

基于改进的弹簧-质点模型的三维服装模拟*

刘卉¹⁺, 陈纯², 施伯乐¹

¹(复旦大学 计算机与信息技术系, 上海 200433)

²(浙江大学 计算机科学与工程系, 浙江 杭州 310027)

Simulation of 3D Garment Based on Improved Spring-Mass Model

LIU Hui¹⁺, CHEN Chun², SHI Bai-Le¹

¹(Department of Computing and Information Technology, Fudan University, Shanghai 200433, China)

²(Department of Computer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

+Corresponding author: Phn: 86-21-65642219, E-mail: huihui@fudan.edu.cn; realcomet_l@yahoo.com

<http://www.fudan.edu.cn>

Received 2001-11-28; Accepted 2002-04-10

Liu H, Chen C, Shi BL. Simulation of 3D garment based on improved spring-mass model. *Journal of Software*, 2003,14(3):619~627.

Abstract: Some problems still exist in 3D garment modeling and simulation, including that the model is complex, the efficiency is low, and the structural characteristics of garment are ignored. An improved spring-mass model is proposed, by which 2D→3D transformation and simulation of garment are formulated unifiedly. The dynamic system of modeling and simulation is derived and solved using time differentiate method, with given composition and expression of internal and external cloth forces in the formulation. And then the simulation algorithm is described. Overcoming the serious weakness representing cloth properties simply of previous model, the improved mass-spring model considers mechanical properties of cloth such as stretching, shearing and bending. Structural characteristics of garment such as dart and pleat are took into account too, thus complex garment pattern can be modeled and simulated. Compared the efficiency and the effect of simulation with other simulation systems, the resulting simulation system is faster and more realistic. The technique has been used in some garment enterprises and gets well responses.

Key words: cloth modeling; simulation; spring-mass model; computer-aided garment design

摘要: 针对三维服装造型与效果仿真中存在的模型复杂、模拟效率低、忽略服装的结构特征等问题,提出了改进的弹簧-质点模型.利用该模型统一建立了 2D→3D 映射和服装真实感模拟方程,给出方程中质点所受内力和外力的组成与表达式以及动态系统的推导和求解过程,并且描述了模拟的具体实现算法.改进的弹簧-质点模型克服了原有模型对服装织物的材料性能表达单一的缺点,考虑了拉伸、剪切、弯曲等力学性能以及省/褶等结构因素对服装外观的影响,实现了较复杂的服装外型.通过从效率与效果两个方面与其他模拟系统进行比较,发现该技术的模拟效率较高而且模拟结果较为真实.该模拟技术已经在服装企业推广应用,用户反映良好.

* Supported by the Grand Research Foundation of National Planning Commission of China (国家计委重大项目)

第一作者简介: 刘卉(1973—),女,湖北荆州人,博士,讲师,主要研究领域为计算机图形学,CAD/CAM,虚拟现实.

关键词: 织物造型;仿真;弹簧-质点模型;计算机辅助三维服装设计

中图法分类号: TP391 文献标识码: A

在国际图形学界,柔性纺织材料(织物)的造型与仿真课题一直倍受关注,SIGGRAPH 与 IEEE Computer Graphics and Applications 都曾数次召开专门的小组讨论会对该课题进行探讨.由于织物外形不像刚体那样固定不变,而是随着外界条件的不同发生改变,因此模拟难度很大.三维服装造型与效果仿真则是该课题的延伸,它不局限于单片织物在三维空间中的形态模拟,而是对由多片织物组成的服装进行三维造型与效果仿真.由于多片织物之间需要满足缝合约束,并且服装所特有的结构(如:省/褶)也需要加以表现,因此三维服装模拟的复杂度较之织物模拟有数量级的增加.同时,由于三维服装模拟可以对服装的合体程度以及款式等各个方面进行虚拟审视与检测,所以又有着广泛的应用前景,其具体应用包括:

- 大规模成衣设计、生产、管理——支持样衣制作、立体裁剪,
- 量身定做——针对个体的服装设计,
- 虚拟试衣镜——顾客无须亲自试衣,便可看见穿着效果,
- 虚拟购物——满足网上购买合体服装的要求,
- 人物动画和电子游戏——解决缺乏服装细节和真实感的问题.

3D 服装造型与效果仿真蕴含着两个阶段:(1) 根据 2D 衣片生成初始 3D 服装,即完成 2D→3D 的转换;(2) 在初始 3D 服装的基础上施加纹理映射,并产生褶皱、悬垂等细节,获得真实的穿着效果.整个过程的瓶颈在于造型与仿真模型的确定以及碰撞检测处理和响应机制方面.造型方法分为基于几何的方法和基于物理的方法,后者是目前织物模拟的主流,但是几乎所有的物理模型都具有模拟速度慢的问题.随着对服装真实性的要求的增加,计算规模更是呈指数级增长.因此,需要建立合理复杂度的造型与仿真模型,确定求解模型的快速方法,在真实感与模拟速度之间达到一种平衡.在 2D→3D 映射与仿真过程中,均会发生服装与人体之间的碰撞和服装自身的碰撞,有效的碰撞检测与响应是提高 3D 服装效果仿真速度的关键,由于该问题非常复杂,本文仅作一个简要介绍,详细内容将另文撰述.

B.K.Hinds 和 J.McCartney^[1,2]提出了一种在人体模型的基础上定义一系列位移曲面片(即服装曲面)的 3D 服装造型方法.这是一种典型的基于几何技术的造型方法,它没有考虑织物的物理性质,仅集中于外观的表现,不能准确表现局部结构.

Terzopoulos^[3]所提出的基于物理的弹性变形模型是织物模拟技术的里程碑.该模型从连续介质力学的角度考虑物体的变形,认为变形体的变化遵循 Newton 力学和经典弹性力学原理,将问题归结为一个微分方程,求解方程得到物体上各点的空间几何位置.其后的研究都秉承了这种动力学思想,提出了许多模拟技术,如:Thal-mann^[4-8]小组和 Okabe^[9]分别提出的粒子系统技术(particle systems);Celniker^[10],Eischen^[11]分别提出的有限元方法(finite elements methods)以及 Provot^[12],Howlett P^[13]利用弹簧-质点模型(mass-spring model)的模拟技术等等.这些模拟技术已经被广泛应用于织物模拟、虚拟演员着装和动画等,取得了良好的效果.国内在这方面的研究初露端倪,浙江大学计算机科学与工程系^[14]、华中科技大学 CAD 国家重点实验室^[15]、西北工业大学自动控制系^[16]做了一些初步的研究工作.对这些方法的详细介绍参见文献[17~19].在这些模拟方法中,都要求解复杂的微分方程,运算效率很低,在普通的 PC 机上几乎不可能做到实时.但是在实际应用中,如前面提到的虚拟试衣镜、人物动画等,都要求三维服装的造型与仿真达到实时或在用户的忍受范围内完成.其次,上述有些方法没有考虑碰撞问题,如文献[9,12].最后,上述的织物模拟技术大多只考虑了单片织物^[10-13,16]的形态模拟,即使应用到 3D 服装造型与仿真上^[4-9,15],也仅仅考虑了服装衣片之间的缝合约束,而没有考虑 3D 服装的结构特征,不能模拟复杂的服装造型.

综上所述,3D 服装造型与效果仿真中有两个问题亟待解决:一是改善仿真模型,提高模拟效率;二是将服装的结构特征结合到模型当中,以真实再现服装的外观形态.本文针对这两个问题提出了解决方案.第 1 节首先分析现有模型的不足之处,然后描述我们所建立的 2D 衣片到 3D 服装的映射模型,详细讨论模型中每个变量的组成以及模型的求解方法,并且介绍了具体的实现步骤.此时的 3D 服装还不具有足够的真实感,因此第 2 节论述了

在初始 3D 服装基础上所进行的 3D 服装效果仿真过程.首先通过纹理映射表现服装的色彩和图案特征;然后对 2D→3D 的映射模型加以修改,形成仿真模型,求解模型方程获得具有褶皱、悬垂效果的 3D 真实感服装.第 3 节从效率与效果两个方面比较了我们的模拟结果与其他方法模拟结果的不同.最后给出结论.

1 二维到三维的映射模型

1.1 模型分析及存在的问题

2D 衣片到 3D 服装的映射是一个复杂的弹性变形过程,必须满足以下 3 个条件^[15]:(1) 衣片面积在映射前后尽量保持不变;(2) 衣片之间符合正确的缝合关系;(3) 在映射过程中无碰撞发生.因为基于物理的造型方法适于对复杂的弹性变形过程进行仿真,能够较为真实地再现服装外观,所以我们选择基于物理的方法建立映射模型.

基于物理的造型方法有很多,比如前面提到的弹性变形模型、粒子系统模型、有限元方法、弹簧-质点模型等.经过详细分析我们发现,弹簧-质点模型较为简单,运算效率较高,而且 2D→3D 映射和服装真实感模拟均能在该模型中统一实现,缺点是对织物的材料性能表达比较单一^[12,13,15].

在弹簧-质点模型中,2D 衣片和 3D 服装均被离散表达为由规则三角形网格组成的弹簧-质点系统,网格的顶点是质点,边是弹簧,每一个质点与周围质点以弹簧相连.根据织物的力学性能,弹簧分为 3 类:结构弹簧、剪切弹簧和柔性弹簧,如图 1 所示.在以往基于弹簧-质点模型的织物模拟中,这 3 种弹簧被当作同一种弹簧对待,忽略了它们可以表现织物力学性能的特点,进而影响了模拟效果.为了同时满足 3D 服装造型与仿真对效率和效果的要求,我们采用弹簧-质点模型并对其加以改进,将服装织物的材料性能集成到模型方程当中.

另一方面,在以往的 3D 服装造型研究中,往往忽略了服装的省/褶信息对外观的影响.省/褶是服装中的常见元素(如图 2 所示),是为了使服装呈现立体形状以符合人体曲线的一种重要的设计手段,也是造成服装曲面不可展的原因.以往的 3D 服装造型偏向于服装动画,对服装的可实现性没有要求.即使在面向服装 CAD 的 3D 服装造型中,为了简化问题,省/褶信息也经常被忽略.我们在这一点上也作出了改进.

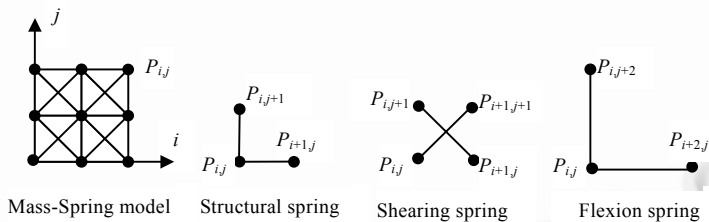


Fig.1 Mass-Spring model and 3 types of spring

图 1 弹簧-质点模型和 3 种弹簧类型

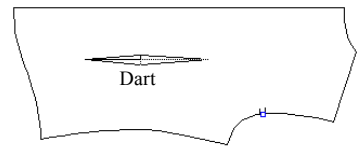


Fig.2 Dart in 2D pattern

图 2 2D 衣片上的省/褶

下面将详细地介绍改进的弹簧-质点模型、模型的求解方法以及具体的实现算法.

1.2 改进的弹簧-质点模型

2D 衣片在映射的初始时刻处于静止状态,2D→3D 映射过程可以看做是随时间变化的动态系统.质点的运动规律由 Newton 第二定律确定.

$$m \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = f_{\text{ext}}(X, t) + f_{\text{int}}(X, t). \quad (1)$$

式中 X 表示质点的位置矢量, $X \in R^3$, 是我们的求解目标; m 表示质点的质量; $f_{\text{ext}}(X, t)$ 表示质点所受外力, $f_{\text{int}}(X, t)$ 表示质点所受内力, 它们均随质点位置和时间而变化.

1.2.1 内力

在弹簧-质点模型中, 唯一被考虑的内力是弹簧的弹性变形力. 由于采用的是理想的弹簧-质点系统, 可以利用 Hooke 定律来计算弹簧的弹性变形力. 假设质点 p_0 , 其相邻质点的集合为 R , 则 p_0 所受的弹性变形力 f_{elast} 为

$$f_{\text{elast}} = \sum_{i \in R} c_e (\| \overline{p_0 p_i} \| - \| \overline{p_0 p_i} \|_0) \cdot N_{\frac{p_0 p_i}{p_0 p_i}} \quad (2)$$

弹性变形成能 E_{elast} 为

$$E_{\text{elast}} = \sum_{i \in R} \frac{1}{2} c_e (\| \overline{p_0 p_i} \| - \| \overline{p_0 p_i} \|_0)^2 \quad (3)$$

式中 c_e 表示弹簧的弹性变形系数,根据织物的材料性能参数曲线确定。 $\| \overline{p_0 p_i} \|$ 表示质点 p_0 与 p_i 之间 t 时刻的距离, $\| \overline{p_0 p_i} \|_0$ 表示质点 p_0 与 p_i 零时刻的初始距离, $N_{\frac{p_0 p_i}{p_0 p_i}}$ 表示 p_0 指向 p_i 的单位向量。

p_0 与 p_i 之间的弹簧属于结构弹簧、剪切弹簧、柔性弹簧中的一种,在以前的方法中对这 3 种弹簧都采用同一个弹性系数.显然,这种简化处理影响了最终的计算效果.我们在这一点上作出改进:将 3 种弹簧分别与织物的拉伸性能、剪切性能和弯曲性能对应起来,对待不同的弹簧采用不同的弹簧刚度.而且,即使对同一类型弹簧,根据其变形程度也采取不同的弹簧刚度.以结构弹簧为例:通常,织物的拉伸性能曲线是非线性曲线,如图 3 所示为常用天然纤维织物的弹性曲线^[20],曲线的斜率即为织物的弹性系数。

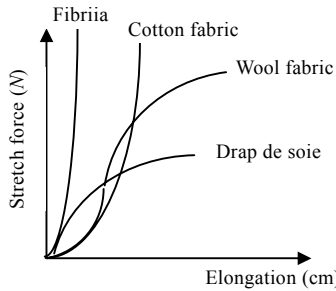


Fig.3 Stretching curves of the fabrics made of natural fiber

图 3 天然纤维织物的拉伸曲线

由于我们在弹簧-质点模型的内力中充分考虑了织物的材料性能,因而允许计算结果具有更强的真实感。

1.2.2 外力

在服装 2D→3D 的映射过程中,考虑了如下 4 种外力:

(1) 重力

不失一般性,假设织物是均质的,则每个质点所受重力 f_{grav} 为

$$f_{\text{grav}} = \frac{M}{n} g \quad (4)$$

式中 M 为衣片总质量, n 为衣片所包含的质点数。

(2) 缝合力

通过在各衣片的缝合边上施加缝合力,满足 2D→3D 映射中的缝合约束.缝合力定义为对应缝合点之间距离的线性函数.对两个缝合点 p_1 和 p_2 ,缝合力 f_{seam} 为

$$f_{\text{seam}} = c_s * \| \overline{p_1 p_2} \| \cdot N_{\frac{p_1 p_2}{p_1 p_2}} \quad (5)$$

式中 c_s 为缝合力系数,由织物的缝合性能决定.需要特别提出的是:除了在衣片缝合线上施加缝合力以外,还应在衣片上省和褶的对应位置施加缝合力.这是我们作出的另外一点改进。

3D 服装造型与仿真的应用领域要求 3D 服装能够准确地反映 2D 纸样的设计要点,例如:虚拟样衣制作的目的是取代实际样衣制作,通过在虚拟样衣上检测纸样设计是否有瑕疵,穿着是否合体,来决定是否需要修改服装结构.所以准确地表现省/褶等服装的结构特征非常关键.在省/褶上施加缝合力的前提是省/褶线在弹簧网格上,而不能处在网格之间,对 2D 衣片进行三角划分时必须考虑到这一点。

(3) 反碰撞力

在服装 2D→3D 的映射过程中,服装与人体碰撞是碰撞检测的主要因素.如果不对质点的运动加以约束,就会发生衣片与人体模型之间的相互穿透现象.我们采用惩罚力的方法处理它们:当检测到质点与人体三角形发生碰撞时,加入一个碰撞惩罚力 f_{penalty} ,将粒子拉回到正确的三角形一侧.对质点 p 和碰撞发生点 p_0 ,有

$$f_{\text{penalty}} = \begin{cases} c_p * \exp(\| \overline{p p_0} \|^{-1}) \cdot N_{p_0}, & \text{if collision happend} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (6)$$

式中 c_p 为反碰撞系数,系数越大惩罚得越重; N_{p_0} 表示 p_0 处的单位外法向量。

(4) 阻尼力

减少由于上述各力引起的质点过度振荡,是质点速度的函数:

$$f_{\text{damp}} = -C_d \frac{\partial X}{\partial t}. \quad (7)$$

c_d 是阻尼系数.显然,质点运动得越快,阻尼力越大,所以可以避免质点过度振荡所导致的服装不真实地拉长变形的现象.

1.2.3 求解运动方程

经过如上分析,方程(1)可展开为

$$m \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} + C_d \frac{\partial X}{\partial t} = f_{\text{elast}} + f_{\text{grav}} + f_{\text{seam}} + f_{\text{penalty}}. \quad (8)$$

整个变形模型系统形式化为一个非线性微分方程,方程右边除了重力 f_{grav} 与质点位置 X 无关以外, f_{elast} , f_{seam} 与 f_{penalty} 都是 X 的函数;且根据时间差分法^[21],方程左边两项可以简化为如下二式:

$$m \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} = m \frac{1}{\Delta t^2} (X_{t+\Delta t} - 2X_t + X_{t-\Delta t}), \quad c_d \frac{\partial X}{\partial t} = c_d \frac{1}{2\Delta t} (X_{t+\Delta t} - X_{t-\Delta t}). \quad (9)$$

将式(9)代入方程式(8),有

$$m \frac{1}{\Delta t^2} (X_{t+\Delta t} - 2X_t + X_{t-\Delta t}) + c_d \frac{1}{2\Delta t} (X_{t+\Delta t} - X_{t-\Delta t}) = f_{\text{grav}} + f_{\text{elast}}(X_{t+\Delta t}) + f_{\text{seam}}(X_{t+\Delta t}) + f_{\text{penalty}}(X_{t+\Delta t}). \quad (10)$$

这是一个非线性动态系统.为了简化求解过程,在时间步长足够小的情况下, $f_{\text{elast}}(X_{t+\Delta t})$, $f_{\text{seam}}(X_{t+\Delta t})$, $f_{\text{penalty}}(X_{t+\Delta t})$ 可以用 $f_{\text{elast}}(X_t)$, $f_{\text{seam}}(X_t)$, $f_{\text{penalty}}(X_t)$ 代替.这样,整个系统简化成一个动态的线形系统:

$$(m \frac{1}{\Delta t^2} + c_d \frac{1}{2\Delta t}) X_{t+\Delta t} = f_{\text{grav}} + f_{\text{elast}}(X_t) + f_{\text{seam}}(X_t) + f_{\text{penalty}}(X_t) + m \frac{2}{\Delta t^2} X_t - (m \frac{1}{\Delta t^2} - c_d \frac{1}{2\Delta t}) X_{t-\Delta t}. \quad (11)$$

令 $A = m \frac{1}{\Delta t^2}$, $B = c_d \frac{1}{2\Delta t}$, $g_t = f_{\text{grav}} + f_{\text{elast}}(X_t) + f_{\text{seam}}(X_t) + f_{\text{penalty}}(X_t)$, 则方程(11)简化为如下常系数方程:

$$(A + B) X_{t+\Delta t} = 2A X_t - (A - B) X_{t-\Delta t} + g_t. \quad (12)$$

衣片在映射的初始时刻处于静止状态,因此,系统的初始条件为

$$X_{t=0} = X_0, \quad X_{- \Delta t} = X_{t=0} = X_0, \quad \left. \frac{\partial X}{\partial t} \right|_{t=0} = 0, \quad \left. \frac{\partial^2 X}{\partial t^2} \right|_{t=0} = 0, \quad (13)$$

其中 X_0 为质点的初始位置.根据方程(12)以及系统初始条件式(13),便可求得 $t + \Delta t$ 时刻质点的位置矢量 $X_{t+\Delta t}$. 因为一件服装由多个衣片组成,每个衣片又包含多个质点,在每个时间步长对每个质点都需要求解方程(12),所以最终形成一个巨型线性系统:

$$(A + B) \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{t+\Delta t} = 2A \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_t - (A - B) \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{bmatrix} g_1 \\ g_2 \\ \vdots \\ g_n \end{bmatrix}. \quad (14)$$

该算法的核心是一个动态迭代过程.算法的效率由两个要素决定:(1) 动态系统中质点的个数.过少的质点个数会降低衣片的逼近程度从而影响 2D→3D 的映射效果,但过多的质点个数又会导致系统迭代时间剧烈增加,所以需要通过实验选择合适的质点数量;(2) 时间步长.由于采用时间差分法求解系统,因此时间步长应该取得足够小以保证整个系统的求解稳定性,但过小的时间步长将导致系统求解效率下降.为此,我们采用自适应时间步长优化方法^[22],以提高系统求解效率.

1.3 2D→3D映射的算法实现

1.3.1 服装的数据结构

我们采用层次结构统一定义服装的数据结构.服装由衣片链表、缝合信息链表以及层次包围盒的二叉树组成,如图4所示.其中需要特别指出的是:(1) 缝合信息由缝合边对定义,目的是方便动态系统求解,只需在缝合边上施加缝合力 f_{seam} ,排除其他质点.(2) 省/褶链表由两部分组成:省/褶的起始点——边界点指针;省/褶的形状——有序内点集合.定义省/褶链表的目的在于:一方面使得在求解动态系统时,便于在省/褶上施加缝合力;另

一方面,该链表有效地保存了衣片的结构信息,即使在转化到3D曲面以后,结构信息仍然不会丢失.在后续的3D→2D展开中还要利用这些结构信息.(3) 层次包围盒是为了便于碰撞检测.

这种层次结构有效地组织了服装信息,并便于动态系统求解时的参数读写.

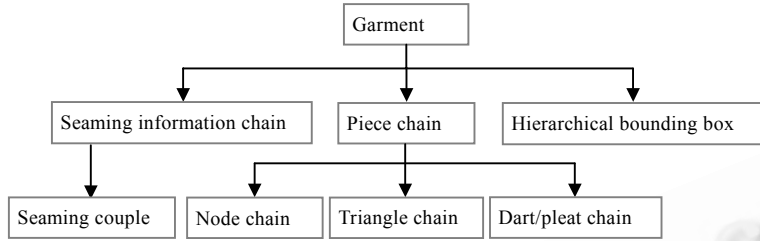


Fig.4 Data structure of the garment

图4 服装的数据结构

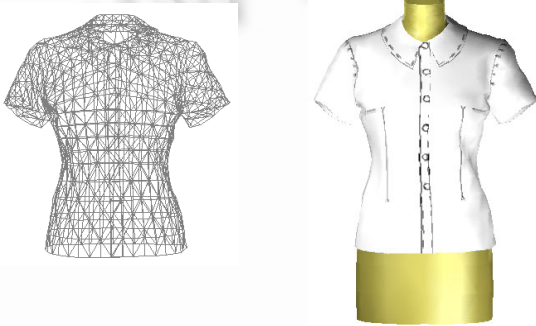
1.3.2 服装2D→3D的映射过程

在确定服装数据结构的基础上,采取如下步骤实现服装2D→3D的映射:

(1) 指定缝合边和关键点

缝合方式随着服装款式不同而发生变化,因此,需要交互指定对应衣片中的缝合边对.指定结果储存在服装缝合信息链表中.此外,指定关键点是为了将服装与人体模型在3D空间中匹配起来.

(2) 将2D衣片离散为初始的弹簧-质点系统



(a) Triangle mesh model
(a) 三角形网格模型

(b) Realistic model
(b) 真实感模型

Fig.5 Initial 3D garment after 2D→3D transformation

图5 2D→3D转换后的初始三维服装

在这一步中,2D衣片被离散化并形成规则三角形网格的弹簧-质点系统.首先将2D衣片转化为一组相连的四边域参数曲面,然后采用曲面均匀离散方法^[23]形成规则的三角形网格.

(3) 求解动态变形模型

2D→3D映射是一个动态迭代过程,在满足如下两个条件时,迭代终止:(a) 所有缝合点之间的距离小于给定的缝合距离;(b) 在相邻的两次迭代过程中,系统弹性变形能的变化值小于给定误差.条件(a)保证所有衣片均处于缝合状态,条件(b)则保证衣片处于平衡状态.

缝合过程结束后,获得3D服装的初始形状(如图5所示),需进一步对其进行效果仿真,产生纹

理、褶皱、悬垂等真实感效果.

2 三维服装效果仿真

2.1 纹理映射

可以将各种纺织材料通过扫描仪转换成位图形式并进行归一化处理,通过建立三维服装的空间坐标 (x,y,z) 与纹理空间坐标 $(u,v),u,v \in [0,1]$ 之间的映射关系,将位图像素点的颜色值映射到3D服装上,达到纹理映射的目的.由于材料的图案、组织等外观特征通过扫描反映在位图上,因此纹理映射使三维服装具有了初步的真实感.

2.2 服装褶皱与悬垂效果模拟

缝合结束时的3D服装呈现刚体的效果.为了模拟服装穿着时的真实效果,必须继续进行如方程(15)所示的动态系统演变过程.但是,这时缝合力消失了,即式(12)中的 g_r 变为

$$g_r = f_{\text{grav}} + f_{\text{elast}}(X_r) + f_{\text{penalty}}(X_r), \quad (15)$$

方程其他部分不变.在褶皱与悬垂模拟过程的每一个时间步长中,皆需进行碰撞检测与响应,此时,自碰撞

(self-collision)成为碰撞的主要因素.

由于质点之间以弹簧相连,弹簧被过度拉伸的现象不可避免,使得服装呈现不真实的类似橡胶的效果.通过约束弹簧变形率可以解决这个问题^[24].如图 6 所示,如果被过度拉伸的弹簧与服装上的约束点相连,则调整弹簧另一端自由点的位置,使得弹簧的长度恢复到静止状态时的长度;如果弹簧两端的质点均不受约束,则两点的位置都被调整,弹簧恢复到静止长度.

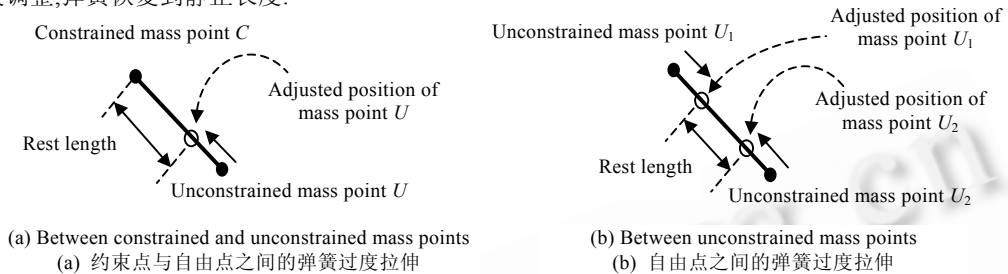


Fig.6 Solution of the problem about super-elongated spring

图 6 解决弹簧过度拉伸问题

在相邻的两次迭代过程中,如果系统弹性变形能的变化值小于给定误差,说明系统达到平衡状态,迭代结束.模拟效果如图 7 所示.

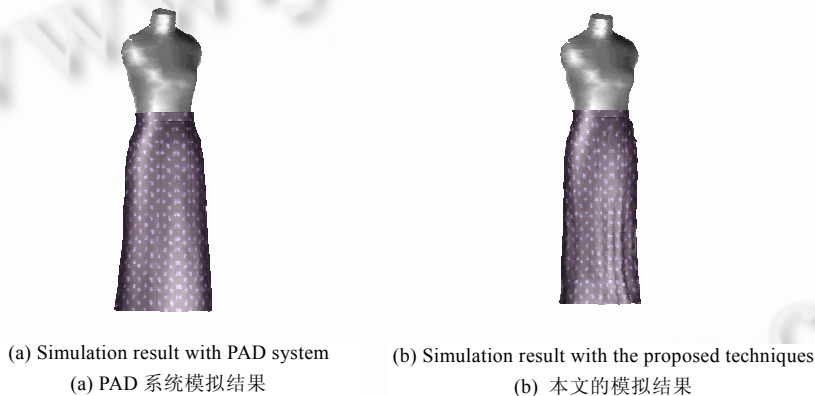


Fig.7 Comparison of simulation results

图 7 模拟结果比较

2.3 碰撞检测与响应

在 2D 衣片转换到 3D 服装、3D 服装效果仿真、服装动画 3 个阶段的进程中,碰撞检测与响应的重要性依次增加,成为系统效率的瓶颈问题.服装模拟涉及的碰撞类型有两种:一是服装与人体之间的碰撞(虚拟现实中还包服装与周围环境的碰撞);二是服装衣片之间或衣片的不同部分之间的碰撞,统称为自碰撞.对于前者,我们采取基于区域划分的方法;对于后者,采取基于层次包围盒的技术.通过分别考虑两种碰撞及采用有效的检测与响应技术,可以满足对服装模拟实时性与稳定性的要求.关于这部分的详细内容将另文撰述.

3 实验结果比较

一般地,增加 3D 服装的真实感是以降低模拟效率为代价的.在文献[15]中提到,Breen 等人提出的基于粒子的织物模拟算法需要在 IBM RS6000 工作站上运行 3 天~7 天不等.Thalmann 小组给出的几个模拟范例大约需要在 SGI 工作站上运行几个小时.这样的硬件要求和模拟速度均不符合实际应用环境.实际应用要求 3D 服装模拟能在普通 PC 机上以接近实时的速度完成.

采用本文给出的各项技术进行 3D 服装造型与效果仿真基本可以达到上述要求.我们以 PAD 商用系统^[25]

作为比较对象:在 CPU 为 PentiumIII933,内存为 256M 的 PC 机上采用本文的技术模拟一条长裙(由 2 200 个左右三角形面片组成),约需 1min 左右时间;而 PAD 系统仅实现 2D→3D 映射就需要 5min 左右时间.从模拟结果上看,由于 PAD 系统仅实现了 2D→3D 映射,没有进一步的效果仿真过程,因此 3D 服装的显示呈现刚体效果,不具有本文模拟结果的褶皱和悬垂效果.模拟结果比较如图 7 所示,更多模拟结果如图 8 所示.



Fig.8 3D garment modeling and simulation

图 8 3D 服装造型与效果仿真

4 小 结

三维服装造型与效果仿真的目的是把 2D 衣片的平面结构转化为 3D 服装的立体结构,并且根据服装织物的材料性能模拟服装穿着时的真实效果.由于研究是面向实际应用而不仅仅是服装动画,所以在 3D 服装模拟中,需要将服装的结构特征和面料特征对服装外观的影响体现出来,而不仅仅是集中于服装效果的展示.本文详细讨论了 3D 服装造型与效果仿真过程中涉及的关键技术,包括 2D→3D 映射模型和实现技术、纹理映射、褶皱与悬垂效果模拟,碰撞检测和响应等.主要结论为:(1) 改进了弹簧-质点模型,利用该模型统一地建立了 2D→3D 映射方程和服装真实感模拟方程;(2) 模型中考虑了拉伸、剪切、弯曲等服装织物的材料性能,因而允许计算结果具有更强的真实感;(3) 考虑了省/褶等结构因素对服装外观的影响;(4) 实现了较复杂的服装外型,不局限于简单的无领无袖裙;(5) 对服装/人体碰撞和自碰撞采用了不同的检测和响应技术.通过这些工作,基本上克服了以往 3D 服装模拟研究结果中存在的效率低下和缺乏真实感的问题.本文的研究成果已经陆续在浙江省内的服装企业推广使用,力求增强企业新产品的设计开发能力,用户反映良好.

致谢 浙江大学计算机科学与工程系许端清副教授对本文的工作给予了支持和帮助,马凌洲博士、莫震尧硕士对本文的完成提出了很多有益的建议,在此一并表示感谢.

References:

- [1] Hinds BK, McCartney J. Interactive garment design. *Visual Computer*, 1990,6(6):53~61.
- [2] McCartney J, Hinds BK, Seow BL, Gong D. Dedicated 3D CAD for garment modeling. *Journal of Materials Processing Technology*, 2000,107(11):31~36.
- [3] Terzopoulos D, Platt J, Barr A, Fleischer K. Elastically deformable models. *Computer Graphics (SIGGRAPH'87)*, 1987,21(4): 205~214.
- [4] Carignan M, Yang Y, Thalmann NM, Thalmann D. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. *Computer Graphics*, 1992,26(2):99~104.
- [5] Yang Ying, Thalmann NM, Thalmann D. Three-Dimensional garment design and animation, a new design tool for the garment industry. *Computers in Industry*, 1992,19(3):185~191.
- [6] Volino P, Thalmann NM, Shen Jian-Hua, Thalmann D. An evolving system for simulating clothes on virtual actors. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 1996,16(5):42~51.
- [7] Hadap S, Bangerter E, Volino P, Thalmann NM. Animating wrinkles on clothes. In: Ebert DS, Gross M, Hamann B, eds. *Proceedings of the IEEE Visualization'99*. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 1999. 175~182.

- [8] Volino P, Thalmann NM. Implementing fast cloth simulation with collision response. In: Thalmann NM, ed. Proceedings of the Computer Graphics International. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000. 257~266.
- [9] Okabe H, Imaoka H, Tomiha T, Niwaya H. Three dimensional apparel CAD system. Computer Graphics, 1992,26(2):105~110.
- [10] Celniker G, Gossard D. Deformable curve and surface finite-elements for free-form shape design. Computer Graphics (SIGGRAPH'91), 1991,25(4):257~266.
- [11] Eischen JW, Deng S, Clapp TG. Finite-Element modeling and control of flexible fabric parts. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996,16(5):71~80.
- [12] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior. In: Wayne A, ed. Proceedings of the Graphics Interface Conference'95. Vancouver: Canadian Human-Computer Communications Society, 1995. 147~154.
- [13] Howlett P, Hewitt WT. Mass-Spring simulation using adaptive non-active points. Computer Graphics Forum, 1998,17(3):345~354.
- [14] Liu H. Research on virtual fashion design and its color element [Ph.D. Thesis]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001 (in Chinese with English Abstract).
- [15] Fan J, Zhou J, Wang QF, Yuan MH. 2D/3D isometric transformation using spring-mass system. Journal of Software, 1999, 10(2):140~148 (in Chinese with English Abstract).
- [16] Chen W, Xu NP. Realistic cloth simulation using energy method. Journal of Software, 2001,12(2):303~308 (in Chinese with English Abstract).
- [17] Breen DE. Computer graphics in textiles and apparel modeling. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996,16(5):26~27.
- [18] Ng HN, Grimsdale RL. Computer graphics techniques for modeling cloth. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5):28~41.
- [19] Liu H, Xu DQ, Chen C. A survey of computer aided design. Journal of Computer Aided Design and Computer Graphics, 2000,12(6):473~480 (in Chinese with English Abstract).
- [20] Yao M, Zhou JF, Huang SZ, Shao LH, An RF, Fan DX. Textile Materials Science. 2nd ed., Beijing: Textile Industry Press, 1993. 518~532 (in Chinese).
- [21] Jin YQ. Numerical Techniques. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1997. 198~222 (in Chinese).
- [22] Baraff D, Witkin A. Large steps in cloth simulation. In: Cohen M, ed. Proceedings of the SIGGRAPH'98 Conference. Orlando: ACM SIGGRAPH, Addison Wesley, 1998. 43~54.
- [23] Zhu XX. Modeling Techniques of Free Curve and Surface. Beijing: Science Press, 2000 (in Chinese).
- [24] Kang YM, Choi JH, Cho HG. Fast and stable animation of cloth with an approximated implicit method. In: Thalmann NM, ed. Proceedings of the Computer Graphics International 2000. Los Alamitos: IEEE Computer Society Press, 2000. 247~255.
- [25] PAD Corp. Introduction. 2001. <http://www.padsystem.com>.

附中文参考文献:

- [14] 刘卉.虚拟服装设计及其色彩要素的研究[博士学位论文].杭州:浙江大学,2001.
- [15] 樊劲,周济,王启付,袁铭辉.基于弹簧质点模型的二维/三维映射算法.软件学报,1999,10(2):140~148.
- [16] 陈晔,徐乃平.采用能量法进行真实感布仿真.软件学报,2001,12(2):303~308.
- [19] 刘卉,许端清,陈纯.服装 CAD 综述.计算机辅助设计与图形学学报,2000,12(6):473~480.
- [20] 姚穆,周锦芳,黄淑珍,邵礼宏,安瑞凤,范德圻.纺织材料学.第2版,北京:中国纺织出版社,1990.518~532.
- [21] 金一庆.数值方法.杭州:浙江大学出版社,1997.198~222.
- [23] 朱心雄.自由曲线曲面造型技术.北京:科学出版社,2000.