

利用物理模型合成皮肤图像

徐舒畅 叶修梓 张三元 张引

(浙江大学计算机学院, 杭州 310027)

摘要 为了获得各种丰富和逼真的皮肤图像,在对皮肤结构和皮肤组成进行分析的基础上,提出了一种基于物理模型的鲁棒算法对输入的单张皮肤图像自动进行色素分离,并在此基础上实现了全局性和局部性的合成。输入的图像首先被分成 N 个子区域,并依次在每个子区域利用 ICA 算法提取分离向量,之后对得到的分离向量进行合理性验证。如果分离向量不合理,则丢弃,在下一个子区域重复上述过程。最后,从所有的合理分离向量中得到最终的分离向量,分离得到黑色素和血红素的密度分布图。通过改变色素的密度可以进行全局性合成,也可以利用密度信息选取感兴趣区域进行局部性合成。实验结果表明,该算法非常有效,可以对人体皮肤图像进行“电子化妆”,重新生成更多逼真的合成图像。

关键词 黑色素 血色素 皮肤图像合成

中图法分类号: TP391.41 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)07-1374-05

Skin Image Synthesis Based on Physical Model

XU Shu-chang, YE Xiu-zi, ZHANG San-yuan, ZHANG Yin

(College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract To produce various realistic skin images, a physical-model-based and robust algorithm is proposed in this paper to automatically separate single skin image into melanin and hemoglobin components based on the analysis of skin structure and compositions. Skin image can then be locally or globally synthesized based on pigment components separation. Firstly, we divide the input image into several sub-regions and ICA algorithm is successively performed in each sub-region to extract separation vectors. After testing the validity of separation vector, invalid separation vector is discarded and the valid are considered as candidate vectors. Repeat above operations and we obtain final separation vector from the collection of candidate vectors for obtaining melanin and hemoglobin component map. Based on separated component map, we can globally synthesize new skin image, or select ROI (Region of Interest) to locally synthesize. Our experiments show that the proposed algorithm is very effective and can act as an e-cosmetic function to reproduce realistic results.

Keywords melanin, hemoglobin, skin image synthesis

1 引言

近年来,对皮肤图像的研究成为众多领域的热点问题。特别是在计算机视觉、远程医学、电视电影行业以及整容业,都成为研究的重点。对皮肤图像的研究可以分为底层研究和上层研究,前者是后者的理论基础。底层研究主要涉及皮肤光学属性的研

究,并从微观角度对光线和皮肤的接触过程进行模拟^[1-4]。底层研究大多需要特殊硬件(比如利用仪器测定皮肤在各个波段的反射率)的支持,数据量也非常大,但在影视作品中有广泛应用。皮肤图像合成属于上层研究,可以分为基于图像处理的合成和基于物理模型的合成。颜色传输技术就属于前者,它可以将一幅图像中的主色调“移植”到另一幅图像。在这方面我们也做了一定的工作,并提出了

基金项目:国家自然科学基金项目(60473106);教育部博士点基金项目(20060335114)

收稿日期:2006-08-04;改回日期:2007-03-02

第一作者简介:徐舒畅(1979~),男。现为浙江大学计算机学院计算机应用专业博士研究生。主要研究方向为图像处理与机器视觉。

E-mail: xusc@cgimlab.cn

一种统一色彩传输方案^[5]。由于这种合成完全基于图像处理,最重要的是无法为目标图像提供合理的皮肤颜色,因此缺乏真实感。在基于物理模型的研究上,Numahara 等人根据皮肤的光学属性模拟生成了各种类型的肤色^[6]。Imai 等人则利用皮肤反射率的主成分分析(PCA)估算人体皮肤在各种媒体上(显示器、电视机等)应该显示的色彩^[7]。然而,上述研究均不能对输入的单一皮肤图像进行随意的逼真合成。2003年,Tsumura 等人利用独立成分分析(ICA)成功对皮肤图像进行分解,得到了皮肤的黑色素、血色素和阴影等分量^[8]。但文献[8]需要用户手动确定皮肤区域,还需要在同一环境中拍摄的皮肤图像库来确定某些变量的阈值,而且未考虑图像的噪声,皮肤的分离中也未提及如何区分分离出来的黑色素和血色素分量。

本文给出了一种区分黑色素分量和血色素分量的方法,并在 Tsumura 等人工作的基础上,结合色素分离向量的区分方法,提出了一种自动色素分离算法。该算法以单张图像为输入,不需要硬件或图像库的支持,无需交互操作,且算法鲁棒,对于含有噪声的图像和低分辨率的图像也同样适用。

2 基于物理模型的皮肤图像合成

在利用物理模型对皮肤图像进行分析之前,需要先了解皮肤的基本结构和组成成分。一般认为,皮肤由多层组织构成(图1)。最外层是包含角化细胞的角质层,非常薄。角质层下面依次是表皮层和真皮层,这两层是皮肤的主要组成部分,真皮层下面的皮下组织一般不属于皮肤的范畴。皮肤的多层结构使得其光学属性变得非常复杂。最外面的角质层由于太薄,对入射光线影响不大,可以只考虑镜面反射。穿透角质层的光线将在表皮层和真皮层被色素部分吸收,同时伴有散射和漫反射现象。因此,皮肤的颜色主要由表皮层中的黑色素和真皮层中的血色素决定。

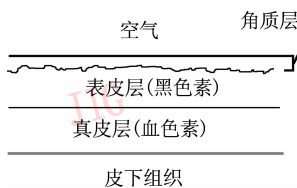


图1 皮肤结构简图

Fig. 1 Three-layered skin model

2.1 色素成分分离

由上所述,黑色素和血色素对肤色有决定性作用,如果能将上述两种色素分离,则能据此重新合成逼真的皮肤图像。根据皮肤光学属性和 Lambert-Beer 定律,皮肤可以看成是黑色素和血色素的线性组合^[8,9]:

$$skin = V_m D_m + V_h D_h + Z \quad (1)$$

式中, D_m 和 D_h 分别表示黑色素和血色素的密度, V_m 和 V_h 是和皮肤厚度以及黑色素、血色素的消光系数相关的系数,称之为分离向量, Z 是和光照强度等其他因素相关的变量。由于黑色素和血色素密度在空间分布上是独立的,式(1)中等号左边的变量可以看作两个独立信号组成的混合信号,Tsumura 等人成功利用独立成分分析(ICA)在光密度空间将两种色素分离:

$$skin = [V_m \quad V_h \quad 0] \times \{k \times [D_m \quad D_h \quad D_{shadow}]^T\} + E$$

$$[D_m \quad D_h \quad D_{shadow}]^T = [V_m \quad V_h \quad 1]^{-1} (C^{log} - E)$$

$$E = \min([V_m \quad V_h \quad 1]^{-1} C^{log}) \quad (2)$$

式中,对角阵 k 控制色素的相对密度, D_{shadow} 表示阴影的密度。 C^{log} 表示像素在光密度空间的值,可以通过对像素的 RGB 通道取 log 值获得,如下式所示。

$$C^{log} = \left[\log\left(\frac{C_R}{255}\right) \quad \log\left(\frac{C_G}{255}\right) \quad \log\left(\frac{C_B}{255}\right) \right]^T \quad (3)$$

式中, C_i ($i = R, G, B$) 表示像素在 i 通道的值。

Tsumura 方法的不足之处在于:需要用户交互确定皮肤区域;未考虑噪声影响;选择不同的皮肤区域将产生不同的结果,因此不是很稳定;需要一个图像库进行训练,确定一些参数的阈值,并建立相应判别函数确定最终的分离向量。在此,提出一种基于单幅图像的自动分离算法,对于分辨率低、质量不高的图像同样能有效分离。算法如下:

将输入图像划分为 $N \times N$ 的子区域,对于每个子区域,按文献[8]中所述进行 PCA 和 ICA 操作,得到两个 3×1 的分离向量 V_1 和 V_2 。由于 ICA 分离的不确定性,需要确定哪个向量对应于黑色素,哪个对应于血色素。引入变量 A_m 和 A_h 来进行判断:

$$A_m = \text{Mean}(RGB2A(\text{new}C1))$$

$$A_h = \text{Mean}(RGB2A(\text{new}C2))$$

$$\text{new}C1 = \exp[-([V_1 \quad 0 \quad 0] \times C^{log})]$$

$$\text{new}C2 = \exp[-([0 \quad V_2 \quad 0] \times C^{log})] \quad (4)$$

式中, $newC1$ 和 $newC2$ 是临时变量, 函数 $RGB2A$ 由代表 RGB 通道值的变量得到 CIELab 颜色空间中的 a 变量值, $Mean$ 函数计算向量的平均值。如果式(4)中 $A_m > A_n$, 则 V_1 对应于 V_n , 表示血色素分离向量。反之, V_1 对应 V_m , 表示黑色素分离向量。由于分离向量和皮肤厚度以及色素的消光系数成正比, 根据已有的对色素消光系数的测定^[4], 黑色素的消光系数在可见光的红、绿、蓝波段是递减的(对应下列规则 1), 且有一定的取值范围(对应下列规则 2)。红色素的消光系数在红光波段是最小的(对应下列规则 3)。因此对于得到的两个 3×1 分离向量 V_m 和 V_n , 提出下列规则来判断合理性:

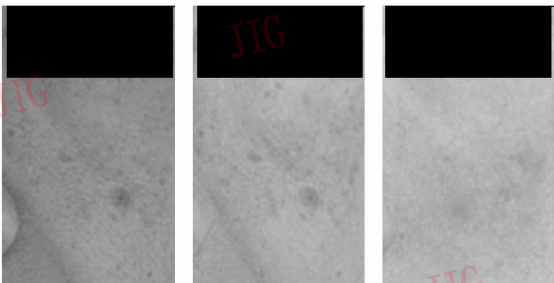
规则 1 $V_m(R) < V_m(G) < V_m(B)$

规则 2 $V_m(R) \in [0.1, 0.5]$, $V_m(G) \in [0.3, 0.7]$, $V_m(B) \in [0.7, 1.0]$

规则 3 $V_n(R)$ 不是 V_n 向量中最大的值

其中, $V_m = [V_m(R), V_m(G), V_m(B)]^T$ 。如果分离向量符合上述规则, 则认为是合理的, 否则丢弃。对于含有非皮肤像素比较多的子区域, 上述分离向量一般都是不合理的, 因此保证了算法的鲁棒性。对于图像中的每个子区域分别进行上述操作, 最后得到若干组合理的分离向量, 取其中方差最小的一组作为最后的分离向量对图像进行分离, 得到黑色素分布图和血色素分布图。如图 2 所示, 可以看到在分离出的黑色素图中有黑斑, 而在血色素图中则没有, 但红色斑点可见。

上述过程很好地解决了图像中噪声的影响(如果有噪声)。这些噪声可能是非皮肤区域的像素, 也可能是图像本身的噪声, 大部分噪声使所在的子区域产生不合理的分离向量而最终被舍弃。



(a)输入图 (b)黑色素分量图 (c)血色素分量图

图 2 色素分离图

Fig. 2 Separated pigment component

2.2 全局性合成

基于物理模型的皮肤合成, 能产生最逼真的效

果。通过改变式(2)中控制色素密度的向量 k 值, 可以对皮肤图像进行全局性的合成。显然, 当 k 分别取对角阵 $diag[1, 0, 0]$ 、 $diag[0, 1, 0]$ 和 $diag[0, 1, 1]$ 时, 利用式(2)可以分别得到黑色素分量图、血色素分量图和阴影分量图(图 2, 为了保护隐私, 文中所有人脸图像中眼睛部位都将被遮盖)。如果增加黑色素的密度, 即则 k 中第 1 个分量变大, 皮肤会显得更黑, 因此可以模仿皮肤经日晒后的颜色。而增加血色素的密度, 即则 k 中第 2 个分量变大, 皮肤会显得红润, 可以模仿皮肤充血或者饮酒后使皮肤变红的颜色。而 k 值中相应向量减小, 则有相反的效果。一般说来, k 中色素分量取值在 $0 \sim 2$ 之间就能有非常明显的效果。

2.3 局部性合成

为了达到特殊的效果, 需要对皮肤进行局部性的合成。在皮肤区域的选择上, 主要考虑黑色素和血色素的分布。通过下式来选择特殊的皮肤区域进行合成:

$$ROI = \{p(x, y) |$$

$$(\lambda + \eta_1 \sigma) < D_{m/h}(p) < (\lambda + \eta_2 \sigma)\} \quad (5)$$

式中, $p(x, y)$ 表示图像中坐标为 (x, y) 点的像素, λ 表示色素的平均密度, σ 表示色素分布的均方差, 变量 η_1 和 η_2 控制所选区域的范围。 $D_{m/h}(p)$ 表示 p 点的黑色素密度或血色素密度。利用式(5)可以对皮肤图像进行雀斑去除“手术”, 如图 3 所示, 其中 $\eta_1 = 0, \eta_2 = 1.6$ 。皮肤上黑色素含量较多的地方常常表现为雀斑, 因此图像中出现雀斑的点都是黑色素密度较高的点。首先利用式(5)对雀斑进行定位, 一般此时 η_1 和 η_2 均为非负数。采用类似于皮肤移植手术的纹理合成技术^[10]来消除雀斑。和传统基于块的纹理合成技术相比, 在进行块匹配时, 只对窗口中非雀斑区域进行匹配, 而不是仅对已经合成的上半窗口区域进行匹配; 另外, 当某个雀斑像素被“消除”后, 需要将其标记为非雀斑像素, 在下次计算或匹配时以非雀斑像素统计。图 3 中窗口大小为 9 个像素。

式(5)中参数 η 的选择决定了需要合成的局部区域的范围。根据实验, 对于一般皮肤图像中雀斑区域的选择, η_1 取值范围大约为 $0 \sim 0.5$, 取值范围越小, 涉及到的区域面积越大。而 η_2 取值范围大约为 $1.0 \sim 2.0$, 当 η_2 取值超过 2.5 时, 基本上所选择的区域并不会产生很大变化。这是因为值越大, 表示雀斑的颜色越深, 但这种区域都是很小的。

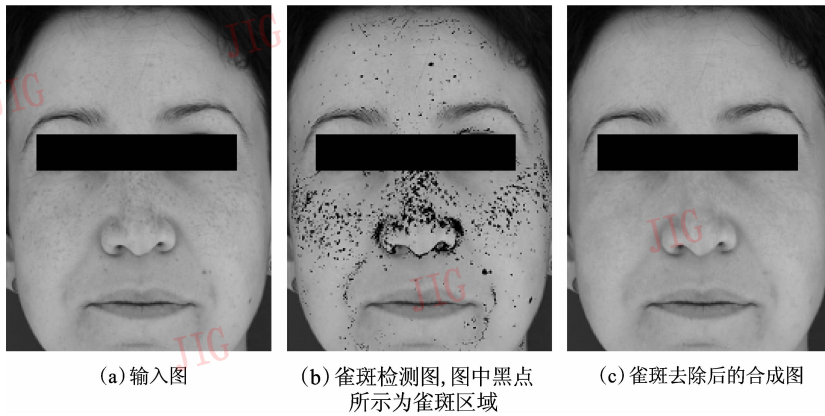


图 3 局部性合成
Fig. 3 Local synthesis

3 实验结果

本文算法均已在 VC6 的环境下实现,算法对于低分辨率、背景复杂且具有噪声的图像同样能取得满意的效果。图 4 是低分辨率、背景复杂且噪声很

高的图像的合成效果,输入图像是在野外随意拍摄的。图 4(b) $k = diag[1.4, 0.7, 1]$,图 4(c) $k = diag[0.7, 1.3, 1]$ 。可以看到,图 4(b)由于黑色素增加,血色素减少,鼻子上的红斑已经不明显了。相反,图 4(c)鼻子上的红斑加深了。图 5(a)输入图已经采用偏光镜去除高光影响。图 5(b) $k = diag[1.7, 1, 1]$,



图 4 低精度高噪声图像合成

Fig. 4 Resultant image with low resolution input

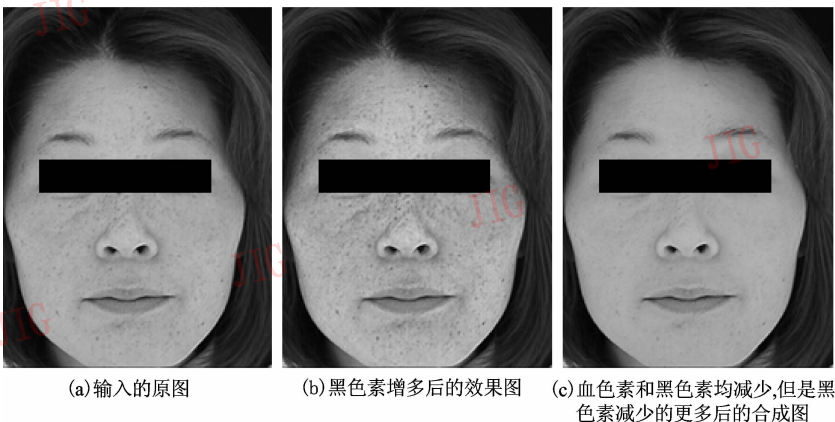


图 5 高精度图像的合成

Fig. 5 Resultant image with high resolution input

图 5(c) $k = \text{diag}[0.5, 0.9, 1]$ 。可以看到,如果黑色素增加,黑点和雀斑增加。黑色素减少,则皮肤显得更加光滑。而血色素增加,皮肤则显得更加红润。图 4 中由于有环境光的影响,且图像中皮肤分辨率低,因此合成后有些地方会成块状。但是还是表现了黑色素和血色素分布变化对肤色的影响,也说明了本文算法的鲁棒性。而图 5 中输入图分辨率高,且已经去除了皮肤表面的镜面反射光和环境光的影响,因此合成效果非常好。

需要注意的是,在进行局部合成时,由于非皮肤区域的像素会影响式(5)中的色素密度平均值和方差值,因此需要预先确定皮肤区域。在实验中,设计了类似 Photoshop 中的魔法棒来选择皮肤区域。

4 结 论

作为人体皮肤中最重要的两种色素,黑色素和血色素决定了人体的肤色,改变这两种色素的分布就可以改变肤色。基于皮肤的多层结构和光学属性,提出了一种自动的、鲁棒的色素分离算法,并在此基础上讨论了皮肤图像的全局性和局部性合成方法。由于这种合成基于皮肤的物理模型,因此合成效果非常逼真。实验结果表明本文算法对于低精度和高噪声的图像同样有效,可以直接对从网站下载的或者利用家用数码相机拍摄的图像进行分离与合成。

致 谢 感谢 L'Oreal 公司提供皮肤图像。

参考文献 (References)

- 1 Baranoski G V G, Krishnaswamy A. An introduction to light interaction with human skin [J]. *Revista de Informatica Teorica e Aplicada*, 2004, **11**(1): 33 ~ 62.
- 2 Gemert M M C V, Jacques S L, Sternborg H J C M, *et al.* Skin optics [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 1989, **36**(12): 1146 ~ 1154.
- 3 Angelopoulou E. The Reflectance Spectrum of Human Skin [R]. Technical Report MS-CIS-99-29, Philadelphia, Pennsylvania, USA: GRASP Laboratory, University of Pennsylvania, 1999.
- 4 Krishnaswamy A, Baranoski G V G. A Study on Skin Optics [R]. Technical Report CS-2004-01, Waterloo, Ontario, Canada: University of Waterloo, 2004.
- 5 Xu S C, Zhang Y, Zhang S Y, *et al.* Uniform color transfer [A]. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C]*, Genova, Italy, 2005, **3**: 940 ~ 943.
- 6 Numahara T. From the Standpoint of Dermatology [EB/OL]. <http://biocolor.umin.ac.jp/book200102/din01022812.pdf>, 2001-01-12/2006-06-13.
- 7 Imai F H, Tsumura N, Haneishi H, *et al.* Principal component analysis of skin color and its application to colorimetric color reproduction on CRT display and hardcopy [J]. *The Journal of Imaging Science and Technology*, 1996, **40**(5): 422 ~ 430.
- 8 Tsumura N, Ojima N, Sato K, *et al.* Image-based skin color and texture analysis/synthesis by extracting hemoglobin and melanin information in the skin [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH [C]*, San Diego, California, USA, 2003: 770 ~ 779.
- 9 Takiwaki H. Measurement of skin color: practical application and theoretical considerations [J]. *The Journal of Medical Investigation*, 1998, **44**(3-4): 121 ~ 126.
- 10 Wei L Y, Levoy M. Fast texture synthesis using tree-structured vector quantization [A]. In: *Proceeding of SIGGRAPH [C]*, New Orleans, Louisiana, USA, 2000: 479 ~ 488.