

肤色检测技术综述

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 合肥 230027)

²⁾(国立华侨大学计算机科学系 泉州 362021)

摘要 肤色检测在人脸和手势识别与跟踪、Web 图像内容过滤、数据库或因特网中的人物检索和医疗诊断等方面有广泛应用。文中通过分别介绍基于统计和基于物理的两类肤色检测技术,较全面地综述了肤色检测技术,其中对颜色空间选择、静、动态肤色建模方法、肤色反射模型和肤色波谱特性等肤色检测重要环节做了分析,明确了选择颜色空间与特征提取和分类方法的联系,强调了研究肤色波谱特征对基于物理的肤色检测技术的重要性。最后探讨了肤色检测的技术难题和发展趋势。

关键词 肤色检测;肤色建模;反射模型;皮肤光谱;计算机视觉

中图法分类号 TP391

A Survey of Skin Color Detection

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

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

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

Abstract Skin color detection has many applications in tasks like detecting and tracking human faces and gestures, filtering web image contents, retrieving people in databases and Internet, and diagnosing diseases. This paper comprehensively surveys the skin color detection techniques by dividing them into statistics-based and physics-based approaches. Important aspects of skin color detection are discussed, including color space selection, static and dynamic skin color modeling, skin reflection models, and visual and infrared skin spectrum. Based on the discussion, the color space selection is related to feature exaction and classification methods. The selection of color space is actually the selection of a feature base for the classification; and features are not independent from the classifier, so how well they cooperate can affect the overall performance of the classification system. Therefore, it is of little significance to discuss the optimal color space for skin color detection without considering the methods of skin color modeling and the principle and implementation of the classifier. A successful dynamic skin color model should be able to work well under varying illumination, which is also the precondition for a skin color detection system to work properly outdoors. Physics-based skin color detection should study skin reflection model or skin spectrum, the combination of reflected and emitted data will essentially improve the performance of skin color detection system. The major challenge of skin color detection techniques is how to deal properly with different illumination conditions and complex background. The further research directions of the skin color detection techniques include intercrossing related disciplines, fusing related algorithms and combining related features. It is a trend to integrate physics-based techniques in statistics-based skin detection techniques in high end applications.

Keywords skin color detection; skin color modeling; reflection model; skin spectrum; computer vision

收稿日期:2004-11-01;修改稿收到日期:2005-10-24. 本课题得到福建省自然科学基金(A0510020)和福建省科技计划国际合作重点项目基金(2004I014)资助. 陈锻生,男,1959年生,博士,教授,主要研究领域为数字图像处理与计算机视觉. E-mail: dschen@hqu.edu.cn. 刘政凯,男,1940年生,教授,博士生导师,主要研究领域为数字图像处理与模式识别.

1 引言

肤色检测是在图像中选取对应于人体皮肤像素的过程。随着视频图像采集设备的普及，近年来对图像中肤色区域分割的研究日趋活跃^[1]。在与人有关的各种机器视觉系统中，肤色检测技术正得到越来越多的应用，具有巨大的市场潜力。目前比较典型的应用包括人脸检测与识别、表情识别、手势识别、基于部分内容的图像与视频检索、新的人机接口技术、肌体检测和黄色图片过滤等方面，如文献[2~9]；也包括计算机图形学真实感润色、视频监控、皮肤疾病诊断、化妆品效果量化分析、通过下意识行为的检测分析进行测谎等，如文献[10~14]。可见，肤色检测不仅是人脸或手势等身份、情感和行为识别系统的重要组成，而且在安全防范、反恐和医疗保健等领域，人脸的化装和整容的检测也日趋重要。

根据有没有涉及成像过程，可以将肤色检测方法分成两种基本类型：基于统计的方法（如文献[15]）和基于物理的方法（如文献[16]）。基于统计的肤色检测通过建立肤色统计模型进行肤色检测，主要包括两个步骤：颜色空间变换和肤色建模。基于物理的方法则在肤色检测中引入光照与皮肤间的相互作用，通过研究肤色反射模型和光谱特性进行肤色检测。

本文在第2节比较全面地阐述基于统计肤色建模的肤色检测技术，包括静态和动态肤色检测，分析了颜色空间的选择对肤色检测的影响；在第3节介绍了基于物理的肤色检测，包括利用肤色反射模型和皮肤波谱特性的肤色检测；最后分析肤色检测的技术难点和发展趋势。

2 基于统计的肤色检测

统计肤色检测的主要步骤是颜色空间变换和肤色建模。选择颜色空间本身就是选择肤色检测的最基本特征表示。肤色模型是关于肤色知识的计算机表示。通过训练样本集建立肤色模型是肤色检测的关键，根据不同应用可以将肤色建模分为静态和动态两类。

2.1 颜色空间

颜色空间是定义、创建和观察颜色的方法。对颜色的研究和应用产生了许多不同的颜色空间，包括色度学的CIE-RGB真实三原色系统和CIE-XYZ虚拟三原色系统，三分量归一化后用两个分量表示

的色度图CIE-xy和NCCrgb，用亮度和双色差表示的颜色空间CIE Lab和CIE Luv等^[17]；电视工业用的YIQ、YUV、YCbCr和YES；面向色调的由颜色心理三属性表示的颜色空间HSI、HSV、HSL、HSB、TSL以及MPEG7中采用的HMMD^[18]。另外还有一些针对某些类型的图像应用通过统计或物理分析，由RGB线性或非线性导出的颜色空间，比如用在肤色检测的颜色空间YU'V'^[19]和LUX^[20]、彩色不变特征^[21]、具有亮度适应能力的H-SV-V颜色空间^[22]等。颜色空间的定义及其转换在此不做详细介绍，文献[23]是一个较好的参考。

肤色在颜色空间的分布相当集中，但会受到照明和人种的很大影响。为了减少肤色受照明强度影响，通常将颜色空间从RGB转换到亮度与色度分离的某个颜色空间，比如YCbCr或HSV，然后放弃亮度分量。在双色差或色调饱和度平面上，不同人种的肤色变化不大，肤色的差异更多的是存在于亮度而不是色度^[15]。另外，肤色变化中也包括唇色^[19,24,25]，唇色也是一个重要线索。LUX颜色空间有利于加强皮肤与嘴唇等之间的反差^[20]。

2.2 静态肤色模型

目前常用的静态肤色建模基本方法有三种：肤色范围、高斯密度函数估计和直方图统计，三者分别对应阈值化、参数化和非参数化方法。

2.2.1 规定肤色范围

用数学表达式明确规定肤色范围是一种简单的肤色建模方法，例如Chai^[26]采用YCbCr颜色空间的CbCr平面，如果输入像素的颜色落入 $RCr=[133;173]$ 和 $RCb=[77;127]$ 限定的矩形区域，就认为是属于肤色像素。有人注意到在不同的亮度分量Y上的矩形区域(RCr, RCb)不同，因此在Y分量上分段定义肤色矩形区域^[27,28]。Zhang^[29]在YUV空间中根据Y范围和UV平面中的色度范围进行肤色检测。这种简单明确的判断运行起来快速高效，特别是在实时系统中更具有吸引力。

规定肤色范围虽然快捷，但要取得好的效果需要解决两个问题：(1)如何选择合适的颜色空间；(2)怎么确定规则中的参数。选择颜色空间不仅要考虑肤色样本在颜色空间中的聚集程度，还要注意在该空间的色域^[30]，因为有些颜色空间的色域没有规则边界。

2.2.2 高斯分布模型

高斯密度函数估计是一种参数化建模。可以用单峰高斯模型SGM(如文献[28,31,32])或高斯混

合模型 GMMs9(如文献[15,33,34]).

(1) 单峰高斯模型是椭圆高斯联合概率密度函数

$$p(x|skin) =$$

$$\frac{1}{2\pi|\Sigma|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)\right\},$$

其中 x 是像素颜色向量; 均值向量 μ 和协方差矩阵 Σ 是高斯分布参数, 用最大似然法估算^[32].

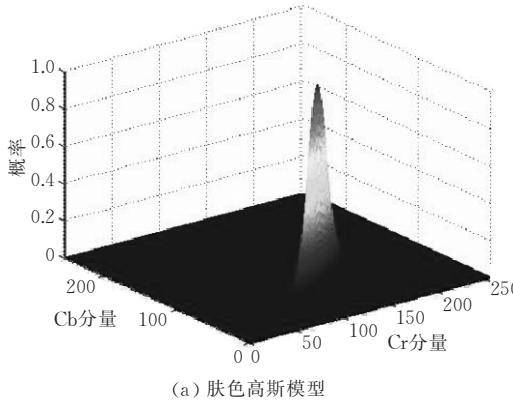
$p(x|skin)$ 可以直接衡量像素 x 属于肤色的可能性, 也可以通过高斯分布参数计算输入像素颜色 x 与均值 μ 的马氏距离 $d^2 = (x-\mu)^T \Sigma^{-1} (x-\mu)$, 距离大小表示该像素与肤色模型的接近程度.

(2) 高斯混合模型是多个高斯密度函数的加权和

$$P(x) =$$

$$\sum_{i=1}^K w_i \frac{1}{2\pi|\Sigma_i|^{1/2}} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x-\mu_i)^T \Sigma_i^{-1} (x-\mu_i)\right\},$$

其中 x 是颜色向量, 有 k 个高斯密度函数, 分别用均值向量 μ_i 和协方差矩阵 Σ_i 定义, 权值 w_i 表示各高斯密度函数对混合模型的贡献大小.

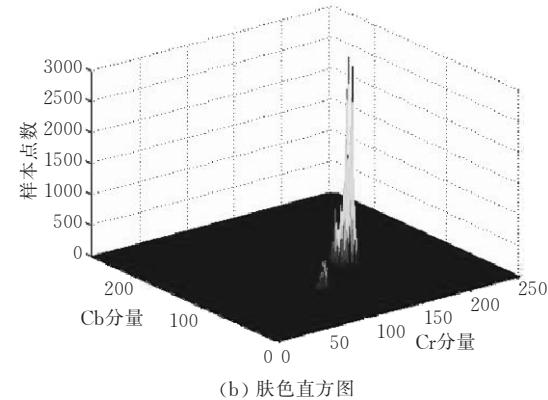


(a) 肤色高斯模型

对肤色和非肤色分别用一个高斯混合模型表示, 用标准的期望最大化 EM 算法训练这两个高斯混合模型, 每个高斯混合模型中的高斯密度函数个数 k 需要事先给定, 如文献[33,34].

Caetano^[35] 认为高斯混合模型比单峰高斯模型好, 但后来在 NCCrgb 颜色空间中的实验^[36] 却发现, 高斯混合模型仅仅在特定的工作区域有比较好的性能, 这个区域处在 ROC 曲线^[37] 的中后段, 即正检率和误检率都比较高的区间.

高斯肤色模型常用 2 维色度平面, 在色度平面上的肤色分布是否符合高斯分布, 决定了本建模方法的好坏, 但这种分布形态与所选的颜色空间有关. Yang^[15] 验证了在一定光照变化范围内的个人肤色在 RGB 中符合高斯正态分布; Yang^[33] 证明了肤色在 Luv 颜色空间中的正态分布. 如果肤色在某颜色空间中分布比较不对称, 就会造成相同正检率条件下的误检率升高, 如图 1(a) 对图 1(b) 的建模.



(b) 肤色直方图

图 1

2.2.3 直方图模型

直方图肤色模型是一种非参数模型. 肤色样本的直方图统计可以构造肤色概率图 SPM^[38,39], 即为离散化的颜色空间中的每个格子赋予一个概率值. 利用 SPM 检测肤色像素主要有两种方法: 规则化查找表和贝叶斯分类器.

(1) 规则化查找表

规则化查找表直接利用 SPM 作为肤色概率查找表. 输入像素的颜色向量经过与 SPM 相同的颜色空间变换和量化后, 所得到的向量作为查表的索引, 查表得到的值是该输入像素属于肤色的概率. 可见这里所谓的肤色概率就是肤色训练样本在这种颜色上所出现的相对频数:

$$P_{skin}(x) = \frac{Count(x)}{Norm},$$

其中 $Count(x)$ 是训练场地中颜色向量为 x 的像素个数, 规则化参数 $Norm$ 是训练场地中的像素总数目. 例如, Crowley^[40] 采用 NCCrgb 颜色空间统计肤色样本集在 rg 平面上的直方图 $h(r,g)$, 根据待测像素的 (r,g) 值查表 $h(r,g)$, 如果查出的频数大于预定阈值就判定该像素属于肤色.

(2) 贝叶斯分类器

上述直方图统计量 $P_{skin}(x)$ 实际上只是估计条件概率 $P(x|skin)$. 对肤色检测更合适的度量应该是 $P(skin|x)$. 为了计算后者, 需要用 Bayes 公式^[42]:

$$P(skin|x) =$$

$$\frac{P(x|skin)P(skin)}{P(x|skin)P(skin)+P(x|\neg skin)P(\neg skin)},$$

其中 $P(x|skin)$ 和 $P(x|\neg skin)$ 可由肤色和非肤色样本的直方图估计^[37]. 先验概率 $P(skin)$ 和 $P(\neg skin)$

是训练场地中肤色和非肤色像素数目比例, 实际应用时经常令二者相等。当 $P(\text{skin} | x) > \Theta$, Θ 是阈值, 则具有颜色向量值 x 的像素被判定为肤色像素。

因为贝叶斯分类器学习正反样本, 很可能得出较好的分类器。规则化查找表只学习肤色样本, 但需要充足的有代表性的样本容量以及适当的量化级数。表面上似乎量化级数越多模型越精确, 但是查找表容量随量化级数呈指数式膨胀, 所需要的样本容量也呈指数式增加。因此, 在实际中构造查找表的颜色分量量化级数并非越多越好, 特别是 64 级以上的量化级对分类精度的改善很有限, 而且需要增加多倍的存储和样本。比如文献[41]用 32 或 64 级的 3 维线性量化和 128 或 256 级的 2 维线性量化时, 肤色检测有最佳 ROC 曲线, 超过 128 级的 3 维量化反而使检测性能下降。

非参数化的直方图肤色模型与参数化的高斯肤色模型的比较各有优缺点。直方图模型的统计学习速度快, 理论上与肤色的分布形态无关, 但需要大量的存储空间, 特别是维数和量化级较多的直方图需要更多的统计样本, 因此更适合于具有大量的训练和测试图像数据。为了减少存储需求和避免训练数据不足, 通常采用粒度较大的颜色空间量化。高斯肤色模型的参数化所需的存储空间相对很小, 能够内插和归纳不完整的训练数据, 因此能适应容量较小的训练和测试数据集, 但速度较慢, 并需要考察所选颜色空间中肤色分布的形态, 高斯混合模型的高斯密度函数个数的选定通常在 2~16 之间^[33, 43], 个数多了会有过度训练之嫌, 个数少了又恐怕估计不准, 容易造成高误检率, Terrillon^[75]取折中的个数为 8。作为统计模型, 这两种肤色模型都要求样本具有充分的代表性。

上述三种肤色建模基本方法在实现上可能有结合, 比如参数化的高斯建模后, 检测时可以用非参数化的 LUT 方法加速。另外, 还有基于神经网络和支持向量机^[29, 44~46]、基于自组织图(SOM)^[47, 48]等半参数化方法以及基于模糊集理论^[49]的 Bayes 网络^[50]等肤色建模方法。

2.2.4 区域级肤色检测

以上的肤色检测方法都没有考虑颜色的空间分布, 属于像素级肤色检测。区域级肤色检测似乎本质上与像素级肤色检测相同, 只是尺度不同, 实际上已经提出多种方法利用空间信息提高肤色检测性能。Solar^[51]先在 RGB 空间用高斯混合密度函数做基于像素的检测, 然后用可信度高的像素作为种子进行

“散射”处理, 其它像素要确认是肤色必须在其某领域内有确认过的肤色像素。Kruppa^[52]结合形状和颜色提出一种肤色色块模型, 用参数表示肤色像素的椭圆区域, 在模型生成的肤色像素分布与图像中肤色分布之间用最大化互信息量进行该色块模型的参数估计。Zhu^[53]将肤色的空间和形状信息加入到高斯混合密度函数的训练中。Jedynak 和 Zheng^[54, 55]采用多种最大熵模型检测肤色, 用 Bethe 树表示 4 邻像素, 使参数估计简化为邻接像素的彩色直方图计算, 并用可信度传播算法加速计算肤色概率。

与利用颜色及其空间分布的肤色检测工作相关的还有大量采用的基于颜色-空间特征的图像检索方法, 如文献[56~59]。

2.3 动态肤色模型

一个实用的彩色图像肤色检测系统必须能够处理由于成像条件变化引起的肤色变化。一般地, 处理环境变化有两种基本方法: 容忍和适应。容忍的方法可以利用人眼的颜色恒常性, 即在不同照明条件下, 人们一般能正确反映物体固有的颜色。然而人们对颜色恒常性的机制还不清楚, 颜色恒常性还没有适合于计算机视觉的好方案出现^[5, 60]。对于机器视觉而言, 颜色恒常性是关于物理表面光谱反射率的描述^[61], 不是人眼颜色恒常性对照明变化的容忍。因此, 人们实际上更多的是研究如何使肤色模型自动适应环境变化。

目前的动态肤色建模方法可以分成两类: 第 1 类方法是可以将肤色模型参数调节到适应某幅静态图像; 第 2 类方法是针对序列图像, 能适应成像条件随时间的变化。这些自适应方法所建立的动态肤色模型的通用性可能较差, 但是在特定条件下的性能更优, 能获得高检测率和低误检率^[2]。

针对人脸跟踪设计的肤色建模方法与静态图像人脸检测的肤色建模有些不同。人脸跟踪有相对稳定的图像数据源, 肤色模型比较专用, 可以只适应于某种场合的光线、某种摄像机和特定的人群, 还可以进行初始化, 便于从固定背景将人脸区域分割。因此, 与数据来源广泛的静态图像人脸检测(如文献[43]的高斯混合模型等)相比, 人脸跟踪的肤色模型在专用的场合比较容易获得更好的性能。对这种人脸跟踪用的动态肤色模型的要求是训练和分类快, 并能自我更新以适应条件的变化。因此, 使用简单的参数式肤色建模速度快而且存储量少, 便于随分布的变化而更新。在非参数肤色模型中, 直方图交叉^[62, 63]和直方图查找表^[64]也常用在肤色跟踪中。

肤色分布动态更新的方法有动态直方图^[64~68]、高斯分布自适应^[15,69]、均值漂移^[70]和肤色轨迹白平衡^[73]等。例如文献[64,65]通过在 HS 直方图上做直方图反向投影快速跟踪彩色人脸区域。Soriano^[66]的肤色模型更新利用肤色搜索区中落入肤色轨迹范围的像素进行直方图反向投影来完成肤色跟踪。Stern^[67]发现在 RG, rg, HS, YQ, CbCr 这些不同的 2D 颜色平面间自动切换能改进人脸跟踪性能。Sigal^[68]在 HSV 颜色空间中用二阶 Markov 模型预测肤色直方图的变迁。Yang^[15]对 NCCrgb 颜色空间的高斯肤色模型通过将原模型参数与预测的参数进行线性组合, 实现均值向量和协方差矩阵的自适应; Comaniciu^[70]也利用均值漂移实时跟踪彩色非刚体目标。Lu^[71]将连续自适应均值漂移 Camshift 方法引入色调查找表, 可较好地适应不同测试图像的照明变化。Gong^[72]采用条件密度传播 Condensation 方法调整不同时刻的高斯混合肤色模型。Störring^[73]的肤色轨迹方法是基于皮肤色度知识的。它并不设定某种颜色属于肤色的概率, 而只是定义皮肤可能出现的色度区域。因此, 肤色轨迹方法对可用的光照变化范围和白平衡条件有明确的规定, 本质上能适应不均匀照明。Cho^[74]和 Zhu^[34]采用从粗到细的自适应肤色过滤算法。

通常, 能否处理照明变化是动态肤色模型成功与否的关键, 也是一个肤色检测系统从室内走向室外的前提。

2.4 肤色检测与颜色空间关系的探讨

近年来有几篇论文对不同颜色空间中的肤色检测性能进行比较。Terrillon^[75]分析了两种肤色模型和九种颜色空间在静态图像人脸检测中的性能, 认为 TSL 颜色空间的性能最好, 其次是 NCCrgb 和 CIE-xy。Zarit^[76]在五种颜色空间中比较了两种基于直方图的肤色像素分类性能, 包括放弃亮度维的 2 维直方图查表法和贝叶斯最大似然法, 采用最大似然法的肤色像素检测率在不同颜色空间中变化很小, 均优于查表法。Brand^[77]定量比较了三种颜色空间中的肤色检测性能, 包括单阈值化的红绿分量之比、RGB 的线性变换 $YI'Q'$ 以及 RGB 中的肤色概率图。Jayaram^[41]分析了颜色空间和肤色建模对肤色检测的影响, 认为颜色空间变换有时可以提高系统性能, 放弃亮度分量会降低性能, 肤色建模方法比颜色空间变换对检测系统的性能影响更大。而 Gomez^[78]用统计方法评价若干颜色空间的分量, 发现混合选取的分量 $H(HSV)-Y(RGB-Y)-W_r(W_r)$ 具有最

好的肤色分类和泛化性能。也有些肤色检测研究认为, 肤色检测性能与颜色空间关系不大^[79], 这在使用肤色直方图统计量的贝叶斯分类系统中得到佐证^[1]。有人还在理论上证明, 只要不同颜色空间之间的变换可逆, 肤色检测与颜色空间甚至没有关系^[80], 因为对应每个颜色空间理论上都存在一个最佳分类器, 使系统性能相当。

以上关于肤色建模颜色空间的研究成果都是在各自的实验环境中得到的, 虽然结论有所不同, 但有两点比较一致:(1)颜色空间需要转换到 RGB 以外, 常用亮度与色度分离或面向色调的颜色空间;(2)认为亮度分量对肤色检测有贡献。我们认为, 对于像素级的肤色检测, 颜色空间的选择实际上就是分类特征基的选择。对于一个模式分类系统, 分类特征与分类器并不是相互独立的, 它们之间的配合好坏会影响系统的整体性能。比如, 用高斯概率密度函数表示肤色模型就是假设肤色呈正态分布, 用单峰高斯建模进行肤色检测就需要选择肤色分布较为正态的颜色空间。因此, 离开肤色建模方法和分类器原理与实现, 探讨所谓的肤色检测最佳颜色空间就没有太大意义。另外, 评判任何分类特征的优劣除了要考虑所用的分类方法, 还需要一致的评判标准以及有代表性的实验数据。

3 基于物理的肤色检测

在复杂照明条件下, 比如图像中肤色在高光区或阴影区中, 上述基于统计的肤色检测技术都会使相同的肤色区域分割成不同的区域, 导致肤色区域分割失败。为了从成像机理上克服光照对图像的这种不利影响, 需要了解光线与皮肤的相互作用, 了解皮肤波谱特性。这种考虑电磁辐射与皮肤相互物理作用的肤色检测技术就称为基于物理的肤色检测技术。因此, 基于物理与基于统计的肤色检测所使用的数学工具基本相同, 主要差异在于有没有利用解释皮肤辐射特性的物理模型。下面介绍皮肤反射的物理模型和肤色波谱特征以及利用它们进行肤色检测的方法。

3.1 肤色反射模型

3.1.1 双色反射模型

Shafer^[81]根据非均匀电介质的反射特性(如图 2), 提出一个模拟不透明的非均匀电介质物体反射过程的数学模型, 称为双色反射模型。

图 2 中定义了几个光度角: 入射光 E 与局部界

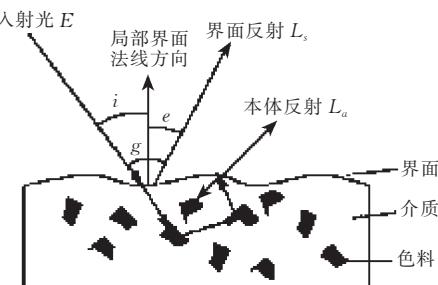


图 2 非均匀电介质的光线反射

面法线之间的入射角 i ; 界面法线与观测方向之间的出射角 e 以及入射光与出射光之间的相位角 g . λ 表示光线的波长.

该模型将物体上某一点的反射光线 L 表示为两部分的线性组合,一部分是不同介质分界面上的反射,称为界面反射分量 L_s 或镜面反射分量;另一部分来自物体中的反射,称为本体反射分量 L_b 或朗伯体反射分量.

$$L(\lambda, i, e, g) = L_s(\lambda, i, e, g) + L_b(\lambda, i, e, g).$$

该模型将光谱反射特性与它们的几何反射特性分离,得到如下双色反射模型:

$L(\lambda, i, e, g) = m_s(i, e, g)c_s(\lambda) + m_b(i, e, g)c_b(\lambda)$, 式中 $m_s(i, e, g)c_s(\lambda)$ 表示界面反射分量 L_s , $m_b(i, e, g)c_b(\lambda)$ 表示本体反射分量 L_b . 给定表面的光谱能量分布 $c_s(\lambda)$ 和 $c_b(\lambda)$ 是不变的,仅与波长有关;而几何比例因子 $m_s(i, e, g)$ 和 $m_b(i, e, g)$ 仅与照明和观察角度有关,如图 3 所示.

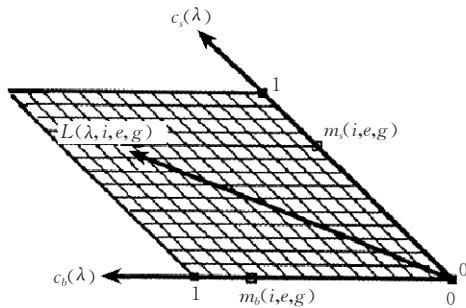


图 3 物体界面和物体体内反射光线的混合

在彩色图像理解中,双色反射模型强调的是其中的光谱能量分布 $c_s(\lambda)$ 和 $c_b(\lambda)$ 之间的差异. $c_s(\lambda)$ 与入射光光谱基本一致,而 $c_b(\lambda)$ 则反映物体本身的颜色特性. 通常 $m_s \geq 0$, $m_b \leq 1$, 并采用归一化: $m_s + m_b = 1$. 对于大多数照明和观察角度 (i, e, g) 组合,有 $m_s = 0$, $m_b = 1$, 即以本体反射分量为主.

Klinker^[82,83]改进了双色反射模型,认为在 RGB 空间中界面反射以“ \perp ”形分布在四个边形平面中. 作为 Shafer 方法的一个变种, Sato^[84]采用序列

图像为界面分量建模. 这些方法都只适合于点光源. Störring^[16]将双色反射模型用到多光源的肤色建模. Buluswar^[85]的归一化光度函数 NPF 是双色反射模型在 NCCrgb 颜色空间中的简化.

3.1.2 皮肤结构的双色反射特性

人体皮肤通常分为三层:表皮、真皮、皮下组织,总厚度约 1.5mm,如图 4(上图)^[86]. 皮肤表面本身可以用散射近似,因为最上层覆盖着一层死亡的细胞,它们的反射是无规律的. 皮肤的光泽是由汗水、皮肤油脂或其它覆盖在皮肤表面的化学物质引起的. 无光泽的肤色受到 3 个颜色因素的影响:表皮中的黑色素、真皮和皮下组织中的胡罗卜素以及真皮中毛细血管.

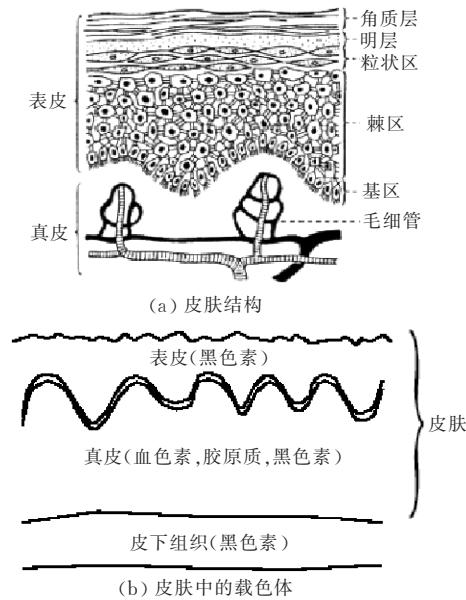


图 4

皮肤的波谱反射特性与皮肤的结构有密切关系. Ohtsuki^[87]将皮肤分成表皮和真皮两层,用双色反射模型描述皮肤反射. 人体皮肤上的界面反射发生在表层. 大约占辐射量 5% 的界面反射率,这部分界面反射与光波波长无关,也与人种无关. 其余 95% 的入射光进入皮肤,在表皮和真皮等皮肤层次中被吸收和散射,散射光中的一部分溢出表皮形成皮肤的本体反射^[88]. 将图 4(b) 与图 2 的非均匀电介质物体比较,皮肤对光线的反射与非均匀电介质非常相似,这说明皮肤反射可以用双色反射模型描述.

肤色是由皮肤各层中的载色体所决定,载色体主要是黑色素和血色素^[89]. 表皮主要吸收光线,表皮中的散射可以忽略不计. 因此,表皮具有光学滤波器的特性,光的透射率取决于波长和表皮中黑色素

的浓度。在真皮中光线被散射和吸收，吸收光线是血液中的血色素、胆红素和胡萝卜素等成分。

皮肤的本体反射率可表示为^[87]

$$\rho_{\text{body}} = (\text{表皮透射率})^2 \times (\text{真皮反射率})$$

由上述分析可知，表皮透射率与人种有关，真皮反射率与人种无关。由于绝大部分光线进入真皮再反射出表皮形成本体反射，本体反射才是皮肤的真实颜色。因此，因人种而异的表皮透射率引起皮肤亮度差异，而相同的真皮反射特性使得不同人种的肤色在色度图上能够高度聚集，尽管表皮的光学滤波特性也会影响肤色。

Störring^[88]使用基于双色反射模型的肤色模型，可以对不同的校正色温参数在 NCCrgb 颜色空间中推算出不同的肤色区域；从皮肤的高光区域估算照明颜色也取得了较高的精度^[73]。系统分析和实验均证明，双色反射模型基本可以反映活的人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界面反射矢量和本体反射矢量，需要较复杂的计算。Chen^[30]提出了一种在 TSL 颜色空间中进行二维双色反射建模的高光检测和辐射校正的方法。

3.1.3 其它肤色反射模型

在计算机图形学或计算机视觉方面还有许多肤色反射模型，如文献[90, 91]。其中双向反射分布函数 BRDF^[90]可用来进行几何造型润色和模拟皮肤反射^[92]。Hanrahan^[93]用一维线性传输理论，对包含次表面散射的多层次表面反射提出一种参数化模型，并用于模拟皮肤和树叶。皮肤被分成表皮和真皮两层，各层的散射特性和着色用参数建模，用 Monte Carlo 算法计算层间的光线传输，对人脸外表面还用一层油来模拟镜面反射。Ng^[94]用一层皮脂覆盖皮肤扩展了 Hanrahan^[93]的工作，从皮脂层开始建模使皮肤润色更真实自然，模拟得到的 BRDF 与实测的 BRDF 很相似。

目前用来纠正和检测肤色的反射模型主要还是双色反射模型，其它肤色反射模型主要用于图形的真实感润色、皮肤病诊断、局部的药效测试和化妆品的量化分析等。也有人采用直方图统计方法纠正图像偏色，如文献[95]。

3.2 皮肤的波谱特性

由于含有皮肤的图像都是通过电磁波辐射检测的，所以肤色检测的物理基础是电磁场理论和肤色的电磁波谱特性，皮肤波谱特性是基于物理的肤色检测的重要物理基础。图 5 是人的皮肤在可见光和

近红外波段的反射光谱曲线^[73, 96]。

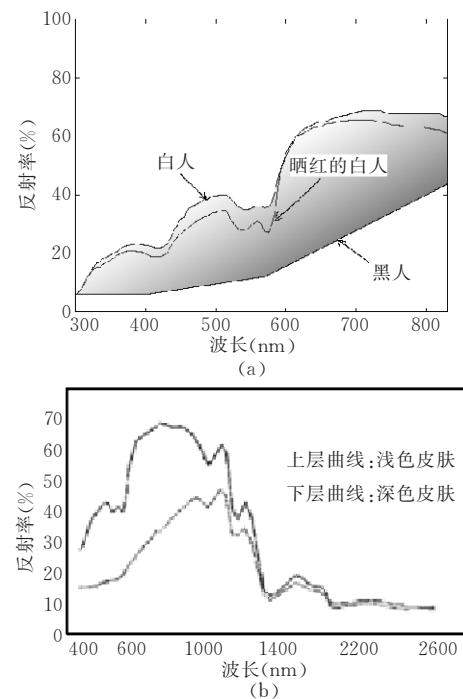


图 5 不同人种皮肤的反射光谱曲线

从图 5 可见尽管人种和性别不同，可见光波段的皮肤反射率总体上呈上升趋势。文献[97, 98]也认为肤色的蓝、绿、红分量有递增关系，即 $R > G > B$ ，但是还有许多物体也有类似反射光谱，比如牛皮纸、一些木材、红砖墙和沙地。

Angelopoulou^[89, 99]研究了肤色反射对成像过程的影响，在精确调校的照明条件下用高分辨高精度的光谱摄制仪测量皮肤的反射光，并建立了肤色反射模型，得到了与人种无关的皮肤反射信息。这种高光谱信息比 RGB 三色成像的信息准确和丰富得多。皮肤在绿光波段中有一种特有的‘W’型曲线，是真皮层中血色素吸收引起的，见图 6，这个‘W’型曲线是肤色检测应该特别关注的肤色光谱特征，在一般的 RGB 成像设备中这个关键特征被平滑在绿色分量中。

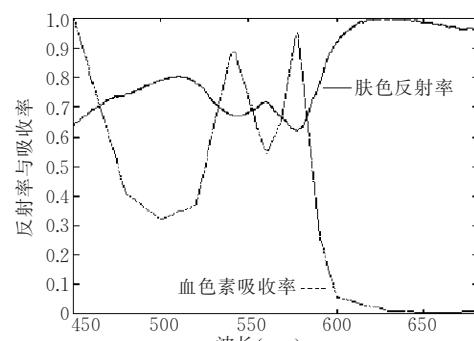


图 6 皮肤反射光谱与血色素吸收光谱

3.3 基于物理的肤色检测

根据上述肤色反射模型和皮肤波谱特性分析,在可见光和红外波段有许多成像物理特性可用于检测皮肤。根据电磁辐射的性质,下面分反射波段和发射波段分析肤色检测方法。

3.3.1 可见光和反射红外波段

在可见光反射波段可以创建或利用各种肤色反射模型进行皮肤反射光校正和检测。比如利用双色反射模型分离界面反射分量和朗伯体反射分量。前者与照明波长有关,可用来估计照明主色光;后者与皮肤本体反射有关,可用来检测皮肤。如果有可见光的高光谱反射数据,还可以利用“W”型波谱特征检测皮肤。在近红外反射波段可利用人眼瞳孔对近红外光的强烈反射,进行眼睛的检测^[100]、跟踪^[101]和识别^[102]。

通常反射红外波段又分近红外波段NIR(0.7~0.9 μm)和短波红外波段SWIR(0.9~2.4 μm),而Pavlidis^[96]将反射红外波段分成两段:高频段(0.8~1.4 μm)和低波段(1.4~2.2 μm)。在1.4 μm处划分的原因是太阳光谱辐射强度在低频段比在高频段高约3倍。皮肤在高频段的反射率很低;活体毛发在高频段的反射率很高,而在低频段很低;假发在高频段的反射率很低,这可用来揭露毛发化装。通过对反射红外划分高低波段能有效地检测人脸,但不能检测人脸是否被整容。

3.3.2 热红外波段

红外波段(0.7~14 μm)包括反射红外(0.7~2.4 μm)和热红外(3~14 μm)波段。热红外波段包括中波红外MWIR(3~5 μm)和长波红外LWIR(8~14 μm)两个波段。在SWIR与MWIR之间的2.4~3.0 μm和MWIR与LWIR之间的5.0~8.0 μm,由于大气对太阳辐射的强烈吸收,使得在这两段成像很困难。

人体在LWIR波段具有比在MWIR波段较强的热辐射,在这两个热红外波段都不需外加红外照明就能检测图像。这种热红外系统的被动性也降低了复杂性,加强了可靠性。人体皮肤具有比较稳定的热信号,并通常与环境反差较大,便于区域分割。这是用热红外比用可见光波段检测皮肤的优势之一。发射光比反射光受环境的影响要小很多。可见光的杂乱背景在热红外图像中通常呈暗淡背景,这有利于皮肤的检测、定位和分割。

热红外对伪装检测也提供有效的线索,化装材料会改变人脸的热信号分布,而整容手术的刀路引

起血液循环管道的改变,会在热红外图像上留下冷斑。但是,热红外成像设备昂贵,多数商用的热红外相机感光速度较慢,不利于运动目标检测。

3.3.3 可见光波段与热红外波段的结合

在成像分辨率方面,反射波段(包括可见和反射红外波段)的空间分辨率较高,而热红外的灰度分辨率较好。这是两者互补性强的物理基础。

不同人种的皮肤反射特性变化较大,加上光照的变化就使得肤色检测更加困难。由于室外光线可变范围很大,而室内比室外容易控制光线,通常在室内检测肤色比室外容易。用可见光也难于区分化装或整容后的人脸,因为伪装的目的就是要欺骗人眼。反射红外波段仅与被反射的太阳辐射有关,与物体的热信息无关,绝大部分不为人眼所觉察。因此只要将照明光谱限制在SWIR波段,就可以进行隐蔽的人工辅助照明。Pavlidis^[96]研究了可见光波段及红外波段的人脸和伪装检测技术,认为稳健的室内外人脸检测与识别系统需要可见光、反射红外和中波红外的多波段成像。可见光波段适合于人脸识别,反射红外波段适合于人脸检测,而反射红外和热红外波段适合于伪装检测。

Socolinsky^[103]比较了可见光波段与8~12 μm的热红外波段中的人脸识别,发现热红外在许多情况下有比较好的检测性能,而其它情况下也能达到可见光波段的人脸识别性能,其中的关键因素是热红外波段受到照明条件的影响很小。Kong^[104]认为可见光的人脸识别在可控照明条件下比较可靠,而热红外图像在照明不可控制的情况下或检测伪装人脸时比较有利。

融合红外和可见光进行肤色和人体检测与识别已经成了一种新的系统设计趋向。例如,Li^[105]综合考察红外可见光图像人脸识别的优缺点,设计了结合红外和可见光波段的人脸检测与识别系统。Chen^[106]也验证了结合红外波段和可见光波段比仅用其中之一能更好地识别人脸。Heo^[107]采用数据融合和决策融合两种方式结合热红外和可见光,在照明变化和表情变化的带眼镜人脸识别中也取得了较好的结果。

4 存在的问题和发展趋势

前面介绍了近年来国内外学者在肤色检测与跟踪技术方面的主要研究成果,从这些技术现状可以看出肤色检测技术目前仍然存在如下主要问题:

(1)复杂背景和复杂照明条件下的肤色检测依然有待解决。肤色特征虽然具有大小、位置和姿态不变的特性,但容易受照明条件影响。照明变化包括角度、强度与色温。当照明变化不大或主要是光强变化时,通常采用基于统计的肤色检测技术中的动态肤色建模;当照明变化包括较大的色温变化或引起高光和阴影时,可能需要采用基于物理的肤色纠正和检测技术。在技术设备条件允许的情况下,热红外波段的肤色检测可直接消除照明条件影响。

(2)肤色不是很独特,有不少日常物品的颜色与肤色范围重叠。不同人种或个人的肤色也不一样,不同人种的肤色差异和成因还有待相关学科的深入研究。不仅是因为引起肤色多样性的生物基因还是一个谜^[108],而且对不同人种的皮肤光谱特征和反射模型还有待进一步探讨。由于深色皮肤的低亮度使得其色调更不稳定,对深色皮肤的检测也更困难。目前对黑色人种的肤色检测技术研究也相对薄弱。

(3)肤色表示有待优化。颜色空间的选择和量化级数与肤色建模和分类方法有关,不应局限于比较不同颜色空间中的肤色样本的分布形态和分布交叠情况。多数分类算法使用了色差度量,为使色差度量值与人眼的颜色分辨率一致,应尽可能采用比较均匀的颜色空间,目前色度学也仅在 CIE 1976 Luv 和 Lab 定义了色差计算公式^[17]。放弃亮度分量通常是简化颜色空间的首选,对样本量较小的肤色建模有利于保持较好的泛化性,但是无助于提高分类性能。当样本量足够多并有代表性时,应该保留所有颜色分量。

(4)公用的肤色图像数据集比较缺乏,检测系统性能评价方法不统一,难以对各种肤色检测技术的性能进行定量比较。为了定量、客观地比较各种肤色表示和检测技术,需要加强公用肤色图像数据库的建设,统一系统评测方法和规范。

目前公开的肤色图库既有用于研究基于统计肤色检测的 Compaq 肤色库^[43],也有专门用于研究基于物理肤色检测的人脸数据库,带有肤色反射率、照相机的通道响应率和照明光谱分布等成像光谱数据^[109],还有 Equinox 公司的红外人脸图库^[110]。许多肤色检测用的数据来自人脸检测与识别所用的图库。比如,西班牙巴塞罗那计算机视觉中心的 AR 人脸库^[111]、韩国浦项科技大学的亚洲人脸库 PF01^[112]、美国卡耐基·梅隆大学的 PIE 人脸库^[113]和中国科学院计算技术研究所-银晨科技面像识别联合实验室的 CAS_PEARL 中国人脸库^[114]。

要设计一个高效实用的肤色检测系统,除了必须考虑颜色空间、肤色建模和分类器三者的选择和配合,还要构建动态肤色模型以适应成像条件的变化,或者进行必要的图像预处理,主要是补偿照明的颜色校正。比如文献[28]将图像中前 5% 亮度的像素作为参考白,或采用传统的灰色世界假设^[115]、照明色温估计^[116]采用基于物理的颜色校正^[30]以及人脸球面谐波图像模型^[117,118]。对于照明条件变化中的视频图像肤色检测可采用肤色轨迹白平衡^[73,119]。

肤色检测技术涉及统计学、物理学、心理学、神经生物学、图像模式识别和计算机视觉等学科。随着肤色检测和其它相关技术的发展,目前已经呈现以下几方面的发展趋势:

(1)研究动态肤色模型和图像颜色校正技术,开发适应照明变化的实用肤色检测系统。动态肤色模型包括上述的动态直方图、高斯分布自适应、均值漂移和肤色轨迹白平衡等肤色分布动态更新方法。图像颜色校正可以采用各种物理假设,比如上述几种照明补偿技术。由于对照明可控程度不同,室内应用比室外应用容易,肤色建模的难度随着肤色处在特定图像、系列图像和不同来源的图像集而增加。

(2)结合空间信息的肤色检测。肤色特征通常不单独使用,结合与空间分布有关的其它信息,如梯度、形状或纹理特征,有利于排除复杂背景的干扰,提高检测精度。

(3)结合检测与检索技术。尽管肤色检测与肤色检索的要求和结果不同,但所使用的图像特征表示基本相同,图像分析技术也都可以相互借鉴,如文献[7,120]。

(4)研究和利用皮肤波谱曲线,融合反射与发射波段的肤色特征。皮肤波谱曲线是肤色检测的重要物理基础,需要建立各人种的皮肤辐射波谱曲线数据库。利用可见光波段的皮肤高光谱反射特性、反射红外波段中高低频子波段的皮肤与毛发反射率的反差、热红外成像不需照明等特点,反射与发射波段的肤色信息具有很强的互补,融合反射与发射波段的信息能使肤色检测性能有本质性的提高。

5 结束语

由于肤色过滤迅速,并且不受拍摄角度、人体姿势的影响^[121],许多人体检测方法都将肤色作为一种基本检测线索。目前基于统计的肤色检测技术比基于物理的倍受关注,相对来说,基于统计的肤色检

测技术强调结果而基于物理的强调过程。在加强特征提取和统计分类算法研究的基础上,引入基于物理的方法,拓展光谱波段或增加光谱分辨率,建立肤色成像模型和肤色波谱库,将使肤色真正成为一种强分类特征,大幅提高肤色检测性能和拓宽应用领域。

参 考 文 献

- 1 Phung S. L., Bouzerdoum A., Chai D.. Skin segmentation using color pixel classification: Analysis and comparison. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2005, 27(1): 149~154
- 2 Störring M.. Computer vision and human skin colour[Ph.D. dissertation]. Computer Vision and Media Technology Laboratory, Aalborg University, Denmark, 2004, <http://www.cvmt.dk/~mst>
- 3 Yang M. H., Kriegman D., Ahuja N.. Detecting faces in images: A survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2002, 24(1): 34~58
- 4 Zhao W., Chellappa R., Philips P. J., Rosenfeld A.. Face recognition: Literature survey. *ACM Computing Survey*, 2003, 35(4): 399~458
- 5 Oliver N., Pentland A., Berard F.. LAFTER: A real-time face and lips tracker with facial expression recognition. *Pattern Recognition*, 2000, 33: 1369~1382
- 6 McKenna S. J., Morrison K.. A comparison of skin history and trajectory-based representation schemes for the recognition of user-specified gestures. *Pattern Recognition*, 2004, 37(5): 999~1009
- 7 Ke Y., Sukthankar R., Huston L.. Efficient near-duplicate detection and sub-image retrieval. In: Proceedings of the 12th ACM International Conference on Multimedia, New York, 2004, 869~876
- 8 Bhuiyan M. A., Ampornaramveth V. *et al.*. Face detection and facial feature localization for human-machine interface. *NII Journal*, 2003, 5(3): 25~39
- 9 Zeng W., Gao W., Zhang T., Liu Y.. Image guarder: An intelligent detector for adult images. In: Proceedings of the 6th Asian Conference on Computer Vision, Jeju Island, Korea, 2004, 198~203
- 10 Ng C. S. L., Li L.. A multi-layered reflection model of natural human skin. In: Proceedings of Computer Graphics International, Hong Kong, China, 2001, 249~256
- 11 Raja Y., McKenna S. J., Gong S. G.. Tracking and segmenting people in varying lighting conditions using color. In: Proceedings of Face and Gesture Recognition, Nara, Japan, 1998, 228~233
- 12 Claridge E., Cotton S., Hall P., Moncrieff M.. From colour to tissue histology: Physics based interpretation of images of pigmented skin lesions. *Medical Image Analysis*, 2003, 7(4): 489~502
- 13 Shimizu H., Uetsuki K., Tsumura N., Miyake Y.. Analyzing the effect of cosmetic essence by independent component analysis for skin color images. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Multispectral Color Science, Joensuu, Finland, 2001, 65~68
- 14 Lu S., Tsechpenakis G., Metaxas D. *et al.*. Blob analysis of the head and hands: A method for deception detection. In: Proceedings of the 38th Annual Hawaii International Conference on System Science(HICSS'05), Hawaii, 2005, 1(1): 20
- 15 Yang J., Lu W., Waibel A.. Skin color modeling and adaptation. In: Proceedings of the 3rd Asian Conference on Computer Vision, Hong Kong, China, 1998, 687~694
- 16 Störring M., Andersen H., Granum E.. Physics-based modelling of human skin under mixed illuminants. *Journal of Robotics and Autonomous Systems*, 2001, 35(3~4): 131~142
- 17 Wyszecki G., Stiles W.. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae*. 2nd edition. New York: John Wiley & Sons, 2000, 165~168
- 18 Manjunath B., Ohm J., Vasudevan V., Yamada A.. Color and texture descriptors. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 2001, 11(6): 703~715
- 19 Yao Hong-Xun, Liu Ming-Bao, Gao Wen *et al.*. Method of face locating and tracking based on chromatic coordinates transformation of color images. *Chinese Journal of Computers*, 2000, 23(2): 158~165(in Chinese)
(姚鸿勋, 刘明宝, 高文等. 基于彩色图像的色系坐标变换的面部定位与跟踪法. *计算机学报*, 2000, 23(2): 158~165)
- 20 Lievin M., Luthon F.. Nonlinear color space and spatiotemporal mrf for hierarchical segmentation of face features in video. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2004, 13(1): 63~7
- 21 Gevers T., Smeulders A.. Color-based object recognition. *Pattern Recognition*, 1999, 32(3): 453~464
- 22 You Ya-Ping, Li Ming, Yuan Bao-Zong. Face detection in varying light condition. *Signal Processing*, 2004, 20(2): 101~107(in Chinese)
(游亚平, 李明, 袁保宗. 可变光照下的人脸检测. *信号处理*, 2004, 20(2): 101~107)
- 23 Ford A., Roberts A.. Colour space conversions. Technical Report, Westminster University, London, 1998
- 24 Yao H., Gao W.. Face detection and location based on skin chrominance and lip chrominance transformation from color images. *Pattern Recognition*, 2001, 34(8): 1555~1564
- 25 Niu Chao-Wei, Wang Zeng-Fu. Face detection based on color and motion information. *Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 2001, 15(2): 205~210(in Chinese)
(牛朝伟, 汪增福. 基于彩色和运动信息的人脸检测. *模式识别与人工智能*, 2002, 15(2): 205~210)
- 26 Chai D., Ngan K. N.. Locating facial region of a head-and-shoulders color image. In: Proceedings of the 3rd International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Nara, Japan, 1998, 124~129

- 27 Lei Ming, Zhang Jun-Ying, Dong Ji-Yang. A skin color detecting algorithm under variant lighting condition. Computer Engineering and Applications, 2002, 38(24): 123~125(in Chinese)
 (雷 明,张军英,董济扬.一种可变光照条件下的肤色检测算法.计算机工程与应用,2002,38(24): 123~125)
- 28 Hsu R. L., Abdel-Mottaleb M., Jain A.. Face detection in color images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(5): 696~706
- 29 Zhang Hong-Ming, Zhao De-Bin, Gao Wen. Face detection under rotation in image plan using skin color model, neural network and feature based face model. Chinese Journal of Computers, 2002, 25(11): 1250~1256(in Chinese)
 (张洪明,赵德斌,高 文.基于肤色模型、神经网络和人脸结构模型的平面旋转人脸检测.计算机学报,2002,25(11): 1250~1256)
- 30 Chen Duan-Sheng, Liu Zheng-Kai. A method for automatic detection and correction of highlighted area in color face image. Journal of Software, 2003, 14(11): 1900~1906(in Chinese)
 (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)
- 31 Pan Zhi-Geng, Zou Peng-Cheng, Liang Rong-Hua. Human face detection using eigen-face and skin color. Journal of System Simulation, 2004, 16(6): 1346~1349(in Chinese)
 (潘志庚,邹鹏程,梁荣华.基于特征人脸和肤色统计的人脸检测.系统仿真学报,2004,16(6): 1346~1349)
- 32 Cai J., Goshtasby A.. Detecting human faces in color images. Image and Vision Computing, 1999,18(1): 63~75
- 33 Yang M. H., Ahuja N.. Gaussian mixture model for human skin color and its application in image and video databases. In: Proceedings of the SPIE Conference on Storage and Retrieval for Image and Video Databases(SPIE 99), 1999, 3656: 458~466
- 34 Zhu Q., Cheng K., Wu C., Wu Y.. Adaptive learning of an accurate skin-color model. In: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition(FGR'04), 2004, 37~42
- 35 Caetano T., Barone D.. A probabilistic model for the human skin color. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Analysis and Processing, Palermo, Italy, 2001, 279~283
- 36 Caetano T., Olabarriagab S., Baronea D.. Do mixture models in chromaticity space improve skin detection ?Pattern Recognition, 2003, 36(12): 3019~3021
- 37 Lee J. Y., Yoo S. I.. An elliptical boundary model for skin color detection. In: Proceedings of the 2002 International Conference on Imaging Science, Systems, and Technology, 2002, 579~584
- 38 Fang J., Qiu G.. A colour histogram based approach to human face detection. In: Proceedings of International Conference on Visual Information Engineering, Surrey, Guildford, UK, 2003
- 39 Chai D., Bouzerdoum A.. A Bayesian approach to skin color classification in ycbcr color space. In: Proceedings of IEEE Region Ten Conference(TENCON'2000), 2000, II: 421~424
- 40 Crowley J., Berard F.. Multi-modal tracking of faces for video communications. In: Proceedings of IEEE Conference Computer Vision and Pattern Recognition, Puerto Rico, 1997, 640~645
- 41 Jayaram S., Schmugge S., Shin M. et al.. Effect of color-space transformation, the illuminance component, and color modeling on skin detection. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition(CVPR'04), Washington, DC, USA, 2004, 813~818
- 42 Duda R. O., Hart P. E., Stork D. G.. Pattern Classification. 2nd Edition. New York: John Wiley and Sons, 2001
- 43 Jones M., Rehg J.. Statistical color models with application to skin detection. International Journal of Computer Vision, 2002, 46(1): 81~96
- 44 Seow M., Valaparla D., Asari V.. Neural network based skin color model for face detection. In: Proceedings of the 32nd Applied Imagery Pattern Recognition Workshop (AIPR'03), Washington, DC, USA, 2003, 141~145
- 45 Chen Ze-Yu, Qi Fei-Hu. Cascading neural networks-based human face detection. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2000, 19(1): 57~61(in Chinese)
 (陈泽宇,戚飞虎.基于级联神经网络的人脸检测方法的研究.红外与毫米波学报,2000,19(1): 57~61)
- 46 Waring C., Liu X.. Face detection using spectral histograms and SVM. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, 2005, 35(3): 467~476
- 47 Wu Y., Liu Q., Huang T.. An adaptive self-organizing color segmentation algorithm with application to robust real-time human hand localization. In: Proceedings of IEEE Asian Conference on Computer Vision, Taipei, China, 2000, 1106~1111
- 48 Brown D., Craw I., Lewthwaite J.. A SOM based approach to skin detection with application in real time systems. In: Proceedings of the British Machine Vision Conference, Manchester, UK, 2001, 491~500
- 49 Fang Y. Ch., Tan T. N.. A novel adaptive colour segmentation algorithm and its application to skin detection. In: Proceedings of the 11th British Machine Vision Conference, Bristol, UK, 2000, 1; 23~31
- 50 Sebe N., Cohen I., Huang T., Gevers T.. Skin detection: A Bayesian network approach. In: Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition, Cambridge, UK, 2004, 903~906
- 51 Ruiz-del-Solar J., Verschae R.. Skin detection using neighborhood information. In: Proceedings of the 6th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recogni-

- tion, Seoul, Korea, 2004, 463~468
- 52 Kruppa H., Bauer M., Schiele B.. Skin patch detection in real-world images. In: Proceedings of Annual Symposium for Pattern Recognition of the DAGM 2002, Lecture Notes in Computer Science 2449, Springer, 2002, 109~117
- 53 Zhu Q., Wu C. T., Cheng K. T., Wu Y. L.. An adaptive skin model and its application to objectionable image filtering. In: Proceedings of ACM Multimedia 2004, New York, 2004, 56~63
- 54 Jedynak B., Zheng H., Daoudi M.. Skin detection using pairwise models. Image and Vision Computing, 2005, 23(13): 1122~1130
- 55 Zheng H., Daoudi M., Jedynak B.. From maximum entropy to belief propagation: An application to skin detection. In: Proceedings of the British Machine Vision Conference(BMVC'04), Kingston, 2004
- 56 Pass G., Zabih R.. Histogram refinement for content-based image retrieval. In: Proceedings of the 3rd IEEE Workshop on Applications of Computer Vision(WACV'96), Sarasota, Florida, USA, 1996, 96~102
- 57 Huang J., Kumar S., Mitra M. et al.. Spatial color indexing and applications. International Journal of Computer Vision, 1999, 35(3): 245~268
- 58 Wang Tao, Hu Shi-Min, Sun Jia-Guang. Image retrieval based on color-spatial feature. Journal of Software, 2002, 13(10): 2031~2036(in Chinese)
(王 涛,胡事民,孙家广. 基于颜色-空间特征的图像检索. 软件学报, 2002, 13(10): 2031~2036)
- 59 Cao Kui, Feng Yu-Cai, Cao Zhong-Sheng. Color and shape based image representation and retrieval. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2001, 13(10): 906~911(in Chinese)
(曹 奎,冯玉才,曹忠升. 基于颜色和形状特征的彩色图像表示与检索技术. 计算机辅助设计与图形学学报, 2001, 13(10): 906~911)
- 60 Funt B., Barnard K., Martin L.. Is machine colour constancy good enough? In: Proceedings of the 5th European Conference on Computer Vision, University of Freiburg, Germany, 1998, 445~459
- 61 Tao Lin-Mi, Xu Guang-You. Color issues and applications in machine vision. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(3): 178~190
(in Chinese)
(陶霖密,徐光祐. 机器视觉中的颜色问题及应用. 科学通报, 2001, 46(3): 178~190)
- 62 Comaniciu D., Ramesh V.. Robust detection and tracking of human faces with an active camera. In: Proceedings of the 3rd IEEE International Workshop on Visual Surveillance, Dublin, Ireland, 2000, 11~18
- 63 Birchfield S.. Elliptical head tracking using intensity gradients and color histograms. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Santa Barbara, CA, USA, 1998, 232~237
- 64 Yoo T. W., Oh I. S.. A fast algorithm for tracking human faces based on chromatic histograms. Pattern Recognition Letters, 1999, 20(6): 967~978
- 65 Zhou Zhi-Yong, Zhou Ji-Liu, Liu Zhi-Ming, He Xin. An algorithm for detecting and tracking human faces based on chromatic histograms and backprojection. Journal of Guizhou University of Technology, 2003, 32(3): 46~50(in Chinese)
(周志勇,周激流,刘智明,贺 新. 基于彩色和投影的人脸检测和跟踪算法. 常州工业大学学报, 2003, 32(3): 46~50)
- 66 Soriano M., Martinkauppi B., Huovinen S. et al.. Adaptive skin color modeling using the skin locus for selecting training pixels. Pattern Recognition, 2003, 36(3): 681~690
- 67 Stern H., Efros B.. Adaptive color space switching for face tracking in multi-colored lighting environments. In: Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition, Washington, DC, USA, 2002, 249~255
- 68 Sigal L., Sclaroff S., Athitsos V.. Skin color-based video segmentation under time-varying illumination. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2004, 26(7): 862~877
- 69 McKenna S., Raja Y., Gong S. G.. Tracking colour objects using adaptive mixture models. Image and Vision Computing, 1999, 17: 225~231
- 70 Comaniciu D., Meer P.. Real-time tracking of nonrigid objects using mean shift. In: Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, South Carolina, USA, 2000, 142~149
- 71 Lu J., Gu Q., Plataniotis K.. A comparative study of skin-color models. In: Proceedings of the International Conference on Image Analysis and Recognition, Toronto, 2005
- 72 Gong S. G., McKenna S., Psarrou A.. Dynamic Vision: From Image to Face Recognition. London: Imperial Colledge Press, 2000, 66~71, 136~145
- 73 Störring M., Andersen H., Granum E.. Skin colour detection under changing lighting condition. In: Araujo, Dias J. eds.. Proceedings of the 7th Symposium on Intelligent Robotics Systems, Coimbra, Portugal, 1999, 187~195
- 74 Cho K. M., Jang J. H., Hong K. S.. Adaptive skin-color filter. Pattern Recognition, 2001, 34(6): 1067~1073
- 75 Terrillon J., Akamatsu S.. Comparative performance of different chrominance spaces for color segmentation and detection of human faces in complex scene images. In: Proceedings of the International Conference on Face and Gesture Recognition, Grenoble, France, 2000, 54~61
- 76 Zarit B. D., Super B. J., Quek F. K. H.. Comparison of five color models in skin pixel classification. In: Proceedings of the International Workshop on Recognition, Analysis, and Tracking of Faces and Gestures in Real-time Systems, Corfu, Greece, 1999, 58~63
- 77 Brand J., Mason J.. A comparative assessment of three approaches to pixel-level human skin-detection. In: Proceedings

- of the International Conference on Pattern Recognition, Barcelona, Spain, 2000, I: 1056~1059
- 78 Gomez G. . On selecting color components for skin detection. In: Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, Quebec, Canada, 2002, II: 961~964
- 79 Shin M. C. , Chang K. I. , Tsap L. V. . Does colorspace transformation make any difference on skin detection ?In: Proceedings of the 6th Workshop on Applications of Computer Vision, Orlando, FL, USA, 2002, 275~279
- 80 Albiol A. , Torres L. , Delp E. J.. Optimum color space for skin detection. In: Proceedings of the International Conference on Image Processing, Thessaloniki, Greece, 2001, I: 122~124
- 81 Shafer S. A.. Using color to separate reflection components. Color Research Application, 1985, 10(4): 210~218
- 82 Klinker G. J. , Shafer S. A. , Kanade T.. Color image analysis with an intrinsic reflection model. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Computer Vision, Rome, Italy, 1988, 292~296
- 83 Klinker G. J. , Shafer S. A. , Kanade T.. A physical approach to color image understanding. International Journal of Computer Vision, 1990, 4(1): 1~38
- 84 Sato Y. , Ikeuchi K.. Temporal-color space analysis of reflection. Journal of the Optical Society of America, 1994, 11(11): 2990~3002
- 85 Buluswar S. D. , Bruce A. D.. Color models for outdoor machine vision. Computer Vision and Image Understanding, 2002, 85(2): 71~99
- 86 Nakai H. , Manabe Y. , Inokuchi S.. Simulation and analysis of spectral distributions of human skin. In: Proceedings of the 14th International Conference on Pattern Recognition, Brisbane, Australia, 1998, II: 1065~1067
- 87 Ohtsuki T. , Healey G.. Using color and geometric models for extracting facial features. The Journal of Imaging Science and Technology, 1998, 42(6): 554~561
- 88 Störring M. , Ganum E. , Andersen H. J.. Estimation of the illumination colour using highlights from human skin. In: Proceedings of the 1st International Conference on Color in Graphics and Image Processing, France, 2000
- 89 Angelopoulou E.. Understanding the color of human skin. In: Proceedings of the 2001 SPIE Conference on Human Vision and Electronic Imaging VI, SPIE, 2001, 4299: 243~251
- 90 Schlick C.. A survey of shading and reflectance models. Computer Graphics Forum, 1994, 13(2): 121~132
- 91 Shen Chen, Shen Xiang-Yang, Ma Song-De. A survey of image based illumination model. Chinese Journal of Computers, 2000, 23(12): 1~9(in Chinese)
(沈 沉,沈向阳,马颂德. 基于图像的光照模型综述. 计算机学报, 2000, 23(12): 1~9)
- 92 Marschner S. R. , Westin S. H. , Lafourche E. P. F. *et al.*. Image-based BRDF measurement including human skin. In: Proceedings of the 10th Eurographics Workshop on Render-
- ing, Granada, Spain, 1999, 139~152
- 93 Hanrahan P. , Krueger W.. Reflection from layered surfaces due to subsurface scattering. In: Kajiya J. T. ed.. Computer Graphics(SIGGRAPH'93 Proceedings), ACM SIGGRAPH, 1993, 27: 165~174
- 94 Ng C. S. L. , Li L.. A multi-layered reflection model of natural human skin. In: Proceedings of Computer Graphics International, Hong Kong, China, 2001, 249~256
- 95 Zheng Jian-Hua, Hao Chong-Yang, Lei Fang-Yuan, Fan Yang-Yu. Automatic illuminations detection and color correction of image using chromatic histogram characters. Journal of Image and Graphics, 2003, 8A(9): 1001~1007(in Chinese)
(郑建铧,郝重阳,雷方元,樊养余. 利用色彩直方图特征进行偏色图像的自动检测和校正. 中国图象图形学报, 2003, 8A(9): 1001~1007)
- 96 Pavlidis I. , Symosek P.. The imaging issue in an automatic face/disguise detection system. In: Proceedings of IEEE Workshop on Computer Vision Beyond the Visible Spectrum: Methods and Applications (CVBVS 2000), Hilton Head, South Carolina, 2000, 15~24
- 97 Tao Lin-Mi, Peng Zhen-Yun, Xu Guan-You. The feature of skin color. Journal of Software, 2001, 12(7): 1032~1040(in Chinese)
(陶霖密,彭振云,徐光祐. 人体的肤色特征. 软件学报, 2001, 12(7): 1032~1041)
- 98 Chiang C. C. , Tai W. K. , Yang M. T. *et al.*. A novel method for detecting lips, eyes and faces in real time. Real-Time Imaging, 2003, 9(4): 277~287
- 99 Angelopoulou E. , Molana R. , Daniilidis K.. Multispectral skin color modeling. In: Proceedings of CVPR, Hawaii, USA, 2001, II: 635~642
- 100 Dowdall J. , Pavlidis I. , Bebis G.. Face detection in the near-ir spectrum. Image and Vision Computing, 2003, 21(7): 565~578
- 101 Zhu Z. , Ji Q. , Fujimura K.. Combining kalman filtering and mean shift for real time eye tracking under active IR illumination. In: Proceedings of the 16th International Conference on Pattern Recognition, Quebec, Canada, 2002, IV: 318~321
- 102 Pan Z. H. , Healey G. , Prasad M. , Tromberg B. J.. Face recognition in hyperspectral images. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1552~1560
- 103 Socolinsky D. A. , Selinger A. , Neuheisel J. D.. Face recognition with visible and thermal infrared imagery. Computer Vision and Image Understanding, 2003, 91(1): 72~114
- 104 Kong S. G. , Heo J. , Abidi B. R. *et al.*. Recent advances in visual and infrared face recognition—— A review. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 97(1): 103~135
- 105 Li Jiang, Yu Wen-Xian, Kuang Gan-Yao, Song Hai-Na. A compound face recognition system design. Journal of National University of Defence Technology, 2003, 25(3): 45~49(in Chinese)

- (李江,郁文贤,匡刚要,宋海娜.一种复合模式的人脸识别系统设计.国防科技大学学报,2003,25(3):45~49)
- 106 Chen X., Flynn P. J., Bowyer K. W.. IR and visible light face recognition. Computer Vision and Image Understanding, 2005, 99(3): 332~358
- 107 Heo J., Kong S., Abidi B., Abidi M.. Fusion of visual and thermal signatures with eyeglass removal for robust face recognition. In: Proceedings of IEEE Workshop on Object Tracking and Classification Beyond the Visible Spectrum, in Communication with CVPR'04, Washington, DC, 2004, 94~99
- 108 Barsh G. S.. What Controls Variation in Human Skin Color? Bologics: Public Library of Science(Plos), 2003, 1(1): e27
- 109 Martinkauppi B.. Face colour under varying illumination-analysis and applications [Ph. D. dissertation]. University of Oulu, Finland, 2002
- 110 Equinox. Builds facial database. Infrared Imaging News, 2002, 8(4)
- 111 Martinez A. M., Benavente R.. The AR face database. Computer Vision Center(CVC), Barcelona, Spain: Technical Report 24, 1998
- 112 Intelligent Multimedia Lab. Asian face image database PF01. Department of Computer Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology, San 31, Hyoja-Dong, Nam-Gu, Pohang, 790~784, Korea, Technical Report, 2001
- 113 Sim T., Baker S., Bsat M.. The CMU pose, illumination, and expression database. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(12): 1615~1618
- 114 Zhang Xian-Hua, San Shi-Guang, Cao Bo, Gao Wen et al.. CAS-PEAL: A large-scale Chinese face database and some primary evaluations. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2005, 17(1): 9~17(in Chinese)
- (张晓华,山世光,曹波,高文等.CAS-PEAL大规模中国人脸图像数据库及其基本评测介绍.计算机辅助设计与图形学报,2005,17(1): 9~17)
- 115 Finlayson G. D., Hordley S. D., Hubel P. M.. Colour by correlation: A simple, unifying framework for colour constancy. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2001, 23(11): 1209~1221
- 116 Funt B., Xiong W.. Estimating illumination chromaticity via support vector regression. In: Proceedings of the 12th Color Imaging Conference-Color Science, Systems & Applications, Scottsdale, AZ, USA, 2004, 47~52
- 117 Basria R., Jacobs D.. Lambertian reflectance and linear subspaces. In: Proceedings of the 8th IEEE International Conference Computer Vision, 2001, 383~390
- 118 Ramamoorthi R., Hanrahan P.. On the relationship between radiance and irradiance: Determining the illumination from images of a convex Lambertian object. Journal of the Optical Society of America A, 2001, 18(10): 2448~2459
- 119 Martinkauppi B., Soriano M., Pietikainen M.. Detection of skin color under changing illumination: A comparative study. In: Proceedings of International Conference on Image Analysis and Processing(ICIAP03), Montava, Italy, 2003, 652~657
- 120 Ai Hai-Zhou, Xiao Xi-Pan, Xu Guang-You. Face detection and retrieval. Chinese Journal of Computers, 2003, 26(7): 854~861(in Chinese)
- (艾海舟,肖习攀,徐光祐.人脸检测与检索.计算机学报,2003,26(7): 854~861)
- 121 Vezhnevets V., Sazonov V., Andreeva A.. A survey on pixel-based skin color detection techniques. In: Proceedings of Graphicon-2003, Moscow, Russia, 2003, 85~92



CHEN Duan-Sheng, born in 1959, Ph. D., professor. His research interests include digital image processing and computer vision.

Background

This work is supported by the Natural Science Foundation of Fujian, China under grant No. A0510020 and the Key International S&T Cooperation Project of Fujian, China under grant No. 2004I014. The projects focus on pattern classification techniques supporting intelligent detection and recognition of text and image patterns on the Web. In the past

LIU Zheng-Kai, born in 1940, professor and Ph. D. supervisor. His research interests include digital image processing and pattern recognition.

years, the authors have researched and developed several novel techniques for human skin color detection under complex illumination condition and face detection. As the primary stage of the research projects, the content of this paper mainly helps to focus attention on interested regions in color images.