

中图法分类号: TP391.41 文献标志码: A 文章编号: 1006-8961(2011)06-1102-10

论文索引信息: 刘凯, 孙正兴, 张尧焯, 宋沫飞, 章菲倩, 张岩. 采用草绘轮廓的3维人脸建模方法[J]. 中国图象图形学报, 2011, 16(6): 1102-1111

采用草绘轮廓的3维人脸建模方法

刘凯, 孙正兴, 张尧焯, 宋沫飞, 章菲倩, 张岩

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室, 南京 210093)

(南京大学计算机科学与技术系, 南京 210093)

摘要: 为方便用户进行3维人脸形状设计, 提出一种基于手绘轮廓的3维人脸建模方法。该方法的主要特点在于, 一方面, 引用姿态估计技术对人脸草图进行解析, 将用户绘制的侧视人脸草图转换成对应的正视人脸草图, 可支持用户选择多个视角绘制人脸; 另一方面, 采用多层映射机制建立人脸草图特征点与3维人脸特征点之间的一一对应关系, 由对应特征点之间的形变量来控制生成3维人脸, 保证草图笔画的几何形状信息能有效映射到3维模型中。实验结果表明, 文中方法能快速生成形状新颖的特定人脸, 可有效支持用户进行3维人脸形状的手绘建模。

关键词: 手绘草图交互; 3维人脸建模; 姿态估计; 特征点抽取; 网格形变

Method of 3D face modeling from freehand portrait sketch

Liu Kai, Sun Zhengxing, Zhang Yaoye, Song Mofei, Zhang Feiqian, Zhang Yan

(State Key Lab for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

(Department of Computer Science and Technology, Nanjing University, Nanjing 210093 China)

Abstract: To facilitate designers to design 3D face shapes conveniently, this paper presents a method of 3D face modeling using freehand portrait sketch. Our method has two characteristics: Firstly, pose estimation is introduced to face sketch analysis. It infers the corresponding front-view sketch from the side-view face sketch, users then can draw the free-form portrait sketch from their selected view. Secondly, multi-layer mapping is adopted to establish one-to-one correspondence between the sketch feature points and 3D face feature points, and the displacements between the corresponding feature points are calculated to generate the specified 3D face models. It guarantees that the geometrical characteristics of the strokes can be retained in the final 3D face model. The experiment results prove that the proposed method can generate novel 3D face models quickly and support the process of sketch-based face modeling efficiently.

Keywords: sketch-based interface; 3D face modeling; pose estimation; feature point extraction; mesh deformation

0 引言

人脸是情感表达和身份识别的最重要载体。自

Parke^[1]在1972年开创计算机3维人脸建模和动画研究以来, 个性化人脸建模一直都是计算机图形学中的热门研究课题。3维人脸建模过程主要包括建立几何形状模型, 纹理合成和动画驱动等步骤, 其中

收稿日期: 2010-11-01; 修回日期: 2011-01-11

基金项目: 国家高科技研究发展(863)计划项目(2007AA01Z334); 国家自然科学基金项目(69903006, 60373065, 60721002); 教育部新世纪优秀人才资助计划项目(NCET-04-0460); 江苏省自然科学基金项目(BK2009230, BK2010375); 江苏省科技支撑计划项目(BE2010072)。

第一作者简介: 刘凯(1985—), 男, 南京大学计算机科学与技术系博士研究生, 主要研究领域为计算机图形学。

E-mail: liukai@graphics.nju.edu.cn。

通讯作者: 孙正兴, E-mail: szx@nju.edu.cn。

建立人脸几何形状模型最为关键。现有人脸形状建模领域研究大部分是采用诸如人脸图像、视频及3维扫描数据等真实人脸数据进行3维重建^[2],不能直接用于设计形状新颖的3维人脸模型。现行大多数软件建模工具(如 Maya, Poser 等)虽可支持用户设计特定形状的3维人脸,但都是以大量预定义对象和指令按钮的 WIMP 方式为用户提供构思表达,其结构化输入的方式严重束缚思路快速流畅地呈现,难以捕捉用户脑海里那些稍纵即逝的灵感创意。由于模拟传统纸笔模式的草绘交互方式能为用户提供很自然的图形输入方式^[3],因此,采用草绘交互方式进行3维人脸形状设计成为人脸建模这一领域的重要研究课题之一^[4-5]。

诸如 Teddy^[6]及其改进的 FiberMesh 系统^[7]等基于草绘的一般曲面建模方法可用于创建3维卡通人脸,但这类方法是让用户根据人脸结构在一个膨胀球体上通过拖曳等操作模拟生成3维人脸,此过程需要频繁切换绘制视图及预定义的操作手势而显得十分复杂。为此,在考虑人脸结构先验知识的基础上,一些方法将手绘草图专门用于3维人脸建模。Nataneli 等人^[8]先识别出所绘制的人脸草图的表情语义类别,再利用语义所对应的3维人脸表情模板生成相应表情;Sucontphunt 等人^[9]通过修改2维人脸肖像模板各器官的形状来驱动不同的3维人脸进行形变产生表情;Lau 等人^[10]和 Chang 等人^[11]允许用户直接在3维人脸模型上利用笔画选定待修改的区域,然后以绘制新的笔画或拖曳控制点作为约束条件来编辑人脸模型,从而可获得不同形态的表情;但这些方法都是通过对已有3维人脸模型的细节(局部)修改来生成相应的表情,尽管它们会改变人脸形状,但不适于进行人脸整体形状的设计。Gunnarsson 等人^[12]和 Sucontphunt 等人^[13]将基于统计模型的思想^[14]用于手绘3维人脸的形状建模,即先对3维人脸库利用主成分分析得到一个特征点的统计模型,根据用户手绘草图中抽取的形状特征计算统计模型的参数,最后可线性组合得到新的3维人脸;统计模型特征点稀疏的特点也使得这类方法在抽取草图特征点时会丢失笔画中那些用户需要表达的几何特征信息;然而,这类方法要求用户在指定模型或区域上绘制正视图下的人脸器官轮廓草图,才能将笔画特征映射到对应的人脸器官上,显然,这在一定程度上限制了用户手绘的自由度。Li 等人^[15]的方法是从多个不同视角绘制一系列草图来

创建3维卡通人脸,它先选取正视和完全侧视的人脸草图,利用文献[7]中的膨胀策略构建3维网格作为头部模型,然后将其他视角下的草图作为投影轮廓对头部网格进行形变^[16],但该方法需要用户大量手动标记以实现多个人脸草图的笔画对应。事实上,在设计3维人脸形状时,用户通常会根据自身的绘制习惯选择视角,然后以勾勒人脸器官轮廓线的方式来呈现所要设计的人脸形状及器官间的相对位置关系。这就要求手绘设计3维人脸形状的建模方法既要支持用户在定义人脸形状参数时而不限制其视图选择,还要在将草图映射生成3维人脸模型的过程中能保持反映用户创意的笔画形状信息,而且整个生成过程应该是自动实时实现,以使得用户能专注于表达创意的形状设计本身。

据此,提出一种基于手绘草图的3维人脸建模方法,其基本思想是根据手绘人脸轮廓的形状对3维人脸模板进行整体形变,以得到特定形状的3维人脸。首先,利用人脸先验知识对用户绘制的草图笔画进行识别,然后利用姿态估计技术对人脸草图进行分析,生成对应的正视人脸草图,因此允许用户可从多个视角绘制人脸草图;其次,根据曲率大小关系直接从3维人脸模板上自动抽取人脸内外轮廓点作为3维特征点,并利用基于径向基函数的网格形变,可保证交互过程的实时性;最后,利用多层映射机制来建立2维草图特征点与3维模板特征点的一一对应关系,在2维草图向3维模型的映射过程中能够有效地保持使草图笔画的形状信息,从而可以更好地反映用户创作意图。

1 本文方法概述

本文方法旨在将用户自由手绘的人脸器官轮廓草图映射生成相应形状的3维人脸,其处理流程主要涉及3个方面:人脸草图解析,3维人脸模板特征点抽取以及形状映射与形变,方法流程图如图1所示。

人脸草图解析主要是对用户绘制的人脸草图进行解析以从抽取表示人脸各器官形状的笔画特征点,以构成一个能反映人脸整体形状的完整草图人脸模型。在笔画识别阶段,对人脸草图进行数据预处理,并根据人脸器官分布规则确定草图各笔画与人脸器官之间的对应关系,允许用户在手绘人脸器官时不限定各绘制笔画的先后顺序。对于非正视图下的人脸草图,利用姿态估计分别计算其法向量、中

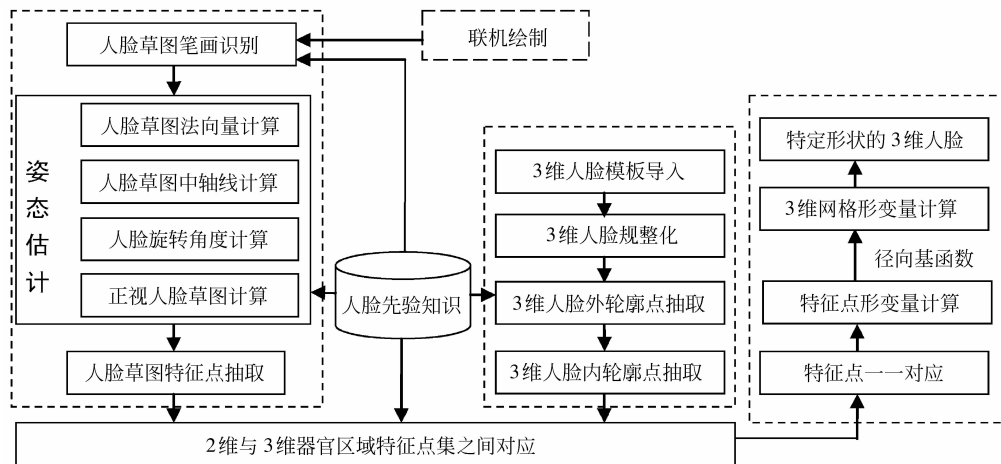


图 1 本文方法流程示意图

Fig. 1 Flow chart of our method

轴线及旋转角度,最后根据人脸左右对称生成对应的正视草图,这允许用户可以绘制人脸的侧视草图进行形状设计,而不仅仅是正视图,从而增加了绘制的自由度。最后,利用草图特征点抽取,从正视人脸草图中获取表示几何形状信息的形状特征点,从而构成一个完整的草图人脸模型。

在 3 维人脸模板特征点抽取过程中,允许用户导入任意的中性 3 维人脸模型作为模板,采用基于计算曲率大小关系的对象空间方法分别抽取 3 维人脸的内外轮廓点作为 3 维特征点,避免用户进行繁琐的手动标注或复杂的 3 维人脸库训练过程。

在形状映射与形变阶段,利用多层映射机制来建立所抽取的 2 维草图特征点与 3 维模板特征点之间的一一对应关系:先建立各器官区域特征点集之间的对应,然后在两个对应区域的特征点集合内部,根据草图特征点的形状分布特点对 3 维模板特征点进行插值以使得两个集合特征点相同,从而建立一一对应关系;此时可将相应特征点之间的偏移向量作为形变控制参数,通过径向基函数来计算整个模板网格的形变量,最终得到形变后的特定 3 维人脸模型。此映射过程中,草图笔画的形状特征信息可在最终生成的 3 维模型上得以保持,且形变计算时间开销小能保证 3 维人脸实时生成。

2 人脸草图解析

人脸草图解析主要是从所绘制的草图中抽取表示人脸全局和局部几何形状的特征点。用户所绘制

的非正视人脸草图其实是 3 维人脸在特定角度下的投影,不能直接抽取其特征点,因此需要先转换生成对应的正视人脸草图然后再计算各笔画的特征点,此过程可分为草图人脸识别,姿态估计和草图人脸特征点抽取 3 个步骤。

2.1 草图人脸识别

通常设计师在绘制人脸草图时,无论是正视人脸草图,还是侧视人脸草图,一般习惯于先全局后局部的“由粗到细”策略,即先绘制表示脸部形状的笔画(外轮廓),再绘制眼睛、鼻子、嘴巴等局部人脸器官的笔画(内轮廓),最终形成由全局外轮廓草图组件和局部器官轮廓草图组件构成的人脸草图。各草图组件之间的空间关系反映草图人脸面部器官之间的相对位置关系,草图组件中笔画的形状反映人脸外形和器官的几何形状。

草图人脸识别的目的是找出人脸外轮廓和内轮廓分别所对应的草图笔画。根据人脸器官分布先验知识,侧视人脸草图与正式人脸草图各组件的空间分布类似,也满足 BNF 的人脸草图模型^[17],因此,可利用人脸器官分布规则作为先验知识,对草图笔画进行识别,得到各草图笔画分别表示人脸器官的含义,最终构成一个完整的人脸草图模型。

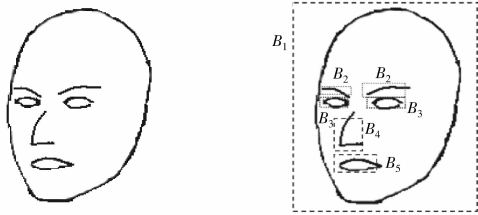
定义 1 人脸草图模型

- 1) $\langle \text{草图人脸} \rangle ::= \langle \text{外轮廓草图组件} \rangle \langle \text{局部器官轮廓草图组件} \rangle$;
- 2) $\langle \text{外轮廓草图组件} \rangle ::= \langle \text{基本笔画} \rangle$;
- 3) $\langle \text{局部器官轮廓草图组件} \rangle ::= \langle \text{基本笔画} \rangle$;
- 4) $\langle \text{基本笔画} \rangle ::= \langle \text{采样点} \rangle$;

5) < 采样点 >.: = (平面坐标, 时间戳, 笔触压力, 执笔角度)。

假定侧视人脸草图由 9 部分组成: 外轮廓、左右眉毛、左右眼、鼻子、嘴以及左右耳朵, 每部分用一个笔画来表示。如果用户绘制人脸时出现“重绘”(即用多个笔画来刻画某部分器官形状), 可对表示同一人脸器官的笔画簇进行笔画合并^[4]。

图 2(a) 是用户绘制人脸草图, 根据人脸器官分布规则可计算各笔画对应的人脸器官: B_1 是外轮廓, B_2 是眉毛, B_3 是眼睛轮廓, B_4 是鼻子轮廓, B_5 是嘴巴的轮廓, B_6 是耳朵的轮廓, 见图 2(b)。



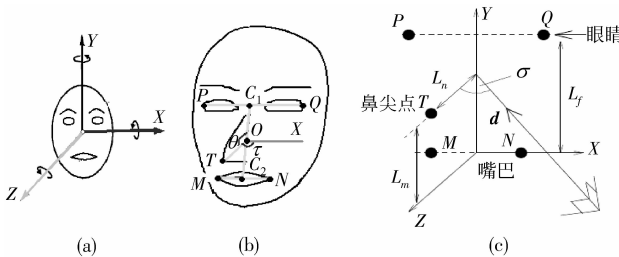
(a) 用户绘制的人脸草图 (b) 笔画所对应的人脸器官

图 2 人脸笔画识别

Fig. 2 Face stroke recognition

2.2 人脸草图姿态估计

尽管人脸姿态的旋转变化有 3 个自由度, 如图 3(a) 所示, 但用户在绘制非正视人脸草图时, 所选择的视图视角变化主要是围绕 Y 轴旋转产生的, 用户所绘制的草图是 3 维人脸在该视角下的投影轮廓。根据人脸测量统计的知识, 人脸面部存在由眼角点、嘴角点和颌下点构成的 1 个平面区域(相对平行区), 该区域内器官在旋转过程中基本处在 1 个刚性的平面上, 且在正视状态下该平面与 Z 轴垂直, 两个外眼角点的连线与 X 轴平行, 因此草图中人脸的姿态估计可转化为求该平面区域的旋转角度, 然后可根据人脸左右对称的基本特性将非正视人脸草图转化生成对应的正视人脸草图。



(a) (b) (c)

图 3 人脸法向量计算

Fig. 3 Computation of face sketch's normal

2.2.1 人脸法向量估计

我们采用两个外眼角点、鼻尖点和两个口角点作为面部模型的特征点计算旋转角度。在人脸草图中, 根据人脸器官结构可以分别从眼睛笔画, 鼻子笔画和嘴巴笔画中抽取这些特征点, 其中, 左右外眼角点分别用 P, Q 表示, 其连线中点用 C_1 表示; 左右嘴角点分别用 M, N 表示, 其连线中点用 C_2 表示; 连线 $C_1 C_2$ 的中点为 O ; 鼻尖点可以视为鼻子笔画中曲率最大的点, 用 T 表示, 如图 3(b) 所示。则人脸草图法向量^[18]为

$$n_f = [\sin\sigma\cos\tau, \sin\sigma\sin\tau, -\cos\sigma] \quad (1)$$

式中线段 OT 与 X 轴之间的夹角为 τ , 视线与人脸法向量之间的夹角为 σ , 如图 3(c) 所示。

视线可用单位向量 $d = [d_x, d_y, d_z]$ 表示, 则夹角 σ 可用 $\cos\sigma = |d_z|$ 表示, 且满足关系式

$$R_n^2(1 - m_2)d_z^4 + (m_1 - R_n^2 + 2m_2R_n^2)d_z^2 - m_2R_n^2 = 0 \quad (2)$$

式中: $m_1 = (l_n/l_f)^2$, $m_2 = \cos^2\theta$, R_n 是常量; θ 是线段 OT 与 $C_1 C_2$ 之间的夹角; l_f 表示左右眼睛连线与左右嘴角点连线之间的距离, 可用连线 $C_1 C_2$ 的长度表示, l_n 表示鼻子的高度, 可用连线 OT 的长度表示。通过式(1)和式(2), 可计算出人脸草图的法向量 $n_f = [n_x, n_y, n_z]$ 。

2.2.2 正视人脸草图计算

在运用人脸左右对称这一特性之前, 需要先计算人脸草图的中轴线及对应的旋转角度。经过眼角连线中点 C_1 , 鼻尖点 T , 嘴角连线中点 C_2 , 以及人脸草图最高点 E 和最低点 F 作为控制点拟合生成一条曲线来表示人脸草图中轴线, 如图 4(b) 所示。实际上, 设计者在绘制人脸草图时, 为便于观察, 也习惯绘制人脸的中轴线 EF 和眼弧线 PG , 此时可以将用户提供的线索笔画来表示中轴线。

在得到人脸中轴线 EF 后, 我们将人脸外轮廓分为左右两个部分, 其中距视点近的那部分轮廓对应人脸模型的外轮廓线, 距视点远的那部分轮廓其实是人脸模型内部点在当前视图下的投影, 而非实际的人脸外轮廓线, 如图 4(c) 所示, 草图轮廓 ELF 是人脸模型内部点的投影线, 而 ERF 则对应人脸模型的外轮廓线。但在正视人脸草图中, 一般不考虑非人脸器官轮廓点, 所以在恢复生成正视图下的人脸草图时, 只需与人脸模型外轮廓线对应的那部分草图轮廓及人脸中轴线来计算正视图下的人脸草图的外轮廓形状。

对于人脸中轴线 EF 的每一个点 S , 在草图外轮廓 ERF 上可以找到一点 H , 使得 SH 与眼弧线 PG 平行, 也可视为 SH 与左右眼睛中点连线平行。由 2.2.1 小节可计算出侧视人脸草图的法向量 $\mathbf{n}_{per} = [n_x, n_y, n_z]$, 而正式人脸草图的法向量 $\mathbf{n}_{ort} = [0, 0, 1]$, 则人脸旋转角度可用法向量 \mathbf{n}_{per} 与 \mathbf{n}_{ort} 之间的夹角 ϕ 来表示

$$\phi = \arccos\left(\frac{\mathbf{n}_{per} \cdot \mathbf{n}_{ort}}{|\mathbf{n}_{per}| |\mathbf{n}_{ort}|}\right) \quad (3)$$

则将 SH 按照夹角 ϕ 投影到 $S'H'$, 则有 $l_{S'H'} = l_{SH} \cdot \cos\phi$, 如图 4(e) 所示。

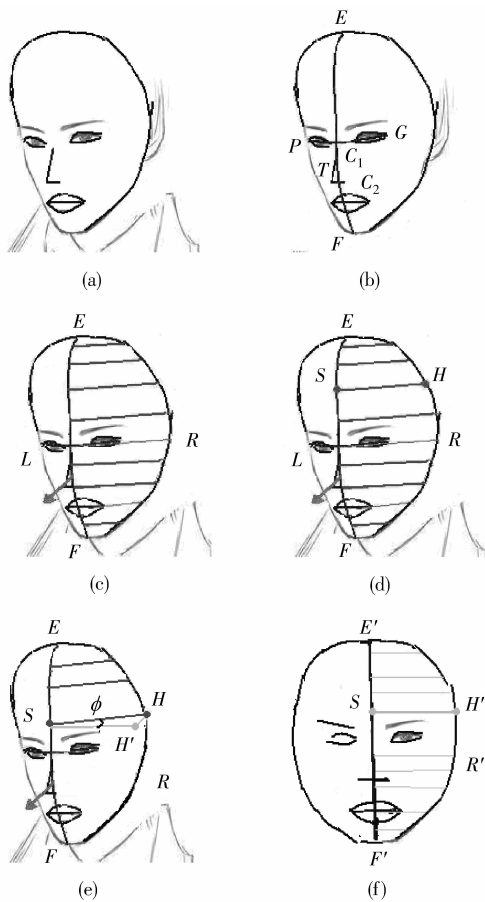


图 4 正视人脸草图计算

Fig. 4 Computation of front-view face sketchy

在计算正式人脸草图之前, 先计算正视人脸的中轴线 $E'F'$, 其方向所在单位向量为 $[0, 1, 0]$, 长度满足 $l_{E'F'} = l_{EF}$ 。对于中轴线 $E'F'$ 上每一点 S' , 则可求得两个点 H' 和 H'' 与之对应, H' 和 H'' 关于中轴线 $E'F'$ 对称, 且 $S'H'$ 和 $S'H''$ 所在单位向量为 $[\pm 1, 0, 0]$, 长度满足 $l_{S'H'} = l_{S'H''} = l_{SH} \cdot \cos\phi$ 。由 H' 和 H'' 组成的点序列则构成正视人脸草图的外轮廓。类似

地, 可计算所绘制的人脸草图在正视图下的眼睛、嘴巴以及表示鼻翼宽度的轮廓线, 最终得到正视人脸草图, 如图 4(f) 所示。

2.3 草图人脸形状特征点抽取

经姿态估计可计算得到正视图下的人脸草图, 根据 2.1 节可识别出该人脸各笔画所代表的人脸器官。然后, 就需要对各笔画进行特征分析, 以抽取各笔画的特征点来表征草图人脸的形状, 即从轮廓曲线上选择一些离散点来表征该曲线的形状, 整个草图人脸的特征点构成一个特征点分布模型。

从草图笔画中抽取特征点的一般方法是等距离采样法, 但在笔画形状不规则的情况下, 这类方法的采样结果可能会遗漏掉那些包含更多形状信息的关键点, 我们把这些点称为“关键点”。如图 5 所示, (b) 中圆点是采用等距离重采样法所抽取的特征点, 可见结果中并不包含如点 p 等反映局部细节形状的关键点((b) 中方点)。

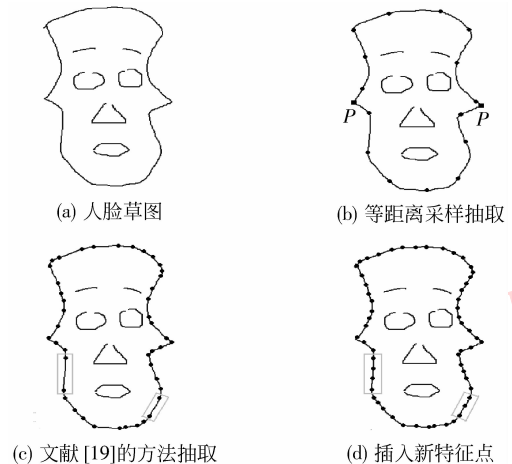


图 5 草图人脸特征点抽取示意图

Fig. 5 Extraction of 2D face sketch's representatives

为了能保留原始人脸草图中刻画人脸细节的局部特征, 需要从草图笔画中找到尽可能多的关键点, 借鉴 Sklansky 等人^[19]的方法, 引入参数 ϵ 控制计算笔画的关键点, 然后在关键点之间插入新的特征点, 此时即使在关键点稀少的情况下仍能保证最后各笔画是分布比较均匀的特征点集。图 5(c) 是采用文献[19]的方法计算关键点的效果图, 与等距离采样法相比, 该方法所获取的笔画特征信息更为完整; (d) 是在(c) 中较稀疏的关键点之间(如灰色矩形方框所示)插入新特征点所得到的效果图, 也就是原始人脸外轮廓笔画所对应的特征点分布结果。类似

地,依次抽取其他人脸笔画的特征点以构成人脸草图的特征点分布模型。

3 3 维人脸模板特征点抽取

为了能与草图形状特征点对应,需要获取 3 维人脸特征点。本文采用基于计算曲率的对象空间方法^[20]抽取 3 维特征点。方法允许用户任导入一个中性人脸网格作为 3 维模板,然后根据曲率大小变化在 3 维人脸脸上抽取内外轮廓点作为 3 维特征点,而不需要用户进行手动标定,也避免了复杂的 3 维人脸库训练过程。为处理方便,先对用户导入的 3 维人脸模板进行规整化,然后再分别抽取 3 维人脸外轮廓点和内轮廓点作为 3 维特征点。

3.1 3 维人脸网格外轮廓提取

根据文献[20]对轮廓(contours)的定义,轮廓是 3 维模型可见部分与不可见部分的分界线,也就是对于 3 维曲面上任一点 p_i ,若 p_i 所在处的曲面法向量 $\mathbf{n}(p_i)$ 与当前视向量 \mathbf{v}_c 互相垂直,即满足

$$\mathbf{n}(p_i) \cdot \mathbf{v}_c = 0 \quad (4)$$

则该点 p_i 是当前视图下 3 维曲面的轮廓点,如图 6(a)所示。

对于 3 维人脸网格模型,外轮廓可以近似视为一系列边的集合,这些边所关联的两个多边形面片中的一个可见的,另一个是不可见的。因此我们可以通过一条边相关联的两个三角形的法向和视线方向的关系来判断其是否在外轮廓上。对于人脸网格上的任意一条边 e ,它所关联两个三角形的法向量分别为 \mathbf{n}_1 和 \mathbf{n}_2 ,如果 $\langle \mathbf{n}_1, \mathbf{v}_c \rangle \cdot \langle \mathbf{n}_2, \mathbf{v}_c \rangle < 0$,则边 e 在人脸外轮廓上,连接边 e 的顶点则是人脸外轮廓点。抽取的人脸外轮廓点如图 6(b)中外侧黑色粗线所示。由于计算出的外轮廓线包含耳朵轮廓线点,根据人脸器官分布可将该部分点去除,从而得到完整的人脸外轮廓特征点。

3.2 3 维人脸网格内轮廓提取

曲面的最大最小曲率^[20]描述了曲面结构的重要信息,且具有不随 3 维模型的刚体运动而变化且与坐标系独立的特点,其中最大曲率可较好地描述“脊”的形状特征,如眉毛轮廓线、鼻梁轮廓线、嘴唇轮廓线;最小曲率可较好地描述“谷”的形状特征,如眼睛内轮廓线、鼻翼轮廓线,如图 6(b)中人脸内部黑色细线所示。因此,将最大、最小曲率相结合的高斯曲率可描述人脸曲面的形状,其关系式为

$$\begin{cases} K = k_1 k_2 \\ H = \frac{1}{2}(k_1 + k_2) \\ k_1, k_2 = H \pm \sqrt{H^2 - K} \end{cases} \quad (5)$$

式中分别用 k_1 和 k_2 表示最大、最小曲率, K 表示高斯曲率, H 表示均值曲率。

通过计算高斯曲率与阈值的大小关系可以获取表示人脸内部器官的区域点,如图 6(c)所示。与基于图像的二值化方法不同,采用对器官点集的迭代聚类方法抽取内部器官轮廓点^[17],如图 6(d)所示。

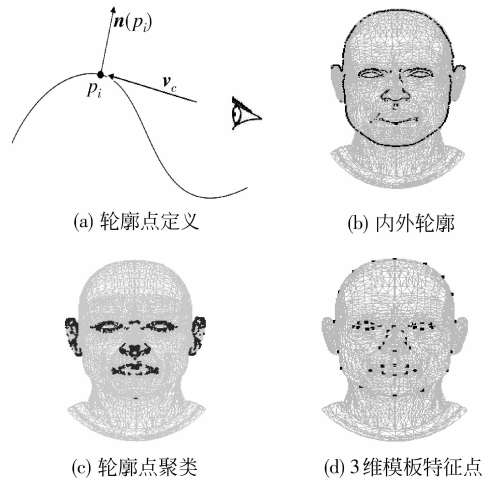


图 6 3 维人脸模板特征点抽取

Fig. 6 Extraction of 3D face template feature points

4 2 维到 3 维的形状映射

在获得 2 维人脸草图特征点和 3 维模板特征点后,一般情况下,草图人脸特征点数目与 3 维人脸模板特征点数目不相等,因此,需要建立 2 维与 3 维特征点之间的对应,以将草图特征形状映射到最终生成的 3 维人脸。Sucontphunt 等人^[13]采取的方法是根据模板特征点个数来确定草图特征点个数,即根据模板中定义的各器官特征点个数在对应草图笔画中均匀抽取 2 维特征点。在用户设计复杂形状人脸时,这种基于模板特征的对应机制不能抽取完整的笔画特征信息,所生成的 3 维难以保持那些能体现用户创意的形状特征。

使用以 2 维草图特征为主导的多层映射机制来建立 2 维与 3 维特征点的一一对应关系:先根据人脸器官分布先验知识,可建立草图人脸与 3 维人脸相同器官的区域的特征点集之间的对应,即对于草

图人脸中表示某一特定器官的笔画,可以在 3 维人脸特征点集合中找到一个子集与之对应;然后,根据笔画形状特征点的分布,对相对应的 3 维特征点进行比例插值,使得笔画特征点与 3 维特征点数目相同。

下面以人脸外轮廓为例来说明该形状映射过程。对于人脸草图外轮廓 $SFP_{2D} = \{sp_1, sp_2, \dots, sp_n\}$, 则有 3 维人脸外轮廓 $TFP_{3D} = \{tp_1, tp_2, \dots, tp_m\}$, 其中 n, m 为对应的轮廓点数目(一般 $n > m$), 如图 7 所示:(a) 为草图人脸的外轮廓笔画;(b) 中黑色外轮廓线表示 3 维人脸特征点集中的点序列与之对应。



图 7 特征点对应与模型形变

Fig. 7 Feature points matching and mesh deformation

根据草图外轮廓特征点之间的距离,对 3 维外轮廓进行插值,使得草图人脸特征点与 3 维人脸轮廓特征点数目相同。为计算方便,先过 2 维外轮廓 SFP_{2D} 和 3 维外轮廓 TFP_{3D} 分别计算参数曲线 Γ_{2D} 、 Γ_{3D} , 则轮廓 SFP_{2D} 特征点之间的长度分布可用参数 u_i 表示,即

$$u_i = \begin{cases} 0 & \text{若 } i = 0 \\ u_{i-1} + \frac{\text{len}(sp_{i-1}, sp_i)}{\sum_{j=1}^{n-1} \text{len}(sp_{j-1}, sp_j)} & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

式中 $\text{len}(sp_{i-1}, sp_i)$ 表示点 sp_{i-1} 与 sp_i 之间的距离。然后根据参数 u_i 对曲线 Γ_{3D} 进行等比例采样,即可求得与草图外轮廓 SFP_{2D} 相对应的 3 维外轮廓特征点 TFP'_{3D} 。分别对嘴巴、眼睛和鼻子部分进行类似计算,最终可得到与 2 维形状特征点集合一一对应的 3 维人脸形状特征点集合。

在建立 2 维草图特征点集合与 3 维模板特征点集合之间的一一映射关系后,根据对应特征点的形变量来控制整个人脸模板网格进行形变,以生成特定的 3 维人脸模型。该形变量是根据草图特征点分布情况计算而得,所以用户绘制的笔画形状信息可在最终的 3 维模型上得以保持。

在计算对应特征点形变量时,先计算草图人脸形状特征点相对于人脸中心的归一化距离(水平方向距离除以人脸外轮廓的宽度,垂直方向距离除以人脸外轮廓的高度),对应可得出 3 维特征点在形变后的相对偏移向量。3 维人脸特征点和偏移向量构成了 3 维网格形变的控制参数。

使用基于径向基函数的插值方法对 3 维人脸模板进行形变。将在形状映射过程得到新的 3 维人脸特征点集为网格形变的控制点集,可表示为 $C = \{cp_1, cp_2, \dots, cp_{n'}\}$, 其中 n' 表示控制点个数,特征点对应的位移向量为 $D = \{dis_1, dis_2, \dots, dis_{n'}\}$ 。3 维人脸模板网格表示为 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_{m'}\}$, m' 为网格节点的数目。根据径向基函数列出方程组如下式

$$f(\mathbf{v}) = \sum_{i=1}^{n'} \lambda_i \cdot \varphi(\|\mathbf{v} - \mathbf{v}_i\|) + q(\mathbf{v}) \quad (7)$$

式中, \mathbf{v}_i 是第 i 个控制点, n' 是控制点的个数, $\|\mathbf{v} - \mathbf{v}_i\|$ 表示任意顶点 \mathbf{v} 与 \mathbf{v}_i 之间的距离, $\varphi(\cdot)$ 是基函数, λ_i 是第 i 个基函数的权值, 多项式 $q(\mathbf{v}) = \mathbf{M} \cdot \mathbf{v} + t$ 是仿射变换部分。基函数 $\varphi(\cdot)$ 的形式有多种, 本文选取 $\varphi(r) = e^{-r/64}$, 其特点是计算简单且具有较好的局部性。求解方程组可得到系数 λ_i 及 $q(\mathbf{v})$ 的仿射变换系数, 进而可计算出网格各节点在形变后的偏移量, 从而可以得到网格各顶点 p_i 在形变后的新坐标 p'_i , 即有

$$p'_i = p_i + f(p_i) = \sum_{i=1}^{n'} \lambda_i \cdot \varphi(\|p_i - \mathbf{v}_i\|) + q(p_i) \quad (8)$$

对于图 7(a) 和 (b) 中的人脸外轮廓, 形变产生的结果如 (c) 所示。尽管该形变方法中求解方程组的时间复杂度为 $O(n^3)$, 但线性方程组的方程数目仅与特征点的数目 n' 相关, 且特征点数远小于网格节点数 ($n' \ll m'$), 因此整个形变过程的计算开销不大, 可满足实时形变的要求。

5 实验结果与分析

本文方法实现环境是 Visual Studio 2005 结合 OpenGL 图形库, PC 机配置为 Intel P4 1.73 GHz CPU, 1 GB 内存。在实验中, 分别从姿态估计, 映射机制两个方面来验证方法有效性, 同时也分析了所生成 3 维人脸模型的准确性和建模时间开销。

5.1 姿态估计实验

利用文献[12-13, 17]方法设计人脸时, 用户只

能绘制正视人脸草图,且必须在指定的人脸器官区域绘制笔画来表示相应器官的形状,用户绘制的自由度受到限制。本文允许用户可选择不同视角以自由绘制的形式进行人脸形状设计,图 8(a)表示用户绘制在不同视角下设计的人脸,其视角分别大概对应于左 30°,左 45°,右 45°;(b)表示生成的正视人脸,最后生成的模型如(c)和(d)所示。

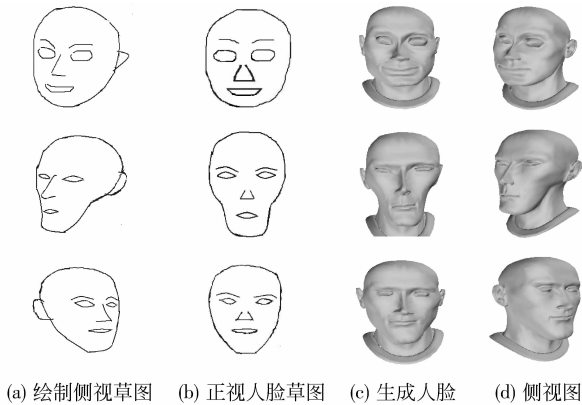


图 8 姿态估计及形变效果

Fig. 8 Generated results based on pose estimation

5.2 形状映射机制评估

在将人脸草图笔画映射到 3 维模型的过程中,笔画的几何形状信息应该能尽可能多地传递到 3 维人脸模型。文献[13]方法的形状映射机制是以模板特征为主导,即根据 3 维模板特征点个数来建立 2 维特征与 3 维特征之间的对应关系。采用这种映射机制生成的人脸模型可能会丢失用户设计的笔画形状信息,如图 9(b)中前两行效果图中矩形线框内的人脸模型部分与对应的笔画部分差别明显,在人脸形状比较复杂时(最后一行),笔画形状信息丢失更为严重,而(c)是本文方法对应生成的人脸效果。

在 3 维人脸概念设计时,需要所生成的 3 维人脸模型尽可能与人脸草图保持一致,因此,我们用 3 维人脸内外轮廓的 2 维投影与人脸草图之间的相似度来描述所生成的 3 维人脸与人脸草图的一致性。在实验中分别采用傅里叶描述子和形状上下文^[21]来度量 3 维人脸与人脸草图之间的相似度。对于人脸草图与所生成 3 维模型眼睛、鼻子、嘴巴等局部器官,本文采用基于傅里叶描述子间的欧式距离来度量其相似度,即先分别计算人脸草图与 3 维人脸内外轮廓投影中各局部形状的傅里叶特征,再计算两个特征向量之间的欧式距离;然后采用基于形状上下文的形状距离来度量 3 维模型与人脸草图整体形

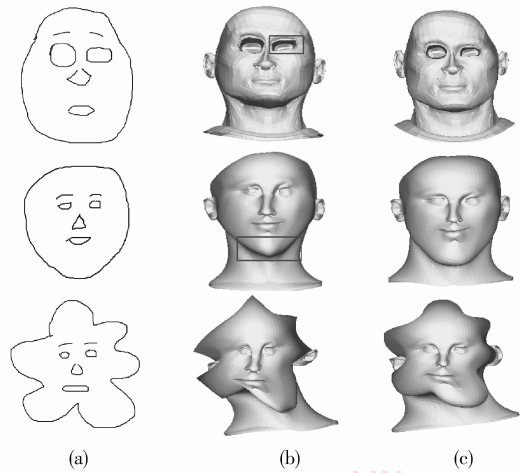


图 9 形状映射效果对比

Fig. 9 Comparison of results of shape matching

状的相似性。实验中绘制多幅人脸草图,对每幅草图分别计算其与所生成 3 维模型局部形状和整体形状的相似度,最后统计得出平均值,结果如表 1 所示。在利用形状距离度量相似度时,距离数值越小,相似度越大,因此利用本文方法所生成的 3 维人脸模型在保持人脸草图局部和整体几何形状特征时均要优于文献[13]的方法。

表 1 3 维人脸轮廓与人脸草图相似度度量

Tab.1 Results of similarity measures between 3D face silhouette and portrait sketch

方法	外轮廓	左眼	右眼	鼻子	嘴巴	整体人脸
文献[13]	0.320 5	0.219 4	0.277 3	0.258 9	0.202 2	0.402 6
本文	0.178 7	0.116 5	0.179 5	0.237 6	0.189 1	0.229 0

实验结果表明,本文方法所生成的 3 维人脸模型与草图笔画相似度较高,能较好地与所绘制草图的几何形状保持一致,在生成形状复杂的夸张人脸时,这一特性更能有效反映用户的设计创意。

5.3 3 维人脸建模时间性能评估

在 3 维人脸草绘建模时,需要系统能将生成效果快速反馈给用户。本文方法是通过计算 2 维草图特征点集与 3 维网格模板特征点集之间对应点的位移来控制 3 维人脸模板进行形变,因此特征点的数目和 3 维人脸模板的网格规模都会影响建模过程的时间开销。针对不同规模的 3 维人脸网格模板,绘制多幅人脸草图进行实验,然后采用不同的参数 ϵ 进行特征点抽取,以获得不同数目的特征点集,最后统计建模过程的平均时间开销。图 10 给出了 3 维人脸建模时间与特征点数目、3 维人脸网格规模之间

的关系,每条曲线对应不同数量的草图特征点集随人脸网格规模大小的时间开销,由于草图人脸特征点数目由参数 ε 控制,因此每条曲线表示 ε 取不同参数的建模时间,分别为 $\varepsilon = 0.1, \varepsilon = 1, \varepsilon = 3, \varepsilon = 5$ 。

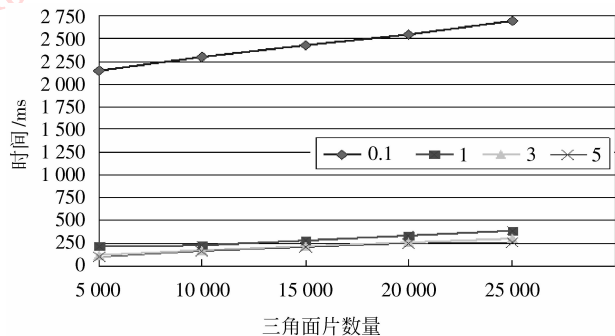


图 10 人脸建模的时间开销

Fig. 10 Time cost of face modeling

实验结果表明,当 ε 值相同时,建模过程时间开销随着 3 维网格模板规模缓慢地线性增加,这是由于形变过程所要求解的方程组规模主要由特征点的数目决定,因此本文方法能适应更大规模的 3 维人脸网格生成。此外,随着 ε 增加,平均建模时间相应减少,从图 10 中可以看出,当 $\varepsilon = 0.1$ 时,平均建模时间在 2 145 ms 和 2 687 ms 之间,而用户在实验中会发现在反馈所生成人脸的效果时存在一定地延迟;而当 $\varepsilon = 1, 3, 5$ 时,平均建模时间控制在 216 ~ 395 ms,此时用户设计过程明显流畅得多,满足交互的实时要求。但是当 $\varepsilon = 3$ 或 5 时所生成的 3 维人脸模型效果质量明显下降,而 $\varepsilon = 1$ 时所生成的 3 维人脸模型能保持人脸草图中的特征信息,与原始草图的相似度较高。因此,我们取参数 $\varepsilon = 1$, 以实现 3 维人脸模型的质量和建模时间开销的,从而同时满足 3 维模型生成时保持特征和交互实时的要求。

6 结 论

使用手绘草图是设计师在设计初期所使用的一种传统自然的工作方式,提出一种基于手绘草图设计 3 维人脸形状的建模方法。在用户提交已经制好的人脸草图后,利用人脸先验知识对所设计的人脸草图进行解析,该过程利用姿态估计技术对草图进行分析计算可生成对应的正视人脸草图,然后从草图笔画中抽取表示人脸各器官几何形状信息的特征

点。根据曲率大小关系从模板上自动抽取人脸内外轮廓点作为 3 维特征点。在 2 维草图向 3 维模型的映射过程中,利用多层次映射机制来建立 2 维草图特征点与 3 维模板特征点的一一对应关系,这种多层次的映射机制能够使草图笔画的形状信息得到保持,从而可以更好地反映用户的意图。与已有的一些人脸形状设计方法相比,本文方法既可支持用户以视图自由的绘制方式设计人脸(而不仅仅限制用户只能绘制正视草图),同时,还能生成形状新颖甚至夸张的 3 维人脸模型。

由于本文方法主要针对用户通过手绘设计人脸整体形状,而缺乏对人脸内部非器官的特征细节设计支持,因此可以考虑增加一些基于手绘的编辑操作,以生成形状特点更加丰富的 3 维人脸。此外,本文的姿态估计方法主要针对侧视旋转的人脸设计,当草图中人脸是绕 X 旋转上下旋转幅度较大的情况则需要进一步的工作来解决。

参考文献 (References)

- [1] Parke F. Computer generated animation of faces [C]// Proceedings of the ACM Annual Conference on Computer Graphics. New York: ACM Press, 1972: 451-457.
- [2] Xu Chenhua, Wang Yunhong, Tan Tieniu. Overview of research on 3D face modeling[J]. Journal of Image and Graphics, 2004, 9(8): 893-903. [徐成华,王蕴红,谭铁牛. 3 维人脸建模与应用[J]. 中国图象图形学报, 2004, 9(8): 893-903.]
- [3] Sun Zhengxing, Feng Guihuan, Zhou Ruohong. Sketch-based user interface: review and research[J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2005, 17(9): 1889-1899. [孙正兴,冯桂焕,周若鸿. 基于草图的人机交互技术研究进展[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2005, 17(9): 1889-1899.]
- [4] Olsen L, Samavati F F, Sousa M C, et al. Sketch-based modeling: a survey[J]. Computers & Graphics, 2009, 33(1): 85-103.
- [5] Cook M T, Agah A. A survey of sketch-based 3D modeling techniques[J]. Interacting with Computers, 2009, 21(3): 201-211.
- [6] Igarashi T, Matsuoka S, Tanaka H. Teddy: a sketching interface for 3D freeform design [C]//Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH 1999. New York: ACM Press, 1999: 409-416.
- [7] Nealen A, Igarashi T, Sorkine O, et al. FiberMesh: designing freeform surfaces with 3D curves [J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 41.
- [8] Nataneli G, Faloutsos P. Sketching Facial Expressions [C]//

- Proceedings of ACM SIGGRAPH 2007 Sketches. New York: ACM Press, 2007: 60.
- [9] Suontphunt T, Mo Z, Neumann U, et al. Interactive 3D facial expression posing through 2D portrait manipulation [C]// Proceedings of Graphics Interface 2008. New York: ACM Press, 2008: 177-184.
- [10] Lau M, Chai J X, Xu Y Q, et al. Face poser: interactive modeling of 3D facial expressions using facial priors [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(1), Article 3: 1-17.
- [11] Chang E, Jenkins O C. Sketching articulation and pose for facial animation [C]// Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Switzerland: Eurographics Association, 2006: 271-280.
- [12] Gunnarsson O, Maddock S. A statistically-assisted sketch-based interface for creating arbitrary 3-dimensional faces [C]// Proceeding of Theory and Practice of Computer Graphics 2007. Switzerland: Eurographics Association, 2007:1-8.
- [13] Suontphunt T, Tunwattanapong B, Deng Z G, et al. Crafting 3D faces using free form portrait sketching and plausible texture inference [C]// Proceedings of Graphics Interface 2010. New York: ACM Press, 2010: 209-216.
- [14] Blanz V, Vetter T. A morphable model for the synthesis of 3D faces [C]// Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH 1999. New York: ACM Press, 1999: 187-194.
- [15] Li X, Xu J, Ren Y C, et al. Animating cartoon faces by multi-view drawings [J]. Computer Animation and Virtual Worlds, 2010, 21(3): 193-201.
- [16] Vlasic D, Baran I, Matusik W, et al. Articulated mesh animation from multi-view silhouettes [J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [17] Jiang W, Sun Z X. A 3D face modeling method using freehand sketch [J]. Lecture Notes in Computer Science: Transactions on Edutainment, 2010, 6250: 215-228.
- [18] Gee A H, Cipoll R. Determining the gaze of faces in images [J]. Image and Vision Computing, 1994, 12(10): 639-647.
- [19] Sklansky J, Gonzalez V. Fast polygonal approximation of digitized curves [J]. Pattern Recognition, 1980, 12(5): 327-331.
- [20] Decarlo D, Finkelstein A, Rusinkiewicz S, et al. Suggestive contours for conveying shape [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003, 22(3): 848-855.
- [21] Belongie S, Malik J, Puzicha J. Shape matching and object recognition using shape contexts [J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2002, 24(4): 509-522.