

# YCbCr 空间中一种基于贝叶斯判决的 肤色检测方法

吕东辉 王 滨

(上海大学通信与信息工程学院, 上海 200072)

**摘 要** 皮肤颜色是人脸检测、定位、跟踪时的一种十分有效的特征,而且裸露的皮肤区域也是色情图像的最重要特征之一。为了有效地进行图像的肤色检测,提出了一种新的肤色检测方法。该方法首先通过统计1 809 502个肤色像素点和1 763 682个非肤色像素点,并使用贝叶斯规则来建立肤色分类器;然后考虑亮度对肤色的影响,采用Y-Cb和Y-Cr两个子空间的查询表来建立肤色模型。为了联合使用两个查询表,先采用高斯归一化和线性化方法来将阈值范围调整至 $[0, 1]$ ;同时对查询表进行中值滤波处理,以除去离散孤立点。实验表明,与其他3种方法相比,该方法不仅有着较低的漏检率(9.814%)和误检率(3.5%),而且对于不同光照条件也有较好的检测效果。

**关键词** 贝叶斯判决 查询表 高斯归一化 肤色检测

**中图分类号**: TP391.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)01-0047-06

## A Skin Detection Method Based on Bayes Decision in YCbCr Color Space

Lü Dong-hui, WANG Bin

(School of Communication and Information Engineering, Shanghai University, Shanghai 200072)

**Abstract** Skin color has been proven to be a useful and robust cue for face detection, localization and tracking. Naked skin region is one of the most important features to detect the erotic pictures. For detecting the skin images effectively, a skin color classification technique that employs Bayesian decision with color statistics data, which include 1 809 502 skin pixels and 1 763 682 non-skin pixels gathered from YCbCr color space, has been presented. Considering the influence of luminance (Y component) on skin color, the skin color model is constructed by two lookup tables in Y-Cb and Y-Cr subspaces. To use 2 lookup tables (LUTs) together, Gaussian normalization and linear converting are used to normalize the range of threshold value to  $[0, 1]$ . To filter scattering points, both LUTs are processed by median filter. Experimental results have demonstrated that this method can provide lower false dismissal rate (9.814%) lower false detection rate (3.5%), compared with three methods given in this paper, and achieve better detection performance in various lighting conditions.

**Keywords** Bayes decision, lookup table (LUT), Gaussian normalization, skin color detection

## 1 引 言

人脸检测和追踪是近十几年人们研究的热点。美国“9·11事件”以后,全球恐怖活动比较猖獗,为防止恐怖分子继续制造事件,对可疑恐怖人物进行

识别,乃至监控十分必要。在众多的基于人的生物特征识别中,人脸识别由于其非接触性而日益受到人们的关注。另外,随着多媒体技术的发展,对互联网上的色情图像的控制已经成为日益紧迫的任务。在人脸和色情图像的许多特征中,尽管颜色是把皮肤从其他物体的背景中提取出来的有效特征,但是,

基金项目:上海市教委发展基金项目(217433);上海市宝山区科委基金项目(04-E-5)

收稿日期:2004-11-02;改回日期:2005-03-20

第一作者简介:吕东辉(1966~),男,副教授。1999年获上海交通大学工学博士学位。主要从事模式识别、图像重建及小波分析等方面的研究。已发表学术论文20余篇。E-mail: dhl@staff.shu.edu.cn

建立合适的肤色模型是人脸检测的前提。人们已经提出了多种肤色检测模型,其中大多数都是基于像素建立的<sup>[1-4]</sup>。通常建立肤色模型时要考虑两方面内容:(1)应该选择哪一种颜色空间;(2)如何利用肤色分布来精确地建立模型。

本文采用 YCbCr 空间来构建皮肤颜色分布模型,其原因是它的离散性、与人的视觉感知的同一性、亮度和色度分离以及肤色聚集区域紧凑等特性<sup>[1]</sup>。“皮肤颜色”不仅是物体的物理特性,还是人的一种主观概念。因此感知一致性意味着颜色分量一个小的扰动就能被感觉出大约相同程度的颜色变动范围<sup>[5]</sup>。YCbCr 空间是一种从 RGB 空间非线性转换而来的颜色空间,其已被广泛应用于视频压缩标准中(比如,MPEG, JPEG)<sup>[2]</sup>。式(1)用来从范围为[0,1]的 RGB 信号输出 YCbCr 信号。输出 YCbCr 信号的范围是  $Y \in [16, 235]$ ,  $Cb, Cr \in [16, 235]$ 。使用式(2)可以将 YCbCr 信号恢复成范围为[0,1]的 RGB 信号。

$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 65.481 & 128.553 & 24.966 \\ -37.797 & -74.203 & 112 \\ 112 & -93.786 & -18.214 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.00456621 & 0 & 0.00625893 \\ 0.00456621 & -0.00153632 & -0.00318811 \\ 0.00456621 & 0.00791071 & 0 \end{bmatrix} \times \left( \begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 16 \\ 128 \\ 128 \end{bmatrix} \right) \quad (2)$$

人们在 YCbCr 空间建立肤色模型方面已经做了许多工作,如 Hsu 等人将 YCbCr 空间进行非线性转换,然后在新的  $Cb'-Cr'$  色度平面建立一个参数椭圆边界,用来描述肤色模型<sup>[1]</sup>;Chai 等人提出了一种在  $Cb-Cr$  色度平面,利用贝叶斯最小代价规则建立皮肤颜色分类器的方法<sup>[2]</sup>;雷明等人提出一种在 Y-Cb 和 Y-Cr 两个子空间建立 2 维查询表的方法,并使用一种彩色均衡技术来消除由光照引起的色彩偏移<sup>[3]</sup>。

本文提出一种与亮度关联的基于贝叶斯判决的双查询表方法,并用该方法构造了一种提取 YCbCr 颜色空间数据的肤色分类方法。该方法先从大量肤色样本和非肤色样本统计出实验数据,然后使用贝叶斯规则建立肤色分类器。考虑到在高亮度区和低亮度区肤色色度分量  $Cb, Cr$  与亮度分量  $Y$  非线性相关,因此采用 Y-Cb 和 Y-Cr 两个子空间的查询表来

建立肤色模型。

## 2 基于贝叶斯判决的肤色模型的建立

### 2.1 与亮度有关的双查询表的建立

以往的研究常常丢弃亮度分量,虽然这样做看起来是合理的,因为与亮度分量相比,皮肤色调与色度分量关系更大,所以许多现有皮肤颜色建模的方法都是建立在  $Cb-Cr$  平面上<sup>[2,4]</sup>,但是如图 1 所示,肤色分布情况受亮度影响也很大。

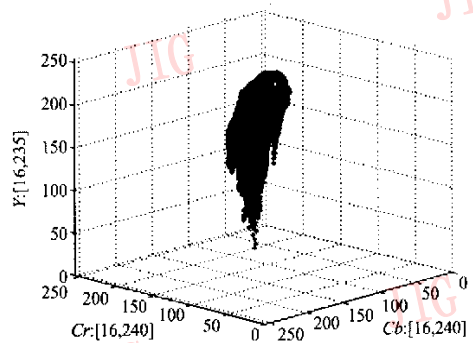


图 1 YCbCr 颜色空间中的肤色聚集区域  
Fig. 1 Skin cluster in YCbCr color space

要考虑这个问题会遇到一些困难,这是因为描述肤色 3 维分布的数据量很大,而且需要大量的肤色样本,所以应综合考虑亮度对色度影响和减少维数来简化肤色分析的需要,本文通过两个联合颜色平面 Y-Cb 和 Y-Cr 来建立肤色模型,这样对于亮度变化较大的肤色区域也能有较好的检测效果。

### 2.2 贝叶斯分类器中判定阈值的选择

由于研究对象的复杂性,因此建立肤色模型时要求助于统计方法。肤色像素和非肤色像素数据可从大量肤色样本和取自皮肤背景的非肤色样本的训练图像数据中获得。为了对 Y-Cb 和 Y-Cr 两个子平面的皮肤和非皮肤颜色的交叠区域进行分类,使用贝叶斯规则来建立皮肤颜色分类器<sup>[4]</sup>:

$$P(s|c) = \frac{P(c|s)P(s)}{P(c|s)P(s) + P(c|\bar{s})P(\bar{s})} \quad (3)$$

其中  $P(s|c)$  是表示给定某子空间的具体颜色后,判定该子空间颜色  $c$  为肤色  $s$  的概率。 $P(c|s)$  和  $P(c|\bar{s})$  则分别是肤色点总数和非肤色点总数中该颜色  $c$  所出现的概率; $P(s)$  和  $P(\bar{s})$  分别是统计模型中肤色点总数和非肤色点总数各占的比例( $s$  是  $\bar{s}$  的补事件)。

由式(3)可得式(4)<sup>[4,5]</sup>:

$$\frac{P(s|c)}{P(\bar{s}|c)} = \frac{P(c|s)P(s)}{P(c|\bar{s})P(\bar{s})} \quad (4)$$

本文采用式(5)作为肤色判决规则,即先给定某子空间具体颜色  $c$ ,然后用训练数据计算其为皮肤的概率和为非皮肤概率的比值。如果子空间的某一位置上, $c$  与  $s$  的比值超过规定的阈值  $T$ ,则将该颜色判为皮肤颜色,否则就判为非皮肤颜色。

$$R = \frac{P(s|c)}{P(\bar{s}|c)} \geq T \quad (5)$$

### 2.3 肤色建模

由式(4)计算得出的贝叶斯概率比值分布范围是  $[0, +\infty)$ 。本文采用了  $3\sigma$  高斯归一化和线性化方法,将两个分布图中的概率比值归一化至  $[0, 1]$ 。归一化处理后,阈值的范围就缩小到  $[0, 1]$  区间,因此可以方便地分析阈值变化对模型性能的影响。

值得注意的是,一个阈值对两个归一化的分布图有着相同的分类效果,即用一个阈值可以对两个面进行合理的分割。这是因为给定一个阈值后,如果它在 Y-Cb 平面上分类为肤色的区域中,每个位置的颜色  $(Y, Cb)$  为肤色的概率均不小于  $T_p$ ,那么它在 Y-Cr 平面上分类为肤色的区域中,每个位置的颜色  $(Y, Cr)$  为肤色的概率也都不小于  $T_p$ 。此处  $T_p$  为概率比值归一化后使用的阈值,其范围为  $[0, 1]$ 。

实际上,在 2 维平面图中,非皮肤像素的颜色分布范围与皮肤像素的颜色分布相比,前者远比后者大,并且包含后者,从后面的图 2 中也可以看出这个情况,这是可以使用式(4)的原因。由于比值为零的区域表示对应颜色范围不存在皮肤像素数据,因此,阈值调整只对比值不为零的部分处理,其他区域将直接被视为非皮肤区域。

采用  $3\sigma$  高斯归一化方法处理  $P(s|c)$  和  $P(\bar{s}|c)$  的比值为

$$G_i = \frac{R_i - m}{3\sigma} \quad (6)$$

其中,  $R_i, i=1, 2, \dots, N$  为 2 维平面图中每一个  $P(s|c)/P(\bar{s}|c)$  不为零的比值,  $m = \frac{\sum_{i=1}^N R_i}{N}$ ,  $\sigma =$

$\left[ \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (R_i - m)^2 \right]^{1/2}$ ,  $N$  为 2 维平面图中非零比值  $R_i$  的总数。

经过  $3\sigma$  高斯归一化后,超过 99% 的非零比值被调整到  $[-1, 1]$ 。为了把这些处理过的数据调整至最终范围  $[0, 1]$ ,可采用如下线性变换进行归一

化,归一化后第  $i$  个数据为

$$M_i = \frac{G_i + 1}{2} \quad (7)$$

原始的比值数据经过式(6)和式(7)转换后,只有不到 1% 的归一化比值不在  $[0, 1]$  范围内。归一化后的比值反映的是查询表上某位置对应的颜色被判定为皮肤颜色的可能性。

这样,对于一定的检测要求,就可以从 ROC (receiver operating characteristic) 曲线中获得合适的归一化阈值,并可由此生成两个对应的二值皮肤区域分布图,同时建立两个查询表<sup>[5]</sup>,然后即可建立作为对皮肤区域进行检测使用的肤色模型。

## 3 基于贝叶斯判决和双查询表的肤色建模的实验研究

本文基于贝叶斯判决和双查询表的肤色建模是一种非参数方法,其性能与训练集有关。一般说来,与人种的肤色相比,图像中光照条件的变化和色彩偏移现象对模型分类的影响更大。本实验共采用了 50 幅训练图像和 15 幅测试图像。两类图的大小均为  $250 \times 250$  左右。两类图像有广泛的皮肤色调、环境和光照条件,它们都被手工分割为皮肤区域和非皮肤区域。

根据图 1 的肤色统计数据分布情况,为减少计算量,实验只对颜色空间中  $Y \in [16, 235]$ ,  $Cb \in [41, 160]$ ,  $Cr \in [111, 230]$  范围内的数据进行处理,而其余颜色都被认为是非皮肤颜色,简称为非肤色。从训练图像共得到 1 809 502 个肤色像素点和 1 763 682 个非肤色像素点。图 2 是肤色像素和非肤色像素在两个子空间的分布情况,由图 2 可见,非肤色像素的颜色分布范围包含肤色像素的颜色范围。

实验时,对非零比值的的数据都进行了处理,因此后面提到的阈值均为归一化阈值  $T_p$ 。实验过程中,由于在查询表中发现少量稀疏和遗漏的数据,因此需使用窗口为  $5 \times 5$  的中值滤波器对查询表进行处理,滤去离散的点,补上缺失的点,以使得查询表的数据分布更加紧凑完整。图 3 是当概率阈值  $T_p$  为 0.462 时,对两个平面查询表进行中值滤波前后的情况。

根据训练数据实验结果得到的错误率与阈值的关系曲线以及漏检率和误检率关系曲线如图 4、图 5、图 6 所示。检测图像得出的错误率可分为漏检率  $r_1$  和误检率  $r_2$ :

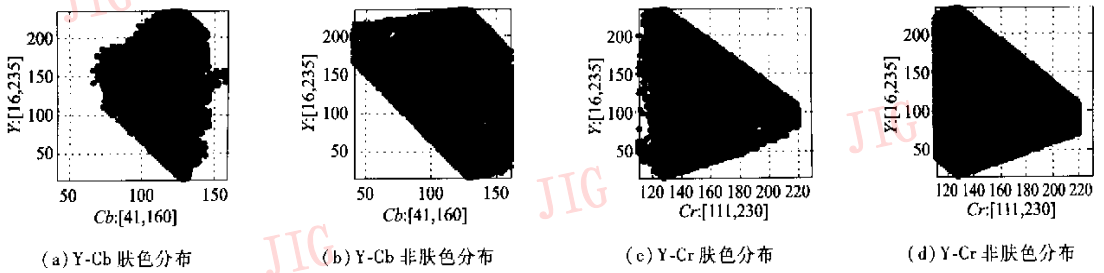


图 2 肤色和非肤色像素在两个子空间的分布

Fig. 2 Skin and non-skin pixel distributions in two subspaces

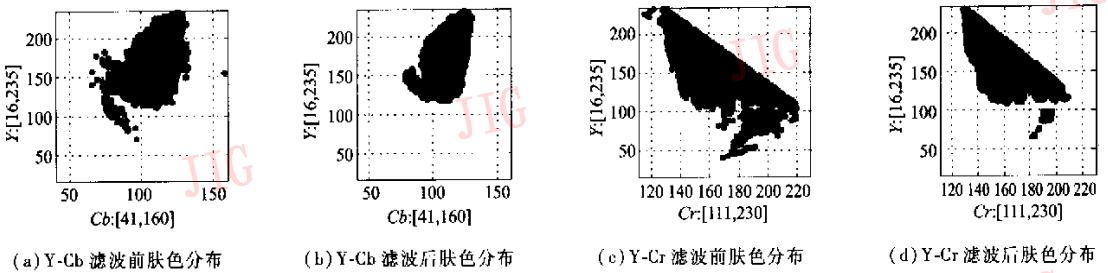


图 3 阈值  $T$  为 0.462 时,两个颜色平面进行中值滤波前后的皮肤区域分布对照

Fig. 3 Contrast in two color planes with the threshold value of 0.462 between original skin region and med-filtered region

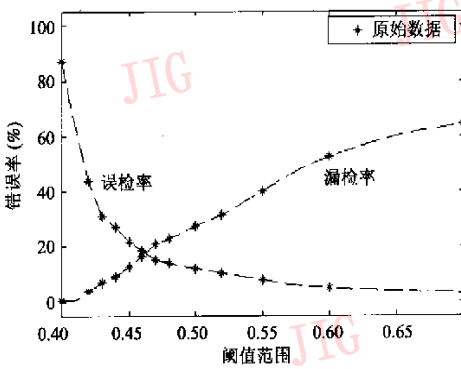


图 4 使用两个联合查询表时,错误率随阈值  $T_p$  变化曲线

Fig. 4 Change of error rates with diverse thresholds using two combined LUTs

$$r_1 = \frac{N_1}{N_{skin}} \times 100\% \quad (8)$$

$$r_2 = \frac{N_2}{N_{non-skin}} \times 100\% \quad (9)$$

其中,  $N_1$  为未检测到的肤色像素数,  $N_2$  为检测到的肤色像素数,  $N_{skin}$  为皮肤颜色像素总数,  $N_{non-skin}$  为非肤色像素总数。

图 4 显示出误检的情况会随着阈值增大而减少, 而漏检的情况则恰恰相反。图中两条曲线的交叉点对应的阈值  $T_p$  可以作为控制漏检率和误检率的参

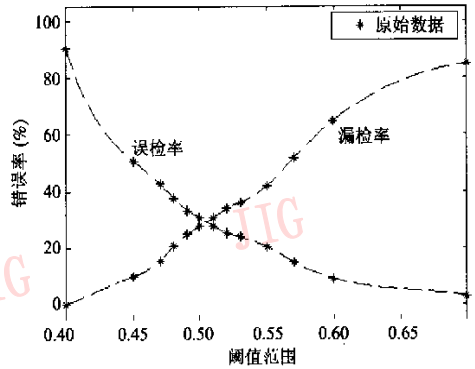


图 5 使用 Cb-Cr 平面上的查询表时

错误率随阈值  $T_p$  变化曲线

Fig. 5 Change of error rates with diverse thresholds using LUT in Cb-Cr subspace

数。图 5 显示出和图 4 类似的情况。在图 4 和图 5 中,使用 1 维线性插值法可以得到使漏检率和误检率较适中的两个阈值分别为 0.462 与 0.505。用双查询表的方法在阈值  $T_p=0.462$  时对 15 幅测试图像进行实验,得到的漏检率为 16.9681%,误检率为 14.8047%;用色度平面查询表的方法在阈值 0.505 情况下得到的漏检率为 20.2754%,误检率为 33.2671%。图 6 表明,在绝大多数情况下,使用两个联合颜色平面的总错误率比使用 Cb-Cr 平面都要小。

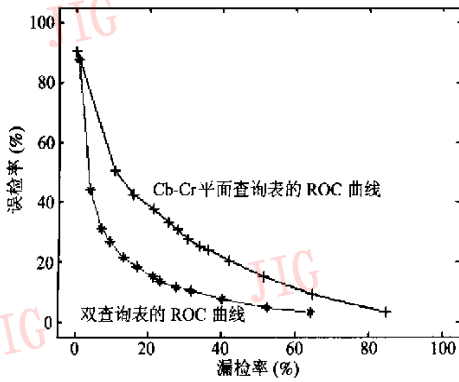


图 6 两种方法的 ROC 曲线

Fig. 6 Receiver operating characteristic curves of two methods

### 4 4 种肤色区域提取方法的比较研究

为了验证本文方法的优越性,还对相同的测试集使用其它方法进行实验。由表 1 可见,参数椭圆方法<sup>[1]</sup>(方法 1)的漏检率和误检率都比较高。该方法是在颜色空间的色度平面操作的参数方法,忽略了亮度信息,由于其仅考虑皮肤颜色像素,因此对肤色和非肤色交叠区域的判决错误较多。仅使用 Y-Cb和 Y-Cr 平面查询表的方法(方法 2),其漏检率虽很低,但误检率相当高,这是因为该实验采用的训练数据仅是各种光照条件下的肤色信息,而没有考虑到利用背景非皮肤区域的颜色信息。由表 1 不难看出,Y-Cb 和 Y-Cr 平面基于贝叶斯判决的查询表的肤色检测方法取得了漏检率和误检率都不是很高的结果。

表 1 4 种方法对整个测试集进行测试的错误率比较

Tab.1 Contrast of error rates to test pictures using 4 methods

4 种方法的错误率比较	漏检率 (%)	误检率 (%)
参数椭圆方法(方法 1)	24.8668	35.425
Y-Cb 和 Y-Cr 平面的查询表(方法 2)	0.7359	95.1695
Cb-Cr 平面基于贝叶斯判决的查询表(阈值 0.505)(方法 3)	20.2754	33.267
Y-Cb 和 Y-Cr 平面基于贝叶斯判决的查询表(阈值 0.462)(方法 4)	16.9681	14.8047

图 7(a)原图是测试图像集中的一幅,图 7(b)和图 7(c)分别为用手工分割的皮肤区域图像和非

皮肤区域图像。图 8 是 4 种方法对该测试图像进行肤色检测的效果图,由肤色区域图像可以得出 4 种方法对该图像的漏检率,使用非肤色区域图像可以得出误检率。图 8 中白色区域为各方法检测出的肤色部分,黑色区域则为被判作非肤色的部分。

表 2 4 种方法对一幅测试图像进行测试的错误率比较

Tab.2 Contrast of error rates to one test picture using 4 methods

4 种方法的错误率比较	漏检率 (%)	误检率 (%)
参数椭圆方法	20.987	43.071
Y-Cb 和 Y-Cr 平面的查询表	1.0731	87.057
Cb-Cr 平面基于贝叶斯判决的查询表(阈值 0.505)	12.566	47.856
Y-Cb 和 Y-Cr 平面基于贝叶斯判决的查询表(阈值 0.462)	9.814	3.5128



(a)原图 (b)皮肤区域图像 (c)非皮肤区域图像

图 7 一幅测试图像及其手工分割图像

Fig. 7 A test picture and its hand-segmented pictures

### 5 结论与展望

本文提出了一个使用贝叶斯判决和两个联合查询表的肤色检测模型。该模型是采用贝叶斯判决来处理颜色空间中皮肤区域和非皮肤区域的交叠,而不是仅依赖肤色聚集区域的形状,因而提高了肤色模型的合理性。另外通过调节判决阈值,还可以根据具体检测要求来对漏检率和误检率进行动态调整,以满足人们对于肤色检测方面的不同要求。

另一方面,因为考虑了 Y 亮度信息,故两个联合查询表的性能比起 Cb-Cr 平面的查询表有很大改善。由于在对条件概率的比值的处理中用到了高斯归一化和线性变换方法,使阈值调节在 [0, 1] 范围内,因此对漏检率和误检率平衡点的求取得变得容



(a) 方法 1 效果图



(b) 方法 2 效果图



(c) 方法 3 效果图



(d) 方法 4 效果图

图 8 4 种方法对一幅测试图像进行肤色检测的效果图

Fig. 8 Result pictures of 4 methods using one test picture

易进行。另外,在不改变分类器的性能情况下,归一化后的阈值可以使在两个颜色平面具有相同的分类标准,这样就可以联合使用两个查询表。

需要指出的是,本论文的处理方法对人种肤色没有针对性,即论文提出方法的性能仅与训练集有关。由于训练样本中已经包含了广泛的光照条件和各种人种的肤色数据,因此模型可以对亚洲人、白人或者黑人进行有效的检测。当然,检测的效果与训练数据集的大小有一定的关系。由于该方法是基于贝叶斯的统计方法,因此总希望训练集大些比较好,

但这也增加训练的时间。另外,化妆品对肤色检测的影响,在效果上可以等同于检测经过光照和色彩处理后的图像。

本文提出的肤色模型虽是基于像素的,但没有考虑像素分布的相关性。下一步的工作将考虑皮肤像素分布的空间特性,即采用基于区域的方法,比如采用隐马尔可夫(hidden Markov model, HMM)模型等的方法<sup>[6]</sup>来进一步提高肤色检测的性能。

### 参考文献 (References)

- 1 Hsu R L, Mottaleb M A, Jain A K. Face detection in color image [J]. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(5): 696 ~ 706.
- 2 Chai D, Bouzerdoum A. A Bayesian approach to skin color classification in YCbCr color space [A]. In: *Proceedings IEEE Region Ten Conference [C]*, Kuala Lumpur, Japan, 2000, 2: 421 ~ 424.
- 3 LEI Ming, ZHANG Jun-ying, DONG Ji-yang. A skin color detecting algorithm under variant light condition [J]. *Computer Engineering and Application*, 2004, 38(24): 123 ~ 125. [雷明, 张军英, 董济扬. 一种可变光照条件下的肤色检测算法[J]. *计算机工程与应用*, 2002, 38(24): 123 ~ 125.]
- 4 Zarit B D, Super B J, Quek F K H. Comparison of five color models in skin pixel classification [A]. In: *Proceedings of International Workshop on Recognition, Analysis and Tracking of Faces and Gestures in Real-Time Systems, ICCV '99 [C]*, Corfu, Greece, 1999: 58 ~ 63.
- 5 Vezhnevets V, Sazonov V, Andreeva A. A survey on pixel-based skin color detection techniques [A]. In: *Proceedings of 13th International Conference of Computer Graphics and Visualization Graphicon '2003 [C]*, Moscow, Russia, September, 2003: 85 ~ 92.
- 6 Jedynak B, Zheng H, Daoui M, et al, D. Maximum entropy models for skin detection [R]. Technical Report XIII, Universite des Sciences et Technologies de Lille, de Lille, France, 2002.