



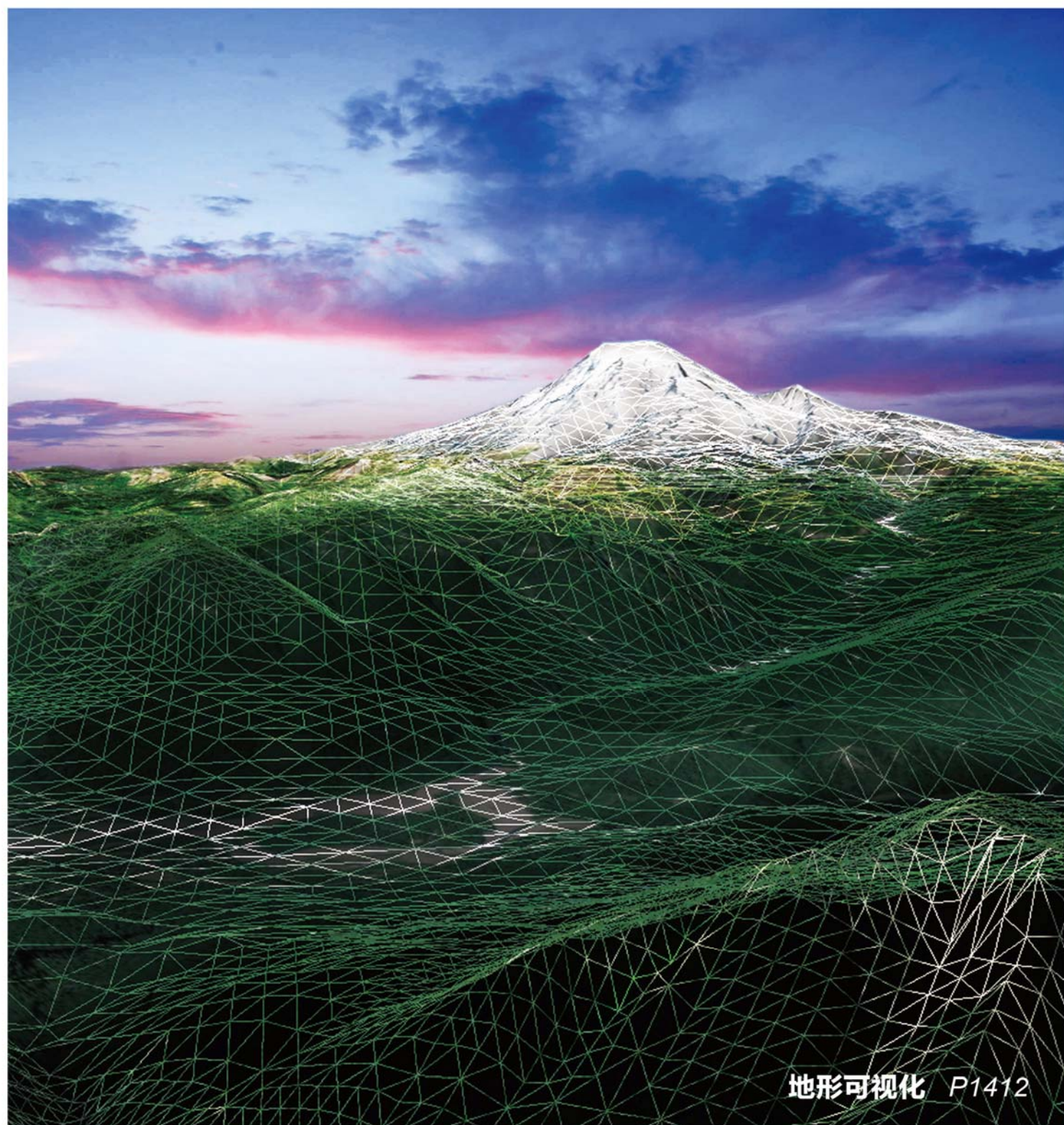
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS

主办: 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

中国图象图形学报

2015
10
VOL.20

ISSN1006-8961
CN11-3758/TB



地形可视化 P1412



第20卷第10期（总第234期）

2015年10月16日

中国精品科技期刊
中国国际影响力优秀学术期刊
中国科技核心期刊
中文核心期刊

版权声明

凡向《中国图象图形学报》投稿，均视为同意在本刊网站及CNKI等全文数据库出版，所刊载论文已获得著作权人的授权。本刊所有图片均为非商业目的使用，所有内容，未经许可，不得转载或以其他方式使用。

Copyright

All rights reserved by Journal of Image and Graphics, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS. The content (including but not limited text, photo, etc) published in this journal is for non-commercial use.

主管单位 中国科学院
主办单位 中国科学院遥感与数字地球研究所
中国图象图形学学会
北京应用物理与计算数学研究所

主 编 李小文
编辑出版 《中国图象图形学报》编辑出版委员会
邮政信箱 北京9718信箱
邮 编 100101
电子信箱 jig@radi.ac.cn
电 话 010-64807995
网 址 www.cjig.cn

广告经营许可证 京朝工商广字第0361号
总 发 行 北京报刊发行局
订 购 全国各地邮局
海外发行 中国国际图书贸易集团有限公司
(邮政信箱: 北京399信箱 邮编: 100048)
印刷装订 北京科信印刷有限公司

Journal of Image and Graphics

Title inscription: Song Jian | Monthly, Started in 1996

Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS
China Society of Image and Graphics
Institute of Applied Physics and Computational Mathematics

Editor-in-Chief LI Xiaowen
Editor, Publisher Editorial and Publishing Board of Journal of Image and Graphics
P.O.Box 9718, Beijing, P.R.China
Zip code 100101
E-mail jig@radi.ac.cn
Telephone 010-64807995
Website www.cjig.cn

Distributed by Beijing Bureau for Distribution of Newspapers and Journals
Domestic All Local Post Offices in China
Overseas China International Book Trading Corporation
(P.O.Box 399, Beijing 100048, P.R.China)
Printed by Beijing Kexin Printing Co., Ltd.

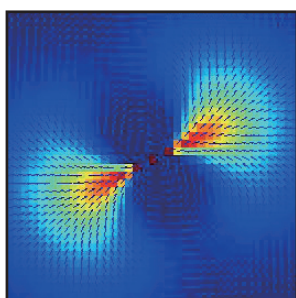
CN 11-3758/TB
ISSN 1006-8961
CODEN ZTTXFZ
国外发行代号 M1406
国内邮发代号 82-831
国内定价 50.00元



JPEG图像双重压缩偏移量估计的篡改区域自动检测定位(第1304页)



基于表情传输的交互式照片编辑(第1366页)



结合张量投票和Snakes模型的SAR图像道路提取(第1403页)

图像处理和编码

基于模式特征的H.264/AVC可逆视频水印

李淑芝, 张翔, 邓小鸿, 吴晓燕1285

二阶总广义变分小波修复模型

许建楼, 郝岩, 张翼1297

JPEG图像双重压缩偏移量估计的篡改区域自动检测定位

赵洁, 郭继昌, 张艳, 张众维1304

图像分析和识别

基于非对称局部梯度编码的人脸表情识别

胡敏, 程轶红, 王晓华, 任福继, 许良凤, 黄晓音1313

采用积分图块间距离检测图像边缘

贾迪, 孟琢, 孙劲光, 李思慧, 赵明远1322

自适应属性加权2维FCM分割算法

侯晓凡, 吴成茂1331

利用层间相关性的岩心CT图像半自动分割方法

徐永进, 滕奇志, 吴晓红, 卿粲波1340

图像理解和计算机视觉

在线特征选取的多示例学习目标跟踪

周志宇, 彭小龙, 吴迪冲, 朱泽飞1346

融合外观和运动特征的在线目标分割

张雷, 李成龙, 汤进, 高思晗1358

基于RGB-D深度相机的室内场景重建

梅峰, 刘京, 李淳芃, 王兆其1366

计算机图形学

带平台伸缩函数的参数曲线变形

张莉, 余慧芳, 檀结庆1374

视景建模中树木纹理图像的随机变形网格方法

施冠羽, 欧阳清1384

基于表情传输的交互式照片编辑

刘锦云, 彭宏京1390

遥感图像处理

结合张量投票和Snakes模型的SAR图像道路提取

符喜优, 张风丽, 王国军, 邵芸1403

GPU Tessellation全球地形可视化方法

李尚林, 郑利平, 张迎凯, 李琳1412

CONTENTS

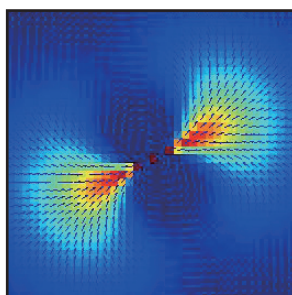
JOURNAL OF IMAGE AND GRAPHICS



Automatic detection and localization of image forgery regions based on offset estimation of double JPEG compression (P1304)



Interactive photo editing based on expression transmission (P1366)



Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model(P1403)

Image Processing and Coding

- Reversible video watermarking algorithm for H.264/AVC based on mode feature
Li Shuzhi, Zhang Xiang, Deng Xiaohong, Wu Xiaoyan 1285
- Second order total generalized variational model for wavelet inpainting
Xu Jianlou, Hao Yan, Zhang Ji 1297
- Automatic detection and localization of image forgery regions based on offset estimation of double JPEG compression
Zhao Jie, Guo Jichang, Zhang Yan, Zhang Zhongwei 1304

Image Analysis and Recognition

- Facial expression recognition based on asymmetric region local gradient coding
Hu Min, Cheng Yihong, Wang Xiaohua, Ren Fuji, Xu Liangfeng, Huang Xiaoyin 1313
- Edge detection method of block distance combining with summed area table
Jia Di, Meng Lu, Sun Jinguang, Li Sihui, Zhao Mingyuan 1322
- Adaptive weighted two-dimensional histogram FCM segmentation algorithm
Hou Xiaofan, Wu Chengmao 1331
- Semi-segmentation of rock CT images using the correlation of adjacent frames
Xu Yongjin, Teng Qizhi, Wu Xiaohong, Qing Linbo 1340

Image Understanding and Computer Vision

- Object tracking based on multiple instance learning with online feature selection
Zhou Zhiyu, Peng Xiaolong, Wu Dichong, Zhu Zefei 1346
- Online object segmentation via fusing appearance and motion features
Zhang Lei, Li Chenglong, Tang Jin, Gao Sihan 1358
- Improved RGB-D camera based indoor scene reconstruction
Mei Feng, Liu Jing, Li Chunpeng, Wang Zhaoqi 1366

Computer Graphics

- Deformation of parametric curves based on platform extension function
Zhang Li, Yu Huifang, Tan Jieqing 1374
- Method of random transmogrification mesh for tree texture images in scene modeling
Shi Guanyu, Ouyang Qing 1384
- Interactive photo editing based on expression transmission
Liu Jinyun, Peng Hongjin 1390

Remote Sensing Image Processing

- Road extraction from SAR images using tensor voting and Snakes model
Fu Xiyu, Zhang Fengli, Wang Guojun, Shao Yun 1403
- GPU Tessellation method of global terrain visualization
Li Shanglin, Zheng Liping, Zhang Yingkai, Li Lin 1412

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2015)10-1390-13

论文引用格式: Liu J Y, Peng H J. Algorithm for interactive photo editing based on expression transmission[J]. Journal of Image and Graphics, 2015, 20(10): 1390-1402. [刘锦云, 彭宏京. 基于表情传输的交互式照片编辑[J]. 中国图象图形学报, 2015, 20(10): 1390-1402.][DOI: 10. 11834/jig. 20151013]

基于表情传输的交互式照片编辑

刘锦云, 彭宏京

南京工业大学计算机科学与技术学院, 南京 211306

摘要: 目的 生活中照片拍摄时难以捕捉到所有人脸表情最佳的时刻, 多次摆拍不仅费时, 而且可能会错过某些场景, 传统的后期编辑软件不具备针对性, 且操作复杂。针对人物照片中部分人脸表情不佳的情况, 提出一种基于表情传输的交互式照片编辑算法。**方法** 首先将包含源人脸的照片与具有目标表情人脸的照片进行特征点检测, 通过交互将指定人脸部分选出并将其姿态归正为眼睛在同一水平线上, 如果目标人脸与源人脸身份相同, 将目标人脸区域根据源人脸的轮廓以及左右半脸分布以扫描线变形得到替换目标; 不相同则根据目标人脸特征点分布的几何特征计算源人脸中特征点的新位置, 通过基于特征点变化的网格变形得到替换目标, 最后利用二次光照与泊松融合将其无缝拼接到源图中。**结果** 实验表明算法可以对人脸五官清晰且在宽容度内的人物照片进行表情编辑, 处理结果只改变了人物的脸部表情, 并且无明显拼接痕迹。**结论** 提出了一种新型针对目标人脸不同身份信息交互式表情传输模型, 该模型可以适应不同的编辑条件与要求, 效果出色。

关键词: 表情映射; 特征点检测; 二次光照; 泊松融合

Interactive photo editing based on expression transmission

Liu Jinyun, Peng Hongjin

College of Computer Science and Technology, Nanjing Tech. University, Nanjing 211306, China

Abstract: **Objective** Seldom does a photograph record what we perceive with our eyes. As a result, we could not obtain an optimal photo with all the subjects smiling as expected. When taking pictures, we spend a considerable amount of time capturing other shots and inadvertently miss beautiful scenes. Traditional photo editing apps could not facilitate expression editing. Hence, we develop an algorithm for interactive photo editing based on expression transmission to edit parts of faces with poor expression. The proposed algorithm uses scan line deformation or feature point deformation on the basis of the identity related to the source face. **Method** Our approach is to utilize target face expression to edit source faces with unsatisfied expressions. The result shares an expression similar to that of the target face. The face is edited by relighting and then finally fused in the photo. **Result** The proposed algorithm can edit frontal face images to achieve desired expressions. This algorithm, which is based on different processing conditions and transmission models, demonstrate better performance than the conventional Gaussian mixture model with regard to the test results. **Conclusion** This study proposes a novel expression transmission model. We assign different transmission models for different pieces of target face identity information and subsequently introduce interaction. Experiment results indicate that our model achieves preferable adaptive performance

收稿日期: 2015-04-03; 修回日期: 2015-06-21

基金项目: 江苏省自然科学基金项目 (BK2011794)

第一作者简介: 刘锦云 (1990—), 男, 南京工业大学计算机科学与技术学院硕士研究生, 主要研究方向为图像编辑, 模式识别。E-mail: liujinyun1234@163.com

Supported by: Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (BK2011794)

when applied in photos with different conditions and requirements.

Key words: expression mapping; feature points detection; relighting; Poisson image fusion

0 引言

人脸表情编辑在图像处理和视频编辑领域是非常具有挑战性的问题。如拍摄的照片中存在部分人脸表情不佳、电影拍摄时群众演员的表情难以控制,这些细微的瑕疵往往需要耗费摄影师的时间去重拍或者后期人员去编辑。以上做法不仅费时费力且难以取得完美的结果,在对现有的人脸表情编辑算法进行研究后,提出一个通用且灵活的方法进行照片中人脸表情的编辑。

人脸面部表情编辑是通过编辑算法将该人脸编辑成符合预期目标的表情的过程。对照片中人脸表情的编辑,可以获得一张实际上不存在但是合理的照片,这张照片可以更好地展示照片中每个人的风采。而通用的图像编辑软件,如 Adobe 公司的 Photoshop 则需要通过大量的交互来完成对人脸表情的编辑,这一过程没有目标指向,每一步的编辑都是为了使结果更加自然,其步骤是不确定的,因此不是算法研究的范畴。本文所讨论的人脸表情编辑都是具有目标表情指定的,最终的编辑结果应与目标人脸的表情相似。如图 1 所示,根据结果图像与原图像和目标图像之间的关系,大致可以将目前的表情编辑算法分为 3 类:

第 1 类编辑结果如图 1(c),其利用图 1(b)中的部分去替换图 1(a)中的部分,其本质就是直接替换。Aseem 等人^[1]利用图割算法(graph-cut)与泊松融合,通过交互在目标图片上选取替换区域,再利用泊松融合完成替换。Dmitri 等人^[2]利用建好的人脸库,根据原人脸的相关信息,自动选取最佳目标进行替换。高岩^[3]提出局部器官替换算法,利用拉普拉斯算子为约束,将替换器官与原器官进行混合替换。类似的利用目标图像中的部分或者全部替换的算法还有很多^[4-5],这些算法都无法与原图像很好地契合,在某些情况下产生较为明显的失真,而且交互过程烦琐。

第 2 类编辑结果如图 1(d),其利用图 1(b)中的表情信息来编辑图 1(a),获得与图 1(b)相近的表情。文献[6]提出了一个表情合成系统,该系统通过建立面部细节区域分布与不同表情的特征点下的关

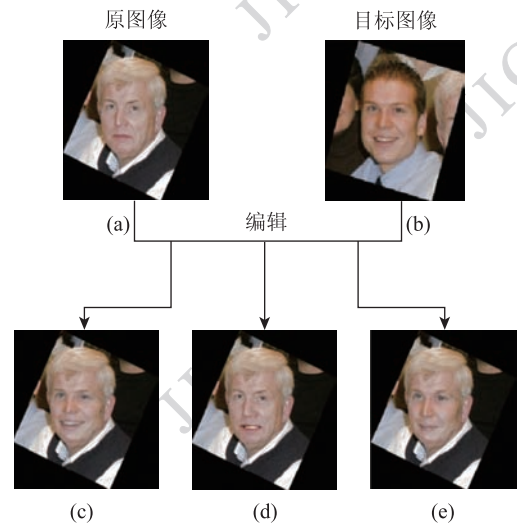


图 1 表情编辑算法示意图

Fig. 1 The illustration of expression editing algorithm

系,利用目标图像的特征点位置信息合成一幅相似的表情,相当于对原图像进行了重映射。宋明黎^[7]在基于拉普拉斯微分的脸部细节迁移中,将目标人脸面部的皮肤细节特征传递到原图像中,使其具有目标图像的面部细节,以达到年龄传输的结果。类似的利用目标人脸中全部或部分特征信息作为指导,对原图像进行编辑的算法也有很多^[8-9],但是这些算法对原图像和目标图像需要很强的相关性,如姿态、中性脸参考。这些局限性大大限制了此类算法的应用范围。

第 3 类编辑结果如图 1(e),其利用目标人脸的面部细节,按照原图像的表情信息进行约束,其结果具有图 1(a)的表情和图 1(b)的面部细节,其本质是将预设好的人物形象生成与自身相似的表情。这种编辑主要应用于动画制作,以及特效电影中,利用人脸的面部表情,合成出动画人物的表情。文献[10-12]的方法也属于第 3 类,这类研究相对成熟,因为算法追求的是效果不需要严格的符合现实,模型建立也相对容易。

本文提出基于表情传输的人脸编辑算法,主要用于处理人物照片中因曝光时间不当,而没有拍摄出令人满意的表情,编辑后的结果应与原图像中的人物关系一致,根据上文介绍,不能采用第 3 类编辑算法,故算法采用了第 1 类与第 2 类相结合的表情编辑,其处理思想是在目标图像与原图像中身份关

系一致时利用直接替换来达到编辑效果;人物关系不一致时,通过第2类编辑对原图像进行重映射,生成新的表情图。虽然在上文提到的方法中,针对某一项人脸编辑可以取得良好的效果,但是对原图像和目标图像的要求过高,如文献[1]需要一组相机固定,人物相对位置不变的人脸照片。文献[2]需要根据姿态建立人脸库。文献[3]只能处理标准的正面人脸图片编辑。文献[8-9]需要建立中性脸与有表情脸之间的映射关系,再将此映射关系传递给新的中性脸,生成新的表情人脸,过程复杂,需要较多的数据,有时候取得效果也不理想。部分算法提供了交互,不过交互设计太过复杂,步骤烦琐,对于结果的控制往往是不确定的。

基于上述分析,本文改进了交互方式、利用人脸特征点信息以及根据目标图像身份的不同采用不同的变形方法,以解决传统仿射变化不能很好匹配目标区域,使得人脸部分在不同分辨率下可以完美匹配,并利用二次光照与泊松融合相结合,完成对一般正面人物照片中的表情编辑工作。

1 算法设计过程及原理

照片中的人脸部分主要包含的信息有:身份信息、表情信息和姿态信息。

本文算法通过建立原人脸与目标人脸的表情传输模型,从而完成对原人脸表情编辑的任务,根据人脸所包含的信息,最终处理结果应保留原人脸的身份与姿态信息,改变后的表情应于目标人脸相似,且编辑后的人脸表情要自然,图2为算法流程图。

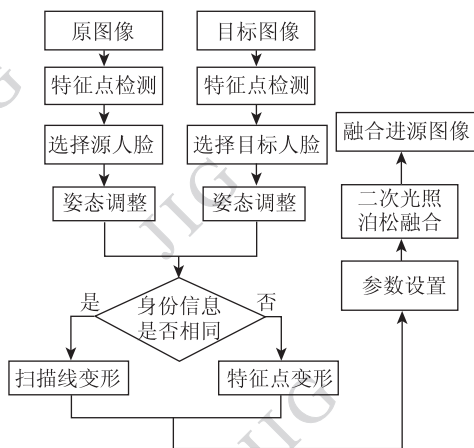


图2 算法流程图

Fig. 2 The algorithm flow chart

1.1 特征提取

人脸特征点的定位在人脸识别和人脸分析系统中扮演者一个非常重要的角色。特征点的定位是很多面部操作的基础,因此这个问题的讨论近几年非常火热。大致上来说,特征点定位有3种主要的方法。

第1种方法是利用一个基于局部块的分类器(local-patch classifiers)滑动窗口(sliding window)去搜索,看这个区域里是否具有这个局部特征。这个方法很难去包含全局的特征,可能会造成某些地方搜索不到。

第2种方法是基于统计信息的主动形状模型(ASM)和基于主动表观模型(AAM)。这些方法定义一个能量函数,通过调节模型参数使得能量函数取得最小值,方法是健壮的,然而,需要用实验来估计某些参数。

第3种方法是基于明确回归复原的方法,这个模型框架中,将关键点的定位作为一个回归任务,将关键点的最初输入位置不断计算得出最终的位置输出。这种办法更加健壮^[13-14]。

采用文献[13]提出的由粗到精的深度学习特征点标注方法,该方法是通过不断对图像中人脸区域进行更加精细的划分,并最终精确到每个器官,通过这些器官组件与系统中已经训练过的各个姿态下的器官模型匹配,最终得出特征点的位置,该方法可以更加精准地对面部进行标注,对人脸检测与特征点的标注宽容度也更大,标注结果如图3。



图3 特征点检测标注图

Fig. 3 The illustration of feature points marking

1.2 目标交互选择与姿态信息归正

照片中往往包含多张人脸,且姿势不尽相同,本文算法利用鼠标点击的交互方式,通过计算鼠标点击位置与照片中每个脸部鼻子处的坐标的欧氏距

离,对欧氏距离最小的人脸标记选定,并进行下一步的归正处理,选定示意图如图4。

选定的人脸会以高亮显示以判断是否选择正确,选中的人脸具有不同的姿态,而姿态信息反映了人脸在3个方向的角度信息,如图5所示。



图4 目标选择示意图

Fig. 4 The illustration of target selection

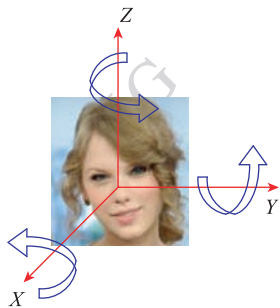


图5 人脸姿态示意图

Fig. 5 The illustration of face pose

人脸的姿态信息主要集中于图5中所示3个方向的旋转角度大小,反映人脸表情信息最明显的就是嘴与眼睛的特征,而在侧脸或者五官被遮挡的情况下,人脸特征的标注结果没有意义,而照片中人脸通常是五官清晰且在X轴与Y轴的旋转角度不超过正负 10° ,这样的人脸通过X轴方向的修正,就很接近标准的正面人脸,本文算法基于此建立表情传输模型。

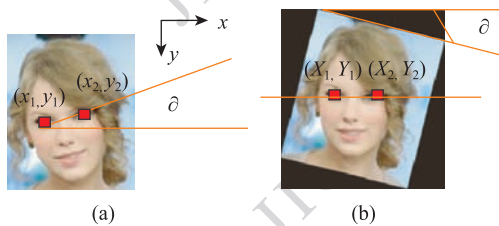


图6 人脸姿态归正示意图

Fig. 6 The illustration of Face pose normalization

如图6(a)所示,选中人脸两眼坐标分别为 $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$,图6(b)所示变换过的两眼坐标分别为 $(X_1, Y_1), (X_2, Y_2)$ 。计算出人脸在X轴偏转的角度 θ ,并逆时针旋转图6(a)旋转 θ 度就得到图6(b),根据几何知识可知

$$\theta = \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \quad (1)$$

对选择好的人脸姿态归正后,可以将照片中的任意姿态的人脸表情编辑,转换到正面模型进行处理。

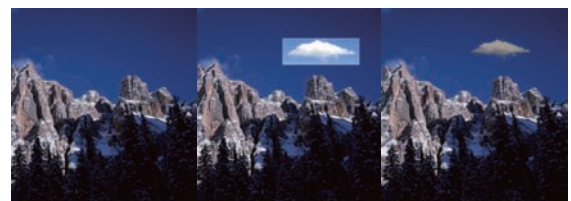
1.3 保留身份信息表情传输

反映个人身份信息的特征通常包括特征点间的欧氏距离、曲率和角度等,因此要保留原图像中人脸的身份信息就不能将别人的面部的特征数据替换进去,故在目标人脸与原人脸来自同一个人,可以通过第1类编辑与第2类编辑,不同情况下只能采用第2类编辑。本文算法根据目标人脸与原人脸的身份关系,采用不同的变形方法。在相同时,采用扫描线变形后的目标人脸进行替换;在不相同时,采用特征点变形后的原人脸进行替换。

1.4 二次光照与泊松融合相结合的拼接

不同照片上的人脸由于拍摄时的光照情况不同,直接替换后会在拼接处产生很明显的接缝。文献[1]中虽然通过泊松融合算法,将替换处的梯度信息传递给目标替换区域,但对于明暗差别过大的情况,该方法依然无法解决拼接处的痕迹。文献[15]通过建立两幅图片光场的传输模型,成功将目标人脸的光照信息传递给原人脸,效果自然。本文算法将得到的替换区域先进行二次光照处理,使得替换目标具有与原图像类似的颜色分布,再将其融合进原图像中,使得边界处的拼接自然。

如图7所示将其融合进原图像中,图7(b)是直接将替换部分覆盖到原图中,图7(c)是经过泊松融合处理的图,泊松融合可以看做在替换部分处理边界并改变梯度与原图相近的过程。



(a) 原图 (b) 直接覆盖图 (c) 泊松融合图

图7 泊松融合示意图

Fig. 7 The illustration of Poisson image fusion

图8中 f^* 表示定义在原图 S (除去区域 Ω)上的函数, f 表示定义在插入区域上的未知函数,图8中 $\partial\Omega$ 表示区域 Ω 的边界。 g 表示待插入的已知函数,插入效果受到 v 的影响(v 通常为 g 的梯度场)。依照此定义,图像融合问题即在一定的约束条件下求解未知函数 f 的优化问题。一般情况下,插入后的图像需保持插入图像本身的纹理信息,但是在边界上看不出明显的处理痕迹,此种约束下的优化问题可以表示为

$$\min_f \iint_{\Omega} |\nabla f - v|^2 \quad \text{当 } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega} \text{ 时} \quad (2)$$

上述问题的解等价于泊松方程的解,即

$$\text{当 } f|_{\partial\Omega} = f^*|_{\partial\Omega} \text{ 时, } \nabla f = \text{divv}(\text{over}\Omega) \quad (3)$$

式中, ∇f 的结果是以 Ω 的边界为中心处(over)的散度(divv),因此,图像融合问题就抽象为求解上述离散化泊松方程的问题。将目标人脸变形后再准确地融合到原人脸区域,实现融合边界的平滑过渡。其原理上就是利用替换的图片边界,并结合原图片的梯度信息,即变化纹理,得到融合图像。

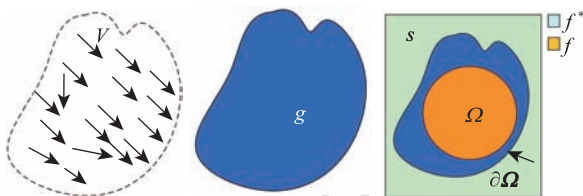


图8 泊松融合原理图

Fig. 8 The schematic diagram of Poisson image fusion

因此本文算法对目标人脸进行光场传递之后再行泊松融合。对比单一泊松融合,本文算法可以对两幅光照条件相差很大的人脸,进行表情传输。该过程可以参考文献[4,15]。

本文算法通过对传统的人脸表情编辑算法的分析,结合目前照片编辑中所遇到的问题,利用简单的交互,将不规则的人脸表情编辑转换为规则人脸表情编辑,同时根据目标人脸的不同制定不同的表情传输方案,再通过二次光照与泊松融合相结合的拼接,最终实现了对普通照片中人物脸部表情不佳的编辑。

2 目标指定的表情传输算法

在进行目标人脸的选择时,如果有且存在较好

的替换对象,直接替换往往可以取得较好的效果,而实际过程中可能少有适当的目标人脸进行替换,但是存在某个人脸的表情是符合要求,如果将目标人脸的表情信息传递给原人脸,同样也可以完成表情编辑任务。因此本文算法针对这两种情况,提出了不同的变形方法,下面将分别介绍目标人脸身份与原人脸身份相同和不相同时的传输模型。

2.1 基于扫描线变形的人脸表情传输

当存在恰当的相同身份的目标人脸时,而目标人脸与原人脸的光照信息和尺寸不可能完全相同。文献[2-3]提出的算法,仅通过眼部坐标位置进行仿射变化,将目标图片进行最佳比例的缩放,再进行替换。由于两者的姿态信息不同,有可能会造成虽然眼睛部分覆盖上了,下巴处可能没有覆盖到,造成双下巴的替换结果。文献[16]提出一种基于轮廓的变形方法,可以将图像逐行约束目标指定形状。本文算法利用人脸的边界与左右半脸的分布线信息作为轮廓约束信息,将目标人脸进行扫描线变形,生成的替换图像可以进行完美的替换,同时保持原有的表情特征,图9为流程示意图。

在传输流程图中,输入归正好的人脸图像图9(a)与图9(b),利用文献[13]算法标注好的特征点信息,绘制出轮廓约束图图9(c)和图9(d),轮廓约束图的高亮处将人脸分成了左右半脸,通过将两幅人脸的高度缩放到与人脸的高度相同,得到图9(e)和图9(f),这两幅图分别指定了替换人脸的边界与人脸的信息。之后再根据图9(c)的边界信息与图9(e)和图9(f)为基础,逐行将图9(f)变形为图9(g),该图具有与原人脸相同的轮廓以及左右半脸分布。此时得到的图9(g)由于来自另外一幅图片之中,存在光场不同,直接拼接会造成明显的拼接痕迹。

此处通过计算图9(a)(g)中人脸得颜色分布情况,在RGB 3个颜色通道上,将图9(g)归正到与图9(a)的颜色通道相似,即颜色直方图分布相似。该方法在面对正面光原的照片处理效果良好,且计算速度快。这一步操作是让图9(g)与原图具有相似的颜色分布,之后进行的泊松融合是为了使拼接处的融合效果逼真自然。

此处需要对边界轮廓进行单独处理,首先通过对拼接处的边界进行检测,然后使用泊松图像融合原理处理边界轮廓,对前景替换人脸与背景原图像完成自然的纹理过渡,将目标人脸与原图像无缝融

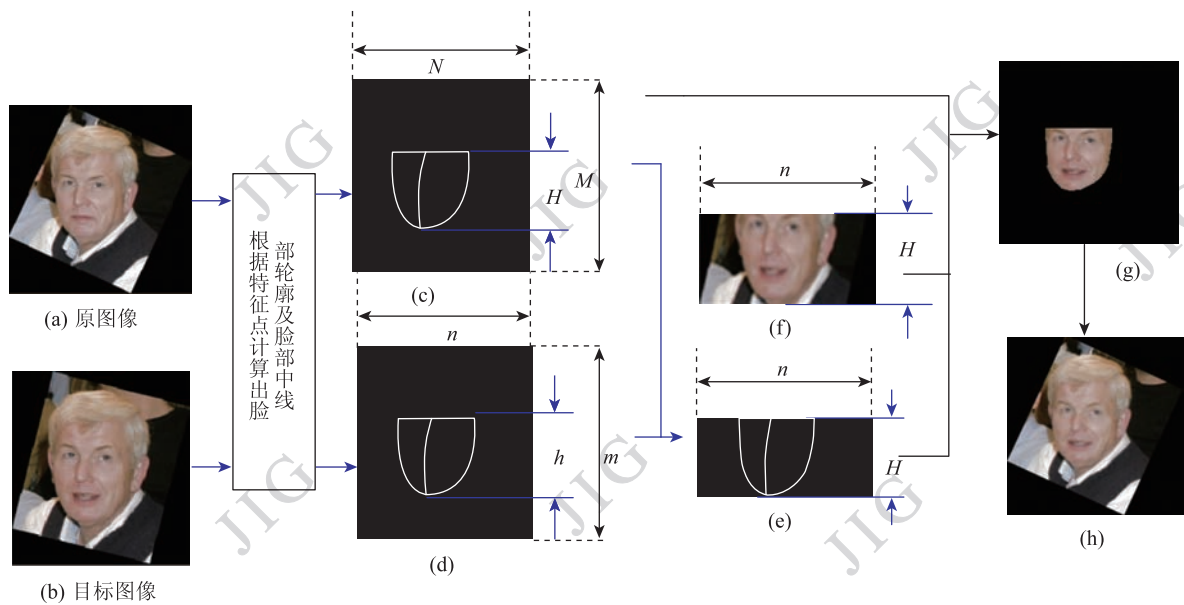


图9 扫描线变形传输示意图

Fig. 9 The illustration of scanning line deformation transfer

合,使得合成的边界显得自然。

上述计算过程简单,利用人脸的轮廓做约束,逐行扫描变形生成最佳覆盖人脸,可以不受目标人脸的位置、姿态的影响,同时可以取得较为满意的结果,具体实验结果将在下节详细介绍、分析。

2.2 基于特征点变形的表情传输

当目标人脸与原人脸的身份信息不一致时,只能通过将目标人脸的作为约束条件对原人脸进行重映射的第2类编辑,本文算法采用了基于特征点变形的办法。基于特征点的人脸变形算法主要有两类:基于像素和基于网格。基于像素的变形方法通常采用高斯径向基函数作为映射函数进行变形,该方法控制简单,但具有很强的全局性,不易产生紧缺的局部变形效果,同时易使图像边界发生扭曲。基于网格变形,通常采用三角剖分,进行分段仿射变化求得。其计算速度快,在特征点较多时,剖分的三角形足够多,效果良好^[17-18]。

与文献[6,8]通过建立各种表情与中性脸之间的差分变化模型,再以中性脸为基础,生成新的指定表情人脸相比,本文算法无需中性脸,通过直接建立一个原人脸与目标人脸关键点传输模型,将目标人脸的表情传递到原人脸,不仅速度更快,而且可以通过简单的交互以及参数调节完成较大范围的表情传输。

利用人脸各个器官如面部、嘴部、眼睛等器官为

一封闭图形,在面部表情变化过程中,某些部分的特征点位置变化很小的情况,通过确定器官封闭图形的两个边界点,再通过将目标人脸其他特征点与这两个角点的位置关系传递到原图像中的特征点上,利用原人脸上的特征点变化关系以及参数调节,再进行分段仿射变化,生成接近目标人脸的表情替换人脸。

图10中的3个图分别为鼻子、眼部或嘴部,以及脸部轮廓的示意图,上面的标记为特征点的位置,通过分析发现,脸部的各个表情变化集中于眼部与嘴部的开合程度,以及脸部轮廓的下半部分,下面以嘴部为例介绍如何将目标人脸的特征点关系传递到原人脸中的。

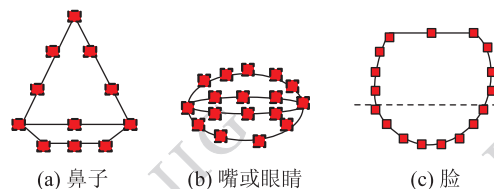


图10 器官标注示意图

Fig. 10 The illustration of organ marking

在1.2节中阐明了传输模型处理的是五官信息完整并且在水平与垂直方向的旋转角度不超过正负 10° 的人脸,在这种情况下,鼻子的高度在人脸区域中所占的比例相对固定,且在宽容度下的姿态变化情况下,比例的变化幅度很小,本文算法利用这一基

础,来作为建立原图像与目标图像中特征点相对位置关系传递的桥梁。

如图 11 所示,人脸嘴部在不同表情下嘴角的位置是不同的,将嘴角的坐标确定,可以为下一步其他位置的关键的位置确定打下基础。本文算法以原人脸嘴角的初始坐标为基础,计算嘴角两个特征点需要进行的位移变量 H_{dif} 、 W_{dif} ,使得嘴角坐标的相对位置关系与目标人脸的嘴角坐标位置关系相似,再通过目标人脸中嘴部的其他特征点与嘴角特征点构成的两条直线斜率去计算原图像中嘴部对应其他特征点的坐标值,通过与原坐标值进行比例混合之后,作为对应特征点新的坐标值,通过建立特征点新的坐标值与原来坐标值的三角剖分图,进行网格变形,变形生成新的表情图。

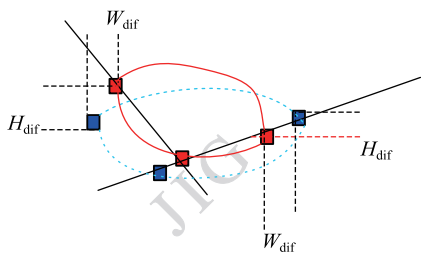
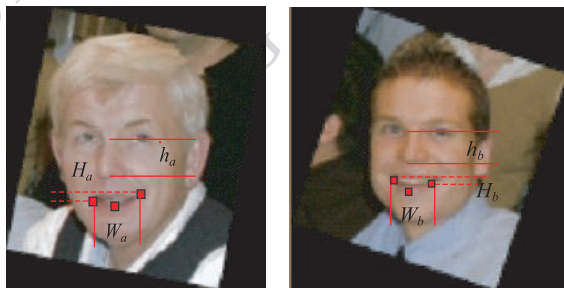


图 11 嘴角坐标计算示意图

Fig. 11 The illustration of mouth coordinate calculation

2.2.1 计算嘴角坐标

嘴角坐标的确定决定了以嘴为基础的封闭图形的位置以及形状特征,因此确定嘴角的坐标是最为重要的。如图 12(a) 设原图像的嘴角坐标 (X_1, Y_1) , (X_2, Y_2) , 图 12(b) 的嘴角坐标 (x_1, y_1) , (x_2, y_2) , 令图 12(a) 的鼻子高度为 h_a , 嘴的宽度 W_a , 嘴角相差的高度 H_a , 图 12(b) 的鼻子高度为 h_b , 嘴的宽度 W_b , 嘴角相差的高度 H_b 。



(a) 原人脸

(b) 目标人脸

图 12 脸部特征示意图

Fig. 12 The illustration of face feature

$$W_a = |X_1 - X_2|, H_a = |Y_1 - Y_2| \quad (4)$$

$$W_b = |x_1 - x_2|, H_b = |y_1 - y_2| \quad (5)$$

原人脸中嘴角新的坐标为 (X'_1, Y'_1) , (X'_2, Y'_2) 则新坐标为

$$W_{dif} = [\alpha \times W_a + (1 - \alpha) \times (h_a/h_b) \times W_b] / 2 \quad (6)$$

$$H_{dif} = [\alpha \times H_a + (1 - \alpha) \times (h_a/h_b) \times H_b] / 2 \quad (7)$$

$$X'_1 = (X_1 + X_2) / 2 - W_{dif} \quad (8)$$

$$X'_2 = (X_1 + X_2) / 2 + W_{dif} \quad (9)$$

$$Y'_1 = \frac{Y_1 + Y_2}{2} + \frac{Y_1 - Y_2}{|Y_1 - Y_2|} \times H_{dif} \quad (10)$$

$$Y'_2 = \frac{Y_1 + Y_2}{2} + \frac{Y_2 - Y_1}{|Y_1 - Y_2|} \times H_{dif} \quad (11)$$

式(6)和式(7)中 α 为系数,满足 $0 \leq \alpha \leq 1$, 该系数的大小决定嘴角坐标的变化程度。其数值越大表面越接近原来点的位置,该值的设置是为了约束嘴角坐标的变化程度。最终的结果是嘴角的相对位置关与目标图像的嘴角坐标相似。这两个嘴角点位置的确定非常重要,变化不宜过大,变化幅度过大容易造成嘴的大小位置不匹配的情况,实验中选取了 0.6。

2.2.2 计算其他关键点的新位置

对于原图像与目标图像中的所标注特征点,根据嘴部的其他位置的点与嘴角坐标的几何关系,可以求出对应于原图像中该对应特征点的新的坐标,通过与原坐标的混合,最终得到该特征点的新坐标,下面是具体计算过程:

设原人脸与目标人脸的某一个关键点 (X_i, Y_i) , (x_{ii}, y_{ii}) , 新位置坐标为 (X'_i, Y'_i) 那么可得该点与嘴角两个点之间的关系,如图 10 所示。

那么根据这两条线直线相交点即为计算出的位置 (X, Y) , 再与原来的位置进行加权计算就可以得出新的坐标 (X'_i, Y'_i) , 由图 13 可知,该点在两条线的交点处,因此满足

$$(X - X'_1) \times (y_{ii} - y_1) = (x_{ii} - x_1) \times (Y - Y'_1) \quad (12)$$

$$(X - X'_2) \times (y_{ii} - y_2) = (x_{ii} - x_2) \times (Y - Y'_2) \quad (13)$$

通过上述两个方程解出未知量 X, Y , 新的坐标为

$$X'_i = \lambda \times X_i + (1 - \lambda) \times X \quad (14)$$

$$Y'_i = \lambda \times Y_i + (1 - \lambda) \times Y \quad (15)$$

式(14)(15)中 λ 为调整参数,满足 $0 \leq \lambda \leq 1$, λ 在

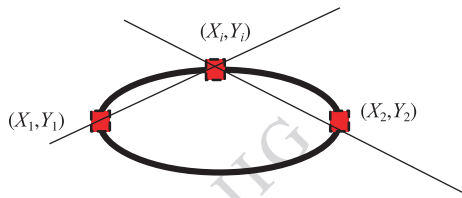


图 13 特征点位置计算示意图

Fig. 13 The illustration of the feature points position calculation

实验时可以通过交互改变。或者通过最优化约束求的,由图 10(b)中所示,嘴部分为 3 个部分,上嘴唇、嘴部、下嘴唇,分别用 S_1 、 S_2 、 S_3 表示, λ 的取值使得新的特征点围成的 3 个区域的新面积为 s_1 、 s_2 、 s_3 满足:

$$T(\lambda) = \left| \frac{s_1}{s_2} - \frac{S_1}{S_2} \right| + \left| \frac{s_2}{s_3} - \frac{S_2}{S_3} \right| + \left| \frac{s_3}{s_1} - \frac{S_3}{S_1} \right| \quad (16)$$

λ 的取值会影响牙齿区占嘴部区域的比例,实验时,通过交互改变 λ 的值,并实时计算出 T ,该值作为参数调整的依据,当交互调整参数并实时计算出 T ,在 $T_{\min}$ 时意味着嘴部区域的分配与目标图像最为接近,此时表情传输的效果最佳。对于眼睛部分的特征点计算,与嘴部计算过程类似。

2.2.3 分段仿射变化

如图 14(a) 根据特征点的位置以及 4 个顶点,用三角剖分将人脸部分分割为相互不重叠的网格区域,这样只需将每个对应三角网格区域的坐标进行映射就可以将指定的特征点变形逐块地传递过去,由于特征点的数量较多,特征点的位移相对有限,最终重映射的结果比较连续自然,具体过程如下:

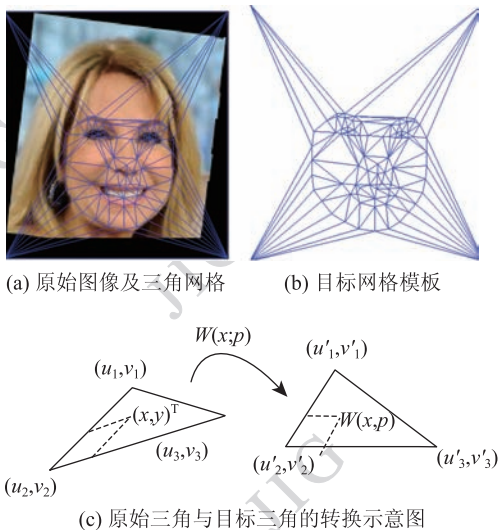


图 14 分段仿射变化示意图

Fig. 14 The illustration of PAW

图 14(a) 人脸图像被分割成互不重叠的网格区域 S , 网格节点为已知的人脸特征点。同样根据目标标定点可获得具有三角网格的目标模板 S' , 分段仿射变换完成 S 中的每个点到 S' 的空间坐标转换, 如图 14(c) 所示。

设原始图中的一个三角形,如图 14(c), 顶点坐标为 (u_1, v_1) , (u_2, v_2) , (u_3, v_3) , 目标图像上阈值对应的三角形区域的顶点为 (u'_1, v'_1) , (u'_2, v'_2) , (u'_3, v'_3) , 这两组点存在仿射变换关系为

$$[u' \ v' \ 1]^T = T[u \ v \ 1] \quad (17)$$

式中, $u = [u_1 \ u_2 \ u_3]$, $u' = [u'_1 \ u'_2 \ u'_3]$, $v = [v_1 \ v_2 \ v_3]$, $v' = [v'_1 \ v'_2 \ v'_3]$ 。

由此可求出仿射变换矩阵 T , 该三角区域内的所有点均适用于此仿射变换系数。

本文算法根据正面人脸表情变化时,鼻子的大小、形状几乎不发生变化这一事实,利用鼻子的尺寸为参照,提出了一个无需中性脸的面部表情传输模型,用于解决不同人物之间的表情传输,可以通过调节参数,来控制变形的效果。在面部表情传输时,原图像可能没有笑容,缺失牙齿部分信息,或者存在闭眼等情况,在经过约束变形时,这部分信息是无法填补的,其结果如图 15。

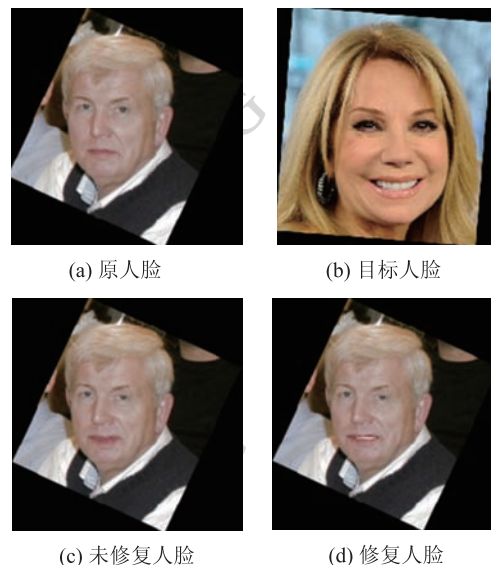


图 15 牙齿修复示意图

Fig. 15 The illustration of dental restoration

本文算法针对因为面部变形而可能缺失的面部信息,如牙齿、眼球等,通过特征点新位置计算出牙齿或者眼睛位置,通过对模板的仿射变化,对指定区域进行填补,在实验中取得了良好的传输效果。

3 实验结果与分析

针对在编辑过程中目标人脸的选择不同采取的不同传输模型,下面将分别对这两种传输模型的实验结果与相关算法进行比较分析,同时介绍本文算法的一些特色应用。

实验结果的运行环境为 Matlab 2010b, Windows 7 系统, CPU 为酷睿 i5, 内存为 8 GB。

3.1 本文算法与文献[1]对比

实验选用文献[1]提供的图像,这里将两者最终的编辑结果部分单独提取出,并进行比较。图 16 的来自文献[1]提供的 3 幅图中的同一个人的不同表情图。

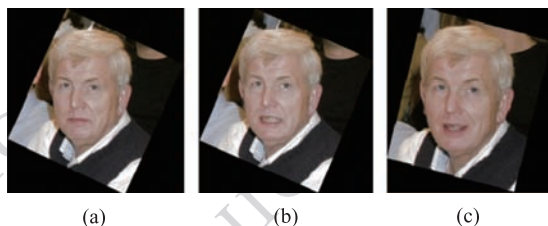


图 16 表情图

Fig. 16 The illustration of expressions

图 16(a) 的表情不佳,下面分别通过本文算法与文献[1]中算法将图 16(b) 和图 16(c) 的表情编辑到图 16(a) 上。照片编辑算法对比如图 17 所示。



(a) 本文算法结果



(b) 文献[1]结果

图 17 处理结果图

Fig. 17 The illustration of expressions

通过实验对比发现,文献[1]算法的交互无法准确地将人脸部分切分下来,拼接处也因为姿态不同而产生很明显的失真。本文算法的交互过程只有点击,因此结果更加精准,人脸的区域划分是通过特征点的分布直接计算出来的,因此切分也更加准确,同时算法通过人脸轮廓约束,可以将不同尺寸下的面部进行精准替换。从实验结果上也可以看出,本文算法的编辑结果更好。

采用梯度均方差 (GMSE) 和归一化内积 (NIP)^[19] 作为评价标准对所生成的结果图进行客观评价。

$$GMSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^{mn} \left\| \begin{bmatrix} \nabla q_x(i) \\ \nabla q_y(i) \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \nabla \hat{q}_x(i) \\ \nabla \hat{q}_y(i) \end{bmatrix} \right\|_2 \quad (18)$$

$$NIP = \frac{1}{mn} \frac{\sum_{i=1}^{mn} \{ [q(i)] - [\hat{q}(i)] \}}{\|q\|_2 \|\hat{q}\|_2} \quad (19)$$

式中, $q \in R^{m \times n}$ 为大小为 $m \times n$ 的目标人脸图像, $[q(i)]$ 和 $[\hat{q}(i)]$ 分别表示目标人脸图像和生成的人脸图像中的第 i 个像素值, $[\nabla q_x(i) \nabla q_y(i)]^T$ 为第 i 个像素点的梯度。

GMSE 测量图像的梯度差异,以小值为佳,而 NIP 度量图像间的灰度值之间的相关性,以大值为佳。取不同方法的平均测试评价数据^[19],如表 1 所示。

表 1 不同算法的客观评价对比

Table 1 Comparison of the objective evaluation of different algorithms

图像	评价标准	文献[1]方法	本文方法
图 16(b)	GMSE	5.832 1	5.212
	NIP	0.987	0.992
图 16(c)	GMSE	5.678 4	5.545
	NIP	0.998	0.996

从表 1 中可以看出由于本文采用了编辑约束变形,所以在 NIP 数据度量时,有些位置发生了微小的改变,造成数据比直接替换要低,可是由于兼顾了目标人脸原来的特征,几乎没有边界痕迹,因此造成的二阶误差较小在视觉上也更加平滑。

所以无论是从主观评价还是从客观数据评价,经本文算法所得的表情编辑结果明显优于文献[1]

方法,尤其是在主观评价上,本文算法所得的图像可以很好的贴合原图像的姿态,使得编辑效果较好。

3.2 本文算法与文献[6]和文献[8]比较

当预期的表情脸实际不存在时,通过算法用目标人脸的表情去约束,并最终生成符合预期的表情图。与上述传输方法不同的是,最终生成的表情图并不是真实的。实验采用文献[8]选用的 JAFFE 人脸库作为对比参照,该脸库人脸均为标准正面人脸。

图 18 为两个人不同表情的原图,在对比时,实验将第 2 排人脸的中性脸用第 1 排的表情脸信息约束重映射生成新的表情图并将结果与现实的表情作比较,最终的结果图 19,依次以中性脸为基础分别用别人的脸部表情信息作约束,生成新的表情的脸。

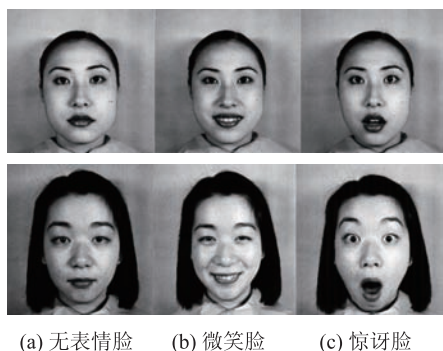


图 18 表情图

Fig. 18 The illustration of expressions

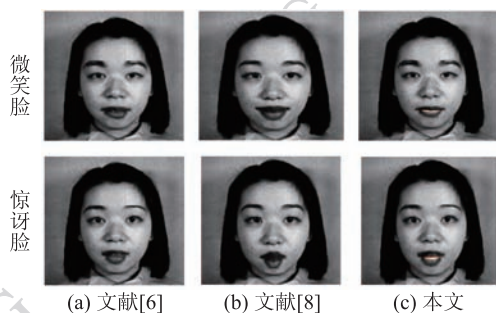


图 19 生成表情图

Fig. 19 The illustration of expressions generated

从直观结果上看,文献[8]与本文采用的算法效果较好,较为接近图 18 中自身的表情,文献[6]的算法变化不够明显,且没有加入下巴处的变化计算,而本文算法加入了牙齿修复功能,在缺失牙齿部分时,可以进行适当填补,如图 15,得到的微笑图和惊讶图本文效果要优于文献[8]。

这里比较计算出新的表情图与真实表情图的特征点相似程度,来判断最终效果的好坏,相似度计算

公式为

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n p_i}{n} \quad (20)$$

式中, $p_i = \begin{cases} 1 & |S_i - s_i| \leq t \\ 0 & |S_i - s_i| > t \end{cases}$, p_i, S_i, s_i, n, t 分别代表第 i 个特征点判断值,生成图像的特征点位置,目标图像生成点位置、数量、判断阈值。最终计算出匹配点的数量所占总的变化点数的比例。

表 2 不同算法的下的相似度

Table 2 Similarity of different algorithms /%

表情	文献[6]方法	文献[8]方法	本文方法
微笑	78.8	82.6	79.8
惊讶	68.7	81.5	80.6

客观数据上说明文献[8]的算法最好,可是该算法需要建立多种表情与无表情脸之间的关系,而且计算出的新表情图不能进行调整,在实际使用中,本文算法建立的传递模型可以不受目标图像的位置、年龄等因素的限制,只要选取一个合适的表情作为编辑目标,就可以进行,过程上较为简单,结果也较为接近真实。

3.3 本文算法的应用

根据上述算法用于解决照片中人脸面部编辑工作的叙述,可以针对不同的处理条件进行不同的处理,如图 20 依次为本文算法原图和两种不同处理的结果。

图 20(b) 和图 20(c) 分别为一种编辑处理结果,图 20(b) 是利用图 20(a) 中最右边的人的表情为参考,对其他两个人的表情进行编辑,从最终的结果来看,他们的嘴的形状较为类似,同时中间人物的牙齿部分因为有了修复过程,填补效果也较为自然,在没有直接替换人脸的情景下,这种处理方式效果自然,同时不需要手动指定特征点移动,操作简单。

图 20(c) 是本文算法的一个拓展应用,其结果是将原图最左边的人脸对中间以及最右边的人脸进行替换。该编辑结果无法保持身份信息的传递,不过对于某些专门需要隐去当事人身份的情况,算法可以根据人脸的位置,自动将指定人脸变形约束替换到指定人脸上,从最终的编辑效果上看,效果自然,同时可以匹配肤色。



图 20 编辑结果图

Fig. 20 The illustration of expressions editing

如图 21 所示,用黑框标记的人脸分别为照片中的某张人脸,图 21 (d) 是编辑的结果图,图 21 (a) (b) (c) 都是拍摄的原图,从最终的编辑结果上,此结果以图 21 (a) 为基础,根据黑框标示的那张人脸,

存在眼睛闭着,笑容不自然的情况,而在图 21 (c) 中,该人脸的笑容自然且眼睛睁开,是符合条件的替换目标,根据最终结果图的显示结果,生成的替换结果衔接自然与原有人脸轮廓完美匹配,效果良好。



图 21 编辑示意图

Fig. 21 The illustration of expressions editing

算法对所处理的人脸无需过多要求,对满足要求的人脸,可以进行匹配,对照片的大小限制也不大,不过人脸在水平与垂直方向的偏差角度不宜过

大,图 22 中分别展示了单张人脸不同角度的替换效果,数据来自于 ORL 人脸数据库。

从图 22 中可以看出在人脸偏转各个方向偏转

情况下的替换结果,本文算法加入的左右半脸控制可以在一定程度适应脸部在水平与垂直方向的角度变化,最终的编辑效果与原图的五官位置相当,未破坏图片其他部分。

通过实验对比,本文建立完备的表情传输模型,

解决了照片中部分人脸表情不佳的编辑,算法操作简单高效,取得的效果与当前的编辑算法接近,不过却大大减少了建模过程,同时可以产生一些有趣的编辑效果,如身份的替换。因此从编辑效果和编辑的范围,本文算法是要高于其他对比文献。



图22 不同角度编辑示意图

Fig. 22 The illustration of different angle expressions editing

4 结 论

针对文献[1]在处理集体照编辑上所遇到的问题,如无法完成姿态位置不同的人物表情编辑以及在没有最佳候选替换人脸时无法完成编辑,同时对原照片的有着过高的要求,通过对这些问题的不断了解深入,再结合目前的人脸编辑算法,提出了基于表情传输的人脸编辑算法。利用人脸面部特征点信息,进行交互式人脸编辑。交互过程通过鼠标点击人脸部分就可以直接选取目标,同时目标会在旁边的显示框里显示,以判断是否选择好了处理对象,算法通过不同的变形算法,使得计算出的替换目标可以完美匹配覆盖区域,实现了不同尺寸下的人脸替换、变形等操作,减少了对处理照片需要在相同尺寸以及中间参考图像的要求。与现有的人脸替换变形算法相比,不仅可以解决人物照片在拍摄时,面部表情编辑,利用改进的二次光照和泊松融合,可以完成绝大多数的人脸替换,替换的过程不需要过多的人工参与,对替换的目标要求也不高,同时可以取得较好的效果。今后工作计划通过建立宽容度内的人脸照

片与标准人脸模型的匹配约束,并引入交互调整,进而可以对人脸进行姿态信息与表情信息的同时编辑。

参考文献 (References)

- [1] Agarwala A, Dontcheva M. Interactive digital photomontage[J]. ACM Transactions on Graphics, 2004, 23(3): 292-300. [DOI: 10.1145/1186562.1015718]
- [2] Bitouk D, Kumar N, Dhillon S, et al. Face swapping: automatically replacing faces in photographs[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 15-19. [DOI: 10.1145/1399504.1360638]
- [3] Gao Y, Xu J Z, Wang C B, et al. Algorithm for human face fusion under constraints[J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(3): 502-506. [高岩, 许建中, 王长波, 等. 约束条件下的人脸五官替换算法[J]. 中国图象图形报, 2010, 15(3): 502-506.] [DOI: 10.11834/jig.20100322]
- [4] Li C X. Automatically replacing faces in images and videos[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011. [李传学. 图像/视频中自动人脸替换研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.]
- [5] Yu T L, Ran Y. A face based image processing device and method. Zhejiang: CN103593870A [P]. 2014-02-19. [俞天力, 冉阳. 一种基于人脸的图像处理装置及其方法. 浙江

- CN103593870A[P], 2014-02-19.]
- [6] Zhang Q, Liu Z, Guo B, et al. Geometry-driven photorealistic facial expression synthesis[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics, 2006, 12(1):48-60. [DOI: 10.1109/tvcg.2006.9]
- [7] Song L M, Wang H Q, Chen C. A laplacian differential approach for face detail transfer [J]. Journal of Computer-aided Design&Computer Graphics, 2008, 20(1):50-54. [宋明黎, 王慧琼, 陈纯. 基于拉普拉斯微分的脸部细节迁移[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2008, 20(1):50-54.]
- [8] Zhao N. Automatic tagging of facial feature points and expression generation[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2011 [赵宁. 人脸特征点自动标注及表情生成[D]. 北京: 北京理工大学, 2011.]
- [9] Vlasic D, Brand M, Pfister H, et al. Face transfer with multilinear models[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3):426-433. [DOI: 10.1145/1186822.1073209]
- [10] Yang L. A practical editorial system for facial customization and expression animation[J]. Journal of Image and Graphics, 2002, 7(4):325-331. [梅丽. 一个实用的人脸定制和表情动画编辑系统[J]. 中国图象图形学报, 2002, 7(4):325-331.] [DOI: 10.11834/jig.200204117]
- [11] Umenhoffer T, Tóth B. Facial animation retargeting framework using radial basis functions[C]//Proceedings of 6th Hungarian Conference on Computer Graphics and Geometry. New York: ACM, 2012: 195-204. [DOI: 10.1145/2019406.2019433]
- [12] Stoiber N, Segulier R, Breton G. Facial animation retargeting and control based on a human appearance space[J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2010, 21(1):39-54. [DOI: 10.1002/cav.331]
- [13] Zhou E, Fan H, Cao Z, et al. Extensive Facial Landmark Localization with Coarse-to-Fine Convolutional Network Cascade[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Computer Vision Workshops. Sydney, NSW: IEEE, 2013: 386-391. [DOI: 10.1109/ICCVW.2013.58]
- [14] Fan H, Cao Z, Jiang Y, et al. Learning deep face representation [DB/OL]. 2014-03-12 [2015-04-01]. <http://arxiv.org/abs/1403.2802v1>.
- [15] Chen J, Su G, He J, et al. Face image relighting using locally constrained global optimization [C]//Computer Vision-ECCV 2010. European, Berlin Heidelberg: Springer 2010: 44-57. [DOI:10.1007/978-3-642-15561-1_4]
- [16] Yu X C, Li Z M, Yu G B. An image deformation algorithm based on scan line[J]. Journal of Engineering Graphics, 2006, 3: 92-96. [于学春, 李宗民, 于广斌. 一种基于扫描线的图像变形算法[J]. 工程图学学报, 2006, 3: 92-96.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-0158.2006.03.016]
- [17] Yang J Z, Liu Z K, Yu N H, et al. An Image warping method based on control points and its applications[J]. Journal of Image and Graphics, 2001, 6(11):26-30. [杨金钟, 刘政凯, 俞能海, 等. 基于控制点的图象变形方法及其应用[J]. 中国图象图形学报, 2001, 6(11):26-30.] [DOI: 10.3969/j.issn.1006-8961.200111005]
- [18] Zhan Q, Li B B, Wei X P. Facial expression synthesis based on feature points. Liao Ning: CN103035022A[P]. 2013-04-10. [张强, 李蓓蓓, 魏小鹏. 基于特征点的人脸表情合成方法. 辽宁: CN103035022A[P]. 2013-04-10]
- [19] Chen Y, Zhang L Y, Yi X B. Bilinear regression based expression face neutralization preserving person-specific characters [J]. Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2014, 10:949-953. [陈莹, 张龙媛, 仪晓斌. 基于双线性回归的个体人脸表情图像归正方法[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 10:946-953.] [DOI: 10.3969/j.issn.1003-6059.2014.10.012]