

## 分类应变限制下的服装仿真

向宇, 侯进\*, 徐芳, 吴铃

(西南交通大学 信息科学与技术学院, 成都 610031)

(\*通信作者电子邮箱 jhou@swjtu.edu.cn)

**摘要:**针对服装仿真中基于物理的质点弹簧模型会产生不真实拉伸形变这一问题,提出了一种分类应变限制方法。该方法主要分为两大处理模块。第一个模块是分类:它使用积分系统计算的速度作为输入参数;然后通过能量法判断某个点是否进行应变限制;最后根据判断结果将点集分为需要应变限制和不需要应变限制两类。第二个模块是应变限制:首先,它设定了弹簧形变限制值和主应变方向上三个未知的限制比;然后根据线应变理论计算出与点相连的弹簧应变张量;最后,通过弹簧方向向量的不变性计算出限制比并更新点的空间位置。该方法在保证仿真结果自然的情况下避免了不真实拉伸形变,并且不需要对所有的图元进行应变限制的处理,减少了计算开销保证了实时性。实验结果表明该方法有不错的仿真效果和仿真效率。

**关键词:**服装仿真;分类应变限制;动力学;质点—弹簧;碰撞检测

**中图分类号:**TP391.99 **文献标志码:**A

## Clothing simulation with classified strain limiting

XIANG Yu, HOU Jin\*, XU Fang, WU Ling

(School of Information Science and Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

**Abstract:** This paper proposed a classified strain limiting method which dealt with unreal stretch deformation in clothing simulation with physical-based mass-spring model. The method primarily included two processing modules. The first module was classification. It used velocity computed by integrating system as input parameters first, and then judged whether some point needs strain limiting by the energy method, finally through the judged result divided point set into two types: needing strain limiting or not. The second module was strain limiting. It defined the threshold value of spring deformation and three variables for representing the restrictive proportions in principal strain direction, and then by the line strain theory computed the strain tensor of spring, finally obtained specific restrictive proportions and updated the position of corresponding point. The method could guarantee natural simulation results and eliminate unreal stretch deformation, and did not require all elements of the strain limiting for processing, reducing the computational cost to ensure real-time. Results indicate that the method has good performance and efficiency.

**Key words:** clothing simulation; classified strain limiting; dynamics; mass-spring; collision detection

## 0 引言

动态服装仿真是目前虚拟现实领域的一个热门方向和重要问题,其中真实感和实时性是决定仿真效果的两个关键因素。在实时性方面,传统的质点—弹簧模型的服装仿真方法存在计算开销大的问题,对这一问题 Elbadrawy 等<sup>[1]</sup>提出了一个改进方法,通过对质点—弹簧模型中的弯曲方程线性化来降低计算开销。不过线性化的缺点也很明显,弹簧大刚性系数和仿真的大时间步不能同时满足。而 Zhuang 等<sup>[2]</sup>则是将传统的质点弹簧模型和一种高级的数值积分方法结合提出了一种新颖的预测—更正质点弹簧模型。模型在计算质点的相关物理量,如位置、速度,之后再计算误差,该模型使得服装仿真的计算开销小,并且能应用在大时间步的服装仿真中。另外,毛天露等<sup>[3]</sup>通过结合物理仿真和几何仿真提出了一种混合服装仿真方法,该方法也提升了服装仿真的实时性。在真实感方面,对服装仿真影响最大的是服装褶皱处理和过度形变处理。高分辨率的褶皱仿真能带来较好的服装真实感,

但是这种褶皱计算开销过大,实时性稍差。目前解决该问题的主流方法是将高分辨率的褶皱与低分辨率的运动服装模型相结合,产生近似高分辨率下的服装仿真。基于该理论 Feng 等<sup>[4]</sup>、Rohmer 等<sup>[5]</sup>、Chentanez 等<sup>[6]</sup>以及 Wang 等<sup>[7]</sup>都提出过他们的方法,这类方法使得高效的近似高分辨率服装仿真得以实现。而对于过度形变的处理,传统的方法是基于额外阻尼力方法,前面提到的研究几乎都是采用的这种方法。然而,阻尼力的方法会产生明显的人工痕迹。目前也有一些对该问题的研究,像 Zhou 等<sup>[8]</sup>提出的一种新的大角度旋转下的服装仿真,他们的方法能够一定程度上减少额外阻尼力造成的影响,不过还是有较明显的人工痕迹。另外,阻尼力的方法也不能很好地表现织物大刚性的特征,这就使得它不适用于不可拉伸织物的仿真。对于不可拉伸织物目前较新的研究有 Ye 等<sup>[9]</sup>和 Chen 团队<sup>[10]</sup>的研究。Ye 等提出了弹簧的过度拉伸问题,他们使用一个非线性系统来控制弹簧的长度,然后提出了一种新的非线性系统线性化的方法来重新得到线性系统,他们的方法对于平面上的过度拉伸起到了一定的作用,不过

收稿日期:2011-11-24;修回日期:2012-01-26。

**作者简介:**向宇(1984-),男,湖北枝江人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实、动力学形变;侯进(1969-),女,重庆人,副教授,博士,主要研究方向:多媒体、人机交互、虚拟现实、人工智能、自然语言处理;徐芳(1986-),女,山东烟台人,硕士研究生,主要研究方向:自然语言处理;吴铃(1986-),女,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向:虚拟现实。

没有处理空间中二面角之间的过度形变问题;另外,由于多了非线性系统的构建和非线性系统到线性系统的线性化,所以仿真效率上有一些降低。而Chen团队的研究提出传统方法中将织物视为弹性材料不能适用于非伸展性织物,并且给出了他们对于非伸展性织物的仿真方法,虽然在非伸展性织物上有很好的效果,但是却不能适用于整个织物领域上。除了阻尼力预防失真的方法外,基于应变限制的保真理论则是目前服装仿真领域的热门理论。Delingette<sup>[11]</sup>在他的研究中详细地用数学语言阐述了布料仿真中应变理论的实质。而Thomaszewski等<sup>[12]</sup>对传统的应变方法提出了改进,但是他们注重的是静态效果下的各种褶皱扭曲等效果,直接在各主应变方向人为地定义应变限制比,所以直接将他们的应变方法应用到动态服装仿真中效果并不好。目前,最新的应变限制理论是由加利福尼亚大学的Wang等<sup>[13]</sup>提出的。他们采用应变张量,并且对于每一个元素计算变形梯度的矩阵奇异值分解,最后将限制过程在不同的分辨率层级上进行,提升了应变处理的效率。但是,他们的方法没有解决应变角的限制问题,所以无法很好地处理双环这种特殊形状的变形。应变限制是几何层面的处理方法,而几何的处理方法本身存在一定复杂性,如果还对所有点进行处理,那么在高分辨率的动态服装仿真中很难满足实时性的需求,这也是大多数研究者在有实时性需求的服装仿真中选择用阻尼力处理振荡和形变过度的原因。

针对上面提到的应变限制理论方面的问题本文提出了一种分类应变限制的方法。该方法抛弃了传统应变限制理论人为定义主应变方向应变限制比的做法,而是实时地计算主应变方向的应变限制比,满足了动态服装仿真中不同方向微线元在同一线元长度拉伸比限制下的应变限制。另外为了降低系统进行应变限制处理的总开销,在对点集进行应变限制处理前对点集进行了分类,减少了需要进行应变限制处理的点的数量。最后,也提出了一种将空间中两三角图元间二面角形变过度的限制问题转化成线应变的限制问题的方法。

## 1 服装仿真相关内容

### 1.1 前期工作和服装仿真模型

在前期工作中,我们进行了个性化虚拟人自动着装部分<sup>[14]</sup>和虚拟服装的自定义设计及动画合成的开发<sup>[15]</sup>。现在,为了提升仿真的效率和真实感我们更加深入地研究了服装的内部构造模型和动态仿真的流程,以获得对更细化内容的把握和改进,并最终提出了分类应变限制的方法。

本文采用改进的质点-弹簧模型<sup>[16]</sup>,该模型如图1(a)所示。点线代表弯曲弹簧,弯曲实线代表拉伸弹簧,弯曲虚线代表剪切弹簧。但是我们的人物和服装模型的组成图元是无规则的三角形,所以我们的质点-弹簧模型和网格模型有一些区别。在无规则三角网格中,相邻点之间的连线既表示剪切弹簧也表示拉伸弹簧,而相间点之间的连线均表示弯曲弹簧。图1(b)是一个无规则的三角网格,图1(c)是网格中的部分拉伸(剪切)弹簧和弯曲弹簧的展示,实线表示拉伸(剪切)弹簧,虚线表示弯曲弹簧。该物理模型中的服装来源于poser建模软件,可以直接通过三角形面获得相邻点之间的弹簧,即拉伸(剪切)弹簧。对于弯曲弹簧,可以通过遍历顶点邻点的邻点来获得,不过要排除间点就是邻点的情况。例如,图1(c)中1的邻点有2和3,其中2的邻点6和1之间在图1(b)中没有连线,所以1和6就是间点对,Spring16是弯曲弹

簧;而3的邻点4在图1(b)中和1有连线,所以1和4是邻点对,Spring14不是弯曲弹簧,而是拉伸(剪切)弹簧。

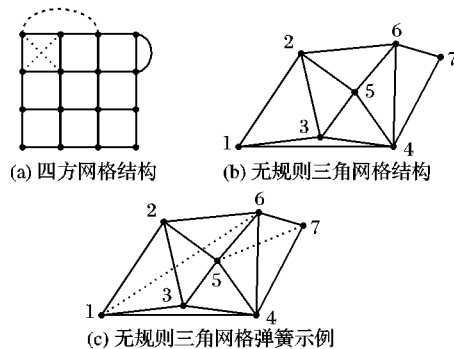


图1 质点弹簧结构

### 1.2 半隐式积分法和碰撞检测

在仿真中质点线性方程组的生成采用文献[17]中的半隐式积分法,不同的是,本文的积分系统没有额外阻尼力。解方程组的方法采用文献[18]中改进的共轭梯度法。对于碰撞检测仿真采用文献[19]中的方法,不同的是,本文没有采用常规的二叉树,而是采用了任意叉树的构造方法,该方法对于不同数量级图元模型的仿真可以智能地选取树的分支数目,使得AABB包围盒树所有层计算量之和尽可能小。

## 2 分类应变限制

### 2.1 应变区域分类

由于传统的应变限制方法是几何层面的方法,耗时较多,一般用于对实时性需求不高的服装仿真中,比如,静态悬挂服装仿真等。而在动态服装仿真领域大多数的理论和案例在解决形变过度的时候都是采用阻尼力的方法。本文从降低传统应变限制整体耗时的角度出发,提出了一种全新的分类概念,并且给出了一套可行的处理方案。

要实现分类,就需要标识可能发生振荡的区域。为了不增加过多的计算开销,需要从仿真系统中找到一个量作为标识数据量,为了找到这个量,我们进行了一些简单的实验。实验中使用了一个 $13 \times 13$ 的悬挂网格布料模型,4个角上的顶点被固定,外力只考虑重力,内力只考虑三种弹簧力,模型见图2。

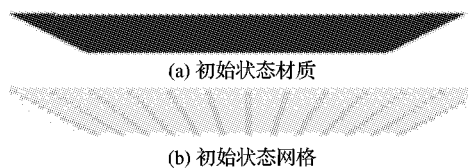


图2 布料悬挂初始状态

基于织物的二相性,我们知道模拟真实织物的弹簧阻尼系数应该是变化的,随着拉伸阻尼系数会变大,假设图3表示一个稳定的阻尼区间,稳定的意思是指质点在不同阻尼区间段取相应的阻尼系数进行仿真将不会出现振荡。 $C_1, C_2, C_3$ 分别代表 $0 \sim S_1, S_1 \sim S_2, S_2 \sim S_3$ 区间段的弹簧阻尼系数。

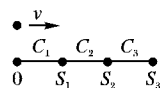


图3 织物稳定阻尼区间示意图

图4表示在三种阻尼系数下质点随弹簧伸长的受力情况。令质点速度为 $v$ ,运动静止时的位置为 $vS_3/|v|$ ,A区域是仿真中受力所做的功 $W_A$ ,A+B区域是以图3假设为前提的真实受力所做的功 $W_B$ 。显然,B区域的面积 $\Delta W_{B-A} = W_B - W_A$

为真实功和仿真功的误差。如果弹簧在0到 $S_3$ 形变过程中的各种能耗为 $\Delta W_{all}$ ,令 $\Delta W = \Delta W_{B-A} - \Delta W_{all} > 0$ ,那么下一个 $\Delta t$ 的时候,质点将沿 $-v$ 运动。根据能量守恒定理当质点静止后,总能量应该为 $W_A + \Delta W$ 。假设质点越过0点后在运动到 $-vS_A/|v|$ 时将 $W_A$ 的能量消耗殆尽,则 $W_A = \int_0^{S_A} C_1 S dS$ ,解出 $S_A = \sqrt{2W_A/C_1}$ 。

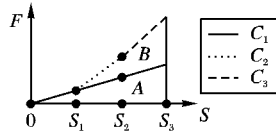


图4 质点受力示意图

从图4中可以得出等式 $W_A = \int_0^{S_3} C_1 S dS = C_1 S_3^2/2$ ,将 $W_A$ 代入 $S_A$ ,解出 $S_A = S_3$ ,所以此时质点已经运动到 $-vS_3/|v|$ 。如果没有其他能量,质点将在 $(-vS_3/|v|, vS_3/|v|)$ 之间来回振荡,但是还有能量 $\Delta W$ 需要考虑。依照 $W_A$ 的做法,得出 $S_W = \sqrt{2\Delta W/C_1}$ ,所以质点相对于真实平衡位置将多运动 $-vS_W/|v|$ 。显然,当质点再次回到 $v/|v|$ 方向的时候,除了运动到 $v(S_3 + S_W)/|v|$ 的位置,依然会多运动 $vS_W/|v|$ ,如此反复,将产生图5中来回振荡的效果,且振荡幅度越来越大,最终产生形变过度。

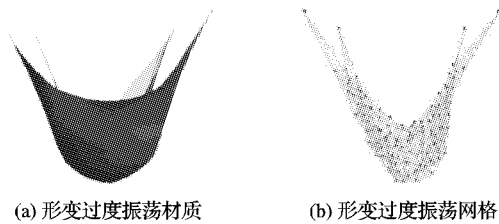


图5 布料形变过度振荡

从上面的分析可以看出,产生振荡的原因是仿真中弹簧阻尼系数和变化中的弹簧的阻尼系数不匹配造成 $\Delta W > 0$ ,虽然我们可以通过实验取得弹簧阻尼系数变化曲线,并且像图3那样,将其近似为分段直线进行应用。但是要将该分段直线应用到服装仿真中是不现实的,因为需要在一个时间步中不断计算质点位置与图3中那样的分段区间进行比较,而每一次质点位置的计算就相当于重新对文献[17]的线性方程组求解。若计算的次数太少,效果不明显;计算的次数太多,计算开销太大。但是,只要能保证 $\Delta W < 0$ ,最终织物会趋于静止的平衡状态,即质点速率收敛至0,如图6所示。

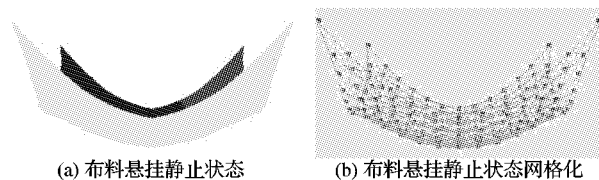


图6 布料悬挂静态图

由 $\Delta W < 0$ 可推出 $W_B < W_A + \Delta W_{all}$ 。显然,质点越接近0点,越有可能满足 $W_B < W_A + \Delta W_{all}$ 。因为时间步 $\Delta t$ 一定,则速率越小质点越接近0点。当 $W_B = W_A + \Delta W_{all}$ 时,可解出质点偏离0点后的一个速率,记为 $v_{balance}$ 。我们只需要使速率满足 $|v| < v_{balance}$ 就可以消除振荡和形变过度。很幸运的是仿真系统的计算过程中会获得当前帧的最终速度 $v$ , $v$ 可以作为下一帧预处理的数据,所以 $v$ 也满足已有数据这一要求。基于以上分析,本文采用 $v$ 作为标识数据合理。用图2中的悬挂布料

模型做的振荡实验。我们用一个速率收敛比 $\alpha_{convergence}$ 来粗略代替 $\Delta W_{all}$ 产生的速度递减的效果,以发生振荡时的最大速率 $|v_{max}|$ 为判断标准。本文选取实验系统中速率最大的质点,即布料正中第7行第7列的质点。通过观察,本文选取0.97和0.98两个收敛比。图7和图8分别是速度收敛比为0.97和0.98时的仿真数据。其中 $x, y, z, velocity$ 分别代表三维空间中的三个坐标轴和质点速率, $x, y, z$ 的单位均为像素,velocity单位为像素/10 ms。图7和图8均为origin 8软件直接生成的四分图,其中,纵坐标为 $x, y, z$ 的三个分图分别代表每一帧中点在 $x, y, z$ 三个坐标轴中的坐标值,纵坐标为velocity的最后一个分图代表每一帧中点的速率。从图中可以看出,在收敛比为0.97的曲线图中有振荡速率临界点,大约在36左右。如果系统运行过程中某质点出现了大于36的速率,则质点速度将无法收敛,将会出现图8中的情况,即此时的 $v_{balance}$ 可取36,具体的 $v_{balance}$ 是通过计算还是简易实验获取可根据具体情况而定。

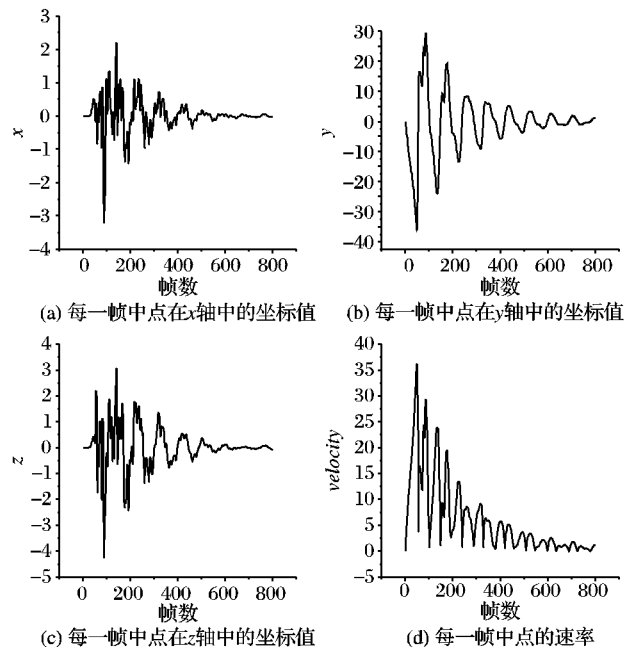


图7 收敛比为0.97 布料仿真数据

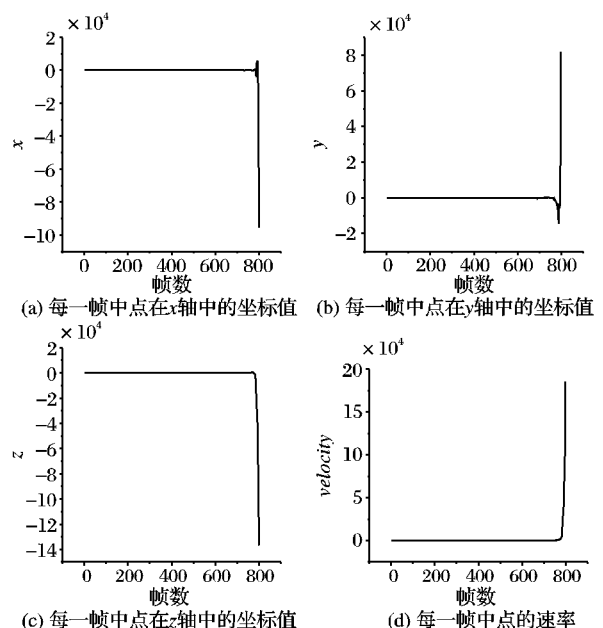


图8 收敛比为0.98 布料仿真数据

## 2.2 应变限制及应用

传统的应变限制方法是预设置主应变方向上应变限制比,这种做法在静态或者悬挂服装仿真中是可行的,因为这些仿真注重的是服装最终静态下的结果,而不是中间的变化过程。但是对于动态服装仿真而言,中间的每一帧动画的真实性都是需要保证的。所以,本文提出了一种实时计算应变限制比的概念,并且给出了一套可行的方案。

### 2.2.1 拉伸剪切应变限制

在仿真中,我们分别称  $t = t^{(n-1)}$  时刻和  $t = t^{(n)}$  时刻的物体构形为参考构形和当前构形<sup>[20]</sup>。两种构形所采用的坐标系我们选用同一个固定直角坐标系。参考构形中第  $i$  个质点用  $\mathbf{X}$  表示,则当前构形中质点  $i$  的空间位置用  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)$  表示,  $x_i = x_i(\mathbf{X}_A, t)$  ( $i, A = 1, 2, 3$ ) 是其分量表示,三个分量的方向就是坐标系基矢量的方向。考虑质点  $t^{(n-1)}$  时刻的弹簧长度  $d\mathbf{X}$  在变形后变为  $d\mathbf{x}$ , 即  $t^{(n)}$  时刻的弹簧长度。 $d\mathbf{X}$  和  $d\mathbf{x}$  的关系由式(1)所示:

$$dx_i = \frac{\partial x_i}{\partial X_A} dX_A; i, A = 1, 2, 3 \quad (1)$$

质点的变形梯度张量为  $\mathbf{W} = \text{Grad } \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}}$ , 由式(1)可得到式(2)。因为参考构形和当前构形采用同一坐标系,所以参考构形中  $d\mathbf{X}$  分量对当前构形中  $d\mathbf{x}$  分量的影响仅限于对应的基矢量方向,即  $\mathbf{W}$  中  $e_{ij} = 0$  ( $i, j = 1, 2, 3$  且  $i \neq j$ )。

$$d\mathbf{x} = \mathbf{W} d\mathbf{X}; \mathbf{W} = \begin{bmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ e_{21} & e_{22} & e_{23} \\ e_{31} & e_{32} & e_{33} \end{bmatrix} \quad (2)$$

令基矢量方向上  $e_{ii}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 的应变限制分别为  $\alpha_{11}$ 、 $\alpha_{22}$  和  $\alpha_{33}$ , 根据线应变的概念,其中的  $e_{ii} = (\Delta x_i / dX_A) + 1$  ( $i, A = 1, 2, 3$ ),  $\Delta x_i$  就是文献[17]中  $d\mathbf{x}$  在基矢量方向分量的值。最终的矩阵  $\mathbf{W}$  展开式如式(3)所示。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \alpha_{11} e_{11} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{22} e_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_{33} e_{33} \end{bmatrix} \quad (3)$$

令  $\mathbf{N}$  和  $\mathbf{n}$  分别是  $d\mathbf{X}$  和  $d\mathbf{x}$  的单位方向矢量,由式(2)可推出式(4):

$$\mathbf{n} | d\mathbf{x} | = \mathbf{W} \mathbf{N} | d\mathbf{X} | \quad (4)$$

式(4)变形后可得到式(5):

$$| d\mathbf{x} |^2 = \mathbf{N} \cdot (\mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{N}) | d\mathbf{X} |^2 \quad (5)$$

记质点  $i$  沿  $\mathbf{N}$  方向的伸长为  $\lambda(\mathbf{N})$ , 其表达式如式(6)所示:

$$\lambda(\mathbf{N}) = \frac{| d\mathbf{x} |}{| d\mathbf{X} |} = \{ \mathbf{N} \cdot (\mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{N}) \}^{1/2} \quad (6)$$

质点  $i$  单位长度的伸长率记为  $l = \lambda(\mathbf{N}) - 1$ , 对于速率过大质点,将伸长率限制为  $l_{\max}$ , 即式(7)所示:

$$l = l_{\max}; l > l_{\max} \quad (7)$$

另外,为了保证应变限制后  $d\mathbf{x}$  的方向不变,则存在两个独立的比例关系,如式(8)所示:

$$\begin{cases} \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{22}} = \frac{e_{11}}{e_{22}} \\ \frac{\alpha_{11}}{\alpha_{33}} = \frac{e_{11}}{e_{33}} \end{cases} \quad (8)$$

联合式(7)、(8)可解得  $\alpha_{ii}$  ( $i = 1, 2, 3$ ) 的值,将其代入式(2)可解得  $d\mathbf{x}$ 。

### 2.2.2 弯曲应变限制

因为仿真是在三维空间中进行的,所以除了三角形边的

控制,还涉及到两个三角形之间的角度控制。考虑图9(a)中的三角形  $ABD$  和  $ADC$ ,  $E$  是  $AD$  边的中点,通过控制  $\angle BEC$  的变化达到对两个三角形之间角度的控制。poser 软件生成的服装模型中,构成模型的三角形面片一般都是锐角三角形,所以用  $\angle BEC$  的变化近似表示三角形之间的角度变化是合理的。对于其他来源的服装模型可以先对其进行 Delaunay<sup>[21]</sup> 的处理,将三角形网格转变为近似的锐角三角形网格。由余弦定理可以得到  $\cos \angle BEC = (BE^2 + EC^2 - BC^2) / (2BE * EC)$ , 显然在  $BE$  和  $EC$  一定的情况下,随着  $BC$  的变大  $\angle BEC$  会不断变大,  $\cos \angle BEC$  的值会不断减小。对比图1发现图9(a)中四面体  $ABCD$  的  $BC$  边实际上就是弯曲弹簧,而两个三角形的其他边都是拉伸(剪切)弹簧,并且当这些边长确定后,三角形  $ABD$  和  $ADC$  的形状就确定了,进而  $BE$  和  $EC$  的长度也随之确定,正好满足前面提到的  $BE$  和  $EC$  一定的情况。所以,我们只要在计算质点位置的时候先计算拉伸(剪切)弹簧,然后就能通过限制弯曲弹簧  $BC$  的大小来控制  $\angle BEC$  的大小。该方法省去了复杂的二面角角度的计算,并且采用弹簧的线应变限制,使得系统对于需要进行角度限制的三角形对同样可以采用质点的速率作为判定标准,大大降低了计算开销。只是需要注意的是此时要进行应变限制的弹簧是弯曲弹簧。因为弯曲弹簧的抗性与拉伸剪切弹簧不同,所以需要采用不同的弹簧刚度系数。

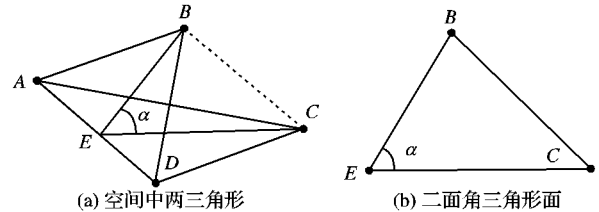


图9 两三角形二面角

## 3 实验结果和分析

本文采用上面提到的分类应变限制的方法进行了穿连衣裙虚拟人行走状态下的服装仿真。仿真采用了大数量级图元的人物和服装模型。服装模型的点数为 6005, 三角图元面数为 11654, 生成的拉伸(剪切)弹簧总数为 34962, 生成的弯曲弹簧总数为 56988。仿真采用的时间步大小为 10 ms, 生成了总帧数为 65 的动画。我们采用的环境参数和上面布料悬挂的环境参数相同, 如弹簧系数、重力加速度等, 所以我们使用了和上面实验相同的速度阈值。显然, 如果在应变限制处理前未进行分类标识, 每次都会对 6005 个点进行应变限制处理。而我们从仿真中任意挑选了其中 5 帧, 发现需要处理的点仅仅为 1304, 2132, 2309, 3587, 2763。显然应变限制需要处理的点数大大减少, 仿真的效率得到提升。图10是虚拟人行走下的服装仿真效果图, 图(a)都进行了本文提出的分类应变限制处理, 而图(b)没有进行该处理, 从图中可以看出, 未进行分类应变限制处理的服装会出现形变过度的情况, 所以进行分类应变限制的处理非常有必要。

## 4 结语

本文放弃了传统的额外人造阻尼力的方法而采用几何层面的应变来限制三角图元的形变过度, 并且针对高分辨率服装仿真中应变限制方法计算开销大的问题给出了一种分类应变限制的解决方法, 而对于三角形角度形变过度的问题也提出了新的解决思路。另外, 该方法中对服装区域的分类标识

是基于前一帧的速率这一已知量,所以没有增加额外的计算开销,较好地保证了仿真实时性。由于处理了大部分可能会产生病态的质点,也从一定程度上保证了仿真真实感。而且,该方法并不仅限于服装仿真中的应用,也能应用于其他具有二相性柔性材料的高分辨率动态仿真。当然,因为该方法采用的是历史速率作为判断依据,所以在病态质点的标识上还是会有一定遗漏,不过遗漏的质点数在质点总数中占的比例很小。并且,即使该方法在当前帧有遗漏处理,但在下一帧必定会对已经显出病态速率的点会进行处理。在时间步为10 ms这样的小数量级时间步下仿真,病态的效果对于人眼的分辨率而言几乎可以忽略。



图10 人物行走下的仿真效果

#### 参考文献:

- [1] ELBADRAWY A A, HEMAYED E E. Speeding up cloth simulation by linearizing the bending function of the physical mass-spring model [C]// 2011 International Conference on 3D Imaging, Modeling, Processing, Visualization and Transmission. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 101-107.
- [2] ZHUANG QINGHONG, DING YING, GONG GUANGHONG. A fast predictive-corrective mass spring method in cloth simulation [C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 562-565.
- [3] 毛天露, 夏时洪, 朱小龙, 等. 一种基于混合模型的实时虚拟人服装动画方法[J]. 计算机研究与发展, 2010, 47(1): 8-15.
- [4] FENG WEI-WEN, YU YI-ZHOU, KIM B U. A deformation transformer for real-time cloth animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 28(4): 1-9.
- [5] ROHMER D, POPA T, CANI M P, et al. Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 1-8.
- [6] MÜLLER M, CHENTANEZ N. Wrinkle meshes [C]// 2010 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. Aire-la-Ville, Switzerland: Eurographics Association, 2010: 85-92.
- [7] WANG H M, HECHT F, RAMAMOORTHI R, et al. Example-based wrinkle synthesis for clothing animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(4): 1-8.
- [8] ZHOU CHUAN, JIN XIAOGANG. Efficient and stable simulation of cloth undergoing large rotations [J]. Computing in Science & Engineering, 2008, 10(4): 30-40.
- [9] YE J T. Simulating inextensible cloth using impulse [J]. Computer Graphics Forum, 2008, 27(7): 1901-1907.
- [10] CHEN M, TANG K. A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation [J]. Visual Computer, 2010, 26(6): 853-863.
- [11] DELINGETTE H. Triangular springs for modeling nonlinear membranes [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(2): 329-341.
- [12] THOMASZEWSKI B, PABST S, STRAßER W. Continuum-based strain limiting [J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(2): 569-576.
- [13] WANG H, O'BRIEN J, RAMAMOORTHI R. Multi-resolution isotropic strain limiting [J]. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6): 1-10.
- [14] 王霞, 侯进, 向宇, 等. 根据个性化特征自动装扮虚拟人的一种方法 [J/OL]. [2011-10-18]. [http://www.paper.edu.cn/index.php/default/advanced\\_search/resultQuickSearch?type=0&judge=0&filename=Dressing+avatars+automatically+based+on+personality](http://www.paper.edu.cn/index.php/default/advanced_search/resultQuickSearch?type=0&judge=0&filename=Dressing+avatars+automatically+based+on+personality).
- [15] WU LIN, HOU JIN, WANG XIA, et al. Costume design and animation synthesis for personalized avatars [C]// 2010 International Conference on Computer Application and System Modeling. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2010: 35-39.
- [16] YU HAIYAN, GENG ZHAOFENG. An improved mass-spring model to simulate draping cloth [C]// 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2008: 568-571.
- [17] SEUNGWOO O, AHN J Y, WOHN K Y. Low damped cloth simulation [J]. Visual Computer, 2006, 22(2): 70-79.
- [18] URI M, ASCHER, BOXERMAN E. On the modified conjugate method in cloth simulation [J]. Visual Computer, 2003, 19(7): 526-531.
- [19] 王晓荣, 王萌, 李春贵. 基于 AABB 包围盒的碰撞检测算法的研究 [J]. 计算机工程与科学, 2010, 32(4): 59-61.
- [20] 张义同. 近代织物力学和稳定性分析理论 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.
- [21] ZHANG W J, KONG J L. Improved delaunay growing algorithms and application [C]// 2011 International Conference on Water Resource and Environmental Protection. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2011: 2896-2899.

(上接第1569页)

- [4] FATTAL R. Single image dehazing [J]. ACM Transaction on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [5] TAN R. Visibility in bad weather from a single image [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2008: 1-8.
- [6] HE KAIMING, SUN JIAN, TANG XIAOOU. Single image haze removal using dark channel prior [C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Piscataway: IEEE Press, 2009: 1956-1963.
- [7] HAUTIERE N, TAREL J P, LAVENANT J, et al. Automatic fog detection and estimation of visibility distance through use of an onboard camera [J]. Machine Vision and Applications, 2006, 17(1): 8-20.
- [8] TAREL J P, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image [C]// Proceeding of International Conference on Computer Vision. Piscataway: IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [9] 高山, 李成, 毕笃彦. 基于 NF-ICM 的图像增强算法 [J]. 中国光学学报, 2010, 8(5): 474-478.
- [10] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法 [J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 143-149.
- [11] 嵇晓强, 戴明, 孙丽娜, 等. 暗原色先验图像去雾算法研究 [J]. 光电子·激光, 2011, 22(6): 926-930.