

# 面向应用的个性化 3D 人脸模型快速生成技术<sup>①</sup>

路 红<sup>1</sup>, 廖龙龙<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(南京理工大学 紫金学院, 南京 210046)

<sup>2</sup>(南京体育学院 信息科学与技术教研室, 南京 210014)

**摘 要:** 真实感 3D 人脸模型生成技术是计算机图形领域研究的热点问题之一, 但已有的相关方法存在真实感差、算法复杂度高、局限性多、实用性弱等问题. 在分析 3D 人脸模型姿态矫正和模型变换方法基础上, 研究基于一张人脸正面图像和普通 3D 人脸模型、采用关键特征点匹配和真实感纹理映射方法构建个性化 3D 人脸模型的方法, 最后利用基于 C++ 和 OpenGL 实现的原型系统进行实验分析. 实验结果表明该方法计算简单、建模效率高, 且适用于影视特效制作、3D 网络游戏、医学美容等领域.

**关键词:** 3D 人脸模型; 关键特征点; 姿态矫正; 模型变换; 纹理映射

## Application-Oriented Construction of Personalized 3D Face Model

LU Hong<sup>1</sup>, LIAO Long-Long<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Zijin College, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210046, China)

<sup>2</sup>(Laboratory of Information Technology, Nanjing Sport Institute, Nanjing 210014, China)

**Abstract:** Realistic 3D face modeling has become the focus of researches in computer graphics, but the existing researches have not provide a convenient, efficient, realistic 3D face models generation method. Based on the analysis of pose correction and transformation of 3D face model, a method of personalized 3D face modeling by matching a few key feature points is discussed, which need only a face picture and a common 3D face model. Then, a prototype system was implemented using C++ and OpenGL, and the experimental results suggest that the proposed method is easy and efficient, and can be widely used in film and advertising, 3D network games, and medical hairdressing, etc.

**Key words:** 3D face model; key feature points; pose correction; model transform; texture mapping

## 1 引言

计算机系统性能的提升和计算机图形学技术的广泛应用, 促使真实感 3D 人脸模型在远程视频会议、网络虚拟教学、3D 虚拟社区、影视广告、3D 虚拟游戏、医学美容、电子商务等领域的应用得到快速发展, 但个性化 3D 人脸模型的生成效率和真实感程度成为影响其普及的重要因素. 尽管 3D 建模师可以利用 3DS Max、Maya、Blender 等专业 3D 建模软件制作真实感很高的 3D 人脸模型, 但由于该方法需要专业技术人员耗费大量时间和精力, 设计和制作成本较高, 无法满足普通用户根据自己的人脸特征自动生成个性化 3D 真实感人脸模型的实际需求. 目前, 3D 人脸模型的

生成技术研究主要集中在以下几个方面: (1)利用三维激光扫描仪获得真实人脸的点云数据, 经过对这些点云数据的处理, 利用相应人脸图像进行纹理映射而获得个性化 3D 人脸模型, 这种方法所需要的技术设备昂贵, 对于普通用户来说并不适用; (2)利用单张人脸照片重构特定的 3D 人脸模型, 这种方法往往由于从二维人脸照片中提取的特征信息有限, 导致重构的 3D 人脸模型逼真度较低, 而且一般需要较长的计算和处理时间.

为此, 研究一种适用于各种应用场景的个性化 3D 人脸模型的快速生成技术, 提高 3D 真实感人脸模型的生成效率和逼真度, 对于促进真实感 3D 计算机图

<sup>①</sup> 收稿时间:2013-08-03;收到修改稿时间:2013-09-17

形技术的广泛应用具有重要的意义. 本研究将为用户提供一种便捷的、可编辑的真实感 3D 人脸模型生成技术, 解决 3D 人脸模型数据处理量大、应用范围有限、系统稳定性差和精确度较低等问题.

## 2 3D人脸模型的姿态矫正与变换

### 2.1 3D人脸模型的姿态矫正

由于实际所获得的 3D 人脸网格模型受旋转、视图切换等操作的影响, 并不满足利用正面人脸照片进行纹理映射生成真实感 3D 人脸模型的要求. 为此, 首先对 3D 人脸模型进行姿态矫正. Cartoux J.Y. 等提出利用 3D 人脸模型的近似对称性寻找对称平面和对称点来进行 3D 人脸的姿态矫正, 但这种方法要求鼻尖点坐标 Z 值是整个 3D 人脸模型坐标 Z 坐标轴上所有顶点的最大值, 对 3D 模型有一定的限制, 且普适性较差<sup>[1]</sup>. 为提高 3D 人脸模型姿态矫正的普适性, 丁立军等基于 Clifford 代数理论提出一种新的 3D 人脸模型姿态矫正方法<sup>[2]</sup>: 首先, 在 3D 人脸模型上确定三个不共线的特征点, 并根据这三个特征点确定 3D 人脸模型的正面及其法向量; 其次, 根据所构造的 Clifford 代数的几何旋转算子对 3D 人脸模型的顶点坐标进行旋转, 使 3D 人脸模型正面法向量与 Z 轴重合, 眼睛连线向量与 X 轴重合, 这时 3D 人脸模型正面便可处于三维空间坐标系的正视图且眼睛保持水平.

### 2.2 3D人脸模型变换

由于种族、年龄、性别等特征均会影响人脸的形状, 为提高个性化 3D 人脸模型与人脸正面照片中人脸轮廓和细节特征的相似性, 在进行人脸关键特征点匹配和纹理映射之前, 需要根据人脸正面图像特征对 3D 人脸模型进行整体变换和局部变换.

#### (1) 整体变换

由于 3D 人脸模型可近似看作 3D 空间中一个长方体的变形, 3D 人脸模型正面的平行投影位于一个长方形区域内, 从而确定 3D 人脸模型 X 轴和 Y 轴方向的相对长度, 3D 人脸面部中心到后脑勺之间的距离可以确定 3D 人脸模型 Z 轴方向的相对高度. 这样, 以图 1 所示的 A、B、C、D 四个顶点作为确定人脸面部区域的四个关键特征点, 对人脸面部进行水平方向(DB 方向)和垂直方向(AC 方向)方向上的缩放变换, 使得 3D 人脸模型面部的轮廓与人脸图像中的人脸轮廓相匹配. 同时, 如图 2 所示, 以双眼眼角连线的中点 O 和其垂直方

向上对应的人脸 3D 模型后脑勺的最高点 P 之间的连线为基准, 按照 3D 人脸模型正面矩形区域面积的缩放比例沿线段 OP 对 3D 人脸模型的厚度进行同比例的缩放变换, 以保持人脸 3D 模型的整体比例关系不变.

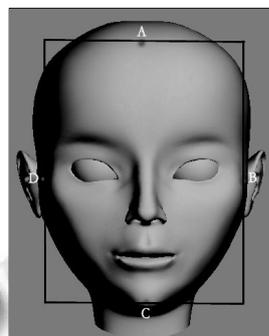


图 1 3D 人脸 X 轴和 Y 轴线平面上的矩形区域

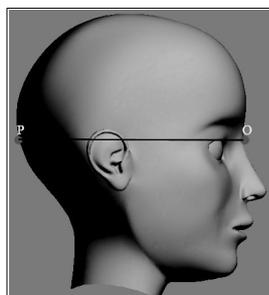


图 2 3D 人脸 Z 轴方向的相对长度

#### (2) 局部变换

利用人脸的几何特征提取具有尺寸、旋转和位移不变性的人脸特征点后, 可以快速、有效地确定双眼、鼻子和嘴巴等人脸关键器官的位置<sup>[3]</sup>. 这里选择如图 3 所示的 10 个关键特征点作为 3D 人脸模型局部变换的关键特征点, 以标识左右眼睛、鼻子、嘴巴的轮廓及其在人脸正面区域的位置<sup>[4]</sup>. 利用 3D 仿射变换可以对选中的人脸主要器官进行大小缩放、位置平移等局部变换, 使 3D 人脸模型中主要器官的形状和位置与人脸照片中相应器官的形状和位置接近.



图 3 3D 人脸模型局部变换的 10 个关键特征点

### 3 人脸关键特征点的分布与获取

#### 3.1 人脸关键特征点的分布

人脸纹理不仅包含人脸的肤色信息,而且包含眼睛、鼻子、嘴巴等人脸主要器官的形状信息,按照普通 3D 模型纹理映射的基本过程直接对 3D 人脸模型进行真实感纹理映射,往往会出现人脸主要器官错位的现象.所以,在进行真实感 3D 人脸模型的纹理映射之前,需要进行人脸关键特征点匹配和 3D 人脸模型参数化处理.

人脸关键特征点可以方便地标识人脸主要器官的特征信息,其选择方法及其关键特征点的个数直接影响到个性化 3D 人脸模型构建技术的可用性和实用性.因此,人脸关键特征点的选择不仅要反映人脸主要器官的位置、轮廓等几何形状特征,而且要能被很容易地提取和标识,同时关键特征点的个数要包含足够的位置和几何形状信息,但人脸关键特征点又不能太多,以免增加个性化 3D 人脸模型生成算法的复杂性.

HWANG B-W 等提出使用如图 4 所示的 22 个特征点表征人脸的形状信息,虽然这 22 个关键特征点详细标识了人脸面部主要器官的特征信息,但对于人脸面部轮廓的并没有进行很好的表示<sup>[5]</sup>.宋刚等提出使用如图 5 所示的 22 个人脸器官特征点和 8 个人脸形状轮廓特征点表征人脸的特征信息,但额头区域缺少相应的特征点来表示<sup>[6]</sup>.



图 4 人脸的 22 个关键特征点分布



图 5 人脸的 30 个关键特征点分布

本文采用如图 6 所示的 26 个人脸关键特征点标识人脸轮廓与主要器官的特征,并以此作为 3D 人脸模型正面平行投影图中关键特征点与人脸纹理之间关键特征点匹配的依据,即在 3D 人脸模型的正面平行投影图中找到相应的网格顶点,使其与人脸纹理中的对应特征点达到准确匹配.



图 6 人脸的 26 个关键特征点分布

#### 3.2 人脸纹理关键特征点的获取

人脸纹理来自二维人脸图像,而二维人脸关键特征点获取方法主要有主动形状模型(Active Shape Model, ASM)、主动表象模型(Active Appearance Model, AAM)及其一些改进算法. ASM 算法基于人工标注的人脸关键特征点训练集,利用全局约束和局部搜索相结合的方法进行人脸特征点的定位<sup>[7]</sup>; AAM 算法是对 ASM 算法的一种改进,它考虑了全局信息的约束,采用形状(特征点之间的关联构成的有向图)变化模型和纹理(形状内的亮度和色彩)变化模型相结合的统计约束方法,通过模型中参数调整使 AAM 模型不断接近实际的输入模型,被广泛应用在人脸特征点定位和人脸识别方面<sup>[8]</sup>.基于 AAM 算法的人脸纹理图像关键特征点获取包括形状模型和纹理模型的构建两个步骤<sup>[9,10]</sup>.

##### (1) 形状模型

形状模型主要是指不受平移、旋转、缩放等几何变换影响的几何形状特征,目标形状可定义为一系列二维坐标点的集合,如式(1)所示.

$$S = ((x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_n, y_n))^T \quad (1)$$

其中,  $S$  表示目标形状,  $(x_i, y_i)$  为手工标注的二维坐标点的集合.首先,将每个样本形状与平均形状进行对齐,然后利用主成分分析(Principal Component Analysis, PCA)方法便可得到使用平均形状  $S_0$  和  $n$  个形状向量  $s_i$  表示的目标形状,如式(2)所示,其中  $p_i$  为一组形状参数.

$$S = S_0 + \sum_{i=1}^n p_i s_i \quad (2)$$

## (2) 纹理模型

首先将目标形状映射到平均形状, 消除因形状差异所导致的纹理变化, 然后对纹理采用后的纹理信息进行 PCA 分析, 纹理信息便可表示为平均纹理  $A_0$  和  $m$  个纹理向量的  $A_i$  的线性组合, 如式(3)所示.

$$A(x) = A_0(x) + \sum_{i=1}^m \lambda_i A_i(x) \quad (3)$$

其中,  $\lambda_i$  表示纹理向量  $A_i$  对应的目标纹理参数.

### 3.3 3D 人脸模型关键特征点的获取

在三维人脸模型特征点提取方面, Salah 等利用增量混合因子分析统计建模方法和结构修正方法来定位三维人脸模型特征点, 但该方法对噪声比较敏感, 且对预处理过程有较高的要求<sup>[11]</sup>. Conde 等基于曲率计算的聚类 and 全局配准方法, 利用旋转图像定位三维人脸模型的特征点<sup>[12]</sup>; 关鹏等在利用贝塞尔曲面表达人脸关键特征点附近的局部三维曲面结构基础上, 采用局部搜索和全局形状模型约束方法精确定位三维人脸特征点<sup>[13]</sup>. 王蜜宫等基于局部形状索引和局部形状图(Local Shape Map, LSM)的统计模型进行三维人脸关键特征点的获取<sup>[14]</sup>. 曲率分析(Curvature Analysis)是利用高斯曲率、最小曲率、最大曲率等曲面分析方法标识三维曲面的局部形状特征, 这里首先利用曲率表示的局部形状索引与曲度(Shape Index and Curvedness, SC)来标识三维人脸模型上的候选特征点, 然后再利用 LSM 统计模型实现三维人脸模型关键特征点的精确定位.

#### (1) 标识候选关键特征点

设形状索引  $S$  包含除平面之外的所有形状, 正数  $C$  表示一个顶点的局部曲面的曲度, 若某点的曲度为零则表示该点在平面上,  $S$  和  $C$  的定义分别如式(4)和式(5)所示.

$$S = \frac{2}{\pi} \times \arctan\left(\frac{k_1 + k_2}{k_1 - k_2}\right) \quad (4)$$

$$C = \sqrt{\frac{k_1^2 + k_2^2}{2}} \quad (5)$$

SC 算法能更好地适用于包含多种曲面和噪声的场景, 尤其是在 3D 人脸不同区域的曲面形状描述方面具有一定的优势, 能够用来标识 3D 人脸的候选关键特征点.

#### (2) 精确定位关键特征点

设  $p$  是曲面  $R$  上的一个顶点,  $n$  是经过  $p$  点的单位法向量,  $TP_p$  是过  $p$  点的切平面, 则曲面  $R$  上的每个顶点  $p_k$  都与变量  $\rho(k)$  和  $d(k)$  相关, 其中  $\rho(k)$  表示  $p$  点和  $p_k$  点之间的距离,  $d(k)$  表示从点  $p_k$  到切平面  $TP_p$  的位移, 分别如式(6)和式(7)所示.

$$\rho(k) = \|p - p_k\| \quad (6)$$

$$d(k) = n \cdot (p_k - p) \quad (7)$$

由于曲面上一个点的 LSM 是一个二维直方图, 为获取曲面上点  $p$  的局部形状描述, 将曲面放置在一个以点  $p$  为球心、以  $r$  为半径的球体内, 球体内部所有曲面上点的二维直方图就是点  $p$  的局部形状图(LSM). 由于人脸模型上不同点所对应的 LSM 不同, 而人脸模型上的每个候选关键特征点将会形成特殊的 LSM, 通过式(8)所示的方法计算每两个候选关键特征点 LSM 之间的相似度来实现 3D 人脸模型关键特征点的精确定位.

$$Cor(M^1, M^2) = \frac{\frac{1}{N} \sum_{ij} M_{ij}^1 M_{ij}^2 - \frac{1}{N^2} \sum_{ij} M_{ij}^1 \sum_{ij} M_{ij}^2}{\sqrt{D(M^1) \times D(M^2)}} \quad (8)$$

$$\text{其中, } D(S) = \frac{1}{N} \sum_{ij} (S_{ij})^2 - \left( \frac{1}{N} \sum_{ij} S_{ij} \right)^2$$

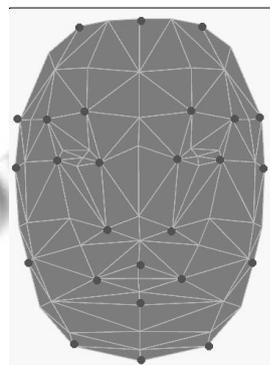


图 7 获取的三维人脸模型上的 26 个关键特征点

## 4 3D 人脸模型的纹理映射

### 4.1 3D 人脸模型参数化

三维人脸模型参数化是将三维人脸模型投影到二维平面上, 得到其参数化的二维人脸网格图, 然后利用该二维参数化网格实现三维人脸模型和二维人脸图像之间的关键特征点匹配和纹理映射. 对 3D 人脸模型进行参数化处理, 可建立 3D 人脸模型上三维空间点  $(x, y, z)$  与二维参数化平面上点  $(u, v)$  之间如式(9)所示的映射关系<sup>[15]</sup>. 三维人脸模型参数化往往会出现面积或

角度失真的问题,为尽可能减少或者避免这种失真,本文采用三维圆柱体作为中间几何对象,采用柱面投影方式实现三维人脸模型的参数化,这样可使得到的二维参数化网格平面完整地保留人脸主要器官的特征信息.

$$(u, v) = g(x, y, z) \tag{9}$$

#### 4.2 真实感 3D 人脸纹理映射

在真实感 3D 人脸模型的纹理映射过程中,映射区域是 3D 空间中的 3D 人脸模型上的一个平面或曲面,其关键是确定纹理图像和映射区域之间的对应关系,即建立三维空间坐标  $(x, y, z)$  与二维纹理空间坐标  $(s, t)$  之间的映射关系. 由于 3D 人脸模型可近似为一个圆柱体,在进行真实感 3D 人脸模型的纹理映射时一般采用基于柱面投影的方法来实现,其基本映射算法是将 3D 人脸模型放置于一个圆柱体内部,使 3D 人脸模型的中轴线与圆柱的轴线重合,然后找到 3D 人脸模型上顶点与圆柱体表面上点之间的投影关系,然后再将圆柱面映射到纹理空间,从而通过圆柱面这一中间曲面建立二维人脸纹理图像与 3D 人脸模型之间的映射关系<sup>[16]</sup>. 假设 3D 笛卡尔直角坐标系中的三维人脸模型的中轴线与 Y 轴重合,双眼所视方向为 Z 轴正方向,沿着 Y 轴的反方向所看到的 3D 人脸模型的投影图如图 8 所示.

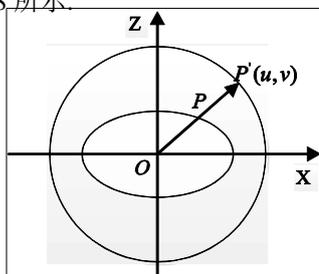


图 8 真实感 3D 人脸模型纹理映射

假设 3D 人脸模型的圆柱投影面的原点为  $O$ , 沿着人脸模型后脑勺的垂直中线展开后所得到的圆柱横截面的半径为  $r$ , 直线  $PP'$  与圆柱侧面的夹角为  $\theta$ , 那么 3D 人脸模型上的点  $P(x, y, z)$  与中间圆柱侧面上的点  $P'(u, v)$  之间的映射关系如式(5)所示<sup>[17]</sup>:

$$\begin{cases} x = r \cos \theta \\ y = r \sin \theta \\ z = z \end{cases} \tag{5}$$

将人脸图像中的纹理值映射到中间圆柱体侧面之后,根据中间圆柱体侧面上的空间点与 3D 人脸模型曲面上的空间点之间的映射关系来确定 3D 人脸模型上每个顶点对应的纹理值,便可实现真实感 3D 人脸模型的纹理映射,从而快速生成具有个性化的真实感 3D 人脸模型.

#### 5 实验结果与分析

为验证本文所研究的个性化 3D 人脸模型快速生成方法的有效性和可行性,我们采用 C++ 和 OpenGL 开发了一个原型系统. 这里采用一个普通 3D 人脸网格模型和一张人脸正面照片进行个性化 3D 人脸模型快速生成实验,如图 9 所示主要包括以下三个步骤:(1)对 3D 人脸模型进行姿态矫正,使 3D 人脸模型正面处于三维空间坐标系的正视图且眼睛保持水平;(2)参照人脸正面图像对 3D 人脸模型进行整体变换和局部变换,构建与真实人脸轮廓和细节特征相匹配的 3D 人脸模型;(3)依据如图 7 所示的 26 个人脸特征点进行关键特征点匹配和真实感纹理映射,构建具有人脸正面照片特征的个性化 3D 人脸模型.

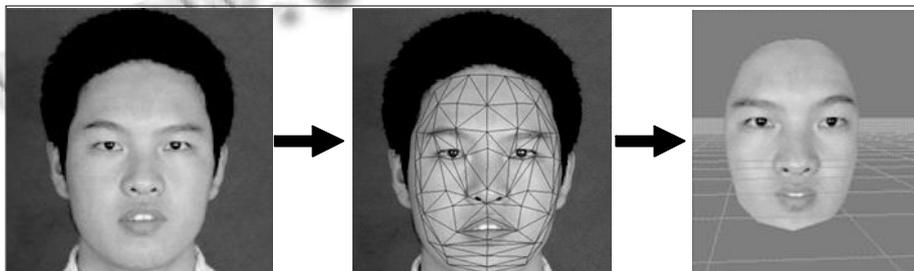


图 9 个性化 3D 人脸模型的快速构建过程

实验证明,参考人脸正面图像对 3D 人脸模型进行姿态矫正、整体轮廓和局部细节变换之后,利用纹理映射算法可快速生成逼真度较高的个性化 3D 人脸

模型,而不会在纹理映射过程中出现部分人脸主要器官发生纹理偏移或错位的问题,而且系统的可靠性和稳定性较高.

## 6 结语

本文研究了一种基于人脸正面图像和 3D 人脸模型快速生成具有个性化特征的真实感 3D 人脸模型的方法, 实验证明该方法具有较好的普适性和应用价值. 例如, 在影视广告制作方面, 利用个性化 3D 人脸模型快速生成技术可根据影视广告的宣传需求和艺术展示要求对 3D 人脸模型进行风格化处理, 构建更具有个性化特征的三维卡通人物形象; 在 3D 网络游戏方面, 可利用个性化 3D 角色生成技术根据游戏玩家或影视明星的外貌特征构建具有真实感的个性化 3D 游戏角色, 增强网络虚拟游戏的真实感和沉浸感; 医学美容主要是利用医学技术和方法对人的容貌和身体具体部位进行修复、再造等, 面部美容是医学美容的核心内容之一, 在医学美容领域引入 3D 人脸快速生成技术, 利用个性化 3D 人脸模型作为面部美容的试验对象, 可为医学美容手术提供重要的实践环境, 通过模拟实验提高医学美容从业人员的业务水平, 同时个性化 3D 人脸模型快速构建技术也能为面部美容消费者提供个性化的美容方案, 使美容消费者看到术后的预期美容效果, 减少医学美容方面的医患纠纷.

## 参考文献

- 1 Cartoux J.Y., LaYreste J.T., Kichetin M. Face authentication or recognition by profile extraction from range images. Proc. of the Workshop on Interpretation of 3D Scenes. Tokyo. 1989. 194-199.
- 2 丁立军, 冯浩, 华亮. Clifford 代数 3D 人脸姿态矫正方法. 小型微型计算机系统, 2013(4):906-909.
- 3 丁宾, 孙天凯, 鞠训光, 等. 基于单张图像的三维人脸建模与表情动画. 计算机工程与设计, 2012, 33(7):2744-2747.
- 4 谭玉玺, 孙延奎, 唐泽圣. 基于特征点加细的多分辨率人脸形变模型及人脸建模. 计算机应用, 2011, 31(1):61-64.
- 5 Hwang BW, Blanz V, Vetter T, et al. Face reconstruction from a small number of feature points. International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Barcelona, Spain. 2000. 842-845.
- 6 宋刚, 艾海舟, 徐光祐. 纹理约束下的人脸特征点跟踪. 软件学报, 2004, 15(11):1607-1615.
- 7 Cootes TF, Taylor CJ, Cooper DH, Graham J. Active shape models-their training and application. Computer Vision and Image Understanding, 1995, 61(1): 38-59.
- 8 Matthews I, Baker S. Active appearance models revisited. International Journal of Computer Vision, 2004, 60(2): 135-164.
- 9 黄琛, 丁晓青, 方驰. 一种鲁棒高效的人脸特征点跟踪方法. 自动化学报, 2012(5):788-796.
- 10 郑博, 毛剑飞, 梁荣华. 基于纹理权重的 AAM 人脸特征点检测方法. 浙江工业大学学报, 2012, (6):661-665.
- 11 Salah AA, Cinar H, Akarun L, et al. Robust facial landmarking for registration. Annals of Telecommunications, 2007, 62(12): 1608-1633.
- 12 Conde C, Cipolla R, Rodr Guezarag LJ. 3D facial feature location with spin images. IAPR Conference on Machine Vision Applications. Tsukuba Science City, Japan. 2005. 418-421.
- 13 关鹏, 张立明. 基于贝赛尔曲面的三维人脸特征点定位方法. 复旦学报(自然科学版), 2008, (1):117-123.
- 14 王蜜宫, 陈锻生, 林超. 基于局部形状图的三维人脸特征点自动定位. 计算机应用, 2010, (5):1255-1258.
- 15 魏衍君, 郑青碧. 一种改进的人脸纹理映射方法. 计算机仿真, 2012, 29(1):253-256.
- 16 李军锋, 姜昱明. 具有真实感的虚拟人脸合成. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2003, (8):525-529.
- 17 张羽中, 郝重阳, 樊养余, 王毅等. 具有照片真实感的三维特定人脸的生成. 西北工业大学学报, 2005, 23(1):65-69.