

## 一种基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测方法

高建坡 王煜坚 杨浩 吴镇扬  
(东南大学无线电工程系 南京 210096)

**摘要:** 肤色检测是计算机视觉中的一个重要问题, 该文提出了一种新的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测方法。算法首先对训练肤色样本进行了分布均匀化处理, 然后以 KL 变换为基本工具最终得到了肤色分布区域的椭圆边界方程。方法简单直观。实践表明, 该算法能完成对各种不同环境条件下所拍摄图像的肤色分割, 效果理想, 其性能明显优于常用的域值界定法和单高斯模型法。

**关键词:** 人脸检测; 肤色模型; 肤色分割; KL 变换; Gauss 模型

中图分类号: TP391.41

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2007)07-1739-05

## An Elliptical Model Based on KL Transform for Skin Color Detection

Gao Jian-po Wang Yu-jian Yang Hao Wu Zhen-yang  
(Department of Radio Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

**Abstract:** Skin color detection is an important problem in computer vision. A new elliptical model based on KL transform for skin color detection is proposed in this paper. As to the proposed algorithm, firstly, the training skin color samples are made to distribute uniformly, then the elliptical boundary equation of skin color region is attained by means of KL transform. This method proves to be simple and intuitive. The experimental results on the images taken under a wide range of different environment demonstrate its efficiency and its clear improvement over the method based on explicit skin region boundary and single Gaussian model.

**Key words:** Face detection; Skin color model; Skin color segmentation; KL transform, Gauss model

### 1 引言

人脸检测、人脸跟踪以及手势分析一直是模式识别和计算机视觉领域研究的热点之一。而通常作为人脸检测、人脸跟踪以及手势分析预处理阶段的肤色区域分割由于其具有明显的速度优势, 且在一定程度上对姿态、尺度、遮掩具有很强的鲁棒性, 因此肤色检测备受研究人员的青睐。彩色图像中的肤色检测主要包括颜色空间的选择和肤色检测的建模两个主要问题。肤色检测中常用的颜色空间除了基本的 RGB 空间外, 还主要包括归一化 RGB(rgb), YCbCr, HSV, HSI, YUV, YIQ 等颜色空间<sup>[1,2]</sup>。如今存在的肤色判别方法主要包括肤色分布域值界定法<sup>[3,4]</sup>、直方图归一化查表法<sup>[2,5]</sup>、单高斯模型法<sup>[6]</sup>、混合高斯模型法<sup>[7]</sup>、椭圆边界模型法<sup>[8-10]</sup>等。

根据肤色的分布特点, 以 KL 变换为基本工具, 本文提出了一种新的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测方法, 为了避免由于训练肤色样本分布的不对称性造成统计所得椭圆中心的偏移, 算法首先对训练样本进行了分布均匀化处理, 然后通过分析最终得到了肤色分布区域的椭圆边界的显式方程, 方法简单直观。实践表明, 本文算法能自动完成对各种不同环境条件下所拍摄图像的肤色分割, 效果理想, 其性能明显优于常用的域值界定法和单高斯模型法。

### 2 基于 KL 变换的椭圆模型肤色判别

KL(Karhunen-Loeve)变换<sup>[11]</sup>被广泛地应用于模式识别和图像分析中。从几何角度看, KL 变换可以看作是坐标轴的平移和旋转, 即将原始坐标系的坐标轴平移、旋转成一组新的正交坐标轴, 并按原始数据的方差来排列这些新坐标轴。本文利用 KL 变换的主要目的正是利用它的这种几何性质, 将原始坐标系的坐标轴按训练肤色样本的分布方差经过平移和旋转而构成一组新的正交坐标轴, 然后再在新的坐标系中构建椭圆肤色检测模型。

诸多研究表明, 人的肤色在外观上的差异主要是由亮度引起的, 在色度空间中, 不同人的肤色分布趋于集中在一个较小的区域内。实验表明肤色在 YCbCr 颜色空间的 CbCr 平面上分布在一个近似的椭圆区域范围内<sup>[9,10]</sup>。

本文共搜集了 600 幅不同人、不同环境下含有肤色的图像(主要是人脸图像)。然后通过人工剪切的方法得到了约 18.3 万肤色样本。这些肤色样本在 YCbCr 颜色空间的 CbCr 平面上的分布如图 1(a) 所示(本文中 CbCr 值的范围均为 double 型[0,1])。从图 1(a) 可以看到肤色样本较为集中地分布在一个近似的椭圆区域内。显然我们可以通过判断一像素点的 CbCr 值是否落在肤色分布的椭圆区域内来确定其是不是肤色。所以现在问题的关键是如何来描述肤色分布椭圆区域

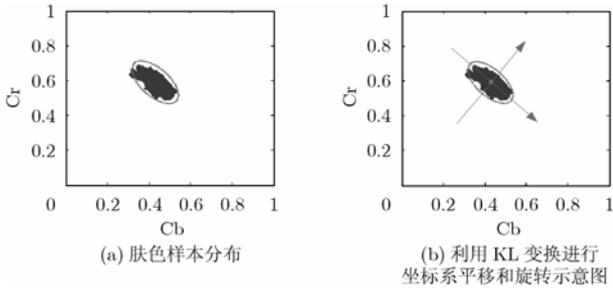


图 1

的椭圆边界。从图 1(a)可以看出，该椭圆边界在 CbCr 平面上是一个倾斜的椭圆，这给我们建立椭圆边界方程增加了难度。试想，如果能把坐标轴进行旋转和平移，使得肤色分布的椭圆区域的中心及长短轴分别为新坐标系的原点和两坐标轴，如图 1(b)所示，显然在这样的新坐标系中建立肤色分布椭圆边界方程将变得容易许多。而我们知道，KL 变换是针对训练数据进行坐标系平移和旋转的有力工具。以上的考虑和分析正是本文所提出的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测算法的出发点。

然而，给定训练肤色样本集，要想通过 KL 变换得到图 1(b)所示原点及坐标轴趋于肤色分布区域中心的理想新坐标系，训练数据要满足一定的对称性。否则，如果所采集的肤色样本分布不对称(即在部分区域内稠密而在其它区域较稀少)，这时通过 KL 变换得到的新坐标系将会偏离图 1(b)所示的理想情况。解决这个问题的一个简单思路就是使样本的分布尽量均匀一些。针对本文中使用的肤色样本，我们采用了下面的方法来使样本分布均匀化，首先把 CbCr 平面均匀分成若干小的区域，并把每个小区域的中心点 CbCr 色度值作为该区域的代表值，然后对采集的肤色样本进行逐一分析，如果一样本落在某一小区域内，则该样本的 CbCr 色度值就以该区域的代表值替换，这样对所有的样本分析完毕后，再对分析所得的新样本集去掉重复出现的样本，剩余的便是我们所要分布较为均匀的样本集。上述肤色样本分布均匀化的实现过程如图 2 所示。

对于本文所收集的肤色样本通过上述样本分布均匀化处理后利用 KL 变换可以得到图 3 所示原点及坐标轴趋于肤色分布区域中心的理想坐标系，这可大大方便在新坐标系中建立较为准确的椭圆边界肤色检测模型。当然，在均匀化抽样过程中，会造成大量肤色样本的减少，但这些被减少的肤

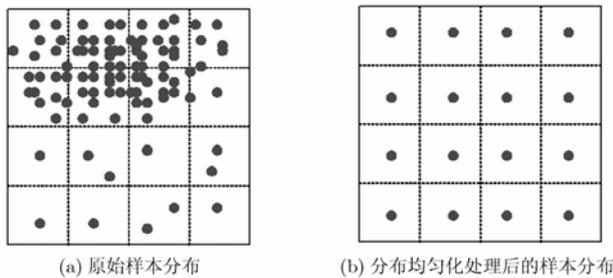


图 2 肤色样本分布均匀化实现过程示意图

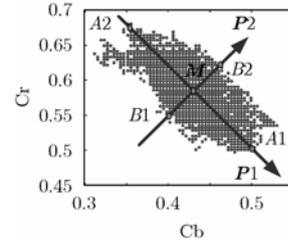


图 3 通过 KL 变换所确立的新坐标系

色样本主要集中在那些分布较密的地方。从图 3 可以明显看出，经过均匀化抽样后，并不会造成肤色样本分布总体区域范围的变化，抽样所改变的仅仅是肤色样本分布区域内的样本点数，而本文算法的核心思想是用一椭圆去描述这一区域的边界，从本文算法的实现过程不难看出，这些由于抽样减少的样本点不仅不会对建立椭圆肤色检测模型产生负面影响，而且去掉这些点反而会使肤色检测模型的性能得到提高。

对经过分布均匀化处理后的肤色样本集  $\{S_i\}$  进行统计分析，计算出其均值  $M$  及协方差阵  $C$ ，然后求出协方差阵  $C$  的特征向量  $P_1, P_2$  及其所对应的特征值  $\lambda_1, \lambda_2$  ( $\lambda_1 > \lambda_2$ )。这样以点  $M$  为原点， $P_1, P_2$  所在的直线为轴的坐标系就是我们所寻求的新坐标系，如图 3 所示。接下来的问题就是在新坐标系中构建肤色分布区域的椭圆边界方程，而其中的关键问题是确定出椭圆的长轴和短轴的长度。而从图 3 可以看出，肤色分布区域椭圆边界长轴和短轴的长度分别为分布在两坐标轴上的端点肤色样本  $A1$  和  $A2$  及  $B1$  和  $B2$  间的距离。因此只要我们能找到两坐标轴上的端点肤色样本  $A1, A2, B1$  和  $B2$ ，就能解决椭圆边界的长轴和短轴的求解问题。

现假设  $M = (Cb_m, Cr_m)$ ， $P_1 = (PCb_1, PCr_1)$ ， $P_2 = (PCb_2, PCr_2)$ ，则 KL 变换的基向量  $P_1$  所在的直线一定通过点  $P'_1 = (PCb_1 + Cb_m, PCr_1 + Cr_m)$ 。由几何知识易得 KL 变换的基向量  $P_1$  所在的直线方程为

$$PCr_1 \square PCb - PCb_1 \square PCr + (PCb_1 \square Cr_m - PCr_1 \square Cb_m) = 0 \tag{1}$$

由于  $PCb_1$  和  $PCr_1$  是 KL 变换的基向量  $P_1 = (PCb_1, PCr_1)$  (标准正交基)的元素，所以有

$$PCb_1^2 + PCr_1^2 = 1 \tag{2}$$

而当满足  $PCb_1^2 + PCr_1^2 = 1$  时，可以证明，CbCr 平面上的任一点  $(Cb, Cr)$  到式(1)直线的垂直距离为

$$abs[PCr_1 \square Cb - PCb_1 \square Cr + (PCb_1 \square Cr_m - PCr_1 \square Cb_m)] \tag{3}$$

式中 abs 表示取绝对值。

根据上面分析所得的结论，对于一肤色样本  $(Cb, Cr)$ ，如果它到式(1)直线的垂直距离足够小，则可认为此肤色样本在该直线上。本文采用的判断准则为：

$$abs[PCr_1 \square Cb - PCb_1 \square Cr + (PCb_1 \square Cr_m - PCr_1 \square Cb_m)] \leq 0.01 \tag{4}$$

通过式(4)准则得到式(1)直线所通过的肤色样本后，容易选取得到图 3 所示的分布在端点处的两个样本  $A1, A2$ ，然后

分别计算出  $A_1, A_2$  与  $M$  点的距离  $d_1$  和  $d_2$ ，我们可以取椭圆的长半轴的长度为

$$a = \min\{d_1, d_2\} \quad (5)$$

按同样的方法，对 KL 变换的基向量  $P_2$  所在的直线进行分析，我们可以得到椭圆的短半轴的长度  $b$ 。

对于一待判色度向量  $P = (Cb, Cr)$ ，其在新坐标系中的坐标值  $P'$  为

$$P' = (PCb, PCr) = (P_1^T(P - M), P_2^T(P - M)) \quad (6)$$

由此我们便可以引入了如下的肤色判决准则：

$$D(P) = \begin{cases} 1, & \frac{PCb^2}{a^2} + \frac{PCr^2}{b^2} \leq 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (7)$$

根据肤色判决准则式(7)，我们可以方便高效地得到有关肤色分割的二值图像，具体结果见下面的实验部分。

### 3 实验结果

在计算机视觉应用领域，明确的域值界定法和单高斯模型法是最为常用的两种肤色检测方法，以下是这两种方法同本文算法的分析比较。

域值界定法是肤色检测最直接的方法，其基本思想是定义出皮肤颜色分布的明确区间。例如在 YCbCr 空间中，通过对大量肤色样本的观察发现肤色在 CbCr 平面上主要集中在  $0.32 \leq Cb \leq 0.52$ ， $0.50 \leq Cr \leq 0.67$  的区域范围内。因此对于一待判样本  $P = (Cb, Cr)$ ，域值界定法是通过判断其是否落在上述的肤色分布区域内来完成。域值界定法的优点是简单快速，然而其误判率往往比较高。从图 4(a)可以看出，在 CbCr 颜色平面上，如果用上面的方法来界定肤色范围(虚线矩形边界所包围的区域)，将会引入较多误判，如斜线阴影区域所示。实践证明用一明确的固定肤色域值范围来界定肤色难以适应多种复杂环境下的肤色检测。

单高斯模型法是另一种常用的肤色检测方法，其基本思想是把肤色分布的概率密度函数建模为一均值为  $u$  协方差为  $\Sigma$  的多元高斯分布( $u$  和  $\Sigma$  分别为肤色训练样本集的均值和协方差阵)，利用单高斯模型来进行肤色检测，实际是判断某一待判样本向量  $c$  是否落在由  $u$ ， $\Sigma$  和肤色概率密度门限  $T$  (判为肤色的最小概率值)所确定的椭圆内。然而在实际的应用过程中，由于训练样本收集的随机性及肤色的分布特点，训练样本集常常不具有均匀对称性，这使得利用训练肤色样本集统计得到的均值  $u$  往往不能位于肤色分布

区域的中心(文献[8]对这个问题也作了类似的探讨)，图 4(b)给出了在建模单高斯模型时利用本文所收集的肤色样本进行统计分析所得的均值  $u$  (椭圆中心的圆点所示)，显然其偏离了肤色分布的中心。这便使得难以用一恰当的阈值  $T$  (对应一椭圆边界)来界定肤色分布区域。如  $T$  大些(对应图 4(b)中的小椭圆)，则误判率较小，但漏判率较大，同样如果减小  $T$  (对应图 4(b)中的大椭圆)，漏判率将相应减少，但随之而来的是大量的误判。由此可以看出，由于样本分布的不对称性，造成了  $T$  选取的两难问题，使得高斯模型对环境的适应能力有所下降。

本文基于 KL 变换的椭圆肤色检测算法是以对大量肤色训练样本的统计分析为前提的，因此所得肤色检测模型的性能在很大程度上将取决于训练样本的选择。而在本文的算法实现过程中，为了统计得出肤色分布椭圆模型，本文所收集的肤色样本集覆盖了很广的亮度等环境范围，基本上保证能布满各种环境下肤色分布的可能区域。所以本文算法所得出的肤色检测模型对不同的人、不同光照(包括阴影和高光)等环境条件下的肤色检测具有较好的适应性。另外重要的一点是，由于本文首先对采集的训练肤色样本集进行了分布均匀化处理，这在很大程度上解决了样本集分布的不对称性问题。从图 4(c)给出的对经过分布均匀化处理后的肤色样本统计得到的  $u$  值(椭圆中心的圆点所示)可以看出，此时  $u$  值已基本上位于了肤色分布区域的中心。在完成了对训练样本分布均匀化处理，本文又通过分析构建了肤色分布区域边界的显式椭圆方程，方法简单直观。从图 4(c)可以明显看出，本文算法一方面减少了直接利用域值界定法带来的大量误判，同时也解决了单高斯模型中由于训练样本分布不对称而造成的确定隐含椭圆边界的两难问题。

我们利用本文的肤色检测算法对不同环境下(不同的人、不同的光照、不同的摄像设备等)所拍摄的含有肤色的图像进行测试，实践证明该方法正如前面分析的那样，对不同的人、不同的光照(包括阴影和高光)等环境条件下的肤色检测具有较好的适应性，效果理想。图 5 给出了利用不同算法对各种光照条件下拍摄图像进行肤色检测的部分实验结果，从图 5 可以看出本文所提出的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测方法对不同的人、不同的光照等环境条件下的肤色检测均取得了较为理想的结果，其对鼻子两侧及人脸相互遮掩部分的阴影区域、(c)组较强光照条件下的鼻尖等部分高光区域都能较较好地肤色检测。通过对比不难看出，本文算法效果明显优于常用的域值界定法和单高斯模型法。

另外，本文对所提出的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测算法的性能进行了定量的统计分析，通过对随机收集的约 30.8 万的肤色样本(不包含训练集肤色样本)和约 126.4 万的非肤色样本进行判别测试，实验统计结果如表 1。其中 CDR(Correct Detection Rate)表示肤色样本被正确判定为肤色样本的概率，FDR(Fale Detection Rate)表示非肤色样

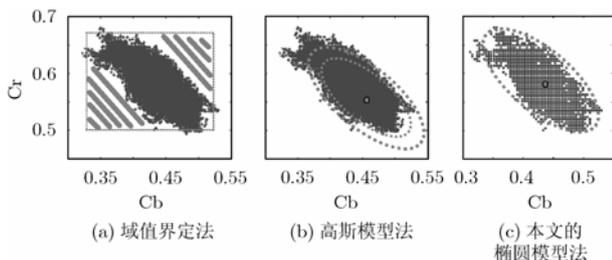


图 4 3 种肤色检测方法的分析比较示意图



图 5 实验结果

本被误判为肤色样本的概率,  $CD$ (Classification Rate)表示把肤色样本和非肤色样本都能正确判定的概率。由表 1 可以看出, 本文所提出的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测方法的性能优于常用的域值界定法和单高斯模型法(本文中, 对于单高斯模型法中阈值  $T$  选取了对大多数图像肤色分割效果较好的  $T = 0.12$ )

表 1 3 种肤色检测算法的性能比较(%)

	域值界定法	高斯模型法	本文的椭圆模型法
CDR	91.3	89.7	92.6
FDR	32.1	18.3	12.5
CR	72.5	83.3	88.5

#### 4 结束语

肤色分割是人脸检测、人脸跟踪及手势分析问题中的一个重要环节, 本文根据人的肤色分布特点, 提出了一种新的基于 KL 变换的椭圆模型肤色检测算法。该算法的基本思想是以 KL 变换为基本工具来构建肤色分布区域的椭圆边界方

程。为了避免由于训练肤色样本分布的不对称性造成统计所得椭圆中心的偏移, 本文首先对训练样本进行了分布均匀化处理, 然后再通过分析得出了肤色分布区域的椭圆边界方程, 方法简单直观。最后通过对大量在不同环境下所拍摄的图像进行测试, 实践证明, 本文所提出的算法效果理想, 其性能明显优于常用的域值界定法和单高斯模型法。

#### 参考文献

- [1] Vezhnevets V, Sazonov V, and Andreeva A. A survey on pixel-based skin color detection techniques. In Graphicon, Moscow, Russia, 2003: 85–92.
- [2] Jones M J and Rehg J M. Statistical color models with application to skin detection. *Int'l J. Computer Vision*, 2002, 46(1): 81–96.
- [3] Garcia C and Tziritas G. Face detection using quantized skin color regions merging and wavelet packet analysis. *IEEE Trans. on Multimedia*, 1999, 1(3): 264–277.
- [4] Chai D and Ngan K N. Face segmentation using skin-color

- map in videophone applications. *IEEE Trans. on Circuits and Systems for Video Technology*, 1999, 9(4): 551-564.
- [5] Sigal L, Sclaroff S, and Vassilis A. Estimation and prediction of evolving color distributions for skin segmentation under varying illumination. *IEEE CVPR*, South Carolina, 2000, 2: 152-159.
- [6] Yang J, Lu W, and Waibel A. Skin color modeling and adaptation. *Asian Conference on Computer Vision*, Hong Kong, China, 1998: 687-694.
- [7] Greenspan H, Goldberger J, and Eshet I. Mixture model for face-color modeling and segmentation. *Pattern Recognition Letters*, 2001, 22(14): 1525-1536.
- [8] Lee J Y and Yoo S I. An elliptical boundary model for skin color detection. In *Proc. of the International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology*, Las Vegas, USA, 2002: 579-584.
- [9] Bojic N and Pang K K. Adaptive skin segmentation for head and shoulder video sequences. *Visual communications and Image Processing, SPIE*, 2000, 4067: 704-711.
- [10] Kovac J, Peer P, and Solina F. Human skin color clustering for face detection. *Faculty of Computer and Information Science*, 2003: 144-148.
- [11] 章毓晋. 图象工程(上). 北京: 清华大学出版社, 1999: 68-70.
- 高建坡: 男, 1975 年生, 博士生, 研究方向为人脸检测、跟踪与识别.
- 王煜坚: 男, 1980 年生, 博士生, 研究方向为图像/视频分割和基于对象的编码.
- 杨 浩: 男, 1969 年生, 博士生, 研究方向为超分辨率图像处理.
- 吴镇扬: 男, 1949 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为听觉与视觉信号处理.