

布料动画模拟综述

朱淮冰 金小刚 冯结青 彭群生

(浙江大学 CAD & CG 国家重点实验室 杭州 310027)

摘 要 分析了近 20 年来布料动画技术的发展情况,对其中的基于物理模型布料模拟技术的框架作了比较详细的介绍,并分别从物理模型、数值方法的采用、碰撞检测和处理等方面对布料模拟技术的发展作了比较深入、全面的综述。

关键词 布料动画;基于物理的造型;数值方法;碰撞检测;碰撞响应
中图法分类号 TP391.41

Survey on Cloth Animation

Zhu Huaibing Jin Xiaogang Feng Jieqing Peng Qunsheng

(State Key Laboratory of CAD & CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract State of the art of cloth animation in recent twenty years is introduced. Key techniques in physics-based cloth animation, namely physical models, numerical methods, collision detection and collision response for cloth animation are discussed.

Key words cloth simulation; physics-based modeling; numerical methods; collision detection; collision response

1 前 言

布料在日常生活中是随处可见的,在计算机动画中出现布料的场合很多,如服饰、窗帘、桌布、飘动的旗帜等。衣服覆盖了人体的 80% 以上,如果要求人体动画具有令人满意的细节和真实感,那么布料动画是不可缺少的。布料动画的一个特殊应用领域为时装设计,它将改变传统的服装设计过程,让人们在着装之前看到服装的式样和试穿后的效果。10 多年来,人们在布料动画方面提出了许多方法,在模拟的速度、效果和稳定性等方面取得了很大的进展,但在布料动画的真实感和交互性上还不能令人十分满意。本文将从模型和数值方法等方面对布料模拟技

术的发展作一个比较全面的综述。

2 布料模型的发展

2.1 布料的物理特性

布料是天然或人工纤维的网状编织物,与薄壳结构相似。在力学特性上,布料具有各向异性、不可压缩、抗拉不抗弯等一些明显的特征。布料是柔性物体,容易产生各种褶皱。与刚性物体不同,布料在外力的作用下会产生很大的形变,并且用不同材料、不同制造方法制造所得布料的形变也各不相同。研究人员做了大量的实验和研究,获得了布料在外力作用下形变的各种物理参数,并开发了一些模型描述这些形变。但是,由于布料形变的复杂性,无法构

原稿收到日期:2003-06-05;修改稿收到日期:2003-09-11。本课题得到国家重点基础研究发展计划(2002CB312101)、国家自然科学基金(60273054,60340440422)和教育部博士点专项基金(20020335070)资助。朱淮冰,男,1977 年生,硕士,主要研究方向为计算机动画。金小刚,男,1969 年生,博士,研究员,主要研究方向为计算机动画、隐式曲面造型。冯结青,男,1970 年生,博士,研究员,主要研究方向为 CAGD、计算机动画。彭群生,男,1947 年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为真实感图形、计算机动画、虚拟现实、基于图像的造型和绘制等。

造一个统一的、能适用各种情况的模型. 主要的困难在于, 由于其原料和编织方法各不相同, 实验数据的离散性往往较大, 不容易构造一个比较统一的力学模型; 即使构造了一个能适用部分情况的模型, 往往也比较复杂. 但是, 对于模型在动画中的应用, 只要求能产生比较真实的动画效果, 而对力学上的精确性要求不是很高. 并且, 为了能产生交互性的动画, 要求模型足够简单. 经过长期的研究, 人们已构造出大致能满足需要的几种模型, 其中弹簧-质点(或粒子)模型比较典型.

2.2 最初的纯几何模型

在 Terzopoulos 等的工作发表之前^[1-2], 布料的运动模拟通常都采用纯几何模型; Weil 最早采用悬链线及其几何变换模拟悬垂布料^[3]; 之后, Hinds 等^[4-5], Ng 等^[6]采用纯几何变换模拟特殊情况下布料的变形; Hadap 等^[7]采用纹理与几何相结合的方法模拟衣服上的褶皱. 纯几何模型的缺点是明显的: 仅仅能适用一些特殊情况, 并且还需要用户干预, 模拟的效果也不够逼真. 因此, 在 Terzopoulos 等^[1-2]之后的绝大多数布料模型都是物理模型.

2.3 物理模型

Terzopoulos 等^[1-2]为将力学上的一些模型变化应用到计算机图形学领域提供了一个很好的范例, 所提供的变形模型使得一些没有力学基础的人也能将之用于图形学的研究.

在力学上, 对板壳结构已经有一套比较成熟的理论, 也有关于有限元分析和有限差分法等成熟的数值分析方法, 因此从这方面入手进行布料动画模拟是十分自然的. 但是, 这些方法存在几个潜在的缺陷: (1) 需要一张细密的网格来产生大的变形, 而作为一个实用的布料动画模拟器, 应该允许粗糙的离散化并保证有合理的表现. 分析几乎不可压缩的薄板材料(如布料), 无论数值积分顺序如何, 在粗糙网格下的单元连续性方程可能会产生高度不确定的应力应变结果. (2) 难以保证算法的稳定性.

对应于这些方法, 布料模型一般表示为三角形网格, 其中的力或能量方程通常由 Terzopoulos 等^[1-2]的结论变化而来. 采用三角形网格的例子很多, 比较典型的有 Baraff 等^[8]和 Volino 等^[9]的模型. 这些模型可以理解为相连的看作是连续体的平面三角形系统, 每个三角形平面内的变形能量(或应力应变关系)从连续介质力学方程得来, 而弯曲变形能量则基于相邻三角形之间的角度. 与后面将提到的粒子模型相比, 这种模型可以模拟大部分力学性

质, 但是计算复杂度较大. 另外, 弯曲性质对网格化的依赖很大. 除了三角形网格, 也有人采用四边形网格, 相关内力或能量方程的导出与三角形网格类似.

Breen 等^[10]在分析布料的物理特性的基础上, 借鉴 Kawabata 评价系统^[11], 最先提出了布料的粒子系统模型(或质点-弹簧模型). 其基本原理是将布料离散为一个个没有体积的质点(或粒子), 质点间的相互作用通过一系列没有质量的弹簧来完成. 为了模拟布料在拉伸压缩、沿平面内方向剪切和平面外方向弯曲三种情况下的力学性质, 该模型设置了三种弹簧, 分别对应这三种情况. 在这种模型下, 尽管理论上可以赋予各个弹簧不同的刚度以体现部分的各向异性, 但本质上这个模型只能处理各向同性的力学行为. 由于该模型只考虑了上述三种物理性质, 因此这三种性质之外的物理属性都无法体现. 但是, 由于该模型与布料微观结构的相似性, 使其在不求相当精确的力学模拟上表现不错, 重要的是有效地降低了计算复杂度. 因此, 在此之后提出的布料模拟方法中, 大多采用了这个模型, 其中 Provot^[12]使用的模型是比较典型的. 下面就对这个模型作简要的介绍.

Provot^[12]所采用的称为“Mass-Spring”(简称 M-S)的模型(如图 1 所示)是一个由 $m \times n$ 个虚拟质点组成的网格, 质点之间用无质量的、自然长度不为 0 的弹簧连接, 如图 2 所示.

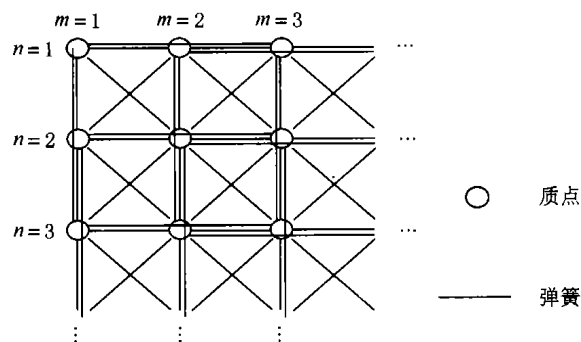
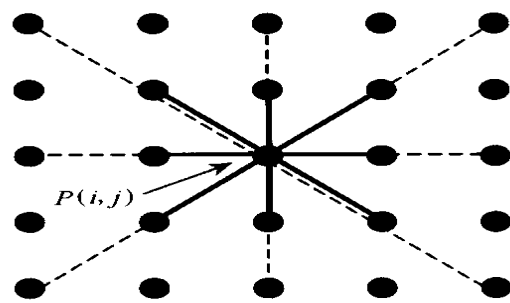


图 1 Provot 的 M-S 模型



注: 较短的实线是拉伸和剪切弹簧; 虚线表示弯曲和压缩弹簧

图 2 文献[13]的粒子模型

图 2 所示的连接关系有以下三种:

(1) 连接质点 $[i, j]$ 与 $[i+1, j]$, $[i, j]$ 与 $[i, j+1]$ 的弹簧, 称为结构弹簧;

(2) 连接质点 $[i, j]$ 与 $[i+1, j+1]$, $[i+1, j]$ 与 $[i, j+1]$ 的弹簧, 称为剪切弹簧;

(3) 连接质点 $[i, j]$ 与 $[i+2, j]$, $[i, j]$ 与 $[i, j+2]$ 的弹簧, 称为弯曲弹簧.

这三种弹簧分别用于与结构力(拉力或压力)、剪力和弯矩相关的计算.

文献[13]的模型与文献[12]的模型很相似, 区别在于文献[13]的模型把第(1), (2)种连接关系合并了, 又把其中的压缩力并入弯曲弹簧中, 并且弯曲弹簧增加了对角线方向的跨度为二的弹簧, 如图 2 所示. 从模拟的物理效果来说, 这些粒子模型几乎可以看作是一样的.

3 数值方法

建立了物理模型之后, 就可以建立运动方程来求解了. 运动方程的最基本的形式是牛顿运动方程, 其矩阵形式为

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

其中, \mathbf{F} 表示外力; \mathbf{E} 表示势能; \mathbf{M} 为质量矩阵; \mathbf{x} 表示位置, 上面的两点表示 \mathbf{x} 对时间的二阶导数.

式(1)一个微分方程(组), 有一套成熟经典的求解方法. 最简单明了的积分算法当属 Provot 所采用的显式欧拉法, 该算法计算速度快、并行性也很好. 但是, 根据线性微分方程理论, 其步长受弹簧刚度的限制, 一旦超过一个临界值, 算法就会失稳. 因此, 为取得较大的时间步长必须减小弹簧的刚度, 而小的刚度又会导致一种称为“超弹性”的效应, 即弹簧相对于其原长的变形太大, 因而大大降低了模拟的真实性(实际上, 布料不太可能出现变形很大的情况). 文献[12]采用约束变形的方法来解决这个问题, 该方法在每个时间步的运算完成后, 检测各质点的情况, 如发现存在变形过大的现象, 就修正该质点的位置, 使其限制在某个范围内, 其实际效果是将超弹性效应在整块布料内分散. 当超弹性效应只发生在局部的少数几个点时, 该方法取得了较好的效果; 但当布料受力比较大、超弹性现象发生比较多的时候, 文献[12]的方法就无能为力了.

从数值方法的理论可知, 隐式方法具有比显式方法高得多的稳定性. 因此, 文献[8]使用隐式方法

来积分, 在不降低刚度的条件下可以取得较大的时间步长, 然而稳定性仍不能保证. 文献[8]在每一步计算后都检查一遍稳定性, 一旦发现计算发散, 就动态地调整(减小)时间步长, 若干步之后再换回大的时间步长.

Choi 等^[13]在研究了前人对布料或薄板的褶皱现象的分析后认为, 由褶皱导致的结构性不稳定可能与压杆稳定原理有关. 因此, 他采用了两种不同的刚度: 较大的用于拉伸和剪切, 较小的用于弯曲和压缩, 从而提高了结构的稳定性.

上面所用的数值方法都是欧拉法, 为一阶精度. 隐式方法的稳定性较好, 相应地能适应的时间步长也比较大. 但是由于其初值需要经过若干步迭代估算得到, 因此开销比较大. 考虑到每一步计算后都要进行碰撞检测和处理, 采用较大的步长的优势是明显的. 为了找出一种最适合布料动画模拟的数值方法, Volino 等^[14]专门考察了几种常用的数值方法, 挑选了显式中点法(二阶精度)、5 阶精度的 Runge-Kutta 法和隐式欧拉法, 并在同一框架下做了一系列实验. 实验表明, 对于精度要求不太高的布料动画模拟, 隐式欧拉法是最适用的; 而如果对精度有较高要求的, 则应该采用 Runge-Kutta 法.

4 一些力的处理

内力或能量函数都是从力学的连续性方程中导出. 三角形或四边形等有限元网格的内力可以直接应用 Terzopoulos 等^[1-2]的公式导出, 中间可以进行一些处理, 舍弃对模拟影响不大的部分, 并对计算作一些优化. 质点-弹簧模型的内力公式极其简单, 只需将各个弹簧力共同作用到质点上即可. 因为各内力或能量函数的表示方法与所采用的具体物理模型密切相关, 所以本文不再对内力或能量函数作详细的分析, 只讨论对一些附加力的处理.

附加阻尼可以增加系统的稳定性. 阻尼表现了布料的硬度, 当模拟的布料较厚实时应当采用较大的阻尼. 但如果使用不当, 阻尼会明显降低模拟的真实感. 另外, 阻尼可以防止模拟布料表现出很大的不切实际的平面内振动. 通常, 附加的都是线性阻尼, 例如 $\mathbf{f}_i = -k_d(\mathbf{v}_i - \mathbf{v}_j)$. 其中 \mathbf{f}_i 为质点 j 对质点 i 的阻尼力; \mathbf{v}_i 和 \mathbf{v}_j 分别表示质点 i 和 j 的速度. 这个阻尼力是速度平面内方向的; 也可以在垂直方向加阻尼, 这样的阻尼对增加布料动画的稳定性很有效, 但容易使模拟布料变硬. 阻尼的物理意义是

弹簧对能量的耗散.

为了增加轻质布料的真实感,还可以加上空气阻力项.目前,还未见考虑流场的空气阻力系统的报道.一般采用的空气阻力项都是速度的线性项,其表达式阻尼力类似,只是相对速度换成了布料平面与气流间的相对速度.除了某些特殊情况,线性的空气阻力系统一般已经够用了.

很多场景中都有布料滑过桌面等道具的情况,因此考虑摩擦力是有必要的.计算摩擦力需要知道法向正压力,这个力很难求得,实际应用中通常用速度代替.

5 碰撞检测和处理

布料一般表示为一张网格曲面.由于它是一个柔性体,曲面的不同部分具有不同的运动,彼此没有严格的约束,因此除了检测织物与周围物体的相交外,还必须检测织物不同部分之间的相交,即自碰撞问题.碰撞检测和自碰撞检测必须进行大量的几何运算,成为布料动画系统的瓶颈之一.近 10 年来,研究人员已经在这方面作了大量的研究,提出一些实用的算法^[15-16].

5.1 碰撞检测

碰撞检测问题是 CAD 等领域的一个大问题,研究人员已经对其作了大量的研究,提出了一整套比较成熟的算法和理论.通常,碰撞检测通过多边形求交来判断是否发生碰撞,即测试网格的边界是否与另一个网格平面或边界相交或发生贯穿.这是一个比碰撞检测更基本的问题,有一系列加速判断相交的算法.常用的加速算法有两种:(1)层次包围盒算法;(2)基于体素(分解模型)的算法.由于布料模型没有“内部”,因此碰撞检测会比一般的变形体碰撞检测更复杂.

下面以 Bridson 等^[15]的方法为例,介绍判断两个网格之间的逼近和碰撞检测的基本算法,在该文中,布料被设定为具有厚度 h .

我们用 \mathbf{x}_{ij} 表示 $\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j$.为了检测某个点 \mathbf{x}_4 到某个法向量为 \mathbf{n} 的 $\triangle \mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2 \mathbf{x}_3$ 的接近程度是否小于 h ,先检查该点到三角形所在平面的距离是否小于 h ,若 $|\mathbf{x}_{43} \cdot \mathbf{n}| < h$,则把该点投影到平面上并计算投影关于三角形的重心坐标

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{13} \cdot \mathbf{x}_{13} & \mathbf{x}_{13} \cdot \mathbf{x}_{23} \\ \mathbf{x}_{13} \cdot \mathbf{x}_{23} & \mathbf{x}_{23} \cdot \mathbf{x}_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{13} \cdot \mathbf{x}_{43} \\ \mathbf{x}_{23} \cdot \mathbf{x}_{43} \end{bmatrix},$$

$$w_1 + w_2 + w_3 = 1.$$

这是用最小二乘法在平面上找最接近 \mathbf{x}_4 的点的正态方程.如果重心坐标都在 $[-\delta, 1+\delta]$ (δ 为 h 除以三角形的一个特征长度)内,就表示这个点足够接近三角形.

为了检查一条边 $\mathbf{x}_1 \mathbf{x}_2$ 是否接近另一条边 $\mathbf{x}_3 \mathbf{x}_4$,我们找一个由两个各在一条边上的点组成的点对,这两个点之间的距离是最近的;然后再计算它们之间的距离.如果两条线段平行,计算很简单;否则,就找到线段所在直线上的两个点,这两个点间的距离最小

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{21} \cdot \mathbf{x}_{21} & -\mathbf{x}_{21} \cdot \mathbf{x}_{43} \\ -\mathbf{x}_{21} \cdot \mathbf{x}_{43} & \mathbf{x}_{43} \cdot \mathbf{x}_{43} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{21} \cdot \mathbf{x}_{31} \\ -\mathbf{x}_{43} \cdot \mathbf{x}_{31} \end{bmatrix}.$$

如果这两个点都在线段内,问题得到解决;否则,就用比较靠近的端点代替.最后能得到两个点 $\mathbf{x}_1 + a\mathbf{x}_{21}$ 和 $\mathbf{x}_3 + b\mathbf{x}_{43}$.

为了检测移动点和移动三角形,或两个移动的边之间的碰撞,我们先找到 4 点共面的时刻,假设在碰撞时间步内的速度不变.这可以通过解一个三次方程 $(\mathbf{x}_{21} + t\mathbf{v}_{21}) \times (\mathbf{x}_{31} + t\mathbf{v}_{31}) \cdot (\mathbf{x}_{41} + t\mathbf{v}_{41}) = 0$ 来实现.舍弃 $[0, \Delta t]$ 之外的解,剩下的用于进行逼近性检测.在时间步的结束点也作一次逼近性检测,以免误差隐藏了两个时间步之间边界上的碰撞.

为了加速检测过程, Bridson 等^[15]采用轴向层次包围盒技术. Choi 等^[13]的算法则采用基于体素的算法来加速碰撞检测:在对包含布料的空间进行体素化后,把每一个粒子和三角形以及它们在空间坐标上相对应的体素登记下来;然后在每个体素上独立地进行碰撞检测.这种体素化方法定位碰撞非常高效,显示出接近线性的性能,但是占用内存量非常大.

5.2 碰撞处理

对应检测到的碰撞作相应的处理,以避免发生实际碰撞.通常可根据碰撞检测的结果以及当时的实际环境,确定检测到的、发生碰撞的粒子对将做的移动,然后通过修正该粒子对的速度来避免碰撞的发生.

现仍以文献^[15]为例讨论实际的处理方法.在碰撞处理中常常要用到布料内部的两个点,计算它们之间的相对速度等.但是,通常不能直接取得或改变这两个点的状态,而是必须用它们所在的三角形或边的端点替代.

为了计算三角形内或边上一点的速度,该文采用线性插值,这在仿射变换下是精确的.具有面积

坐标 w_1, w_2, w_3 的、在 $\triangle x_1 x_2 x_3$ 内的一点的插值速度为 $w_1 v_1 + w_2 v_2 + w_3 v_3$, 同样地, 边 $x_1 x_2$ 上的分割比为 a 的点的速度为 $(1-a)v_1 + av_2$. 由于 w_i 和 a 都是固定的, 因此它们对时间的导数不会出现.

如果有一个冲量 I 作用在布料内的两个点上 (如, I 作用在第一个点上而 $-I$ 作用在第二个点上), 则用作用在三角形或边的端点上的加权冲量代替. 对点-三角形情况, 当 $\triangle x_1 x_2 x_3$ 内一点 (其重心坐标为 w_1, w_2, w_3) 与点 x_4 相互作用时, 调整后的冲量

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{2I}{1 + w_1^2 + w_2^2 + w_3^2}, \\ v_i^{\text{new}} &= v_i + w_i(I/m), \quad i = 1, 2, 3, \\ v_4^{\text{new}} &= v_4 - I/m. \end{aligned}$$

这里假设所有的点都具有质量 m . 对于边-边的情况, 设在边 $x_1 x_2, x_3 x_4$ 上的两个点的相对位置分别为 a 和 b , 则调整后的冲量为

$$\begin{aligned} \bar{I} &= \frac{2I}{a^2 + (1-a)^2 + b^2 + (1-b)^2}, \\ v_1^{\text{new}} &= v_1 + (1-a)(I/m), \\ v_2^{\text{new}} &= v_2 + a(I/m), \\ v_3^{\text{new}} &= v_3 + (1-b)(I/m), \\ v_4^{\text{new}} &= v_4 + b(I/m). \end{aligned}$$

实际上, 由于碰撞处理相当耗时, 因此多采用排斥力来减少碰撞数量. 排斥力是指人为添加的、只有当一对布片接近到一定程度才起作用的力. 有两种方法设置排斥力: 基于非弹性碰撞和基于弹簧. 此外, 由于碰撞处理后可能会产生新的碰撞, 因此需要迭代几次 (通常采用共轭梯度迭代). 对于一些特殊的多碰撞区域 (同时发生几个碰撞) 需要迭代多次的情况, Provot^[16] 提出了刚性碰撞区域的概念, 将多碰撞涉及的节点收集起来形成一个碰撞区域, 并将该区域作为刚体, 以此避免反复迭代.



6 后期处理和研究动向

后期处理包括布料与角色在场景中的融合、布料的纹理绘制等. Hoshino 等^[17]提出了一种布料和人在场景系列中的融合算法, Zhong 等^[18]提出了一种绘制毛织物的方法. 这些后期处理不单纯属于本文所研究的布料动画技术范围, 但与布料动画的表现和应用密切相关.

布料动画的框架已经比较成熟, 近年来有关布料动画的论文基本上都采用物理模型的框架. 有些技术已经能产生相当好的结果, 如图 3, 4 所示, 只是算法在适用范围等方面还有些小问题. 另外, 当前的技术在网格稍微大一点的时候, 就没有能力实时计算、产生动画了; 而在游戏、服装 CAD 的展示系统等应用中, 要求能交互式地、实时地生成动画. 因此, 当务之急是提高算法的速度. 目前大部分文献都是研究速度问题的, 其中大多从数值算法上着手. 成迟慧等^[19]则在模型上下功夫, 他们采用了一种只能弯曲而在长短上不会有变化的称为“半刚性样条”的模型来取得近实时的计算速度.

另外一个方向就是提高模拟的真实程度. 由于所采用的网格相当粗疏, 因此无法生成足够的细节, 如布料张紧形成的细小褶皱等. 若用于要求比较高的行业, 如电影动画, 现在所能产生的结果还不能满足要求. Hadap 等^[7]曾尝试生成网格内褶皱. 细小褶皱的信息量很大, 比较现实的考虑是在绘制时生成较为适宜.

此外, 当前布料模拟系统的适用范围也相当小, 一些较为特殊的、但在现实生活中常见到的织物, 如丝绸等, 难以用现在的模拟系统模拟, 原因是因为这些模拟系统采用的空气阻力模型简单, 并且为了追求计算速度尽量采用了较大的时间步长.



图 3 文献[8]中布料动画例子

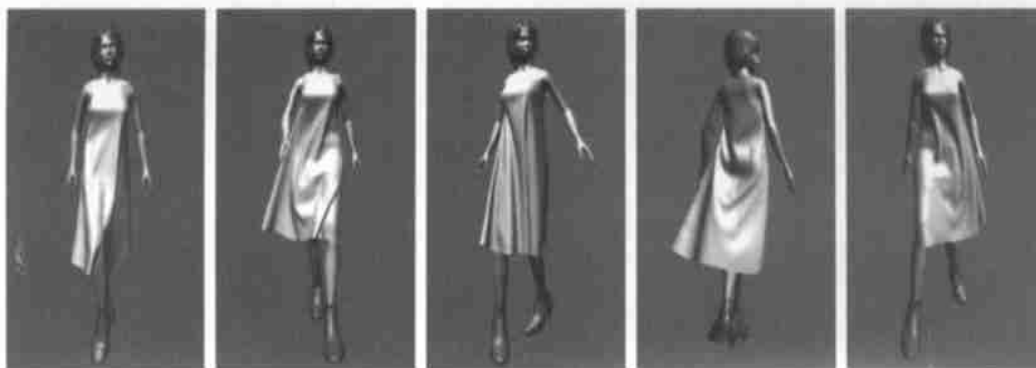


图4 文献[13]中布料动画例子

目前有许多研究人员正在继续这方面的工作,有些已经取得了不错的成果.但是,这些算法通常只对一部分对象作优化,通用性不强.正因为如此,目前一些商品化系统采用的布料动画模拟还是最简单的 Provot 或 Baraff 的方法.因此,设计一个通用性比较好的、比较稳定实用的系统,也是今后应该努力的方向之一.

参 考 文 献

- [1] Terzopoulos D, Platt J C, Barr A H. Elastically deformable models [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Anaheim, CA, 1987. 205~214
- [2] Terzopoulos D, Fleischer K. Deformable models [J]. The Visual Computer, 1988, 4(6): 306~331
- [3] Weil J. The synthesis of cloth objects [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 49~54
- [4] Hinds B K, McCartney J. Interactive garment design [J]. The Visual Computer, 1990, 6(2): 53~61
- [5] Hinds B K, McCartney, Woods G. Pattern developments for 3D surfaces [J]. Computer-Aided Design, 1991, 23(8): 583~592
- [6] Ng H N, Grimsdale R L. GEOFF—A geometrical editor for fold formation [A]. In: Proceedings of International Computer Science Conference(ICSC), Hong Kong, 1995. 124~131
- [7] Hadap S, et al. Animating wrinkles on clothes [A]. In: Proceedings of the Conference on Visualization '99: Celebrating Ten Years, San Francisco, CA, 1999. 175~182
- [8] Baraff D, Witkin A. Large steps in cloth simulation [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Orlando, FL, 1998. 106~117
- [9] Volino P, Courchesne M, Magnenat-Thalmann N. Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Los Angeles, CA, 1995. 137~144
- [10] Breen D E, House D H, Wozny M J. Predicting the drape of woven cloth using interacting particles [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, Orlando, FL, 1994. 365~372
- [11] Kawabata S. The Standardization and Analysis of Hand Evaluation [M]. Osaka: Textile Machinery Society of Japan, 1980
- [12] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [A]. In: Proceedings of Graphics Interface '95, Québec, 1995. 147~155
- [13] Choi K, Ko H. Stable but responsive cloth [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Antonio, Texas, 2002. 604~611
- [14] Volino P, Magnenat-Thalmann N. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation [A]. In: Proceedings of the Conference on Computer Graphics International, Hong Kong, 2001. 265~274
- [15] Bridsou R, Fedkiw R, Anderson J. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation [A]. In: Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, San Antonio, Texas, 2002. 594~603
- [16] Provot X. Collision and self-collision handling in cloth model dedicated to design garment [A]. In: Proceedings of Graphics Interface '97, Kelowna, B C, 1997. 177~189
- [17] Hoshino J, Yamamoto M, Saito H. A match moving technique for merging CG cloth and human movie sequences [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12(1): 23~29
- [18] Zhong H, Xu Y Q, Guo B N, et al. Realistic and efficient rendering of free-form knitwear [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12(1): 13~22
- [19] Cheng Chiyi, Shi Jiaoying, Xu Yingqing, et al. Physically based real-time animation of curtain [J]. Journal of Software, 2000, 11(9): 1228~1236(in Chinese)
(成迟慧, 石教英, 徐迎庆, 等. 基于物理模型的窗帘运动实时动画[J]. 软件学报, 2000, 11(9): 1228~1236)