

计算机动画中人体建模与皮肤变形技术的 研究现状与展望

吴小毛 马利庄 顾宝军

(上海交通大学计算科学与工程系, 上海 200240)

摘要 人体动画制作技术是计算机动画领域内的研究热点和难点。在制作真实感人体动画时,除了有真实的人体运动和灵活的运动控制方法外,还需要有逼真的人体造型和皮肤变形效果。为了使计算机动画研究领域的研究人员对当前各种人体建模与皮肤变形技术有较全面的了解,对计算机动画中的真实感人体建模与皮肤变形技术进行了较为全面的阐述,将现有的方法分为三大类:基于面模型的方法、基于体模型的方法和基于层次式模型的方法,并分析和比较了这些方法的优缺点。在回顾了现有的人体建模与变形技术的基础上指出,3维扫描技术的发展使人体建模和皮肤变形的研究面临新的契机。如何充分利用基于扫描技术建模的优点,并结合层次式建模与变形方法的灵活性的特点,创作出高度真实感的人体皮肤模型及其变形效果,是未来研究的重要方向。

关键词 计算机动画 人体建模 皮肤变形 综述

中图分类号: TP391.41 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)04-0565-09

State of the Art of the Research on Human-body Modeling and Skin Deformation in Computer Animation

WU Xiao-mao, MA Li-zhuang, GU Bao-jun

(Department of Computer Science & Engineering, Shanghai JiaoTong University, Shanghai 200240)

Abstract Creating realistic human animation is one of the most important research focuses, and remains problematic in the research field of computer animation. When creating realistic human animation, we need not only realistic human motion and its control techniques, but also effects of vivid body shapes and skin deformation. In this paper, a detailed survey on existing methods for human-body modeling and skin deformations is given, which can help the researchers to have a good understanding of the state of the art in this area. The existing methods are classified into three categories: surface-model based methods, volume-model based methods and hierarchical-model based methods. The advantages and disadvantages of each method are also discussed. Based on the survey of existing methods, it is pointed out that the development of 3D scanners provides a good chance for researchers. We suggest that an important research direction in human-body modeling and skin deformation is: how to combine the advantage of reality of example-based methods and the advantage of flexibility of hierarchical-based methods, in order to create very realistic human-body models and skin deformations.

Keywords computer animation, human-body modeling, skin deformation, survey

1 引言

计算机动画技术是指使用计算机技术来自动或者半自动地生成动画的技术。计算机动画始于20

世纪70年代,最初只是作为动画师的辅助工具以完成关键帧插值的工作。1974年的电影《Hunger》是最早使用计算机动画技术的电影之一。随着计算机图形学技术的发展以及计算机显示技术的不断更新,计算机动画技术已经不止是动画创作的一种辅助手

基金项目:国家自然科学基金项目(60373070, 60573147)

收稿日期:2006-03-23; 改回日期:2006-05-22

第一作者简介:吴小毛(1977~),男,上海交通大学计算机系03级博士研究生。研究方向为计算机动画、运动捕获技术、人体建模技术。E-mail: wu.xiaomao@gmail.com; wuxiaomao@sjtu.edu.cn

段,而且还是动画创作的必备工具。动画师可以借助于计算机来创作出具有高度真实感的虚拟场景和数字人物。在电影《恐龙》、《木乃伊归来》、《机械公敌》、《金刚》,游戏《FIFA 系列》、《最终幻想》中,人们可以充分体验到计算机动画技术高超的艺术魅力。计算机动画的应用领域非常广泛,虽然应用最多的是游戏和影视行业,但在军事、航空、气象、机械、医学和体育等领域也都拥有着非常重要的应用。

计算机动画的研究对象可以包括现实生活或虚拟世界中一切可以随时间而运动的物体如云雾、河流、各种植物、动物等,但其中最具有难度和最有挑战性的对象之一是人体动画^[1]。人体动画的困难性和挑战性吸引了大批的研究者纷纷投入到人体动画的研究工作中。这些研究主要集中在以下两个方面:人体的运动控制技术和人体造型与皮肤变形技术。由于人体的运动控制技术已在文献[2]中进行了综述,因此,这里将主要介绍人体造型与皮肤变形技术。

人体建模与皮肤变形技术的研究可以追溯到20世纪70年代,当时 Badler^[3]和 Herbison-Evans^[4]使用了体元(volumetric primitives)进行人体建模与变形。现在该领域无论是在学术界还是在工业界都仍然是一个非常活跃的领域,每年都有大量的学术论文发表,每年都有大量的关于人体建模的新的软件或者插件出现。

本文对现有的真实感人体建模与动画技术进行了全面的回顾,并对各种算法的优缺点进行了分析,最后提出了可能的研究方向。

2 人体建模与皮肤变形技术面临的挑战

人体建模与皮肤变形技术至今仍然是计算机动画所面临的重大挑战之一,这主要是由于以下的原因:一是,人体具有200个以上的自由度和非常复杂的运动;二是,人的形状不规则,人的肌肉随着人体的运动而变形,人的个性、表情等千变万化;三是,计算机动画的主要观赏者和评价者就是人类本身,而人对计算机动画中人体的运动和皮肤变形是非常敏感的,往往可以凭直觉捕捉到很细微的差别。从某种意义上来说,人人都是人体动画的“评判专家”。因此,虽然高度真实感的人体建模与皮肤变形的研究时间和图形学的研究时间几乎一样的长,但它至今仍是一个非常大的难题。

目前在数字娱乐领域内应用最多的皮肤变形算法是“蒙皮”算法^[5],该算法还有很多其他的名字,包括“线形插值蒙皮(linear blend skinning)”,“骨骼子空间变形(skeleton subspace deformation, SSD)”,“光滑绑定(smooth binding)”,“变换插值(transform blending)”,“矩阵插值(matrix blending)”等。其基本方法是指定皮肤顶点和骨骼的连接关系以及相应的权重,当骨骼运动时,使用加权相加的方法将与皮肤顶点相关的骨骼的运动传递到皮肤顶点上。这样皮肤便可以随着骨骼的运动而产生相应的变形。现有的商业软件如 Maya^[6]就使用了蒙皮技术。然而“蒙皮”算法很容易出现如“塌陷(collapse)”、“裹糖纸(candy wrapper)”效应等问题^[7],其中,“塌陷”指的是关节弯曲时,皮肤产生的压扁、穿透等现象。它类似于对一段空心的钢管进行弯曲时出现的现象。“裹糖纸”效应是指将皮肤以骨骼方向为轴进行扭转时,关节连接处皮肤将逐渐变细。它类似于对糖果纸进行扭转时出现的现象。有经验的动画师也要花几个小时来调节权重以实现最终满意的效果^[8]。这些问题产生的根本原因在于该方法忽略了骨骼和皮肤之间的肌肉、脂肪等生理结构,只考虑了骨架层和皮肤层。尽管如此,由于“蒙皮”技术的快速性和有效性,它仍然是应用最为广泛的皮肤变形算法。

3维扫描设备^[9]的快速发展给人体建模带来了新的契机。通过使用3维扫描设备对真实的人体进行扫描,并使用3维重建算法^[10,11],可以获得具有高度真实感的静止人体模型。同时,如果对一个真实人体的运动进行系列扫描,可以得到一系列的真实人体运动姿态模型。通过插值这些中间姿态模型,可以生成非常逼真的人体模型动画效果^[12]。该方法面临的问题是每次只能捕获并生成特定扫描对象的皮肤模型及其变形效果,难以将获得的变形效果应用到新的皮肤模型上。最近,Anguelov等人^[13]提出了SCAPE方法,能够将一个人体的皮肤变形效果应用到另外一个皮肤模型上,然而,该方法难以对各肌肉的形状和变形效果进行干预,难以单独调节各肌肉的变形结果。

3 人体建模和皮肤变形技术

人体建模技术主要用于解决在给定姿态下人体的建模问题,而皮肤变形技术主要用于解决在运动过程中人体皮肤的变形问题。两者紧密相连,相互

影响,因此本文将这两者放在一起进行叙述。将人体建模和皮肤变形技术分为三大类:基于面模型的方法、基于体模型的方法和基于层次式模型的方法。

3.1 基于面模型的方法

现有的建模方法中,基于面模型方法只考虑两层结构:骨架层(skeleton layer)和皮肤层(skin layer),而不考虑中间的肌肉层(muscle layer)和脂肪层(fat layer)。骨架层用于表示人体的基本结构,一般使用层次式结构来表示,以方便对动画的控制。在骨架的外面是皮肤层,其变形由内部的骨架层来驱动。面模型方法可以分为刚体模型法、变形函数表示法、“蒙皮”法、轮廓线法和基于样本的方法。

3.1.1 刚体模型法

基于刚体模型的皮肤建模方法^[14]将直接由多边形网格表示的皮肤模型构建在骨架之上。皮肤模型和骨架之间是刚性连接的。动画过程中,骨架的运动带动相应的皮肤顶点运动。具体实现时,可以将皮肤顶点的全局坐标值转换为其所对应的骨骼所在的局部坐标系的局部坐标值。当骨骼运动时,由于其局部坐标系将不断更新,由骨骼的局部坐标系和对应皮肤顶点的局部坐标值,可以计算得到在新的姿态下皮肤的全局坐标值。上述计算对于每一帧计算一遍,就能得到皮肤随骨骼运动的变形效果。

由于该方法认为皮肤与骨骼间是刚性连接的,不考虑皮肤的弹性变形,所以实现简单,计算速度快。但使用该方法时,在关节连接处可能产生压扁、断裂和穿透的问题,因为它没有考虑关节连接处肌肉和皮肤的变形,只是把皮肤当成一个刚性体。尽管如此,刚体模型建模法仍然适合于对皮肤模型精度要求不高的场合,如基于网页的动画应用。同时该方法在运动捕获技术的学术研究中常用于演示骨骼动画效果^[15,16],因为这些研究者关心的是运动,而非皮肤变形效果。

3.1.2 变形函数表示法

针对刚体模型方法所存在的问题,后来的研究者巧妙地通过使用一些以关节角度为自变量的连续函数来解决。通过定义良好的连续函数,如Komatsu所使用的双二次Bezier和Gregory曲面函数^[17],能够在很大程度上克服刚体模型方法所固有的缺点。另一种变形函数表示法是Thalmanns提出的JLD(joint-dependent local deformation)方法^[18,19]。该方法首先将皮肤顶点映射到相应的骨骼上。在关节附近的皮肤顶点将对应两个相邻的骨

骼。其次,设计以关节转角为自变量的变形函数。该函数用来驱动对应的皮肤顶点的变形。当关节角度变小时产生肌肉的隆起效果,当关节角度变大时产生肌肉的扁平效果。在设计好每个类型关节的变形函数后,皮肤就可以根据关节的角度和所设计的变形函数产生相应的变形。

上述的Komatsu的方法^[17]和Thalmanns的JLD方法^[18,19]能够产生较为真实的皮肤变形效果,但却面临以下3个主要的问题:一是使用数学函数只能表达较为简单的变形,它很难清楚地定义复杂的变形如肩膀附近皮肤的变形;二是需要为每一种类型的关节单独指定变形函数。这需要丰富的经验和反复调节的过程,一般的用户难以设计出满意的函数;三是该方法使用起来不直观,使用者很难直观想象出数学函数与变形结果之间的关系。尽管如此,基于变形函数表示的变形方法取得了让人满意的效果,使用该方法成功地创作出了虚拟女孩Marilyn^[18]。

3.1.3 切面轮廓线变形法

由于人体的躯干和四肢的切面接近于椭圆形,Thalmann等人^[20]以及Kalra等人^[21]通过椭圆形的切面来近似地模拟人体皮肤的变形。

其基本思想是将身体躯干和四肢表达为一串的椭圆形轮廓,当人体运动时,通过实时计算每个椭圆形轮廓的朝向和位置,能够得到较为满意的皮肤变形效果。下面以手臂为例说明该算法的原理。首先设计皮肤模型。可以使用造型软件设计法^[6]或者使用隐式曲面定义法^[20]来得到皮肤模型。然后,从骨骼中心沿着与骨骼垂直的面发出一系列的射线,得到这些射线与皮肤的交点,将这些交点连起来,得到一条条封闭的轮廓线,如图1所示。图中将轮廓线投影成了直线,右图是第*i*条轮廓线的正视图。 L_1 和 L_2 分别表示上臂和下臂的方向。 N_l 表示下臂末端切面的法向量, N_u 表示上臂末端切面的法向量, N_0 表示肘关节处切面的法向量,其中, $N_0 = (N_l + N_u)/2$ 。 N_l 和 N_u 之间的其他法向量 N_i 可以通过插值得到,这些法向量呈均匀分布。当骨骼运动时, N_l 和 N_u 随之改变,从而带动 N_i 的改变。 N_i 的变化引起其所对应的轮廓线朝向的改变。这样,改变后的轮廓线就定义了一个新的皮肤姿态。当骨骼不断运动时,皮肤也随之而不断做出相应的变形。

基于切面轮廓线的变形算法比“蒙皮”算法更加快速,也能产生很光滑的变形效果,因为它是直接

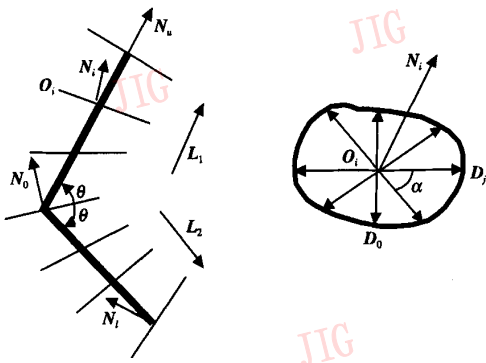


图 1 手臂的切面轮廓线变形法

Fig. 1 Contour-based deformation of the arm

对轮廓线进行操作而不是单独对顶点进行操作。而基于轮廓线的操作比基于顶点的操作具有更好的连续性。该算法同时也适合于精度要求不高的肌肉变形。算法的不足之处在于：第一，由于每条轮廓线只受到离它最近的两层轮廓线的影响，这会造成某些较为复杂的关节（如肩膀）的不理想的变形效果；第二，由于每个肢体都由单独的椭圆形构成，该方法难以表达细微的皮肤结构，在复杂关节如肩部难以达到逼真的造型效果。

3.1.4 “蒙皮”法

“蒙皮”（skinning）是一种基于局部操作的表面变形算法^[5-8,22]。使用该方法时，用户可以通过图形化界面为每个皮肤顶点指定对应的骨骼以及对应的权重。“蒙皮”算法速度较快，但是在指定权重时需要动画师具有一定的经验。

“蒙皮”方法本质上是一种插值算法，其基本原理可以用下式表示：

$$v = \sum_{i=1}^n \omega_i M_i D_i^{-1} v_d \quad \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (1)$$

其中， v_d 是变形前的皮肤顶点坐标， D_i 表示在初始参考姿态下与皮肤顶点相关的第 i 段骨骼的由局部坐标到全局坐标的转换矩阵， $D_i^{-1} v_d$ 表示在第 i 段骨骼局部坐标系中皮肤顶点的坐标值， M_i 表示第 i 段骨骼的在当前帧中由局部坐标到全局坐标的转换矩阵， ω_i 表示第 i 段骨骼对于当前顶点的权值， v 表示变形后的皮肤顶点坐标。“蒙皮”算法的基本思想是使关节附近的皮肤顶点同时受到与关节相邻的两段骨骼的影响，影响的大小由权值 ω_i 确定。

最近对“蒙皮”法的研究主要集中在如何提高算法的速度，如何克服“塌陷”等缺陷，以及如何使

它应用起来更加方便这几个方面^[8,22-25]。

蒙皮算法的主要局限性在于：第一，指定权重只能半自动化，必须进行人工干预，并且要求使用者具有一定的经验；第二，为自由度比较大的关节部分如肩膀指定权重时比较困难，当权重指定得不好时，容易产生不自然的变形。

3.1.5 基于样本的变形方法

通过使用 3 维扫描设备^[9]对真实的人体进行扫描，可以得到逼真的人体模型。同时，如果对运动着的人体进行一系列的扫描就可以得到一系列不同姿势下的高度真实感人体皮肤网格模型。通过内插或者外推这些关键姿态可以真实地模拟人体皮肤的变形效果^[7,12,26,27]。由于扫描姿态是任意的，而且不规则地分布在骨架参数空间，姿态插值可以表达为散乱数据插值问题。RBF (radial basis function) 插值是典型的散乱数据插值算法。Lewis 等人^[7]使用高斯径向基函数 (gaussian radial basis function)；Sloan 等人^[26]使用了 3 次 B 样条基函数；Allen 等人^[12]使用 K-领域插值算法进行关键姿态插值；Anguelov 等人^[13]提出了 SCAPE 方法，能够生成逼真的皮肤变形效果。

下面以 Allen 等人^[12]的方法为例说明基于样本插值的变形算法。该算法主要过程如下：

(1) 在真实的人体身上设置标记点，这些点将被 3 维扫描仪识别出来，以确定标记点处皮肤点的 3 维坐标。

(2) 使用 3 维激光扫描仪对人体进行扫描，扫描过程中，人体根据要求摆出一系列相应的姿势，每次对一个姿态进行扫描。

(3) 使用优化函数求解每个姿态下的每个关节的配置参数（平移量和转角量），以及扫描到的皮肤顶点在其所在的关节局部坐标系下的值。

(4) 根据求得的配置参数，使用造型软件绘制一个模板模型；然后根据模板面对获得的一系列姿态进行参数化，得到不同姿态下的偏移图 (displacement map)。

(5) 计算权值，为插值做准备。权值包括两个部分，即用于姿态之间插值的权值和用于不同身体部位之间插值的权值。

(6) 根据权值进行插值，从而得到连续光滑的皮肤变形效果。

最近，Anguelov 等人^[13]对上述方法进行了拓展，从而能够处理全身的皮肤变形和动画。

基于样本插值的变形算法能够克服蒙皮算法的缺陷,如果充分利用现有 GPU 的硬件加速功能进行矩阵混合运算可以获得实时的速度^[26]。其主要的不足之处在于:第一,一次只能捕获一个人的特定姿态,很难将其重定向到新的人体模型上,如果扫描大量的样本,将是非常费时的的工作,而且目前还没有有这样的姿态库可以使用,即使有了足够的不同人种、不同年龄、不同高度和不同胖瘦的样本库,也很难满足动画师的需要,因为他可能想象出一个现实世界中不存在的模型,而我们无法对不存在的模型进行扫描;第二,需要动画师设计一个“模板面”(template surface),如果模板面和扫描到的模型相差太大,则容易出现匹配问题^[12];第三,无法处理物理约束如碰撞检测,因为它只是一种几何插值算法。

3.2 基于体模型的方法

体模型法主要可以分为隐式曲面法和体数据法。前者使用隐式曲面来定义包围在骨架上的皮肤模型,后者使用扫描到的体数据来表达人体模型。

3.2.1 隐式曲面法

隐式曲面可以由以下方程定义:

$$F(x, y, z) - I = 0 \quad (2)$$

其中, I 用来定义需要的等值面的值。 $F(x, y, z)$ 是一个标量场函数,不同的标量场函数描述了中心点附近不同的区域。也可以使用几个不同的中心点及其场函数来定义各自的面,然后通过插值这些面来定义最终的面。举个简单的例子,设空间有两个点,每个点周围有一个热能场,把两个点靠得比较近的话,由于相互的影响将最终形成一个新的热能场,这个新的热能场就类似于我们定义的最终隐式曲面,当然点的个数可以大于两个。

基本的隐式曲面的造型方法可以分为两类:简单面元(simple primitives)和骨架面元(skeletal primitives)。前者将面元定义为点周围的面(如球或者椭球),典型的方法是 Blobby Molecules, Metaballs 和 Soft object;骨架面元将面元定义在刚性的骨架如线或者多边形上。简单面元可以看成是骨架面元的特例。

20世纪80年代初Blinn^[28]使用基于点骨架和指数递减场定义的隐式曲面,成功地对“Blobby man”进行了建模。Yoshomito^[29]使用500个椭球形metaball创建出了逼真的虚拟人。Bloomenthal等人使用卷积曲面(convolution surfaces)分别模拟了手臂^[30]和手^[31]的造型。

隐式曲面有许多的特性使它适合于人体建模。首先各曲面之间能够平滑地插值,因为场函数通常具有 C^1 或更高的连续性,对于定义光滑的人体模型提供了方便;另外,它数据量少,占用内存小。该方法存在以下局限性:一是容易产生不自然的弯曲;二是将隐式函数多边形化比较困难,尤其是对于动画。由于现有的图形渲染系统大都以多边形为单位进行渲染,不能直接对隐式曲面进行渲染。多边形化的目的就是为了将隐式曲面用离散化的多边形表示,以便于渲染。研究者在隐式曲面多边形化方面做了大量的工作^[20,34,33]。

3.2.2 体数据模型

Gagvani等人^[34,35]提出了一种使用体骨架(volumetric skeleton)来驱动体数据模型的方法。该方法首先对体数据进行细化,然后连接细化后的体元从而得到体骨架。体骨架建立以后,就可以它驱动体数据进行运动。可以使用关键帧动画法或者运动捕获数据驱动法来驱动体骨架的运动,然后由体骨架的姿态恢复出体数据模型。对于每一帧都需要恢复一次体数据模型以便生成最终的动画效果。

该方法适合于对现有的体数据模型进行动画。存在的问题是算法速度慢,不适合于实时应用的场合。

3.3 基于层次式模型的方法

Chadwick等人^[36]在1989年首次将他们的角色加上了肌肉层,从那以后,众多的研究者开始对层次式人体建模进行研究。在层次式模型中,将人体分解成骨骼层、肌肉层、脂肪层和皮肤层。对它们依次建模,并由内到外进行传递最终实现皮肤的变形效果。层次式人体建模因为模拟了人体的真实结构和驱动机制,并能够模拟肌肉的变形,从而能产生逼真的皮肤变形效果。层次式建模的困难性在于设计肌肉以及仔细地调节每块肌肉使之适合皮肤的形状,所以非专业用户感觉门槛较高,专业人员也觉得设计费时费力。

3.3.1 各层次的建模方法

层次式人体建模可以分为骨架层的建模,肌肉层的建模,脂肪层的建模和皮肤层的建模。下面分别就各层次的建模方法进行叙述。

骨架层(skeleton layer)通常定义为层次式关节结构^[20]。骨架有两层含义:它可以用来指抽象的人体棒状结构(stick figure),也可以指人体的骨骼系统^[37]。对于前者,一般都使用树状结构来表示人体

的运动结构,如 *bvh*, *asf/amc* 运动数据文件;对于后者,可以使用建模工具由艺术家或者动画师来绘制各个骨骼^[37-39],这些骨骼的结构和连接关系遵循一定的标准如 *H-Anim specification 1.1*^[14]。

位于骨架层之上的是肌肉层 (*muscle layer*)。肌肉层的建模是层次式建模中关键的一步,其建模的效果将直接影响到皮肤的变形效果。有大量的生物医学领域内和动画领域内的研究者对肌肉建模进行了深入的研究。这里将讨论限制在动画领域内。按照肌肉建模的方法可以将现有的方法分为两类:几何模型法 (*geometric models*) 和物理模型法 (*physically-based models*)。

几何模型法只考虑肌肉的几何形状而不考虑其物理属性。*Chadwick* 等人^[36]在 1989 年使用自由形体变形 (*free form deformation, FFD*) 来进行肌肉的变形。*Moccozet*^[40]随后在 1996 年使用 *DFFD* (*dirichlet free form deformation*) 技术来模拟手的变形。这两种方法取得了令人满意的效果。隐式曲面也可用于肌肉造型。文献[41]就使用了球和超二次曲面来进行肌肉建模。文献[20]使用椭球形元球 (*ellipsoidal meatballs*) 来模拟肌肉的变形。*Scheepers* 等人^[39]使用椭球来表示肌肉,并定义了一般的肌肉形状:将一个大小变化的椭圆沿着一根样条曲线进行扫描可以得到更为一般化的肌肉形状;肌肉的变形可以根据等张 (*isotonic*) 和等长 (*isometric*) 收缩的原则解析地计算出来。*Wilhelms* 等人^[42]使用近心点 (*origin*)、远心点 (*insertion*) 和位于这两点之间的 8 个椭圆来近似模拟肌肉的形状,用户可以交互式编辑这些肌肉的参数。*Dow* 和 *Semwal*^[43]使用圆柱体来表示肌肉,每个圆柱切面用 B 样条来表示并通过两个参数 *BaseSize* 和 *GrowthFactor* 来控制切面的形状,前一个参数表示基本形状,后一个参数用于控制变形。

与上面介绍的几何模型不同,基于物理模型的方法一般使用力学模型来模拟肌肉的变形。文献[44]~[46]使用有限元模型 (*FEM*) 来模拟肌肉的变形,之后,*Hirota* 等人^[47]和 *Lemos* 等人^[48]对有限元模型进行了推广,提出非线性 *FEM* 模型来处理肌肉的变形。*Nedel* 等人^[37]使用弹簧系统来模拟肌肉的变形;他们使用了线性弹簧和非线性弹簧来进行模拟,线性弹簧用于模拟线性的弹力,非线性弹簧用于模拟弯曲力和约束力。最近,*Teran* 等人^[49]提出了一种快速有效的准静力学肌肉变形模拟算法。与

传统的隐式迭代法和准静力学算法方法相比,该方法能够在相同稳定的条件下达到更快的计算速度。另外 *Ng-Thow-Hing* 等人^[50]提出使用 B 样条体 (*B-spline solids*) 的方法来表示肌肉,其方法能统一地表示纺锤形、三角形等形状的肌肉。

脂肪层 (*fat layer*) 一般不作为单独的层来进行造型,它一般都被整合到肌肉层中^[20,36]。脂肪层是位于皮肤之下有一定厚度的层,可以通过弹簧对它进行模拟^[41]。弹簧将皮肤和肌肉以及骨骼联系起来,动画过程中骨骼和肌肉的运动带动这些弹簧进行形变,然后通过弹簧将形变传递到皮肤层。使用脂肪层的算法其基本原理都是类似的^[42,50,51]。

皮肤层 (*skin layer*) 的造型方法可以分为 4 类:

(1) 隐式曲面法 该方法通过隐式函数定义相应的皮肤面^[20,42]。它可以定义出光滑连续的皮肤面,但是在渲染时需要进行多边形化。

(2) 由多边形表示的皮肤网格面^[36,47] 这种方法表示的优势在于能够将图元直接送到图形卡进行渲染,处理速度快。同时也容易出现不连续现象,需要进行光顺处理。

(3) 曲面子分法 (*subdivision*)^[33,52] 这种表示方法有以下优点:光顺性能能够得到保证;可以方便地进行多边形化;插值方便。

(4) 参数曲面表示法^[20,39,53,54] 这种方法使用参数曲面如双三次 B 样条曲面或者 *Bezier* 曲面来表示皮肤的形状。

3.3.2 骨骼肌肉和皮肤的对应

在已经建立好骨骼、肌肉和其他组织的情况下,如何使它们与皮肤进行对应并驱动皮肤的变形呢?可以将现有的方法分为两大类:第 1 类方法是在建好的骨骼肌肉模型上给模型“裹”上一层皮肤;第 2 类方法是单独设计或者通过扫描得到皮肤模型,然后使用内部的组织来驱动皮肤的变形。

第 1 类方法是比较传统的方法。*Thalmann* 等人^[20]使用隐式曲面造型方法将肌肉定义在骨架上并将肌肉表示为 *Metaballs*,之后可以从这些 *Metaballs* 中生成一个隐式曲面,通过采样后就能得到皮肤的网格模型。*Wilhelms* 等人^[42]也使用类似的方法来生成猴子的皮肤,他们将肌肉表示为由 8 个椭圆构成的面,然后通过高斯核对隐式函数进行采样而得到皮肤的网格模型。

第 2 类方法相对较新,它的基本思想是皮肤可以单独设计而不是直接从内部结构来生成。就我们

的了解, Schneider^[55]是最早提出该思想的人之一,他们提出了层次式解剖学建模和现有的扫描到的真实感皮肤相结合的算法,通过半自动的方法将骨骼肌肉和现有的皮肤相对应。该方法能够保证更逼真的皮肤造型,但人工干预太多,调节方法复杂。随后 Simmons 等人^[56]提出了自动化程度更高的算法,基本思想是设计一个标准的具有骨骼、肌肉和皮肤的模型,对于给定的皮肤依次对骨架、骨骼和肌肉进行变形以便让标准模型和皮肤模型的特征点匹配,其他的点使用 RBF 插值计算得到。方法仍有不方便之处是标准模型的建立需要手工调节肌肉的形状使之适应皮肤的形状。

4 结 论

现有的人体建模与皮肤变形方法可以分为三大类:基于面模型的方法,基于体模型的方法和基于层次式模型的方法。

基于面模型的方法应用最为广泛,尤其是基于面模型方法中的“蒙皮”算法至今仍然是使用最为广泛的皮肤变形算法,但使用该方法时,调节皮肤顶点与骨骼的权重是一个非常费时的的工作,有经验的动画师通常也要花几个小时的时间来进行调节。基于样本的皮肤变形方法是近几年研究的热点,它能够制作出目前为止最为逼真的皮肤变形效果。但是成本高而且费时,同时难以调节各肌肉的单独变形。

基于体模型的方法中,隐式曲面法容易生成具有良好形状的人体模型,而且该方法编辑方便,数据量少,占用内存小。但它也存在以下局限性:一是容易产生不自然的弯曲;二是将隐式函数多边形化比较困难。体数据模型法能够用来驱动由体数据构成的人体模型,由于体数据表示法数据量大,故其速度慢。

基于层次式模型的方法由于更接近于人体的结构,能够产生非常逼真的动画效果,但制作骨骼和肌肉是一件比较困难的工作,要求制作者具有人体解剖学的知识和美术基础。对该问题曾进行过深入的探讨,提出了“基于模版模型的解剖学人体建模与动画”方法^[57,58],能在一定程度上减轻用户的建模工作量。

3D 扫描技术的快速发展使人体建模与变形技术面临新的契机,如果能够结合传统的层次式建模方法,将给人体建模技术带来很大的方便,同时给

动画建模技术注入新鲜的血液。另外,目前最新的基于扫描建模与变形的技术^[13]虽然可以得到非常逼真的皮肤形状及其变形效果,但是还是无法编辑和控制各肌肉的形状和变形。如何充分利用基于扫描方法的真实性以及基于层次式建模方法的灵活性,是该领域的一个重要发展方向。

参考文献 (References)

- 1 Aubel A. Anatomically-based human body deformations [D]. Switzerland: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- 2 Chen Zhi-hua, Ma Li-zhuang, Yang Wen-shan. Survey on motion capture data based motion editing techniques[J]. Chinese Journal of Computer Research & Development, 2006, 42(Sup. A): 296 ~ 299. [陈志华,马利庄,杨文山. 基于运动捕获数据的运动编辑技术综述[J]. 计算机研究与发展, 2006, 42(增刊 A): 296 ~ 299.]
- 3 Badler N I, O'Rourke J, Toltzis H. A spherical representation of a human body for visualizing movement[A]. In: Proceedings of the IEEE LXVII/10[C], 1979: 1397 ~ 1403.
- 4 Herbison-Evans D. Nudes 2: A numeric utility displaying ellipsoid solids[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'78[C], Atlanta, Georgia, USA, 1978: 354 ~ 356.
- 5 Lander J. Skin them bones: Game programming for the web generation[J]. Game Developer, 1998, (5): 11 ~ 16.
- 6 Maya User's Manual[M], Canada: Alias/Wavefront Corporation, 2001.
- 7 Lewis J P, Cordner M, Fong N. Pose space deformation: a unified approach to shape interpolation and skeleton-driven deformation[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'00[C], New York, USA, 2000: 165 ~ 172.
- 8 Mohr A, Tokheim L, Gleicher M. Direct manipulation of interactive character skins[A]. In: Proceedings of the 2003 Symposium on Interactive 3D Graphics[C], Monterey, California, USA, 2003: 27 ~ 30.
- 9 Cyberware Incorporation [EB/OL]. <http://www.cyberware.com>, 2006-12-01.
- 10 Krishnamurthy V, Levoy M. Fitting smooth surfaces to dense polygon meshes[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'96[C], New Orleans, Louisiana, USA, 1996: 313 ~ 324.
- 11 Carr J, Beatson R, Cherrie J, et al. Reconstruction and representation of 3D objects with radial basis functions[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'01[C], Los Angeles, California, USA, 2001: 67 ~ 76.
- 12 Allen B, Curless B, Popović Z. Articulated body deformation from range scan data[J]. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 612 ~ 619.
- 13 Anguelov D, Srinivasan P, Koller D, et al. SCAPE: Shape completion and animation of people[J]. ACM Transactions on Graphics, 2005, 24(3): 408 ~ 416.
- 14 Specification for a Standard Humanoid, Version 1.1 [EB/OL],

- <http://h-anim.org/Specifications/H-Anim1.1>, 2006-12-01
- 15 Jordan B V, Majkowski A, Chiu B, *et al.* Dynamic response for motion capture animation [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2005, 24(3): 697 ~ 701.
 - 16 Wang J, Drucker S, Agrawala M, *et al.* The cartoon animation filter [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2006, 25(3): 1169 ~ 1173.
 - 17 Komatsu K. Human skin model capable of natural shape variation [J]. *The Visual Computer*, 1988, 4(3): 265 ~ 271.
 - 18 Magnenat-Thalmann N, Thalmann D. The direction of synthetic actors in the film *rendez-vous à montréal* [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1987, 7(12): 9 ~ 19.
 - 19 Magnenat-Thalmann N, Laperrière R, Thalmann D. Joint-dependent local deformations for hand animation and object grasping [A]. In: *Proceedings of Graphics Interface '88* [C], Edmonton, Alberta, Canada, 1988: 26 ~ 33.
 - 20 Thalmann D, Shen J, Chauvineau E. Fast realistic human body deformations for animation and VR applications [A]. In: *Proceedings of Computer Graphics International '96* [C], Pohang, Korea, 1996: 166 ~ 174.
 - 21 Kalra P, Thalmann N M, Moccozet L, *et al.* Real-time animation of realistic virtual humans [J]. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1998, 18(5): 42 ~ 56.
 - 22 Mohr A, Gleicher M. Building efficient, accurate character skins from examples [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 562 ~ 568.
 - 23 Sun W, Hilton A, Smith R, *et al.* Layered animation of captured data [J]. *The Visual Computer*, 2001, 17(8): 457 ~ 474.
 - 24 Houle J, Poulin P. Simplification and real-time smooth transitions of articulated meshes [A]. In: *Proceedings of Graphics Interface '01* [C], Ontario, Toronto, Canada, 2001: 55 ~ 60.
 - 25 Kavan L, Žára J. Spherical blend skinning: A real-time deformation of articulated models [A]. In: *Proceedings of the 2005 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games* [C], Washington, USA, 2005: 9 ~ 16.
 - 26 Sloan P P, Rose C, Cohen M. Shape by example [A]. In: *Symposium on Interactive 3D Graphics 2001* [C], North Carolina, USA, 2001: 135 ~ 143.
 - 27 Allen B, Curless B, Popović Z. The space of human body shapes: reconstruction and parameterization from range scans [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2003, 22(3): 587 ~ 594.
 - 28 Blinn J. A generalization of algebraic surface drawing [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 1982, 1(3): 235 ~ 256.
 - 29 Yoshimoto S. Ballerinas generated by a personal computer [J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1992, 3(2): 85 ~ 90.
 - 30 Bloomenthal J, Shoemake K. Convolution surfaces [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '91* [C], Los Angeles, California, USA, 1991: 251 ~ 256.
 - 31 Bloomenthal J. Hand crafted [A]. In: *Siggraph Course Notes 25* [C], Anaheim, California, 1993.
 - 32 Wyvill B, Guy A. The blob tree: Implicit modelling and VRML [A]. In: *Proceedings of International Conference From the Desktop to the Webtop: Virtual Environments on the Internet, WWW and Networks* [C], NMPFT, Bradford, 1997: 193 ~ 206.
 - 33 Leclercq A, Akkouché S, Galin E. Mixing triangle meshes and implicit surfaces in character animation [A]. In: *Proceedings of Animation and Simulation '01 (The 12th Eurographics Workshop Proceedings)* [C], Manchester, England, 2001: 37 ~ 47.
 - 34 Gagvani N, Kenchammana-Hosekote D, Silver D. Volume animation using the skeleton tree [A]. In: *Proceedings of the 1998 IEEE Symposium on Volume visualization* [C], North Carolina, USA, 1998: 47 ~ 53.
 - 35 Gagvani N, Silver D. Animating volumetric models [J]. *Graphical Models*, 2001, 63(6): 443 ~ 458.
 - 36 Chadwick J, Haumann D, Parent R. Layered construction for deformable animated characters [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '89* [C], Boston, Massachusetts, USA, 1989: 243 ~ 252.
 - 37 Nedel L P, Thalmann D. Anatomically modeling of deformable human bodies [J]. *The Visual Computer*, 2000, 16(6): 306 ~ 321.
 - 38 May S F, Carlson W E, Phillips F, *et al.* AL: A Language for Procedural Modeling and Animation [R]. TR Osu-ACCAD-12/96-T-5, ACCAD, Columbus, Ohio, USA: The Ohio State University, 1996.
 - 39 Scheepers F, Parent R E, Carlson W E, *et al.* Anatomy-based modeling of the human musculature [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '97* [C], Los Angeles, California, USA, 1997: 163 ~ 172.
 - 40 Moccozet L. Hand modeling and animation for virtual humans [D]. Geneva, Switzerland: University of Geneva, 1996.
 - 41 Turner R, Thalmann D. The elastic surface layer model for animated character construction [A]. In: *Proceedings of Computer Graphics International '93* [C], Lausanne, Switzerland, 1993: 399 ~ 412.
 - 42 Wilhelms J, Gelder A V. Anatomically based modeling [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '97* [C], Los Angeles, USA, 1997: 173 ~ 180.
 - 43 Dow E, Semwal S. A framework for modeling the human muscle and bones shapes [A]. In: *New Advances in Computer Aided Design & Computer Graphics* [M], Zesheng Tang Eds, Dordrecht: International Academic Publishers, 1993: 110 ~ 113.
 - 44 Gourret J P, Magnenat-Thalmann N, Thalmann D. Simulation of object and human skin deformations in a grasping task [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '89* [C], Boston, Massachusetts, USA, 1989: 21 ~ 30.
 - 45 Chen D, Zeltzer D. Pump it up: Computer animation of a biomechanically based model of muscle using the finite element method [A]. In: *Proceedings of SIGGRAPH '92* [C], Chicago, Illinois, USA, 1992: 89 ~ 98.
 - 46 Zhu Q H, Chen Y, Kaufman A. Real-time biomechanically-based muscle volume deformation using FEM [J]. *Computer Graphics Forum*, 1998, 17(3): 275 ~ 284.
 - 47 Hirota G, Fisher S, State A, *et al.* An implicit finite element method for elastic solids in contact [A]. In: *Proceedings of Computer*

- Animation'01[C], Seoul, Korea, 2001.
- 48 Lemos R, Epstein M, Herzog W, *et al.* Realistic skeletal muscle deformation using finite element analysis[A]. In: Proceedings of SIBGRAP'01[C], Sao Paulo, Brazil, 2001: 192 ~ 199.
- 49 Teran J, Sifakis E, Irving G, *et al.* Robust quasistatic finite elements and flesh simulation[A]. In: Proceedings of the 2005 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation[C], Los Angeles, California, USA, 2005: 181 ~ 190.
- 50 Ng-Thow-Hing V. Anatomically-based Models for Physical and Geometric Reconstruction of Humans and Other Animals[D]. Toronto, Canada: University of Toronto, Toronto, 2000.
- 51 Lee Y, Terzopoulos D, Waters K. Realistic modeling for facial animation[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'95[C], Los Angeles, California, USA, 1995: 55 ~ 62.
- 52 DeRose T, Kass M, Truong T. Subdivision surfaces in character animation[A]. In: Proceedings of SIGGRAPH'98[C], Orlando, Florida, USA, 1998: 85 ~ 94.
- 53 Gascuel M-P, Verroust A, Puech C. A modeling system for complex deformable bodies suited to animation and collision processing[J]. *Journal of Visualization and Computer Animation*, 1991, 2(3): 82 ~ 91.
- 54 Henne M. A Constraint-based Skin Model for Human Figure Animation[D]. University of California, Santa Cruz, 1990.
- 55 Schneider P J, Wilhelms J. Hybrid anatomically based modeling of animals[A]. In: Proceedings of the Computer Animation'98[C], Santa Cruz, California, USA, 1998: 161 ~ 169.
- 56 Simmons M, Wilhelms J, Gelder A V. Model-based reconstruction for creature animation[A]. In: Proceedings of ACM Symposium on Computer Animation[C], San Antonio, Texas, USA, 2002: 139 ~ 146.
- 57 Wu X, Ma L, Huang K S, *et al.* Template-model based modeling and animation of human bodies with anatomical structure[A]. In: Proceedings of The 18th Annual Conference on Computer Animation and Social Agents[C], Hong Kong, China, 2005: 79 ~ 84.
- 58 Wu X, Ma L, Huang K S, *et al.* Generic-model based human body Modeling[J]. *Lecture Notes in Computer Science*, 2005, 3711: 203 ~ 21.