

文章编号 1004-924X(2015)05-1450-08

自适应编辑传播的人脸图像光照迁移

梁凌宇, 金连文*, 许 勇
(华南理工大学, 广东 广州 510641)

摘要:提出一种融合人脸特征分析的自适应编辑传播方法来提高人脸图像光照渲染的效能,并以此实现复杂背景下基于单张参考人脸的自动光照迁移。该方法把参考图像的人脸区域与目标图像的背景区域进行融合,利用边缘保持平滑滤波从融合的人脸中提取光照信息。然后,构建一个能随不同人脸区域而自适应变化的编辑传播模型,把提取的光照信息从人脸区域扩散到背景区域,生成光照模板。最后,通过融合光照模板与目标人脸实现光照迁移。在 YaleB 数据库的定量实验中,平均每张迁移光照人脸有超过 85% 的像素(归一化到 $[0, 255]$)与标准光照人脸的像素值差异小于 6。与其他方法对比,本文方法获得的光照渲染效果具有更好一致性。结果表明,本文方法扩展了光照迁移的适用范围,具有良好的稳定性,能在具有不同性别和背景等特点的参考人脸与目标人脸中生成自然的光照迁移效果。

关键词:人脸图像;光照迁移;编辑传播;边缘保持平滑;光照模板

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20152305.1450

Face relighting using adaptive edit propagation

LIANG Ling-yu, JIN Lian-wen*, XU Yong

(South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

* Corresponding author, E-mail: lianwen.jin@gmail.com

Abstract: An adaptive edit propagation method based on facial priors was proposed to achieve natural relighting effect of a portrait in a complex background using a single reference face. Firstly, the facial region of a reference image and the background region of a target were combined, and an edge-preserving smoothing filter was used to extract the illumination information from the combined image. Then a new edit propagation model adaptively changed with facial parameters was constructed to generate an illumination template by propagating the illumination from the facial region to the background. Finally, the illumination template and the target were multiplied in the luminance channel to achieve the relighting effect. The quantitative experiments in YaleB database show that there are averagely over 85% pixels (normalized to $[0, 255]$) in a relighting effect face, whose intensity differences are less than 6 comparing with the ground true. As compared with other methods, the relighting effects of proposed method are more consistency. The conclusion shows that the proposed method achieves reliable and natural face relighting effect on portraits with different genders and backgrounds.

Key words: face image; face relighting; edit propagation; edge-preserving smoothing; illumination template

收稿日期:2014-12-17;修订日期:2015-02-12.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 61472144, No. 61273255);国家科技支撑计划资助项目(No. 2013BAH65F01-2013BAH65F04);国家教育部博士点基金资助项目(No. 20120172110023);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(SCUT 2013ZG0011);广东省教育厅科技创新项目(No. 2013KJ CX0010);中国博士后科学基金资助项目

1 引言

光线效果对于人物照片十分重要。人脸图像的光照特效在电影制作、个人照片增强、艺术设计等方面都有广泛的应用。掌握图像的光线控制技巧并非易事,即使是艺术家和专业摄影师也需要多年的经验积累。虽然通过图像的后期处理技术也可以在人脸中实现光照特效,但要使用专业图像编辑工具,并涉及许多繁复的操作。因此,开发出更加智能化的人脸光照渲染算法与系统是十分必要的。

人脸图像的光照渲染技术在计算机图形学领域的研究主要包括两大类:第一类是基于模型的方法,其主要通过重构人脸与场景的特性来实现光照信息的模拟与渲染^[1-2],该方法一般需要人脸和场景的三维信息;第二类方法是基于图像的方法,其主要基于商图像原理^[3],通过把参考人脸的光照反射特性迁移到目标人脸来实现光照渲染,在近年得到了广泛的关注^[4-9]。本文主要研究基于图像的人脸光照迁移方法。

利用人脸光照迁移方法产生逼真的光照渲染效果并不简单,其原因在于参考人脸图像的光照强度会受很多因素的影响而发生变化。因此如何有效地从参考人脸中提取光照信息同时去除其中的噪声,以及如何有效地将提取的光照信息融合到目标人脸中是人脸光照迁移的重点和难点。

在相关研究中,Peers 等人提出了基于商图像原理的光照迁移基本框架^[4];Li 等人利用对数全变分模型从参考人脸中分解出光照图层,并将其替换到目标人脸中实现光照转移^[5];Chen J. 等人假设一般的辐射环境是局部均匀的,提出了一种利用基于局部约束整体优化方法^[6];Chen X. 等人在边缘保持平滑中融入图像的梯度信息,以提取参考人脸中的光照信息,并利用具有空间变化滤波核的导向滤波器将其融合到目标人脸中实现光照迁移^[7];Liang 等人提出了一种基于边缘保持平滑滤波的光照模板生成方法来实现光照迁移;Chen X. 等人构建了一个人工手绘的光照模板数据库,然后通过模板选择或者参考图像模板匹配的方法应用手绘的光照模板间接地进行光照迁移^[9]。

上述方法虽然都能实现光照迁移,但都存在一定的局限性。Peers 等人^[4]和 Chen J. 等人^[6]的方法需要多张参考人脸图像,对系统的限制较高;Chen X. 等人^[8]应用手绘光照模板进行光照迁移的方法一般只能生成模板数据库中固定的光照效果。同时,上述方法都只考虑了人脸内部区域的光照迁移问题,并没有考虑背景区域的光照生成,一般无法在具有复杂背景的目标人脸中获得较好效果。

本文提出了一种新的基于单张参考人脸的光照迁移方法来实现复杂背景下的人脸光照迁移。该方法主要包含人脸融合、光照提取、光照生成以及光照融合。其中,光照生成是核心环节。为了实现复杂背景的光照迁移,需要在光照模板中将提取的参考人脸内部区域的光照信息扩散到背景区域。对此,本文提出了一个自适应编辑传播模型。编辑传播是近年的研究热点,在抠图^[10]、图像彩色化^[11-12]、人脸美化^[13]等方面都有广泛应用。编辑传播将用户输入的一些稀疏的编辑信息作为限制,并根据图像像素间的某种相似性把这些编辑信息扩散到整幅图像中,从而获得整幅图像的编辑效果^[14]。本文对 Lischinski 等人提出的边缘保持能量模型进行了扩展^[15],提出了一个融合人脸特征先验的具有自适应参数的编辑传播模型^[16-17],实现了针对复杂背景人脸光照迁移的光照模板生成。

2 人脸光照迁移的总体框架

本文的基于单张参考人脸的光照迁移框架,主要包含4个环节,如图1所示。

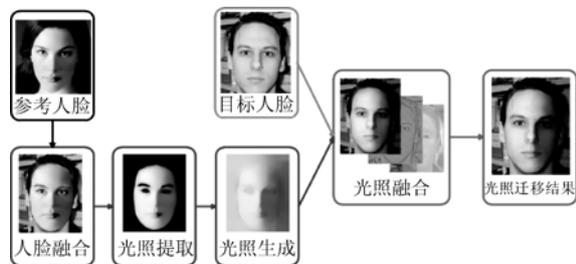


图1 基于单张参考图像的人脸光照迁移框架

Fig. 1 Facial relighting framework using a single reference face

(1)人脸融合:把参考图像的人脸区域与目标

图像的背景区域进行融合;

(2)光照提取:对融合人脸的亮度通道进行边缘保持平滑滤波,提取其中具有较大亮度变化的光照信息;

(3)光照生成:构建一个融入人脸先验与具有自适应参数的编辑传播模型,通过将所提取的人脸内部区域的光照信息扩散到背景区域,实现光照模板生成;

(4)光照融合:在 CIELAB 颜色空间中,通过融合光照模板与目标人脸实现光照迁移。

在该光照迁移框架中,光照生成是其中的核心环节,将在第 3 节详细论述;其余环节将在 2.1 到 2.3 小节分别介绍。

2.1 人脸融合

在人脸融合中,利用人脸特征点生成融合蒙板将参考图像的人脸区域与目标图像的背景区域进行融合。

首先,使用主动形状模型(Active Shape Model)^[17]对参考人脸和目标人脸的五官进行特征点定位,并根据参考人脸形状得到原始蒙板;然后,利用多层次自由变形方法(Multi-level Free Form Deformation)^[18]根据目标人脸形状特点对参考人脸图像和原始蒙板进行变形,使其与目标人脸的形状相匹配;再者,对变形后的蒙板进行腐蚀和羽化,得到融合蒙板;最后利用融合蒙板把参考图像的人脸区域与目标图像的背景区域进行叠加融合,得到融合人脸。

2.2 光照提取

在光照提取中,需要在融合人脸中提取主要的光照变化信息,同时去除其中不必要的人脸细节,为后续生成光照模板做准备。

首先,把融合人脸图像从 RGB 颜色空间变换到 CIELAB 颜色空间,从中分解出包含亮度信息的 L^* 通道;然后,对 L^* 通道进行边缘保持平滑滤波,从中提取出包含较大亮度变化的光照信息,并去除其中无关的人脸细节信息(如皱纹等)。

本文选择了基于加权最小二乘框架的具有隐式结构的边缘保持平滑滤波算子^[19]进行光照提取,避免了具有显式结构的边缘保持平滑滤波算子(如双边滤波器)所带来的光晕等不良效果^[19]。

2.3 光照融合

在生成光照模板后,利用商图像原理^[3-4],在 CIELAB 颜色空间中把光照模板与目标人脸的亮度通道相乘实现光照融合。

设输入的目标人脸的亮度通道为 L_{in} ,生成的光照模板为 M ,光照迁移后输出的目标人脸亮度通道为 L_{out} ,则 $L_{out} = L_{in} \cdot M$ 。

最后,把经过光照融合后的目标人脸亮度通道与其颜色通道进行叠加,得到最终的光照迁移结果。

3 光照生成

为了实现复杂背景下的光照迁移,本文提出了一个融合人脸特征先验并具有自适应参数的编辑传播模型,用于把从参考人脸中提取的光照信息自然平滑地扩散到背景区域,生成光照模板。

该模型以 Lischinski 等人提出的边缘保持能量模型^[15]为基础,并从两方面对其进行扩展。第一,基础模型需要以用户的交互式输入进行初始化,而本文提出的模型则使用自动人脸形状特征检测与特征提取来代替用户输入,避免了手工操作;第二,为了实现光照信息的自适应扩散效果,本文把基础模型的均匀参数扩展为能随人脸特征变化的自适应参数。

假设光照模板为 M ,输入的光照模板初始值为 R ,通过求解以下二次能量泛函实现光照模板生成:

$$M = \operatorname{argmin}_M \left\{ \sum_p \omega(\mathbf{p}) (M(\mathbf{p}) - R(\mathbf{p}))^2 + \sum_p h(\nabla M, \nabla G) \right\}, \quad (1)$$

其中,

$$h(\nabla M, \nabla G) = \lambda(\mathbf{p}) \left\{ \frac{\left| \frac{\partial M}{\partial x} \right|^2}{\left| \frac{\partial G}{\partial x} \right|^a + \epsilon} + \frac{\left| \frac{\partial M}{\partial y} \right|^2}{\left| \frac{\partial G}{\partial y} \right|^a + \epsilon} \right\}. \quad (2)$$

公式(1)的第一项是数据项,用来保证光照模板 M 与输入的 R 在受限制的人脸区域内尽量相同,在非限制的背景区域实现光照信息的自适应扩散。其中,权重 ω 的取值范围为 $[0, 1]$ 。在生成光照模板时,需要保持光照信息的人脸区域权

重为 1,需要进行光照扩散的人眼、眉毛和背景区域的权重为零。

公式(1)的第二项是平滑项,用来控制光照模板 M 的平滑特性。为了使人脸与背景边界产生自然的光照过渡,希望生成的模板 M 中除了那些在导向特征图 G 具有较大梯度变化的地方都能尽量平滑。本文还希望直接利用图像自身的光照特性来控制光照模板的生成。因此,需对人脸融合图像在 CIELAB 颜色空间中的亮度通道进行边缘保持平滑滤波,并把该结果作为导向特征图 G 。

平滑项的具体形式如式(2)所示,共包含 3 个模型参数。其中:指数项参数 α 用来控制 M 的梯度变化对导向特征图 G 梯度变化的敏感程度,本文取经验值 $\alpha=1$;参数 ϵ 为一个小常数,用来避免分母为零的情况,本文取 $\epsilon=0.0001$;参数 λ 用来平衡平滑项与数据项的整体权重, λ 越大,生成的光照 M 越平滑,但同时也会去除更多的光照细节。

一般来说,光照模板在人脸内部区域和背景区域的光滑特性并不相同,均匀的模型参数无法实现上述效果。因此,本文把模型参数 λ 进一步扩展为具有自适应特性的函数 $\lambda(p)$:

$$\lambda(p) = c + b * T(p). \quad (3)$$

式中:参数 $\lambda(p)$ 由常数项 c 和自适应项 $b * T(p)$ 两部分组成。利用常数项能控制光照模板整体的光滑特性,而利用自适应项 $b * T(p)$ 能控制光照模板 M 局部的光滑特性,从而实现具有非均匀光滑特性的光照生成,以及光照信息在背景区域的自适应扩散。

为了保持提取的光照信息不变,光照模板在整体上需要较小的光滑性,故常数项取 $c=1$;而为了在背景区域获得更有效的光照扩散,光照模板在背景区域需要较大的光滑性,故自适应项取 $b=1$,且 $T(p)$ 在人脸区域为零,在背景区域为 1。



图 2 自适应编辑传播的光照生成

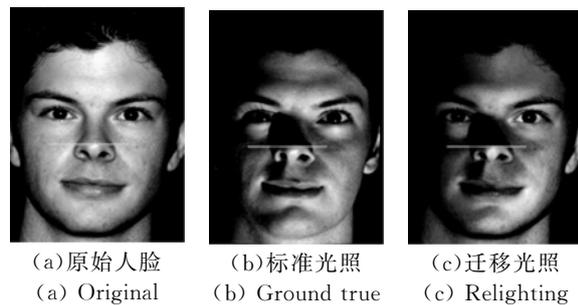
Fig. 2 Illumination generation using adaptive edit propagation

图 2 展示了光照生成时模型各个部分对应的效果,其中 R 为光照模板的初始值(模型输入), M 为生成的光照模板(模型输出), G 为导向特征图。通过比较 R 与 M 可以发现,本文提出的自适应编辑传播模型不仅能有效提取人脸的光照信息和平滑人脸内部区域中不必要的细节,而且能保证人脸与背景区域间的平滑过渡,使人脸内部的光照信息有效地扩散到背景区域,生成具有良好效果的光照模板。

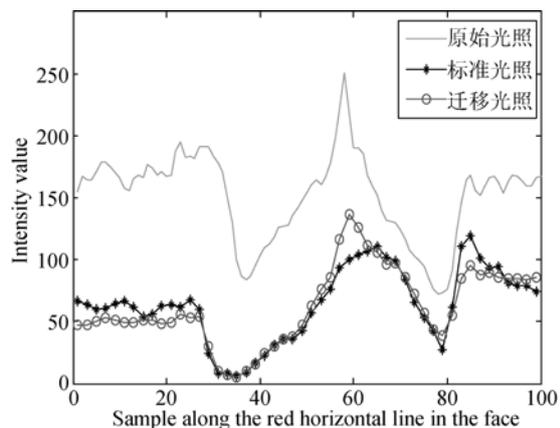
4 实验结果

4.1 迁移光照与标准光照的对比测试

为了验证本文方法的有效性,在 YaleB 人脸数据库^[20]中,采用具有不同光照角度的人脸作为参考图像对具有均匀光照的人脸进行光照迁移,然后对比迁移光照与标准光照的效果。



(a) 原始人脸 (a) Original (b) 标准光照 (b) Ground true (c) 迁移光照 (c) Relighting



(d) 不同光照情况下人脸图像红线处的亮度变化对比

(d) Intensity values along the red horizontal line in different lighting conditions

图 3 标准光照与迁移光照的效果对比

Fig. 3 Comparasion between ground true lighting and relighting

在定量实验中,对 38 个人脸子集分别进行光照迁移,并测量其亮度分布的 KL 散度和像素值差异。

首先,计算出均匀光照、迁移光照与标准光照人脸的亮度直方图分布(分别记为 Q_1 、 Q_2 和 P),并得到均匀光照与标准光照分布的平均 KL 散度 $\tilde{D}_1(P \parallel Q_1) = 1.07$,迁移光照与标准光照分布的平均 KL 散度 $\tilde{D}_2(P \parallel Q_2) = 0.03$ 。KL 散度越小,代表两个分布越相似,因此若 $\tilde{D}_2(P \parallel Q_2) < \tilde{D}_1(P \parallel Q_1)$,则表示迁移光照人脸与标准光照人脸具有更相似的光照分布,说明本文方法能有效地把参考人脸的光照特性迁移到目标人脸中。

然后,计算每张迁移光照和标准光照人脸间像素值(归一化到 $[0, 255]$)的差异。实验结果显示,平均每张迁移光照人脸有超过 85% 的像素与标准光照人脸的像素值差异小于 6,说明了本文方法在光照迁移时具有较高的准确性。

为了更好地观察本文方法的实际效果,本文进行了定性的对比实验,如图 3 所示。由图 3 可知,从整体来说,人脸图像的迁移光照效果与标准光照具有高度相似性。从局部来说,由图 3(d)人脸图像红线处的像素值变化曲线能够观察到迁移光照与标准光照人脸的像素值变化具有较高的一致性。

4.2 复杂背景下的光照迁移效果

为了验证本文方法在具有复杂背景的人脸图像中的光照迁移效果,本文对不同类型的参考人脸和目标人脸进行了光照迁移实验。测试图像主要取自 Caltech 人脸数据库^[21],包含室内与室外不同背景的人脸图像。



图 4 单参考人脸多目标的光照迁移效果

Fig. 4 Relighting effect of facial with single reference and multiple targets



图 5 单目标多参考人脸的光照迁移效果

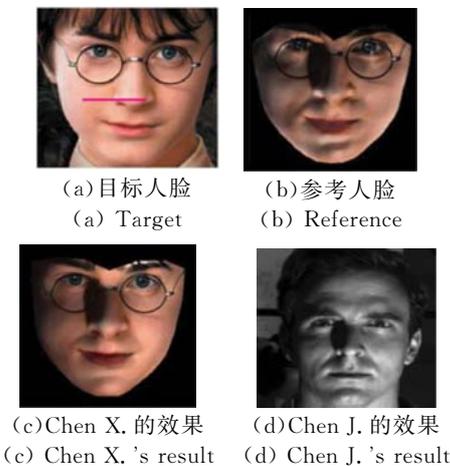
Fig. 5 Relighting effect of facial with single target and multiple references

在图 4 中,利用从同一张参考人脸生成的光照模板对不同目标人脸进行光照迁移。通过观察可以发现,即使参考人脸包含不同的光照特性与人脸特征,本文方法都能有效地从中提取出主要的光照信息,并在目标人脸中产生具有良好一致性的光照渲染效果。这表明本文方法在实现光照迁移时具有良好的稳定性和有效性。

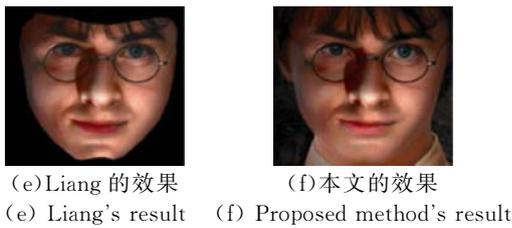
图 5 为本文用不同参考人脸生成的光照模板对同一张目标人脸进行光照迁移的效果。实验表明,本文的方法不仅能有效地把不同参考人脸的光照特性迁移到目标图像的人脸区域,而且能在背景区域生成自然的光照效果。

4.3 与相关方法的效果对比

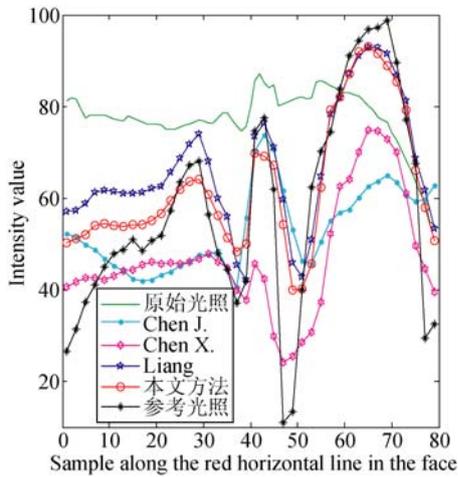
将本文方法与 Chen J. 等人^[6], Chen X. 等人^[7]和 Liang 等人^[8]方法的光照迁移效果进行了定性定量比较。结果如图 6 所示(彩图见期刊电子版)。



(a)目标人脸 (a) Target
(b)参考人脸 (b) Reference
(c)Chen X. 的效果 (c) Chen X.'s result
(d)Chen J. 的效果 (d) Chen J.'s result



(e)Liang 的效果 (f)本文的效果
(e) Liang's result (f) Proposed method's result



(g)不同方法在人脸图像红线处的亮度变化对比

(g) Intensity values along the red horizontal line in different relighting methods

图 6 本文方法与 Chen J., Chen X. 和 Liang 方法的效果对比

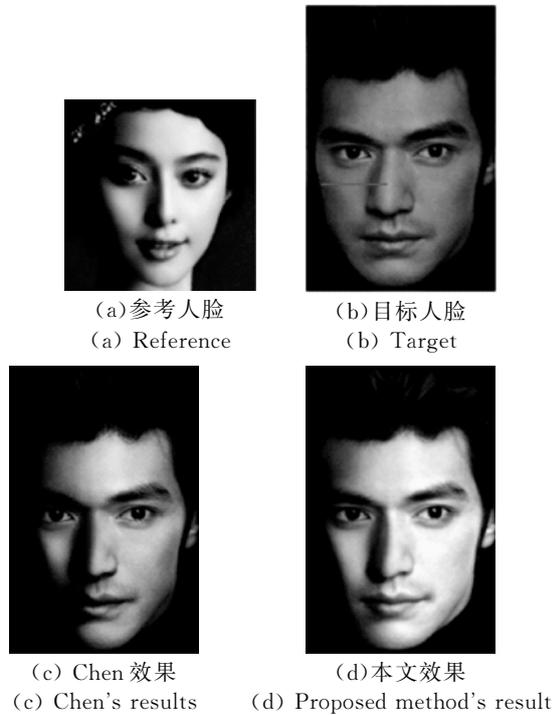
Fig. 6 Comparison of proposed method and Chen J. 's, Chen X. 's and Liang's methods

在定性分析中,可以观察到虽然上述方法都能实现光照迁移,但本文方法生成的目标人脸光照效果的一致性更好。例如,Chen J. 和 Chen X. 的方法无法很好地实现人脸鼻尖处的高光效果,而本文方法能更好地在目标人脸中重现参考人脸的光照效果。

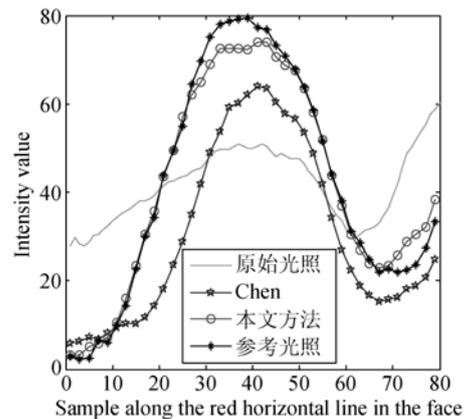
在定量分析中,将不同的迁移光照人脸以及参考人脸匹配到目标人脸,然后描绘了各个人脸图像在图 6(a)红线处的亮度变化情况,如图 6(g)所示。由图 6 可知,本文方法的亮度变化曲线与参考人脸的拟合性最好。尤其在采样点区间[50, 80]中(即人脸鼻尖处的高光区域),能获得比 Chen J. 与 Chen X. 更贴近参考人脸光照的效果,这与定性分析的结果是一致的。

另外,其他 3 种方法均没有考虑人脸以外区域的光照过渡和扩散,只能实现人脸内部区域的光照迁移,其适用范围受到了一定的限制。本文方法由于考虑了人脸背景区域的光照生成,能实

现更为完整的光照迁移效果。本文方法与 Chen 等人^[9]方法的比较结果如图 7 所示。由图 7 可知,虽然两种方法都通过生成光照模板来进行光照迁移,而且实验的效果也十分相似,但两者在光照模板生成的环节中还是有较大差别的。



(a)参考人脸 (b)目标人脸
(a) Reference (b) Target
(c) Chen 效果 (d)本文效果
(c) Chen's results (d) Proposed method's result



(e)不同方法在人脸图像红线处的亮度变化对比

(e) Intensity values along the red horizontal line in different relighting methods

图 7 本文方法与 Chen 等人方法的效果对比

Fig. 7 Comparison of proposed method and Chen et al. 's methods

Chen 等人^[9]主要利用模板匹配的方法,即根据参考人脸的光照特征从预先构建的数据库中选取相应的手绘光照模板,间接地进行光照迁移,而

本文方法能直接从参考人脸中提取光照信息, 并且自动地生成光照模板, 以实现光照迁移。从图 7(e) 的亮度曲线中可以观察到, 虽然手绘模板能在整体上近似参考人脸的光照变化, 但本文自动生成的模板则能更加精准地逼近参考人脸光照。

另外, 由于 Chen 等人的方法涉及光照特征的匹配与分类问题, 因此光照特征提取以及模板匹配的准确性都会对光照迁移的稳定性产生影响。相反, 本文的方法直接通过参考人脸生成光照模板, 并没有光照分类等中间环节, 减少了其他因素对光照迁移的影响。

5 结 论

本文构建了一个新的融入人脸特征先验信息的自适应编辑传播模型, 并以此为基础, 提出了一个复杂背景下基于单张参考人脸的光照迁移框

架。实验表明, 本文方法能有效生成不同的光照渲染效果, 在标准数据库的测试中, 平均每张迁移光照人脸有超过 85% 的像素(归一化到 $[0, 255]$)与标准光照人脸像素值的差异小于 6, 且两者的光照分布具有较小的 KL 散度。同时, 本文方法具有较大的适用范围, 可以在具有复杂背景和不同特点的参考人脸与目标人脸图像中获得稳定与良好的光照迁移效果。

本文的工作能在多个方面做进一步扩展。第一, 本文方法假定输入的目标人脸与参考人脸都具有良好的图像品质, 当该假设不成立时, 可以在本文的光照迁移框架中加入相应的图像增强模块^[22-23]来提升图像品质。第二, 通过与其他真实感绘制^[13]或非真实感绘制方法^[24-25]相结合, 能获得更加丰富与多样的人脸图像渲染效果, 还能在人脸识别^[7, 24]等问题中得到应用。

参考文献:

- [1] BLANZ V, VETTER T. A morphable model for the synthesis of 3D faces [C]. *Proc. Conf. CGIT*, 1999; 187-194.
- [2] BASRI R, JACOBS D W. Lambertian reflectance and linear subspaces [J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2003, 25(2): 218-233.
- [3] SHASHUA A, RIKLIN-RAVIV T. The quotient image: class-based re-rendering and recognition with varying illuminations [J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2001, 23(2): 129-139.
- [4] PEERS P, TAMURA N, MATUSIK W, et al.. Post-production facial performance relighting using reflectance transfer [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2007, 26(3): 10.
- [5] LI Q, YIN W, DENG Z. Image-based face illumination transferring using logarithmic total variation models [J]. *The Visual Computer*, 2010, 26(1): 41-49.
- [6] CHEN J, SU G, HE J, et al.. Face image relighting using locally constrained global optimization [C]. *Proc. ECCV*, 2010; 44-57.
- [7] CHEN X, WU H, JIN X, et al.. Face illumination manipulation using a single reference image by adaptive layer decomposition [J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2013, 22(11): 4249-4259.
- [8] LIANG L, JIN L. A new face relighting method based on edge-preserving filter [J]. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 2013, E96-D(12): 2904-2907.
- [9] CHEN X, JIN X, ZHAO Q, et al.. Artistic illumination transfer for portraits [J]. *Comput. Graphics Forum*, 2012, 31(4): 1425-1434.
- [10] CHEN X, ZOU D, ZHAO Q, et al.. Manifold preserving edit propagation [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2012, 31(6): 132.
- [11] LEVIN A, LISCHINSKI D, WEISS Y. Colorization using optimization [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2004, 23(3): 689-694.
- [12] 厉旭杰, 赵汉理, 黄辉. 局部线性模型优化的灰度图像彩色化 [J]. *中国图像图形学报*, 2013, 18(4): 460-466.
- [13] LI X J, ZHAO H L, HUANG H. Local linear model optimization based grayscale image colorization [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2013, 18(4): 460-466. (in Chinese)
- [14] LIANG L, JIN L, LI X. Facial skin beautification using adaptive region-aware masks [J]. *IEEE Trans. on Cybernetics*, 2014, 44(12): 2600-2612.
- [15] CHEN X, ZOU D, LI J, et al.. Sparse dictionary learning for edit propagation of high-resolution images [C]. *Proc. CVPR*, 2014: 2854-2861.
- [16] LISCHINSKI D, FARBMAN Z, UYTENDAELE

- M, *et al.*. Interactive local adjustment of tonal values [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2006, 25(3): 646-653.
- [16] 杨利平, 辜小花. 用于人脸识别的相对梯度直方图特征描述[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(1): 152-159.
- YANG L P, GU X H. Relative gradient histogram features for face recognition [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(1): 152-159. (in Chinese)
- [17] COOTES T F, TAYLOR C J, COOPER D H, *et al.*. Active shape models-their training and application [J]. *Comput. Vision Image Understand.*, 1995, 61(1): 38-59.
- [18] LEE S, WOLBERG G, SHIN S Y. Scattered data interpolation with multilevel B-splines [J]. *IEEE Trans. Vis. Comput. Graphics.*, 1997, 3(3): 228-244.
- [19] FARBMAN Z, FATTAL R, LISCHINSKI D, *et al.*. Edge-preserving decompositions for multi-scale tone and detail manipulation [J]. *ACM Trans. Graph.*, 2008, 27(3): 10.
- [20] GEORGHIADES A, BELHUMEUR P, KRIEGMAN D. From few to many: Illumination cone models for face recognition under variable lighting and pose [J]. *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, 2001, 23(6): 643-660.
- [21] Caltech Face Database [EB/OL]. Available: <http://www.vision.caltech.edu/html-files/>.
- [22] 邓承志, 田伟, 汪胜前, 等. 近似稀疏正则化的红外图像超分辨率重建[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(6): 1648-1654.
- DENG CH ZH, TIAN W, WANG SH Q, *et al.*. Super-resolution reconstruction of approximate sparsity regularized infrared images [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(6): 1648-1654. (in Chinese)
- [23] BYCHKOVSKY V, PARIS S, CHAN E, *et al.*. Learning photographic global tonal adjustment with a database of input/output image pairs [C]. *Proc. CVPR*, 2011: 97-104.
- [24] WANG X, TANG X. Face photo-sketch synthesis and recognition [J]. *IEEE Trans. Patt. Anal. Mach. Intell.*, 2009, 31(11): 1955-1967.
- [25] 李伟红, 朱宪宇, 龚卫国. 基于人脸画像的伪照片合成及修正[J]. *光学精密工程*, 2014, 22(5): 1371-1378.
- LI W H, ZHU X Y, GONG W G. Pseudophoto synthesis based on face sketch and its amendment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1371-1378. (in Chinese)

作者简介:



梁凌宇(1986—),男,广东广州人,博士,助理研究员,2014年于华南理工大学获得博士学位,主要从事图像处理、计算摄影学和计算机视觉等方面的研究工作。E-mail: eelyliang@scut.edu.cn



金连文(1968—),男,贵州贵阳人,博士,教授,博士生导师,1996年于华南理工大学获得博士学位,主要从事模式识别、智能人机交互和机器学习等方面的研究工作。E-mail: lianwen.jin@gmail.com

(版权所有 未经许可 不得转载)