

## 基于本征图像分解的人脸光照迁移算法<sup>\*</sup>

刘 浩<sup>1,2</sup>, 胡可鑫<sup>1,2</sup>, 刘艳丽<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065)

<sup>2</sup>(视觉合成图形图像技术国防重点学科实验室(四川大学), 四川 成都 610065)

通讯作者: 刘艳丽, E-mail: yanliliu@scu.edu.cn

**摘 要:** 提出了一种基于本征图像分解的人脸光照迁移算法. 首先, 针对本征图像分解效果不彻底的情况, 提出了一种改进的本征图像分解方法. 在此基础上, 为了保持人脸细节特征, 提出了一种基于边缘保留的光照滤波算法, 对参照人脸进行光照迁移至目标人脸, 最后融合目标材质图像与滤波后光照图像进行人脸重光照. 实验结果表明, 与已有算法相比, 该算法能够很好地保留迁移后的人脸肤色, 并且所生成的重光照效果更准确、自然.

**关键词:** 本征图像分解; 光照迁移; 人脸重光照; 线性滤波

中文引用格式: 刘浩, 胡可鑫, 刘艳丽. 基于本征图像分解的人脸光照迁移算法. 软件学报, 2014, 25(Suppl. (2)): 236–246.  
http://www.jos.org.cn/1000-9825/14041.htm

英文引用格式: Liu H, Hu KX, Liu YL. Face illumination transfer algorithm based on intrinsic images decomposition. Ruan Jian Xue Bao/ Journal of Software, 2014, 25(Suppl. (2)): 236–246 (in Chinese). http://www.jos.org.cn/1000-9825/14041.htm

## Face Illumination Transfer Algorithm Based on Intrinsic Images Decomposition

LIU Hao<sup>1,2</sup>, HU Ke-Xin<sup>1,2</sup>, LIU Yan-Li<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

<sup>2</sup>(National Key Laboratory of Fundamental Science on Synthetic Vision (Sichuan University), Chengdu 610065, China)

Corresponding author: LIU Yan-Li, E-mail: yanliliu@scu.edu.cn

**Abstract:** In this paper, a face illumination transfer tech based on intrinsic images decomposition is proposed. Firstly, to tackle the issue that the intrinsic image decomposition effect is not perfect, an improved intrinsic image decomposition method is developed. Next, in order to maintain the face feature, a light filtering algorithm based on edge-preserving is created. The algorithm can transfer the illumination from reference face to target face without missing the target details. Finally, the reflectance image and the illumination image are merged to make face relighting. The experimental results show that compared with the existing algorithms, the presented algorithm can preserve the face skin after transfer and the new method produces light effect more reasonable and natural.

**Key words:** intrinsic image decomposition; illumination transfer; face relighting; linear filter

人脸图像的光照迁移技术是指, 给定一张目标人脸图像和一张参照人脸图像, 将参照人脸上的光照效果迁移到目标人脸. 由于在特效制作、游戏娱乐、虚拟现实中具有广泛的应用前景, 近年来人脸光照迁移技术受到了研究人员的广泛关注. 因为人脸的独特性与复杂性, 人脸光照迁移技术是一个非常具有挑战性的问题. 在人脸光照迁移方面, Li<sup>[1]</sup>提出使用 LTV(logarithmic total variation)模型对目标人脸分解出光照无关图像对其进行光照迁移. 陈小武<sup>[2,3]</sup>提出了一种基于边缘保留的人脸光照迁移算法. 算法首先通过使用加权最小二乘(weighted least square, 简称 WLS)滤波器<sup>[4]</sup>对人脸进行光照分解以获得人脸细节图像与光照相关的大尺度图像; 其次, 根据目标人脸大尺度图像对参照人脸大尺度图像进行引导滤波(guided filter)后得到最终光照迁移图像. 上述这些基于细节分离或图像滤波的方法的主要缺陷是未能将参考图像人脸的光照与材质部分彻底分开, 因

<sup>\*</sup> 基金项目: 国家自然科学基金(61103137); 国家科技支撑计划(2012BAH62F02); 国家高技术研究发展计划(863)(2013AA013902)

收稿时间: 2014-05-09; 定稿时间: 2014-08-19

而造成部分边缘细节被保留在光照图像中.此外,为了实现准确、自然的迁移效果,现有算法通常进行了一定的条件假设,例如固定目标人脸的材质<sup>[5,6]</sup>、约束光照条件<sup>[7-9]</sup>以及人脸的可分解模型<sup>[1,2]</sup>等.另外,与人脸光照迁移相关的技术还包括人脸图像重光照技术.Shashua 等人<sup>[5]</sup>提出基于商图像(quotient image)对 3D 模型进行光照处理得到重光照后的 3D 模型,最后借此得到重光照图像.在此基础上,陈健生等人<sup>[7]</sup>提出加入全局光照约束优化对商图像的效果进行改进,并引入了已经拥有光照效果的参考人脸.该算法的缺陷是由于需要同一人物不同光照下的两幅图像作为输入,在一定程度上降低了算法的实用性.

本文提出了一种基于本征图像分解的人脸图像光照迁移算法.本征图像分解是指假定图像场景为朗伯漫反射场景、光照模型为朗伯模型的情况下,将一幅图像分解成表示场景物表面材质的材质图像,与基于光强、阴影以及间接照明综合作用的光照图像.近年来,本征图像分解技术的不断改进为人脸图像的光照迁移提供了新的途径.比如,近年来 Barron 和 Mailk<sup>[10-12]</sup>提出的基于单幅图像的 SAIFS(shape, albedo, and illumination from shading)算法对图像的平滑性、深度、各向异性等方面进行约束,可对大多数图像取得满意的分解结果.

由于人脸图像,特别是肖像照片大多是在复杂的光照环境如聚光灯等下拍摄的,现有的本征分解算法仍然无法直接应用于这类含有强烈光照或者阴影的图像.为此,我们首先提出了一种改进的基于迭代的本征图像分解迭代算法;其次,为了保证光照迁移后的目标人脸与原图像的肤色尽可能地相近,提出了一种基于边缘保留的光照滤波算法,对参照人脸光照图像进行目标人脸细节信息增强;最后提出自适应融合能量约束,用于求解融合参数以实现自适应光照滤波迁移的目的.本文的主要贡献包括:(1) 提出了一种改进的本征分解方法.由于改进后的本征图像分解可以将人脸的光照信息和材质信息单独剥离开来,使得对光照的迁移更直接和彻底;(2) 在细节分离的基础上提出了基于边缘保留的光照滤波算法对人脸图像进行光照迁移优化,确保迁移后的目标人脸与原图像的肤色更相近、光照效果更加自然.

第 1 节相关工作中介绍本文使用的本征图像分解算法.第 2 节详细介绍本文的主要算法.第 3 节是本文算法的实验结果与相关分析.最后,在第 4 节中总结本文算法,指出今后工作的方向.

## 1 相关工作

本征图像分解最初由 Barrow<sup>[13]</sup>提出,本征图像思想自提出后就不断被改进,包括基于反射模型的逆向绘制算法用于恢复场景光照<sup>[14-16]</sup>.Weiss 等人<sup>[17]</sup>提出了一种使用同一场景多幅不同光照图像的算法来估计材质图像.Liu<sup>[18]</sup>通过图像估计出材质中光照无关的颜色信息.Bousseau<sup>[19]</sup>,Shen<sup>[20]</sup>等人提出了仅使用单幅图像,但需由用户交互的本征图像分解算法.

本文使用的本征图像分解算法是对 Barron 等人<sup>[11,12]</sup>提出的从明暗恢复形状、深度、材质以及光照(SAIFS)算法的改进.为了便于理解,我们首先对 SAIFS 做一个简单的介绍,更多细节参见文献[11,12].

将一副输入图像  $I$  分解成材质图像  $R$  和光照图像  $S$  的乘积: $I=SR$ <sup>[13]</sup>,考虑其在 log 域的公式表示:

$$I=R+S(Z,L) \quad (1)$$

式中光照图像  $S$  包含明度信息  $L$  和深度信息  $Z$ .注意到这个公式中仅输入图像  $I$  是已知的,而材质图像  $R$ 、深度图像  $Z$ 、明度图像  $L$  都是未知的,为求得  $R, Z, L$ , Barron 等人将其归结为一个能量最小化问题<sup>[12]</sup>:

$$\text{Minimize } g(R) + f(Z) + h(L) \quad (2)$$

其中  $g(R)$  为材质  $R$  的代价函数,而  $f(Z)$  和  $h(L)$  则分别为深度  $Z$  与明度  $L$  的代价函数.

对于材质图像  $R$  的先验,代价函数是 3 部分的线性组合:

$$g(R) = \lambda_s g_s(R) + \lambda_e g_e(R) + \lambda_a g_a(R) \quad (3)$$

该材质图像  $R$  通过从 3 个方面进行约束获得,包括人脸的局部平滑  $g_s(R)$ ,人脸全局熵信息  $g_e(R)$ ,人脸具有颜色一致性  $g_a(R)$ .  $\lambda_s, \lambda_e, \lambda_a$  分别为 3 个代价函数的对应权重.

在式(2)中,对于深度图像  $Z$  的先验,同样由 3 项代价函数组成,包括形状具有光滑性  $f_k(Z)$  (形状在局部窗口内很少会较大弯曲),其次是物体表面法向的各向同性  $f_l(Z)$  (对象大多法向更趋向于某一方向),最后是物体轮廓边界处的法线朝外  $f_c(Z)$ .因此,  $f(Z)$  由如下的能量项组成:

$$f(Z) = \lambda_k f_k(Z) + \lambda_i f_i(Z) + \lambda_c f_c(Z) \quad (4)$$

其中,  $\lambda_k, \lambda_i, \lambda_c$  分别为 3 个代价函数的对应权重, 均是在训练集上交叉验证学习得到. 对于深度图像  $Z$  的模型统计规律, Huang<sup>[21]</sup>, Woodford<sup>[22]</sup> 等人已做了大量的工作, 主要是对物体表面的二阶导数能量函数进行约束.

算法由式(3)和式(4)的代价约束求得材质图像  $R$  与深度图像  $Z$ , 其后通过式(1)得到对应明度图像  $L$ . 这就得到了本文算法中所需要的材质图像  $R$  与光照图像  $S$ .

## 2 本文算法

由于参照图像具有的人脸特征与目标图像的人脸特征如五官位置、形状等可能存在差异, 因此在对人脸进行光照迁移之前, 需要对参照图像中的人脸进行变形, 以使得参照人脸与目标人脸的人脸具有相同形状特征. 为此, 本文首先使用主动轮廓模型 ASM(active shape model)<sup>[23]</sup> 对两幅人脸进行特征标定; 然后根据 Delaunay 三角剖分算法对选取的特征点进行三角剖分; 最后对剖分三角仿射变换使人脸进行变形并对齐两幅人脸.

### 2.1 本征光照迁移

在理想情况下, 通过对目标图像和参照图像分别进行本征图像分解以得到对应材质图像与光照图像. 然后, 再通过参照图像的光照图像与目标图像的材质图像进行本征图像逆运算合成, 即式(1)进行目标人脸光照迁移. 然而对于具有强烈光照的目标人脸, 仅本征分解一次并不能得到很好的效果, 其在材质图像上依旧拥有阴影, 如图 1(c)所示的鼻侧.

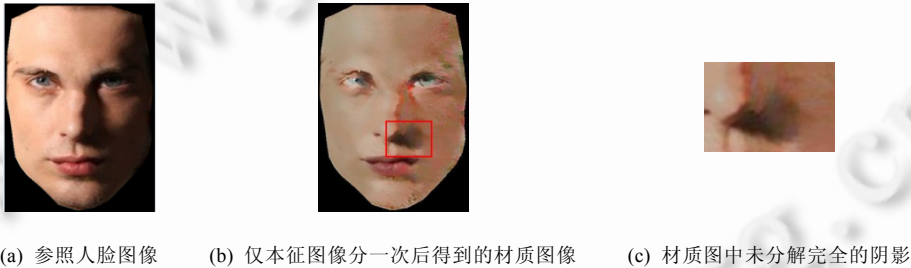


图 1 对参照图像仅本征图像分解一次的结果

如图 2 所示, 我们可以将初次分解的材质图像作为输入图像再次进行本征图像分解, 直至到达结束条件:

$$I = R_1 \times S_1 = (R_2 \times S_2) \times S_1 = R_1 \times \prod_{i=1}^n S_i \quad (5)$$

其中,  $S_i, R_i$  指由材质图像  $R_{i-1}$  经过本征分解后得到的光照图像与材质图像. 上述分解的结束条件为迭代次数高于  $N$  或残差光照图  $C(S_i, S_{i-1})$  低于阈值  $d$ , 其中,  $C(S_i, S_{i-1})$  定义为

$$\begin{cases} C(S_i, S_{i-1}) = \frac{\sum_p |\Delta S_{(p)}|}{\text{valid}(I)} \\ \Delta S_{(p)} = S_{i(p)} - S_{i-1(p)} \end{cases} \quad (6)$$

$\text{valid}(I)$  为通过人脸掩膜得到的人脸有效区域大小. 在本文的实验中, 我们取  $N = 5, d = 10$ .

图 3 为利用我们改进的本征图像分解算法进行人脸光照迁移的效果. 如图所示, 很明显可以观察到图 3(g) 比图 3(e) 具有更为强烈的阴影效果.

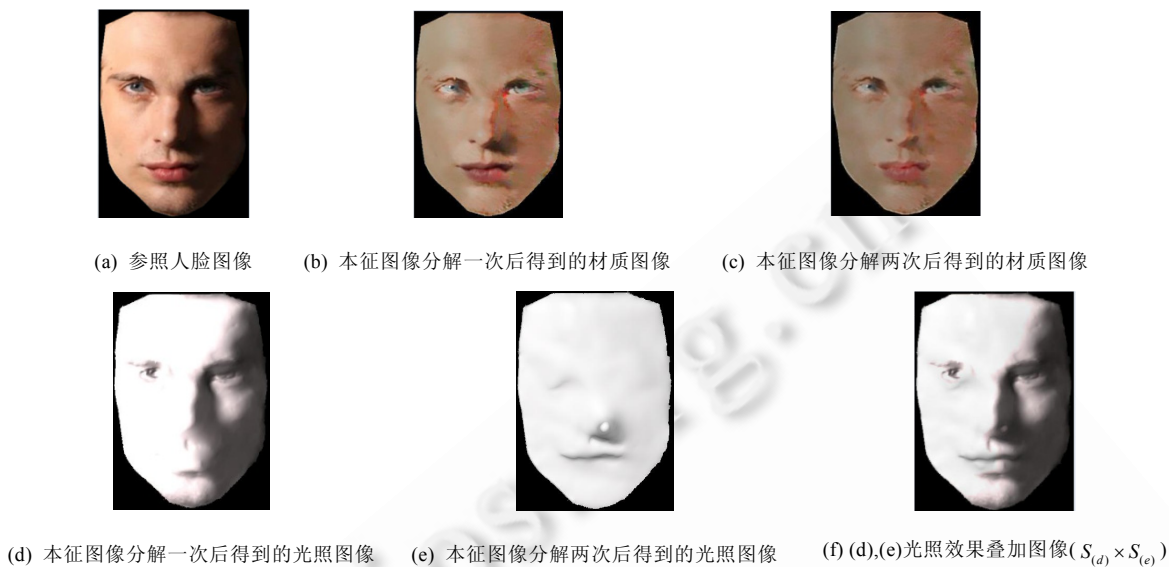


图2 多次本征分解得到光照图像与材质图像,输入参照人脸图像(a)最终分解为(c)与(f)

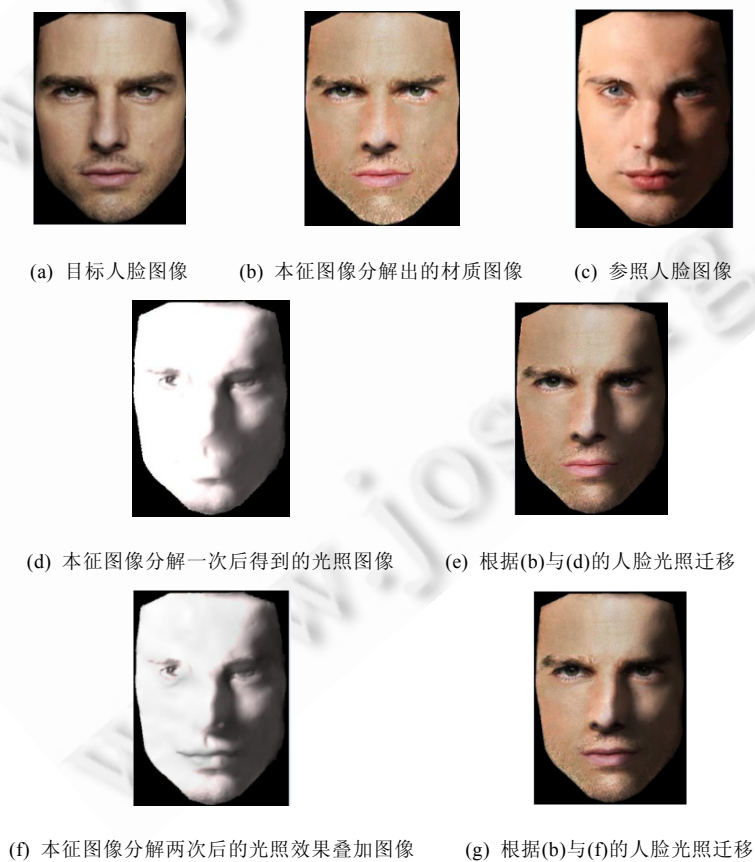


图3 使用改进的本征图像分解进行人脸光照迁移

## 2.2 基于边缘保留的滤波算法

实验中我们发现,仅使用改进的本征图像分解技术仍然不能很好进行人脸分解,表现为有时会出现过分解现象,导致部分细节信息被分解到光照图像上,效果如图 4(c)的目标人脸的胡子区域所示.针对此问题,本文提出基于目标图像边缘保留的参照图像光照滤波的算法,即通过目标图像的边缘信息对参照图像的光照图像进行导向滤波.其结果能够使图像保留目标图像人脸纹理,同时具有参照图像的光照效果.根据需要,该算法输入包括目标图像的光照图像  $S_T$  与参照图像的光照图像  $S_R$ , 而最后滤波得到输出光照图像  $S_O$  拥有  $S_T$  的人脸细节与  $S_R$  的光照效果.



图 4 目标人脸图像的本征图像分解

首先,我们所设计的滤波算法应保留目标图像人脸信息.为使目标图像在本征分解后的光照图像  $S_T$  (如图 5(a)所示)上细节信息尽可能地保留到滤波后的图像中,我们通过建立一个线性模型以满足此要求:

$$S_O(i) = k_i \times S_T(i) + d \quad (7)$$

式(7)中,  $i$  指代图像空域中的一个像素,输出图像  $S_O$  是输入图像  $S_T$  的线性变换,  $d$  为误差偏移量,  $k$  为各个像素对应的权重因子.由于在光照图像中,细节信息体现在图像的边缘上,因此通过保留图像的边缘能够提炼其细节.通过建立式(7)的线性模型,输出图像  $S_O$  是对目标图像  $S_T$  的一个基于边缘保留的滤波结果.

其次,该滤波的输出图像  $S_O$  还应具有参照光照图像  $S_R$  的光照效果.因此,需要把权重因子  $k$  设置为由参照图像的光照图像  $S_R$  (如图 5(b)所示)亮度信息所决定.由于输入图像  $S_T$ ,  $S_R$  都为光照图像,其像素值只包含亮度信息而非色彩信息,因此,较高的像素值对应高亮度,反之则对应低亮度像素点.

为了确定由  $S_R$  所决定的亮度权重  $k$ , 对于参照图像的光照图像  $S_R$  的任意一点亮度值  $S_R(i)$ , 确立一个亮度常值  $P$ , 当  $S_R(i) > P$  时,认为  $i$  点是在亮度区域,则使权重因子  $k_i > 1$ , 在式(7)中以加强该点在滤波结果图像  $S_O(i)$  的亮度;反之,当  $S_R(i) < P$  时,认为  $i$  点是在阴影区域,则使  $k_i < 1$  减弱图像  $S_O(i)$  对应点亮度.借此定义本算法所需  $k$  权重:

$$k_i = \begin{cases} \frac{1}{P + \varepsilon} \times S_R(i), & \forall S_R(i) \in \text{valid}(S_R) \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (8)$$

原公式(7)相应变为

$$S_O(i) = \begin{cases} \frac{S_R(i)}{P + \varepsilon} \times S_T(i) + d \\ \forall S_R(i) \in \text{valid}(S_R) \end{cases} \quad (9)$$

本文定义该  $P$  为图像中介点的值,称为亮度基值,并有:

$$P = \omega_1 \times \max\{S_R(i)\} + \omega_2 \times \min\{S_R(i)\}.$$

通常  $\omega_1 + \omega_2 = 1$ , 这是由于  $P$  应为参照图像的光照图像中阴影区域与亮度区域间的介值.此外,本文称由全部权重因子  $k_i$  (亮度比值)所组成的图像为比例因子图像,若  $\omega_1$  越大,则  $P$  越逼近高亮区域,则由光照图像  $S_R$  所建立



的比例因子图中  $k_i$  小于 1 的比重偏多,相应滤波后图像  $S_o$  整体光照强度变弱(如图 5(l)),反之,  $\omega_1$  小则为加强  $S_o$  亮度(如图 5(f)所示).

由该滤波算法式(9)得出光照滤波图像  $S_o$ . 在此基础上,再通过式(1)得到最后的重光照图像,结果如图 5 所示.

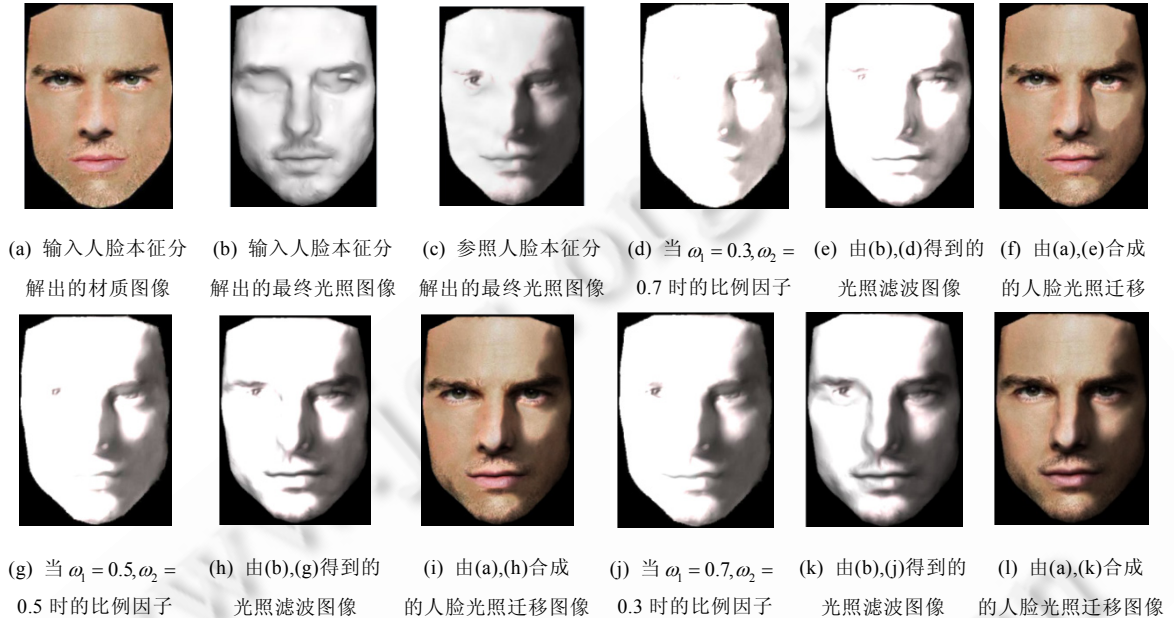


图 5 基于边缘保留的光照滤波算法进行人脸光照迁移

### 2.3 自适应光照滤波算法

由于前文所提出的滤波方法的基值  $P$  具有不确定性,最后合成的重光照效果会明显依赖于基值的参数调整,如图 5 所示.对于不需要对光照效果进行调节的情况,本文设计使用一种最小二乘法的算法求得亮度基值  $P$ ,并相应求出输出图像.现根据式(7)、式(8)得知需要找到这样一个基值  $P$ ,使图像  $S_T$  经过边缘保留的线性变换后亮度能够尽可能地接近图像  $S_R$ ,则有能量函数:

$$E(P) = \sum_i \left( S_R(i) - \frac{S_R(i)}{P + \epsilon} \times S_T(i) \right)^2 \quad (10)$$

此函数中,  $S_R$  为参照光照图像,  $S_T$  为需要保留边缘的目标光照图像(拥有部分细节纹理),当该能量函数值最小时,由图像  $S_T$  线性变换后的图像  $S'_T$  的亮度最接近于图像  $S_R$ . 解出公式(10)的最小值在

$$P = \frac{\sum_i S_T(i)^2 \times S_R(i)^2}{\sum_i S_T(i) \times S_R(i)^2} \quad (11)$$

时取得.根据此亮度基值  $P$  再代回式(9),得到光照滤波输出图像  $S_o$ . 我们将该自适应滤波算法应用于原图中,可得出如图 6 所示的结果.

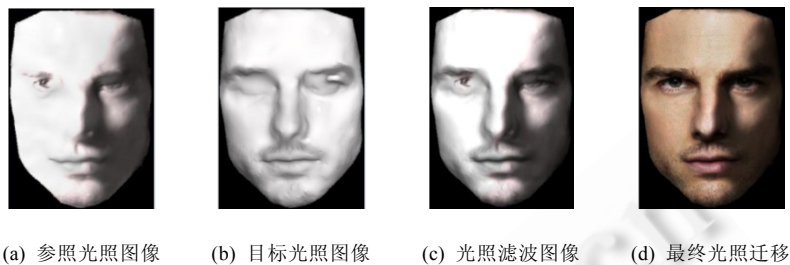


图6 自适应光照滤波算法进行人脸光照迁移

### 3 实验结果与比较

为了避免人为因素,接下来的实验中我们选择使用自适应光照滤波对结果进行对比实验.我们对本文提出的光照迁移算法与陈小武<sup>[2]</sup>等人提出的算法效果进行了比较.其比较结果如图7所示,其中,图7(a)为原始目标图像,图7(b)为文本算法的效果,图7(c)为文献[2]的算法效果.观察图7(b)、图7(c)中的眉毛与胡须等细节可以看出,本文算法表现得更为接近原始输入图像,且人脸的肤色也表现得更为相似.除此之外,本文算法的阴影边缘也比Chen<sup>[2]</sup>的算法效果清晰.



图7 本文算法与文献[2]的光照迁移结果比较

图8给出了本文算法与文献[1,3]的比较.从图8(c)与图8(e)可以看到,与文献[1]相比,本文算法所得到的迁移后的人脸肤色明显更接近目标人脸.从图8(d)与图8(e)的对比可以看到,我们的效果阴影边缘(如鼻翼两侧处、脸颊)更清晰,且保持原图的更多细节.

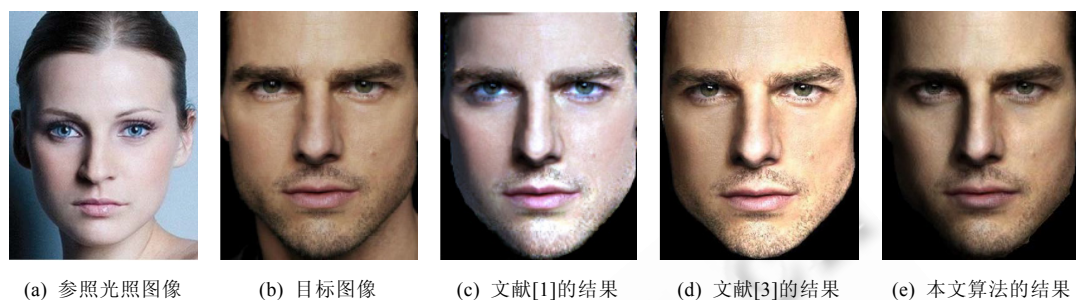


图8 本文算法与文献[1]、文献[3]的结果比较

为了便于观察实验效果,我们对实验步骤中的人脸对齐步骤进行特征点人工扩展,由原有的 76 个特征点增加到 109 个特征点,使其能够对整幅输入图像进行仿射变换,并包含完整的人脸信息.但由于扩展的特征点无法对两幅人脸图像头发进行准确对齐,而对于要求完全人脸对齐的文献[2]算法,我们则辅以人工脸部掩膜进行对比实验,效果如图 9 所示.其中,第 1 行为参考人脸,第 1 列为目标人脸,第 2 行、第 3 行分别为本文算法与文献[2]算法的迁移结果.从合成结果可以看到,本文算法比文献[2]得到的结果光照效果更为明显,且阴影边缘轮廓更清晰,处理阴影不清晰的图像也有更佳的效果.除此之外,重光照后的明度与目标人脸的肤色相关,而并不是参照人脸的肤色.



图9 本文算法的部分实验结果与文献[2]结果的比较



我们最后对女性的人脸目标图像进行效果对比分析,效果如图 10 所示.图中第 1 行为参照人脸图像,第 1 列为目标人脸图像.每一对迁移结果图像中左侧图像为本文实验结果,而右侧图像为文献[2]光照迁移结果.



图 10 本文(左)算法与文献[2](右)算法的女性实验结果对比

为了更好地表明算法的有效性,我们采用目前最广泛使用的 Mean Opinion Score(MOS)方法对用户体验质量(quality of service,QoE)<sup>[24]</sup>进行了量化.在用户体验调查环节中,我们请 10 名相关领域研究人员评估图 9、图 10 的 8 组对比实验结果(共 16 幅图像),并分别从整体迁移质量、人脸细节保留、阴影边缘清晰、光照强度迁移、面部肤色近似度这 5 个方面对本文与文献[2]的迁移结果进行评分.表 1 给出了 16 幅图像进行 MOS 方法分析的各项分数.图 11 进一步给出了对每一组实验图像的综合 MOS 分数(各项权重均占 1/5).可以看出,本文算法比文献[2]算法的结果具有更好的用户体验质量.

表 1 本文算法与文献[2]的 MOS 比较结果

用户体验内容	本文MOS值	文献[4]MOS值
整体迁移质量	4.32	3.71
人脸细节保留	4.43	3.82
阴影边缘清晰	4.44	3.53
光照强度迁移	4.32	3.63
面部肤色近似度	4.10	3.78

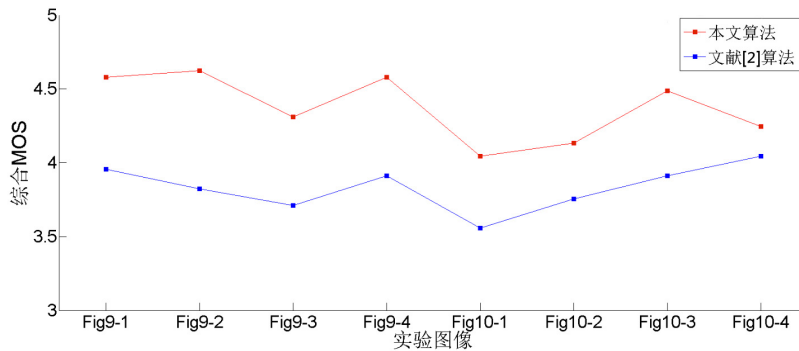


图 11 各组图像综合 MOS 值

#### 4 结束语

本文提出了一种基于本征图像的人脸光照迁移算法.该算法基于本征图像分解模型算法.首先,对目标人脸图像与参照人脸图像进行本征图像分解得到对应光照图像与材质图像.然后,根据此材质图像的结果进行本征分解图像迭代以获取最佳分解效果.最后,本文提出了基于两张光照图像的可控制和自适应的基于细节保留的光照滤波算法,求出目标图像的光照输出图像,并由此图像与对应材质图像合成出最后的重光照图像.

本文算法的局限性包括:1) 需要目标人脸未拥有明显光照,即并不能使参照人脸的光照结果迁移到本身已拥有光照效果的目标人脸上;2) 在现阶段,本文没有考虑对目标人脸非正脸的情况下进行处理,即处理侧脸、仰视脸等情况的重光照,这是我们将来的一个研究方向;3) 本文算法时间与其他光照迁移算法时间相比,效率较低,对于实时渲染的应用适用性较差,提高迭代分解速度将是我们未来工作的一个研究方向;4) 本文算法中提出的光照滤波算法是对材质细节的补偿,若能在图像本征分解前或分解中加入约束条件使其细节尽可能地保留到材质图像中,则迁移效果将更为逼真,这将是未来工作的一个重要研究方向.

#### References:

- [1] Li Q, Yin WT, Deng ZG. Image-Based face illumination transferring using logarithmic total variation models. *The Visual Computer*, 2009,26(1):41-49.
- [2] Chen XW, Chen MM, Jin X, Zhao QP. Face illumination transfer through edge-preserving filters. In: *Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*. 2011. 281-287.
- [3] Chen XW, Wu HY, Jin X, Zhao QP. Face illumination manipulation using a single reference image by adaptive layer decomposition. *IEEE Trans. on Image Processing*, 2013,22(11):4249-4259.
- [4] Farbmán Z, Fattal R, Lischinski D, Szeliski R. Edge-Preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation. *Proc. of the ACM Trans. on Graphics*, 2008,27(3):Article 67.
- [5] Shashua A, Riklin-Raviv T. The quotient image: Class-Based re-rendering and recognition with varying illuminations. *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2001,23(2):129-139.
- [6] Shim H, Luo J, Chen T. A subspace model-based approach to face relighting under unknown lighting and poses. *IEEE Trans on Image Processing*, 2008,17(8):1331-1341.
- [7] Chen JS, Su GD, He JP, Ben SL. Face image relighting using locally constrained global optimization. In: *Proc. of the ECCV*. 2010. 44-57.
- [8] Chen XW, Jin X, Zhao QP, Wu HY. Artistic illumination transfer for portraits. *Computer Graphics Forum*, 2012,31(4):1425-1434.
- [9] Paris S, Sillion FX, Quan L. Lightweight face relighting. In: *Proc. of the 11th Pacific Conf. on Computer Graphics and Applications (PG 2003)*. 2003. 41-50.
- [10] Barron JT, Malik J. High-Frequency shape and albedo from shading using natural image statistics. In: *Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition*. 2011. 2521-2528.

- [11] Barron JT, Malik J. Shape, albedo, and illumination from a single image of an unknown object. In: Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition. 2012. 334–341.
- [12] Barron JT, Malik J. Color constancy, intrinsic images, and shape estimation. In: Proc. of the ECCV. 2012. 57–70.
- [13] Barrow HG, Tenenbaum JM. Recovering intrinsic scene characteristics from images. In: Proc. of the Computer Vision Systems. 1978. 3–26.
- [14] Yu YZ, Malik J. Recovering photometric properties of architectural scenes from photographs. In: Proc. of the ACM SIGGRAPH'98. 1998. 207–217.
- [15] Sun QM, Wu EH. Inverse rendering in a global illuminated environment. Ruan Jian Xue Bao/Journal of Software, 2003,14(10): 1796–1805 (in Chinese with English abstract). <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1796.htm>
- [16] Yu HN. A research of inverse lighting problems [MS. Thesis]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2007 (in Chinese with English abstract).
- [17] Weiss Y. Deriving intrinsic images from image sequences. In: Proc. of the ICCV. 2001. 68–75.
- [18] Liu XP, Wan L, Qu YG, Wong TT, Lin S, Leung CS, Heng PA. Intrinsic colorization. ACM Trans. on Graphics, 2008,27(5):152.
- [19] Bousseau A, Paris S, Durand F. User-Assisted intrinsic images. ACM Trans. on Graphics, 2009,28(5):Article 130.
- [20] Shen JB, Yang XS, Jia YD, Li XL. Intrinsic images using optimization. In: Proc. of the Computer Vision and Pattern Recognition. 2011. 3481–3487.
- [21] Huang JG, Lee AB, Mumford D. Statistics of range images. In: Proc. of the IEEE Conf. on Computer Vision and Pattern Recognition. 2000.
- [22] Woodford O, Torr P, Reid I, Fitzgibbon A. Global stereo reconstruction under second-order smoothness priors. IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2009,31(12):2115–2128.
- [23] Milborrow S, Nicolls F. Locating facial features with an extended active shape model. In: Proc. of the ECCV. 2008. 504–513.
- [24] Lin C, Hu Jie, Kong XZ. Survey on models and evaluation of quality of experience. Chinese Journal of Computers, 2012,35(1): 1–15 (in Chinese with English abstract).

#### 附中文参考文献:

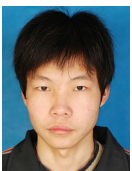
- [15] 孙其民,吴恩华.全局光照环境中的逆向绘制.软件学报,2003,14(10):1796–1805. <http://www.jos.org.cn/1000-9825/14/1796>.
- [16] 余涵娜.基于图像的逆向求解光照研究[硕士学位论文].上海:上海交通大学,2007.
- [24] 林闯,胡杰,孔祥震.用户体验质量(QoE)的模型与评价方法综述.计算机学报,2012,35(1):1–15.



刘浩(1990—),男,重庆人,硕士生,主要研究领域为图像处理,计算机视觉.  
E-mail: lewes6369@gmail.com



刘艳丽(1981—),女,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学,增强现实,图像/视频处理.  
E-mail: yanaliliu@scu.edu.cn



胡可鑫(1988—),男,硕士生,主要研究领域为图像处理,计算机视觉.  
E-mail: hukexin0000@126.com