

DOI: 10.13203/j.whugis20130152

文章编号: 1671-8860(2014)08-0992-06

一种真实感三维人脸交互式生成方法

谈国新¹ 孙传明¹

1. 华中师范大学国家文化产业研究中心, 湖北 武汉, 430079

摘要: 针对传统三维人脸模型构建复杂、效率低下等不足, 提出了一种基于单张照片的真实感人脸快速生成方法。首先, 构建标准化的人脸模型库, 交互式选取输入照片的面部特征点, 并基于脸型特征, 匹配最佳模型; 其次, 通过三角形变形和双线性插值的方法实现照片到三维模型的纹理映射, 并引入 Alpha 图实现人脸覆盖纹理到模型中性纹理的融合过渡; 最后, 采用网格调节方法从整体到细节分层次调整模型以达到生成真实感三维人脸的目的。实验结果证明, 该方法对用户友好, 所需特征点较少, 可实时生成高质量的真实感模型。

关键词: 三维人脸生成; 特征点标定; 纹理映射; 肤色融合

中图法分类号:P237.3

文献标志码:A

构造具有真实感人脸的三维虚拟角色对增强用户的兴趣和参与主动性具有积极的作用。但由于人脸结构的复杂性和多变性, 针对真实感人脸的三维重建技术研究一直是计算机图形学领域的热点和难点。现有的人脸快速生成方法主要有三种。第一种是通过三维扫描仪等设备获取真实人脸的三维数据, 以采集序列图像等方式重建模型。Yan 等人^[1]通过三维扫描仪以及人脸建模算法构建高精度的人脸模型。Bickel 等人^[2]通过三维扫描获得人脸模型, 并采用脸上的标记点插值变形获得夸张的人脸变形。这种途径生成的模型逼真度高, 但依赖大量的点云数据, 技术要求较高, 价格昂贵, 在采集时还需要演员现场参与。

第二种方法是以至少两张图像作为输入, 通过应用人眼视觉的相关理论和算法实现人脸模型的重建。Beeler 等人^[3]通过图像分析法和窗口立体匹配等方式, 从多幅输入图像中重建真实感人脸。董洪伟^[4]提出了一种有效的基于图像一致性约束的人脸变形算法, 可自动化对三维人脸模型进行变形。这些方法重建效果较好, 但需两幅以上的图像, 有时还要手工标定较多的特征点, 输入条件较为复杂。

第三种方法是使用单幅图像, 通过人脸模型与人脸特征点匹配, 达到重建三维人脸的效果。Romdhani 等人^[5]提出基于 Multi-Features Fitting

的算法, 实现人脸重建和纹理生成, 获得了较高的人脸重建精度。Jiang 等人^[6]通过改进形变模型算法, 实现单张照片的纹理映射和匹配。袁理等^[7]提出的方法能够对非可控条件下获取的单幅图像进行有效、快速地三维重建。这些方法输入数据更少, 但是生成的效果不如前两种方法精确。

第一、二种方法存在设备昂贵, 实现过程复杂, 实时性不足等问题, 不能完全满足在虚拟场景中实时交互的需求。对于虚拟场景中的体验用户来说, 虚拟化身只需“相似”, 而不必“完全一样”, 即可达到真实感的体验。因此, 研究真实感程度较好, 成本低廉, 生成过程快速简单的人脸模型生成技术具有重要的意义。而 Romdhani 等人^[5]的方法虽保证了人脸重建的有效性, 但算法较复杂, 运算时间较长。Jiang 等人^[6]的方法虽然优化了建模过程, 但需要较多的特征点, 而且特征点提取的准确度直接影响到纹理映射的效果。基于此, 本文提出了一种只需一张正面照片和较少的特征点, 即可由用户参与自主完成的真实感人脸创建方法。

1 交互式生成方法步骤

真实感三维人脸交互式生成方法首先要针对亚洲人脸特点, 构建人脸模型库; 然后将二维正面照片与人脸模型匹配, 利用纹理映射与肤色融合

收稿日期: 2013-05-20

项目来源: 国家科技支撑计划资助项目(2012BAH83F00); 国家社科基金重点资助项目(13AZD008)。

第一作者: 谈国新, 教授, 主要研究方向为数字媒体技术、文化遗产数字化技术。E-mail: gxtan@mail.ccnu.edu.cn

通讯作者: 孙传明, 博士, 讲师。E-mail: cms@mail.ccnu.edu.cn

算法,通过模型调节器的细微调节,生成真实感三维模型。

1.1 模型库构建

现在已有一些标准化的三维人脸模型库,比如UND、BU-3DFE、BJUT等。这些模型库在人脸生成和人脸识别等领域得到了广泛的应用。不同的三维模型库对种族、年龄、性别、光照等均有不同的标准,本文方法主要针对亚洲人种,有针对性地建立三维人脸库。

常用的亚洲人正面脸型分类有多种标准,比如形态法、字形法、亚洲人法等。为了更好地匹配照片与模型的脸型,模型库根据特征的明显程度和常用程度将脸型分为椭圆形、倒三角形、长形、方形和圆形5种。人脸中性模型的生成参考瑞典林雪平大学的图像研究组织ICG开发的一个中性人脸线框模型CANDIDE-3^[8],它的模型简单且无偿对外开放使用,不过该模型只适用于脸部。本文参考了CANDIDE-3中性人脸模型,特别制作了适合中国人脸型特征的头部中性模型。模型库建设完成后,需要对模型进行预处理,包括修补漏洞,绑定中性肤色纹理,归一化大小,标定特征点等。

1.2 生成步骤

三维人脸主要从模型的面部特征和纹理两个方面体现其真实感,用户参与纹理的指定与模型的调整。具体方法流程如图1所示,主要细分为以下5个步骤。

1) 特征点标定:获取正面二维人脸照片,对双眼、鼻子、嘴等7个部分选取13个特征点进行标记,确定整个面部五官的大致位置。

2) 模型匹配:比较照片与模型之间的特征点距离,在模型库中匹配相似度最大的模型。

3) 纹理映射:根据人脸的纹理贴图模拟面部真实颜色,实现覆盖纹理到中性纹理的映射。中性纹理是模型默认的纹理,覆盖纹理为人脸照片。通过在两层纹理中13个特征点及其周围区域的映射,向匹配模型加入目标脸的纹理特征。

4) 肤色融合:使用一张Alpha图,在人脸融合的边界部位形成从覆盖纹理到中性纹理的平滑过渡。同时,利用Alpha图对眉毛、鼻梁等细节部位进行细微调整。

5) 模型调节:通过向量差值的方法对匹配模型的嘴巴、眼睛、脸型等五官大小及位置等特性进行调节,生成符合其面部特征的个性化模型。

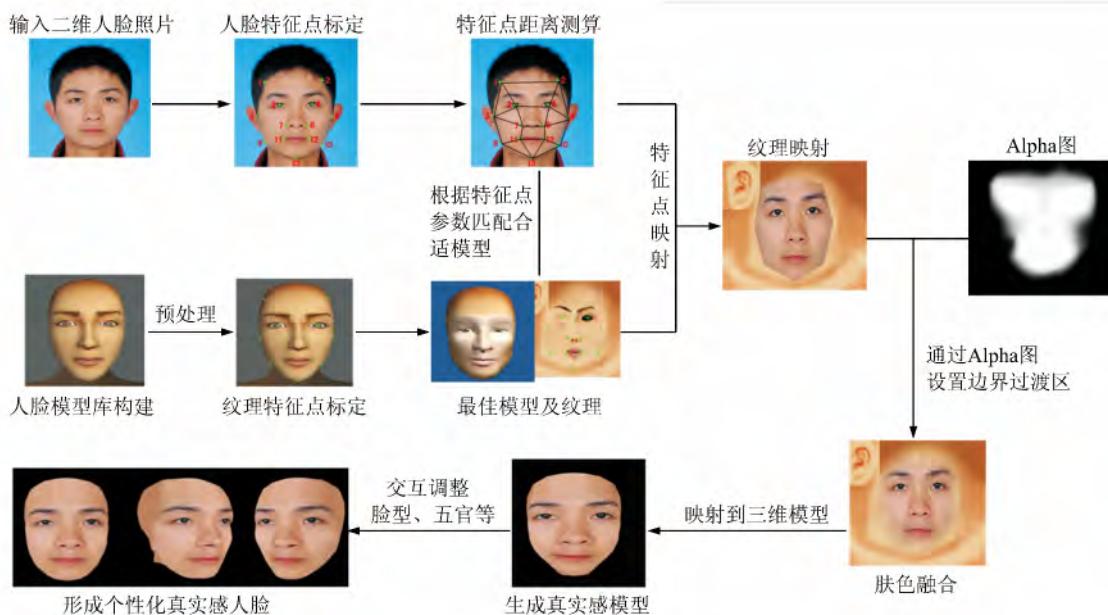


图1 真实感人脸构建流程
Fig. 1 Generation Process of 3D Face

1.3 模型调节器设计

模型调节器的作用是对人脸五官的布局进行局部调整,以达到更加接近真实人脸的目的。常用的三维建模软件,如Maya、3DS Max等,均提供blend shapes(或称morph)的功能,使模型在

两个或多个状态间变换,形成不同的五官布局或者人脸表情。本文借鉴这种技术思想,通过构造一个可用于调整人脸五官细微变化的模型调节器,生成个性化的逼真脸。

如果把人脸网格中的顶点 $\mathbf{V}_i = (x, y, z)^T$ 看

成是向量组 $\mathbf{H}_0 = (\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2, \mathbf{V}_3, \dots, \mathbf{V}_n)$, n 表示顶点的数量, 对眼睛进行变换后(如改变大小), 一些点的位置发生改变, 形成向量组 $\mathbf{H}_1 = (\mathbf{V}'_1, \mathbf{V}'_2, \mathbf{V}'_3, \dots, \mathbf{V}'_n)$, 对这种变换增加一个权值 W 。那么, 从 \mathbf{H}_0 到 \mathbf{H}_1 中间所有的变换状态 \mathbf{H}_x 都能通过线性插值计算出来:

$$\mathbf{H}_x = \mathbf{H}_0 + W \cdot (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_0) \quad (1)$$

一种变换难以满足人脸模型的需求, 需要根据人脸的特征, 选择多种变换, 为每个变换赋予一个权重值 W , 则 m 个变换的混合公式为:

$$\mathbf{H}_x = \mathbf{H}_0 + \sum_{i=1}^m W_i \cdot (\mathbf{H}_i - \mathbf{H}_0) \quad (2)$$

式中, m 的数量以实际应用中需要的数量为准。在实验中, 定义了 23 种不同变换的网格调节器, 包括眼睛高度、眼睛距离、眼睛大小、眉毛高度、眉毛深度、鼻子大小、鼻子深度、鼻子高度、鼻梁深度、鼻梁宽度、鼻孔宽度、嘴巴高度、嘴巴厚度、嘴巴宽度、嘴唇覆盖、颧骨深度、颧骨宽度、颧骨高度、面颊宽度、下巴高度、下巴深度、下巴宽度、下颌宽度等。调节器通过控制权重来实现网格变形。

2 真实感人脸生成关键技术

真实感人脸生成的关键技术主要有二维人脸照片与三维模型的匹配技术, 纹理映射技术和肤色融合技术等。

2.1 特征点标定及匹配

获取二维人脸照片后, 需要对照片中的关键部位进行特征点标定, 以匹配最佳人脸模型。MPEG4 标准^[9]在中性人脸上规定了 84 个特征点; 廖海斌等^[10]采用 118 个特征点重建出较真实的人脸。为减少人工干预的复杂度, 参考 MPEG4 标准, 针对人脸模型匹配和纹理映射的需要, 提出在输入照片和人脸模型上选取 13 个关键部位的特征点作为匹配和映射的标记, 如图 2 所示。根据三维人脸识别的研究成果, 这些关键特征点之间的相互关系已经可以大致确定人脸五官的位置及脸型, 从而匹配出最适合的模型。在实验部分通过与不同特征点数量的匹配方法进行比较, 验证了 13 个特征点的有效性。

模型匹配的方法如下:首先, 对照片进行归一化处理, 计算出主要特征点之间的距离和比例关系;其次, 根据特征点距离和比例关系, 确定脸型的大致分类;最后, 在相应脸型的模型库中匹配模型和照片相应特征点之间的欧几里得距离, 采用



图 2 特征点位置

Fig. 2 The Position of Feature Point

式(3)寻找距离最近的三维模型:

$$E = \sum_{i=1}^n (D_i - D'_i)^2 \cdot \lambda_i \quad (3)$$

式中, D_i 为照片中某特征点间的距离; D'_i 为三维模型中相应特征点间的距离; λ_i 为每一特征点距离的权重值, 根据其贡献程度大小和经验公式确定; n 为所比较的距离数量。

2.2 纹理映射

国内外研究人员已提出了多种纹理映射方法。Kraevoy 等人^[11]将参数化后的模型和相应的纹理按照特征点的对应关系进行三角剖分, 建立相应的映射关系, 该算法需要建立在大量迭代的基础上, 复杂度较高。本文借鉴该方法, 引入三角形变形、双线性差值等方法实现覆盖纹理到中性纹理之间的特征点映射。

假设中性纹理和覆盖纹理分别标记的特征点位置分别形成 \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 两个二维点集。由于手工标注的差异, \mathbf{V}_1 、 \mathbf{V}_2 中相应的点不会十分精确地处于同一位置, 需要一种映射方法使其自然融合。取 $\mathbf{P}_1 \in \mathbf{V}_1$, $\mathbf{P}_2 \in \mathbf{V}_2$, 将 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 扩展到三维向量, 令 $\mathbf{P}_1 = (X_1, Y_1, 1)$, $\mathbf{P}_2 = (X_2, Y_2, 1)$, 并假设有矩阵 \mathbf{M} , 可得:

$$\mathbf{M} = \mathbf{P}_1 \cdot \mathbf{P}_2^{-1} \quad (4)$$

得到每个点的变换矩阵后, 将特征点的变换应用到特征点周围的像素中。该流程使用常见的三角形变形方式将覆盖纹理应用到模型纹理。如图 3 所示, 将特征点连接, 形成覆盖面部的网格, 此时的网格中兼有三角形和四边形, 通过拆分, 将多边形均简化为三角形。处于三角形中间的像素同时受到三角形三个顶点的影响。

假设三角形的三个顶点为 \mathbf{P}_1 、 \mathbf{P}_2 、 \mathbf{P}_3 , 将它们作为矩阵的三个列, 形成 3×3 矩阵 $(\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3)$ 。假设变换后的三角形是 $(\mathbf{P}'_1, \mathbf{P}'_2, \mathbf{P}'_3)$, 则:

$$\mathbf{M} \cdot (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3) = (\mathbf{P}'_1, \mathbf{P}'_2, \mathbf{P}'_3) \quad (5)$$

$$\mathbf{M} = (\mathbf{P}'_1, \mathbf{P}'_2, \mathbf{P}'_3) \cdot (\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2, \mathbf{P}_3)^{-1} \quad (6)$$

对三角形中间的某点 i , 使用 $\mathbf{M} \cdot \mathbf{P}_i$ 就可得到 \mathbf{P}'_i , 以此确定三角形内所有点映射后的坐标。对于未映射的点, 坐标值全部为整数, 但映射之后的坐标

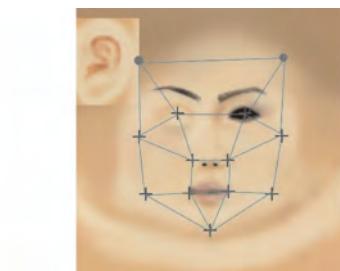


图3 特征点连接

Fig. 3 Connect the Feature Points

可能不为整数,导致无法与图上的像素一一对应。此时,利用双线性插值采样方法对图上的颜色进行采样,可取得较好的效果。

2.3 肤色融合

纹理映射之后,由于中性纹理和覆盖纹理之间的颜色差异,需要一定的融合算法消除视觉上的差异,使肤色融合的效果更加自然。Gal 等^[12]通过镶嵌的方法实现模型表面颜色的自然过渡,但容易在纹理表面形成少量细缝。

在现有的图像处理软件和投影拼接融合软件中,常用 Alpha Transition 方法实现重叠图像的平滑过渡,该方法不仅融合速度快,而且效果较好。借鉴这种思想,本文根据人脸模型特征和纹理图分布,制作标准的 Alpha 图,通过设置边缘的过渡区来消除边界突变。采用 Alpha 图的作用有两个:首先,产生平滑过渡的纹理边界;其次,对面部其他部位细节,如眉毛、鼻梁等部分也进行了渐变调整,以降低覆盖纹理对中性纹理的影响。图 4 为手绘的 10 张 Alpha 图,图 4 中白色部分的颜色取自覆盖纹理的颜色,黑色部分取自中性纹理的颜色。介于白色和黑色中间的部分由 Alpha 图上的像素为权进行线性插值得到,通过覆盖测试,编号为 10 的 Alpha 图可以实现最优的融合效果。



图4 Alpha 图

Fig. 4 Alpha Figures

在实际融合过程中,模型中性纹理、Alpha 图、覆盖纹理将处理成一样的大小。Alpha 图中的像素作为混合的插值权重参与混合,最终形成

自然融合的纹理。三张图的混合公式为:

$$C(x, y) = C_{\text{base}}(x, y) \cdot (255 - C_{\text{Alpha}}(x, y)) + \\ C_{\text{overlay}}(x, y) \cdot C_{\text{Alpha}}(x, y), \\ 0 \leqslant C_{\text{Alpha}}(x, y) \leqslant 255 \quad (7)$$

式中, $C_{\text{base}}(x, y)$ 、 $C_{\text{Alpha}}(x, y)$ 、 $C_{\text{overlay}}(x, y)$ 分别表示中性纹理、Alpha 图、覆盖纹理在 (x, y) 坐标处的颜色值。

3 真实感三维人脸生成实验

在 Visual Studio 2010 平台上采用 C++ 语言开发实验系统,同时使用 Unity3D 引擎。实验电脑配置为 CPU 3.0 GHz, Pentium 4。本实验将从模型匹配、时间性能、人脸生成三个方面验证方法有效性。

3.1 人脸模型匹配准确度评估

实验使用 MH 三维扫描仪采集 30 个不同脸型的三维人脸,并采用 BJUT-3D 人脸库^[13],建立包含 530 个三维人脸的模型库。在特征标定的过程中,正面人脸照片参照模型纹理图的位置标定 13 个特征点,在实际操作过程中,每个特征点的具体位置会有相应提示。采用本文算法,对标定好的照片进行特征点坐标提取,计算特征点距离和比例关系,并在相应脸型库中匹配距离最近的模型。实验中,选取 30 个扫描模型的正面人脸照片作为测试集,使用基于不同特征点数量的匹配方法,依次在模型库中匹配距离最近的模型。经过统计,不同方法的匹配准确率如表 1 所示。

表1 匹配准确率评估

Tab. 1 Accuracy Evaluation of Model Matching

| 模型匹配方法 | 特征点数 | 匹配准确率/% |
|--------------------------------|------|---------|
| 基于特征点曲率值的方法 ^[14] | 8 | 76.7 |
| 特征点距离方法 ^[15] | 11 | 83.3 |
| 本文方法 | 13 | 90 |
| 融合距离矩阵与几何特征的方法 ^[16] | 22 | 93.3 |

从实验结果中可以看出,随着特征点数量的增加,匹配准确度也有所提高,但是运算复杂度也相应增加。当选取 13 个特征点时,准确率为 90%,因此,可在减少运算复杂度的同时保证较高的匹配准确率。实验选取的基于融合距离矩阵与几何特征的方法^[16]取得了 93.3% 的准确率,略高于本文算法,但是该方法需要选取较多的特征点,并构造欧式距离矩阵,以及加权融合几何特征,具有一定的算法复杂度。

3.2 人脸生成时间性能评估

本方法通过选取较少的特征点,降低了算法

的复杂度,减少了计算时间。实验对30个人脸生成时间在Pentium 4系列CPU环境下进行统计,模型匹配平均时间为0.154 s,纹理映射融合平均时间为1.676 s,总平均时间为1.83 s。表2对几种经典方法的人脸重建平均时间进行了比较。本文通过使用三角形变形方法和引入Alpha图,在减少特征点的情况下,仍能快速生成真实感人脸,可满足实际应用的需求。

表2 时间性能评估

Tab. 2 Evaluation of Generation Time

| 人脸生成方法 | CPU 配置 | 平均时间/s |
|--|---------|--------|
| Multi-features Fitting 方法 ^[5] | 3.0 GHz | 70 |
| 2D-3D集成的重建方法 ^[6] | 1.3 GHz | <5 |
| 特征动态选择方法 ^[7] | 3.0 GHz | 3.2 |
| 本文方法 | 3.0 GHz | 1.83 |

3.3 真实感人脸生成

纹理映射完成后,实验需要对人脸五官模型进行局部调节,通过细微修正,使生成的人脸更加符合真人面部轮廓。在实验系统中,权重范围量化为[−100,+100],用户通过滑动杆调节,以达到最优效果。图5为实验选取的三组人脸的生成效果,从上至下,第一组为男性方形人脸生成效果;第二组为女性圆形人脸生成效果;第三组为男性长形人脸生成效果。实验表明,采用本方法生成的人脸模型,交互方式简单,重建速度快;实验系统鲁棒性良好,人脸边缘融合过渡自然,在色差过大或纹理重叠范围较小的情况下仍能实现平滑过渡。

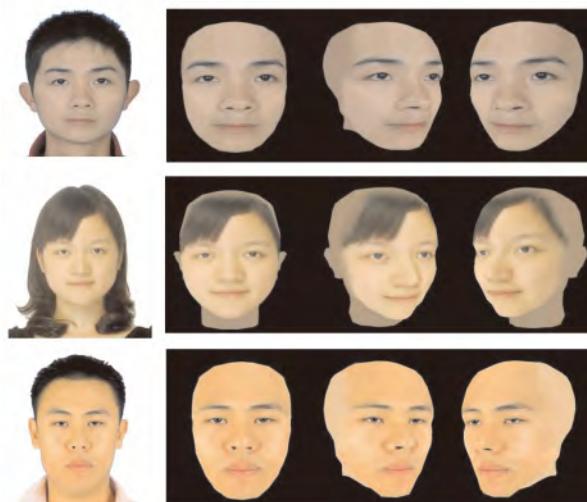


图5 人脸生成效果

Fig. 5 The Final Effect of 3D Face

4 结语

本文重点研究了一种简易、快速的人脸生成方法。该方法将用户引入到人脸的创建过程,通过交互式选取少量的特征点,匹配适宜的人脸模型,实现从覆盖纹理到中性纹理的映射,以及面部边界的肤色融合,最后通过从整体到细节分层次的模型调整,生成具有个性化的人脸模型。研究成果可在三维校园、数字旅游景区、虚拟更衣室等领域应用,作为提高用户感官体验的手段之一。未来将在人脸特征点智能标定、重建精度优化、重建效果定量评估等方面开展重点研究。

致谢:感谢北京工业大学多媒体技术与图形学实验室提供的BJUT-3D三维人脸库。

参 考 文 献

- [1] Yan Luximon, Roger B, Lorraine J. The 3D Chinese Head and Face Modeling[J]. *Computer-aided Design*, 2012, 44(2):40-47
- [2] Bickel B, Botsch M, Angst R, et al. Multi-scale Capture of Facial Geometry and Motion [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3):30.1-30.10
- [3] Beeler T, Bickel B, Beardsley P, et al. High-quality Single-shot Capture of Facial Geometry[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(3):40.1-40.9
- [4] Dong Hongwei. Mesh Deformation Based 3D Facial Modeling From Images[J]. *Journal of Computer-aided Design & Computer Graphics*, 2012, 24(7):932-939(董洪伟. 基于网格变形的从图像重建三维人脸[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(7):932-939)
- [5] Romdhani S, Vetter T. Estimating 3D Shape and Texture Using Pixel Intensity, Edges, Specular Highlights, Texture Constraints and a Prior[J]. *IEEE Computer Society*, 2005, 2:986-993
- [6] Jiang Dalong, Hu Yuxiao, Yan Shuicheng, et al. Efficient 3D Reconstruction for Face Recognition [J]. *Pattern Recognition*, 2005, 38(6):787-798
- [7] Yuan Li, Chen Qinghu, Liao Haibin, et al. 3D Face Reconstruction for Single Visual Images[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(4):487-491(袁理, 陈庆虎, 廖海斌, 等. 单视影像下的人脸快速三维重建[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(4):487-491)
- [8] Jörgen A. Candide-3-an Updated Parameterised Face [R]. Sweden: Image Coding Group Dept. of Electrical Engineering, 2001

- [9] Jörn Ostermann. Animation of Synthetic Faces in MPEG-4[C]. Computer Animation, Pennsy Lvania, USA, 1998
- [10] Liao Haibin, Chen Qinghu, Yan Yuchen, et al. 3D Face Reconstruction of Morphable Model and Its Improvement[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2011, 36(2): 176-180
(廖海斌, 陈庆虎, 鄢煜尘, 等. 面向形变模型的三维人脸建模研究及其改进[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2011, 36(2):176-180)
- [11] Kraevoy V, Sheffer A, Gostman C, et al. Constructing Constrained Texture Maps[C]. ACM SIGGRAPH, New York, 2003
- [12] Gal R, Wexler Y, Ofek E, et al. Seamless Montage for Texturing Models[J]. *Computer Graphics Forum*, 2011, 29(2): 479-486
- [13] BJUT-3D FaceDatabase[OL]. http://www.bjut.edu.cn/sci/multimedia/mul-lab/3dface/face_data-base.htm, 2012
- [14] Lee Y, Song H, Yang U, et al. Local Feature-based 3D Face Recognition[C]. The 5th International Conference on Audio and Video-based Biometric Person Authentication, New York, 2005
- [15] Soyle H, Demirel H. Facial Expression Recognition Using 3D Facial Feature Distances[C]. International Conference on Image Analysis and Recognition, Canada, 2007
- [16] Mo Jianwen, Li Yan, Shon Zhaoyu, et al. Improved 3D Face Recognition Method[J]. *Computer Engineering and Design*, 2012, 33(11): 4 328-4 331(莫建文, 李雁, 首照宇, 等. 改进的三维人脸识别方法[J]. 计算机工程与设计, 2012, 33(11): 4 328-4 331)

An Interactive Approach to Generate Realistic 3D Face

TAN Guoxin¹ SUN Chuanming¹

¹ National Research Center of Cultural Industries, Central China Normal University, Wuhan 430079, China

Abstract: As traditional 3D face construction is too much complex and has low efficiency, therefore, an interactive approach is proposed to generate realistic 3D faces based on one photo. Firstly, we constructed a standardized face model database, and interactively select the facial feature points from an input picture, and then, the best-matched face model is selected based on the features. Secondly, a triangular deformation approach and bilinear interpolation are used to achieve texture mapping from a photo to 3D model. The Alpha Fig was introduced to realize a fusion transition from the photo texture to the neutral texture. At last, a model regulator to regulate the model hierarchically was designed to generate realistic 3D faces. Experimental results show that this approach is user-friendly, and can generate a high-quality realistic character in real time with less characteristic points.

Key words: 3D face generation; Feature points definition; texture mapping; skin color fusion

First author: TAN Guoxin, professor, PhD supervisor. His current research interests include digital media technology, digital technology of cultural heritage. E-mail: gxtan@mail.ccnu.edu.cn

Corresponding author: SUN Chuanming, PhD, lecturer. E-mail: cms@mail.ccnu.edu.cn

Foundation support: The National Key Project of Scientific and Technical Supporting Programs of China, No. 2012BAH83F00; the Key Project of National Fund in Social Science, No. 13AZD008.