

彩色图像边缘特征及其人脸检测性能评价*

陈锻生^{1,2+}, 刘政凯¹

¹(中国科学技术大学 电子工程与信息科学系,安徽 合肥 230027)

²(华侨大学 计算机科学系,福建 泉州 362021)

Edge Features in Color Image and Their Face Detection Performance Evaluation

CHEN Duan-Sheng^{1,2+}, LIU Zheng-Kai¹

¹(Department of Electrical Engineering and Information Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

²(Department of Computer Science, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

+ Corresponding author: Phn: +86-595-22693985, Fax: +86-595-22693552, E-mail: dschen@hqu.edu.cn, http://www.ustc.edu.cn

Received 2004-03-03; Accepted 2004-10-10

Chen DS, Liu ZK. Edge features in color image and their face detection performance evaluation. *Journal of Software*, 2005,16(5):727-732. DOI: 10.1360/jos160727

Abstract: This paper introduces an effective algorithm for color edge features extraction and proposes a novel edge orientation encoding, biaxial symmetry orientation encoding. The average performance of human face detection system, which is based on the support vector classifier using the histograms of color and color edge features, is evaluated with ROC in multi_fold cross validation. Experimental results show that color edge features outperform gray edge features evidently; the classification accuracy of the novel edge orientation coding outperforms the traditional edge orientation coding when they are linearly combined with color histogram respectively; the face detection accuracy can be significantly improved when both color and color edge histograms are used, non-deep rotated human face can be correctly detected in color image under different illuminations, with different expressions and partial occlusions.

Key words: color edge; orientation encoding; biaxial symmetry orientation encoding; support vector machine; receiver operating characteristic

摘要: 介绍了一种有效的彩色图像边缘特征提取算法,提出了一种新的边缘方向编码——双轴对称方向编码,利用多重交叉验证的 ROC(receiver operating characteristic)曲线对基于颜色及其边缘直方图的 SVM(support vector machine)人脸检测进行平均性能评价.实验结果表明,图像颜色边缘特征比灰度边缘特征具有明显优势.通过分别与 RGB 三色直方图线性拼接,新的双轴对称边缘方向编码表现出比传统方向编码更好的 SVM 分类性

* Supported by the Natural Science Foundation of Fujian Province of China under Grant No.A0210017 (福建省自然科学基金); the International Science and Technology Cooperation Project of Fujian Province of China under Grant No.20041014 (福建省国际科技合作项目)

作者简介: 陈锻生(1959—),男,福建泉州人,博士生,教授,主要研究领域为数字图像处理,模式识别;刘政凯(1940—),男,教授,博士生导师,主要研究领域为数字图像处理,模式识别.

能.利用颜色及其边缘直方图特征能够明显提高人脸检测性能,分辨出不同光照条件下、不同表情甚至部分遮挡的非深度旋转的彩色人脸.

关键词: 颜色边缘;方向编码;双轴对称方向编码;支撑向量机;接收机操作特性

中图法分类号: TP391 **文献标识码:** A

不同的颜色在灰度图像中可能有相同的灰度值,因此,在灰度图像检测不到的边缘可能在彩色图像中被检测到.有人认为,90%的边缘在灰度图像和彩色图像中是大致相同的,因此还有 10%的边缘可能在灰度图像中检测不到^[1].由于数字彩色图像成像设备的日益普及,挖掘彩色图像中丰富的颜色边缘细节变得日益重要.

作为一种典型的非刚体目标检测课题,人脸检测在机器视觉研究中具有重要意义^[2-4],在生物测量身份识别、安全监控、图像与视频检索和智能人机接口等方面具有广泛的应用.由于受到光照、姿态、表情和年龄等因素的影响,从图像中检测人脸是一项很有挑战性的工作,其中光照条件对人脸图像影响很大,特别是彩色图像.相对于灰度、颜色特征,边缘特征受光照影响较小,因此,在不同照明条件下的彩色图像中检测人脸,边缘特征尤为重要.人脸图像边缘主要出现在头部轮廓、眼睛和嘴巴,这些人脸知识已经用在各种人脸检测系统中,其中绝大部分是采用灰度边缘特征,包括代表近年来人脸检测重要进展的 Viola 方法^[5],其主要特点也是对不同灰度边缘信息的选择.

本文通过人脸检测效果探讨包括颜色边缘特征的彩色图像信息挖掘潜力.首先介绍一种有效的颜色边缘特征提取方法,其次简介所采用的分类器和分类系统性能评价方法,然后在此基础上分析灰度边缘特征和颜色边缘特征在基于 SVM(support vector machine)^[6]的人脸检测中的分类精度差异,这些差异是通过检验两类分类性能的 ROC(receiver operating characteristic)曲线,以多重交叉验证的方式进行客观评价的.

1 边缘特征提取和直方图特征表示

由于受光照影响较小,无论对人脸整体轮廓或五官等细节,边缘都是人脸检测的重要特征.灰度边缘在许多图像处理文献中均有介绍,颜色边缘则相对较少,下面先介绍一种基于颜色向量场的梯度算法及其实现.

1.1 基于颜色梯度场的颜色边缘

计算颜色梯度可采用颜色分量或颜色向量两种基本方法.简易的颜色梯度可用各颜色分量的梯度叠加或颜色向量的夹角,但是这些颜色梯度模型难以同时表示和计算边缘方向,颜色分量的梯度叠加还有不合理和不准确之处^[7],因此,我们采用文献[1]的颜色梯度向量场提取彩色图像的边缘幅值和边缘方向,这种基于颜色向量场的梯度计算方法简介如下.

彩色图像 $\mathbf{f}(x, y)$ 可以看做是一个具有 RGB 3 个分量 f_1, f_2, f_3 的 2 维向量场,由 $\mathbf{f} = [f_1, f_2, f_3]^T$ 表示.

设向量场的空间梯度矩阵 \mathbf{D} 为

$$\mathbf{D}(x, y) = \begin{bmatrix} \partial f_1 / \partial x & \partial f_1 / \partial y \\ \partial f_2 / \partial x & \partial f_2 / \partial y \\ \partial f_3 / \partial x & \partial f_3 / \partial y \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 x 和 y 是像素 (x, y) 的空间坐标,则

$$\mathbf{D}^T \mathbf{D}(x, y) = \begin{bmatrix} p(x, y) & t(x, y) \\ t(x, y) & q(x, y) \end{bmatrix} \quad (2)$$

是一个实对称的半正定矩阵,因此有非负的特征值.其中:

$$p(x, y) = \left(\frac{\partial f_1}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial x} \right)^2,$$

$$t(x, y) = \left(\frac{\partial f_1}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial f_1}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial f_2}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial f_2}{\partial y} \right) + \left(\frac{\partial f_3}{\partial x} \right) \left(\frac{\partial f_3}{\partial y} \right),$$

$$q(x, y) = \left(\frac{\partial f_1}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_2}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial f_3}{\partial y}\right)^2.$$

因此,像素(x,y)所在的最大变化方向 θ 可由下式计算:

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2t}{(p-q)} \right] \quad (3)$$

像素(x,y)在这个方向上的变化率为

$$G(x, y) = \left\{ \frac{1}{2} [(p+q) + (p-q)\cos 2\theta + 2t \sin 2\theta] \right\}^{1/2} \quad (4)$$

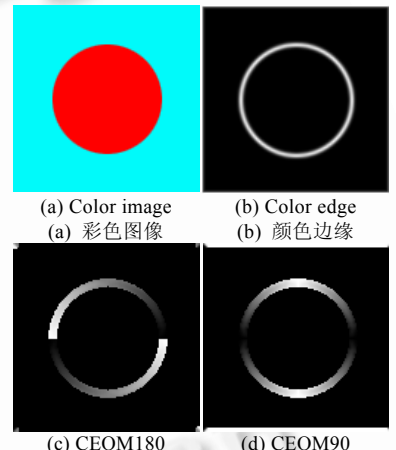
由于 $\tan(\alpha) = \tan(\alpha \pm \pi)$, 如果 θ_0 是式(3)的解, 则 $\theta_0 \pm \pi/2$ 也是. 同时, 由于 $\sin(\alpha) = \sin(\alpha \pm 2\pi)$, 从式(4)可见, $G(x,y)$ 不区分相差 180° 方向的颜色局部变化.

该算法实现可以通过求 $D^T D$ 的最大特征值 λ , 得出梯度的幅值:

$$G(x, y) = \sqrt{\lambda(x, y)} \quad (5)$$

而最大特征值 λ 所对应的特征向量决定了该点梯度的方向矢量.

图 1 表示基于颜色梯度场的两种颜色边缘方向编码. 图 1(a)原图经高斯模糊后, 用式(4)计算得到颜色梯度如图 1(b)所示. 边缘方向的表示采用两种归一化的数值编码, 一是传统的原点对称方向编码, 如图 1(c)所示, 从水平方向逆时针 180° 周期从 $0 \sim 1$ 重复编码, 记为 CEOM180(color edge orientation map, 180° 度周期), 这种编码方式不区分相差 180° 的方向. 二是本文提出的新方案, 逆时针以 180° 周期从 $0 \sim 1$ 表示 $[0, \pi/2]$, 再从 $1 \sim 0$ 表示 $[\pi/2, \pi]$ 的双轴对称方向编码, 如图 2(d)所示, 记为 CEOM90. 虽然第 2 种编码方式在一个圆周上除了水平和垂直两轴外有 4 个双轴对称方向上有相同的码值, 但实际上它能保证所有相近的方向有相似的方向码. 在后面的 SVM 人脸检测实验中, 我们可以看到新方向编码在与颜色直方图结合中有更优表现.



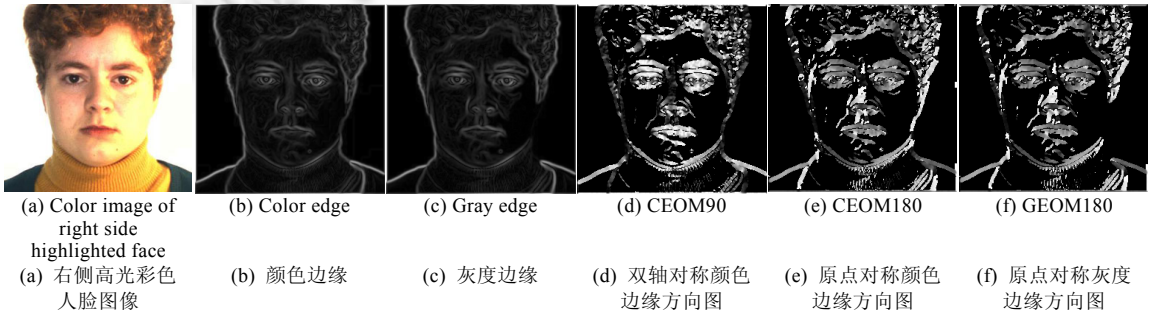
(a) Color image (b) Color edge
(a) 彩色图像 (b) 颜色边缘

(c) CEOM180 (d) CEOM90
(c) 原点对称颜色边缘方向 (d) 双轴对称颜色边缘方向

Fig.1 Two kinds of color edge orientation encoding

图 1 两种颜色边缘方向编码

图 2(a)选自 Purdue 大学的 AR 人脸图库^[8], 经过上述颜色边缘提取方法可得到图 2(b). 但是如果将 Canny 灰度边缘算子作用在图 2(a)的灰度图上, 由于右脸颊灰度与背景基本一致, 导致右脸颊边缘缺失, 如图 2(c)所示. 虽然能够在预处理中对彩色图像中的高光部分进行自动检测和校正^[9], 这可以保住灰度图像的右脸颊边缘, 但仍然会损失一些图像反差和边缘细节. 由于梯度很小的位置梯度方向不可靠, 我们以其梯度图像中最大值的十分之一为阈值, 仅保留具有较高梯度幅值的梯度方向. 图 2(d)和图 2(e)分别是图 2(a)经梯度阈值过滤的颜色边缘方向图 CEOM90 和 CEOM180. 图 2(f)是图 2(a)经梯度阈值过滤的灰度边缘方向图 GEOM180.



(a) Color image of right side highlighted face (b) Color edge (c) Gray edge (d) CEOM90 (e) CEOM180 (f) GEOM180
(a) 右侧高光彩色人脸图像 (b) 颜色边缘 (c) 灰度边缘 (d) 双轴对称颜色边缘方向图 (e) 原点对称颜色边缘方向图 (f) 原点对称灰度边缘方向图

Fig.2 Edge features of color image(a)
图 2 彩色图像(a)的几种边缘特征

1.2 各种颜色特征的直方图表示

图 2 的边缘检测实例直观地显示了图像颜色边缘比灰度边缘完整.图像颜色边缘特征的分类性能将通过后面的人脸检测实验做进一步的评估.人脸检测特征全部是一维的颜色基直方图,包括颜色直方图、颜色边缘方向直方图和颜色边缘幅值直方图,以及用来比较的 3 种对应的灰度基直方图.颜色模型采用最基本的 RGB.

彩色图像在统计前的预处理仅用脸模屏蔽 4 个边角,各颜色分量不作直方图均衡以免破坏颜色.颜色直方图是 3 个分量分别线性量化为 32 级,然后串接为 96 格的一维直方图,记为 RGB32×3.颜色边缘方向可采用图 1 所示的两种编码之一,通过可视化观察不同方向量化级数的核矩阵和多重交叉验证发现,每个圆周分成 24~36 个等角方向即可适合于 SVC(support vector classifier)分类.因此对图 1 的两种边缘方向表示选用 36 个等分角度量化,分别用 36 级的一维直方图表示.颜色边缘幅值是利用式(5)求出的颜色梯度,64 级量化记为 CGrads64.实际上,不带脸模屏蔽颜色边缘幅值能保留较完整的人脸轮廓信息,可以具有比颜色边缘方向更好的 SVM 分类性能,这里采用脸模屏蔽是为了与颜色直方图特征的数据统计范围相一致.

2 分类性能评价方法

正确地评价一个分类系统的性能,对选择分类特征和分类器参数都有重要的指导作用.分类特征的选择主要取决于用它们所构成的分类系统性能,本实验采用径向基 SVM,通过对人脸检测性能评价来判断所用分类特征的优劣.因此如何检验分类系统性能是很重要的一环.

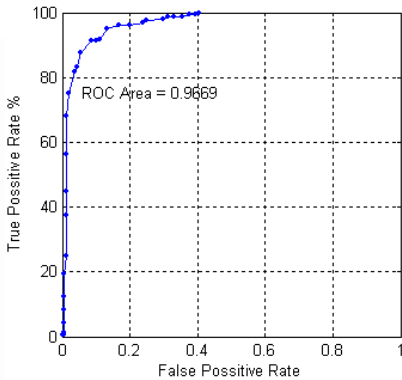


Fig.3 An example of ROC curve

图 3 ROC 曲线实例

为了准确评价不同图像特征的分类性能,本文采用多重交叉验证的 ROC 曲线作分类系统性能评价.概率密度函数有交叠的两类问题的分类系统性能可以通过计算其 ROC 曲线来衡量^[10].经典的 ROC 曲线用横轴表示错误接受率,纵轴表示错误拒绝率,在平面上表示当分类阈值变化时这两种错误率之间的消长关系.在人脸检测中经常将纵轴改为正确接受率^[4],表示在不同分类阈值条件下正确接受率 $TPR=P(\text{predicated_true}|\text{true})$ 与错误接受率 $FPR=P(\text{predicated_true}|\text{false})$ 之间的关系.将不同分类阈值产生的不同 (FPR, TPR) 坐标在平面上画出曲线就是如图 3 所示的 ROC 曲线.ROC 曲线上每一点上的切线斜率表示误检与漏检之间的代价比,斜率大于 1 表示误检的代价比漏检的代价要大.曲线与横轴间所围成的面积大小表示分类系统在所有代价比上的平均性能优劣.面积越大,表示系统的预测性能越好,本质上反映两类样本的可

分性越大或概率密度函数之间的交叠部分越少.

m 重交叉验证是将全体 n 个样本分为 m 等份,做 m 次训练.每次轮流将 1 等份作为测试样本,剩余的 $m-1$ 等份作为训练样本.经过 m 次训练和测试后,即可将 m 等份的全体样本逐一测试一遍,又完全排除了被测试样本参加训练的针对性学习.作为对真实误差的估计,交叉验证误差是偏大的,因此这是一种比较严格的启发性测试技术,5 或 10 重交叉验证已经被推荐为较好的方案^[11].本实验采用 5 等份,对样本序号对 5 求模进行样本的划分.根据我们所采用的交叉验证方法,当分类器对 250 个以上样本测试无误差时可相信真实的误差率在 2% 以下^[12].因此,交叉验证能防止出现过度训练,比较客观准确地反映分类系统的真实性能.

下面通过在径向基支撑向量机中的人脸检测实验,用多重交叉验证技术分析评价颜色边缘直方图特征的分类性能.

3 颜色边缘特征的 SVM 分类性能评价

3.1 实验图库

SVM 分类器的结构风险最小原理虽然适合于小样本的统计学习,但是样本的代表性对训练学习和分类性

能也十分重要.本实验图库中的样本主要根据颜色及其空间分布特性选择有代表性的人脸和非人脸图像.人脸图像是在 AR 人脸图库 126 人的 4 000 幅不同彩色图像的样本集上人工选择 160 幅,选择的人脸包括不同光线、部分遮挡和不同表情几种类型.非人脸图像是在 Corel 图库中选择接近肤色的非人脸彩色图像近千幅,在 RGB 三色直方图特征上用 BP 神经网络训练和分类,得到误检为人脸的图像近百幅,加上人工选择 60 多幅构成 160 幅非人脸图像,是一些在颜色或形态上容易混淆的非人脸图像.总的来说,320 幅的图像样本集虽然容量不大,但具有较大的覆盖范围和代表性.根据上节分析,该样本容量对利用多重交叉验证技术估计推广误差也已足够大.

3.2 实验结果分析

图 4 和图 5 中的每条 ROC 曲线都是对实验图库进行 5 重交叉验证的结果,纵轴 Correctness 是图 3 中的 True Positive Rate.同一图中不同 ROC 曲线都采用相同的 SVC 训练参数.由于训练 SVC 是通过最小化分类超平面的法线(对应各输入特征权重)的 2 阶范数,这会倚重具有较大数值的特征,因为它需要较小的权重.图 5 各子图中不同特征间在线性拼接前需要调整各自的数值大小,既要使 SVC 训练参数选择其符合结构风险的原则,又要使不同 ROC 曲线的特征预处理和训练参数保持一致,以确保在相同条件下比较不同特征的分类性能.

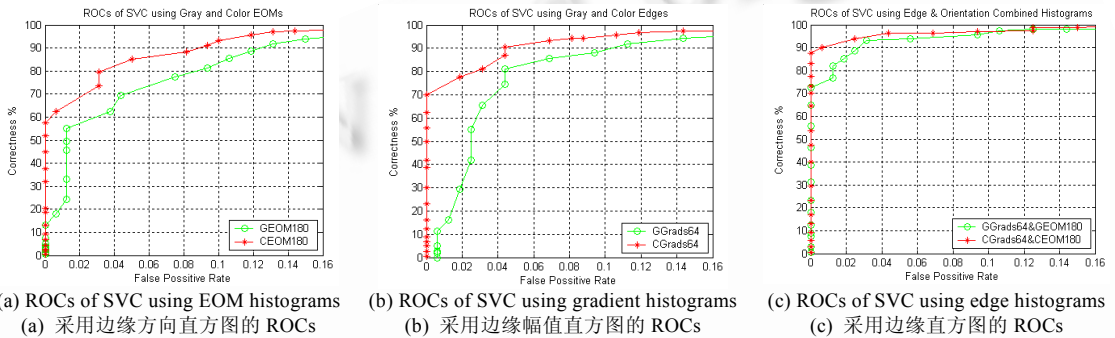


Fig.4 Performance comparison of SVCs using color and gray edge histograms

图 4 图像颜色与灰度边缘直方图的 SVM 分类性能比较

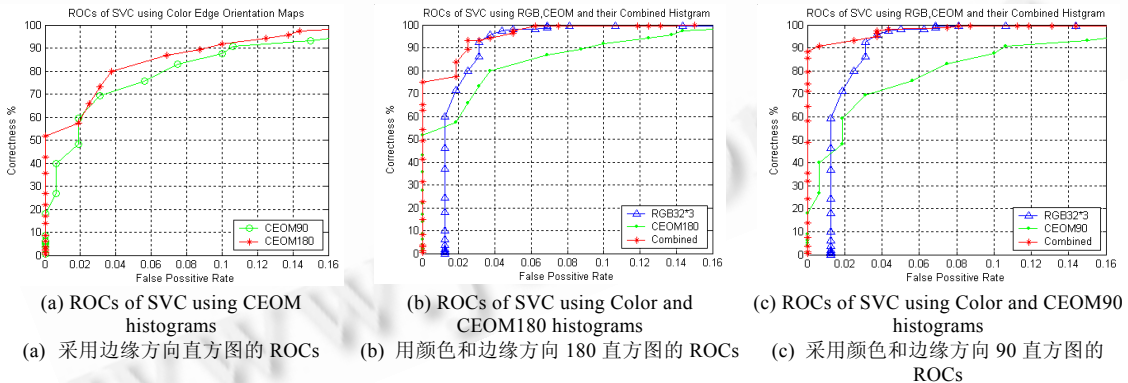


Fig.5 Performance comparison of SVCs using two kinds of color edge orientation histograms

图 5 两种颜色边缘方向直方图的 SVM 分类性能比较

从图 4(a)和图 4(b)分别可见,颜色边缘方向直方图比灰度边缘方向直方图具有较好的 SVM 分类平均性能,ROC 面积分别为 0.968 4 和 0.950 2;颜色边缘幅值直方图比灰度边缘幅值直方图具有较好的 SVM 分类性能,ROC 面积分别为 0.983 8 和 0.956 2.边缘幅值与方向直方图线性拼接后,颜色仍然保持对灰度的明显优势,如图 4(c)所示,ROC 面积分别为 0.993 4 和 0.986 8.这说明颜色边缘比灰度边缘在 SVC 分类器平均性能上,特别是在要求误检率较小的情况下具有明显的优势.

图 5 表示图像颜色边缘方向编码不同时,其直方图的 SVM 分类性能比较.图 5(a)表示如果单纯利用颜色边缘方向图(CEOM)的直方图进行分类,CEOM90 和 CEOM180 对应的 ROC 面积分别为 0.957 5 和 0.968 4,都大于

灰度边缘方向图 GEOM180 直方图的 0.950 2, CEOM90 比 CEOM180 略差。但是从图 5(b)和图 5(c)可见,这两种颜色边缘方向直方图与 RGB 三色直方图线性拼接后, SVM 分类系统平均性能都有明显提高,其中 CEOM90 与 RGB 三色直方图线性拼接后对应的 ROC 面积达到 0.995 7,提高了 0.038 2;相比之下, CEOM180 与 RGB 颜色直方图线性拼接后 ROC 面积仅提高 0.024 2,达到 0.992 6,也小于 CEOM180 与颜色梯度直方图 CGrads64 线性拼接后的 ROC 面积 0.993 4。特别是在要求误检率较小的情况下, CEOM90 与 RGB 的直方图结合具有更明显的优势,比 CEOM180 与 RGB 的直方图结合可高出约 13% 的正确检测率。实验结果证明了本文提出的双轴对称边缘方向编码特征的有效性,以及在某些场合比传统边缘方向编码更具优越性。

4 小 结

本文介绍了一种有效的彩色图像边缘特征提取算法,提出了一种新的边缘方向编码——双轴对称方向编码,能够以渐变码值表示渐变的方向,虽然它使双轴对称的方向有相同编码,但可避免传统方向编码在周期交替处的码值突变。从公用的彩色图库中选择有代表性的人脸和非人脸图像作实验图库,采用多重交叉验证的 ROC 曲线对基于颜色及其边缘直方图的 SVM 人脸检测性能进行客观评价。实验结果表明,无论是边缘图像的直观效果,还是分类性能的特征评价,本算法提取的图像颜色边缘特征比灰度边缘特征具有明显的全面优势;在图像的颜色边缘方向直方图特征方面,通过分别与 RGB 三色直方图线性拼接,本文新提出的双轴对称边缘方向编码表现出比传统方向编码更好的 SVM 分类性能。

实验结果同时也表明,利用 SVM 适合对高维数据进行分类的特点,颜色、颜色边缘幅值和颜色边缘方向直方图的线性拼接能够明显地提高人脸检测精度; SVM 能够深入挖掘颜色基直方图分类潜力,分辨出不同光照条件下、不同表情甚至部分遮挡的非深度旋转的彩色人脸。本文提出的方法也可以用在基于内容的图像检索上。进一步的工作将继续探讨其他结合颜色空间分布特征的图像颜色统计特征的表示和提取方法,并结合统计学习理论研究彩色人脸图像检测特征的选取和组合方法。

References:

- [1] Koschan A. A comparative study on color edge detection. In: Proc. of the 2nd Asian Conf. on Computer Vision ACCV'95. Singapore, 1995. 574–578. <http://iristown.engr.utk.edu/~koschan/paper/ACCV95Proc.pdf>
- [2] Hjeltnæs E, Low BK. Face detection: A survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001, 83(3):236–274.
- [3] Yang MH, Kriegman D, Ahuja N. Detecting faces in images: A survey. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1):34–58.
- [4] Yang MH. Recent advances in face detection. Technical Report, IEEE ICPR 2004 Tutorial, Cambridge, 2004. http://vision.ai.uiuc.edu/mhyang/papers/icpr04_tutorial.pdf
- [5] Viola P, Jones M. Robust real-time object detection. In: *IEEE ICCV Workshop on Statistical and Computational Theories of Vision*. Vancouver, 2001.
- [6] Vapnik VN; Zhang XG, Trans. *The Nature of Statistical Learning Theory*. Beijing: Tsinghua University Press, 2000. 100–101, 176–208.
- [7] Gonzalez RC, Woods RE. *Digital Image Processing*. 2nd ed, Addison-Wesley, 2002. 335–338.
- [8] Martinez AM, Benavente R. The AR face database. Technical Report #24, 1998. http://rvl1.ecn.purdue.edu/~aleix/aleix_face_DB.html
- [9] Chen DS, Liu ZK. A method for automatic detection and correction of highlighted area in color face image. *Journal of Software*, 2003, 14(11):1900–1906 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1900.htm>
- [10] Theodoridis S, Koutroumbas K. *Pattern Recognition*. 2nd ed, Elsevier Science, 2003. 173–174.
- [11] Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag, 2001. 214–215.
- [12] Duda RO, Hart PE, Stork DG. *Pattern Classification*. 2nd ed, John Wiley & Sons, 2001. 259–265, 483–485.

附中文参考文献:

- [6] Vapnik VN, 著, 张学工, 译. 统计学习理论. 北京: 清华大学出版社, 2000. 100–101, 176–208.
- [9] 陈锻生, 刘政凯. 彩色图像人脸高光区域的自动检测与校正方法. 软件学报, 2003, 14(11):1900–1906. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1900.htm>