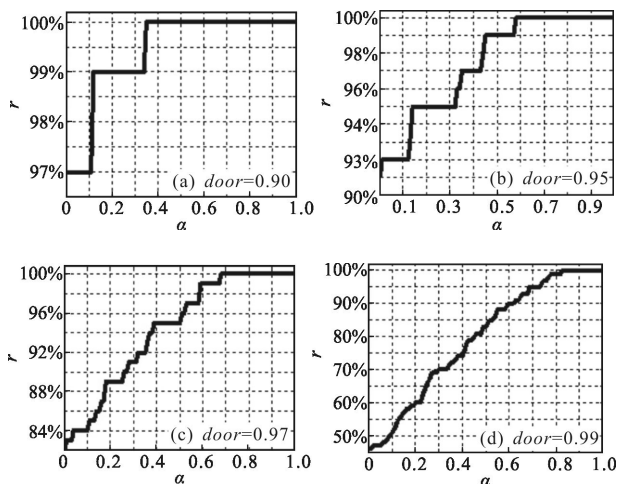


图4 特征融合方法采用公式(6)时所获得的 $\alpha \sim r$ 曲线

Fig.4 Curve of $\alpha \sim r$ obtained by feature fusion method using formula (6)

作为一种特征融合方法,只需将 α 设定于一定的区间,即能够获得稳定的100%的识别率,如表2所示,这是成功的;但是,公式(6)采用了矩阵相除的方式, α 值的大小与色度马氏距离图特征 T_D' 的贡献之间的关系不容易明确。

表2 100%识别率所对应的 α 值区间

Tab.2 α value interval corresponding to 100% recognition rate

Threshold values of similarity degree	0.90	0.95	0.97	0.99
Value field of α	[0.35, 1]	[0.58, 1]	[0.68, 1]	[0.83, 1]

(2) 采用如公式(7)所示的特征融合方法

公式(7)不再是矩阵相除的形式,其分母替换成了范数值,灰度图特征 T_Y' 只起到调节作用,则色度马氏距离图特征 T_D' 的贡献对识别率有重要的影响。图5给出了相似度阈值 door 取不同值时所对应的 $\alpha \sim r$ 曲线。表3给出了不同 door 值条件下所获得的峰值识别率及其对应的 α 值区间范围。

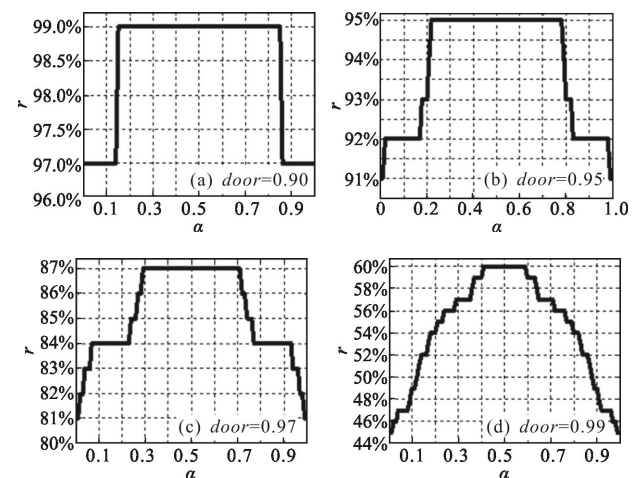


图5 特征融合方法采用公式(7)时所获得的 $\alpha \sim r$ 曲线

Fig.5 Curve of $\alpha \sim r$ obtained by feature fusion method using formula (7)

表3 峰值识别率及其对应的 α 值区间

Tab.3 α value interval corresponding to peak recognition rate

Threshold values of similarity degree	0.90	0.95	0.97	0.99
Peak value of recognition rate	99%	95%	87%	60%
Value field of α	[0.15, 0.85]	[0.22, 0.78]	[0.29, 0.71]	[0.41, 0.59]

(3) 采用如公式(8)所示的特征融合方法

为了提高峰值识别率,将公式(8)分母中的范数作了改动。图 6 给出了相似度阈值 door 取不同值时所对应的 $\alpha \sim r$ 曲线。表 4 给出了不同 door 值条件下所获得的峰值识别率及其对应的 α 值区间范围。

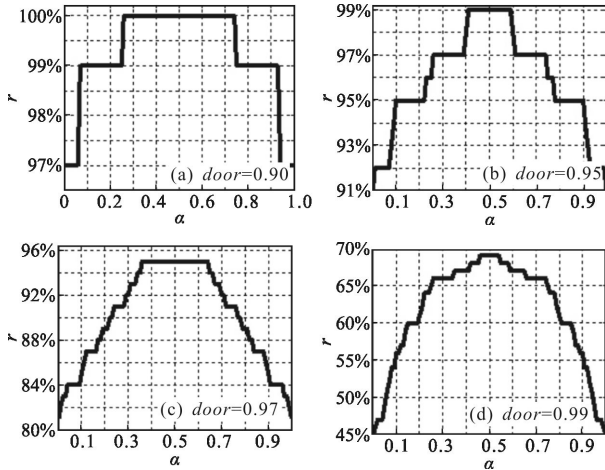


图 6 特征融合方法采用公式(8)时所获得的 $\alpha \sim r$ 曲线

Fig.6 Curve of $\alpha \sim r$ obtained by feature fusion method using the formula (8)

表 4 峰值识别率及其对应的 α 值区间

Tab.4 α value interval corresponding to peak recognition rate

Threshold values of similarity degree	0.90	0.95	0.97	0.99
Peak value of recognition rate	100%	99%	95%	69%
Value field of α	[0.26, 0.74]	[0.41, 0.59]	[0.36, 0.64]	[0.46, 0.54]

(4) 实验结果对比分析

上述实验结果表明,采用如公式(8)所示的特征融合方法对提高彩色压缩图像的识别率最为有效,为了说明识别率的提高程度,现将表 4 中的峰值识别率与表 1 中相应部分的识别率进行对比,如表 5 所示。显然,通过采用如公式(8)所示的特征融合方法,基于彩色压缩图像的人脸识别率明显提高。

鉴于图 6 中曲线的对称性,同时峰值识别率只出现于对称中心区域,不妨在特征融合时选定融合参数 $\alpha=0.5$ 。实验发现,如果色度马氏距离图基于压缩图像构建而灰度图直接从原始图像中分离,分别构造各自的基于小波包结点能量的特征向量后再进行特征融合,可以拓宽峰值识别率所对应的 α 值区间(不改变曲线对称性以及对称中心 $\alpha=0.5$),而且算法耗时增加不明显,以表 4 中相似度阈值为 0.9 为例,达到峰值识别率 100%时 $\alpha \in [0.22, 0.77]$ 。但这样做无实际意义,因为只要选定融合参数为对称中心 $\alpha=0.5$ 即可获得峰值识别率。

参考文献[9-11]基于 YUV 或 YCbCr 颜色空间构造了马氏距离图,利用主成分分析(PCA)法构建了马氏距离图的特征脸空间,使用 BP 或 RBP 神经网络作为分类器,针对自建人脸图像库进行了人脸识别实验,获得了低于 95%的人脸正确识别率。相比而言,文中算法通过色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的方式实现了特征互补,能够获得更高的人脸正确识别率。

表 5 识别率对比

Tab.5 Comparison of recognition rate

Sample/test image set selection	Option 1				Option 2			
	All the even images as the training sample image		All the odd images as the test image		All the even images as the training sample image		All the odd images as the test image	
Threshold values of similarity degree	0.90	0.95	0.97	0.99	0.90	0.95	0.97	0.99
Recognition rate in Tab.1 (uncompressed+model)	100%	100%	99%	92%	100%	100%	100%	93%
Recognition rate in Tab.1 (wavelet compressed+model)	97%	91%	81%	45%	94%	86%	80%	47%
Peak value of recognition rate in Tab.4 (wavelet compressed+model)	100%	99%	95%	69%	100%	94%	88%	71%

4 结论

文中将色度马氏距离图引入彩色人脸识别算法

中。当使用未经压缩的原始图像构建色度马氏距离图以及后续识别工作时,获得了很稳定的高识别率,但算法耗时长。综合考虑算法的实时性与实用

性,使用彩色压缩图像构建色度马氏距离图,采用色度马氏距离图与灰度图特征自适应融合的方式实现了特征互补。实验结果表明:所提算法能够获得较高的人脸识别率。

参考文献:

- [1] OuShanhu, Wang Qianli, Zhu Zheyu. VisualC++.NET Digital Image Processing Technology and Application [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2004: 25-48. (in Chinese)
欧珊瑚,王倩丽,朱哲瑜. VisualC++. NET 数字图像处理技术与应用 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004: 25-48.
- [2] Yip A W, Sinha P. Contribution of color to face recognition [J]. *Perception*, 2002, 31(8):995-1003.
- [3] Angelopoulou E. Understanding the color of human skin[C]//Proceedings of Conference on Human Vision and Electronic Imaging VI, 2001: 243-251.
- [4] Vezhnevets V, Sazonov V, Andreeva A. A survey on pixel-based skin color detection techniques [C]//Proceedings of GraphiCon'03, 2003: 85-92.
- [5] Pei S C, Cheng C M. A novel block truncation coding of color images by using quaternion-moment-preserving principle [C]//Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 1996: 684-687.
- [6] Pei S C, Chang J H, Ding J J. Quaternion matrix singular value decomposition and its applications for color image processing [C]//Proceedings of International Conference on Image Processing, 2003: 14-17.
- [7] Zheng Dezhong, Cui Fayi. Face recognition using wavelet packet feature extraction and variance similarity [J]. *Optical Technique*, 2010, 36(2): 217-224. (in Chinese)
郑德忠,崔法毅. 小波包特征提取及方差相似度的人脸识别[J]. 光学技术, 2010, 36(2): 217-224.
- [8] Yin Juncheng, Liang Bing. Compressing color images with wavelets in MATLAB [J]. *Journal of Shanxi Teacher's University (Natural Science Edition)*, 2002, 16 (1): 9-12. (in Chinese)
银俊成,梁冰. 在 MATLAB 中运用二维小波压缩彩色图像 [J]. 山西师范大学学报(自然科学版), 2002, 16(1): 9-12.
- [9] Xu Congdong, Luo Jiarong, Xiao Bingjia. Face detection based on map of mahalanobis distance to skin in color image [J]. *Computer Engineering*, 2007, 33(12): 196-198. (in Chinese)
徐从东,罗家融,肖炳甲. 基于肤色信息马氏距离图的人脸检测[J]. 计算机工程, 2007, 33(12): 196-198.
- [10] Xu Congdong, Luo Jiarong, Shu Shuangbao. Face recognition based on RBPNN of mahalanobis distance map for skin color information [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(3): 131-135. (in Chinese)
徐从东,罗家融,舒双宝. 肤色信息马氏图的 RBPNN 人脸识别 [J]. 光电工程, 2008, 35(3): 131-135.
- [11] Shu Shuangbao, Luo Jiarong, Xu Congdong, et al. Human face detection based on mahalanobis distance map to skin color[J]. *Microcomputer Information*, 2008, 24(6-1): 268-269, 306. (in Chinese)
舒双宝,罗家融,徐从东,等. 基于肤色马氏距离图的人脸检测 [J]. 微计算机信息, 2008, 24(6-1): 268-269, 306.