

基于轴变形技术的实时人体肌肉变形^{*}

AxDf-Based Real Time Muscle Deformations

左力 李锦涛 王兆其

(中国科学院计算技术研究所 北京100080)

Abstract Anatomy-based body modeling models human body in several layers, such as skeletons, muscles and skins to achieve realistic effects. In this paper, we describe an approach to model muscles use axial deformations combined with cross-sections. Axial deformations can deform objects using axial curve, and cross-sections is used to describe the transverse figure of muscles. We have applied the modeling approach to the system of muscle modeling. The approach can model abundant figures of muscles. Fidelity and speed are also acceptable. Some result of simulation is presented in this paper. The approach is also fit for modeling of other soft objects.

Keywords Computer animation, Virtual human, Human modeling, Articulated models, Soft tissues, Deformations, Muscles, Bones, AxDf(Axial Deformations)

1 引言

真实感虚拟人的建模是计算机图形学领域中最具挑战性的工作之一。自七十年代以来,人体建模的计算模型出现了包括从杆状模型、简单的多边形模型到曲面模型甚至有限元模型,生成的3D人物在虚拟现实系统、视频游戏、电影和电视广告中得到了广泛的应用。虽然研究人员在表示和变形虚拟人体形状已取得很大进展,但人体的逼真动画还没有取得较为满意的结果,其中一个最主要的挑战在于:人体运动时皮肤的自动与真实的变形。对于逼真人体的实时变形模拟,国内外的研究相对较少,随着计算机硬件的飞速发展,虚拟社区、虚拟战场等实时分布式虚拟现实技术的应用需求的不断增加,需要虚拟人不仅具有非常强的真实感,而且能够实时地做出各种动作和姿态。这就为虚拟人建模提出了更高的要求。

人体模型越接近于真实的人体,产生的变形效果越接近于真实的人体变形。基于这种思想,本文提出了一种新的肌肉建模方法,用于模拟人体骨骼肌的形状及其实时的变形效果。为构造逼真的肌肉体并可以实现快速的变形效果,方法扩展了传统的轴变形技术,采用轴变形^[1,2]与横截面相结合的技术。利用指定的可编辑的肌肉中轴线和横截面构造肌肉轮廓,采用NURBS曲面合成肌肉体表面。模型可以模拟肌肉的等长和等张收缩、弯曲和扭曲等变形。通过设置参数指定模型的表面几何和物理弹性等属

性,来设置单个肌肉的静态及动态特性。肌肉模型设置完成后,在人体骨架模型上指定该肌肉体的附着点,这样,随着骨骼关节的运动,相关肌肉可以产生逼真的肌肉收缩、隆起等变形效果。该模型可以描述丰富的肌肉形状,并满足实时变形与显示的要求。

文章的第2节简要介绍了人体肌肉解剖的背景知识及人体多层次模型的研究现状;第3节提出了我们基于轴变形技术的肌肉建模算法;第4节给出本文工作的一些实验结果;最后总结了全文。

2 背景知识及研究现状

2.1 人体肌肉解剖

人体表面使用解剖学系统生成时,肌肉模拟是最为复杂的部分。肌肉在骨骼和其它肌肉体上依次或按层次排列,有的跨越多个关节,肌肉在不同的收缩状态下具有不同的形状^[3]。骨骼肌的收缩产生骨骼的运动,这些肌肉遍布全身形成骨架与皮肤之间的中间层。

每块肌肉按组织结构可分为肌质和肌腱两部分。肌质位于肌肉的中央,由肌细胞构成,有收缩功能;肌腱位于两端,是附着部分,由致密结缔组织构成。每块肌肉通常都跨越关节附着在骨面上,或一端附着在骨面上,另一端附着在皮肤。一般将肌肉较固定的一端称为起点,较活动的一端称为止点。肌肉的形状往往体现了它的功能。解剖学家把肌肉收缩分为两类,等张收缩,肌肉长度缩短肌质变粗并产生骨骼运动;等长收缩,肌肉长度在有阻力情况下收缩时

^{*}国家自然科学基金资助项目(69789301);国家863高科技发展计划资助项目(863-306-ZD03-01-2);中国科学院知识创新工程课题。左力 博士生,主要研究领域为虚拟现实,计算机仿真。李锦涛 博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实,数字化技术,多媒体技术。王兆其 博士,研究员,博士生导师,主要研究领域为虚拟现实,人工智能。

保持不变,肌质变粗。表层的肌质和肌腱的形状及位置的变化对体表皮肤有较大影响。

2.2 人体肌肉建模的研究现状

三维人体建模的主要方法可以分为四类:杆状模型、表面模型、实体模型和多层次模型^[4]。其中,多层次模型是人体建模的研究热点,并取得了一些非常不错的结果。多层次的基本思想是人体模型越接近于真实的人体,产生的变形效果越接近于真实的人体变形。多层次模型通常使用骨架支撑中间层和皮肤层,有时也考虑衣物层,中间层(包含骨骼、肌肉、脂肪组织等)用来模拟人体体积。一个层次可以定义为概念上的模拟模型,它将较高层的输入参数映射为较低层的输出。动画制作人员指定层次之间的各种约束关系,并能够由高层控制人体的全局运动。

人体肌肉的形状和变形影响人体表面的外观和变形效果,另外,肌肉的构造和变形计算占了人体变形计算量的很大一部分,因此,肌肉模型是人体建模中的非常关键的部分。肌肉的建模方法可以分为三类:基于物理的模型、生物力学模型和几何模型。Holton 和 Alexander^[5]使用质点和连接器排列构造软分子结构来近似肌肉微观组织,Bro-Nielsen 和 Cotin^[6]对肌肉体采用有限元网格模拟线性弹性变形,都应用到外科手术模拟中。Luciana 等人^[7]使用质点弹簧模型构造肌肉模型。Chen 和 Zeltzer^[8]使用生物力学模型建模肌肉,在线性有限元网格上施加非线性作用力模拟肌肉的运动。此类方法的缺点是对交互应用计算复杂性较大,难以实现全身肌肉的实时变形。Wilhelms^[9]在动物模拟中使用几何方法建模,肌肉由三个椭球体组成(两个肌腱,一个肌肉体)。后来 Wilhelms 又将肌肉表示为可变形的离散化圆柱体^[10]。Turner 的 LEMAN 系统^[9]中使用隐表面(包括圆球和圆柱体),变形由全局变形参数的改变实现。Shen^[11]、Scheeper^[12]都使用了椭球体模型实现肌肉建模。椭球体肌肉模型可以模拟简单的纺锤状肌肉的形状及其收缩效果,但无法模拟类似羽肌、半羽肌、多羽肌等更为复杂的肌肉体形状。

3 基于轴变形技术的肌肉建模与变形

3.1 轴变形技术

Burtnyk N 和 Wein M 在文^[13]中提出了2D轴变形技术,将图像像素位置定义为相对于指定轴线的函数,轴线的变形可映射为像素位置的变化,从而改变图像的形状。Francis Lazarus^[1]和 K. C. Hui^[2]等人使用轴变形技术实现3D物体的变形,通过调整轴线的形状产生物体多边形网格的变形。本文采用轴变形技术构造逼真的肌肉体同时实现快速

的变形效果。

3D轴变形技术是利用3D轴曲线变形物体形状^[1]。设存在一物体G,变形G的过程是:首先在G的内部或外部定义3D轴曲线A,A的形状根据所期望的变形任意定义;其次,使用传统的交互曲线编辑技术改变轴线的形状,轴线的变形包括弯曲、拉伸、扭曲和环绕轴线的缩放,而这些变形自动传递到G上。为实现这一变形过程,需要两部操作:首先将物体表面的每一个顶点绑定到轴曲线的某个点 P_N 上,并计算出该顶点在轴空间的局部坐标 (u, v, w) ;然后得到轴曲线上 P_N 变形后对应的坐标位置 P'_N ,根据 P'_N 和局部坐标 (u, v, w) 的值计算顶点在世界坐标系下的新位置。这样,使用轴变形技术需要考虑三个问题:

- 绑定物体的每个顶点到轴曲线上;
- 定义轴曲线上的局部坐标系;
- 计算变形后顶点的坐标位置。

为了使肌肉实现实时的变形效果,我们对传统的轴变形技术进行了改进:减少绑定到轴曲线上的顶点个数,使模型在保持肌肉形状的基础上可以极大地减少算法在顶点映射中的计算量。在我们的轴变形与横截面结合的模型中,只需要将横截面的控制点绑定到轴曲线上,而不是所有的表面网格。

3.2 肌肉体的定义

3.2.1 模型参数定义 为了描述尽量多的肌肉信息,肌肉模型中定义两类参数:一类是关于肌肉物理特性的参数,包括肌肉强壮程度和肌肉紧张度,这两个参数都可以调整横截面的面积,其中肌肉强壮程度参数描述肌肉体的粗细程度(相对于肌肉长度),而肌肉紧张度用来定义肌肉的等长收缩效果,使肌肉在保持长度不变的情况下改变肌肉横截面积;另一类是肌肉的几何参数,包括轴曲线参数,横截面参数,轴曲线控制点在骨架局部坐标系中的位置等。本节下面的部分中详细介绍该模型的数学模型。

3.2.2 轴曲线和横截面定义 模型采用二次均匀B样条构造肌肉体轴线 $C(u)$,使用二次均匀B样条可以实现轴线的一阶光滑并便于交互编辑。控制点个数根据肌肉体形状复杂度决定,默认的轴线是5个共线的控制点确定的一条直线。 n 个控制点确定的二次均匀B样条曲线表示为 $C(t) = \sum_{i=0}^n p_i N_i^2(t)$,其中 p_i 为控制点, $N_i^2(t)$ 为二次基函数。构造的轴线如图2所示。

横截面采用闭合的二次B样条曲线,每个横截面由截面轴心和8个B样条控制点确定,默认横截面的8个控制点使用两个正交线段端点决定的4个控制点确定,如图1所示。控制点相对于截面轴心的位

置由肌肉物理参数和几何参数中的横截面参数共同决定。另外,根据肌肉体形状的复杂程度确定合适的控制截面个数,默认状态下,4个横截面均匀排列在轴线上。

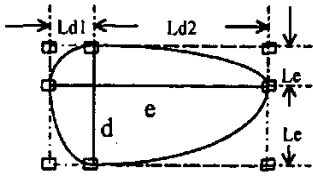


图1 横截面参数及控制点

这种定义方式为生成特定的肌肉模型提供了足够的参数。可以通过调整轴线控制点、截面控制点以及截面的个数和位置生成逼真的肌肉体模型。

3.2.3 截面控制点在轴空间中的绑定 设点 P 为横截面 S 边界上一点, $C(u)$, $u \in [0, T]$ 为一条穿过横截面的空间轴线, P_N 为 P 点在曲线 $C(u)$ 上的投影, 使得 $P_N = C(t)$, V 是 P_N 到 P 的方向向量, $V = P - P_N$, 显然 $V \cdot C'(t) = 0$, 则有 $P = C(t) + (V \cdot L_x(t))L_x(t) + (V \cdot L_y(t))L_y(t) + (V \cdot L_z(t))L_z(t)$,

其中 $(L_x(t), L_y(t), L_z(t))$ 是 $C(t)$ 处的轴局部坐标系, 轴局部坐标系的选定使用 Bishop^[3] 和 Klok^[4] 定义的旋转最小正交标架, 曲线 C 上局部坐标轴 $L_x(t), L_y(t), L_z(t)$ 定义为 $L_x(t) = C'(t) / \|C'(t)\|$, $L'_y(t) = -(C''(t) \cdot L_y(t))C'(t) / \|C'(t)\|$, $L'_z(t) = -(C''(t) \cdot L_z(t))C'(t) / \|C'(t)\|^2$

记 $u = V \cdot L_x(t)$, $v = V \cdot L_y(t)$, $w = V \cdot L_z(t)$, 则有

$$P = C(t) + uL_x(t) + vL_y(t) + wL_z(t) \quad (1)$$

因此,横截面边界上的点 P 在 $C(t)$ 和局部坐标轴 $(L_x(t), L_y(t), L_z(t))$ 定义的轴空间中可以使用四元组 (t, u, v, w) 唯一指定。

3.3 肌肉变形模拟

轴曲线控制点位置变化后,肌肉模型表面顶点 V 的新位置 V_{AxDf} 的计算方法如 3.1 节所述: 设 V 点的坐标值表示为 P_N 所在坐标系下的点 (u, v, w) , 设 P'_N 是变形后轴上点 P_N 的位置, P'_N 在变形后的轴上的参数值等于 P_N 在原轴上的值, V_{AxDf} 点定义为 P'_N 所在局部坐标系下的点 (u, v, w) 。

当把肌肉附着到骨骼模型上以后,肌肉体的轴曲线控制点定义为相对于骨骼的局部坐标位置,控制点的新位置根据骨骼关节的运动计算得出。这样肌肉可以根据人体的不同姿态产生自动的变形。

同时,肌肉伸缩时的体积保持通过调整截面面积实现。设肌肉初始长度为 l_0 , 截面面积分别为 $\{S_k | k=0, 1, \dots, n\}$, 伸缩后的长度为 l_1 , 截面面积与原截

面的比例可以近似为 $S'_k/S_k = l_0/l_1$ 。这样,截面控制点到截面轴心的距离变化 $r = d'_k/d_k = \sqrt{l_0/l_1}$, 其中 d_k 是控制点到轴心的距离。在 3.2.1 节得出的四元组 (t, u, v, w) 中加入距离变化参数 r , 截面控制点 P 在轴空间的新位置 P' 定义为

$$P' = C(t) + ruL_x(t) + rvL_y(t) + rwL_z(t) \quad (3)$$

肌肉体的等长收缩可以直接通过肌肉紧张度参数来改变 (3) 式中的 r 值实现。

3.4 肌肉体表面绘制

肌肉体采用 NURBS 曲面绘制, 双参数变量分段有理多项式定义的 NURBS 曲面的数学模型为:

$$Q(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} P P_{i,j} N_{i,p}(v) N_{j,q}(u)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n w_{i,j} N_{i,p}(v) N_{j,q}(u)} \quad (2)$$

式中 $PP_{i,j}$ 是曲面控制点网格的坐标, 由轴线 $C(u)$ 两端点和截面控制点共同组成, $w_{i,j}$ 是相应控制点权因子, $N_{i,p}(v)$ 和 $N_{j,q}(u)$ 分别是定义在结点矢量 U 和 V 上的 p 阶 ($p-1$ 次) 和 q 阶 ($q-1$ 次) 的 B 样条基函数。

4 实验结果

采用本文方法我们在 PC 机上使用 OpenGL 实现了人体肌肉建模系统, 系统提供肌肉的交互建模接口, 并提供了默认的肌肉模型, 用户可以根据具体的肌肉调整轴线和截面组合成新的肌肉模型。默认肌肉模型的轴线有 5 个控制点, 4 个横截面。实验表明, 轴变形技术与横截面定义相结合的方法可以定义逼真的模型并产生快速、丰富的变形效果, 非常适合于肌肉体的模拟, 纺锤肌、羽肌和多羽肌等肌肉都可以通过指定轴线和横截面的轮廓来确定形状。图 1 至图 5 是对小腿比木鱼肌的建模过程, 图 6 是指定肌肉起止点的位置变化后程序自动产生的肌肉变形效果, 图 7 是肩部三角肌的变形模拟序列。在普通的 PC 机上可以实现多个肌肉模型同时的实时变形。

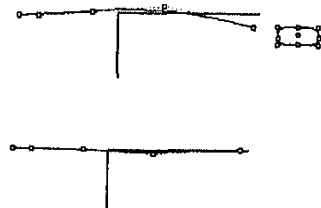


图2 轴线的正视及右视图



图3 肌肉体的4个横截面



图4 轴线上定位横截面

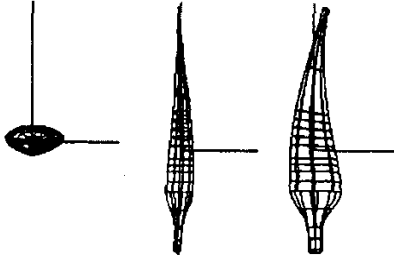


图5 肌肉模型线框图的俯视、右视及正视图

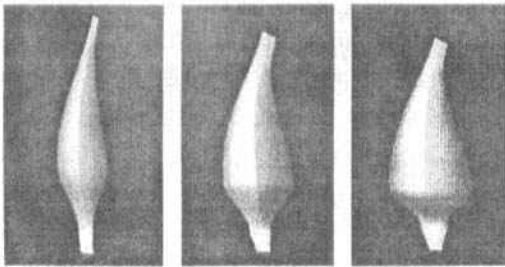


图6 肌肉变形序列

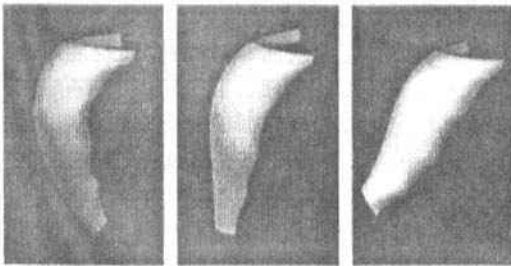


图7 三角肌变形序列

结论 计算机仿真领域中,软组织逼真建模与动画是一项具有挑战性且有意义的工作。本文提出了使用轴变形技术结合横截面实现肌肉建模的方

法,可以模拟非常丰富的肌肉形状和变形效果,模型算法在逼真性和速度上取得了很好的折中,这种肌肉建模方法也可以应用于其它的软组织建模中,如人体内脏器官建模与变形。设计出的肌肉模型保存为我们定义的各种肌肉参数,可以在不同的人体模型中重复使用。在今后的工作中,肌肉建模软件包将嵌入我们的人体建模系统中,用来构造多层次人体模型的肌肉层。

参考文献

- 1 Lazarus F, Coquillart S, Jancene P. Axial deformations: an intuitive deformation technique. *Computer-Aided Design*, 1994, 26 (8):607~613
- 2 Hui K C. Axial Representation for Modeling 3D Shapes. In: *IEEE Intl. Conf. on Information Visualization (IV'00)*, 401~406
- 3 Goldfinger E. *Human Anatomy for Artists: The Elements of Form*. Oxford University Press, New York, 1991
- 4 Wilhelms, Jane, Gelder A V. Anatomically Based Modeling. *Computer Graphics (ACM Siggraph Proceedings)*, Aug. 1997. 173~180
- 5 Holton M, Alexander S. Soft Cellular Modeling: A Technique for the Simulation of Non-rigid Materials. *Computer Graphics: Developments in Virtual Environments*, R. A. Earnshaw and J. A. Vince, England, Academic Press Ltd, 1995. 449~460
- 6 Nedel, Porcher L, Daniel T. Real Time Muscle Deformations using Mass-Spring Systems. In: *Proc. of Computer graphics International (CGI'98)*, June 1998. 156~165
- 7 Bro-Nielsen M, Cotin S. Real-time Volumetric Deformable Models for Surgery Simulation using Finite Elements and Condensation. *EUROGRAPHICS'96*, 1996, 15(3):C-57-C-66
- 8 Chen D T, Zeltzer D. Pump It Up; Computer Animation of a Biomechanically Based Model of Muscle Using the Finite Element Method. *Computer Graphics*, 1992, 26(2):89~98
- 9 Wilhelms J. Modeling Animals with Bones, Muscles, and Skin. *USCS-CRL-95-01*, Jan. 1994
- 10 Wilhelms J. *Animals with Anatomy*. IEEE Computer Graphics and Applications, May 1997
- 11 Shen J, Thalmann D. Interactive Shape Design using Metaballs and Splines. In: *Implicit Surfaces'95*, Grenoble, France, pril, 1995
- 12 Scheepers F, et al. Anatomy-based modeling of the human musculature. In: *SIGGRAPH 97 Conf. Proc. Annual Conference Series*. Aug. 1997
- 13 Burtnyk N, Wein M. Interactive skeleton techniques for enhancing motion dynamics in key frame animation. *CACM*, Oct. 1976. 546~569