

基于广义交叉截面的实时虚拟人皮肤变形方法^{*}

李 艳^{1,2} 王兆其¹ 毛天露¹

(中国科学院计算技术研究所数字化技术研究室 北京100080)¹ (中科院研究生院 北京100039)²

摘 要 皮肤变形是虚拟人合成研究领域的重要研究方向之一。交叉截面皮肤变形方法由于具有较好的实时性和逼真性在实时虚拟人应用环境中被广泛采用。但是这种方法要求虚拟人皮肤网格按照规则的交叉截面轮廓的方式组织,难以表达更丰富和精细的皮肤变形特征。基于此,本文提出了基于广义交叉截面的皮肤变形方法。该方法既具有速度快、操作简单、占用存储空间小的优点,同时又克服了交叉截面方法在皮肤网格组织方式方面的局限性,可以驱动任意皮肤网格组织方式的虚拟人表面模型,获得非常逼真的皮肤变形效果。

关键词 虚拟人,皮肤变形,交叉截面,广义交叉截面

A Method of Virtual Human Skin Deformation Based on Generalized Cross-Sectional Contour

LI Yan^{1,2} WANG Zhao-Qi¹ MAO Tiao-Lu¹

(Institute of Computing Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080)¹

(Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)²

Abstract Skin deformation is one of the most important problems in virtual human modeling. Firstly, a method based on cross-sectional contour is introduced in this paper, and then a new approach for skin deformation based on generalized cross-sectional contour is presented. This approach inherits the merits of cross-sectional contour deformation which is simple, fast and space compressed. Moreover, it can drive arbitrary skin griddings and flexibly adjust the level of detail. Consequently, it can achieve better deformation result.

Keywords Virtual human, Skin deformation, Cross-sectional contour, Generalized cross-sectional contour

1 引言

随着虚拟人在虚拟现实、娱乐、外科手术模拟等方面越来越广泛的应用^[1],实时逼真地显示虚拟人越来越重要。在虚拟人的所有特征中,皮肤位于整个人体的外表面,是最精细复杂的部分,皮肤的实时逼真变形对整个虚拟人的实时性和逼真性具有至关重要的影响。

皮肤变形依赖于三维人体几何表示方法,虚拟人几何模型结构决定了皮肤变形所能采用的方法以及可能获得的效果。在交互式三维人体动画等实时应用领域,为了保证实时性,通常采用表面模型几何表示方法来表示虚拟人。表面模型一般只包括骨架和皮肤两层(参见图1)。人体动画首先表现为底层骨架运动,然后骨架按特定的规律驱动皮肤的变形。这种方法计算和绘制的速度都相对较快。但是,由于表面模型不考虑肌肉、脂肪等人体解剖结构,因此很难取得非常逼真的模拟效果。

为了实现实时且逼真的表面模型皮肤变形, Kalra 等人^[2-4]提出了交叉截面皮肤变形方法。该方法按交叉截面轮廓而非针对单独的顶点执行变形计算,既保证了实时性,又克服了传统蒙皮法的变形失真问题,还可以模拟初步的肌肉变形效果。而且,与基于实例的插值方法^[5-7]相比较,该方法不需要扫描仪等特殊的数据采集设备,无需繁琐的数据获取和处理过程,不需要存储大量的实例数据,所以建模过程简单,占用存储空间小。

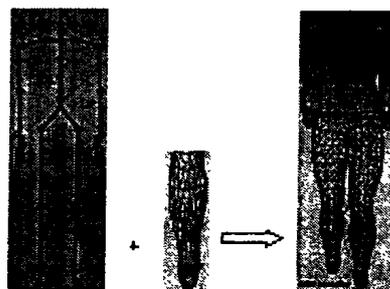


图1 表面模型分层结构

但是交叉截面方法需要虚拟人皮肤网格按照交叉截面轮廓的方式组织。为了构造人体的交叉截面,需要对原虚拟人皮肤顶点按交叉截面的方式重新采样,因此对于具有复杂表面的人体皮肤来说,人体模型的多边形网格表示效率势必受到影响,有时该方法甚至无法表示出皮肤的细节信息,更难以表达丰富和精细的皮肤变形特征。

基于此,本文提出了基于广义交叉截面的皮肤变形方法。该方法无须对原模型皮肤顶点重新采样,而是将原模型的皮肤顶点进行分组,把相对不变形且连续的皮肤顶点相互连接所组成的多边形网格定义为广义交叉截面,从而通过对广义交叉截面的处理实现皮肤的变形驱动。由于该方法不改变原模型的几何结构,可以很好地保持原模型的细节,而且广义交叉截面的划分是以皮肤变形特征为依据的,所以,该方法可以

^{*} 本课题得到国家自然科学基金项目(60103007),国家十五863计划(2001AA115131),国家973项目(2002CB312104)(2002CB312105),国家奥运科技专项(2001BA904B08),中科院知识创新项目(20036070)资助。李艳 硕士研究生,研究方向为虚拟现实,虚拟人建模和变形。王兆其 研究员,博士生导师,研究方向为虚拟现实与智能人机交互技术。毛天露 研究实习员,硕士,研究方向为虚拟现实。

获得非常逼真的变形效果。另外,该方法还具有速度快、操作简单、占用存储空间小、自动化程度高的优点。

本文第2节介绍交叉截面皮肤变形方法,第3节详细介绍基于广义交叉截面的皮肤变形方法,第4节是实验结果,最后总结本文的工作。

2 交叉截面皮肤变形方法

交叉截面皮肤变形方法中,人体仍然采用图1所示的分层表示方法,由骨架和皮肤两层组成。交叉截面建模和变形的基本思想是:人体躯干和四肢具有近似圆柱体的形状,因此可以将身体的不同部分表示为广义圆柱体。此时底层骨架的每一段可以看作每个广义圆柱体的轴线。皮肤顶点按照圆柱体截面轮廓线分组。通过修改每个轮廓线的方向、大小和位置,便可以实现人体四肢和躯干皮肤的平滑变形^[2~4]。

2.1 交叉截面模型生成

对于一般的虚拟人模型,按照交叉截面的方法进行变形驱动之前需要对原模型皮肤网格进行交叉截面重采样,生成交叉截面模型。具体的方法如下:首先设定虚拟人处于标准立正姿态下,然后进行两步操作。

1) 对于肢体的每一段,即每一个部位,沿着其轴线(骨架的对应关节连线),以一定间隔作垂直于该轴线的截面,如图2a所示;

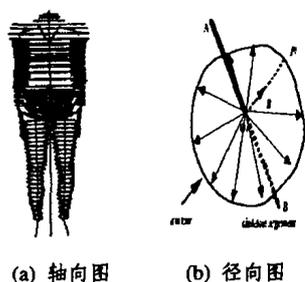


图2 交叉截面模型生成^[3]

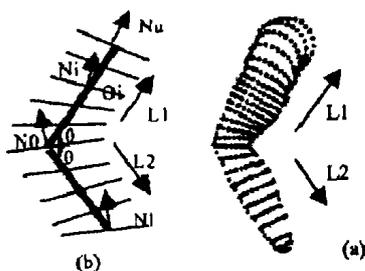


图3 交叉截面变形的手臂^[2]

2) 设1)中某部位的第*i*个截面与其轴线的交点为 O_i ,那么在该截面内,以 O_i 为原点,按照星形方式向外发射射线,求出每一条射线与原虚拟人皮肤网格的交点即为该截面上的所有皮肤采样点,如图2b所示。将不同截面上的采样点按一定规则连成三角网格面(或四边形网格面)即生成交叉截面模型。

2.2 交叉截面皮肤变形

交叉截面模型生成以后,就可以通过改变每个截面轮廓线的方向、大小和位置,得到人体四肢和躯干皮肤的平滑变形。以手臂为例,如图3b所示。有三个关节和两个肢体分段,其方向分别为 L_1 和 L_2 。设 N_u, N_o 和 N_l 分别是肢体分段端点处,即关节处的法向量。一般将端点处的法向量设为肢体分段的法向量,而关节处两部位公共截面的法向量设为两端法

向量的二等分向量,即 $N_o = (N_u + N_l) / 2$ 。在同一部位内部通过对其两端点法向量简单的线性插值,我们得到中间第*i*个截面的法向量 N_i 。求得了截面的法向量,这个截面上皮肤顶点的新坐标就可以求得,从而得到了每一时刻下皮肤的平滑变形。通过调整相关截面的半径可以近似模拟肌肉收缩的隆起效果,如图3a。

2.3 关于交叉截面方法的分析

交叉截面皮肤变形方法按交叉截面轮廓执行变形计算,因此获得了较快的计算速度和较好的效果。对于逼真性要求不高的实时应用场合来说,可以很好地满足系统的需要。

但是,因为采用交叉截面方法时需要将虚拟人皮肤网格按照交叉截面的方式重构,而且这种重构方式近似于一种规则的网格划分方法,因此势必影响网格的表示效率。有时该方法甚至无法表示出皮肤的细节信息,更难以表达丰富和精细的皮肤变形特征。

比如,对图4所示的模型来说,使用交叉截面方法就很难获得较好的效果。这类模型的特点是:细节程度刻画很高,皮肤网格顶点和面片分布不均匀。在变形显著的区域(如关节处)顶点数通常较多,而变形不明显的区域顶点和面片数相对较少,皮肤网格表示效率较高,一般具有较强的逼真性。使用交叉截面方法来驱动这类模型时,在重采样生成交叉截面模型的过程中将会使得原模型损失大量的皮肤细节信息,参见图5(以腰部的模型生成过程为例),从而运动时也无法精确模拟皮肤的真实变形。若在交叉截面模型生成过程中设置非常高的轴向和径向密度,虽然可以满足静态时的逼真性,但是将会使模型顶点数激增,增加计算和渲染的时间,同时变形控制变得复杂,甚至出现局部失真。

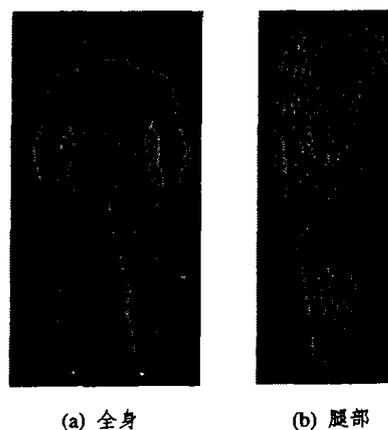
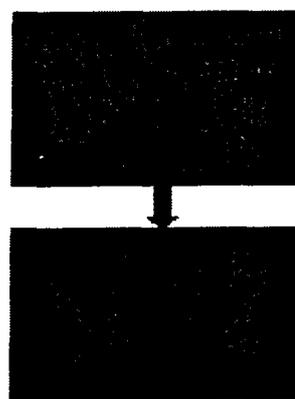


图4 不规则网络虚拟人皮肤模型



(上为原模型, 下为交叉截面模型)

图5 交叉截面采样的细节损失

3 基于广义交叉截面的皮肤变形方法

为了克服交叉截面方法在皮肤网格组织方式方面的局限性,获得更加逼真的皮肤变形效果,本文提出了基于广义交叉截面的皮肤变形方法。广义交叉截面是交叉截面的一个概念扩充,是指相对不变形且连续的皮肤顶点相互连接所组成的多边形网格。同一广义交叉截面的点并非真的在一个物理截面上。

广义交叉截面方法借鉴了交叉截面方法分组变形的原理,但是不需要对原虚拟人皮肤网格进行重构。该方法的基本思想是:由于人体皮肤变形呈现区域性,因此可以按照变形特性的差异将虚拟人皮肤顶点划分为多个广义交叉截面,然后按照不同的变形规则驱动不同的截面,从而得到皮肤的逼真变形。

广义交叉截面的划分准则灵活多样,但应遵循变形趋势一致且连续的点划分为一个广义交叉截面的原则。采用不同的划分准则,广义交叉截面方法可以有不同的实现方案,获得不同的变形效果。对于健美等复杂运动,皮肤变形较大,需要选用精细的划分方法。而对于虚拟人基本运动,如走、跑等,使用简化的“Y坐标”准则就可以达到满意的效果。

下面将以简化的“Y坐标”准则为例,来说明广义交叉截面皮肤变形方法的实现过程。“Y坐标”准则是指按照皮肤点的Y轴坐标来划分广义交叉截面的准则。该准则的合理性在于:关节旋转时,皮肤顶点的变形与其到关节的距离有关,而在人体模型中,皮肤点与关节的距离与其在Y轴的投影值相近,所以,可以用皮肤点的Y轴坐标作为划分广义交叉截面的准则。

3.1 “Y坐标”准则下广义交叉截面模型的生成

要实现基于广义交叉截面的皮肤变形,首先需要生成广义交叉截面模型,即按照广义交叉截面组织虚拟人模型。在“Y坐标”准则下,具体步骤介绍如下:首先设定虚拟人处于标准姿态下,然后每次任意选定相邻的两个部位,直到所有的部位都处理完毕为止,此处以大腿和小腿为例。

(1) 相邻部位公共广义交叉截面的确定

因为虚拟人模型各个部位皮肤网格独立存储,所以为了保证无缝连接,必须保证部位间的公共皮肤点始终保持一致的变形。由于公共点的这种特殊性,在广义交叉截面模型生成过程中,首先需要找到所有的公共点,然后将公共点集合作为相邻部位的公共广义交叉截面 SGS (Shared Generalized cross-Section),在两个部位重复存储,如图6所示。确定 SGS 的方法和步骤与具体的截面划分准则无关。

(2) 部位内部广义交叉截面划分

对于任意部位,找到其所有的 SGS 以后,就可以对剩余的皮肤点进行广义交叉截面分组。首先从该部位内部所有的皮肤点中去掉边界的 SGS 顶点,然后按照事先确定的划分准则和截面密度对未处理的皮肤顶点逐一处理。在“Y坐标”准则下,以大腿为例说明下。大腿的 SGS 数目为2,假设预设的广义交叉截面数目为 n 。那么按照 Y 轴坐标大小将剩下的顶点分为 $n-2$ 个不同的集合,如图6所示,任意皮肤点,若其 Y 轴坐标为 y ,满足 $Y_i < y \leq Y_{i+1}$,则划分入广义交叉截面 LC_i 内(如图6阴影所示)。按照这种方式,处理完所有的皮肤点,即可完成广义交叉截面的分组过程。

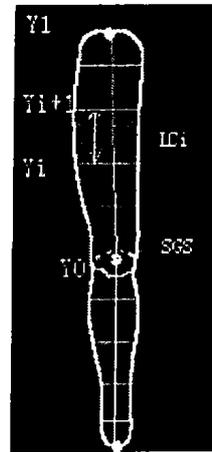


图6 广义交叉截面模型生成

根据不同的需要,上述划分的区间数目和每个区间的长度可以任意设定,从而控制运动时的变形精度和时间复杂性。广义交叉截面划分结束后,记录下该部位的广义交叉截面数以及每一截面包含的皮肤点数,即完成了该部位的处理。按照这样的规则依次处理所有的部位,并注意相邻部位 SGS 的存储一致性,就完成了广义交叉截面模型的生成过程。此时模型从数据存储结构和逻辑结构上与交叉截面模型一致,因此称作广义交叉截面模型。

3.2 “Y坐标”准则下广义交叉截面变形的实现

广义交叉截面模型的皮肤变形体现为对各个广义交叉截面的变形处理,其变形规则决定于其划分准则。对于按照“Y坐标”准则划分的广义交叉截面模型,我们设定如下的变形规则。假设部位 S_j 共有 n 个广义交叉截面,某个影响关节为 J_j ,那么可如下求解在 J_j 发生旋转时 S_j 的变形。对该部位所有的广义交叉截面 $LC_i (i=0, \dots, n-1)$,求出截面包含的顶点集合的 Y 轴坐标均值 $Y_i (i=0, \dots, n-1)$,并记录关节 J_j 的 Y 轴坐标 Y_{j_j} ,如图7所示。然后对于任意一个广义交叉截面 $LC_i (i=0, i < n)$,根据 $\|Y_i - Y_{j_j}\|$ 的值设定关节 J_j 对该截面的变形影响因子 $\omega_i (0 \leq \omega_i \leq 1)$ 。这样,在关节 J_j 发生旋转的时候,该广义交叉截面内部任意顶点 P_i 变形后的新坐标 P'_i 可如式(1)计算。

$$P'_i = \omega_i \cdot M_j \cdot P_i \tag{1}$$

其中 M_j 是关节 J_j 的变换矩阵。

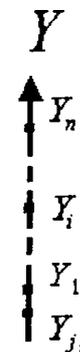


图7 Y轴投影

ω_i 的值在距离关节最近的 SGS 达到最大,在距离关节最远的 SGS 达到最小,中间广义交叉截面的 ω_i 值通过线性插值得到。

按照这种方法,依次设定每一个部位在其影响关节旋转时的变形规律,即可实现骨架运动时,皮肤相应地平滑变形。

以上以简化的“Y坐标”准则为例说明了广义交叉截面方

法的实现原理和过程。实际上,可以采用更为精细的广义交叉截面划分准则以及相应更准确的变形规则,以满足不同应用的逼真性需求。

4 实验结果

基于广义交叉截面变形的思想,本文开发了一个虚拟人皮肤变形系统作为实验平台。图8为系统图。图9给出了广义交叉截面方法在一个运动序列的变形效果图。图10以渲染和网格两种方式给出了广义交叉截面方法与交叉截面方法变形效果比较图。其中,广义交叉截面模型大腿和小腿皮肤点数分别为:504,407;三角面片数分别为:934,748;交叉截面模型中大腿和小腿点数分别为:500,400;三角面片数分别为:960,760。由实验结果可见,在皮肤顶点和面片数相当的情况下,广义交叉截面可以取得更逼真的变形效果。表1给出了广义交叉截面皮肤变形方法的时间性能分析。

表1 基于广义交叉截面的皮肤变形方法的时间性能(该模型三角面片数31,235,顶点数17,023)

	全身各部位调整的 逻辑截面数目 占总数比例	每帧变形计 算耗时(秒)	每秒计算 帧数(fps)
走路	40%	0.024817	40
跑步	80%	0.047953	21

说明:在“Y坐标”准则下,运动幅度较大的跑步运动中,为保证逼真性全身各部位调整的广义交叉截面数占总数的80%,此时计算速度可以达到21fps,可满足实时虚拟人应用环境的要求。

结束语 本文首先介绍了交叉截面皮肤变形方法,然后在此基础上提出了“广义交叉截面”的概念和通用的基于广义交叉截面的皮肤变形方法,并给出了实验结果。实验表明,该方法既保持了速度快,操作简单,占用存储空间小等优点,又不需要对原模型重新采样,可以保持原模型的细节,从而通过合理的广义交叉截面划分和变形规则的设定,获得更丰富和精细的皮肤变形效果。今后的研究重点将集中在如何更好地划分广义交叉截面以及如何获得更好的变形规则,包括对人体解剖特性及皮肤变形规律的深入了解,对现实世界真实获取的变形数据进行统计学习,从而建立更为真实准确的皮肤变形模型。

参考文献

- 1 王兆其,虚拟人合成研究综述.中国科学院研究生院学报,2000,17(2):89~98
- 2 Magnenat Thalmann K N, Moccozet L, Sannier G, Aubel A, Thalmann D. Real-Time Animation of Realistic Virtual Humans. Computer Graphics and Applications, 1988,18(5):42~56
- 3 Jianhua S, Magnenat-Thalmann N, Thalmann D. Human Skin Deformation from Cross Sections. In: Proc. of Computer Graphics Intl. CGI'94, 1994
- 4 Thalmann D, Shen J, Chauvineau E. Fast Realistic Human Body Deformations for Animation and VR Applications. Computer Graphics Intl. '96, Pohang, Korea, June 1996
- 5 Lewis J P, Corder M, Fong N. Pose Space Deformation: A Unified Approach to Shape Interpolation and Skeleton-Driven Deformation. Computer Graphics (SIGGRAPH '2000 Proceedings), Aug. 2000
- 6 Sloan P-P, Rose C, Cohen M. Shape by example. 2001 Symposium on Interactive 3D Graphics, March 2001
- 7 Allen B, Curless B, Popovic Z. Articulated body deformation from range scan data. In: Proc. SIGGRAPH 2002, Addison-Wesley, 2002. 612~619
- 8 Zuo Li, Li Jintao, Wang Zhaoqi. Anatomical Human Musculature Modeling for Real-time Deformation. Journal of WSCG, 2003,11(1)

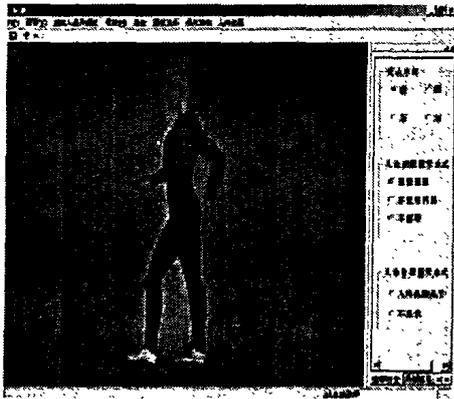


图8 皮肤变形系统效果图

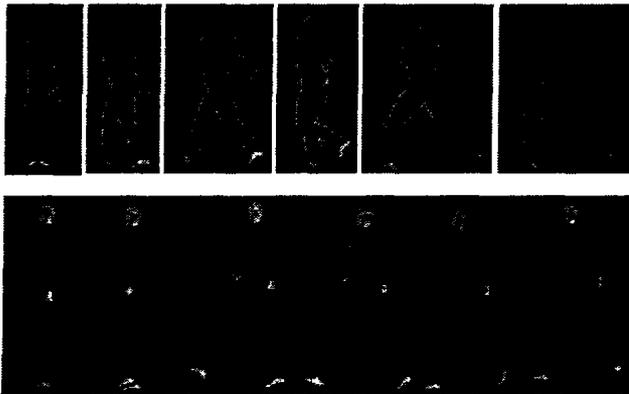


图9 广义交叉截面皮肤变形效果图(以跑步运动序列为例)



(上:广义交叉截面方法;下:交叉截面方法)

图10 广义交叉截面变形与交叉截面变形效果比较图(最左边一组为静态模型比较)