

## 摘要

三维特定脸部重建问题，是计算机视觉和计算机图形学中一个十分具有吸引力的主题。作为三维重建中的一个重要分支，它已经在许多领域中发挥了广泛的实用价值，涉及到计算机视觉、人工智能、模式识别、通信技术、辅助教学、医疗研究、电影动画制作、游戏娱乐等诸多方面，因此，也越来越引起图形学研究者们广泛的研究兴趣。

本论文以三维特定脸部模型为研究对象，从整体上对三维脸部重建技术进行了分类和介绍，比较了各种方法的优缺点，并在此基础上，提出了以特征参数变换法为主要思想的改进方案及 OpenGL 环境下的真实感显示工作。

本论文的工作是国家自然科学基金重点项目多功能感知系统中的一部分，主要应用于人机交互的环境中。其主要目的在于利用有限的计算资源，以较好的实时性获得具有真实感的个性化脸部模型，在多功能感知系统中，起到与用户自然交互，使其具有良好沉浸感的作用。

本文在前人的研究基础上展开，主要包括以下几个方面的内容：

- 提出了一种改进的三维脸部模型重建方法——特征参数变换法，完成了具有真实感的特定脸部模型的重建工作。此方法在一般模型的变形过程中，不是对构成模型的每个点的坐标进行重新计算，而是通过将脸部进行参数化并对相关参数进行修改以达到脸部模型特定化变形的目的，简化了算法，极大的降低了计算量，因此仅要求中等的计算资源，并可以有效地在 PC 平台上执行。
- 对复杂物体的纹理映射问题进行了研究，并运用多方向纹理映射方法在 OpenGL 图形接口环境下实现了特定脸部模型的纹理映射，使模型具有较好的真实感。
- 初步探讨了人脸面部表情的模拟和重建，使用特征参数变换法的参数变化模拟了脸部器官的一些基本动作和哭笑等基本表情。
- 设计完成了三维头部模型应用平台，在显示三维模型的同时实现了对它的控制和调整。该平台采用了 Win32 编程技术，具有良好的图形界面和良好的可移植性，使用户对平台的操作达到快速便捷的效果。

关键词：三维脸部模型 II 特征参数变换法 计算机视觉  
计算机图形学

## Abstract

Reconstructing three-dimension (3D) individualized face model is an attractive subject in computer vision and computer graphics. As one of important branches in 3D reconstruction, it has wide applications in various fields, such as computer vision, artificial intelligence, pattern recognition, telecommunication technology, computer aid instruction (CAI), medical researching and computer games and so on. Recently, it is attracting groups of computer graphics researchers.

This thesis mainly researches on 3D individualized face model, classifies and introduces common methods of reconstructing 3D individualized face model, compares and analyzes their respective characteristics, provides an improved scheme based on feature-parameter transformation method and develops three-dimensional display in OpenGL environment.

As a part of National Science Foundation, the work of this thesis mainly is used for human-computer interactive in multi-function sense system. It can use limited computer resources to acquire vivid individualized face model in real-time, and interactive with user friendly in multi-function sense system.

This thesis includes following items:

- Present an improved method of reconstructing 3D individualized face model — feature-parameter transformation method. This method does not recalculate coordinate of each point in face model, but changes related feature parameters to distort generic face model. Compared with traditional approaches, this method simplifies algorithm, requires only moderate computing resources and can be implemented efficiently on PC-based platforms.
- Research on texture mapping of complex object, and implement texture mapping of individualized face model based on multi-direction texture mapping in OpenGL graphic interface environment.

- Research on simulation and reconstruction of facial expressions, and use feature-parameter transformation method to simulate basic expressions of human face, such as laugh and cry.
- Design and develop 3D face model application platform to implement control and adjustment when display 3D model. As using Win32 programming technology, this platform has friendly graphic interface and good portability. Users can operate it easily and quickly.

## 致谢

在本论文的工作过程中，我要深深感谢袁保宗教授，从开始选题到最后完成论文的近三年中，袁老师给了我大量的帮助和鼓励。当我的工作遇到困难时，袁老师以其丰富的经验，给了我及时而有效的指点；当我取得一些进展时，袁老师又会给我以鼓励，并提出更完善的方法使我的工作不断地加以改进。袁保宗教授渊博的知识、敏锐的洞察力、严谨的治学态度和对科学事业孜孜以求的献身精神都给我留下了深刻的印象，这些优秀品质不仅在我的求学阶段督促我不断努力，而且将在今后的工作、生活中带给我很大的裨益，在此，我要对袁保宗教授致以深深的谢意。

同时，我还要感谢唐晓芳老师，她在我近三年的研究生学习中，给了我极大的关心与帮助。

此外，我还要特别感谢王延江博士、刘汝杰博士、丁丰博士、许晓斌博士、李孟东博士、姜海东硕士、韩旭硕士、陆宽硕士、李华硕士、董娜硕士和金京华硕士，他们在我的课题工作和论文完成过程中，提供了无私的帮助与支持，我的每一点成绩都是与他们分不开的。

最后，我要感谢我的家人，是他们含辛茹苦地培养我长大成人，一直全力以赴地支持我，鼓励我。我已无法用语言来表达对他们最真挚的感激之情。

# 第一章 绪论

## 1-1 三维人脸重建技术的应用

随着时代的发展,三维人脸的建模与重建在计算机视觉和计算机图形学领域引起了越来越多的注意,是一个十分具有吸引力的主题。这是因为它可以广泛应用在各种不同的领域,包括人体语言感知模型研究、通信技术、辅助教学、医疗研究、电影动画制作、游戏娱乐等诸多方面。例如以很低的比特速率进行基于建模压缩编码视频通讯以及计算机辅助医学诊断和治疗。

近些年来,以图像分析和计算机图形生成技术为基础的基于模型的图像编码方法受到了广泛的重视和关注。例如,运动图像压缩标准(MPEG-4)中专门提供了合成编码(Synthetic/Natural hybrid coding)方式。此方法主要通过图像参数的提取、传输和图像合成实现图像的压缩编码。面部图像作为视频图像中的一个重要信息已引起各方面研究者的广泛兴趣和重视。从图像分析的角度来看,面部图像是具有一定的结构特征的,如人脸面部图像的轮廓、器官分布等特征。为了有效地对面部图像进行压缩编码,需要建立基于(可生成面部图像的)面部结构模型、面部图像分析和合成技术的合成编码方法。在可视电话和电视会议系统中,人脸是场景中的主要部分,发送端将人脸图像经编码压缩后在接收端重新合成源图像,这一过程需要人脸合成方面的诸多技术。

在图像处理方面,脸部的合成是创建虚拟现实(Virtual Reality)的基础研究,在工业设计、野外训练、勘测和演习等许多方面都有重要意义。在近些年中,三维人体的计算机重建,在服装设计、销售方面发挥了很大的作用。人们可以通过计算机合成的虚拟人来试装,或是得到根据自己的身材裁剪的服装,这比传统的人工试装和量体裁衣要快的多,也能更好地满足顾客的需要。而对于刚刚发展起来的虚拟现实来说,虚拟人的构造是其中十分重要的一部分,虚拟人自然行为(脸、头和四肢的运动)和意识行为(表情和唇动)的合成对于很好地模拟人在相似环境中的活动有重要意义。譬如在聋哑人辅助教学系统,多功能感知系统中都起到了重要的作用。另外,通过人脸合成技术将来甚至可以将游戏

者本身的形象合成到游戏场景中，以达到身临其境的效果，从而为今后的游戏设计提供了新的思路。

## 1-2 三维人脸重建技术在国内外的发展情况

关于人脸的三维重建的研究是一项具有重要实用价值的研究工作，它在计算机视觉、人工智能、模式识别、生物、医学等各个领域都有广泛的应用价值。在这个领域中，国际上已经有了较成熟的发展，不但有充分的人体特征重建，而且还发展了人面部表情的模拟和重建。

- (1) 瑞士 Geneva 大学的计算机图形实验室，通过一种基于三维模型的直接造型方法获得了有效的特定虚拟人脸部、躯干建模以及人体动作的合成<sup>[34]</sup>。这种方法类似于黏土雕塑的方式，直接在三维的模型上进行特定人体的变换；
- (2) 在日本，人体的三维重建工作有较完善的发展。Hitachi 公司的中心研究实验室成功地发展了一种从一张照片进行人脸的建模和表情动画的变换方法<sup>[9]</sup>。主要是在一般人脸模型上选择控制点，映射到二维圆柱坐标上进行线性内插，再反变换到三维坐标空间一获得特定模型，并且通过脸部行为编码系统（FACS）得到了九种基本脸部表情。

在我国，此课题的开发还处在进行阶段，比较而言，香港城市大学、清华大学、中国科学院、北京工业大学、哈尔滨工业大学和江苏理工大学等著名研究机构成功地进行了脸部模型的建模和一些表情的模拟，并对以前的方法提出了行之有效的改进或提出了新的算法。

- (1) 江苏理工大学计算机科学系的詹永照教授为改进三角形片构造脸部模型难以交互造型，难以细致地表现细节的缺点，采用了一种分层设计的规则逻辑网格的脸部轮廓造型法，通过局部细化方法来构造人脸的真实模型<sup>[33]</sup>。同时，以 FACS 为依据，以解剖学和生物力学特点为前提，研制各种肌肉运动调节器，通过合理使用和协调有关肌肉调节器产生相应的脸部表情动画。
- (2) 哈尔滨工业大学的高文教授（现为中国科学院计算技术研究所教授）给出了一般人脸图像的参数合成方法以及通过两级映射得到特定人脸图像，并且通过对若干类面部表情图像的分析，建立了基于部分分解组合的面部表情图像和发音口型的合成方法<sup>[7]</sup>。
- (3) 香港城市大学计算机科学系计算机图像实验室的 Horace H.S.Ip 等

提出了基于局部最大曲率追踪 (LMCT) 算法提取个体脸部特征的方案, 其中从一般模型变形到特定模型由变形矢量场完成<sup>[2]</sup>。

### 1-3 本文的主要工作

本论文的工作是国家自然科学基金重点项目多功能感知系统中的一部分, 主要应用于人机交互的环境中。作为多功能感知系统, 一个具有良好真实感和沉浸感的用户界面是十分必要的, 这也是今后人机接口的发展方向, 而作为用户主体的人, 则是其中的一个重要的方面, 因此, 重建一个具有真实感的特定人脸模型是一项具有实际意义的工作, 也将在多功能感知系统中使用户感到身临其境。目前, 在三维人脸模型的重建中存在的主要问题是尽可能满足实时性、系统资源和虚拟人脸个性化的要求。本文在前人的研究基础上展开, 主要包括以下几个方面的内容:

- (1) 在前人的基础上提出了一种新的方法—特征参数变换法, 完成了三维特定人脸模型的重建工作。由于人脸是一个不规则的复杂物体, 因此使用数学模型对其进行重建是一项算法复杂, 计算量很大的工作, 而我们提出的特征参数变换法算法简单, 通过将脸部参数化进行脸部模型的特定化变形, 而不是将构成模型的每个点的坐标进行重新计算, 因此仅要求中等的计算资源, 并可以有效地在 PC 平台上执行。
- (2) 对复杂物体的纹理映射问题进行了研究和部分实现。
- (3) 初步探讨了人脸面部表情的模拟和重建。
- (4) OpenGL 环境下图形的三维真实显示。
- (5) 工作平台界面的完善和功能的增强。

## 第二章 三维重建方法概述

### 2-1 三维重建的基本方法

目前，世界上采用的三维重建方法多种多样，主要可分为以下几种：

- (1) 基于模型的三维重建和恢复技术，它主要是通过二维图象和已知的三维模型的比较来设法恢复三维信息。这一技术分为两个阶段：一个是决定图像和模型之间特征的联系，另一个是根据从二维图像到三维模型的几何变换得到三维信息。这种方法在计算机视觉和人工智能中用得比较多，事实上，它主要是为了完成三维识别工作，其重点在于识别而不在于重建后的实体，因而不适合三维造型。另一方面它本身的基于模型的特性使其具有很大的局限性。
- (2) 利用高精度的摄影设备拍摄一个或多个物体图片，再根据已经知道的摄影机与物体之间的相对位置以及摄影机的各项参数（例如倾角、焦距等）来弥补图像的三维信息的不足，从而实现三维重建。这种方法需要知道各种准确的摄影参数，往往仅应用于实验室中，而对于日常生活中的随机图像显得无能为力。
- (3) 依靠单一图像和多个视图来进行三维恢复和重建工作。它通常是通过多个视图找出物体的面貌和使用知识的约束，并以此来从图像上进行三维恢复和重建。它往往被用在工程图纸和一些简单图形的识别和重建，通常是对于图像进行矢量化，再通过综合三视图（主视图、俯视图、侧视图）中的二维（2D）几何与拓扑信息，进行分析和识别，从而在计算机中自动产生相应的三维（3D）形体的几何与拓扑信息。由于其三维信息是通过视图得到的，因此对视图的要求比较高，不适合普通随机图像。
- (4) 基于平面对称原理的三维重建，一种是对物体本身的对称性要求很高，另一种是利用特殊的摄影方法来构造对称图像：通常是加入一面或多面镜子来形成满足要求的本象和镜象，其重建流程如下：



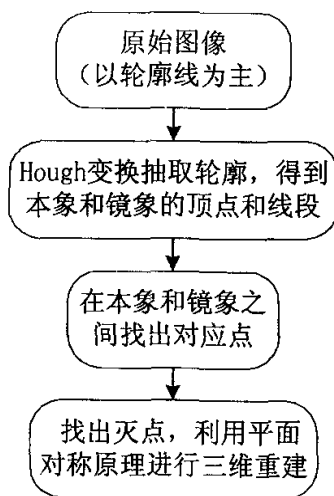


图2-1 基于平面对称原理的三维重建流程图

此重建主要对以轮廓线为主体的简单图像进行处理，有其局限性。

- (5) 利用多幅断面照片（如 CT 照片）来重构物体，主要是被用在生物、医学和地震研究等领域。这种方法主要是完成在所有的断面图像中抽取其轮廓，然后在连续面片的轮廓之间形成面。通常，如果连续面片的轮廓之间的距离很小，则只要简单的将它们按正确的顺序叠加起来即可，否则就需要在两个面之间进行插补，因此，在对面的光顺上的各种方法研究的比较多。但是这种方法中的数据已经是三维的，不须进行二维数据向三维数据的变换，它要解决的是三维数据的可视化问题。

## 2-2 三维人脸重建方法概述

对于越来越引起人们研究兴趣的三维特定人脸重建问题，是三维重建中重要的一个分支。目前已发展出许多方法使人们能够在虚拟的世界中重建一个具有真实感的人脸。主要分为只考虑人脸外形信息的重建方法和考虑人脸外形和结构信息的重建方法两大类。

## 2-2-1 外形重建

**石膏模型** Magnenat Thalmann 等在 1987 年提出了一种使用真正的石膏模型来重建一个虚拟的人脸模型的方法<sup>[22]</sup>。他们在石膏模型上标志出一些平面和突变点，从不同角度对模型拍照并进行数字化。这种方法要求在石膏模型上标出细致的曲线网格，这是一项十分耗费时间的工作，但好处是可以在任何感兴趣的区域获得高质量的重建。

**激光扫描** 在图象景物场景中，通过使用一些传感器，如扫描仪，可以产生序列图像。对于图像中的每一个像素，此场景中物体可见表面的范围是可知的，从而可以确定这些表面上点的空间位置。使用激光扫描进行三维数字化的一个成功的例子是 Cyberware Color Digitizer<sup>TM</sup>。Yuencheng Lee 等于 1996 年通过使用序列扫描传感器数字化了人脸的几何结构<sup>[23]</sup>。这种方法需要较少的时耗，具有很好的实时性。但是，这种基于三维数字化的方法要求非常昂贵的硬件和功能强大的工作站。

**条纹发生器** 与激光扫描仪相比，通过使用照相机和条纹图案发生器这些相对便宜的设备，光条纹可以被用于人脸的重建工作。由条纹图案发生器产生的条纹图案被投射到三维物体表面并被照相机拍摄下来。通过投影机、照相机和条纹图案之间的位置信息，可以重建出三维物体的外形。1997 年，Marc Proesmans 等使用幻灯投影仪，通过对图象结构重建很好地恢复了一个三维物体<sup>[24]</sup>。这种方法的缺点是不能获得动画效果和面部表情的模拟。

**照明转换测光法** 1992 年，日本的科学家提出照明转换测光法来提取静止<sup>[25]</sup>或移动<sup>[26]</sup>的人脸外形。此方法使用三个或更多的光源来计算光源光线在物体上交点的法线矢量。但它很难计算光反射强度较弱处，如阴影区域，点的精确法线矢量。

**立体视觉** 1996 年由 Fua 和 Leclerc 首先提出的立体视觉方法通过距离测量来确定某些特征点的对应坐标<sup>[27]</sup>。此方法基于三角测量原理，利用两个或多个摄象机对同一景物从不同位置的成像结果中的几何关系来恢复物体表面深度信息，通常只需很少的空间数据。一般来说，通过加权凸的成分来恢复凹凸区域，加权凹的成分来恢复光滑区域。

## 2-2-2 结构化外形重建

上面所提到的多数方法着重于恢复一个理想的外形，但它们最大的缺陷在于它们仅提供了外形信息而没有提供结构信息。同时，这些方法需要进行大量耗时的手工工作，需要精密的设备和复杂的算法。这些复杂性和潜在的费用限制了它们的流行和应用。为了获得一个结构化的外形重建，最典型的方法是通过结构信息，如眼睛、嘴唇、鼻子、头发等，来调整一个已知的一般模型。三维人脸重建的研究方向之所以主要集中在基于模型的脸部重建，另一个重要原因是因为不同的人脸在结构和形状上存在着共同的特点，例如人的脸部轮廓可近似地看作椭圆，眉毛、眼睛、鼻子、嘴巴等器官在整个面部中的相对位置是稳定的，它们的形状也存在着共性，因此通过修正一个一般人脸模型来构造一个特定三维人脸模型比起随意建造一个三维模型要简单的多。

在计算机图形学领域中许多研究者对三维人脸模型的建模作出了很大贡献。Parke 模型<sup>[19]</sup>经常被认为是第一个用于计算机动画的参数化脸部动画模型，通过给定不同的参数生成一幅幅脸部动画关键帧画面。在此基础上，一些其他的脸部模型，如 Terzopoulos 和 Waters 提出的一种高级人脸模型<sup>[20]</sup>被广泛应用。这是一种基于物理的合成面部结缔组织和一组基于解剖学的面部肌肉活动的结合。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。采用这种模型通过跟踪视频图像中非刚性的面部特征运动，达到再合成瞬间表情的目的，但其实现十分复杂。

在 Ekman 和 Friesen 提出的面部运动编码系统 (FACS)<sup>[21]</sup>中采用 44 个能够独立运动的基本面部肌肉运动单元 AUs (Action Units) 描述面部动作，每个脸部表情都可由若干个独立的 Aus 线性组合而成。在这个系统中，Ekman 和 Friesen 还提出并研究了 6 种基本表情，分别表达为愤怒、厌恶、恐惧、高兴、悲伤、惊奇。后来的研究者们进一步揭示了运动单元与肌肉运动之间的关系，提供了表情模型的生理学依据。

**网格适应** 使用一个结构化的脸部网格，Lee 等首先提出了一种算法，根据激光扫描和反射数据自动构造一个人体脸部模型<sup>[23]</sup>。在获得大量的扫描数据后，简化脸部网格为一简单的脸部几何模型，最终有效地进行动画控制。在调整一般脸部网格过程中，一旦网格匹配到数据点位置，算法将在脸部网格的节点位置采样序列图像以获得脸部几何结构。节点

位置也提供纹理映射坐标, 这些纹理映射坐标将全部颜色信息映射到构成网格的三角形面片上。

但是这种基于三维数字化而获得数据的方法经常需要昂贵的特殊硬件设备(如激光扫描仪等), 因此创建三维人脸的更普遍的方法是通过二维照片信息来进行重建。这些二维照片信息通常通过普通的设备即可获得。最经常被使用的有人机交互局部变换法和根据特征点重建法。

**人机交互的局部变换** Magnenat Thalmann 等于 1989 年提出了一种交互变换方法以产生物体的拓扑网格表面<sup>[29]</sup>。此方法利用一个基本的操作“移动顶点”来指定一个新的特殊顶点的三维位置。人机交互的局部变换发展了局部变换方法和点集的概念, 它是一些无序的元素的集合。点集用来选择被处理的表面区域。局部变换只作用于点集。主要有三种局部变换被应用:

- (1) 特定变换: 仅作用于当前点的一个顶点。
- (2) 比例缩放: 根据一定比例的缩放和变换功能移动点集的所有顶点。
- (3) 平行变换: 根据变换功能变换点集所有的顶点。

人机交互的局部变换法是一个很好的构造脸部模型的方法, 对于那些没有照片或其它图像来源的人脸重建, 如历史名人的脸部重建, 它可能是唯一有效的方法。但它涉及的计算量大, 不具有良好的实时性。

**根据特征点重建法** 与以上方法相比, 从脸部的若干照片来重建脸部模型是一个更快的方法<sup>[29]</sup>。在此方法中, 我们已知一个三维一般脸部模型, 从两张(或更多)直交视角照片上自动地或交互地检测出有限数量的特征点, 通过特征点来对一般模型进行特征校准。一般模型上的其它点由特定函数进行调整。

根据以上的介绍我们不难看出, 随着三维人脸重建技术的不断发展, 现在的研究逐渐倾向于从人脸的二维数据信息(如照片等)通过特征点的确定, 并对一般脸部模型的变形来达到构造一个个体化的脸部模型的目的。这主要是因为相对而言这种方法不需要特殊的外部设备, 计算量较小, 具有很好的实时性, 并且对计算资源的要求也不是十分苛刻。

在下一节中, 我们将介绍两个根据特征点重建人脸模型的具体方案, 它们都具有很好的代表性, 是现在三维人脸重建领域中的主流方向。

### 2-3 根据特征点进行三维人脸模型重建

在根据特征点进行三维人脸模型重建时，一般都是先通过各种方法获得二维图像上的脸部特征点，再利用变形函数将一般脸部模型调整到特定脸部模型。而在这一方案中计算机图形学研究者习惯用来描述人脸结构的模型一般都是多边形网格拓扑模型。为了将一般脸部模型变形到特定脸部模型，需要将网格拓扑模型的每个顶点进行移动。然而，移动所有的顶点是一件很繁琐耗时的工作。因此，在所有的顶点中选取特征点进行移动就变得很有意义。

(一) 1991年，Kurihara 和 Arai 提出了一种新的人脸建模的方法<sup>[6]</sup>。以人机交互方式获得人脸图像的若干特征点和 Delaunay 三角形，构造了一个脸部模型并进行了纹理映射使其具有很好的真实感。

设  $P_i (1 \leq i \leq n_v)$  为脸部拓扑网络的顶点， $C_j$  和  $V_j (1 \leq j \leq n_c)$  为控制点（特征点）和对应的位移矢量，其中  $n_v$  为顶点数量， $n_c$  为控制点数量。控制点  $C_j$  是顶点  $P_i$  的子集。 $P_i$ 、 $C_j$  和  $V_j$  皆为三维矢量。现在要解决的问题是通过对控制点  $C_j$  的位移来进行内插以完成对每一个顶点  $P_i$  的位移（如图 2-2(a)所示）。

在一个三维物体表面对点进行内插是十分困难的，但当将这个三维表面映射到二维空间时，内插问题被简化到二维的情况下进行。在此方案中采用圆柱坐标映射进行简化（如图 2-2(b)所示）。在圆柱参数空间中，点  $A(x, y, z)$  被映射到  $A_s(\theta, H)$  的映射函数被定义如下：

$$A_s(\theta, H) = (\tan^{-1}(z/x), y) \quad (2-1)$$

设  $P_{si}$  和  $C_{sj}$  为顶点  $P_i$  和控制点  $C_j$  在二维空间的映射点。每一个顶点的位移矢量  $W_i$  由控制点的位移矢量内插而得。进行内插时，参数空间通过控制点  $C_{sj}$  使用 Delaunay 三角形 (Sibson 1978) 进行三角化（如图 2-2(b)所示）。

顶点  $P_{si}(\theta, H)$  的位移矢量  $W_i$  进行如下内插（如图 2-2(c)所示）：

1. 确定包含顶点  $P_{si}(\theta, H)$  的三角形。

设  $C_1(\theta_1, H_1)$ 、 $C_2(\theta_2, H_2)$ 、 $C_3(\theta_3, H_3)$  为此三角形的三个顶点， $V_1$ 、 $V_2$ 、 $V_3$  分别为每个顶点的位移矢量。

2. 计算满足下列方程的权值  $k_1$ 、 $k_2$ 、 $k_3 (k_1 + k_2 + k_3 = 1)$ ：

$$\theta = k_1 \cdot \theta_1 + k_2 \cdot \theta_2 + k_3 \cdot \theta_3 \quad (2-2)$$

$$H = k_1 \cdot H_1 + k_2 \cdot H_2 + k_3 \cdot H_3$$

3. 计算位移矢量  $W_i$  :

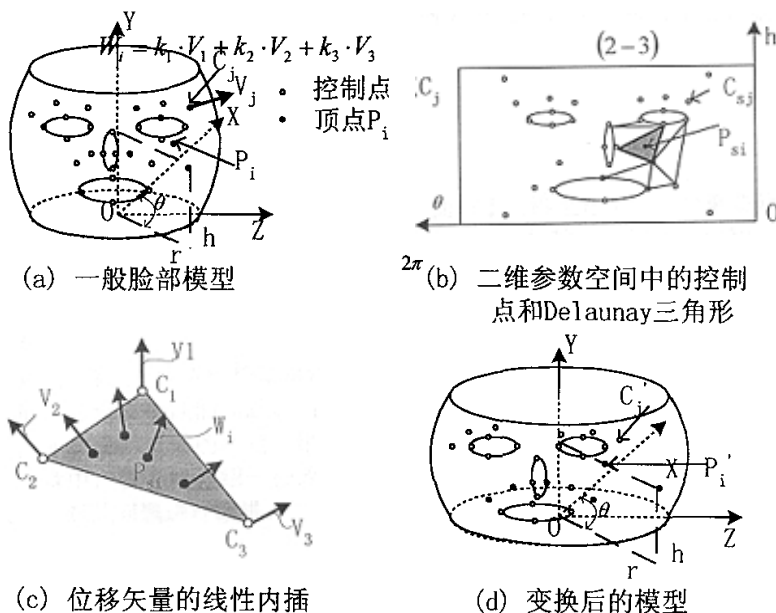


图2-2 人脸模型变换方法

Kurihara 和 Arai 的方法可以获得很好的效果，但它最大的缺陷是他们用来调整一般模型的控制点太少。因此当一般模型与要重建的模型差别太大的话，结果将是不令人满意的，并且纹理映射也不能很好的进行。为了增加结果的准确性，增加适当的控制点是必要的。

(二) Horace H.S.Ip 和 Lijun Yin 于 1996 年提出了一种从一个脸部的侧视图和正视图自动构造一个三维特定脸部模型的新方案<sup>[2]</sup>。这种方案试图自动地检测面部特征点，主要是采用 LMCT（局部最大曲率追踪）算法来检测脸部侧面轮廓线上的凸点和凹点，在此基础上，使用一个非

常简单的过滤模板获得脸内部的特征点。由特征点获得的变形矢量场将一般模型通过对应的匹配和内插方法变形到特定模型。

构造三维特定脸部模型的方案如下页图 2-3 所示的四个阶段构成。

Horace H.S.Ip 和 Lijun Yin 的方案试图采用自动的方法来构造特定脸部模型，但从实验来看，这种方法还不具有很强的鲁棒性。但它所采用的 LMCT 算法获得特征点对于蒙古人种（包括中国人）的脸部可以获得很准确的检测结果。因此，在本文的研究方法中，将着重讨论这种获得脸部特征点的算法。

## 2-4 本章小结

本章介绍了三维重建的基本方法，而对于三维重建中的一个重要分支——三维人脸重建，则进行了着重讨论，并对各种方法进行了比较，指出了它们的优缺点，最后还具体介绍了两个根据特征点重建人脸模型的具体方案。

现有的这些三维人脸模型重建方法各有优缺点，但是普遍存在一个大计算量和处理复杂性的问题。由于这些方法都需要对大量的三维点进行修正，才能获得所需的特定三维人脸模型，所以这个缺点是不可避免。在下一章中，我们将介绍一种改进的三维人脸重建方法——特征参数变换法，以对此问题进行改进。

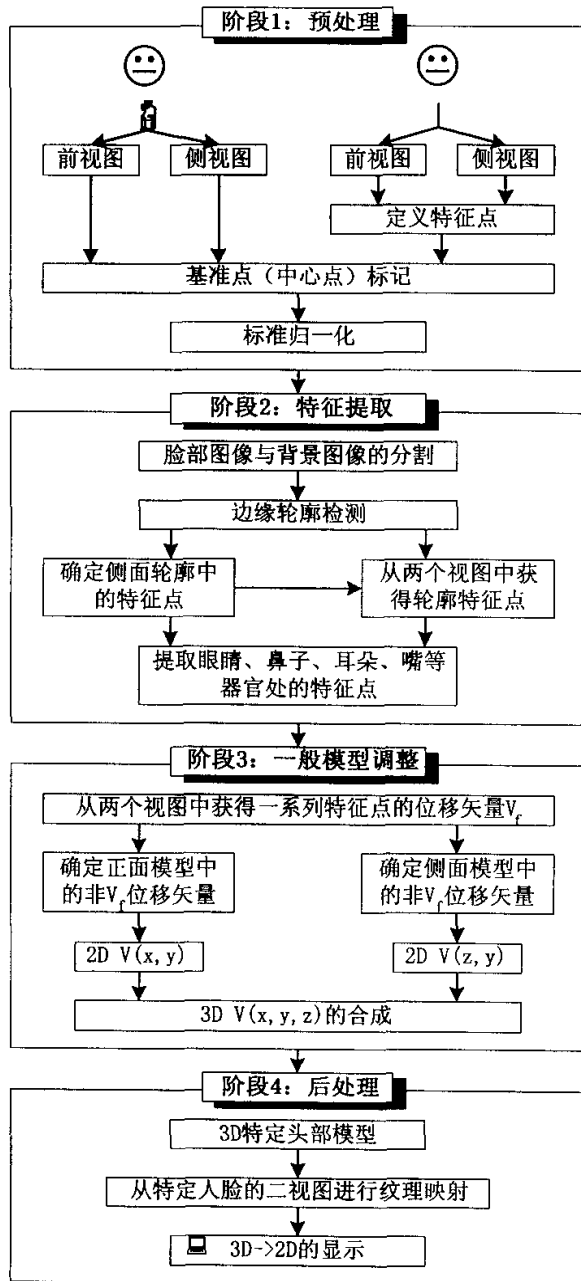


图2-3 3D特定头部模型重建方案框图



## 第三章 一种改进的三维脸部模型合成方法

### ——特征参数变换法

在上一章中，我们介绍了三维重建及三维脸部重建的一些常用方法。下面我们来详细讨论一下本文所采用的一种三维脸部重建方法，即特征参数变换法。

#### 3-1 特征参数变换法的基本思想及处理流程

在上一章中我们曾经提到三维人脸重建的研究方向之所以主要集中在基于模型的脸部重建的一个原因是因为不同的人脸在结构和形状上存在着共同的特点，因此通过修正一个一般人脸模型来构造一个特定三维人脸模型比起随意建造一个三维模型要简单的多。但是，不容否认，面部特征的个体差异是客观存在的，有时会相当明显，世界上根本不存在有两张完全相同的人脸，即使是看起来非常相似的双胞胎，在某些方面也存在着不同之处。对于一个特定人而言，眼睛的大小，鼻子的高低，嘴唇的形状等都刻画了这个人的面部特征。一般人脸可以看作一张典型的、不具备任何明显特征的人脸，可以认为一张给定人脸和一般人脸之间的不同之处就是这个特定人脸的独立特征。

为了个体化一般人脸模型，一般的方法是使用分析与识别技术从图像上提取特征，然后将其当作对一般人脸模型的变形参数，以获得特定人脸模型。在从一般模型到特定模型的变形问题中，现在一般的实现方法都要将一般模型的顶点进行位移变换，根据从图像中获取的新的特定的顶点值来确定模型的变形方向，或者是通过一组特征点的位置变换来得到一个新的人脸网格模型。但当使用这些方法时，都涉及到一个单个特征点位置的变化影响到整个模型的问题。特征参数变换法正是为改进以上问题而提出的，它的基本思想是考虑人的脸部可以由眼睛、鼻子、嘴、颊、脸部的大小等信息构成，当对一般模型进行结构化、参数化，即将特征参数作为比例因子去构成脸部模型之后，我们可以通过改变脸

部特征参数值的大小来控制一般模型的变形过程，而不需要逐个改变模型上每一顶点的位置。脸部特征参数的确定主要决定于二维图像中特征点的提取。在有严格约束条件的情况下，一些自动建模算法可以被使用。还有一些其它的算法通过能量最小化样条获取脸部特征点，如 Snakes 变形曲线和变形模板。但是这种自动特征提取的精度不高，而且识别结果还在很大程度上依赖于所提供图像的质量。因此，在考虑到自动提取十分困难的情况下，我们在本文中提出了一种半自动的方法从两张人脸图像来获得特定人脸模型。它可分四个阶段来完成这个过程。第一阶段为预处理阶段，包括面部图像的获取（正视图和侧视图），对图像进行标准化预处理，完成图像和一般模型的归一化过程。第二阶段为边缘检测阶段，通过 Sobel 和 Canny 算子检测面部图像的边缘轮廓曲线。第三阶段进行特征点提取，在 Horace H.S.Ip 和 Lijun Yin 的 LMCT 算法<sup>[2]</sup>基础上，采用半交互方式从面部轮廓曲线中提取面部特征点。第四阶段为一般人脸模型变形阶段，根据已获得特征点计算得到人脸特征参数，并通过特征参数变换法将一般人脸模型变形为特定人脸模型。整个方案的流程如图 3-1 所示。

此方法中所采用的一般模型是一个参数化的线框模型。脸部表面由多边形网格构成，包括 642 个顶点和 508 个拓扑结构，如图 3-2 所示。

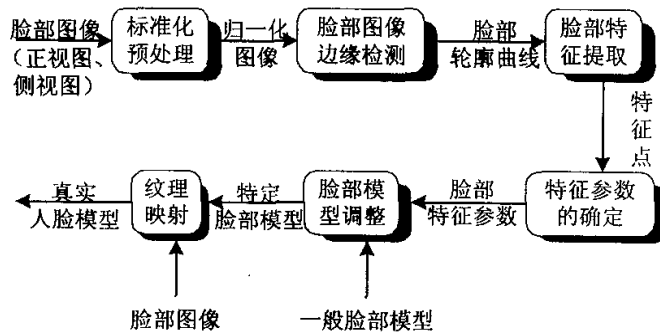


图3-1 特征参数变换法处理流程

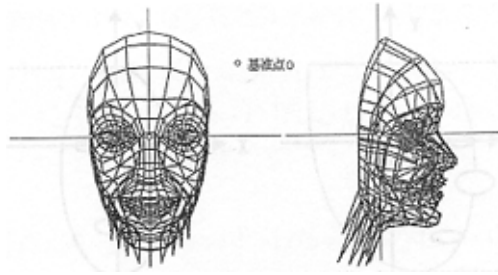


图 3-2 一般脸部模型

### 3-2 脸部图像和一般模型的标准化预处理

为了将一般模型适配为特定的脸部模型，首先一个基准参考点应被设定在脸部的两个视图和一般模型上。我们把三维一般模型的原点作为参考点。这个点，当投影到模型的正视图和侧视图上时，对应于两眼之间距离的中点和鼻梁与后脑之间的中点，如图 3-2 中基准点 O 所定义的那样。

为了使脸部器官（如眼睛，鼻子和嘴）在两个视图中位于同一个水平面，输入的脸部图像要如下标准化。我们定义脸的长度为从头顶到下巴的长度，在侧视图和正视图中分别表示为  $H_s$  和  $H_f$ （图 3-3）。原始坐标  $X$  和  $Y$ ，坐标原点是基准点 O。两个视角图像的标准化坐标  $x$ ， $y$  可以通过分别用原始坐标  $X$ ， $Y$  除以  $H_s$  和  $H_f$  而获得，即：

$$\begin{cases} x = k(X/H) \\ y = k(Y/H) \end{cases} \quad (3-1)$$

其中，

$$H = \begin{cases} H_s & \text{侧视图} \\ H_f & \text{正视图} \end{cases} \quad (3-2)$$

$k$  是系数因子（例如  $H_s$ ， $H_f$  或 256，512 等）。

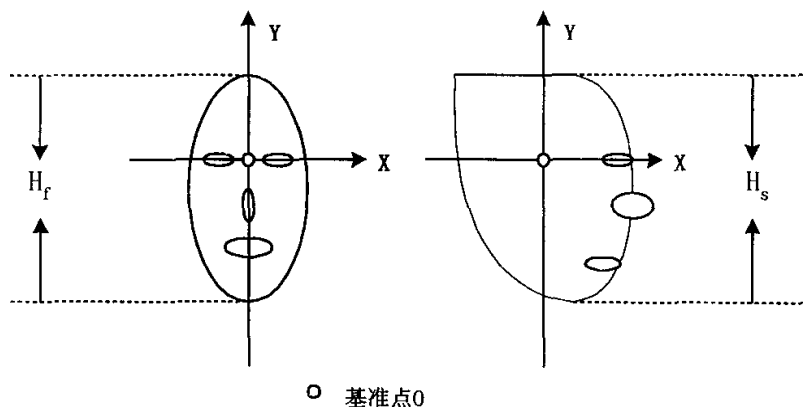


图3-3 图像预处理示意图

### 3-3 边缘检测

所谓的图像边缘，确切地说是图像灰度发生明显改变的地方，而不单单是物体与背景交界的地方。传统的边缘检测方法将边缘点理解为灰度的突变点，从而通过领域像素之间的代数运算来求取边缘点。

#### (一) 梯度法

我们知道，对于一幅连续图像  $f(x, y)$ ，其梯度  $\text{grad}f(x, y)$  是一个矢量，即：

$$\text{grad}f(x, y) = \left( \frac{\partial f(x, y)}{\partial x}, \frac{\partial f(x, y)}{\partial y} \right) \quad (3-3)$$

它指向  $f(x, y)$  增长最快的方向。而

$$|\text{grad}f(x, y)| = \left[ \left( \frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3-4)$$

则表示在  $\text{grad}f(x, y)$  方向上的单位距离增加率。

对于离散的数字图像，可以用差分来近似。近似的公式可以是

$$\begin{aligned} |\text{grad}f(x, y)| &\cong \left\{ [f(x, y) - f(x+1, y)]^2 + [f(x, y) - f(x, y+1)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\cong |f(x, y) - f(x+1, y)| + |f(x, y) - f(x, y+1)| \end{aligned} \quad (3-5)$$

也可以是

$$\begin{aligned} |\text{grad}f(x, y)| &\cong \left\{ [f(x, y) - f(x+1, y+1)]^2 + [f(x+1, y) - f(x, y+1)]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \\ &\cong |f(x, y) - f(x+1, y+1)| + |f(x+1, y) - f(x, y+1)| \end{aligned} \quad (3-6)$$

如令  $g(x, y) = |\text{grad}f(x, y)|$

则不管用哪一个近似公式（或者其它的近似公式），利用  $g(x, y)$  就可得到原图像  $f(x, y)$  的梯度图像。显然，在图像的边缘处， $g(x, y)$  有较大的值；在灰度平滑变化的地方， $g(x, y)$  的值很小；在灰度不变的地方， $g(x, y) = 0$ 。因此，要求得到图像的边缘或轮廓线，只须取定一个阈值  $DG$ ，求出那些  $g(x, y) \geq DG$  的像素即可。

梯度法只考虑一阶导数，如利用二阶导数则可找出灰度变化显著点。例如，对于灰度线性变化的图像， $|f_x| + |f_y|$  的值可能很大，但其实并不存在什么灰度分界线。

## (二) 拉普拉斯(Laplace)差分算子法

我们知道，满足拉氏方程  $\Delta f(x, y) = \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} = 0$  的曲面  $z = f(x, y)$  是平坦的，这里  $\Delta$  是拉普拉斯算子。因而

$$\Delta f = f_{xx} + f_{yy} \quad (3-7)$$

能反映出图像  $f(x, y)$  灰度的突变。对离散数字图像，有

$$\begin{aligned} \Delta f &\cong [f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)] - 4f(x, y) \\ &= -5 \left[ f(x, y) - \frac{f(x, y) + f(x+1, y) + f(x-1, y) + f(x, y+1) + f(x, y-1)}{5} \right] \\ &= -5 [f(x, y) - \bar{f}(x, y)] \quad (\bar{f}(x, y) \text{ 是平均灰度}) \end{aligned} \quad (3-8)$$

根据阈值 DG, 由  $|\Delta f| \geq DG$  可以找出灰度突变的点、线。而

$$g(x, y) = f(x, y) - \Delta f(x, y) = f(x, y) + 5[f(x, y) - \bar{f}(x, y)] \quad (3-9)$$

把突变值叠加到原来的图像上。由于当  $f(x, y) > \bar{f}(x, y)$  时,  $g(x, y) > f(x, y)$ ; 当  $f(x, y) < \bar{f}(x, y)$  时,  $g(x, y) < f(x, y)$  从而能使图像明显地尖锐化。

### (三) 索贝尔(Sobel)算子算法

索贝尔算子算法是一种将方向差分运算与局部平均相结合的方法。索贝尔算子是在以  $f(x, y)$  为中心的  $3 \times 3$  邻域上计算  $x$  和  $y$  方向的偏导数, 即

$$\begin{aligned} S_x &= \{f(x+1, y-1) + 2f(x+1, y) + f(x+1, y+1)\} - \\ &\quad \{f(x-1, y-1) + 2f(x-1, y) + f(x-1, y+1)\} \\ S_y &= \{f(x-1, y+1) + 2f(x, y+1) + f(x+1, y+1)\} - \\ &\quad \{f(x-1, y-1) + 2f(x, y-1) + f(x+1, y-1)\} \end{aligned} \quad (3-10)$$

实际上, 式(3-7)应用了  $f(x, y)$  邻域的图像强度的加权平均差值。其梯度大小为

$$g(x, y) \cong S = \sqrt{S_x^2 + S_y^2} \quad (3-11)$$

或取绝对值

$$g(x, y) \cong S = |S_x| + |S_y| \quad (3-12)$$

在实际应用中, 通常是利用简单的卷积核来计算方向差分, 不同的算子对应不同的卷积核, 它们产生的两个偏导数在图像一个点上用均方值或绝对值求和的形式结合起来, 图 3-4 给出了索贝尔算子的卷积核。严格地说, 在进行卷积之前必须将卷积核旋转  $180^\circ$ , 但由于核模板是对称的, 可以忽略这一旋转。

|    |    |    |
|----|----|----|
| -1 | -2 | -1 |
| 0  | 0  | 0  |
| 1  | 2  | 1  |

|    |   |   |
|----|---|---|
| -1 | 0 | 1 |
| -2 | 0 | 2 |
| -1 | 0 | 1 |

图3-4 索贝尔算子的卷积核

一旦估计出梯度值，将梯度值与某个给定的阈值比较来判断是否存在边缘，如果梯度值大于这个给定值，就认为存在边缘。显然，阈值的选择是很重要的。在含有噪声的图像中，阈值选择是一个涉及在丢失有效边缘和由于噪声所造成的错误边缘之间进行折衷考虑的问题。

#### (四) 坎尼(Canny)算子算法

##### 1. 坎尼算子的基本原理

坎尼给出了评价边缘检测性能优劣的三个指标：

- ① 好的信噪比，即将非边缘点判为边缘点的概率要低，将边缘点判为非边缘点的概率要低；
- ② 好的定位性能，即检测出的边缘点要尽可能在实际边缘的中心；
- ③ 对单一边缘仅有唯一响应，即单个边缘产生多个响应的概率要低，并且虚假边缘响应应得到最大抑制。

坎尼首次将上述判据用数学的形式表示出来，然后采用最优化数值方法，得到了对应给定边缘类型的最佳边缘检测模板。对于二维图像，需要使用若干方向的模板分别对图像进行卷积处理，再取最可能的边缘方向。坎尼的分析针对的是一维边缘，对于阶跃形的边缘，坎尼推导出的最优边缘检测器的形状与高斯函数的一阶导数类似，利用二维高斯函数的圆对称性和可分解性，我们可以很容易计算高斯函数在任一方向上的方向导数与图像的卷积。因此，在实际应用中可以选取高斯函数的一阶导数作为阶跃形边缘的次最优检测算子。下面推导二维次最优阶跃边缘检测算子的数学表达式。设二维高斯函数为

$$G(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-13)$$

在某一方向  $n$  上  $G(x, y)$  的一阶方向导数为

$$G_n = \frac{\partial G}{\partial n} = n \nabla G \quad (3-14)$$

式中

$$n = \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} \quad \nabla G = \begin{bmatrix} \partial G / \partial x \\ \partial G / \partial y \end{bmatrix}$$

$n$  是方向矢量,  $\nabla G$  是梯度矢量。我们将图像  $f(x, y)$  与  $G_n$  作卷积, 同时改变  $n$  的方向,  $G_n * f(x, y)$  取得最大值时的  $n$  (即  $\frac{\partial(G_n * f(x, y))}{\partial n} = 0$  对应的方向) 就是正交于检测边缘的方向。由

$$\frac{\partial(G_n * f(x, y))}{\partial n} = \frac{\partial \left[ \left( \cos \theta \cdot \frac{\partial G}{\partial x} \right) * f(x, y) + \left( \sin \theta \cdot \frac{\partial G}{\partial y} \right) * f(x, y) \right]}{\partial \theta} = 0 \quad (3-15)$$

得

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta &= \frac{\frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y)}{\frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y)} \\ \cos \theta &= \frac{\frac{\partial G}{\partial x} * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|} \\ \sin \theta &= \frac{\frac{\partial G}{\partial y} * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|} \end{aligned} \quad (3-16)$$

因此, 对应于  $\partial(G_n * f(x, y)) / \partial n = 0$  的方向  $n$

$$n = \frac{\nabla G * f(x, y)}{|\nabla G * f(x, y)|} \quad (3-17)$$

在该方向上  $G_n * f(x, y)$  有最大输出响应, 此时



$$\begin{aligned} |G_n * I| &= |\cos\theta(\partial G/\partial x) * f(x, y) + \sin\theta(\partial G/\partial y) * f(x, y)| \\ &= |\nabla G * f(x, y)| \end{aligned} \quad (3-18)$$

二维次最优阶跃边缘算子是以卷积 $\nabla G * f(x, y)$ 为基础的, 边缘强度由 $|G_n * f(x, y)| = |\nabla G * f(x, y)|$  决定, 而边缘方向为

$$n = \nabla G * f(x, y) / |\nabla G * f(x, y)|$$

在实际应用中, 我们将原始模板截断到有限尺寸 $N$ 。实验表明, 当时,  $N = b\sqrt{2}\sigma + 1$  能够得到较好的检测效果。

## 2. 坎尼算子的计算实现

为了提高速度我们可以采用分解的方法, 即把 $\nabla G$  的两个滤波卷积模板分解为两个一维的行列滤波器。

$$\begin{aligned} \frac{\partial G}{\partial x} &= kx \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(x)h_2(y) \\ \frac{\partial G}{\partial y} &= ky \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right) \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right) = h_1(y)h_2(x) \end{aligned} \quad (3-19)$$

其中,

$$h_1(x) = \sqrt{k}x \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$h_1(y) = \sqrt{k}y \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$h_2(x) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{x^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$h_2(y) = \sqrt{k} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma^2}\right)$$

$$h_1(x) = xh_2(x)$$

$$h_1(y) = yh_2(y), k \text{ 为常数}$$

将式(3-19)中二式分别与图像  $f(x,y)$  卷积, 得到输出

$$E_x = \frac{\partial G}{\partial x} * f(x,y) \quad E_y = \frac{\partial G}{\partial y} * f(x,y) \quad (3-20)$$

令

$$A(i,j) = \sqrt{E_x^2(i,j) + E_y^2(i,j)}$$

$$\alpha(i,j) = \arctg \left[ \frac{E_y(i,j)}{E_x(i,j)} \right]$$

则  $A(i,j)$  反映了图像上  $(i,j)$  点处的边缘强度,  $\alpha(i,j)$  是图像的点  $(i,j)$  处的法向矢量 (正交于边缘方向的方向)。

根据坎尼的定义, 中心边缘点为算子  $G_n$  与图像  $f(x,y)$  的卷积在边缘梯度方向上的区域中的最大值, 这样, 就可以在每一点的梯度方向上判断此点强度是否为其邻域的最大值来确定该点是否为边缘点。当一个像素满足以下三个条件时, 则被认为是图像的边缘点:

- ① 该点的边缘强度大于沿该点梯度方向的两个相邻像素点的边缘强度;
- ② 与该点梯度方向上相邻两点的方向差小于  $45^\circ$ ;
- ③ 以该点为中心的  $3 \times 3$  邻域中边缘强度极大值小于某个阈值。

此外, 如果(1)和(2)同时被满足, 那么在梯度方向上的两相邻像素就从候选边缘点中取消, 条件(3)相当于用区域梯度最大值组成的阈值图像与边缘点进行匹配, 这一过程消除了许多虚假的边缘点。

在本文中, 我们在传统方法的基础上, 通过计算 Sobel 算子和 Canny 算子的图像边缘, 然后加权求和得到边缘图  $E$ , 如式(3-21)所示:

$$e(x,y) = \alpha C(x,y) + (1-\alpha)S(x,y) \quad (3-21)$$

其中,  $C(x,y)$  是 Canny 算子得到的边缘函数,  $S(x,y)$  是 Sobel 算子得到的边缘函数。

在构造三维脸部模型过程中,仅使用单一的算子,对于质量不是很高的原始图像会出现边缘毛刺以及将非中心边缘位置的灰度变化误认为是边缘点的现象,而通过本加权求和算法可以得到基本的脸部轮廓曲线,算法简单,毛刺现象较少,可以为特征点提取提供满意的图像,同时我们也不需要使用更复杂的算子,以达到减少计算时间的目的。

### 3-4 特征点提取及特征点集的确定

我们在上一章中曾讨论过三维人脸重建技术现今的一个重要的发展分支是通过特征点进行三维重建过程。而特征点的提取,是其中一个十分重要的部分。我们在上一章中也曾介绍了几种特征点提取的方法,而其中局部最大曲率追踪(LMCT)算法是我们最关注的问题。下面主要介绍一下 LMCT 算法的基本原理和计算过程。

#### 3-4-1 通过 LMCT 算法进行侧面轮廓分析

LMCT 算法采用一个两阶段处理过程去提取脸部两个视图的显著特征。侧面轮廓曲线被分解为对应于鼻尖,上下嘴唇和下巴的特征点的子集。这些点帮助划分一些期待窗口,从中可以分析细节图像的灰度以提取内部特征点,即刻画眼睛、鼻子、嘴等脸部轮廓内的脸部器官的特征点,如图 3-5 中  $V_i$  所示。

一个人脸部的侧面轮廓展示了典型的特征。从眼线(基准水平线)到下巴底部,存在八个显著特征点,其中四个凹点(即图 3-5 中的  $s_1, s_3, s_5, s_7$ )和四个凸点(即图 3-5 中的  $s_2, s_4, s_6, s_8$ )。这些点使特定脸部特征如眼的中心,鼻尖,上嘴唇,下嘴唇和下巴尖典型化。为了有效和可靠地检测特征点  $s_1-s_8$ ,我们推导了 LMCT 算法用局部最大曲率去寻找这些点。

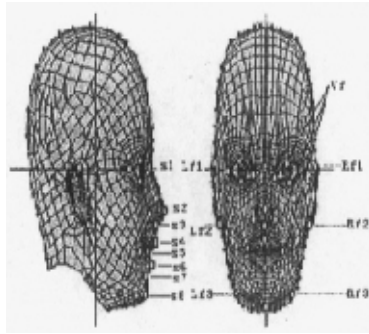


图 3-5 脸部特征点定义

LMCT 算法使用两种动态地改变方向的追踪模式：

- ① 追踪脸部轮廓曲线；
- ② 形成一系列近似原始数字化曲线的分割线；
- ③ 测量每一个分割线的端点的曲率；
- ④ 根据局部最大曲率确定特征点。

此算法以曲率的计算值为基础。假定一个曲线被表示为  $y = f(x)$ 。曲线上一点  $P_n(x_n, y_n)$  的曲率  $C_n$  被定义为：

$$C_n = \frac{y_n''}{[1 + (y_n')^2]^{\frac{3}{2}}} \quad (3-22)$$

凹点和凸点与具有局部最大绝对值曲率或曲率值尖锐变化的点有关。在离散空间，我们近似式 3-22，用相邻线段之间的斜率差来表示由式 3-24 定义的对应该线段端点的平均曲率值。

#### (一) 追踪优先模式的定义 (PM)

我们定义沿着侧面轮廓曲线的像素为候选像素 (c-像素)。曲线追踪方向假定为从眼睛到下巴的方向。假定被追踪的当前点在像素  $P_0$  的位置，追踪的下一点是与之相邻五个像素的点 (图 3-6)。然而，如果在相邻像素中存在超过一个 c-像素，接下去进行的路线必须被选择。为了正确地追踪侧面轮廓曲线和提高对噪音的非敏感性，我们为路线选择定义两种追踪 PMs，当前点的 PM 选择路线。

两种 PMs 分别为顺时针优先级模式 (PM1) (图 3-6(a)), 被选择的路线优先级, 从高到低, 是  $p_1, p_2, p_3, p_4, p_5$ , 和逆时针优先级模式 (PM2) (图 3-6(b)), 被选择的路线优先级, 从高到低, 为  $p_5, p_4, p_3, p_2, p_1$ 。

被 PM 选择的  $c$ -像素是主动像素 ( $a$ -像素)。进而, 我们定义有效像素 ( $v$ -像素) 为用于计算曲率的主动像素 ( $a$ -像素)。

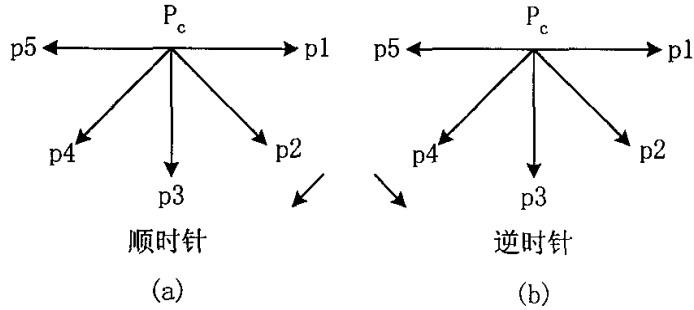


图3-6 优先权模式示意图

## (二) LMCT 算法

LMCT 算法流程图如图 3-8 所示, 应用此算法的一个例子如图 3-7 所示。算法由两个阶段构成: 曲线追踪和下一点的定位。

### 1. 曲线追踪

- ① 置初始 PM;
- ② 置当前有效像素到  $P_n$  (初始  $v$ -像素被设为开始点);
- ③ 根据当前 PM 移到下一个主动像素  $a$ -像素;
- ④ 在追踪过程中, PM 的变换标准是: 当当前 PM 是 PM1 并且被选择的  $a$ -像素是  $p_4$  或  $p_5$  时, PM 被转换到 PM2; 当当前 PM 是 PM2 并且被选择的  $a$ -像素是  $p_1$  或  $p_2$  时, PM 被转换到 PM1。其他情况下, PM 保持不变;
- ⑤ 寻找下一个有效像素 ( $P_{n+1}$ ), 计算直线  $P_n P_{n+1}$  的斜率: 如果被选择的  $a$ -像素是  $p_2$  或  $p_4$ , 此  $a$ -像素被作为一个新的有效像素 ( $P_{n+1}$ ), 直线  $P_n P_{n+1}$  的斜率由式 3-23 计算:

$$S_n = \frac{y_{n+1} - y_n}{x_{n+1} - x_n} \quad n = 0, 1, 2, \dots, N \quad (3-23)$$

相应的 a-像素  $P_n(x_n, y_n)$  和  $P_{n+1}(x_{n+1}, y_{n+1})$  显示如图 3-7。

如果被选择的 a-像素是 p1, p3 或 p5, 那么重复步骤③并继续追踪。置  $n=n+1$ , 重复从步骤②开始的过程并保持追踪。

## 2. 特征点的定位

- ① 一系列  $S_n (n=0, 1, 2, \dots, N)$  由步骤(1)得到, 每一个 v-像素的曲率  $C_n$  可以由式 3-24 计算:

$$C_n = \frac{S_{n-2} + S_{n-1}}{2} - \frac{S_n + S_{n+1}}{2} \quad n = 2, 3, \dots, N-1 \quad (3-24)$$

- a 对于曲线的凸出部分, 有局部最大绝对值曲率 ( $C_n$ ), 从  $S_{n-1}$  到  $S_n$  的符号变化是 “+ → -”。
- b 对于曲线的凹陷部分, 有局部最大绝对值曲率 ( $C_n$ ), 从  $S_{n-1}$  到  $S_n$  的符号变化是 “- → +”。

- ② 根据图 3-5 中特征点 s2, s4, s6, s8 的相对位置, 在侧视图中这四个特征点可以在上一步骤 a 的基础上被识别。以同样的方法, 剩下的特征点 s1, s3, s5, s7 可以在上一步骤 b 的基础上被识别。

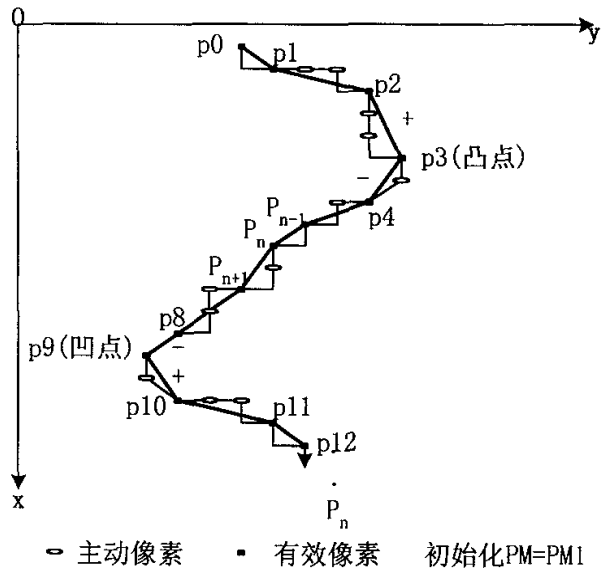


图3-7 一个LMCT算法的例子

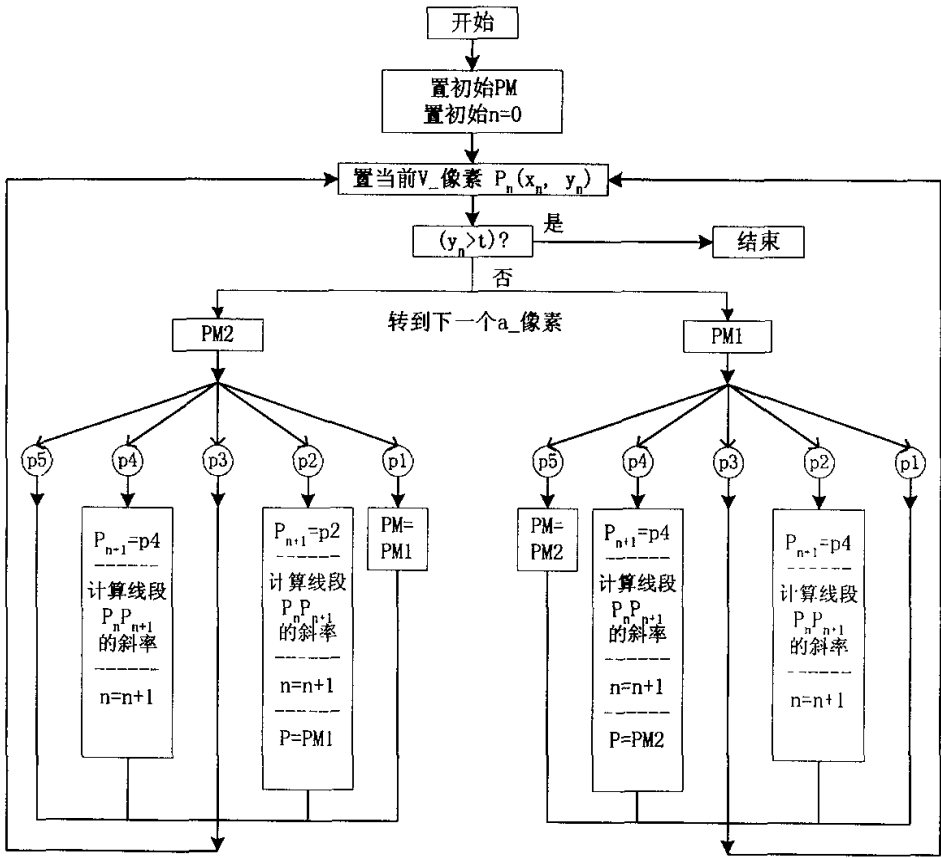


图3—8 局部最大曲率追踪(LMCT)算法流程图



### 3-4-2 特征点集的确定

我们使用 LMCT 算法直接确定脸的侧面轮廓的特征点  $s_1-s_8$ 。同样地, 沿着脸的正视图的轮廓提取特征点  $L_n-L_B$  和  $R_n-R_B$ 。考虑到眼睛、鼻子、嘴和下巴 ( $s_1-s_8$ ) 的顶点位置由侧面轮廓分析法确定, 我们可以限制内部特征点的搜寻区域。每一个器官的搜寻区域被限制在一个长方形窗口中, 这些窗口的大小和位置由  $s_1-s_8$ ,  $L_n-L_B$  的顶点位置和面部器官的大小来确定。

内部特征点可以通过寻找明显边界和它们在每一个搜寻区域的相对位置来确定。为了减少计算量, 只有搜寻区域被 Sobel 算子过滤, 如式 3-25 定义的那样。在这些预期窗口内的明显边缘线段可以通过用一个预定义的极限去对像素值取极限而被检测。最后, 我们可以由它们沿边缘线段 (极上和极下, 极左和极右) 的相对位置来确定特征点。对于脸部正视图, 鼻尖由正视图中顶点基准线和侧视图中鼻尖的顶点位置的交叉点确定。

$$\begin{aligned} Sobdx &= \frac{1}{4+2\lambda} \begin{pmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -\lambda & 0 & \lambda \\ -1 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ Sobdy &= \frac{1}{4+2\lambda} \begin{pmatrix} 1 & \lambda & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -\lambda & -1 \end{pmatrix} \quad \lambda = 2 \sim 4 \quad (3-25) \end{aligned}$$

如果我们仅依靠 LMCT 算法自动提取脸部特征点, 一方面对图像本身的质量和噪音干扰的要求会很高, 另一方面, 在边缘检测阶段必须采用更复杂的边缘检测算子和算法以期获得十分令人满意的边缘图像, 才能在进行特征提取时获得精确的特征点。这种精确性是以算法的复杂性和计算时间的大量延长为代价的。因此, 我们可以在 LMCT 算法自动提取的基础上, 通过手工交互的方式来确定我们计算特征参数所需的特征点集。由于人的脸部具有较明显的对称性, 我们可以认为它是左右对称的, 这样我们只需要获得脸部一侧的特征点, 通过对称关系即可获得人脸部的完整特征参数, 简化算法, 减少计算量。

我们知道, 在区别不同人脸的过程中, 脸部特征点是刻画不同人脸结构外形关键点。我们只要控制了这些特征点, 包括眼睛、鼻子、嘴

和脸部整体形状，就可以将一般模型变形为一个个体化的特定模型。我们只取脸部正视图左侧和脸部侧视图的特征点来计算下一节中我们将提到的脸部特征参数。

在实验中，我们使用鼠标在脸部正视图和侧视图图像上依次点取我们所需的脸部特征点。以鼠标中心位置坐标为参考，选取 LMCT 算法提取的特征点中最接近这一坐标的点作为最后确定的特征点。我们共获得了 23 个脸部特征点，包括正视图上的 15 个特征点和侧视图上的 8 个特征点，如图 3-9 所示。



图 3-9 脸部特征点集和特征参数

### 3-5 由一般模型到特定模型的变形

为了使人脸模型个体化，我们需要根据输入的人脸图像来调整一般模型以匹配特定人脸。从一般模型到特定模型的变形有很多方法。一种简单的实现人脸模型变形的方法是曲面插值法。变形后网格点的三维空间坐标是由变形前网格点的三维空间坐标乘以变形矩阵得到的。其中变形矩阵由已知的变形前后特征点集的坐标所决定。这种方法的主要缺点是单个特征点位置的变化会对整体模型产生影响，从而无法完成模型的局部调整。此外，还有一些其它的算法可以完成这一过程，下面我们主要介绍一种模拟脸部皮肤粘弹特性的变形算法和我们所采用的特征参数变换法。

### (一) 模拟脸部皮肤粘弹特性的变形算法

此算法<sup>[5]</sup>通过一组特征点的位置变换来得到一个新的人脸网格模型，当一般模型上的一个特征点被移动到特定图像上相应特征点的位置时，变形算法将模拟人脸皮肤的粘弹特性，自动计算出与该移动相关的网格点的新坐标位置。下面就以一个移动点为例来描述该算法的核心思想，它能很方便地推广到有多个移动点时的情况。

假设网格模型上一点  $v = (x, y, z)$ ，被移动到  $v' = (x', y', z')$ 。当移动发生后，整个模型上的网格点分成两个集合，分别称为内部点集和外部点集。内部点集由所有被该移动所影响的点组成。相应地，外部点集则包括了那些不被该移动影响的点。我们可以在生成内部点集时考虑人脸肌肉的分布和走向，这时一件十分复杂的工作。为此，一种可替代的简单确定方法是把到移动点的距离不大于某固定长度的网格点都放入内部点集。图 3-10 所示的网格点均属于关于移动点  $v$  的内部点集，共 15 个，其中固定长度取值为 2。在实际过程中可将此长度设为可调参数。

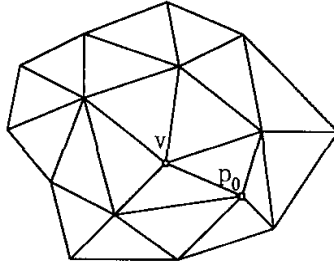


图3-10 与移动点 $v$ 相关的内部点集

人脸面部皮肤是一个弹性表面，为了模拟面部变形，一个合理的假设是将网格体相邻顶点间看作弹簧连接。设  $p_0$  是内部点集中的一点，即  $v$  的移动将对  $p_0$  的空间位置产生影响， $p_1, p_2, \dots, p_n$  与  $p_0$  相邻，如图 3-10。假设初始网格体是平衡的，当移动点移动时，在内部点集中的点被驱动到新的位置以获得网格体的新的平衡状态。因此，我们可以对  $p_0$  列出下面的平衡方程：

$$\sum_{i=1}^m \frac{p'_i - p'_0}{\|p'_i - p'_0\|} (\|p'_i - p'_0\| - \|p_i - p_0\|) k = 0 \quad (3-26)$$

其中, 当  $p_i = v$  时,  $p'_i = v'$  是已知的, 除此之外均为未知量。对所有的内部点列出这样的平衡方程, 解此非线性方程组, 即可得到内部点的新的三维坐标。应当指出的是, 当阶数增大时, 解空间很不稳定。为此, 我们假设人脸皮肤具有收缩特性, 即认为  $p_0$  与它周围点的距离和最小, 列出方程如下:

$$\partial \sum_{i=1}^m (\|p'_i - p'_0\|)^2 / \partial p'_0 = 0 \quad (3-27)$$

相应地, 可对所有内部点列出方程, 这是一个简单易解的线性方程组。

通过以上的变形算法, 我们可以由此得到新的人脸网格模型, 完成对一般模型的变形。

## (二) 本文采用的变形算法——特征参数变换法

以上介绍的变形算法可以完成从一般模型到特定模型的变形, 但它最大的缺点就是需要对构成模型的网格点都进行位移处理, 涉及到很大的计算量。所取的控制点数越多, 模型越精确。但这是以大计算量为代价的。这些方法自动化程度高, 但需要的计算时间长, 而且由于噪声的影响结果常常不很理想。比较方便可靠的是在少量交互的基础上加上自动拟合的半自动方法。我们提出的特征参数变换法, 在一般脸部模型上定义了 55 个特征参数。这些特征参数包括: 眼部参数 (5 个), 眼睑参数 (5 个), 眉毛参数 (2 个), 颊部参数 (4 个), 鼻部参数 (4 个), 嘴部参数 (7 个), 瞳孔参数 (2 个), 牙齿参数 (2 个), 头部参数 (3 个) 和其它相关的脸部器官的相对位置参数。

由于中国人在脸部的凹凸变化上不是很大, 包括眉毛的弯曲度, 眼睛、鼻子、嘴等相对位置的变化也不是很明显, 因此我们在进行模型变形时, 一般并不需要对每个特征参数都进行改变, 而只是对主要决定脸部基本形状, 确定脸部器官大小、宽窄、高矮等主要特征的 13 个特征参数进行变化, 这 13 个特征参数包括:

眼长  $P_{5,7}$  ( $P_{5,7}$  表示由第 5 个和第 7 个特征点确定的特征参数, 下同), 眼宽  $P_{6,8}$ , 脸宽  $P_{2,10}$ , 脸长  $P_{1,4}$ , 鼻宽  $P_{11,12}$ , 鼻梁宽  $P_{9,10}$ , 嘴长  $P_{12,13}$ , 下巴宽  $P_{3,4}$ , 鼻高  $P_{17,18}$ , 鼻长  $P_{10,12}$ , 下巴高  $P_{22,23}$ , 下巴长  $P_{4,15}$ , 眼间距  $P_{7,10}$ , 这些特征参数的定义如图 3-9 所示。

此外, 在模型全部 55 个特征参数中, 还有一些是用来模拟脸部的一些基本动作的, 如眼的睁闭, 嘴的张合, 眼角的上扬或下弯, 嘴的上弯

或下弯, 通过改变这些参数的值, 我们可以很容易地控制脸部器官的变化, 从而模拟出人脸的一些基本表情, 如哭的脸部表情, 我们可以认为是眼角下耷和嘴部向下弯曲的结果, 而笑的表情, 则是眼睛半闭和嘴部向上弯曲的结果, 眼睛闭合程度和嘴部弯曲程度以及嘴张开程度的不同则可以区别微笑和大笑。

那么我们如何通过二维图像中提取出的特征点集来确定我们所需的特征参数呢? 在上一阶段提取特征点集的基础上, 我们通过计算两个特征点之间的像素距离得到这些特征参数。设特征点  $i(x_i, y_i)$ ,  $j(x_j, y_j)$ , 则由它们确定的特征参数  $P_{i,j}$ , 可由下式计算而得:

$$P_{i,j} = |x_i - x_j|$$

或是,

$$P_{i,j} = |y_i - y_j|$$
(3-28)

这些特征参数被作为比例因子与模型中的网格点一起构成一般脸部模型。在从一般模型到特定模型的变形过程中, 我们用从特定图像中提取的特征点获得的个体特征参数替代一般模型中对应的一般特征参数, 完成变形过程, 具体的变形过程如下所示。

设变形前脸部模型上网格点的坐标为  $(x, y, z)$ , 经变形后的坐标为  $(x', y', z')$ , 变形前后脸部的中心点坐标  $O$  分别为  $(x_0, y_0, z_0)$  和  $(x'_0, y'_0, z'_0)$ , 一般特征参数为  $P_{i,j}$ , 个体特征参数为  $P'_{i,j}$ , 则映射变换关系为

$$\begin{cases} x' = x'_0 + P_1(x - x_0) \\ y' = y'_0 + P_2(y - y_0) \\ z' = z'_0 + P_3(z - z_0) \end{cases} \quad (3-29)$$

其中,

$$P_k = \frac{P'_{i,j}}{P_{i,j}} \quad (k = 1, 2, 3)$$

这样, 我们在变形过程中, 并不需要对每一个网格点的位置坐标都进行计算, 而只需要计算出特征参数, 进行特征参数的变换就可以达到对一般脸部模型进行变形的目的, 得到一张具有特定人脸特征的脸部模型。

同时，由于特征参数可以直接控制脸部各器官，因此，我们也可以通过对特征参数的改变来进行脸部的基本动作，包括眼部、嘴部的开合，哭、笑等表情模拟。

### 3-6 特征参数变换法的算法实现

在上几节中，我们具体分析了特征参数变换法实现的四个阶段各自的算法原理，而其具体的算法流程如图 3-11 所示。

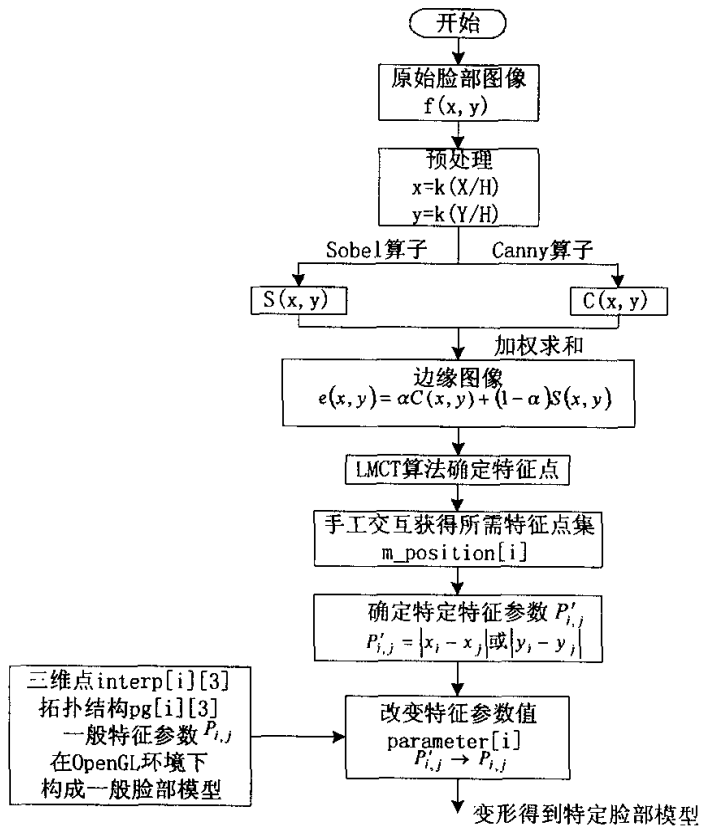


图3-11 特征参数变换法的算法流程

### 3-7 本章小结

本章主要介绍了一种改进的三维脸部模型合成方法——特征参数变换法，其基本思想和处理流程，并分预处理、边缘检测、特征点提取和一般人脸模型变形四个阶段具体实现了此方法的整个处理过程。

已有的一些三维脸部模型重建方法都是通过改变新的特定的顶点值来确定模型的变形方向，或者是通过一组特征点的位置变换来得到一个新的人脸网格模型，但这些方法都涉及到大量的三维点坐标位置的重新计算，因此不可避免地存在算法复杂性和大计算量的问题。针对这个问题，我们提出了特征参数变换法。通过特征参数变换法我们可以仅通过改变我们在模型上定义的 55 个特征参数，以作为构成模型的比例因子，从而控制脸部整体形状和脸部器官的大小，最后得到具有个体化特征的三维脸部模型。此方法的改进之处在于它将脸部模型进行了参数化，通过一些参数来控制模型的变形，而不再通过改变构成模型的三维点的坐标位置来进行模型变形，显而易见，构成脸部模型的三维点的数量要比我们定义的 55 个特征参数的数量大的多，因此，我们极大地简化了变形算法，减少了实现过程中的计算量。

## 第四章 真实性的改善和三维显示

在上一章中我们已经比较详细地讨论了如何用特征参数变换法构成三维特定脸部模型，但由于缺少光照效果，没有阴影，使得模型的真实感有待改进。在这一章里，我们主要介绍三维物体真实感的显示。

### 4-1 光照处理

对物体进行透视投影，然后在可见面上产生自然光照效果，可以实现物体的真实感显示。一个光照明模型(Illumination model)，亦称光照模型，或明暗模型，主要用于物体表面某点处的光强度的计算。目前模拟实际情况下的光照效果有许多模型，常用的用 Phong 模型，Torrance-Sparrow 模型，Cook-Torrance 模型等，但最常用的还是 Phong 模型，因为该模型的计算量小，而且还有很好的模拟效果。在这里我们对 Phong 模型作一简单介绍。

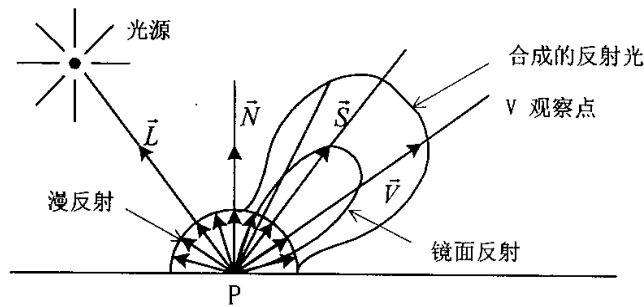


图4-1 光照模型

考虑在空间某一点  $L(x_l, y_l, z_l)$  处有一个点光源，其发光强度为  $I_l$ 。从观察点  $V(0, 0, -f_c)$  处观察一个不透明的物体表面  $P(x_p, y_p, z_p)$  点，注意我们应把 P 点理解为 P 附近的一小块面元，而物体表面具有二重性：

一方面它在 P 处有法向量  $\vec{N}$ ，另一方面它在 P 附近并不是理想光，因此



入射到 P 的光线并不全部沿反射方向  $\vec{S}$  反射, 而是将反射光线分解成两部分: 一是向各方向均匀的漫反射  $I_{ld}$ ; 一是围绕着理想反射方向  $\vec{S}$  的镜面反射  $I_{ls}$ , 如图 4-1 所示。

此外, 我们还要考虑到物体间光的相互作用, 这可以归结为环境光  $I_a$ , 它在 P 点亦向各方向均匀地漫反射。因此, 由 P 向 V 反射的光强度为

$$I_p = I_{ad} + I_{ld} + I_{ls} \quad (4-1)$$

式中  $I_{ad}$  —— 环境光  $I_a$  引起的漫反射分量 ( $I_{ad} = k_a I_a$ ,  $k_a$  为漫反射系数);  
 $I_{ld}$  —— 入射光的漫反射分量;  
 按照 Lambert 定律, 可表示为

$$I_{ld} = \begin{cases} I_l k_d \cos \theta = I_l k_d \vec{L} \cdot \vec{N} & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4-2)$$

$I_{ls}$  —— 入射光的镜面反射分量, 它产生所谓的“高光”效应;  
 按照 Bui-Tuong Phong 提出的公式, 可以表示为

$$I_{ls} = \begin{cases} I_l W(\theta) \cos^n \delta = I_l W(\theta) (\vec{S} \cdot \vec{V})^n & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ 0 & \theta > \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (4-3)$$

其中  $\delta$  为视线方向  $\vec{V}$  与镜面反射方向  $\vec{S}$  间的夹角。N 为物体表面光洁度系数, 它随表面材料而定, 对金属、玻璃等表面光滑的材料 n 值较大; 对纸张、木材等表面粗糙的材料 n 值较小, 其空间分布特性为扩散型。式中  $W(\theta, \lambda)$  为反射率曲线, 它是作为入射角  $\theta$  和光波长  $\lambda$  的函数而给定的, 实用时常根据美学观点或实验数据用一常数  $k_s$  来代替, 称作镜

面反射系数。

又考虑到光线在传播过程中能量会衰减，应该引入距离的影响因素，因此可以用下式来近似地表达这一影响，即用  $I'_i$  来代替  $I_i$ ，用  $I'_p$  来代替  $I_p$ ，而  $I'_i$  与  $I'_p$  分别为

$$\begin{aligned} I'_i &= \frac{I_i}{ad_{LP}^\alpha + b} \\ I'_p &= \frac{I_p}{cd_{PV}^\beta + d} \end{aligned} \quad (4-4)$$

式中  $a, b, c, d, \alpha, \beta$  均为适当选择的常数。

为了简便，取

$$\begin{aligned} I_p &= k_a I_a + \frac{I_i}{d+k} \left[ k_d (\vec{L} \cdot \vec{N}) + k_s (\vec{S} \cdot \vec{V})^n \right] & 0 \leq \theta \leq \frac{\pi}{2} \\ I_p &= k_a I_a & \theta > \frac{\pi}{2} \end{aligned} \quad (4-5)$$

其中， $d$  为  $V$  到  $P$  的距离， $k, k_a, k_d, k_s$  均为常数。如果不考虑距离的影响，可以设  $d+k=1$ 。

在处理过程中应注意： $k_a, k_d, k_s$  均为  $0 \sim 1$  之间的常数，且  $k_d+k_s \leq 1$ ，这是因为部分光能将被物体表面吸收。

对多光源情况有：

$$I = I_a k_a + \sum_{j=1}^M \frac{I_{ij}}{d_j + k_j} (k_d \cos(\theta_j) + k_s \cos^n(\delta_j)) \quad (4-6)$$

式中  $M$  是光源的个数。

对于平行光照射情况，其实相当于光源位置处在无穷远时的情形，此时只要给出一个光矢量  $\vec{L}$  即可。

## 4-2 投影变换

投影变换是三维形体二维表示的技术。投影就是把空间图形投射到投影面上而得到的平面图形。投影的种类很多，如正投影、透视投影、仿射投影等等。其中最常用的是透视投影，这是由于透视投影产生的效果很类似于照相系统和人类的视觉系统，比较适合于人的观察习惯。透视投影按主灭点的个数又可以分为下列三种：一点透视、二点透视、三点透视等。在这三种方法中第一种最常用。我们在显示中采用的就是一点透视方式，下面对此方法做一简单介绍。

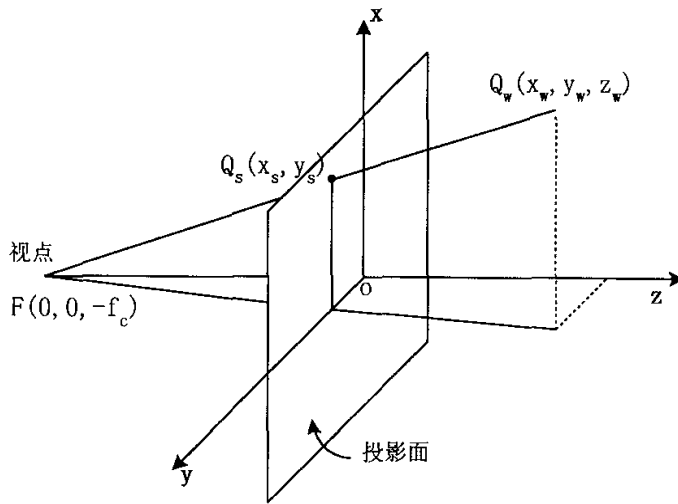


图4-2 透视变换

如图 4-2 所示，我们设想生成的纹理物体处于  $xoy$  平面的右边( $z>0$ )， $xoy$  平面为投影面， $F(0, 0, -f_c)$  为观察位置。对于空间物体上的某一点  $Q(x, y, z)$ ，其在投影面上的成像位置可根据相似三角形的几何关系来确定：

$$\begin{aligned}x_s &= \frac{x_w}{1+z_w/f_c} \\y_s &= \frac{y_w}{1+z_w/f_c}\end{aligned}\quad (4-7)$$

利用齐次坐标技术，我们可把透视投影过程用下式来表示：

$$\begin{aligned}[x'_s \quad y'_s \quad z'_s \quad H] &= [x_w \quad y_w \quad z_w \quad 1] \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1/f_c \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ &= [x_w \quad y_w \quad 0 \quad (1+z_w/f_c)] \\ &\Rightarrow [x_s \quad y_s \quad z_s \quad 1] = \begin{bmatrix} \frac{x_w}{1+z_w/f_c} & \frac{y_w}{1+z_w/f_c} & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4-8)\end{aligned}$$

这是观察点在  $z$  轴、投影面为  $xoy$  面的情况，对于观察点在  $y$  轴和  $x$  轴的情况按同样方法可以求得。

三维物体经透视变换至投影面  $xoy$ ，但要真正地在显示器上显示还需要对投影面上的图像进行裁剪和坐标变换。设投影面坐标和屏幕坐标如图 4-3 所示，显示屏的大小为  $N_x \times N_y$ ，则物体投影在如图 4-3(a) 的矩形区域内是可见的，否则是不可见的，也就是说投影的线框区域外的图像将被剪掉。显然投影面到显示屏的坐标变换关系式为：

$$\begin{cases} x' = N_x/2 + x & -N_x/2 \leq x \leq N_x/2 \\ y' = N_y/2 - y & -N_y/2 \leq y \leq N_y/2 \end{cases} \quad (4-9)$$

其中， $x, y, x', y'$  都是整数。

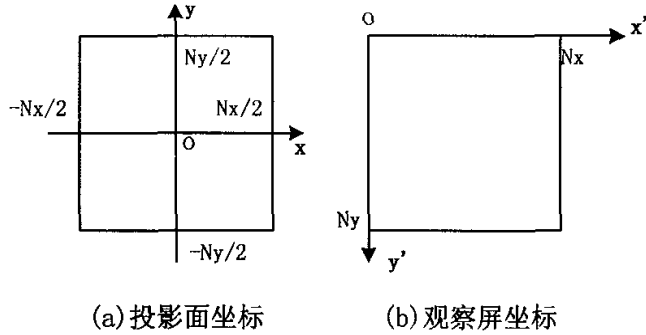


图4-3 坐标变换

### 4-3 纹理映射

在用计算机制作模拟自然的三维景物时，为了使生成的物体图形具有真实感，采用了许多算法进行消隐处理、产生明暗效应，建立颜色模型，光照模型，光线跟踪等图形生成技术。为了能用计算机模拟物体各种表面细节，纹理映射就成为真实感图形生成必不可少的方法。

纹理按其纹理物体表面粗糙程度的不同可以分为两种类型：一种是在光滑表面上描绘附加定义的花纹或图案，当花纹绘上后，表面仍然是光滑的，我们可称这类纹理为光滑表面纹理；另一种是使物体表面出现凹凸不平形状，如山脉、云团等等，我们称这类纹理为凹凸纹理。不同类型的纹理需不同的方法合成，对于第一类纹理，一般采用的是纹理映射的方法(Texture Mapping)，这种方法也是我们所要采用的；第二类纹理合成的方法很多，如凹凸映射(Bump Mapping)方法，固体纹理(Solid Texture)方法。下面我们分别介绍这几种方法的基本原理以及它们各自的特点。

## (一) 纹理映射

E.E.Catmull 于 1974 年首先提出来了纹理映射方法, 它的基本思想就是指利用一定的映射关系(线性的或非线性的), 实现二维纹理到三维物体表面的映射, 从而将二维纹理“贴”到三维物体表面上, 并经透视变换显示于光栅扫描显示器上, 通过这一映射, 二维纹理图像重新进行分布, 使合成的纹理显示出立体效果。整个纹理映射过程可分两步来实现, 如图 4-4 所示。首先对物体表面参数化, 以实现从纹理空间到对象空间的映射, 经透视变换将三维物体投影在图像空间进行显示。

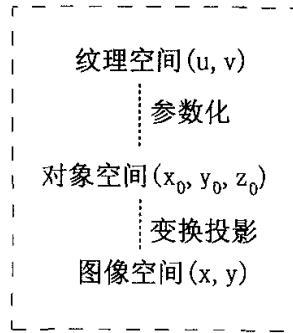


图4-4 纹理映射过程

上述过程可用数学关系式表示: 如图 4-5, 纹理空间上一点  $P'(u, v)$  经映射  $f$  映射至对象空间中三维物体表面上一点  $P(x_0, y_0, z_0)$ , 为了在显示屏上显示, 需将点  $P$  经过投影变换  $p$ , 得到图像空间上  $Q$  的坐标。图中函数  $f^{-1}$  是映射函数  $f$  的逆函数。

由映射函数  $f$  和投影函数  $p$  可得函数  $g(u, v) = p(f(u, v))$ , 它是一个从纹理空间到图像空间的映射函数。如果设  $h(x, y)$  是  $g(u, v)$  的逆函数, 那么只要求得函数  $g$  或  $h$ , 就可以实现从纹理空间到图像空间的映射。

根据映射函数  $h(x, y)$  或  $g(u, v)$  的线性、非线性特性可以将映射分成线性映射和非线性映射。一般来说, 将平面纹理映射到任意曲面上, 这是一个非线性过程, 但是考虑到算法的复杂程度, 一般是用线性映射来近似非线性映射的。

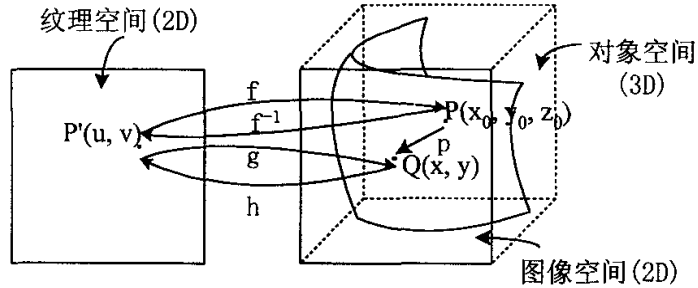


图4-5 映射过程的图解

目前，利用纹理映射技术合成三维纹理的研究很多，但在利用纹理映射合成三维纹理中，普遍存在纹理的严重畸变和走样。

(二) 凹凸映射

利用纹理映射的方法合成三维纹理，合成后的纹理表面仍是光滑的，但是在实际生活中，许多物体的表面往往是凹凸不平的。如何来模拟这些表面粗糙的物体是一个值得研究的课题，Blinn 在 1978 年提出了凹凸映射方法。由于该方法实质上是利用一随机函数扰动物体表面的法向量来获得表面凹凸不平的效果的，因此此方法也被称为表面法向量扰动法。

设参数表面一点  $\vec{p}(t, w)$ ，沿  $t$ 、 $w$  方向的偏导数矢量  $\vec{p}_t$  和  $\vec{p}_w$  位于表面在该点的切平面上，由  $\vec{p}_t$  和  $\vec{p}_w$  可求得该点的法矢量，即

$$\vec{n} = \vec{p}_t \times \vec{p}_w$$

为了在表面上产生出凹凸纹理，在表面上沿法线方向附加一个扰动函数  $Q(t, w)$  作为分量的矢量，从而得到一新的表面，其任一点的位置矢量为：

$$\vec{P}'(t, w) = \vec{P}(t, w) + Q(t, w) \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \quad (4-10)$$

新的法向量:

$$\begin{aligned}\vec{n}' &= \vec{P}'_t \times \vec{P}'_w \\ \vec{P}'_t &= \vec{P}_t + Q_t * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) + Q * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) \\ \vec{P}'_w &= \vec{P}_w + Q_w * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) + Q * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right)\end{aligned}\quad (4-11)$$

由于扰动函数非常小, 因此上面两个式子中最后一项可以略去不计, 从而我们可以得到简化后的式子:

$$\vec{P}'_t = \vec{P}_t + Q_t * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) \quad \vec{P}'_w = \vec{P}_w + Q_w * \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) \quad (4-12)$$

扰动后表面的法向量为:

$$\begin{aligned}\vec{n}' &= \vec{P}'_t \times \vec{P}'_w + \frac{Q_t * (\vec{n} \times \vec{P}_w)}{|\vec{n}|} + \frac{Q_w * (\vec{P}_t \times \vec{n})}{|\vec{n}|} + \frac{Q_t * Q_w * (\vec{n} \times \vec{n})}{|\vec{n}|} \\ &= \vec{n} + \frac{Q_t * (\vec{n} \times \vec{P}_w)}{|\vec{n}|} + \frac{Q_w * (\vec{P}_t \times \vec{n})}{|\vec{n}|}\end{aligned}\quad (4-13)$$

上式中最后两项为原表面法向量的扰动项。 $\vec{n}'$ 经单位化后用于光照模型中产生扰动作用。显然对表面上每一点都需要求新的法向量 $\vec{n}'$ , 所以这种算法的计算量很大。

### (三) 固体纹理的合成

固体纹理的合成方法首先是由 Peachy 提出的, 它是一种完全不同于纹理映射和凹凸映射的崭新方法。该方法的基本思想是利用一个定义在三维空间某一区域内的纹理函数 $\rho(x, y, z)$ 来合成三维纹理, 利用该方法我们可以很逼真地模拟一些三维自然纹理, 如木纹理、岩石、云彩等, 此外还可以很容易地应用到一些难以用二维纹理描述的复杂纹理表面。



一般地可以选择下列函数作为固体纹理函数 $\rho(x, y, z)$ ：

(1) Bombing 方法

这是一随机纹理函数，其建模方式是将大量的，不同形状和大小的”Bomb”随机地落入三维空间中某一区域内，从而合成一定形状的三维固体纹理。在实际应用中可以用不同大小的球体来模拟”Bomb”。

(2) 傅里叶合成函数(Fourier synthesis function)

该函数用一系列定义在三维空间中的正弦函数之和来表示，利用该函数可以合成大理石纹理。

(3) 联合函数(Combination function)

一系列简单固体纹理函数的复合函数可以构成新的纹理函数，这一新的函数就称为联合函数。

此外，湍流函数、噪音函数、投影函数也可作为三维纹理函数。与一般的纹理映射方法相比，固体纹理方法有下列优点：

- (1) 需要合成的三维物体形状和纹理是相互独立的，因此没有曲面参数化问题；同样由于是直接函数描述三维纹理的，因此没有二维纹理的预畸变问题。
- (2) 只要求很小的数据库。

(四) 本文所采用的纹理映射方法

在本文所完成的三维特定脸部模型的重建过程中，在调整完模型形状后，为了生成真实感的面部图像，我们采用多方向纹理映射技术生成不同视点方向的面部图像。此纹理映射从多个面部图像（正视图和侧视图）上获取纹理信息投射到三维面部曲面模型。对于面部曲面上的每一个 Bézier 片，其相应的纹理图像区域通过正投影此 Bézier 片的边界曲线到面部图像上来确定，图 4-6 是这一过程的示意图。

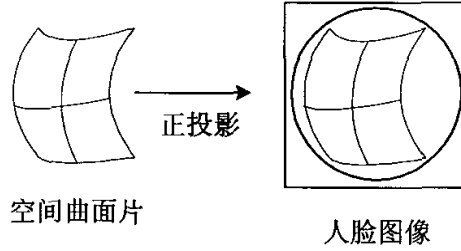


图4-6 应用面部图像进行纹理映射示意图

选取哪一个图像作为被投影图像将取决于此曲面片的整体方向，当曲面片的整体方向与正脸方向平面（Y-Z 平面）夹角小于  $30^\circ$  时，投影于正视图图像，否则投影于侧视图图像。曲面片的整体方向采用如下方法计算。

设

$$p(u, v) = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_{ij} B_{i,2}(u) B_{j,2}(v) \quad (u, v) \in [0,1] \times [0,1]$$

为双二次 Bézier 曲面片，其中  $b_{ij}$  为排成网格的控制顶点，而  $B_{i,2}(u), B_{j,2}(v)$  皆为基函数，

$$B_{i,2}(u) = c(2, i) u^i (1-u)^{2-i} \quad (i = 0, 1, 2)$$

$$c(2, i) = \frac{2!}{i!(2-i)!}$$

其切平面由如下两个向量表示。

u 方向：

$$r_u = \frac{\partial p(u, v)}{\partial u} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_{ij} B_{j,2}(v) \frac{\partial B_{i,2}(u)}{\partial u} \quad (4-14)$$

v 方向：

$$r_v = \frac{\partial p(u, v)}{\partial v} = \sum_{i=0}^2 \sum_{j=0}^2 b_{ij} B_{i,2}(u) \frac{\partial B_{j,2}(v)}{\partial v} \quad (4-15)$$

曲面片的整体方向可由下式的每点方向的平均值给出，

$$N = \int_0^1 \int_0^1 \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|} dudv \quad (4-16)$$

上述函数分子和分母分别为一个三次多项式和一个六次多项式的平方根，一般很难得到它的精确积分结果，在实际计算中，我们采用下式将其离散化，即

$$f_N(u, v) = \frac{r_u \times r_v}{|r_u \times r_v|}$$

$$N \approx \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \frac{1}{m^2} f_N\left(\frac{2i-1}{2m}, \frac{2j-1}{2m}\right) \quad (4-17)$$

以此得到曲面片法向量的估计值，算法时间复杂度为  $O(m^2)$ ，其中  $m$  的取值可在估算精度与算法的时间开销权衡考虑之下作出。

由于本论文的研究工作是在 OpenGL 图形接口环境下完成的，因此，在纹理映射的实现上，也采用 OpenGL 中的纹理映射函数来完成。

一般来说，OpenGL 中的纹理映射分 4 步进行：

1. 定义纹理；
2. 控制滤波；
3. 说明映射方式；
4. 绘制场景给出顶点的纹理坐标和几何坐标。

下面我们就按照这四步具体说明纹理映射的实现过程。

### 1. 纹理定义

在本论文中，纹理图像是 256\*256 像素的二维图像，因此我们使用下面的函数定义一个二维纹理映射。

```
void glTexImage2D( GLenum target , GLint level , GLint
components, GLsizei width, GLsizei height, GLint border, GLenum
format, GLenum type, const GLvoid *pixels )
```

其中,

target 是常数 GL\_TEXTURE\_2D;

level 表示多级分辨率的纹理图像的级数, 如本论文中只有一种分辨率, level 为 0;

components 是从 1 到 4 的整数, 1: 选择 R; 2: 选择 R A; 3: 选择 RGB; 4: 选择 R G B A; 在本论文中我们选择 3;

width 和 height 是纹理的尺寸, 此处分别为 256, 256;

border 是图像边界宽度, 此处为 0;

format 和 type 描述映射格式和数据类型, 在本论文中分别为 GL\_RGB 和 GL\_UNSIGNED\_BYTE;

\*pixels 为指向纹理图像数据数组的指针;

一般纹理数据维数应该是 2 的幂次, 本论文涉及的纹理数据维数为 2 的 24 次幂。

## 2. 纹理控制 (滤波和重复与缩限)

所有纹理控制通过 void glTexParameter{if}[v] (GLenum target, GLenum pname, TYPE param)来实现。

target 为 GL\_TEXTURE\_2D, pname 和 param 的可能取值见下:

| Pname                 | param                     |
|-----------------------|---------------------------|
| GL_TEXTURE_WRAP_S     | GL_CLAMP                  |
|                       | GL_REPEAT                 |
| GL_TEXTURE_WRAP_T     | GL_CLAMP                  |
|                       | GL_REPEAT                 |
| GL_TEXTURE_MAG_FILTER | GL_NEAREST                |
|                       | GL_LINEAR                 |
| GL_TEXTURE_MIN_FILTER | GL_NEAREST                |
|                       | GL_NEAREST_MIPMAP_NEAREST |
|                       | GL_NEAREST_MIPMAP_LINEAR  |
|                       | GL_LINEAR_MIPMAP_NEAREST  |
|                       | GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR   |

原始纹理图像是个方形图像, 把它映射到不规则的复杂物体上, 一般不可能图像上的一个像素对应屏幕上的一个像素, 因此局部放大缩小时, 就要定义合适的滤波方式 (以 2D 为例):

```
void glTexParameterf(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER,
GL_NEAREST);
```

```
void glTexParameterf(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER,  
GL_NEAREST);
```

前者是放大滤波 (GL\_TEXTURE\_MAG\_FILTER)，后者是缩小滤波 (GL\_TEXTURE\_MIN\_FILTER)。另外，GL\_NEAREST 是利用其坐标最靠近像素中心的纹理元素，这有可能使图形走样，但计算速度快；GL\_LINEAR 利用线形插值，效果好但计算量大。

纹理映射可以重复映射或者缩限映射。

对于重复映射：

```
void glTexParameterfv(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S,  
GL_REPEAT);  
void glTexParameterfv(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T,  
GL_REPEAT);
```

参数 GL\_REPEAT 改为 GL\_CLAMP，则缩限，所有大于 1 的纹理元素值置为 1，所有小于 0 的纹理元素值置为 0。

### 3. 映射方式

处理纹理本身图案颜色和物体本身颜色的关系：

```
void glTexEnv{if}{v}(GLenum target, GLenum pname, TYPE param)  
target 必须是 GL_TEXTURE_ENV;
```

pname 是 GL\_TEXTURE\_ENV\_MODE，则 param 可以是 GL\_DECAL、GL\_MODULATE 或 GL\_BLEND，说明纹理值与原来颜色不同的处理方式，这里我们选择 GL\_BLEND；

pname 是 GL\_TEXTURE\_ENV\_COLOR，则参数 param 是包含 4 个浮点数 (R、G、B、A) 的数组。

### 4. 纹理坐标

当我们采用上文提到的多方向纹理映射技术，计算出构成脸部模型的每个拓扑三角形三个顶点的纹理坐标后，我们采用 void glTexCoord2f (TYPE coords) 设置当前纹理坐标，此后调用 glVertex3d (GLdouble x, GLdouble y, GLdouble z)，使每个顶点都被赋予当前的纹理坐标，从而完成整个纹理映射过程，得到具有较高真实感的特定人脸模型。

#### 4-4 本章小结

本章介绍了三维物体真实感的显示，包括光照处理，投影变换和纹理映射等方面的基本原理，其中主要讨论了纹理映射的基本分类和具体到本论文所采用的多方向纹理映射方法的算法和实现过程，并通过 OpenGL 图形接口环境下函数的调用来完成了一个具有较高真实感的特定脸部模型的纹理映射过程。

## 第五章 实验概述

在上面两章中，我们详细介绍了使用特征参数变换法构成三维特定脸部模型的具体过程，并讨论了具有真实感的三维模型的显示问题。在这一章中，我们将介绍一下整个实验工作的情况，其中包括工作环境的选择，平台功能概述以及实验结果。

### 5-1 工作环境的选择

我们的实验是在一台 PC 机上完成的，其配置为：

- 奔腾(Pentium) MMX 166MHz;
- 内存 32MB;
- 硬盘 2GB;
- 14" SVGA 显示器，分辨率设置为 800×600 像素;
- 操作系统为 Windows 95 OSR-1;
- 编程环境为 Visual Studio-Visual C++ 5.0 以及 OpenGL 图形接口。

我们之所以选择 Visual C++和 OpenGL 图形接口作为整个实验的工作语言，主要是因为以下的一些原因。

- (一) Visual C++是目前为止最为完善的软件开发系统之一，它将程序编辑、资源编辑、编译、调试、运行融为一体，通过应用平台(Application Studio)将程序开发应用向导(AppWizard)和类向导(ClassWizard)结合的天衣无缝，其集成化和智能化程度之高令众多同类软件自叹不如，从而极大地提高了我们开发的效率。
- (二) Visual C++不仅仅是 C++语言的集成开发环境，而且还与 Windows 紧密相连，更有 Microsoft 的基本类库(MFC)使得应用程序框架、类框架及函数框架的自动生成完全支持 Windows 系统，使程序更加健壮，可靠性和易维护性得到极大地改善。

(三) OpenGL 是一个提供 3D 图形绘制及着色功能的图形应用程序接口函数库。作为图形硬件的软件接口, OpenGL 的主要功能是在帧缓存中为二维或三维物体着色。用户可以直接控制二维或三维图形的基本操作, 指定坐标变换矩阵、光照条件的各种因子、反走样方法等各种参数, 另外, 用户还可以通过 OpenGL 命令指定产生某些特定的效果。目前包括 Microsoft、SGI、IBM、DEC、SUN 以及 HP 等几家在计算机市场上占主导地位的大公司都采用了 OpenGL 标准, 而且随着支持 OpenGL 的图形加速卡的出现和 PC 机性能的提高, OpenGL 在微机平台上也得到了广泛的应用, 它现在已经成为事实上的高性能图形和交互式视景处理的标准。

## 5-2 工作平台功能概述

在本文完成的实验中, 我们构成了一个三维特定头部模型应用平台的基本框架, 并分四个菜单选项边缘提取、特征点确定、标准模型和特定模型完成了整个脸部模型重建工作, 之所以将标准模型和特定模型分别显示, 主要是为了突出变形的效果, 使之有所对照。在标准模型和特定模型的显示中, 我们在显示区域左侧建立了一个控制区域, 以达到在显示的同时方便快捷地对右侧的三维模型和场景进行调整和控制的目的。这个控制区域如图 5-1 所示, 包括以下几项主要功能:

- **背景选择:** 可以选择不同的场景背景颜色, 采用调色板方式, 默认值为黑色;
- **光照选择:** 可以选择环境中光照的颜色, 由环境反射、漫反射和镜面反射构成的物体表面反射光的视觉影响, 采用调色板方式, 默认值为白光;
- **消除混叠:** 由于计算机以离散点生成图形, 生成图形必然与真实景物存在差距, 这种差距表现为: 直线或光滑曲面的锯齿、花纹失去原有色彩形状、细小物体在画面的消失等, 这些都被称为走样。反走样可以减少这种情况, 即把原来边界的地方锯齿部分用低饱和度的点补上, 这样既不影响整体轮廓, 又获得较好的平滑效果;
- **图形平滑:** 模型物体由曲面片构成, 在每个曲面片相接处并不能保证连续, 图形平滑可以将曲面片连接处进行平滑处理, 使模型表面保持光滑;



- **模型方式**: 模型显示方式, 包括线框模型、填充模型、纹理模型;
- **动画效果**: 主要是指模型的旋转, 包括自动旋转和鼠标控制旋转;
- **比例缩放**: 模型大小的调整, 包括整体缩放和 x, y, z 方向的单独缩放。

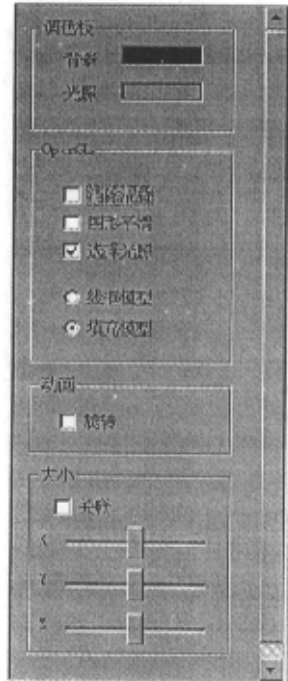


图 5-1 控制区域示意图

### 5-3 实验结果

我们在黑背景下使用 CCD 摄像机共拍摄了 12 个人的脸部正面和侧面图像各 1 张, 共 24 张, 黑白图像数字化的结果是 256\*256 像素。

通过特征参数变换法, 我们合成了具有真实感的三维特定脸部模型。使用此方法, 我们同样可以进行其它特征的变换, 如脸部的基本动作, 包括眼部、嘴部的开合, 哭、笑等表情模拟。

整个实验结果可以用我们设计完成的三维头部模型应用平台来进行演示，下面我们通过一些图示来介绍一下这个应用平台和实验结果。



图 5-2 三维头部模型应用平台封面



图 5-3 三维头部模型应用平台菜单选项

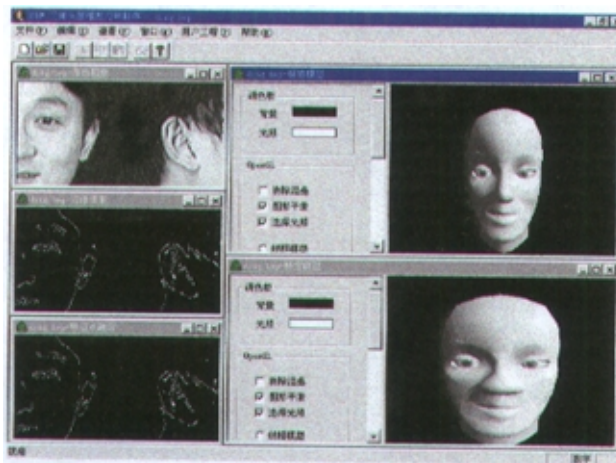


图 5-4 三维头部模型应用平台实验结果演示



图 5-5 原始图像（正视图和侧视图）



图 5-6 边缘检测图像



图 5-7 特征点提取图像



图 5-8 一般脸部模型



图 5-9 变形后的特定脸部模型

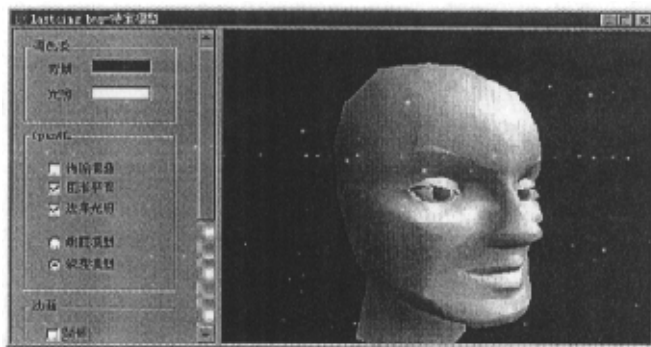


图 5-10 三维特定脸部模型的实验平台



图 5-11 眼部的动画



图 5-12 嘴部的动画



图 5-13 表情模拟一笑



图 5-14 表情模拟一哭

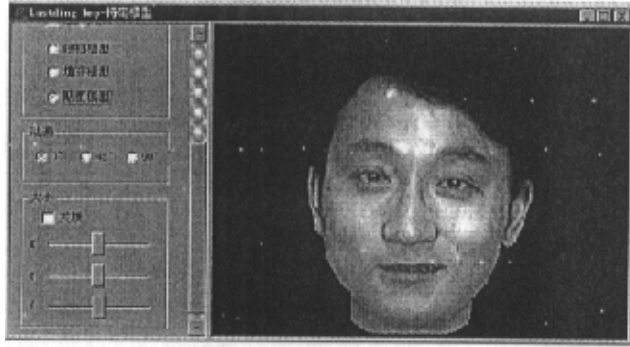


图 5-15 纹理映射 (0°)

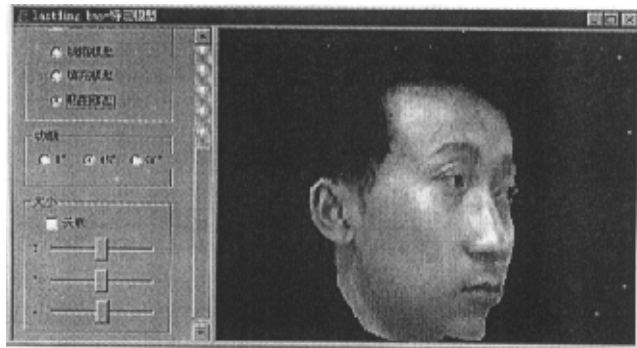


图 5-16 纹理映射 (45°)

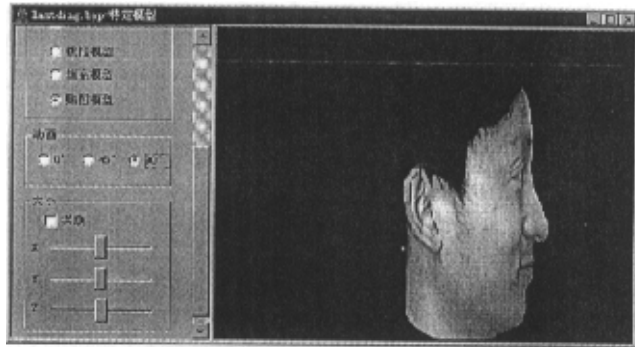
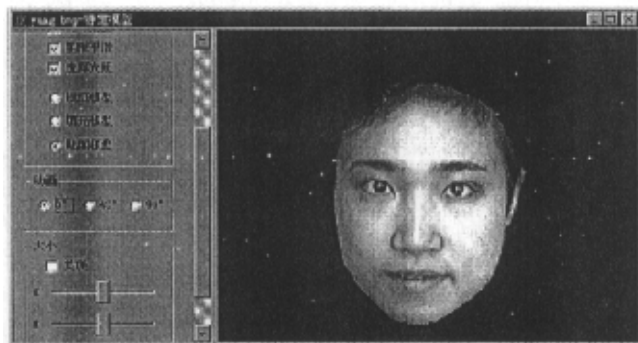
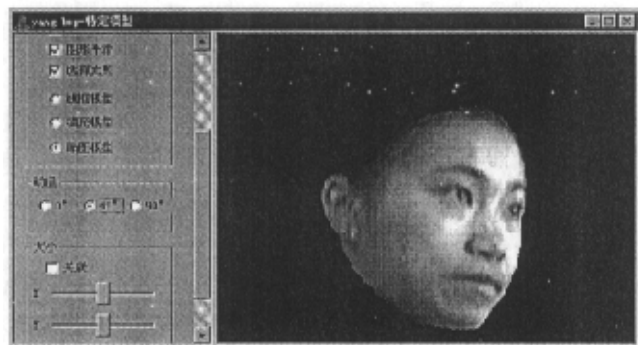


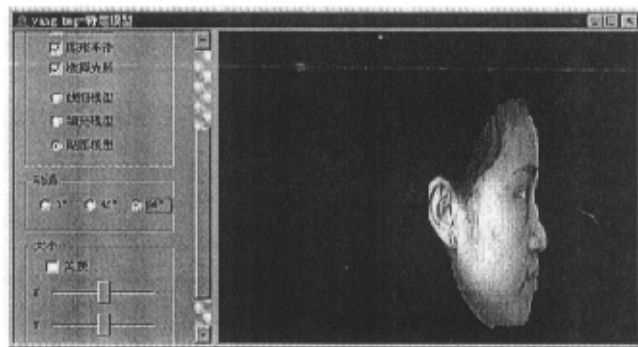
图 5-17 纹理映射 (90°)



(a)



(b)



(c)

图 5-18 另一个三维特定头部模型重建的例子

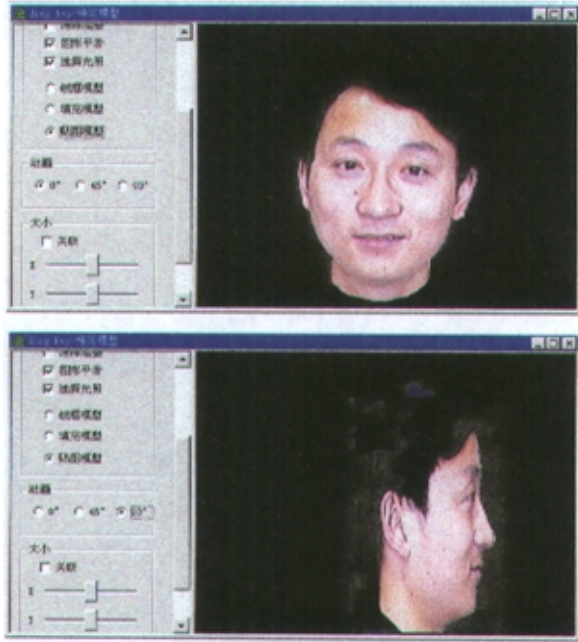


图 5-19 彩色纹理映射

从实验结果来看,使用特征参数变换法进行三维特定人脸的重建,算法简单,速度较快,重建的效果也比较令人满意。但是,在纹理映射方面,还存在一些不足,有时的纹理贴图效果不尽如人意。而且,由于特征点数目的选取比较少,使得脸部模型还不能非常精确地刻画脸部特征。这些都是在以后的研究中需要改进的地方。

通过三维头部模型应用平台,我们在提供一个特定脸部正视图和侧视图的情况下,可以获得具有真实感的特定头部模型。与传统方法相比,此平台对原始图像要求不高,整个实现过程算法简单,计算量少,具有较好的实时性。此方法可以较为容易地被移植到多功能感知系统中,作为其中人机交互的接口环境。当用户向系统提供其正视图和侧视图之后,我们可以使用本平台来重建一个具有用户个性化特征的特定三维脸部模型,并可对其进行简单的控制,使用户在使用多功能感知系统时,具有很强的沉浸感和身临其境的奇妙感受,因此,本论文所完成的三维头部模型应用平台具有较强的应用价值和发展前景。



## 结束语

随着时代的进步，计算机科学不断地带给人们日新月异的发展和变化，人们在感受了计算机带来的科技突飞猛进之后，不再满足于与计算机冰冷的键盘鼠标和枯燥的数据打交道，而是希望能够象与真正的人交流一样，和计算机进行更加直接，更加生动的交互。三维特定脸部模型的重建正是在这种情况下应运而生的。通过重建一个具有真实感的三维人脸，计算机用户接口被充分的人性化，用户可以不再面对死板的界面和闪动的光标，而是感到仿佛身在其中般的奇妙感受，这使得三维脸部重建技术日益成为研究者们注意的焦点。

现在流行的三维脸部重建技术主要集中在结构化外形重建方面，其中的几种主要方法，如网格适应法、人机交互的局部变换法和根据特征点重建法等，都可以很好的对特定脸部进行重建，并且可以完成对脸部动画的控制和脸部表情的模拟。但现有的技术方法，有些需要昂贵的特殊硬件设备支持，有些涉及的计算量太大，不具有良好的实时性。所以，如何利用有限的资源，实时地进行三维脸部模型的重建是如今脸部重建技术面临的一个主要问题。

本论文正是围绕这一问题展开的，文中提出的特征参数变换法在不需要特殊设备的情况下，仅通过脸部正视图和侧视图就可获得具有真实感的个体化脸部模型，算法简单，具有较好的实时性。但此方法还并不完善，在模型特征细化，脸部纹理映射和脸部表情动画方面还有待进一步的提高。

随着三维脸部模型的重建在多功能感知系统、虚拟现实、辅助教学、电视会议、军事训练、医疗手术、游戏娱乐等诸多领域的广泛应用，各种新方法、新思路如雨后春笋般涌现，三维脸部重建技术也必将日臻成熟，成为今后人机交互不可缺少的一部分。

## 参考文献

- [1] Thomas S. Huang, Li-An Tang. "3-D face modeling and its applications". *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 1996, Vol.10, No.5 pp.491-520.
- [2] Horace H.S.Ip, Lijun Yin. "Constructing a 3D individualized head model from two orthogonal views". *The Visual Computer*, 1996,12:pp.254-266.
- [3] Won-Sook Lee, Elwin Lee, Nadia Magnenat Thalmann. "Real face communication in a virtual world". *Virtual Worlds. First International Conference, VW'98, Proceedings*, pp.1-13.
- [4] Won-Sook Lee, Prem Kalra, Nadia Magnenat Thalmann. "Model based face reconstruction for animation". *Multimedia Modeling. Modeling Multimedia Information and Systems*, 1997, pp.323-38.
- [5] 晏洁, 高文, 尹宝才. "具有真实感的三维虚拟特定人脸生成方法". *计算机学报*, 1999, 2, Vol.22, No.2, pp.147-153.
- [6] 尹宝才, 高文, 晏洁, 宋益波. "基于模型的头部运动估计和面部图像合成". *计算机研究与发展*, 1999, 1, Vol.36, No.1:pp.67-71.
- [7] 高文, 陈熙霖, 晏洁, 宋益波, 尹宝才. "虚拟人面部行为的合成". *计算机学报*, 1998, 8, Vol.21, No.8, pp.694-703.
- [8] Tsuneya Kurihara, Kiyoshi Arai. "A Transformation Method for Modeling and Animation of the Human Face from Photographs". *Computer Animation*, Springer-Verlag Tokyo, 1991, pp.45-58.
- [9] Li-An Tang, Thomas S. Huang. "Automatic construction of 3D human face models based on 2D images". *Proceedings. International Conference on Image Processing*, 1996, Vol.3, pp.467-70.
- [10] Qian Chen, Gerard Medioni. "Building human face models from two images". *1998 IEEE Second Workshop on Multimedia Signal Processing* pp.117-22.
- [11] 洪文松, 陈武凡. "实现图象边缘检测的改进广义模糊算子法". *中国图象图形学报*, 1999, 2, Vol.4(A), No.2, pp.143-147.
- [12] 郑飞, 陈梅. "由人面照片重建人面三维模型的探讨". *自动化学报*, 1999, 1, Vol.25, No.1:pp.138-141.
- [13] 袁慧, 曾黄麟. "有真实感图形的纹理映射算法". *计算机应用*, 98,10, pp.29-31.

- [14] 范波, 吴慧中, 孔小斌. “一种基于透视变换的球面纹理映射方法”. 南京理工大学学报, 1999, 4, Vol.23, No.2, pp.145-148.
- [15] Richard Lengagne, Pascal Fua, Olivier Monga. “Using differential constraints to generate a 3D face model from stereo”. Proceedings. Fourteenth International Conference on Pattern Recognition Vol.1, pp.637-6399.
- [16] Suhuai Luo, Robin W King. “Automatic human face modeling in model-based facial image coding”. 1996 Australian New Zealand Conference on Intelligent Information Systems. Proceedings. ANZIIS 96 pp.174-177.
- [17] Chung J. Kuo, Ruey S. Huang, Tsang G. Lin. “Synthesizing lateral face from frontal facial image using anthropometric estimation”. Proceedings. International Conference on Image Processing Vol.1.1, pp.133-136.
- [18] 晏洁. “显示具有真实感的三维合成人脸图形的两种方法”. 计算机工程 98,1,pp.49-52.
- [19] F. I. Parke. “Parameterized models for facial animation”. IEEE Computer Graphics and Applications 12, 1982, pp.61-68.
- [20] D. Waters. “A muscle model for animating three-dimensional facial expression”. Computer Graphics 21, 1987,4, pp.17-24.
- [21] P. Ekman, W. V. Friesen. “Facial Action Coding System”. Consulting Psychologists Press, Inc., Palo Alto, California, 1978.
- [22] N. Magnenat-Thalmann, D. Thalmann. “The direction of Synthetic Actors in the film Rendez-vous a Montreal”. IEEE Computer Graphics and Applications,1987, 7(12):pp.9-19.
- [23] Yuencheng Lee, Demetri Terzopoulos, Keith Waters. “Realistic Modeling for Facial Animation”. Computer Graphics(Proc. SIGGRAPH), 1996, pp.55-62.
- [24] Marc Proesmans, Luc Van Gool. “Reading between the lines-a method for extraction dynamic 3D with texture”. Proceedings of VRST, 1997, pp.95-102.
- [25] Coleman EN, Jain R. “Obtaining 3D Shape of Textured and Specular Surfaces Using Four-Source Photometry”. IEEE Computer Graphics and Image Processing, 1982,18:pp.309-328.
- [26] Hrroshi Saji, Hirohisa Hioki, Yoshihisa Shinagawa, Kensyu Yoshida, Tositasu L. Kunii. “Extracting of 3D Shapes from the moving human face using lighting Switch Photometry”. Creating and Animating the virtual world, Spinger-Verlag, Tokyo, 1992, pp.69-86.
- [27] P. Fua, Y. G. Leclerc. “Taking Advantage of Image-Based and Geometry-Based Constraints to Recover 3-D Surfaces”. *Computer Vision and Image Understanding*,

- 1996,1, pp.111-127.
- [28] 沈英俊.“图像三维重建的算法研究与系统实现”. 清华大学硕士学位论文.
- [29] N. Magnenat-Thalmann, I. S. Pandzec, Jean-Claude Moussaly, Zhyong Huang, Jianhua Shen. “The Making of Xian Terra-cotta Soldiers”. Computer Graphics: Developments in Virtual Environments, 1995.
- [30] 王志祥.“三维纹理图像的合成与 Fractal 图形的产生”.北方交通大学硕士论文.
- [31] 金廷赞. 《计算机图形学》. 浙江大学出版社.
- [32] 郑南宁. 《计算机视觉与模式识别》. 国防工业出版社.
- [33] 詹永照, 宋顺林, 余江峰, 张建明. “脸部表情动画建模方法的研究与实现”. 软件学报, 1998,2, Vol.9, No.2, pp.81-85.
- [34] Arghyro Paouri, Nadia Magnenat Thalmann, Daniel Thalmann. “Creating Realistic Three-Dimensional Human Shape Characters for Computer-Generated Films”. Proceedings of Computer Animation'91, Springer, Tokyo, pp.89-99.
- [35] 赵修伟, 孙家广. “以网格曲线为连续条件的光滑曲面”. 计算机辅助设计与图形学学报, 1994,4, Vol.6, No.2, pp.81-88.
- [36] 赵修伟, 孙家广. “从一幅透视图像重建三维对称形体”. 计算机学报, 1994,4, Vol.17, No.4, pp.303-306.
- [37] 金刚, 李德华, 李泽宇. “三维激光彩色扫描仪中获取物体表面弱反射区深度信息的方法”. 中国图象图形学报,1999,5, Vol.4(A), No.5, pp.383-386.
- [38] 王汝传, 王绍棣, 胡岚. “利用共轭梯度法重建三维物体表面算法的研究”. 计算机研究与发展, 1999,6, Vol.36, No.6, pp.717-724.
- [39] Lande, C., Francini, G.. “An MPEG-4 facial animation system driven by synthetic speech”. Proceedings 1998 MultiMedia Modeling. MMM'98 pp.203-212.
- [40] Debevec P. E., Taylor C. J., Malik J., Levin G., Borshukov G., Yu Y.. “Image-based modeling and rendering of architecture with interactive photogrammetry and view-dependent texture mapping”. ISCAS '98. Proceedings of the 1998 IEEE International Symposium on Circuits and Systems Vol.5, pp.514-517.
- [41] Yemez Y., Aydin T., Sankur B., Anarim E.. “A new approach to 3-D face modeling”. ECCTD '95 Proceedings of the 12th European Conference on Circuit Theory and Design Vol.1, pp.343-346.
- [42] Saeyor S., Dohi H., Ishizuka M.. “NURBS-based facial expression modeling for anthropomorphic interface agent”. Proceedings. 5th IEEE International Workshop on Robot and Human Communication RO-MAN'96 Tsukuba pp.395-400.
- [43] Medina R., Garreau M., Lebreton H., Jugo D.. “Three-dimensional reconstruction of the left ventricle from two angiographic views”. Proceedings of the 19th

- Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 'Magnificent Milestones and Emerging Opportunities in Medical Engineering' Vol.2, pp.569-572.
- [44] Aoki Y., Hashimoto S.. "Physical modeling of face using spring frame based on anatomical data". *Multimedia Modeling. Modeling Multimedia Information and Systems* pp.339-354.
- [45] Brunelli R.. "Estimation of pose and illuminant direction for face processing". *Image and Vision Computing* Vol.15, pp.741-748.
- [46] Aboul-Ella H., Nakajima M.. "Image warping based on elastic body spline transformation: application for facial animations". *Proceedings. 1997 IEEE Conference on Information Visualization* pp.106-110.
- [47] Herpers R., Witta L., Bruske J., Sommer G.. "Dynamic cell structures for the evaluation of keypoints in facial images". *International Journal of Neural Systems* Vol.8, pp.27-39.
- [48] Radai M., Abboud S., Rosenfeld M.. "Left-right asymmetry of visual evoked potentials in a realistic 3-dimensional numerical model of the head". *Proceedings of the 18th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. 'Bridging Disciplines for Biomedicine'* Vol.5, pp.1790-1791.
- [49] Matsumura K., Nakamura Y., Matsui K.. "Mathematical representation and image generation of human faces by metamorphosis". *Electronics and Communications in Japan, Part 3 [Fundamental Electronic Science]* Vol.80, pp.36-46.
- [50] Borghese N. A.. "3D reconstruction of human faces from range data through HRBF networks". *IEE Colloquium Neural Networks in Interactive Multimedia Systems (Ref. No.1998/446)* pp.6/1-4.
- [51] Mendonca R. M. L. O., Campos M. F. M.. "Evaluation of three-dimensional reconstructions from arbitrary images". *Proceedings SIBGRAPI'98. International Symposium on Computer Graphics, Image Processing, and Vision* pp.402-409.
- [52] Haider A. M., Takahashi E., Kaneko T.. "A 3D human face reconstruction method from CT image and color-photographs". *IEICE Transactions on Information and Systems* Vol.E81-D, No.10 pp.1095-1102.
- [53] Jin Gu, Chang T., Mak I., Gopalsamy S., Shen H. C., Yuen M. M. F.. "A 3D reconstruction system for human body modeling". *Modelling and Motion Capture Techniques for Virtual Environments. International Workshop, CAPTECH'98. Proceedings* pp.229-241.
- [54] Ziou D., Tabbone S.. "Edge detection techniques-an overview". *Pattern*

- Recognition and Image Analysis Vol.8, No.4 pp.537-559.
- [55] Jie Yan, Wen Gao, Baocai Yin, Yibo Song. "Deformable model-based generation of realistic 3-D specific human face". ICSP '98. 1998 Fourth International Conference on Signal Processing Vol.2, pp.857-860.
- [56] Vetter T., Blanz V.. "Estimating coloured 3D face models from single images: an example-based approach". Computer Vision - ECCV'98. 5th European Conference on Computer Vision. Proceedings Vol.2, pp.499-513.
- [57] Hassanien A.E., Nakajima M.. "Image morphing of facial images transformation based on Navier elastic body splines". Proceedings Computer Animation '98 pp.119-125.
- [58] Yi-Ping Hung, Chu-Song Chen, Ing-Bor Hsie, Chiou-Shann Fuh. "Reconstruction of complete 3D object model from multi-view range images". Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering Vol.3640 pp.138-145.
- [59] 范波, 吴慧中. "多面体表面纹理映射方法的研究". 计算机研究与发展 99,4, pp.446-450.
- [60] 张英杰, 赵汝嘉. "一种实现正向纹理映射的新方法". 工程图学学报 97,1, pp.61-65.
- [61] 凌云, 林波. "用 VC 和 OPENGL 建立三维图形应用环境". 电脑学习 98,4, pp.32-33.
- [62] 张英杰, 张铁昌. "纹理映射技术的发展综述". 计算机工程与应用 94,3-4, pp.1-4.
- [63] <http://miralabwww.unige.ch/ARTICLES/31A98.html>
- [64] <http://www.ugcs.caltech.edu/~dragos/3DP/mesh.html>
- [65] <http://www.eurecom.fr/~image/Clonage/>