

文章编号:1001-9081(2007)05-1145-02

织物动态仿真中改进的粒子模型

肖明兴, 耿兆丰

(东华大学 信息科学与技术学院, 上海 200051)

(mingxingxiao@126.com)

摘要:针对三维织物动态仿真中存在的超弹性现象,考虑到织物的高度非线性材料性能,提出了一种改进的粒子模型。该模型内力表达式中不仅考虑了材料线性刚度的作用,而且增加了非线性项作用,使所建立的模型更加符合织物的物理特性。在外力计算方面,考虑了实际风力作用下粒子间存在的遮挡情况,并给出了相应的风力计算算法。仿真研究表明,该改进模型能较好地反映织物的力学性能,所获得模拟结果也更加真实。

关键词:超弹性现象; 非线性; 织物动态仿真; 力学特性; 粒子模型

中图分类号: TP391.9 文献标识码:A

Improved particle system for cloth animation

XIAO Ming-xing, GENG Zhao-feng

(School of Information Science and Technology, Donghua University, Shanghai 200051, China)

Abstract: It is one of the most difficult tasks in computer graphics community to obtain realistic cloth animation in real-time. Targeting on the super-elastic effect in cloth animation and considering the material characteristics of fabric, this paper presented an improved particle system, in which not only the linear stiffness but nonlinear factors were taken into account. This model fit the physical characteristics of fabric better. In the external forces calculation, the particles covering case under air forces was considered and the corresponding algorithm was put forward. As simulation shows that this model can reflect the mechanics characteristics of fabric better and the simulation results are more real.

Key words: super-elastic effect; nonlinear; cloth animation; mechanics characteristics; particle system

0 引言

在计算机图形学界,织物的造型与仿真课题一直备受关注,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。从 Weil^[1]起织物仿真已经发展了近二十年,其间提出了许多的模型。从所用技术上可分为基于几何的方法、基于物理的方法和两者的混合方法。基于物理的模型能充分考虑织物的物理特性,从而仿真结果具有较强的真实性,尤其粒子模型因其简单性和计算速度相对较快而应用广泛。

Weil 是第一个在计算机图形学界研究织物可视化问题的人,他使用悬链线比拟织物的悬垂形状。该算法分为两个阶段。第一阶段形成一个粗糙的织物变形框架,第二步使这个线框图达到真实的效果,最终形成织物变形曲面。

Kunii^[2]等人认为纯粹物理的方法尽管可以得到很有真实感的图形,但计算费用高、物理参数不易获取,因此他们提出了一个混合的模型。首先对织物进行网格划分,网格上的质点之间存在拉伸能和弯曲能;然后,利用最速梯度下降法寻找能量最小时织物的形状;最后,利用奇异理论模拟最终的褶裥。

Breen^[3]等人采用了基于物理的粒子模型模拟织物的悬垂。他们认为将织物看作连续介质是不准确的,而用离散的

观点看织物较符合实际。模型中研究者将经线和纬线的交点看作一个个粒子,整块织物是相应粒子的集合。

Baraff^[4]等人在 Breen 的基础上,将织物离散成三角形,认为可以消除矩形带来的拓扑限制,提出一种简单织物内力的表达式,并应用隐式积分求解粒子运动微分方程,从而使得大步长成为可能。

在以上这些模型中,粒子模型以其简单且具有较强的实时性而得到了广泛应用。然而,已有粒子模型的表达形式不能准确反映织物的材料性能,尤其在采用线形弹簧模拟具有高度非线性织物时,会造成较大的失真(如超弹性现象)。基于此,本文在考虑织物的力学特性的基础上,提出了一种非线性粒子模型,并应用于织物的三维动态仿真研究。

1 超弹性现象

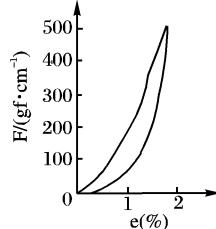


图 1 织物经向拉伸实验曲线

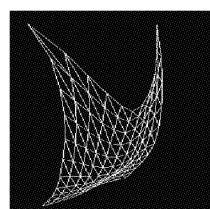


图 2 超弹性现象

织物经向拉伸实验曲线(图 1)表明:织物在拉伸力作用下,呈现较强的非线性特性。在织物仿真中,由于部分区域

收稿日期:2006-11-27; 修订日期:2007-02-01

作者简介:肖明兴(1977-),男,四川都江堰人,博士研究生,主要研究方向:计算机图形学、计算机辅助设计; 耿兆丰(1938-),男,江苏张家港人,博士生导师,主要研究方向:智能控制、计算机辅助设计、工业自动化。

(尤其在约束点附近)相对于其他部分拉伸过大,模拟结果产生了不合理的变形,有悖于真实织物的感觉,即所谓的超弹性现象,如图 2 所示。研究分析表明:产生超弹性现象的根本原因是采用线形弹簧模拟具有高度非线性特性的织物。针对这一问题已有较多解决方案,诸如:提高弹簧的刚度系数,基于动力学反演的质点位置调整和有序的质点位置及速度调整等,但它们并不能从本质上反映织物的非线性特性。

2 非线性粒子模型

本文提出了改进的粒子模型并应用于织物动态仿真。该模型从织物非线性材料特性出发,在线形刚度的基础上,考虑了非线性项的作用,从而能更好的反映织物的力学性能,获得更加真实的仿真效果。

2.1 运动微分方程

假设织物被离散为由 n 个粒子组成的网状系统,则根据牛顿第二定律,织物的运动微分方程可表示为,

$$\ddot{x} = M^{-1} \left(-\frac{\partial E}{\partial x} + F \right) \quad (1)$$

式中: x 表示织物的空间位置, $x \in \mathbf{R}^{3n}$, 是求解目标; $[M]$ 表示织物的质量矩阵, $M \in \mathbf{R}^{3n \times 3n}$; E 表示织物的内能; $-\frac{\partial E}{\partial x}$ 则表示由内能衍生出来的内力, $\frac{\partial E}{\partial x} \in \mathbf{R}^{3n}$; F 表示织物所受外力, $F \in \mathbf{R}^{3n}$ 。合并 $-\frac{\partial E}{\partial x}$ 和 F 为向量 f , 令

$$f(x, \dot{x}) = \left(-\frac{\partial E}{\partial x} + F \right)$$

于是(1) 式转化为:

$$\ddot{x} = M^{-1} f(x, \dot{x}) \quad (2)$$

2.2 隐式积分

假设时刻 t_0 系统的位移和速度分别为 $x(t_0)$ 和 $\dot{x}(t_0)$, 求解目标是在时刻 $t_0 + h$ 时系统的位移 $x(t_0 + h)$ 和速度 $\dot{x}(t_0 + h)$ 。利用隐式积分求解 $t_0 + h$ 时的位移和速度,则必须将(2) 式转换为一阶常微分方程组。因此,令系统的速度 $v = \dot{x}$, 则:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ \dot{x} \end{pmatrix} = \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} x \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \\ M^{-1} f(x, v) \end{pmatrix} \quad (3)$$

记 $x_0 = x(t_0)$ 、 $v_0 = v(t_0)$ 、 $\Delta x = x(t_0 + h) - x(t_0)$ 和 $\Delta v = v(t_0 + h) - v(t_0)$, 应用隐式后向 Euler 法,(3) 式可化为:

$$\begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta v \end{pmatrix} = h \begin{pmatrix} v_0 + \Delta v \\ M^{-1} f(x_0 + \Delta x, v_0 + \Delta v) \end{pmatrix} \quad (4)$$

对(4) 式第二项应用泰勒级数展开可得:

$$f(x_0 + \Delta x, v_0 + \Delta v) = f_0 + \frac{\partial f}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v \quad (5)$$

将 $\Delta x = h(v_0 + \Delta v)$ 和(5) 式代入式(4) 第二项得:

$$\Delta v = h M^{-1} \left(f_0 + \frac{\partial f}{\partial x} h(v_0 + \Delta v) + \frac{\partial f}{\partial v} \Delta v \right) \quad (6)$$

令 I 表示单位矩阵,则由(6) 式可得:

$$(I - h M^{-1} \frac{\partial f}{\partial v} - h^2 M^{-1} \frac{\partial f}{\partial x}) \Delta v = h M^{-1} \left(f_0 + h \frac{\partial f}{\partial x} v_0 \right) \quad (7)$$

利用(7) 式即可求得 Δv ,再由 $\Delta x = h(v_0 + \Delta v)$ 可得 Δx ,则 $x(t_0 + h)$ 和 $\dot{x}(t_0 + h)$ 即可求解。

2.3 内力

织物内力包括:拉伸力、剪切力和弯曲力。由(1) 式可知,内力与 E 有关。考虑材料非线性特性,令

$$E_c(x) = \frac{k}{2} C(x)^T C(x) + \frac{\lambda}{4} C(x)^T C(x) C(x)^T C(x)$$

其中 $C(x)$ 是期望值为 0 的标量函数, $E_c(x)$ 是与 $C(x)$ 相关的能量函数, k 是织物的线性弹性刚度系数, λ 是织物的非线性弹性刚度系数。则对于与 $C(x)$ 相关的各个粒子 i 所受内力可表示为:

$$\begin{aligned} f_i &= -\frac{\partial E_c(x)}{\partial x_i} \\ &= -k \frac{\partial C(x)}{\partial x_i} C(x) - \lambda \frac{\partial C(x)}{\partial x_i} C(x) C(x)^T C(x) \end{aligned} \quad (8)$$

同理,可以定义 $[K]_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j}$, 其中 i, j 表示与 $C(x)$ 相关粒子的序数,根据式(8) 可得:

$$K_{ij} = \frac{\partial f_i}{\partial x_j} = -k g_1(C(x)) - \lambda g_2(C(x)) \quad (9)$$

其中:

$$g_1(C(x)) = \frac{\partial C(x)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial C(x)^T}{\partial x_j} + \frac{\partial^2 C(x)}{\partial x_i \partial x_j} C(x) \quad (10)$$

$$\begin{aligned} g_2(C(x)) &= \frac{\partial C(x)}{\partial x_i} \cdot \frac{\partial C(x)^T}{\partial x_j} C(x)^T C(x) + \\ &\quad \frac{\partial^2 C(x)}{\partial x_i \partial x_j} C(x) C(x)^T C(x) \end{aligned} \quad (11)$$

本文中与拉伸力相关的 $C(x)$ 定义如下:

$$C(x) = a \begin{pmatrix} \|w_u(x)\| - b_u \\ \|w_v(x)\| - b_v \end{pmatrix} \quad (12)$$

其中: u, v 分别是纹理坐标的单位方向向量; a 表示三角形单元的面积; b_u 和 b_v 分别是 u, v 两个方向的调节参数。 $w_u(x)$ 和 $w_v(x)$ 分别表示 u, v 两个方向上织物的相对变化率。

与剪切力相关的 $C(x)$ 定义如下:

$$C(x) = a w_u(x)^T w_v(x)$$

弯曲力是与两个相邻的三角形的四个粒子相关的。设 n_1 和 n_2 分别表示这两个三角形的单位方向向量, e 是公共边的单位方向向量, θ 是两个三角形相对于公共边的夹角,则可用 $C(x) = \theta$ 来度量弯曲力,且 $\sin\theta = (n_1 \times n_2) \cdot e$ 和 $\cos\theta = n_1 \cdot n_2$ 。

2.4 外力

2.4.1 重力

不失一般性,假设织物是均质的,则第 i 个粒子所受重力 f_{gravi} 为:

$$f_{gravi} = \frac{1}{3} m_i \cdot mg \quad (14)$$

式中: m 为三角形单元质量, m_i 为粒子 i 所属三角形的个数。

2.4.2 风力

在已有文献中,织物所受风力大小是通过下式计算的:

$$f_{iwind} = k_{wind} (v_{wind} - v_i) \quad (15)$$

其中, f_{iwind} 、 k_{wind} 、 v_{wind} 、 v_i 分别表示第 i 个粒子所受的风力大小,风力因子,风速和该粒子的速度。研究表明:部分织物可能会被其他部分遮挡,从而不受风力作用。如图 3 所示,图中粒子 B 在风力方向被粒子 A 遮挡而不受风力。

考虑粒子间的遮挡情况,风力计算的算法可描述为(假设风力方向沿世界坐标系中 Z 轴正向):首先,初始化缓冲器的值为最大 Z 坐标值;然后,计算织物的每个粒子的 Z 坐标

(下转第 1170 页)

从表 1 可以看到,RCBF 算法的 PSNR 值的方差比原算法明显下降,对于 Carphone 序列在 384kbps 时比原算法下降 0.45dB。PSNR 值方差平均比原算法下降了 0.15dB。控制精度比原算法也有提高,News 序列在 48kbps 时,原算法的实际码率为 49.26kbps,而 RCBF 算法为 48.13kbps,比原算法更准确。平均 PSNR 值比原算法也有提高。

4 结语

本文提出在保证缓冲区满度不超出限定范围情况下,按照各帧复杂度为各帧分配目标比特数的帧层码率控制算法 RCBF。该算法的目标是尽可能按照各帧的复杂度来分配目标比特数,消除因为考虑缓冲区状态所引起的各帧目标比特数与帧复杂度的不一致性,从而减少各帧之间质量的波动。同时利用控制理论中的反馈原理,根据误差动态调整分配给各帧的目标比特数,使帧层目标比特分配更加合理和准确。实验结果表明,RCBF 算法可以减少各帧间质量的波动,码率控制精度更准确,同时平均质量也有提高。

参考文献:

- [1] 尚书林,杜清秀,卢汉清. 一种低复杂度 H.264 宏块级码率控制算法[J]. 计算机学报,2006,29(6):914~919.
- [2] JIANG MQ, LING N. Low-Delay Rate Control for Real-time H.264/AVC Video Coding[J]. IEEE Transaction on Multimedia, 2006, 8(3):467~477.
- [3] RIBAS-CORBERA J, LEI S. Rate control in DCT video coding for

low-delay communications[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1999, 9(1): 172~185.

- [4] LI ZG, PAN F, LM KP, et al. Adaptive basic unit layer rate control for JVT, JVT-G012[A]. 7 th meeting, Pattaya II[C]. Thailand, 2003.
- [5] 沈兰荪. 视频编码与低速率传输[M]. 北京: 电子工业出版社, 2001. 303~308.
- [6] 倪伟, 郭宝龙. H.264 变换编码和量化算法的研究[J]. 计算机工程与应用, 2006, (3):33~36
- [7] SIWEI MA, WEN GAO. Rate-distortion analysis for H.264/AVC video coding and its application to rate control[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 2005, 15(12): 1533~1544.
- [8] CHIANG T, ZHANG Y-Q. A new rate control scheme using quadratic rate distortion[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 1997, 7(1):246~250.
- [9] H.264/AVC Reference Software, JM10.2 [EB/OL]. http://iphome.hhi.de/suehring/ml/download/old_jm/jm10.2.zip, 2006-10-10.
- [10] 马思伟, 高文. 一种面向 H.264/AVC 的码率控制算法[J]. 电子学报, 2004, 32(12): 2024~2027.
- [11] 赵波, 吴成柯. 一种新的低延时视频编码码速率控制算法[J]. 计算机学报, 2005, 28(1): 53~59.
- [12] ABDUL H. SADKA. Compressed video communications[M]. John Wiley & Sons, 2002. 75~119.

(上接第 1146 页)

值,若其值小于相应的缓冲器中的值,则替换 Z 缓冲器中的值;最后,通过比较各个顶点与缓冲器中相应值的大小来判断当前顶点是否受风力作用,如果受风力作用则风力大小通过式(15)计算,否则风力大小为零。

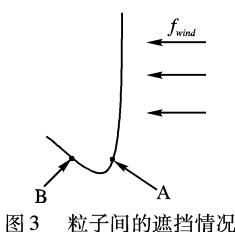


图 3 粒子间的遮挡情况

2.4.3 阻尼力

为减少由于上述各力引起的粒子过度振荡而引入阻尼力,它是粒子速度的函数:

$$f_{damp} = -k_d \frac{\partial C(x)}{\partial x} \dot{C}(x) \quad (16)$$

3 实验结果

当织物受到外部激励或内部参数扰动时,网格单元发生变形,由此产生的拉伸力使粒子系统向平衡状态恢复,防止网格单元产生不合理变形。因此,织物拉伸刚度的选取对仿真中的超弹性现象有直接的控制作用。以大小为 0.6×0.8 离散成 20×20 的三角形网格结构的棉织物为仿真对象,如图 4 所示。其中 $Kst = 20$, 图 4(a)~图 4(d) 分别为 λst 等于 0、1600、51200、204800 时的悬垂仿真图。可以看出,随着 λst 值的增加,即非线性项作用的增强,超弹性现象明显减弱,而仿真的真实感加强。从而说明,改进的粒子模型更能反映织物材料的非线性特性,获得的仿真结果也更加真实。

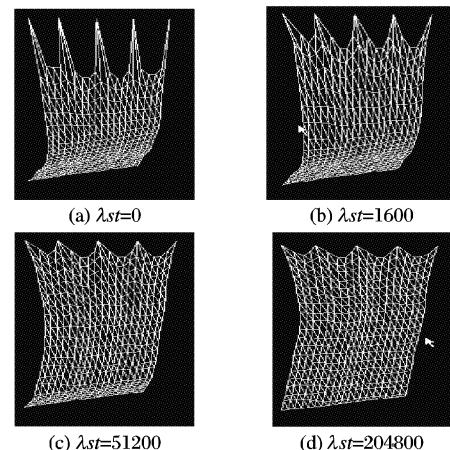


图 4 仿真结果

参考文献:

- [1] WEIL J. The synthesis of cloth objects[J]. Computer Graphics, 1986, 20(4):18~2.
- [2] HINDS BK, MCCARTNEY J, WOODS G. Pattern development for 3D surfaces[J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(8):583~592.
- [3] BREEN DE. Computer graphics in textiles and apparel modeling [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5):26~27.
- [4] BARAFF D, WITKIN A. Large steps in cloth simulation[A]. Proceedings of SIGGRAPH, 1998. 43~54.
- [5] 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.
- [6] 聂卉. 三维柔性织物动态仿真技术的研究[D]. 广州: 中山大学, 2002.
- [7] 刘宁. 三维织物动态仿真及相关技术研究[D]. 广州: 中山大学, 2004.