

计算机辅助颅面复原技术研究

李一波 王扬扬 姬晓飞 肖红

(沈阳航空工业学院, 沈阳 110034)

摘要 颅面复原技术以头骨与面貌相互关系规律为科学依据,广泛应用于刑侦、考古等领域。本文综述了计算机辅助3D颅面复原技术中数据采集、颅面复原、复原后面部表情修饰等方法的进展情况。重点介绍以特征点及其软组织厚度为基础的颅面皮肤的复原技术,及曲面拟合方法的改进。最后,指出颅面复原后续工作的发展方向。

关键词 3D 颅面复原 特征点 软组织厚度

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2006)10-1369-11

Survey on the Research of Computer Aided Facial Reconstruction

LI Yi-bo, WANG Yang-yang, JI Xiao-fei, XIAO Hong

(Shenyang Institute of Aeronautical Engineering, Shenyang 110034)

Abstract Facial reconstruction is a kind of scientific technology which is based on the rules of the relationship between skull and skin. It is widely applied in the fields such as criminalistics, archeology and so on. This paper introduces the whole process of computer aided 3D facial reconstruction, which including 3D reconstruction of a digital skull, reconstruction of skin from skull data, facial expression and animation etc. Various existing methods about the phases mentioned above are also reviewed. The focus of this paper is on reproducing three-dimensional facial skin based on a small quantity of landmarks and their corresponding tissue thickness, and improving of surface fitting. At last, the tendency of facial reconstruction is given.

Keywords 3D facial reconstruction, landmark, tissue thickness

1 引言

颅面复原是对人类的颅骨进行面部容貌复原的技术。该技术以法医学、人类学、解剖学中的头骨与面貌相互关系规律为科学依据,广泛应用于刑侦、考古等领域。

颅面复原包括2D复原和3D复原两种形式,因为3D立体比2D平面更具空间感,复原后的效果和真实性更好,所以本文主要论述3D颅面复原技术。

19世纪末,解剖学家维尔黑姆·希斯(Wilhelm His)开创性地提出根据骨骼解剖学特征雕刻人像重现死者面貌。并与雕刻家塞弗内合作复原了音乐家巴赫的遗骸^[1,2]。20世纪二、三十年代,人们用泥塑

面貌法取代了雕刻复原法。最早有文字记载的案例可追溯到1935年,随后Krogman(1946年)进行了一个关键的实验^[3]。他首先制作一个头骨的石膏模型,根据解剖学参数在石膏模型上打下许多孔,在每个孔中插入一根木条,使木条向外突出的长度等于该处的软组织厚度;然后用粘土填充面部肌肉的空间,直到所有的木条被覆盖;最后加上五官,进行整体修饰。

无论是雕刻还是充填,都需要复杂的工艺。随着计算机技术的发展,出现了借助计算机技术复原颅骨面貌的虚拟3D技术,也称计算机颅面复原技术。

虚拟复原也要依据人体解剖学,把头部分为骨骼、肌肉群层、脂肪蜂窝组织层(骨头也可称为硬组织,肌肉群层和脂肪蜂窝组织层统称为软组织)3部分。软、硬组织给出了形态上的信息,纹理提供颜色

基金项目: 辽宁省自然科学基金项目(20044016); 辽宁省教育厅重大基础研究基金项目(2004C070)

收稿日期: 2005-08-17; **改回日期**: 2005-11-10

第一作者简介: 李一波(1963~),男,教授,博士,博士生导师。主要研究方向为人工智能、模式识别、颅像鉴定、供应链管理、协同商务和计算机应用等。E-mail: lyb20040612@yahoo.com.cn

和美学特征。由此计算机颅面复原的全过程就是通过图像或扫描数据重建 3D 数字颅骨(重建硬组织),在重建的颅骨上复原皮肤雏形(即加软组织),最后进行纹理映射、添加表情,使复原像生动逼真,达到辨认失踪者或重现考古人物的目的。

2 计算机辅助颅面复原基本过程

计算机辅助颅面复原并不是手工颅面复原的计算机化。计算机辅助颅面复原技术充分发挥了计算机的优点,并引进了模型和变形技术,使计算机辅助 3D 颅面复原结果有了科学的依据。

计算机辅助 3D 颅面复原一般要经过颅面重建、面部表情构建、加毛发与五官组合修饰 3 个过程。颅面重建过程为获取软组织厚度数据或特征点软组织数据;重建 3D 颅骨;判断骨龄、人种、性别,在 3D 颅骨上添加相应骨龄、人种、性别的软组织数据。重建过程得到的面貌只是雏形,要想真正完整地得到一个形象逼真的 3D 人脸,还需纹理、表情、肌理复原,此过程称为面部表情构建过程。加毛发与五官组合修饰一般又分为 2D 五官组合修饰和 3D 五官组合修饰两种。

颅面重建需要首先获取 3D 数字颅骨,而后将软组织数据添加到 3D 数字颅骨上,从而完成颅骨重建过程。从这个过程描述可见,完成颅面重建的先决条件是要获取软组织厚度数据。

2.1 软组织厚度数据的采集

因为颅面复原是以面部软组织厚度为依据的,所以要采集不同年龄、性别、种族、地区的面部软组织厚度样本,建立大型的完整的软组织厚度信息库。对颅骨与颜面的共性与个性化特征的大量研究与实践结果证明,要想在一个没有任何生前资料的无名颅骨上重建出一个近似其本人的生前相貌,必须首先建立一套能够正确反映颅骨与颜面、五官各个部位解剖学关系和软组织厚度的指标体系,才能使重建的颜面与本人生前相貌近似,从而为查找身源提供有价值的相貌线索。

获取面部软组织厚度的数据指标,是建立颅面复原软组织数据库的技术关键。因此,颅骨与颜面的解剖关系和软组织厚度的观测被广泛地关注,出现了许多确定软组织厚度的方法和技术,例如解剖检测法、探针测量法(Rhine 和 Campbell 的数据表)、活体 X 线摄影法、超声波探测法,以及 CT 与核磁共振等现代新方法。

在确定软组织指标体系方面,已有不少研究成果。文献[4]的方法是应用 CT 机和超声波仪器在活人的头部获得更加准确的数据。文献[5]的方法与上述方法相似,仍然是对少量的特征点进行厚度测量。文献[6]采用 X 线标定摄影法和计算机 3D 扫描测距法,研究确立了一套专门用于中国人 3D 颅面重建的指标体系。表 1^[7]、表 2^[6]分别列出了外国人、中国人特征点处软组织厚度均值统计表。

表 1 美国黑人颅面复原软组织厚度指标

Tab. 1 Tissue thickness indexes of facial reconstruction for American Blacks

单位: mm

No.	Measurement Name	Emaciated		Normal		Obese	
		Male	Female	Male	Female	Male	Female
1	Supraglabella	2.25	2.50	4.25	3.50	5.50	4.25
2	Glabella	2.50	4.00	5.25	4.75	7.50	7.50
3	Nasion	4.25	5.25	6.50	5.50	7.50	7.00
4	End of Nasals	2.50	2.25	3.00	2.75	3.50	4.25
5	Mid Philtrum	6.25	5.00	10.00	8.50	11.00	9.00
6	Upper Lip Margin	9.75	6.25	9.75	9.00	11.00	11.00
7	Lower Lip Margin	9.50	8.50	11.00	10.00	12.75	12.25
8	Chin-Lip Fold	8.75	9.25	10.75	9.50	12.25	13.75
9	Mental Eminence	7.00	8.50	11.25	10.00	14.00	14.25
10	Beneath Chin	4.50	3.75	7.25	5.75	10.75	9.00
11	Frontal Eminence	3.00	2.75	4.25	3.50	5.50	5.00
12	Supraorbital	6.25	5.25	8.25	7.00	10.25	10.00
13	Suborbital	2.75	4.00	5.75	6.00	8.25	8.50
14	Inferior Malar	8.50	7.00	13.25	12.75	15.25	14.00
15	Lateral Orbit	5.00	6.00	10.00	10.75	13.75	14.75
16	Zygomatic Arch, midway	3.00	3.50	7.25	7.50	11.75	13.00
17	Supraglenoid	4.25	4.25	8.50	8.00	11.25	10.50
18	Gonion	4.50	5.00	11.50	12.00	17.50	17.50
19	Supra M2	12.00	12.00	19.50	19.25	25.00	23.75
20	Occlusal Line	12.00	11.00	18.25	17.00	23.50	20.25
21	Sub M2	10.00	9.50	16.00	15.50	19.75	18.75

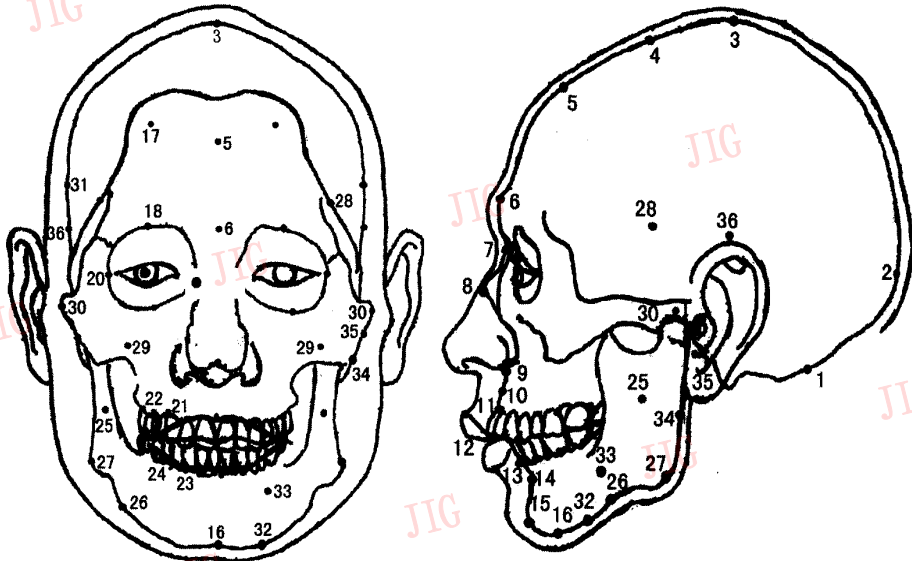
表 2 中国汉族 3D 颅面复原软组织厚度指标

Tab.2 Tissue thickness indexes of facial reconstruction for the Han nationality in China

单位: mm

标记点	3D 颅面复原指标测量统计表									
	3D 头面部(男性)		3D 颅骨(男性)		男性指标	3D 头面部(女性)		3D 颅骨(女性)		女性指标
	平均值	标准差	平均值	标准差		平均值	标准差	平均值	标准差	
1	91.52	7.67	82.91	6.01	8.61	90.02	7.67	82.61	6.01	7.41
2	93.82	7.66	87.07	4.94	6.75	92.32	7.66	85.77	4.94	6.55
3	121.11	5.78	115.28	4.30	5.83	126.61	5.78	121.98	4.30	4.63
4	132.75	6.24	126.56	5.17	6.19	131.25	6.24	126.26	5.17	4.99
5	129.89	6.06	125.10	4.77	4.79	128.39	6.06	112.80	4.77	15.59
6	93.95	3.80	88.97	4.65	4.99	92.45	3.80	86.67	4.65	5.79
7	93.00	3.91	89.59	4.31	3.41	91.50	3.91	81.29	4.31	10.21
8	96.48	5.18	93.58	5.66	2.90	94.98	5.18	92.28	5.66	2.70
9	102.88	4.79	92.34	5.38	10.53	101.38	4.79	96.04	5.38	5.33
10	100.13	4.14	87.62	4.81	12.51	98.63	4.14	90.32	4.81	8.31
11	104.04	4.57	92.25	4.93	11.79	102.54	4.57	92.95	4.93	9.59
12	99.89	4.59	97.57	4.75	2.32	98.39	4.59	95.27	4.75	3.12
13	102.87	4.63	89.61	4.53	13.26	100.37	4.63	89.31	4.53	11.06
14	98.56	3.96	86.88	4.73	11.68	97.06	3.96	86.58	4.73	10.48
15	97.34	5.19	87.86	4.92	9.48	95.84	5.19	87.56	4.92	8.28
16	126.26	5.76	120.95	4.79	5.31	124.76	5.76	118.65	4.79	6.11
17	82.00	4.25	76.31	5.04	5.69	80.50	4.25	76.01	5.04	4.49
18	95.18	3.69	90.13	3.92	5.05	93.68	3.69	88.83	3.92	4.85
19	91.59	3.73	87.14	4.07	4.45	90.09	3.73	83.84	4.07	6.25
20	91.39	3.23	87.84	3.24	3.55	89.89	3.23	85.54	3.24	4.35
21	95.03	4.69	83.46	7.78	11.56	93.53	4.69	83.16	7.78	10.36
22	95.78	4.68	84.27	5.62	11.51	94.28	4.68	84.97	5.62	9.31
23	92.88	5.06	77.61	4.68	15.27	91.38	5.06	75.31	4.68	16.07
24	94.08	4.25	79.49	4.69	14.59	92.58	4.25	77.19	4.69	15.39
25	77.05	3.71	58.56	2.63	18.48	75.55	3.71	53.26	2.63	22.28
26	101.42	5.25	90.55	4.12	10.87	99.92	5.25	93.25	4.12	6.67
27	69.19	3.91	59.47	3.18	9.72	67.69	3.91	58.17	3.18	9.52
28	81.84	3.47	73.54	3.65	8.30	80.34	3.47	71.24	3.65	9.10
29	95.65	3.77	89.32	3.56	6.32	94.15	3.77	88.02	3.56	6.12
30	78.44	2.95	74.05	3.12	4.40	76.94	2.95	71.75	3.12	5.20
31	81.14	4.22	73.61	3.17	7.54	79.64	4.22	73.31	3.17	6.34
32	79.98	3.64	72.34	3.47	7.64	78.48	3.64	71.04	3.47	7.44
33	82.15	4.05	69.41	4.15	12.74	80.65	4.05	69.11	4.15	11.54
34	78.97	2.48	69.34	3.34	9.63	77.47	2.48	69.04	3.34	8.43
35	77.19	3.01	69.88	2.98	7.31	75.69	3.01	68.58	2.98	7.11
36	78.35	4.01	70.55	3.14	7.80	76.85	4.01	70.25	3.14	6.60

表 2 标记点编号说明及图例如图 1 所示^[6]。



- 1、枕外隆凸点 2、后头点 3、头顶点 4、额颞颥点 5、额中点 6、眉间点 7、鼻根点 8、鼻骨末端点 9、鼻棘点
10、鼻棘下点 11、上齿槽前点 12、口裂厚 13、下齿槽前点 14、颊唇沟点 15、颌前点 16、颌下点 17、冠颞点
18、眶颞点(眶上缘) 19、眶下点(眶下缘) 20、眶外缘点 21、上颌 3~4 间牙槽点 22、上颌 5~6 间牙槽点
23、下颌 3~4 间牙槽点 24、下颌 5~6 间牙槽点 25、下颌枝中点 26、下颌体外缘咬肌前 27、下颌角点
28、额颞点 29、颞骨点 30、颞弓点 31、侧头点 32、颞前外侧点 33、颞孔点 34、耳垂前点
35、耳屏点 36、颞骨点(平耳廓)

图 1 表 2 标记点编号及图例

Fig. 1 The explanation and legend of the number of landmark in table 2

2.2 重建 3D 颅骨

在研究过程中,可以用 3 坐标测量仪或 3D 扫描仪直接扫描头骨,然后在计算机中重建 3D 数字化颅骨图像(图 2);也可以利用 X 射线、核磁共振以及 CT 等医疗检测设备,由 2D 断层图像重建 3D 维颅骨图像。

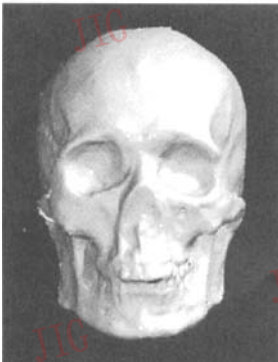


图 2 3D 数字化颅骨
Fig. 2 3D digital skull

在这方面有很多的研究成果,比较典型的方法有:

- (1) 用径向基函数从不完整的扫描数据生成连续网格^[8];
- (2) 基于 CT 等值面数据生成颅骨曲面^[9];
- (3) 用傅里叶级数拟合 CT 图像提取颅骨边缘轮廓曲线^[10];
- (4) 基于形状的利用数学形态学算子进行骨架提取的插值算法^[11]。

不管采用何种方法,重建数字颅骨的总原则是,在保证颅骨对面貌的复原信息不丢失的前提下,构成颅骨图像的原始数据量越少越好,以便在对颅骨图像做交互式操作处理时,有较快的响应时间。

2.3 软组织的添加

数字化 3D 颅骨建模之后,要在数字化颅骨上添加软组织。可以把软组织的添加分成两种,一种是通过颅骨的变形用所谓硬组织充填软组织的空间;另一种是确定软组织的厚度之后,定量地充填软

组织。根据确定软组织厚度或充填方法的不同,一般把计算机辅助颅面复原分成以下 7 种方法,即颅骨变形法、仿手工复原法、对照匹配法、模板法、2D 凸包法、3D 凸包和分区法、特征点法。

3 计算机辅助颅面复原的主要方法

3.1 颅骨变形法

颅骨变形技术是参照扫描人头的 3D 模型做变形,直到原颅骨的硬组织与目标颅骨相匹配。颅骨变形法由 Michael 和 Chen 提出^[12]。其中,用体变形函数 V ,使含有颅骨 S_0 的原头部模型 H_0 发生变形,直到原头骨近似地匹配目标颅骨 S_1 ,即 $V(S_0) \approx S_1$ 。假定变形后的源颅骨模型 $V(H_0)$ 与未知的目标头部颅骨很相似,体变形函数 V 便成为一个使用 40 对盘状区域变形构成的场函数,它被手动地放置在颅骨的外围。这种方法的缺点是设置和建立变形函数时需大量手工辅助,位置控制不够准确。最近,Zhang 等人^[13]又提出了用多层变形技术对基于解剖学结构的人脸进行面貌复原的新方法。该方法通过变形一个多层解剖学结构的原型人脸模型获得面部信息。它与 Michael 的体变形法相比,需要的手工辅助少,且对后续的纹理、表情处理容易实现。

3.2 仿手工复原法

仿手工复原法是建立在人类学和法医学的基础上的一种方法。该方法首先建立软组织厚度的数据库,而后根据具体的颅骨调用数据库中的资料。类似于手工泥塑面貌法,在颅骨上用钉子标记复原软组织的厚度。所有钉子被固定厚度的橡皮带连接,它们之间的空间慢慢的用可压膜的材料充满。这样,可以逼真地复原人脸;然后再加上鼻子、眼睛、嘴唇;因为不能由下颌骨判断嘴唇的圆肌肉,所以根据头骨所属的人种判断它的形状就很重要。基于对不同年龄和人种人群的人类学和法医学研究结果确定复原的辅助标记。人类学家采用的数据范围非常广:Francesce Mallegni 复原 Wadje 头的模型用的是 Ubelhaker 描述的方法,而该方法采用了 Rhine, Campbell 表(1980)^[14],和 Rhine, Moorer, Weston 表(1982)^[15]的数据,尽管该方法有一定的主观性,但还是十分可靠的。用以上方法设计的软件可以帮助操作者在头骨的 3D 模型上做定位标记,以便选择一套正确的人类学参数。随后,用填充方法自动生成软组织。

3.3 对照匹配法

对照匹配法是以完整的软组织厚度为基础的计算机辅助 3D 颅面复原技术,英国格拉斯哥大学研究院开发的面部重构(FR)系统^[16]是比较典型的代表。Nelson 和 Michael 还研究了 3D 体积变形原理^[17]。

这种方法是利用 CT 扫描与待复原颅骨相似的活体颅面,作为参考颅面;在两个颅骨上标记一系列相应的特征点,使两个颅骨的特征点之间形成关联关系;在待复原颅骨的一点加上厚度时,需要在参考颅骨的相应位置上求得此厚度,再把得到的厚度加到此点上。这样,边计算厚度,边复原,实际上就是把参考人头的完整的软组织厚度加到待复原颅骨上,复原出的面貌非常相似于参考人头。

这种方法存在的问题是数据量大,处理速度很慢,而且找到和待复原颅骨相似的活人样本也耗费人力、财力,有时甚至不可能。

3.4 2D 凸包法

以 2D 凸包理论为基础,主要是在待复原的颅骨切片上求得 2D 凸包,在其上加软组织厚度,得到复原的面貌^[18]。主要步骤是:利用 CT 图像重建 3D 人头图像,重新切割头部图像得到一定数量的切片;在每个图像上标记凸包点,由凸包点连成的多边形闭合折线,作为此切片骨组织的闭包;利用多边形闭合折线和皮肤边界计算软组织厚度,在待复原的颅骨切片上相应求得 2D 凸包,在其上加软组织厚度,得到复原的面貌。在实施的过程中,由人工干预并标记每个切片的凸包点。

这种方法未充分考虑颅骨结构以及颅骨和软组织厚度的解剖学关系,所以面貌映射有一定的缺陷,复原后的面貌有明显的错位现象,面部有严重的横向断层和“毛刺”,主要是横向的骨切片过渡不平滑造成的。由于是逐层切片,所以需要对各层切片进行平滑连接处理,数据量大。

3.5 模板法

这种方法建立在数据库的基础上,用数据库存放大量各种人物面孔扫描获得的数字化面部模板。复原时,根据颅骨的特点选择适当的面部模板,把它像面罩一样覆盖到颅骨上,同时,对面部模板进行变形调整使之与待复原颅骨的标志点位置相匹配。该方法是从在相应的颅骨标志点上加静态软组织厚度值的方法中衍生出来的。

这种方法由 Vanezis 于 2000 年提出^[19],重构的

头部可通过图像的后处理添加眼睛、面孔和头发。

由该方法得到的复原头像一般是不完整的,头顶和下巴经常缺失,Vanezis 提出的解决办法是开发一套图像处理系统来修补头部。该系统还可以对复原后的面貌锥形进行加五官及头发的处理。另外,在重构的过程中,该方法需依赖大型面部模板数据库。

3.6 3D 凸包和分区法

这种方法^[20]也要求扫描活人的头部,或扫描由法医专家手工复原的带软组织厚度的颅像,得到颅骨和软组织数据,作为待选样本存入数据库。复原时要判断待复原的颅骨的基本特性,从数据库中选择与之相近的软组织,用计算机加到颅骨上。上述过程涉及两个技术要点:3D 凸包和分区。3D 凸包是采用 3D 包裹技术(Quickhull 算法^[21])包裹整个颅骨。凸包颅骨既保留原始颅骨的轮廓特征,又忽略细节的干扰,降低了复原处理的复杂度,且复原效果较好。而分区技术^[20]是为了按照颅骨的解剖结构来合理布局面貌,是模板面貌映射法的改进。采用分区规则,不仅确定了颅骨的结构和软组织之间的对应关系,还确定了不同颅骨相同部位子区域的对应关系,软组织厚度数据可根据颅骨的子区域大小进行比例伸缩,整体面貌细化到各个子区域中,合理地适应了待复原颅骨结构。采用分区规则复原的面貌比不采用此规则的面貌效果好(图 3)。

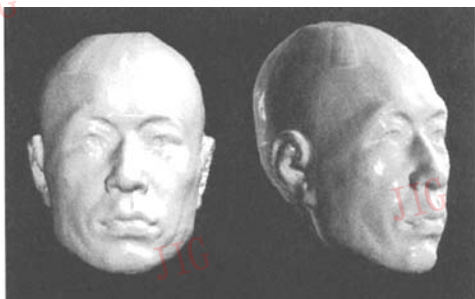


图 3 用 3D 分区和凸包法复原的正面、侧面颅像图

Fig. 3 A front and side view of facial reconstructions created with the method of convex hull and subareas

3.7 特征点法

前述 4 种方法都需要大量的数据和复杂的手工交互操作。特征点法是以少量特征点及其软组织厚度为基础的计算机辅助 3D 颅面复原技术,是用计算机模拟手工复原过程,在自身颅骨上生成面部皮

肤。英国 Archer 和 Bullock 等人^[22,23]较早研究了该方法,是当前众多学者致力发展的技术。

复原面貌时仅考虑软组织均值是不科学的,必须通过观察颅骨的形态结构进行相应的调整,才能使复原像更具个性化,达到符合辨认条件的效果。软组织厚度(均值)数据是人种的共性参考数据,只有共性与个性的结合,才能做到符合客观实际。虽然其他方法也是可行的,但都存在着数据量大、速度慢、3D 表情呆板、肌理无复原及纹理映射困难等问题。比较上述各种方法,目前具有较好开发前景的是基于特征点的颅面复原方法。

4 基于特征点的计算机辅助颅面复原技术

首先根据待复原颅骨的基本形状特征,由法医或人类学专家判断出该颅骨的种族、性别、年龄等,以便选择适当的软组织厚度数据。然后用交互方法在 3D 颅骨上做出标记点,在标记点上设定软组织厚度。根据一定的连接规则把特征点连成网格结构;对网格结构数据应用插值、拟合、平滑、优化等运算,得到复原的基本轮廓;再在其上进行适当的修饰、调整,得到最后的面貌。

这种方法只要求在数字化的颅骨上标注少量特征点的软组织厚度,所需的统计数据较少。但是,生成合理的网格结构及对网格数据合理地插值、拟合会产生很多的难点。因为特征点稀少,所以不能合理地按照颅骨和软组织厚度的依存关系去处理,不能准确地预测标记点间软组织厚度的变化规律,需要主观地反复调节控制参数。对于仅仅几十个点的软组织厚度信息来说,采用不同的网格结构、插值算法和拟合算法都将严重地影响复原面貌形态,不同方法产生的复原面貌差异大、不稳定,甚至不能反映出人的面貌轮廓。

实际上,颅面复原的要求是用最少的特征点获取与原来面貌最相似的 3D 图像,所以选择合适的算法成为特征点法的主要研究方向。

4.1 样条曲面拟合

样条曲面拟合法采用通用的分层 B 样条曲面拟合头部模型。使用者在颅骨模型上插入带有软组织厚度值的木楔做标记点,通过 B 样条曲面拟合生成面部目标。每个木楔代表一个在分层 B 样条曲面上相对应的参数位置,该参数位置表明分层 B 样

条曲面的哪个位置将与木楔的端点吻合。附加木楔靠手工添加,其高度和参数位置是通过计算确定的。参数位置和高度有时需要手工调整。

拟合中的问题是标记点相隔太远,两个点间插值生成的曲面太光滑,导致生成的曲面不一定符合颅骨的曲率。主要的解决方法是^[22,23]:

(1)增加标志点,给计算软件提供更多的颅骨曲面曲率和位置的信息,新增标志点的软组织厚度值由新增点邻近的标准标志点的厚度值插值得到;

(2)插值过程中若把每个标志点的切线信息结合进去,对高曲率区域的拟合效果会更好;

(3)沿等参数曲线测量插入木楔的高度,用来模拟雕塑家用的粘土条,于是,沿参数为常量的曲线,产生一系列用参数表示的样本点。通过对邻近木楔测量高度的插值,可以估算出每个样本点的软组织厚度值。因为由颅骨模型可知颅骨曲面的位置,因此,可以求出插值点坐标。

这种方法的缺点是设置/建立插值函数时仍需大量的手工辅助。从一个一般的模型开始拟合,每个木楔被处理为分层 B 样条插值的数据点。用手把木楔放在一个参数(u, v)位置,这个由标准木楔构成的参数被用于全部颅骨模型的拟合。围绕颅骨对头颅进行变换和分度,使得分层 B 样条的鼻子近似地安放在最终的位置,并且使标准木楔相对地靠近在分层 B 样条的相关(u, v)位置。

4.2 隐式曲面法

隐式曲面法是把颅骨和颌部多边形作为隐式曲面发射体的颅面重构技术^[23]。颅面模型必须消除多边形颅骨模型的噪声和锐角。基于发射体的隐式曲面建模技术容易解决这个问题,即使骨骼参差不齐,发射体也能生成光滑的曲面。

对于颅面重构的司法应用来说,还要把隐式函数转化成可以修饰、渲染的形式。对于指定的隐式函数,可以在理想的等效程度上产生多边形表面。这项技术被称为多边形化。有很多种多边形化技术,包括 Marching Cubes 和 Shrinkwrap^[24]等。

对于头骨的颞部和头骨与颌部之间的间隙,不能直接地应用隐式曲面法,需要通过手工填充间隙,产生更真实的表面形状。

这种方法的另一个问题是最终的颅面形状取决于发射体的数量。即使两个发射体骨架严格地生成同样形状,形成的表面也会很不一致。如果发射体的尺寸小于其场距离,就会发生凸包。在发射体公

式中增加 k 值,可以减小凸包,然而,即使增大 k 值也不能消除凸包,所以不能从根本上解决问题。

隐式曲面法和分层 B 样条各有优缺点。隐式曲面法提供了一个几乎自动生成面部形状的方法。一旦设好标准标记点,就会通过一定的算法产生 3D 模型。对照的,分层 B 样条拟合技术要求手工设置附加的标记点,通过修改标记点参数位置来改变面部扭曲失真,调试拟合参数。这些附加的工作增加了复原的主观性。但是,分层 B 样条拟合技术更适合五官的添加和对复原锥形的进一步修饰处理,不像隐式曲面复原法,添加面部特征必须另外完成一个独立的过程。样条法复原中的面部特征从始至终都是整体中的一部分,每个面部细节都被存作特殊控制向量的偏移,另外,样条曲面比隐式曲面技术生成的原始网格更易修饰。

4.3 网格生成法

Kähler 等人^[25]根据标记相对较少的头部模板重构颅面,最终生成完整的头部模型。他们采用的可变形面部模板的曲面是由任意 3 角网格构成的,而不是使用高阶曲面或者采样点,使用标准建模工具简化了后期的艺术修饰。其中虚拟头部模型是在人体解剖学的基础上,由计算机生成的,在进行计算机重构时集成了面部表情的动画。

5 3D 面部表情构建

以上各种方法复原出的面貌只是锥形,要想真正完整地得到一个形象逼真的 3D 人脸,还需进行纹理、表情、肌理复原。

5.1 纹理映射

要生成具有真实感的 3D 人脸模型,使头像产生如见其人的视觉效果,还需要纹理映射。

颅像纹理映射包括颜色纹理、几何纹理映射两方面内容。颜色纹理是呈现在不同种族人脸表面上的各种不同的肤色。由于光照的原因,同一人脸的不同部位肤色也有明暗差异。几何纹理广义上是指基于景物表面微观几何形状的表面纹理,如树干、岩石、山脉等表面呈现的凸凹不平的纹理细节^[26]。对颅像复原来说,几何纹理就是人脸上的皱褶。每个人的皮肤并不是完全光滑,特别是对脸部皱褶很多的老年人而言,要复原逼真,不能不考虑到几何纹理映射。

纹理图像可由合成图像及真实的照片组成,经

纹理映射到复原像上。例如在 3D MAX 中制作人物动画时,可给材质的表面贴上一幅某种肤色的图片,通过参数调整得到多种效果。

圆柱形纹理映射^[27]是一种颜色纹理映射建模方法。其原理如图 4^[27]所示,选择参考人物的至少 3 个角度的视图(正面像一张,侧面像两张),来生成圆柱形纹理。将圆柱形纹理上的任意点 P 投影到圆柱轴线上,射线与头的表面交于 q 点。观察 q 点法线和视图法线间的夹角,可以确定在哪个视图上可以看到 q 点。 p 点的颜色由可见视图上颜色的加权和给定,而权重取决于与法线的夹角。最后,将纹理映射到整个模型上。图 5^[27]为此方法的面部表情构建结果图。

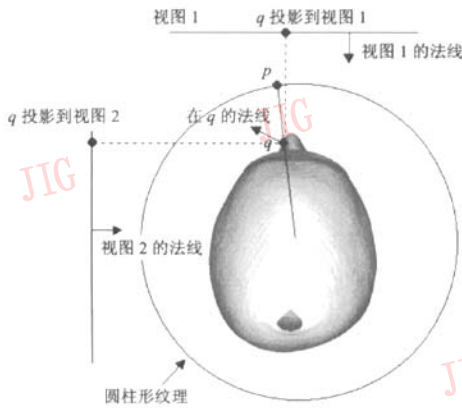


图 4 圆柱形纹理

Fig. 4 Cylindrical texture



(a) 重建颅面 (b) 参考人物 (c) 表情构建结果

图 5 面部表情构建结果

Fig. 5 Texturized model of reconstructed soft tissues of the mummy

这种方法的问题是,在提取颜色之前,必须修改各个视图,使整个模型相应的投影互相匹配。确定了对视图理想点的地图投影方式,就可以隐含地实现这种变化。通过在视图上投影曼彻斯特点,并且

在适当的地方移动这些视图,可以得到这种地图投影。

目前几何纹理算法主要有 Blinn 算法和 Cook 算法^[26]。Blinn 的纹理映射技术无需修改表面几何模型,即可模拟表面凹凸不平的效果,其基本原理是通过对象物表面各采样点的位置作微小扰动来改变表面的微观几何形状,从而引起景物表面法向量的扰动。

尽管 Blinn 的凹凸纹理映射方法有效地模拟了参数曲面的几何纹理,但对多边形网格表面的凹凸纹理模拟则较为困难,这是因为 Blinn 方法并不致力于求解扰动后表面各采样点的新的位置,而是直接计算扰动后表面新的法向量。为此, Cook 采用位移映射技术来克服上述缺陷。位移映射方法通过沿表面法向量扰动景物表面上各采样点的位置来模拟表面粗糙不平的效果,扰动量则依赖于给定的几何纹理值。一般说来,上述两种技术在表现景物表面的几何纹理时效果相差不大,但在轮廓区域则完全不同。用 Blinn 方法,轮廓线显得光滑;用 Cook 方法,则保持凹凸不平。

5.2 3D 面部表情动画

人脸面部表情的产生是由于肌肉的牵引将正常的人脸变形成为有表情的人脸。20 世纪 80 年代后开始使用肌肉模型,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。建模时,使用由皮肤层和肌肉层组成的分层结构,肌肉层依附于皮肤层下,皮肤形变由模拟的肌肉层触发。

目前多采用网格结构,皮肤曲面划分成网格,以眼窝,眉框,鼻翼等处特征点作为网格的各个顶点坐标,同时赋予顶点的颜色、纹理、法线等信息,再针对模型上的特征点进行交互修改而改变模型形状^[28]。改变脸部表情时,可控制脸部面片的控制点,使之发生相应位移的弹性形变,使之与特定人脸吻合。在构造的过程中,针对于正常人脸部的左半面和右半面的对称性,构造脸部的轮廓仅需构造脸部的右半部或是左半部即可,而另半部可通过镜像的方式得到。

一些人脸动画系统使用模拟分层解剖结构的方法。Wates^[29]把皮肤和肌肉作为分开的两个独立实体,肌肉向量和径向函数由线性方程导出,皮肤网格上的变形由括约肌确定。相比于纯粹的几何学方

法^[30],基于物理的方法试图通过模拟皮肤的生物力学特性,建立肌肉收缩影响皮肤表面的模型。典型的应用为质量-弹簧即有限元网络模型,该模型已被成功用于数值仿真^[31]。

Chadwick 等人^[32]在多层模型中通过采用自由变形形成皮肤。该模型包括骨骼、肌肉、脂肪组织和皮肤。Terzopoulos 和 Waters^[33]用初始的 3 三角形网格,自动建造了一个人脸的分层模型。模型结构由肌肉层,真皮层和表皮 3 层构成,颅骨被近似为偏离皮肤表面。Lee^[34]等人又对 Terzopoulos 的模型做了进一步的简化,以提高效率。

Scheepers 等人^[35],还有 Wilhelms 和 Van Gelder^[36]提出了基于解剖学的仿真人和动物的模型,其焦点在于骨骼和肌肉组织。皮肤组织仅用零厚度的隐式曲面来表示。

Kähler^[25]等人构造了基于解剖学的变形系统。在肌肉和骨骼层上面,使普通的脸部网格变形,以便匹配扫描得到皮肤几何形状。这种方法也用于使肌肉层和骨骼层与给定的颅骨相匹配。

6 加毛发与五官组合修饰

从图 5 可见,经过面部表情构建过程就可以基本得到一张形象逼真的 3D 人脸。但问题是,由于耳朵是软组织,所以在重建颅面时就经常产生缺陷,构建的眉毛一般可能也不能保证会沿着眉骨的走向,连鬓胡子已经长到脖子上去了等。

鼻子、眼睛、嘴、耳朵等五官含有较多软组织成分,为此重建结果可能和实际有较大的偏差,若把基于整脸映射匹配技术的面部表情构建结果作为最后的颅面复原结果,实用效果会打折扣。在刑事侦查工作中,颅面复原结果的主要应用是为了寻找受害失踪人^[20],所以从这个应用目的出发,对表情构建结果再进一步进行五官人工组合修饰,而后再加头发等毛发处理实用性会更好。

五官组合修饰有 3D 组合修饰和 2D 组合修饰两类。3D 组合修饰实现技术难度较大,例如玛雅软件中的某些功能,位置、形状控制较难而实用性不强。本文提出了 2D 五官组合修饰方法。该方法首先建立五官库,而后再将重建颅面进行正投影,得到 2D 正面图像,手工确定五官的关键控制点,再将此正面 2D 图像与颅骨重叠半透明显示,由专家根据眉骨、牙齿及牙槽、鼻孔结构、眼眶等五官颅骨形状

在五官库中选择与此相适应的对应五官图像,程序自动把对应五官图像放置到相应位置,在放置过程中还自动完成对五官图像尺寸的调整,选择合适的头发和胡须等,最后进行图像融合与渲染。2D 五官组合修饰效果如图 6 所示。

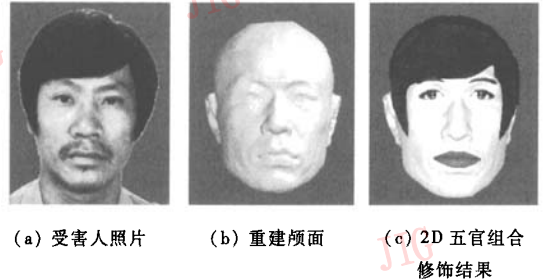


图 6 未渲染前的 2D 五官组合修饰效果

Fig. 6 A 2D male reconstructed effect with facial features decoration prior to the rendering

该操作只要经培训就可以完成,不必一定是专家操作,所以虽然多了一个人工五官组合修饰环节,但并不影响其大众实用性。而这样处理的好处是可以快速生成多个 2D 图片,对于加快寻找受害人很有益处。

7 复原方法的验证和复原技术的改进

后续工作可分为两个方向:复原方法的验证和复原技术的改进。

就颅面复原技术的实用性要求而言,希望对结果的主观分析越少越好。目前,颅面模型对原始对象的复原结果还没有客观的验证方法,对颅面复原需要定性和定量的分析。已经提到,MRI 能用于活人扫描,从扫描中抽取面部模型可以与复原的面部模型做比较。可以通过计算一个物理量,如扫描对象和重构对象之间的体积差,来度量重构误差。于是可以通过误差来评价重构的效果。一旦确定验证重构效果的方法,就可以更好地探索扩展现有的和新的重构技术。

至于复原技术的改进,本文论述的各种方法都有进一步发展的余地。比如,可进一步发展体积变形技术,无论是对 3D 颅骨、面貌模型,还是对诸如 MRI 扫描生成的 2D 体积横断面,都可以开发和比较。

对基于特征点的颅面复原法,为了估计软组织的厚度,目前任何自动系统都要结合专家的经验

知识。在分层 B 样条插值拟合中,在颅骨上手工插入木楔是费时间的,在输出的隐式曲面模型上应能自动加点,而不是在颅骨上插入拟合木楔;应把鼻子、嘴和眼窝等区域罩起来,避免在这些地方加点等。

目前,颅骨上一个给定点的软组织厚度可以根据投影到由 3 个木楔描述的三角形上的点的重心插值确定。这项技术的成果在法医学上是可以被接受的。但有了验证插值方法的新手段,还可以考察其他的插值技术如自然相邻插值等。

插值的组织厚度分析可在尸体或活人体上进行。在大量的面部位置上,包括一系列标准木楔的位置,测量组织厚度。对于被测量对象,标准木楔的长度将被设成标志组织厚度的测量标准。这些测量可在尸体上采用传统的介入技术和 CT 扫描,或者在人体上采用安全的深度测量方法得到,例如 MRI 扫描。可以用这些测量结果与插值的软组织厚度相比较,做特征点法的颅面复原结果相似度分析。

还可以进一步研究其他复原方法如基于弹性模型的松弛法。该方法把人脸曲面表示为弹簧网格。网格的顶与颅骨保持一定距离,其方法是把顶点放在使静止弹簧长度等于软组织厚度的位置,或者限制弹簧,不允许顶点与人脸曲面邻近的网格交叉。把弹簧网格中特殊的顶点锁定在脸曲面特殊的位置,例如标准的标志位置和眼、鼻、嘴等脸部特征的边缘。

另外在复原过程中用到网格技术的,在进行五官等面部特征修饰时,可以先把特征位置设定在网格中。这样能从数据库中选择面部特征模型,并自动地加到产生的曲面上。

司法应用的颅面复原问题是需要做很多后续工作的活跃的研究领域。

参考文献 (References)

- Helmer R P, Rohricht S, Petersen D, et al. Identification of Skulls: Forensic Analysis of the Skull[M]. New York: Wiley-Liss, Inc., 1993:29 ~ 45.
- Krogman W M, Iscan M Y. The Human Skeleton in Forensic Medicine[M]. Illinois USA: Springfield, 1986.
- Taylor K T. Forensic Art and Illustration[M]. Boca Raton USA: CRC Press LLC, 2001.
- Phillips V M, Smuts N A. Facial reconstruction: Utilization of computerized tomography to measure facial tissue thickness in a mixed racial population[J]. Forensic Science International, 1996, 83(1): 51 ~ 59.
- Li Yan, Zhou Ming-quan, Geng Guo-hua. A method of 3D depth measurement following normal direction[J]. Computer Engineering, 2003, 29(12):70 ~ 71,132. [李燕,周名全,耿国华.一种沿法线方向的3维深度测量方法[J].计算机工程,2003,29(12):70 ~ 71,132.]
- Lan Yu-wen, Li Yue-wei, Chen Shou-rong, et al. The research of 3D craniofacial reconstruction's Indication[A]. In: Proceedings of the 11th Biennial Scientific Meeting of the International Association for Craniofacial Identification[C], Da Lian, 2004: 102 ~ 121. [兰玉文,李跃威,陈守榕等.三维颅面复原指标系统的研究[A].见:第11届国际颅面鉴定学术会议论文集[C],大连,2004:102 ~ 121.]
- Stanley Rhine. Tissue Thickness Measures: American Caucasoids, American Blacks, Southwestern Indians[M]. Albuquerque, USA: University of New Mexico Press, 1982.
- Carr J C, Beaton R K, Cherrie J B, et al. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions[A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series[C], Los Angeles, California, 2001:67 ~ 76.
- Lu Ke, Geng Guo-hua, Zhou Ming-quan. A method of surface reconstruction with CT cross-sectional Data [J]. Computer Engineering, 2002, 28(2):68 ~ 69. [吕科,耿国华,周明全.医学图像3维表面的快速重构方法[J].计算机工程,2002,28(2):68 ~ 69.]
- Zeng Zheng, Chen Xiao, Zhou Hong, et al. Extracting contour in 3-D surface reconstruction based on convex hull algorithm [J]. Microcomputer Development, 2004, 14(12): 39 ~ 41. [曾筝,陈晓,周宏等.基于凸包算法的3维表面重建中边缘轮廓提取[J].微机发展,2004,14(12):39 ~ 41.]
- Wang Gang, Gao Xin-bo, Ji Hong-bing. Shape-based interpolation algorithm for 3D reconstruction [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2003, 15(8): 1012 ~ 1015. [王刚,高新波,姬红兵.三维重建中形状插值的快速算法研究[J].计算机辅助设计与图形学学报,2003,15(8):1012 ~ 1015.]
- Michael S, Chen M. The 3D reconstruction of facial features using volume distortion[A]. In: Proceedings of 14th Eurographics UK Conference[C], London, 1996: 297 ~ 305.
- Yu Zhang, Terence Sim, Eric Sung. Anatomy-based human face reconstruction using multi-layer deformation[A]. In: The 13th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision' 2005 [C], Plzen, Czech Republic, 2005: 75 ~ 76.
- Rhine J S, Campbell H R. Thickness of facial tissues in American Blacks[J]. Journal of Forensic Science, 1980, 25(4):847 ~ 858.
- Ubelaker D H. Human Skeleton Remains: Excavation, Analysis, Interpretation[M]. Washington DC, USA.: Taraxacum Press, 1989.
- Mark W J. Facial reconstruction using volumetric data[A]. In: Vision, Modeling and Visualization[C], Stuttgart, Germany, 2001: 135 ~ 150.
- Nelson L A, Michael S D. The application of volume deformation to

- three dimensional facial reconstruction: A comparison with previous techniques [J]. *Forensic Science International*, 1998, **94**(3): 167 ~ 181.
- 18 Zhou Ming-quan, Geng Guo-hua, Fan Jiang-bo. Computer-aided forensic facial reconstruction [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 1997, **27**(5): 375 ~ 378. [周明全, 耿国华, 范江波. 计算机辅助的颅骨面貌复原技术[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 1997, **27**(5): 375 ~ 378.]
- 19 Vanezis P, Vanezis M, McCombe G, *et al.* Facial reconstruction using 3-D computer graphics [J]. *Forensic Science International*, 2000, **108**(2000): 81 ~ 95.
- 20 Li Yi-bo, Liu Min, Wang Qing-jun, *et al.* 3D facial reconstruction based on subarea and convhull [J]. *Journal of Image and Graphics*, 2005, **10**(5): 654 ~ 657. [李一波, 刘敏, 王庆军等. 基于分区和凸包的 3 维相貌复原[J]. *中国图象图形学报*, 2005, **10**(5): 654 ~ 657.]
- 21 Barber C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H T. The quickhull algorithm for convexhulls [J]. *ACM Transactions on Mathematical Software*, 1996, **22**(4): 469 ~ 483.
- 22 Katrina Marie Archer. *Craniofacial Reconstruction Using Hierarchical B-spline Interpolation* [D]. West Mall Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 1997.
- 23 David William Bullock. *Computer Assisted 3D Craniofacial Reconstruction* [D]. West Mall Vancouver, Canada: The University of British Columbia, 1999.
- 24 Kees van Overveld, Brian Wyvill. An efficient adaptive algorithm for triangulating an equi-potential surface [A]. In: *Proceedings of 5th Annual Western Computer Graphics Symposium* [C], British Columbia, 1993: 31 ~ 62.
- 25 Kolja Kähler, Jörg Haber, Hans-Peter Seidel. Reanimating the dead: Reconstruction of expressive faces from skull data [J], *ACM Transactions on Graphics*, 2003, **22**(3): 554 ~ 561.
- 26 Lin Hao, Yao Han-zhen, Yu Hai-yan. The using of texture mappings technique in computer generated mages [J]. *Journal of Tianjin University of Light Industry*, 2002, **40**(1): 52 ~ 55. [林浩, 姚函珍, 于海艳. 纹理映射技术[J]. *天津轻工业学院学报*, 2002, **40**(1): 52 ~ 55.]
- 27 Áttardi G, Betro M, Forte M, *et al.* 3D facial reconstruction and visualization of ancient Egyptian mummies using spiral CT data Soft tissues reconstruction and textures application [EB/OL]. <http://medialab.di.unipi.it/Profect/mumma/SIGGRAPH99/>, 2000-03-18.
- 28 Kähler K, Haber J, Yamauchi H, *et al.* Head shop: Generating animated head models with anatomical structure [A]. In: *Proceedings of the 2002 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation* [C], San Antonio, Texas, 2002: 55 ~ 64.
- 29 Keith Waters. A muscle model for animating three-dimensional facial expression [J]. *Computer Graphics*, 1987, **21**(4): 17 ~ 24.
- 30 Kähler K, Haber J, Seidel H P. Geometry-based muscle modeling for facial animation [A]. In: *Proceedings of Graphics Interface* [C], Ottawa, Canada, 2001: 37 ~ 46.
- 31 Koch R M, Gross M H, Bosshard A A. Emotion editing using finite elements [J]. *Computer Graphics Forum*, 1998, **17**(3): C295 ~ C302.
- 32 Chadwick J E, Haumann D R, Parent R E. Layered construction for deformable animated characters [J]. *Computer Graphics*, 1989, **23**(3): 243 ~ 252.
- 33 Terzopoulos D, Waters K. Physically-based facial modeling, analysis, and animation [J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1990, **2**(11): 73 ~ 80.
- 34 Lee Y, Terzioyakis D, Waters K. Realistic modeling for facial animation [A]. In: *SIGGRAPH '95 Conference Proceedings* [C], Los Angeles, CA, USA, 1995: 55 ~ 62.
- 35 Scheepers F, Parent R E, Carlson W E, *et al.* Anatomy-based modeling of the human musculature [A]. In: *SIGGRAPH '97 Conference Proceedings* [C], Los Angeles, CA, USA, 1997: 163 ~ 172.
- 36 Wilhelms J, Van Gelder A. Anatomically based modeling [A]. In: *SIGGRAPH '97 Conference Proceedings* [C], Los Angeles, CA, USA, 1997: 173 ~ 180.