基于粒子系统的快速而有效的布模拟算法

张建忠! 刘二莉! 张君琦² (北京航空航天大学工业设计系 北京 100083) (北京贝尔科技集团 北京 100044)

E-mail zhangjianzhong@bear.com.cn

摘要 该文从逼真模拟和实时性两个方面入手,通过对布匹动力学的物理模型的简化,求解微分方程,实现了基于粒子系统的快速而有效的布模拟算法,模拟了旗帜飘动,窗帘动画和桌布,悬挂布等现象。

关键词 布匹的逼真模拟 实时性 碰撞检测 碰撞校正

文章编号 1002-8331-(2003)35-0066-05 文献标识码 A 中图分类号 TP391

A Fast and Effective Algorithm of Simulating Cloth

Zhang Jianzhong¹ Liu Erli¹ Zhang Junqi²

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics Beijing 100083)
(Beijing Bear Technology Group Beijing 100044)

Abstract: This paper realizes a fast and effective algorithm of simulating cloth throughout simplifying the physical model of the cloth. The study is based upon realistic simulating and real-time rendering. And the paper simulates some phenomena about cloth such as flag flapping curtain animation table cloth and hanging cloth.

Keywords: Realistic simulating Real-time Collision detecting Collision correcting

1 引言

用计算机模拟布的运动,由于涉及因素较多,物理模型复杂,所以常见的布匹模拟算法的计算量都很大,这就使得实际应用中的布匹模拟算法一般只能产生静态图像。在这方面,国外从80年代以来已经有很多研究成果[123]。这些成果被用于服装设计,纺织物检测等许多领域。但是,如何实时地模拟布匹运动,仍有许多工作要做,因为这方面有很多需求。例如在常见的有关角色的动画中,各种人物的衣服显得十分僵硬,影响了动画的整体效果,即使使用 Maya,3DMAX SoftImage等大型软件的衣服插件在图形工作站上也需要长时间的渲染,才能产生像《最终幻想》中的女主角衣服随风飘动的效果。但是如何在普通PC上实时地、高质量地模拟布匹运动呢,这已经成为计算机图形学领域里现在关注的一个热点。

该文的出发点就是研究一种快速而有效的方法,以便实时、逼真地模拟布匹运动。其关键在于简化了原有的基于粒子系统的布匹物理模型,显著降低了计算量,使模拟可以实时地进行;另外,通过考虑风力、碰撞检测、纹理映射等逼真化因素,使用数值分析理论中的显式求解微分方程的方法,实现了对布匹运动快速而有效的模拟,达到了该研究的目的。

2 基本物理模型的简化

2.1 原有的基于粒子系统动力学的布匹物理模型

如图 1 所示,可以建立基于粒子系统的布匹模型。在该粒子系统中,每个粒子代表了布匹中各条丝线的交点,通过对每个粒子进行受力分析,计算它们的位移和速度,大量的粒子组

合在一起,就可以模拟布匹的整体运动。对每个粒子可以做如 下的受力分析:

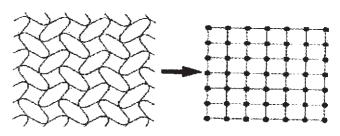
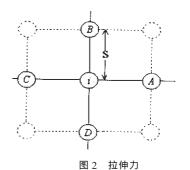


图 1 基于粒子系统的布匹模型

2.1.1 拉伸力

如图 2 所示,在每个粒子与其相邻的四个粒子之间加上弹簧的作用,来表示布匹的丝线的拉伸力,这些弹簧是相互作用的,但具有相同的弹性系数和衰减系数。



作者简介:张建忠(1977-),男,硕士生,研究方向为计算机图形学及科学计算可视化。刘二莉,副教授,硕士生导师,研究领域为计算机图形学,虚 拟现实和科学计算可视化。张君琦,硕士,研究领域为计算机图形学,图形图像处理,多媒体等。

根据弹簧理论 得出弹力的计算:

$$F_{stretch} = K_s * (s-l) - K_d * v$$
 (1)

K₂:弹性系数 ፮:两个粒子间的距离 ៛:弹簧的自由长度;K₂:弹簧的衰减系数 ᢧ:粒子的运动速度。

由弹力产生的形变能量为:

$$E_s = \int F_{stretch} * ds$$

如果综合了周围四个粒子的作用,则拉力产生的总能量表示如下:

$$U_{stretch} = \sum E_{si}$$
 ($i=0$,1 ,2 ,3)

需要指出的是,对相互作用的两个粒子而言,他们受的弹簧力大小相等,方向相反。

2.1.2 剪切力

剪切力是用力矩的作用形式体现的,如图 3 所示,在对角线的粒子之间存在剪切力矩,这个力矩的主要作用是控制布匹的基本形状。

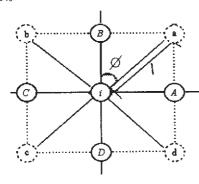


图 3 剪切力矩

剪切力矩的计算:

$$T = F^* l^* \cos \phi \tag{2}$$

F:与布匹材料本身有关的量,根据不同的纺织物,根据试验测出 1:对角线上两个粒子的距离 h 表示这两个粒子位置之间的夹角。

由剪切力矩产生的能量为:

$$E_t = \int T^* d\phi = \int F^* l^* \cos\phi d\phi$$

如果综合了周围四个粒子的作用 ,则剪切力产生的总能量表示如下:

$$U_{shear} = \sum E_{ii}$$
 ($i=0$,1 ,2 ,3)

2.1.3 弯曲力

弯曲力也是以力矩的作用形式体现的,如图 4 所示,在相隔粒子间存在弯曲力矩,这个力矩的主要作用是控制布匹在地面上运动时不会滚成一团。

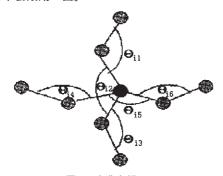


图 4 弯曲力矩

根据纺织物受力理论,弯曲力矩产生的能量计算如下:

$$E_b = M * K * \sigma * \frac{\sigma}{2} \tag{3}$$

 E_b 表示产生的能量 M 是弯曲力矩是与布匹材料有关的参数 K 表示曲率 σ 表示材料系数。该公式是由纺织试验得出的经验公式。

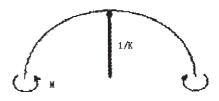


图 5 弯曲力矩能量的计算

如果综合了周围四个粒子的作用 ,则弯曲力矩产生的总能量表示如下:

$$U_{bend} = \sum E_{bi}$$
 (i =0 ,1 ,2 ,3)

另外再考虑由重力产生的能量 $U_{gravity}$,则布匹的受力可以用能量公式综合如下:

$$U=U_{stretch}+U_{shear}+U_{bend}+U_{gravity}$$

用上述布匹物理模型模拟布匹运动,理论公式复杂,计算量大,所以只有在静态图像显示和对实时性要求较低的场合使用。但是由于它的理论基础与实际情况相似,所以在显示时具有相当高的逼真程度。

现在,如果要在普通 PC 上实现实时的布匹运动模拟,就必须对上述物理模型进行简化,只有这样才能从根本上减少计算量,另外,必须要指出的是,简化的前提是不能过度影响模拟效果的逼真程度。

2.2 简化的物理模型

从前边的分析中,如果对相邻节点间加上弹簧作用,就可以对拉伸力以弹簧原理进行分析。这就给人们一个提示,能不能对另外两个力也用弹簧理论分析呢?这样就可以不用再计算能量,而直接通过对粒子的受力来进行运动判定。

为了回答这个问题,可以从这两个力的作用效果进行分析。剪切力矩的作用是保持布匹的形状,使其在拉伸中不会变成一根丝线,这相当于在对角线方向的粒子增加了一对约束,如果从能量的角度看,根据公式(2),可以推出能量公式:

$$E=T*\sigma=F*r*\sigma=F*\Delta l$$

此时就可以用弹簧理论来进行简化了。相当于在两个粒子中加上一个弹簧,该文也将其称为剪切力。对弯曲力矩来说,它的目的是使布匹在掉到地面上不至于滚成一团,使相隔粒子间有约束的效果,这样从能量的角度看,也可以用弹簧的弹性能来代替实际的弯曲力矩产生的能量,该文将这种简化为弹簧力的弯曲力也称之为弯曲力。

至此,可以将基本模型中的力都用弹簧力来表示,它的好处有两点,一是统一了力的计算方法,二是降低了计算量,这样就提高了运算速度,同时还能满足逼真性要求。这些分析的合理性都可以从下面的图形试验中得到检验。

2.3 简化模型的模拟效果分析

根据分析,笔者用网格点创建了一块长方形的布,对其加上三种弹簧的作用力和重力的不同组合,产生了不同的效果图,如图6789,10。在图6中没有加任何作用力,可以看到就是布的原始形状。在图7中单纯加上拉伸力,布只在一个平

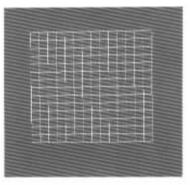


图 6 原始形状网格

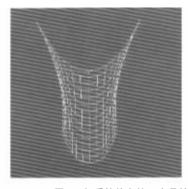


图 7 仅受拉伸力的两点悬挂

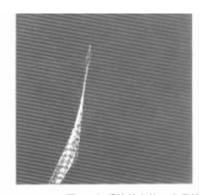


图 8 仅受拉伸力的一点悬挂

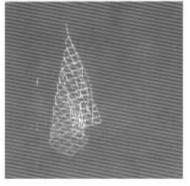


图 9 受拉伸力和剪切力的一点悬挂

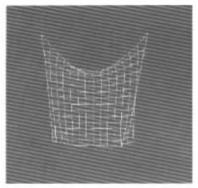


图 10 受拉伸力和剪切力的两点悬挂 图 11 受拉伸力和剪切力的网格掉在地面上呈卷曲状

面内发生拉伸变化,另外如果只用一点悬挂,则整个布匹会变成一根绳子如图 8。在图 9 中,加上了剪切力的作用,则可以解决此问题。图 10 是用两点悬挂时加上剪切力后的效果。但是在只有这两种力的情况下,如果让布匹掉到地面上,则会产生图 11 所示的卷成一团的情况,为了解决这个问题,添加了弯曲力的作用,则布匹在地面的运动效果大为改善。改进后的效果如图 12。

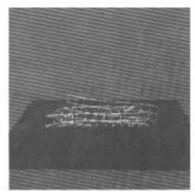


图 12 受拉伸力,剪切力和弯曲力的网格掉在地面上

这样从悬挂,地面运动各种情况证明了简化模型的合理 性。综合笔者的结论可以有如下的公式:

F=m*a $F=F_{stretch}+F_{sheat}+F_{bend}+F_{gravity}+F_{other}$ $=F_{spring}+F_{gravity}+F_{other}$ $F_{spring}=K_{s}*\Delta l-K_{d}*V$ (4)

 K_s 弹簧的弹性系数 K_d 弹簧的衰减系数 Δl 弹簧的拉伸长度 V 粒子的相对速度。

68 2003.35 计算机工程与应用

 F_{other} 表示其他外力,例如风力,人手的拉力。

3 逼真化因素

从日常生活分析来看,要使布匹的运动更具真实性,风力是笔者考虑的一个重要方面,另外用合适的纹理图则更能体现布匹的美观效果,而运动阻尼也是体现动力学特性的一个重要方面。该文就是从这三个方面着手,使笔者的布更像一块真正的布。

3.1 添加风力的影响

由于该文的模型中考虑的是粒子的运动,因此如果直接对它们加风力的作用,就很难考虑风力方向与粒子受力面的关系(粒子是没有大小的)。为了解决这个问题,将组合成三角形的三个粒子综合考虑。

如图 13 所示,先根据 a b c 三个粒子的位置得出整个三角平面的法线 N ,然后计算出风力 F_{uing} 在法线方向的分量大小 $F_{N}=(F_{uing}\cdot N)$ 再将其作用到法线方向上,就是对这三个粒子的作用力,将其平均分成三份,可以得出每个粒子承担的风力。

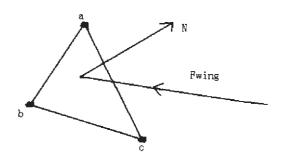


图 13

3.2 运动阻尼因素

由于布在运动中肯定受到阻力等因素的影响,为了更全面 地考察布匹的运动,这一因素也必须考虑,对空气阻力的影响, 理论上应该是与粒子的运动速度二次有关,但在低速情况下, 认为它与速度为线性关系,公式为:

$$F_{damp} = K_{damp} * V$$

 K_{dem} 是阻尼系数,可以提供一个接口,让用户调节这一变量。

3.3 合适的纹理映射

要想得到一块真实感很强的布,除了控制它的形状外,也 应该考虑它的图案 因此给模拟的网格加上合适的纹理映射非 常重要。该文采用了较为完善的纹理映射方法。首先每个网格 点的纹理坐标数尽量精确,另外还使用了GOURAUD颜色插值。

4 碰撞检测与校正

布的运动如果没有碰撞检测这一项 则很难将其变为衣服 "穿"到角色动画中的人物身上。因此从布模拟的发展趋势看, 碰撞检测及其校正将是布匹模拟研究中的一个重要方向。

该文主要考虑了两种碰撞检测:平面检测和小球检测。

4.1 平面检测

该文的布运动在代表一间房子的长方体中,这样布在运动 时 必须考虑它与墙壁和地面的碰撞问题。具体方法如下:首先 将粒子与平面的位置关系定义成三种:无碰撞,碰撞,穿透;同 时设定一个碰撞范围值 Depth。将平面定义为 AX+BY+CZ+D=0 将粒子的位置(X_{pos} X_{pos} Z_{pos})代入平面方程中,得出结果:

$$P=AX_{pos}+BY_{pos}+CZ_{pos}+D$$

然后判断 P与 Depth 的关系 ,如图 14 所示。

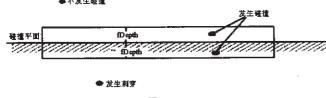


图 14

- (1)如果 P<-Depth ,则说明粒子已穿透平面 ,则记标记位 为穿透,准备进行穿透校正。
- (2)如果-Depth<P<Depth,则说明粒子与平面可能发生碰 撞 此时还需判断粒子的速度方向 如果方向为离开平面 则不 会发生碰撞,因为下一步长中肯定离开平面,反之,则记标记位 为碰撞,准备进行校正。
 - (3)如果 P>Depth 则没有发生碰撞,不做任何处理。

4.2 碰撞球检测

对碰撞球而言,主要考虑粒子与球心的距离和半径的关 系。首先应该计算出粒子与小球球心的距离与半径的差,再判 断它与前面定义的碰撞范围值 Depth 的关系。穿透和无碰撞检 测与平面检测相同,区别主要在有可能发生碰撞时,做进一步 的判断时,遵循的原理为:

判断 P=V·(Pos-SpherePos), 其中 Pos 表示粒子的位置, SpherePos 表示球心的位置。

只有在 P<0 时才为碰撞。

4.3 碰撞校正

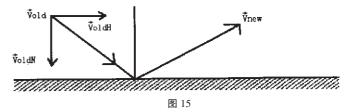
校正主要分成两个方面,一是碰撞校正,一是穿透校正。对

碰撞校正而言,粒子在发生碰撞后,速度会发生变化,它与碰撞 点的法线和碰撞系数有关,如图 15 所示,用公式表示如下:

$$V_{neu} = V_{neu}N + V_{neu}H$$

 $V_{neu}H = V_{old}H$
 $V_{neu}V = V_{old}N \times (1.0 - K_r)$
 $V_{neu} = V_{old}M + V_{old}V \times (1.0 - K_r)$

K, 为碰撞系数 ,表示了碰撞后对速度的影响 ,V, 表示速度 在法线方向上的分速度,可以看出K,必须要大于1。



对穿透校正而言,只能减小步长,让粒子的位置变化减小, 将其由穿透改变为碰撞,用上述碰撞检测的方法再校正。

5 交互作用

如果将以上介绍的部分组合起来,可以构成一块在自然状 态下的布匹,但是这样做会使用户很难干预布匹运动,可以想 象掉在地面上的一块布,人们用手拾起来时的情景,这可能是 每个用户的想法。该文用鼠标实现了人与布匹的交互,通过鼠 标拾取 拖动布匹 整块布就可以在空间中按照用户的想法随 意运动。这一点是靠增加新的作用力 F_{max} 实现的。这个力的关 键在于寻找到受力的粒子,同时根据鼠标的状态,给出合适 的力。

6 微分方程的求解

该文的核心动力学公式就是牛顿第二定律 $:F=ma \; a=v'=$ p'' p 表示位置 p'' 表示粒子的质量。在已知 t_0 时刻的位置 P_0 和 速度 V_0 ,求在 $t=t_0+\Delta t$ 的位置 P_t 和速度 V_s 。根据数值分析理论 , 这样的微分方程可以用显式微分方法求解,常用的方法有:向 前欧拉法,中点公式,龙格-库塔。

以欧拉法为例:

由于所进行的均为矢量计算,所以应该分成XYZ=个 方向分别计算。

具体的迭代过程如下:

已知 t_n 时的位移 P_n 和速度 V_n ,求解 $t_{n+1}=t_n+h$ 时的位移 P_{n+1} 和速度 V_{min} 。 h 表示步长。

首先根据 P_n 和速度 V_n ,计算出 t_n 时的受力 F_n ,然后得出 t_n 时的加速度 a_n 。 然后计算 $V_{n+1}=a_n*h+V_n$,最后得出位移 $P_{n+1}=V_{n+1}$ $*h+P_{no}$

一般眼观接受的步长为 0.02s, 这样的动画效果比较符合 视觉习惯。

7 程序流程和效果图

依据图 16 所示流程图,该文采用 VC++6.0 和 DirectX8.0 在 Pentium550 CPU+Matrox G450 显卡上实现了效果逼真的布 匹运动的实时动画,在20*20的网格状况下达到的速率为 25fps。图 17~23 是几张典型实例图 ,分别模拟了旗帜、窗帘、桌 布和悬挂的布。

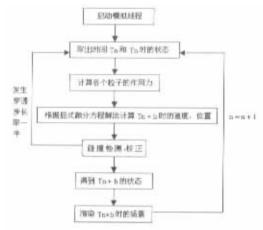


图 16 程序流程



图 17 添上纹理后的布

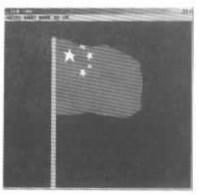


图 18 受各种力综合作用的旗帜效果 1

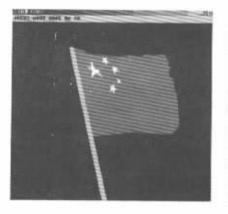


图 19 受各种力综合作用的旗帜效果 2

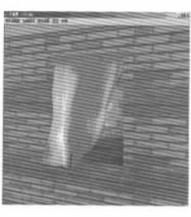


图 20 窗帘实时运动画面

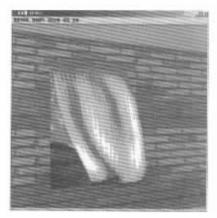


图 21 换观察角度后窗帘实时运动画面

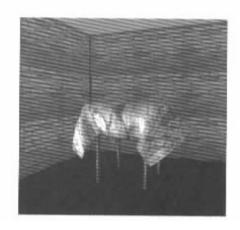


图 22 铺在桌面上的布

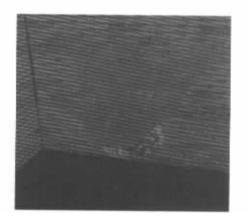


图 23 两点悬挂的布与小球发生碰撞的实时画面

8 结束语

布匹的模拟是计算机图形学中的一个热点。逼真、实时地模拟布匹运动是图形学研究的一个重要方向。该文通过简化物理模型,改进了算法,提高了速度,实现了常见的布匹运动。但是要想将布匹变成动画中人物造型的衣服,还需要对各种复杂情况进行碰撞检测,同时,显式微分法稳定性不如隐式方法,如何将隐式微分法与该模型结合,这些都是以后研究的方向。

(收稿日期:2003年1月)

参考文献

- 1.B Eberhardt ,A Weber ,W Strasser.A fast ,flexible ,particle-system model for cloth draping[J].IEEE Computer Graphics and Applications , 1996 ;16 52~59
- 2.David Baraff ,Andrew Witkin.Large Steps in Cloth Simulation[C].In: SIGRAPH98 ,Orlando ,1998 :19~24
- 3.D Terzopoulos J C Platt A H Barr. Elastically deformable models[C]. In Computer Graphics proc SIGGRAPH ,1987 21 205~214