# 真实感人脸建模研究的进展与展望*

徐 琳[1,2+], 袁保宗[1], 高 文[3]

[1](北方交通大学 信息科学研究所,北京 100044)
[2](国家自然科学基金委员会 信息科学部,北京 100085)
[3](中国科学院 计算技术研究所,北京 100080)

# Development and Prospect on Realistic Facial Modeling

XU Lin[1,2+], YUAN Bao-Zong[1], GAO Wen[3]

[1](Institute of Information Science, North Jiaotong University, Beijing 100044, China)
[2](Division of Information Science, National Natural Science Foundation of China, Beijing 100085, China)
[3](Institute of Computing Technology, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)
+ Corresponding author: Phn: 86-10-62327141, E-mail: xulin@nsfc.gov.cn
http://www.nsfc.gov.cn
Received 2002-12-02; Accepted 2002-12-16

**Xu L, Yuan BZ, Gao W. Development and prospect on realistic facial modeling. *Journal of Software*, 2003,14(4):804~810.**

**Abstract**: The research on computer synthesis realistic human face is a hot point and meanwhile a difficulty in the area of computer graphics. In this paper, the realistic human face synthesis procedure as a lead, the research on constructing realistic human face model is made a comprehensive survey from three aspects: acquisition of face data, constructing geometry model and generation of realistic human face. And its application and research directions in the future are predicted.
**Key words**: human face; modeling; survey

**摘 要**: 计算机合成真实感人脸是计算机图形学研究的一个热点,也是一个难点.以真实感人脸合成的过程为线索,从脸部数据的获取、人脸几何建模和真实感人脸生成这 3 个方面对近 30 年以来的真实感人脸建模方面的研究进行了详细的综述,并对其应用和未来的发展作了简要的介绍.
**关键词**: 人脸;建模;综述
**中图法分类号**: TP391 **文献标识码**: A

面部是非常重要而又复杂的交流通道,逼真的面部合成是计算机图形学中最根本的问题之一,同时也是最困难的问题之一.人脸的计算机模拟长期以来一直是计算机图形学以及人机交互中非常活跃的研究领域.而真

* Supported by the National Natural Science Foundation of China under Grant No.69789301 (国家自然科学基金); China Postdoctoral Foundation (中国博士后基金); the Railway Department Key Laboratory of Information Science and Engineering of Railway Foundation of China under Grant No.TDXX0207 (铁道部"铁路信息科学与工程"开放实验室基金)

**第一作者简介**: 徐琳(1964－),女,浙江宁波人,博士,副教授,主要研究领域为计算机图形学,人工智能.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

实感人脸合成应用于诸如电影、广告人物动画、计算机游戏、视频会议、人机接口、面部外科手术、电视节目、计算机辅助手语教学以及心理学、认知科学等许多领域[1].人脸动画系统能够丰富人-机接口,增强系统非口语语言通信及表情信号的能力,使人机接口更令使用者感兴趣,且更易于使用.

人脸建模及动画的开创性工作是 Parke 在 20 世纪 70 年代做的[1].20 世纪 80 年代中期,大家对此主题的研究重新产生了强烈的兴趣,Waters 等人提出了广泛应用的肌肉模型方法[2].Cohen 和 Massaro 以及其他很多研究者对可视化语音合成进行了初步的尝试[3].随着网络技术的普及,世界上第一个网上虚拟播音员 Ananova 在伦敦发布,计算机合成的 Ananova 可以一天 24 小时发布新闻.由于人脸建模及动画的广泛应用,脸部建模研究得到了应有的重视,美国国家自然科学基金委员会在 1993 年专门组织了脸部建模的研讨会.MPEG-4 标准中也专门制定了人脸模型参数规范.

## 1 脸的生理结构

人脸是一个层次化结构,它由头骨、肌肉层、覆盖的结缔组织和外部皮肤层组成.人脸表情的产生是由于脸部肌肉的变形引起的.使人脸具有特定表情所涉及的主要肌肉有口轮匝肌、鼻肌、颧肌、眼轮匝肌、皱眉肌等[1].唇部的状态主要由口轮匝肌协作完成,皱鼻子主要是由于鼻肌的收缩,颧肌的收缩会造成颧骨处脸颊的提高,眼睛及眼部周围的状况主要是由眼轮匝肌收缩导致的.另外,皱眉肌也对眉毛起一定的作用.

## 2 真实感人脸合成

通常,真实感人脸合成包括以下 3 个过程:脸部数据的获取、设计脸部模型(3D 人脸几何建模)、模型化脸部表情(生成真实感人脸).通过人体测量学对相似的面部进行测量,对其结果进行统计,生成脸的统计学数据.这些统计学数据被当作对参数化表面的约束[2].对特定人脸的建模依然需要用户输入大量的数据,但现在也可以通过激光扫描仪和立体摄像机等自动实现[4,5].

### 2.1 人脸几何建模

人脸几何建模就是把真实人脸的框架标准化,然后用网格表示出来,作为将来生成真实感人脸和面部动画的基础.真实人脸几何建模非常困难并且很耗时间,这是因为人脸高度光滑且形状复杂,并且人们对它的每一个细节都非常熟悉[6].

#### 2.1.1 脸部网格生成方法

对于 3D 人脸几何建模,通常情况下,为了把脸表达得更加详细、生动,总是希望网格数越多越好,但是考虑到计算代价,又不可能把网格数无限制地增加.3D 人脸几何建模的最基本要求是,能够表达清楚脸部的明显特征,同时希望网格数尽可能的少[7].文献[5,8~10]给出了几种不同的网格生成方法.

脸部模型生成方法大致可以分为 3 种:多边形建模技术[8]、曲面建模技术[9]和体网格建模技术[10].这 3 种方法在生成脸部模型上各有优缺点,但控制表面形状的目标却是一致的.

早期用于人脸几何建模的技术大多为多边形建模技术,包括矩形网格和三角形网格,后来发展出了自适应网格[5].文献[5]用自适应网格方法建立非均匀脸部网格(数据来自扫描图像),建立真实感的脸和头(采用 hierarchical method),输入动态控制参数产生动画.这种动态控制参数方法与图像分析方法相结合,为合成高度真实感人脸提供了一种可能,运用这种方法可以获得精细的脸部几何结构和纹理,合成各种脸部变形,实现自然的、完全可控的脸部动画.

曲面建模技术主要包括样条模型[9]和有限元模型[11].有限元方法用于更精确的皮肤形变计算,如整形外科手术等[11].

文献[9]采用 4 层 NURBS 脸模型实现了文本驱动的唇动发声系统.采用 NURBS 是因为 NURBS 可以增加脸部光滑程度且变形容易.由于 B 样条控制的精确性,实现的脸模型可以任意精度忠实于原始人脸.但是,由于 B 样条的控制不是直接基于脸部特征,而是基于其形状,尤其是在曲率变化比较大的地方,这对于其理解和实现非常不方便.另外,B 样条无法实现孔、洞等形状,导致该模型被人为地分成了 3 个表面:眼睛中线以上的表面、眼

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

睛中线到嘴中线的表面和嘴中线以下的表面.这种实现方式使得人们无法通过控制顶点运动来实现睁眼、闭嘴等运动.

2.1.2 脸部各组成部分建模

(1) 上、下颚运动合成

人的上、下颚包括两个很复杂的关节,其中下颚可以绕 3 个轴旋转,运动尤其复杂.上、下颚关节的特殊造型再加上其周围的肌肉,使得其很适合于高效处理食物[12].咀嚼运动的特点是上、下颚关节在运动,但嘴是闭的,脸部的皮肤依然保持中性状况.文献[13]中的 JACK 建立了简单的上、下颚模型.Kunii 等人提出了一种自动估计上、下颚闭合和咀嚼能力的方法[14],但是该方法偏重于牙齿的承受能力和咬合过程,更适用于计算机辅助诊断上、下颚无力症状.文献[15]发展了文献[13]中的模型,建立了一个可以覆盖大部分上、下颚运动的简化的关节模型,并应用该模型实现了吃和咀嚼的动作,其中脸部模型采用双层模型.

(2) 皮肤和皱纹的生成

皱纹是人脸最重要的宏观结构之一,通常有两种类型的皱纹存在,一种是表情皱纹,另一种是年龄皱纹.表情皱纹出现在所有人的脸上,并且随着时间的推移变得永久可见,它是理解面部表情的一个非常重要的因素.年龄皱纹是由于年龄变化而引起的,随着时间的推移,人脸上将会产生越来越多的年龄皱纹,面部皮肤的整个外观和纹理变得明显且粗糙.永久可见的皱纹可以表明一个人的年龄.

对皮肤和皱纹的模拟有两个要求,一个是静态的逼真,另一个是运动的合理.针对这两个要求,人们提出了很多种模型,采用了大量的方法.这些模型主要用于描述皮肤和皱纹的动力学特性[16],常用的模型有几何模型、基于物理的模型和生物机械模型.它们或者使用粒子系统,或者使用连续系统.这些常用的方法主要是为了提供高效、高质量的静态皮肤和皱纹的模拟,比如凸表面颜色映射技术[17]和纹理合成语言[18]常用于爬行动物的皮肤处理;面部数据记录和微几何模型[19]常用于模拟人脸皮肤纹理图案.

文献[20]结合纹理方法和基于物理的模型实现了一个包括年龄变化在内的人脸部皮肤和皱纹模拟的计算机动画系统.基于物理的脸部动画模型使用一个三层结构,由皮肤层、结缔组织层和肌肉层组成.皮肤形变由模拟的肌肉层触发,由结缔组织层约束,由生物机械模型决定.皱纹结构和描述细节由若干颜色层、扰动或位移纹理映射表示,纹理图像由合成图像及真实的照片组成.静态皱纹模型以纹理图像表示,采用脸模型皮肤形变值作为动力学皱纹模拟的变形度量,皱纹形状信息用于修改合成的皱纹模式对应的纹理图像[21].

(3) 头发建模

在人脸图像中,头发起着重要的作用.但是合成具有真实感的 3D 计算机头发图像仍然费时、费力[1].头发的合成方法可以分成两类:显式模型(explicit model)[22~26]和体积密度模型(volume density)[27~29].显式模型非常直观,头发的建模和绘制的直接目标是每一缕头发,是一种微观处理头发的方式,头发合成的粒子模型(partcle model)也可以归入这一类.与之相对应,体积密度模型定义了一个头发的三维空间分布密度函数,然后应用光线跟踪技术(ray-tracing technique)去计算头发表面轮廓的颜色和光照,这是一种宏观处理的方法.体积密度模型更抽象一些.

文献[30]提出了一个基于三棱体束模型合成 3D 头发图像的显式方法,该方法还可以处理头发的一些宏观性质.文中实现的系统应用三棱体束模型、2D 头发分布图和其他计算机图形学技术,成功且有效地合成了真实的头发图像.该文还建立了 3D 头发编辑工具,用以支持 3D 头发的创建.

### 2.2 真实感人脸的生成

真实感人脸就是指计算机合成的具有特定人的喜、怒、哀、乐等表情以及脸部各种特征的人脸模型.从人的视觉要求出发,总是希望合成的人脸能够尽可能地达到逼真,但是由于受模型和计算机能力的限制,合成的图像总是与人们的要求有一定的差距.

真实感人脸的合成过程是一个由几何模型代表的一般人脸到特定人脸的变换过程,或者也可以说是一个映射过程.从 20 世纪 70 年代以来,真实感人脸合成已经得到了长足发展,大体上可以分为 3 个阶段:70 年代以来的参数模型、80 年代以来的肌肉模型和近年来基于图像的建模与绘制技术.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

2.2.1 20 世纪 70 年代以来的参数模型

该模型以 Parke 为代表[1,6,8],在人脸参数模型中,应该考虑两种参数:特定人标识参数和人脸表情控制参数.这些人脸模型由于只把人脸描述为一种几何的线框结构,仅将面部行为用简单的表面几何形状来模拟,而没有从生理的角度对人脸面部行为的驱动机制进行考虑,这样就降低了合成真实感人脸的能力.

2.2.2 80 年代以来的肌肉模型

头、面部是骨头、软骨、肌肉、神经、血管、腺体、脂肪组织、结缔组织、皮肤和头发组成的复杂集合.目前还没有用于面部动画的、完全包括这些脸部部件的、完整的、详细的模型.但是,已经开发了一些基于面部骨骼结构、肌肉、结缔组织和皮肤的简化模型,这些模型主要基于面部肌肉特征,具有模拟面部表情的能力.肌肉模型由 Platt 提出[31],Water[32],Magnenant Thalmann[33,34]等人对其进行了发展和改进.

(1) 人脸表情编码系统(FACS)

广泛使用的描述脸部表情的方案是 Ekman 等人提出的[35].它描述了 44 个能够独立运动的面部动作单元,这些单元与导致面部表情改变的肌肉结构紧密相连.在这个系统中,Ekman 等人还研究并鉴别了 6 种基本表情,分别表示怒、厌、怕、喜、哀、惊,其特点可参见文献[35].Ekman 开发这个系统作为描述或编码面部表情的手段,它包括所有可以独立控制的肌肉的运动.这个描述方案虽然不是专门为计算机人脸动画设计的,但是它已经被用作计算机面部表情控制的基础.

(2) 简单肌肉模型

Platt 和 Badler(1981)开发了一个部分脸模型[31],其脸表面(皮肤)的顶点弹性地相互连接,并且通过具有弹性和收缩性的肌肉连接到基本骨骼上.脸部表情通过把力作用于由基本肌肉弹性连接的皮肤网格进行控制.所有的肌肉运动都模仿 FACS.

1987 年,Waters 等人[32]对 Platt[31]的模型进行了发展和改进,以人脸的解剖学为基础,开发了一个新的脸模型,既考虑了脸部的肌肉活动,也考虑了脸部的结缔组织层对肌肉运动的影响.这种模型将人脸描述为一种层状结构的实体,层与层之间有许多弹簧相连,采用跟踪非刚性的面部特征运动,以达到合成瞬间表情的目的.Waters 模型包括两类肌肉,产生拉伸的线性肌肉,产生挤压的括约肌.像 Platt[31]一样,他用了一个简单的皮肤和肌肉的弹簧质量模型.但他的肌肉拥有向量属性,独立于基本的骨骼结构.这使得肌肉模型独立于特定的脸部拓扑.每块肌肉都有一个影响区域.特定肌肉的影响随着到肌肉向量点的径向距离而减小.Waters 也使用基于 FACS 的控制参数.

(3) 伪肌肉模型(抽象肌肉模型)

Magnenat-Thalmann 等人于 1988 年开发了另外一个肌肉模型[33],其中控制参数是“抽象肌肉运动(AMA)”过程,这些 AMA 过程与 FACS 运动单元有一定的相似性,但又不完全相同.这些 AMA 过程不是独立的,运动的顺序非常重要.该模型允许通过控制低级 AMA 过程和高级“表情”参数值进行面部控制.

由于肌肉模型以及驱动人脸行为的内在变形机制的引入,使人脸模拟的真实感得到了很大的提高,其缺点是实现起来相对比较复杂.

2.2.3 近年来基于图像的建模与绘制技术

在这种方法中,对真实感人脸的生成是通过选取人脸的不同方位进行拍照,并在至少两张人脸图像的特定位置添加标记,然后数字化[36].

从照片提取真实的脸部特征,合成真实表情的步骤大致如下:首先,在给定表情下,用相机随机地、多方向地拍照;然后在所有的相片上标注特征点,如眼角、嘴角以及鼻子顶部等;然后,这些特征点被用于变形普通三维人脸网格,以适应特定人脸要求;最后,用相片作为纹理来映射至变形脸部,以生成所需要的真实感人脸.文献[36]与前人的研究有所不同的是,它对相机的位置没有要求,不一定要求所处理的照片之间完全统一,照片在灰度和颜色之间可以任意变化.文献[37]对照片纹理图的处理方法进行了详细的介绍.

随着计算机视觉在人脸分析上的逐渐应用,最近又出现了一些新的方法[4,5,22,38,39],用数字化仪获取人面全景三维轮廓信息.文献[5]中提到的 3D 激光自动扫描仪可以在几秒钟之内对人的脸部及肩膀等三维物体扫描 $10^5$ 以上个三维点,由此建立起 3D 几何模型,经过纹理映射生成真实人脸,这样可以避开对真实人脸上无以计数

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

的皱褶和细微的颜色和纹理变化的建模,减少控制点个数.其缺点是增加了图像处理的难度.

综合以上的参数模型、肌肉模型以及基于图像的模型等真实感人脸生成方法可以发现,真实感人脸合成技术已经达到了很高的水平.但是,现有的方法要么过于复杂、实现困难、缺乏实时性,要么生成的人脸过于简单、不逼真,还没有完全满足人类需求的真实感人脸建模的算法.

## 3 应用与展望

### 3.1 应 用

长期以来,人脸的计算机模拟一直是一个活跃的研究领域,计算机合成真实感人脸及其动画可以用于诸如娱乐业、商业、服务业、医学以及教育等很多领域.

文献[40]对 190 个人进行了实验,以探求面部动画的益处.实验结果表明,面部动画有助于用户理解噪音环境下的讲话内容,有效地使等待时间更乐于为用户所接受,使得服务对用户更具有吸引力,特别是当用户直接比较有面部动画和没有面部动画的相同服务时,情况更是如此.

人类交互往往声情并茂,交互手段除了自然语言(口语、书面语)以外,人体语言(表情、手势、体势、口型等)也是人类交互的基本方式之一[41,42].自然语言和人体语言共同组成了人类语言.在人与人面对面的通信过程中,自然语言与人体语言同时或联合传递信息.人脸面部动画作为人体语言研究的一部分,在这方面发挥着重要作用,在聋哑人辅助教学系统中的作用尤其重要.另外,人脸合成技术可以将游戏者本身的形象合成到游戏场景中去,以达到身临其境的效果,从而为今后的游戏设计提供新的思路[43].

在计算机帮助系统及互联网中,真实感人脸建模及动画已经得到了大量的应用,如计算机合成的网上虚拟播音员 Ananova 可以一天 24 小时发布新闻[3].动画指南已经用于用户帮助系统[44,45].带有丰富表情的个人动画已经插入提供读者额外信息的文档中[46].人物动画也已经用于通信系统的接口中,当前已经出现了几个使用 Avatars 的多用户系统[47,48].

MPEG-4 预见到对话头在将来的客户服务中将起到非常重要的作用,如可以为游戏或基于网络的客户服务提供定制的代理模型等[49].MPEG-4 指定了中性状态的脸模型、中性脸上作为参考点的许多特征点以及一个 FAPs 集合[49].基于 MPEG-4 标准,已经实现了很多计算机人脸动画系统[50,51].

### 3.2 展 望

对真实感人脸合成的要求包括以下 4 个方面:逼真性、实时性、尽可能少的手工介入以及对特定人脸的自适应性.由于基于图像的方法更易于满足这些要求,把人们从脸部各种细节无穷无尽的建模中解放出来,以后真实感人脸生成的研究将更多地集中在基于图像的建模与绘制技术上.而在该方法中,人脸图像处理是关键中的关键.人脸图像处理的最终目的是构建一个完全自动的系统,可以自动发现人脸上的特征,而不必在人脸上做任何标记.

通过视频或者早期的电影脚本来建立脸部模型也是一个具有挑战性的课题.为了实现这个目的,需要提高目前已有算法的鲁棒性,以便建立脸部网格和纹理.建立这些网格和纹理的图像与基于图像的方法中采用的同一表情的正交照片完全不同,在这些系统中,用来生成真实感人脸的图像并不完全对应于同一表情的不同视图.增加拟人约束(anthropomophic constraints)到建模过程或许可以降低这些图像之间的拟合难度.

**References**:

[1] Parke FI, Waters K. Computer Facial Animation. Wellesley, MA: A. K. Peters, 1996. 1~365.

[2] Terzopoulos D, Waters K. Techniques for realistic facial modeling and animation. In: Magnenant-Thalmann N, Thalmann D, eds. Computer Animation'91. Tokyo: Springer Verlag, 1991. 59~73.

[3] Parke F, Sweetland D, Waters K, Cohen MM. Siggraph'97 panel on facial animation: past, present and future. 1997. http://mambo.ucsc.edu/psl/sig97/siggraph97-panel.html.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[4] Guenter B, Grimm C, Wood D, Malvar H, Pighin F. Making faces. In: SIGGRAPH 1998 Conference Proceedings: Computer Graphics Annual Conference Series. Orlando: ACM SIGGRAPH, 1998. 55~66. http://www.aw.com/catalog/academic/product/1,4096,0201309882,00.html.

[5] Kähler K, Haber J, Yamauchi H, Seidel H-P. Head shop: Generating animated head models with anatomical structure. In: Proceedings of the ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation. New York: ACM Press, 2002. 55~64. http://portal.acm.org/citation.cfm?id=545261&coll=Portal&dl=ACM.

[6] Parke F. Parameterized models for facial animation. Computer Graphics and Applications, 1982,2(9):61~68.

[7] Lee Y, Terzopoulos D, Waters K. Realistic modeling for facial animation. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series. New York: ACM Press, 1995. 55~62.

[8] Parke F. Computer generated animation of faces. Technical Report, AD-762022, 1972. 1~87.

[9] Ip Horace HS, Chan CS. Script-Based facial gesture and speech animation using a NURBS based face model. Computer and Graphics, 1996,20(6):881~891.

[10] Elson M. Displacement facial animation techniques. In: State of the Art in Facial Animation, ACM Siggraph'90 Course Notes, Vol 26. 1990. 21~42.

[11] Koch RM, Gross MH, Carls FR, Von Buren DF, Fankhauser G, Parish YI. Simulating facial surgery using finite element models. In: Proceedings of the SIGGRAPH'96. 1996. 421~428. http://www.siggraph.org/conferences/siggraph96/core/index.html.

[12] Baragar FA, Osborn W. A model relating patterns of human jaw movement to biomechanical constraints. Journal of Biomechanics, 1984,17(10):757~767.

[13] Badler N, Phillips C, Webber B. Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control. Oxford University Press, 1993. 1~269.

[14] Kunii TL, Karol M, Kunii TL, Myszkowski K, Okunev O, Nishida H, Shinagawa Y, Ibusuki M. Evaluation of human jaw articulation. In: Computer Animation'95. Geneva, 1995. 163~171. http://www.computer.org/proceedings/ca/7062/7062toc.htm.

[15] Gudukbay U. A movable jaw model for the human face. Computer and Graphics, 1997,21(5):549~554.

[16] Terzopoulos D, Waters K. Physically based facial modeling, analysis and animation. Journal of Visualization and Computer Animation, 1990,1(4):73~80.

[17] Miller G. The motion dynamics of snakes and worms. Computer Graphics, 1988,22(4):169~178.

[18] Kaufman A. TSL—A texture synthesis language. Visual Computer, 1988,4(3):148~158.

[19] Nahas M, Hutric H, Rioux M, Domey J. Facial image synthesis using skin texture recording. Visual Computer, 1990,6(6):337~343.

[20] Wu Y, Kalra P, Thalmann NM. Physically based wrinkle simulation & skin rendering. In: Thalmann D, van de Panne M, eds. Computer Animation and Simulation'97: Proceedings of the Eurographics Workshop. New York: Springer-Verlag, 1997. 69~79.

[21] Wu Y, Kalra P, Thalmann NM. Simulation of static and dynamic wrinkles of skin. In: Proceedings of the Computer Animation'96. Geneva: IEEE Computer Society Press, 1996. 90~97.

[22] Reeves WT. Particle systems—A technique for modeling a class of fuzzy Objects. ACM Transactions on Graphics, 1983,2(2):91~108.

[23] Reeves WT. Approximate and probabilistic algorithms for shading and rendering structured particle system. Computer Graphics, 1985,19:313~322.

[24] Leblanc A, Turner R, Thalmann D. Rendering hair using pixel blending and shadow buffer. Journal of Visualization and Computer Animation, 1991,2:92~97.

[25] Watanabe Y, Suenaga Y. A trigonal prism based method for hair image generation. Computer Graphics and Applications, 1992, 12(1):47~53.

[26] Anjyo K, Usami Y, Kurihara T. A simple method for extracting the natural beauty of hair. Computer Graphics, 1992,26(2):111~120.

[27] Kajiya JT, Kay TL. Rendering fur with three dimensional textures. Computer Graphics, 1989,23(3):271~280.

[28] Kajiya JT. Anisotropic reflection models. Computer Graphics, 1985,19(3):15~21.

[29] Perlin K, Hoffert EM. Hypertexture. Computer Graphics, 1989,23(3):253~262.

[30] Chen L, Saeyor S, Dohi H, Ishizuka M. A system of 3D hairstyle synthesis based on the Wisp model. Visual Computer, 1999,15(4):159~170.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn

[31] Platt SM, Badler NI. Animating facial expressions. Computer Graphics, 1981,15(3):245~252.

[32] Waters K. A muscle model for animating three-dimensional facial expression. Computer Graphics, 1987,22(4):17~24.

[33] Thalmann NM, Primeau NE, Thalmann D. Abstract muscle actions procedures for human face animation. Visual Computer, 1988, 3(5):290~297.

[34] Thalmann NM, Minh H, Angelis M, Thalmann D. Design, transformation and animation of human faces. Visual Computer, 1989, 5(1-2):32~39.

[35] Ekman P, Friesen WV. Manual for the Facial Action Coding System. Palo Alto, CA: Consulting Psychologist Press, Inc., 1978.

[36] Pighin F, Hecher J, Lischinski D, Szeliski R, Salesin D. Synthesizing realistic facial expressions from photographs. In: SIGGRAPH 1998 Conference Proceedings: Computer Graphics Annual Conference Series. 1998. 75~84.

[37] Noh J. Facial animation by expression cloning [Ph.D. Thesis]. University of Southern California, 2002. 1~155.

[38] Kurihara T, Arai K. A transformation method for modeling and animation of the human face from photographs. In: Thalmann N, Thalmann D, eds. Computer Animation'91. Tokyo: Springer-Verlag, 1991. 45~57.

[39] Akimoto T, Suenaga Y, Wallace R. Automatic creation of 3D facial models. Computer Graphics and Applications, 1993,13(5): 16~22.

[40] Pandzic IS, Ostermann J, Millen D. User evaluation: Synthetic talking faces for interactive services. Visual Computer, 1999, 15(7-8):330~340.

[41] Andre E, Rist E, Muller J. Guiding the user through dynamically generated hypermedia presentations with a life-like character. In: IUI'98, Proceedings of the 1998 International Conference on Intelligent User Interfaces. San Francisco, CA: ACM Press, 1998. 21~28. http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/iui/iui1998.html.

[42] Rist T, Andre E, Muller J. Adding animated presentation agents to the interface. In: IUI'97, Proceedings of the 1997 International Conference on Intelligent User Interfaces. Orlando: ACM Press, 1997. 79~86. http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/iui/iui1997.html.

[43] Yan J. Research and implementation of realistic 3-D human face synthesis [Ph.D. Thesis]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1999 (in Chinese with English abstract).

[44] Ostermann J, Millen DR. Talking heads and synthetic speech: Architecture for supporting electronic commerce. In: IEEE International Conference on Multimedia and Expo (I). 2000. 71~74. http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/icmcs/icme2000.html#LeungC00.

[45] Gibbs S, Breiteneder C. Video widgets and video actors. In: UIST Proceedings of ACM Symposium on User Interface Software and Technology. ACM Press, 1993. 179~185. http://www.acm.org/~perlman/sigchi/429936.html.

[46] Bickmore T, Cook LK, Churchill EF, Sullivan JW. Animated autonomous personal representatives. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Autonomous Agents. New York: ACM Press, 1998. 8~15. http://www.informatik.uni-trier.de/~ley/db/conf/agents/agents98.html.

[47] Pandzic IS, Capin TK, Lee E, Magnenat-Thalmann N, Thalmann D. A flexible architecture for virtual humans in networked collaborative virtual environments. In: Proceedings of the Eurographics'97. Budapest, 1997. 177~188.

[48] Suler JR. From ASCII to holodecks: Psychology of an online multimedia community. 1997. http://www.rider.edu/users/suler/psycyber/palsumary.html.

[49] Tekalp MA, Ostermann J. Face and 2-D mesh animation in MPEG-4. Signal Processing: Image Communication, 2000,15:387~342.

[50] Lavagetto F, Pockaj R, Costa M. Smooth surface interpolation and texture adaptation for MPEG-4 compliant calibration of 3D head models. Image and Vision Computing, 2000,18(4):345~353.

[51] Hartung F, Eisert P, Girod B. Digital watermarking of MPEG-4 facial animation parameters. Computer and Graphics, 1998,22(4): 425~435.

**附中文参考文献:**

[43] 晏洁.具有真实感的三维人脸合成方法的研究与实践[博士学位论文].哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.

© 中国科学院软件研究所 http://www.jos.org.cn