

彩色图像人脸高光区域的自动检测与校正方法^{*}

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 362011)

A Method for Automatic Detection and Correction of Highlighted Area in Color Face Image

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 362011, China)

+ Corresponding author: Phn: 86-595-2693985, Fax: 86-595-2693985, E-mail: dschen@hqu.edu.cn

<http://www.ustc.edu.cn>

Received 2002-10-28; Accepted 2003-02-28

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.

<http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1900.htm>

Abstract: Different environment illumination has a great impact on face detection and recognition. The automatic detection and radiation correction of a highlighted face area is helpful to analyze and identify human faces correctly in a color image. In this paper, a novel approach is presented based on a dichromatic reflection model to detect and correct highlighted skin pixels in the TSL(tint-saturation-luminance) color space. After inspecting the distribution configuration of skin pixels in various color spaces and the spectrum reflection features of human skin, the authors carry out the highlighted are a analysis on a critical two-dimensional plane instead of in a three-dimensional color space, which brings forth certain advantages: computation complexity is deduced, rates between eigenvalues are produced in stepwise PCA to detect automatically the existence of highlighted skin and estimate robustly the skin dichromatic reflection vectors. The highlighted skin regions are compensated based on the dichromatic reflection model.

Key words: skin model; highlight detection; radiation correction; dichromatic reflection model

摘 要: 人脸检测和识别受不同环境照明的影响很大,彩色图像中人脸高光区域的自动检测和辐射校正有助于对人脸的正确分析和识别.提出了一种在 TSL(tint-saturation-luminance)彩色空间基于双色反射模型进行高光检测和辐射校正的新方法.通过考察肤色在各种不同彩色空间中的分布形态,以及对皮肤光谱反射特性的分析,

^{*} Supported by the Scientific Research Foundation of Oversea Chinese Affairs Office of State Council under Grant No.02QZR15 (国务院侨办科研基金); the Natural Science Foundation of Fujian Province of China under Grant No.A0210017 (福建省自然科学基金)

第一作者简介: 陈锻生(1959—),男,福建泉州人,教授,主要研究领域为数字图像处理,多媒体技术.

采用关键的2维平面代替3维彩色空间进行高光分析.一方面降低了算法复杂度,另一方面又可以在序贯主分量分析中提出特征值比值,迅速而准确地自动检测是否有皮肤高光区域的存在,同时还可以鲁棒地确定皮肤双色反射矢量,应用双色反射模型进行肤色高光区域的辐射校正.

关键词: 肤色模型;高光检测;辐射校正;双色反射模型

中图法分类号: TP391

文献标识码: A

关于人脸的计算机视觉研究是图像模式识别领域中倍受重视的一个研究热点^[1,2].对成像时光照的正确估计有助于对图像中的人脸检测和识别.因此,本文提出了一种自动检测彩色图像中是否出现高光照人脸区域以及如何对该区域进行辐射校正的新技术.该方法为 лица检测中选择合适的肤色模型提供了一种有效的自适应手段,也可以成为数码成像设备检测照明光线主成分的一种手段.

根据 Klinker 等人^[3]的研究,彩色图像分割是高光分析中的主要困难之一,分割错误或不准确对高光分析均会产生直接影响.Strörring 等人^[4]通过人工选择皮肤的高光区域,根据双色反射模型估算照明色彩取得较高的精度.系统分析和实验均证明,双色反射模型基本可以反映人的活体皮肤在可见光波段的反射特性.但是,这些高光分析都是直接在三维彩色空间中寻求双色反射模型中的面反射矢量和体反射矢量,需要复杂的分析计算.我们通过考察不同彩色空间中的肤色分布形态以及对皮肤光谱反射特性与机制的分析,提出了一种在 TSL(tint-saturation-luminance)彩色空间中自动选择候选肤色区域、可降到二维平面进行快速、稳健的高光检测和辐射校正的新方法,并在普渡大学的彩色人脸数据库 AR Database^[5]中获得了较好的实验结果.

1 系统分析与技术方案

本节首先考察人脸皮肤的反射波谱特性,使用双色反射模型为皮肤反射机制建模,然后根据不同彩色空间中皮肤彩色的分布特性,选择有利于高光检测的彩色空间,最后提出解决问题的技术方案.

1.1 皮肤的反射光谱与双色反射模型

图 1 表示皮肤的 3 种反射光谱曲线^[4].最上面的曲线代表白种人,中间的代表被晒红的白种人,下面的是黑人.在这些皮肤反射光谱曲线中,最典型的皮肤反射光谱特征是绿光波段中血色素吸收所形成的 W 曲线^[6].可惜该特征不会呈现在 RGB 的色彩空间中,因为一般的彩色成像设备并没有将绿光波段细分成若干波段.尽管如此,皮肤反射光谱特性曲线至少反映出皮肤反射率在总体上是随波长的增加而上升.这与如图 2(a)所示的皮肤彩色在 RGB 中的分布是一致的,也与文献[7]中的 $R>G>B$ 的肤色特征一致,但是彩色分量满足这个不等式的常见物体颜色也不少,比如红砖或未油漆的木板.同时,有的肤色也不满足该不等式.

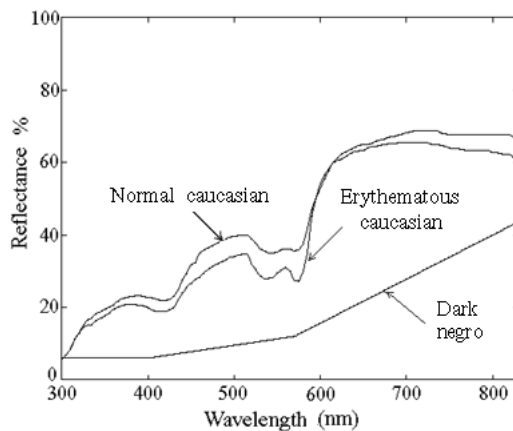


Fig.1 Spectral reflectance curves of human skin

图 1 皮肤的反射光谱曲线

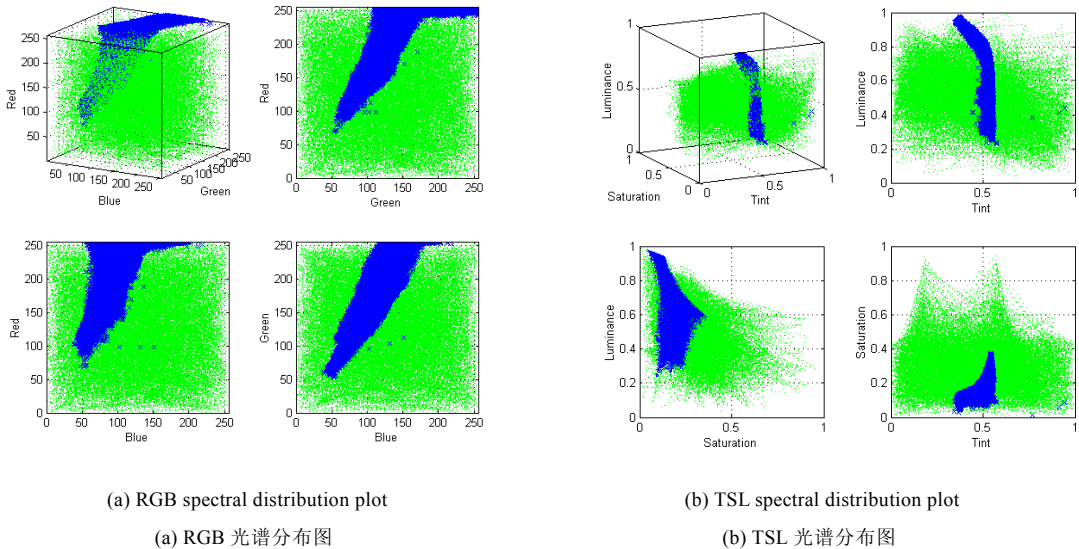


Fig.2 Spectral distribution plot of human skin in training field

图2 人脸皮肤训练场地的光谱分布图

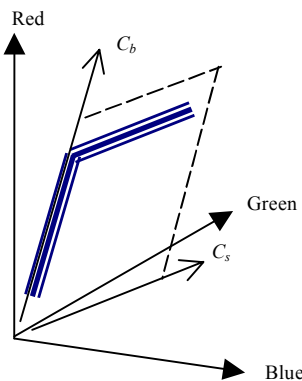


Fig.3 Dichromatic reflection model of human skin

图3 人体皮肤双色反射模型

人的皮肤可分为较薄的表皮层和表皮下较厚的真皮层.人体皮肤上的表面反射发生在表皮,大约占辐射量 5%的表面反射率与光波波长无关,也与人种无关.其余 95%的入射光进入皮肤,在这两层皮肤中被吸收和散射,散射光中的一部分逸出表皮形成皮肤的体反射.皮肤在较强光照下可能出现高光区,区中的像素以不同比例混合了表皮层的面反射和真皮层的体反射,而非高光区的像素基本上只有体反射.因此,皮肤反射机制可以用双色反射模型描述,如图 3 所示.体反射 C_b 基本上具有朗伯体漫反射的特点,面反射 C_s 基本上具有镜面反射的特点,而且面反射的光谱与入射光谱一致.皮肤的双色反射模型可用下式描述:

$$C(x, y) = m_s(x, y) \times C_s + m_b(x, y) \times C_b,$$

其中 m_s 和 m_b 分别是面反射和体反射的权重函数, $m_s + m_b = 1$.

皮肤高光分析的主要目的就是在彩色图像中找出皮肤高光区域,并从光谱中分离出面反射成分 C_s 和体反射成分 C_b ,这不仅可以消除因强光照射所造成的人脸肤色失真,也可以估算入射光的主要光谱成分.

1.2 彩色空间的选择

为选择一个恰当的彩色空间进行高光分析,我们考察了高光皮肤图像在多种彩色空间中的分布情况.表 1 表示在几种常用的彩色空间中,含有高光的人脸肤色在某二维平面所占面积(深色)与所有可能色彩所占面积(浅色)的比例,一般是比例越小越有利于同其他物体的色彩分离.其中在 HV 和 TL 平面中,肤色所占的面积比例最小,而在 La^*b^* 中总体比例最小,但是结合彩色空间中的分布形态和亮度动态,对本肤色训练场地是 TL 平面最有利于高光分析.因此,在这些不同彩色空间中,根据含有高光的肤色像素所占整个彩色空间的面积、分布的形态、亮度的动态范围大小以及前人相关研究工作^[8],我们最后选择了 TSL 和 RGB 彩色空间进行皮肤的高光分析.图 2 显示了人工采样的十几幅强侧光人脸皮肤训练场地在 RGB 和 TSL^[8]彩色空间的分布.

Table 1 Area percentage of skin color training field in some color space
表 1 几种彩色空间中肤色训练场地所占面积比例

3D color space		Area percentage of skin color in 2D color plane	
RGB	RG 14.96	RB 15.21	GB 16.68
TSL	TS 7.91	TL 8.62	SL 21.74
HSV	HS 8.52	HV 7.55	SV 30.08
La*b*	La* 9.01	Lb* 11.12	a*b* 4.96

Note: Gray shadowed 2D color planes are related to brightness
注:与亮度有关的 2 维彩色平面用灰底表示

如果忽略成像传输过程对辐射量的影响,可用亮度分量 L 最大值所在 (T,S,L) 值对应的面反射光谱成分 C_s 估计皮肤受到的主要入射光谱成分,并依此作为照明光线优势波长的估计,从而在彩色数码成像时自动获取白平衡参数提供一种有效途径.

1.3 技术方案

根据上述皮肤反射波谱特性和带有高光区域的皮肤图像在彩色空间中的分布形态特征,我们采用双色反射模型有效地描述了皮肤的反射特性.为了进行可比实验,我们利用普渡大学网上的彩色人脸数据库 AR Database,手工选择人脸皮肤样本建立训练场地,并在此基础上建立皮肤的彩色直方图统计模型.利用人脸肤色模型和连通区域形状特征筛选出候选区域,然后在所选的彩色空间中作肤色集群和主分量分析,得出皮肤体反射矢量和面反射矢量,从彩色皮肤图像中检测并分离出高光区域,并实现了高光辐射的自动校正.系统技术流程如图 4 所示.

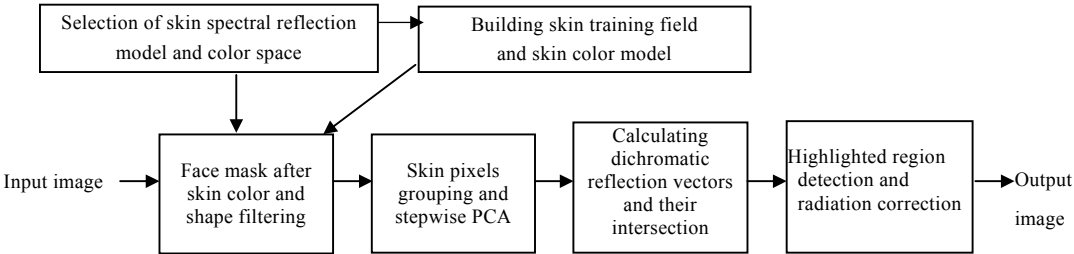


Fig.4 Technical flow chart of automatic detection and radiation correction of highlighted human face regions in color images

图 4 彩色图像高光人脸区域的自动检测与辐射校正的技术流程图

2 高光区检测技术及其实现

我们在前面的系统分析中已经介绍了技术流程图(如图 4 所示)中的分类训练部分,包括来源于 AR Database^[5]的彩色人脸图像训练场地、使用双色反射模型描述皮肤反射、选择 RGB 和 TSL 彩色空间^[8]以及在 TSL 彩色空间中建立肤色模型.下面将介绍人脸皮肤的区域分割,候选肤色像素的序贯 PCA,基于双色反射模型的皮肤面反射矢量 V_s 和体反射矢量 V_b 计算,高光区域检测和辐射校正等.

2.1 建立TSL肤色统计模型

彩色是检测物体的重要基本特征.在彩色图像人脸的低层检测中,区分皮肤像素与非皮肤像素有各种各样的统计彩色模型.高斯模型、混合高斯模型和直方图模型都可以用作皮肤的彩色模型.我们采用以直方图统计模型为基础的肤色模型,又将 RGB 变换到 TSL 彩色空间,以便后面进行基于双色反射模型的高光分析.

从 RGB 映射到归一化的 TSL 彩色空间是一种非线性变换,变换式为

$$T = \begin{cases} \arctan(r'/g')/2\pi + 1/4, & g' > 0 \\ \arctan(r'/g')/2\pi + 3/4, & g' < 0, \\ 0, & g' = 0 \end{cases}$$
$$S = [1.8 \times (r'^2 + g'^2)]^{1/2},$$

$$L = 0.299R + 0.587G + 0.114B$$

其中, $r' = (r-1/3)$, $g' = (g-1/3)$, $r = R/(R+G+B)$, $g = G/(R+G+B)$, T 是色调, S 是饱和度, L 是亮度. 当 R, G, B 归一化时, L 的取值范围和 T, S 一致, 都在区间 $[0, 1]$.

2.2 人脸皮肤区域分割

将输入的彩色测试图像转换到 TSL 彩色空间后, 首先根据上述的皮肤模型对测试图进行像素点的肤色概率检测, 然后用一个较低的阈值将这个肤色概率图二值化. 在这个二值图上运用带有形状测量的连通区快速标号算法^[9]进行连通区标记, 将面积很小或者区域在其外接矩形中面积比例较小的连通区删掉, 并对剩下的连通区进行较小结构的数学形态学闭运算, 最后得到肤色和形状过滤后的候选人脸区域, 如图 5(b)所示. 它们可作为蒙板选择被测图像的相应区域, 进行下一步的人脸高光分析.

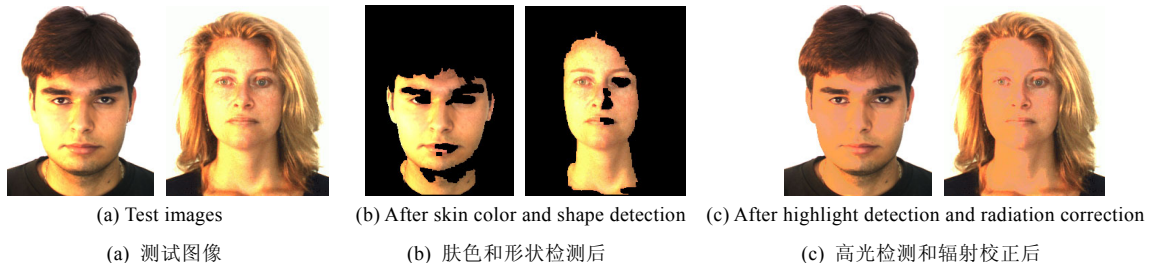


Fig.5 Results of automatic highlight detection and radiation correction of human face in color images

图 5 彩色人脸图像自动高光检测和辐射校正图例

2.3 序贯PCA与双色反射矢量

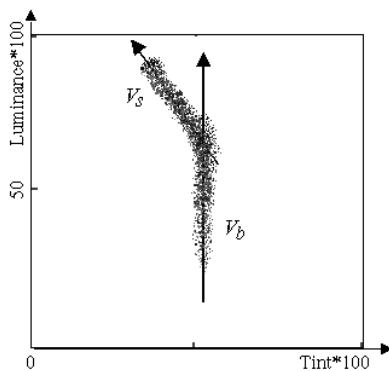


Fig.6 Skin samples color distribution on Tint-Luminance plan

图 6 肤色样本在 TL 平面上的分布

本方法研究的重点是检测彩色人脸图像中是否存在高光照射区域, 如果存在, 则又是如何自动分割出来进行辐射校正的. 皮肤高光区域检测是根据对皮肤训练样本的光谱空间分布形态的观察, 发现在许多不同彩色空间中, 带有高光区域的肤色样本集都呈现出均匀光照下或带有阴影的肤色样本集所没有的 Γ 形分布. 本系统选择 TSL 彩色空间进行皮肤高光分析的原因, 除了 TSL 在肤色检测中表现突出^[8] 以外, 更重要的是带有高光区域的皮肤图像在 TSL 彩色空间中的分布也呈显著的 Γ 形状, 而且集中表现在 TL 和 SL 平面上. 因此, RGB 彩色空间中的三维皮肤反射成分分析在 TSL 彩色空间中可以降到二维中进行, 比如在 TL 平面中, 这样极大地降低了计算复杂度. 图 6 表示 TL 平面上肤色像素的分布, V_b 和 V_s 分别是由序贯主分量分析估算的体反射矢量与面反射矢量.

如果体反射像素的亮度具有一定的动态范围, 这些像素就可以用来估计体反射. 根据朗伯体的余弦定律, 体反射的亮度仅与照明的入射角余弦成正比. 在有主要照明方向的人脸上, 入射角变化必然导致皮肤体反射强度的变化, 所以, 体反射为主的像素集合一般具有足够的亮度动态范围.

由于彩色直方图与空间信息无关, 以亮度分量 L 为索引值对肤色区中的所有像素的 (T, S, L) 三元组进行排序, 可以得到一串有序的彩色像素. 在这些有序的彩色像素上进行序贯主分量分析, 需要将这些像素按数量等分成 n 个 (本实验中 n 取 32) 子集, 或按亮度动态的范围等分为 n 个级别, 在每个级别中选取限量的像素. 序贯主分量分析的过程是: 第 1 次取第 1 个子集的协方差阵做主分量分析, 第 2 次取前两个子集的协方差阵做主分量分析, 到第 n 次取全部肤色像素的协方差阵做主分量分析, 得到 n 组特征值和特征向量.

2.4 高光区域检测和辐射校正

肤色像素各分量间的协方差阵的特征值实质上就是在其特征矢量上投影值的方差,反映了肤色像素在各特征矢量方向上的彩色动态范围.高光分析在我们前面选择的 TL 平面中进行.假设在二维平面上的两个特征值是 λ_1 和 λ_2 , $\lambda_1 > \lambda_2$, 我们发现,比值 $R = \lambda_1 / \lambda_2$ 是肤色像素在该平面上分布扁平程度的有效度量.对按 L 排序的肤色像素进行 2 维序贯主分量分析之后,可以依次得到 n 对特征值间的 n 个 R 值.如果肤色集合中没有高光区域,则 R 值是单调上升的.如果肤色集合中的确存在高光区域,则 R 值是先升后降,其过程会出现一个明显的峰值.可见,检测肤色区域是否存在高光区域就变成检测序贯主分量分析是否存在 R 值的峰值.最大 R 值出现前的一组特征值中较大的特征值所对应的特征矢量就是肤色在 TL 平面中的体反射向量 V_b .如果存在高光区,还需要计算面反射向量 V_s .具体实现是,将按 L 升序排列后的所有肤色像素的 (T, S, L) 三元组进行反序,即从最亮到最暗的像素进行类似上述 V_b 的计算,可得到肤色在 TL 平面的面反射向量 V_s .

为了准确定位带高光区域的肤色图像在彩色空间中 Γ 形分布的转折点,我们在估算体反射向量 V_b 和面反射向量 V_s 时避免采用转折点附近的像素,并采用体反射向量 V_b 和面反射向量 V_s 之间的交点作为划分高光和 non 高光皮肤区域的亮度阈值 L_{th} .

高光区域的辐射校正的实现是根据双色反射模型将 L 分量大于 L_{th} 的肤色像素沿着面反射矢量 V_s 的方向投影到体反射矢量 V_b 轴上,同时应注意保留高光区肤色像素间的亮度和色度差异,但这种投影依然会不可避免地降低了高光区的反差.最后我们利用结构阵列中像素对像素的数据组织方式建立了 TSL 到 RGB 彩色查找表,便于将辐射校正后肤色像素快速从 TSL 映射到 RGB 空间进行显示或存储.

2.5 实验结果

利用普渡大学网上的彩色人脸数据库 AR Database^[5],一部分用作人脸皮肤训练场地,另一部分用作测试图像.图 5 是部分人脸测试图像、人脸候选区域、自动高光检测和辐射校正效果.从肤色模型检测出的测试图像按 0.1~0.3 之间的某概率阈值二值化,经形状过滤后得到了候选肤色区域(如图 5(b)所示).肤色概率阈值大小变化会影响候选肤色区域的个数和大小,但经形状过滤后对后面的高光分析结果影响很小,表现出很好的稳健性.左图的人脸浓眉和腮帮子胡须等部分对人脸区域虽然有一定影响,但缺少部分皮肤面积根本不影响在整体上对皮肤高光区域的检出和辐射校正.右图的头发与肤色很接近,但经过形状和密集度过滤,只剩下皮肤区域.为了与输入图像相比,高光校正后的肤色部分仍然与被过滤的其他部分一起显示(如图 5(c)所示).

3 小 结

本文介绍了一种基于双色反射模型的彩色人脸图像高光检测和辐射校正的全自动方法.通过对皮肤光谱反射特性的分析、考察肤色在各种不同彩色空间中的分布形态,我们在 TSL 彩色空间中自动提取含有高光人脸的区域,并提出了一种基于双色反射模型进行高光分析的新方法.实验证明,在关键的 2 维亮度与色度平面中,即使在基于肤色和形状的人脸区域的分割精度不高的情况下,通过对肤色像素进行序贯主分量分析,采用特征值比值作主要参数,也可以迅速而准确地检测是否有皮肤高光区域的存在.同时,可以鲁棒地确定高光区域与非高光区域的亮度分割阈值,应用双色反射模型进行肤色高光区的辐射校正.

从图 5 中的测试图像可以看出,虽然高光区域被正确地检测和较好地校正,但存在阴影部分,如图中鼻子右侧被漏检和左眼被误检,可能影响进一步的人脸局部特征分析.虽然漏检和误检是难以兼顾的,但通过增加训练场地,建立不同照明条件的肤色模型,系统性能将会得到进一步提高.因此,利用高光检测和其他照明条件自动检测方法,自适应地选择合适的肤色模型是我们正在继续进行的研究工作.

References:

- [1] Hjeltnæs E, Low BK. Face detection: A survey. *Computer Vision and Image Understanding*, 2001,83(3):236~274.
- [2] Yang MH, Kriegman D, Ahuja N. Detecting faces in images: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002,24(1):34~58.

- [3] Klinker GJ, Shafer SA, Kanade T. A physical approach to color image understanding. *International Journal of Computer Vision*, 1990,4(1):7~38.
- [4] Strörring M, Gänem E, Andersen HJ. Estimation of the illumination colour using highlights from human skin. In: *Proceedings of the 1st International Conference on Color in Graphics and Image Processing*. Saint Etienne, 2000. <http://www.cvmt.dk/~mst/Publications/cgip2000html/>.
- [5] Martinez AM, Benavente R. The AR face database. CVC Technical Report #24, 1998. http://rvll.ecn.purdue.edu/~aleix/aleix_face_DB.html.
- [6] Angelopoulou E. Understanding the color of human skin. In: *Proceedings of the SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging VI (SPIE) 2001*. SPIE Vol. 4299, SPIE Press, 2001. 243~251. <http://www.cs.stevens-tech.edu/~elli/spie.pdf>.
- [7] Tao LM, Peng ZY, Xu GY. The feature of skin color. *Journal of Software*, 2001,12(7):1032~1040 (in Chinese with English abstract).
- [8] Terrillon J-C, Shirazi MN, Fukamachi H, Akamatsu S. Comparative performance of different skin chrominance models and chrominance spaces for the automatic detection of human faces in color images. In: *Proceedings of the 4th international Conference on automatic face and gesture recognition*. IEEE Computer Society, 2000. 54~61. <http://dlib.computer.org/conferen/fg/0580/pdf/05800054.pdf>.
- [9] Chen DS, Xie ZP, Liu ZK. Extraction of number plate and character segmentation from color image under complex background. *Mini-Micro Systems*, 2002,23(9):1144~1148 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献:

- [7] 陶霖密,彭振云,徐光祐.人体的肤色特征.软件学报,2001,12(7):1032~1040.
- [9] 陈锻生,谢志鹏,刘政凯.复杂背景下彩色图像车牌提取与字符分割技术.小型微型计算机系统,2002,23(9):1144~1148.