

文章编号: 0253-9721(2008)07-0076-07

织物物理模拟与三维服装实时仿真技术

柳 杨^{1,2}, 孙守迁¹, 徐爱国¹

(1. 浙江大学 计算机科学与技术学院, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江科技学院 信息与工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘 要 针对织物物理建模的计算效率和稳定性问题, 提出基于约束的织物质点弹簧模型。以简单几何实体球和圆柱为例, 说明处理织物可变形体与环境对象碰撞的总体策略, 结合实体碰撞对物理模拟流程进行总结性描述。实验结果表明, 该建模方法相对于织物的几何复杂度有接近线性的计算效率, 因此很适合于实时仿真环境。将上述研究成果集成应用到三维服装仿真环境中, 给出了验证实例。

关键词 织物; 物理模拟; 碰撞检测; 三维服装仿真

中图分类号: TS 941.26 文献标识码: A

Cloth physical modeling and 3-D garment real-time simulation

LIU Yang^{1,2}, SUN Shouqian¹, XU Aiguo¹

(1. College of Computer Science and Technology, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China;

2. School of Information and Electronic Engineering, Zhejiang University of Science and Technology, Hangzhou, Zhejiang 310023, China)

Abstract For computational efficiency and stability of cloth physical modeling, proposed a cloth mass-spring model based on constraint. Taking geometry sphere and cylinder as examples, the paper explains the whole strategy which is used to deal with cloth deformable bodies colliding with environment object. The procedure of physically based simulation is described. The experimental results reveal that the computed data according to the model is very close to the actual values in spite of the complexity of the cloth geometry and it is suitable for real-time simulation. The above research results are applied to 3-D garment simulation environment, and examples are presented.

Key words cloth; physically based simulation; collision detection; 3-D garment simulation

基于物理的三维服装仿真是虚拟现实和计算机图形学领域的研究热点之一, 作为三维服装 CAD 系统集成的核心部分, 它可以有效克服传统二维 CAD 从前期设计到后期造型存在的一系列直观性差和效率低的缺陷。此外, 实现三维人体着装的动静态模拟, 让设计师和客户在计算机屏幕前直接从各个方向和角度观看穿着效果, 并通过实时交互对服装的款式或尺码进行选择 and 修改, 这些功能无疑会有更广泛的应用前景, 例如基于互联网的服装个性化订制、产品销售和虚拟展示等等。然而, 服装物理仿真通常计算量庞大, 如何在低端硬件平台或交互式环境(例如普通 PC 或视频游戏)进行高质量模拟是一

个新的挑战。本文关注的焦点是三维服装仿真, 以物理模拟方法为主, 而对真实感和实时性的取舍, 更侧重于后者。

1 织物物理建模

三维服装实时仿真中, 织物建模是非常重要的研究课题。对织物建模的尝试源于 1986 年 Weil 提出的一个纯几何模型^[1], 它主要是计算 2 个约束点之间的悬链线, 然后通过迭代细分来描述织物当前的褶皱状态。由于纯几何模型过于简单, 完全忽略了织物本身的物理特性, 随后出现了基于物理的织

收稿日期: 2007-07-09 修回日期: 2008-02-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60533080)

作者简介: 柳杨(1978—), 女, 讲师, 博士生。研究方向为虚拟人技术、计算机图形学。孙守迁, 通讯作者, E-mail: ssqy@263.net。

物模型。

Terzopoulos 首先引入弹性变形模型, 用曲面来模拟织物^[2]。应用这种连续模型可以得到逼真的织物仿真效果, 然而模拟系统往往需要构造参数化局部仿射坐标系以及求解规模较大的线性或非线性方程组, 由此带来的计算量非常大, 通常会严重制约系统的实时性, 因此连续模型更多地被应用于对真实感要求比较高的离线计算系统, 也包括一些以研究织物材料特性为目的而构建的力学模拟环境。

现有的计算机硬件条件下, 还无法利用连续模型生成交互式织物仿真动画, 为此有人将相对比较成熟的粒子系统模拟技术引入到织物物理建模中, 通过降低模拟的精确性来提高计算效率。Provot 提出了针对织物的质点弹簧模型^[3]; Volino 将质点弹簧模型扩展到非结构化的三角形网格^[4]; Cordier 等提出了一种混合建模方法^[5], 该方法针对服装仿真, 根据服装相对于角色模型的摆动幅度将其划分为三类区域, 然后用不同的方法进行模拟; Kang 等通过褶皱三次样条曲线插值来提高织物模拟的真实感^[6-7]。

1.1 基于约束的织物物理模拟

为了保证系统的实时性, 选择最简单的粒子系统-质点弹簧模型。图 1 是建立在三角网格上的织物质点弹簧结构, 网格顶点对应物理模型质点, 边定义为拉伸剪切弹簧, 2 个相邻三角形非公共顶点的连接线段定义为弯曲弹簧。

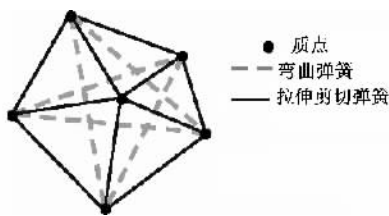


图 1 织物质点弹簧模型的结构

Fig.1 Construction of cloth mass-spring model

对于每一个质点, 最初考虑的外力包括重力 $F_{Gravity}$ 和阻尼力 F_{Damp} 。总的外力 $F_{External}$ 计算如下:

$$F_{External} = F_{Gravity} + F_{Damp} \quad (1)$$

内力主要归结为弹簧的弹力。在本模型中, 内力不被显式计算, 而是作为一个相对约束条件通过弹簧迭代校正过程体现, 该校正过程如图 2 所示。

非线性弹簧内力是影响微分方程数值求解稳定性和限制积分时间步长的主要因素, 本模型直接通过逆向动力学约束来模拟内力, 避免了对它的显式计算。重力等外力, 都作为相对约束引入, 结合

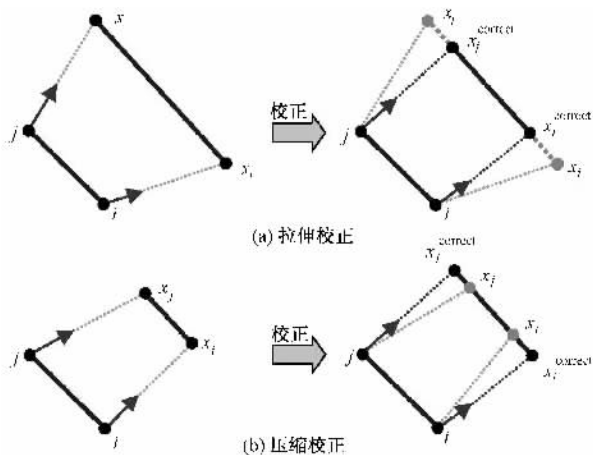


图 2 弹簧校正

Fig.2 Spring correction. (a) Stretching correction; (b) Compression correction

Verlet 数值积分器, 模拟系统可以在较大程度上保持稳定。该模型可以采用较大的时间步长生成织物动画, 总体计算量小, 能够满足服装仿真应用的速度需求。

1.2 流体外力模型

为了增强模拟的真实感, 增加了非线性流体外力, 例如风力。作用在物体上的风力可以分解为 2 个组分^[8]: 提升力 F_L 和拖拽力 F_D , 如图 3 所示。

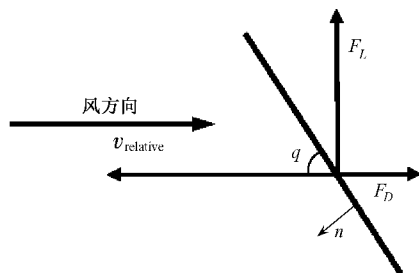


图 3 对作用于物体表面的风力进行分解

Fig.3 Analyzing windpower on the surface of the object

拖拽力 F_D 与相对速度 $v_{relative} = v_{object} - u$ 的方向相反, v_{object} 为物体速度, u 是风速。托拽力的计算公式为

$$|F_D| = \frac{1}{2} C_D \rho |v_{relative}|^2 S \sin\theta \quad (2)$$

式中: C_D 为拖拽力系数; ρ 为流体密度; S 为物体表面积; θ 为相对速度与物体表面的夹角。

提升力 F_L 与相对速度 $v_{relative}$ 的方向垂直, 提升力的计算公式为

$$|F_L| = \frac{1}{2} C_L \rho |v_{relative}|^2 S \cos\theta \quad (3)$$

式中 C_L 为提升力系数。

系统增加流体外力后(主要是风力),总的外力为

$$F_{\text{External}} = F_{\text{Gravity}} + F_{\text{Damp}} + F_{\text{Fluid}} \quad (4)$$

式中 $F_{\text{Fluid}} = F_D + F_L$ 。

2 碰撞检测与响应

碰撞检测与响应是织物模拟的关键之一,在每一个时间步,对于织物的所有质点和边都需要检测与环境对象模型是否发生碰撞,如果发生就必须做出相应的响应。这里解释如何将其作为约束条件结合到织物仿真模拟过程中。

2.1 几何体穿透测试

碰撞检测仅处理织物质点相对于环境几何体的穿透,碰撞响应作为绝对约束引入,为了计算简便,采用几何响应策略,并且只考虑质点位置的调整。

给定一个刚性几何测试实体,如球,设球心位置为 c_{center} ,半径为 $R_{\text{radius}}^{\text{sphere}}$,织物质点位置为 x ,质点发生穿透当下式成立:

$$\|x - c_{\text{center}}\| < R_{\text{radius}}^{\text{sphere}} \quad (5)$$

采用这种方法处理很简单,但是缺陷也很明显,如图 4(a)所示,保持顶点在实体之外却无法避免网格边的穿透,特别是网格比较稀疏的时候。解决办法是在几何实体表面增加一层薄的包围体(对于球体就是增加半径),将检测边界外推到包围体边穿透,如图 4(b)所示。

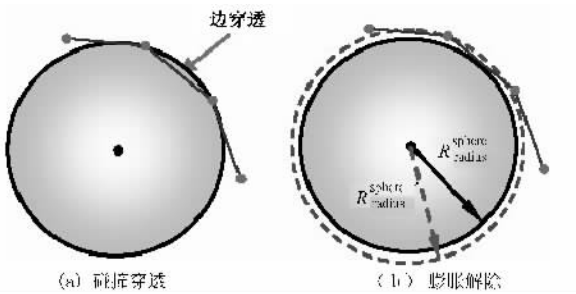


图 4 织物网格边对球体的碰撞穿透和膨胀解除方法

Fig.4 Method for eliminating cloth penetration (a) and inflation to sphere (b)

对于圆柱体,首先计算点到轴线的投影点 x_{proj} ,如果该点在轴线定义的圆柱长度范围之外,可以断定不存在穿透,否则由质点到投影点 x_{proj} 的距离结合圆柱半径 $R_{\text{radius}}^{\text{cylinder}}$ 按下式判定:

$$\|x - x_{\text{proj}}\| < R_{\text{radius}}^{\text{cylinder}} \quad (6)$$

2.2 碰撞响应策略

物理模拟过程中,对检测到的碰撞需要作及时

的响应,这是保证模拟效果真实的前提条件。此外,碰撞造成系统的不连续性,质点位置和速度的不同步引起动力学微分方程数值积分器的振荡,对于显式积分方法很容易导致系统崩溃,由于给出的织物建模方法不存在速度项的显式求解,因此系统可以在很大程度上保持稳定。这里假定织物与实体的碰撞为完全非弹性,由于没有速度项,只考虑位置约束。

对于球体,响应点计算公式如下:

$$x_{\text{respond}} = c_{\text{center}} + \frac{x - c_{\text{center}}}{\|x - c_{\text{center}}\|} R_{\text{radius}}^{\text{sphere}} \quad (7)$$

对于圆柱体,响应点计算公式如下:

$$x_{\text{respond}} = x_{\text{proj}} + \frac{x - x_{\text{proj}}}{\|x - x_{\text{proj}}\|} R_{\text{radius}}^{\text{cylinder}} \quad (8)$$

碰撞响应点并非质点运动轨迹与球表面的真实交点,这样可以避免对质点运动轨迹的跟踪和针对球面的精确求交运算,一方面为了尽可能提高系统性能,另一方面,假定相对于球半径,质点在单个碰撞检测区间运动距离很小,并且织物网格要保证合理的精细度,结合模拟内力效应的弹簧迭代校正过程,近似计算的响应点与真实碰撞点之间不会产生大的误差。

2.3 算法流程

结合与简单几何实体之间的碰撞检测与响应策略,给出织物物理模拟的整体算法流程如下。

1) 设当前时间步为 t ,对每一个织物质点计算外力 F_{External} ,包括重力 F_{Gravity} 、阻尼力 F_{Damp} 和流体力 F_{Fluid} ,其中质点速度项 v^t 的估计由前 2 步位置 x^{t-2h} 和当前步位置 x^t 接近似公式估算。

2) 由质点位置 x^{t-h} 、 x^t 以及外力 F_{External}^t ,用 Verlet 积分器计算下一个时间步 $t+h$ 的质点位置 x^{t+h} 。

3) 为模拟内力效应对织物所有弹簧进行迭代校正 3 次,连续更新质点的位置 x^{t+h} 。如果某一种弹簧两端质点的逆质量 m^{inverse} 都为 0 则将其忽略,质点为完全约束,弹簧的长度不会发生变化,应避免公式的分母为 0。

4) 以质点位置 x^{t+h} 针对环境膨胀后的几何实体进行碰撞检测,如果发生穿透计算碰撞响应点位置 x_{respond} ,作为绝对约束用 x_{respond} 更新对应质点位置 x^{t+h} 解除碰撞。

5) 绘制织物网格,时间步以 h 递增,转入流程 1) 进行下一个模拟循环的处理。

3 实验结果

为了验证算法的有效性,对织物悬垂和碰撞处理机制进行系统的测试,采用的硬件环境为 2.4 GHz 的 Pentium 4 PC, 512 M 内存, 128 M Geforce7300 GT 图形加速卡,软件平台为 Windows 2000 操作系统和 OpenGL 底层图形库支持。

3.1 计算效率

图 5 示出固定同样大小方形织物的 2 个角点进行悬垂测试的结果,模拟时间步长为 0.033 s,不同质点密度的网格详细信息见表 1。对于 625 个质点的织物,由于应用程序其他部分成为系统瓶颈(主要是图形绘制和消息传递),因此帧速率并没有相对于质点密度按比例大幅度提高。

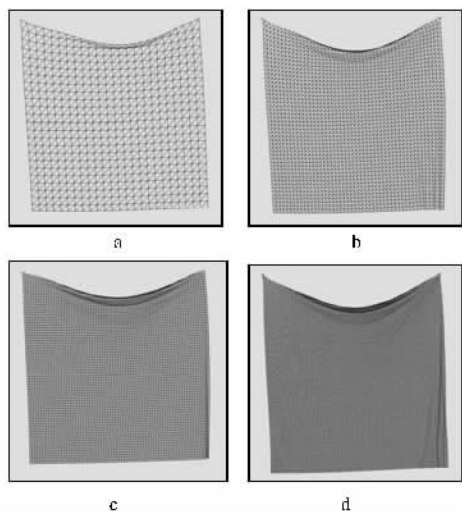


图 5 不同质点密度织物的悬垂效果

Fig.5 Cloth drape effect for different mass density

表 1 不同质点密度织物模拟的详细信息

Tab.1 Detailed information of cloth simulation for different mass density cloth

编号	织物	质点数目	三角形数目	弹簧数目	模拟时间/ms	帧速率/帧·s ⁻¹
a	25 × 25	625	1 152	3 456	2.0	175
b	50 × 50	2 500	4 802	14 406	9.4	75
c	75 × 75	5 625	10 952	32 856	17.3	34
d	100 × 100	10 000	19 602	58 806	33.4	20

以质点数目对应单步模拟消耗的时间作图,如图 6 所示。可以看到,本文基于约束的织物质点弹簧建模方法具有较高的执行效率,其计算代价与织物的几何复杂度接近于线性比例关系,因此很适合于实时仿真环境。

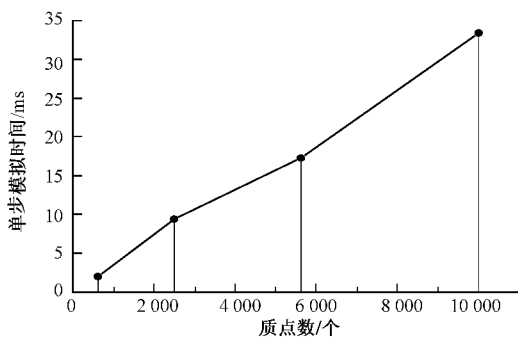


图 6 不同质点密度织物的单步模拟时间

Fig.6 Single step simulation time for different mass density cloth

3.2 增加流体外力

图 7 示出增加流体风力后模拟旗帜飘动的效果,连接旗杆质点的逆质量设置为 0,即为绝对约束质点。流体外力模型参数 KD 和 KL 取值均为 0.1,图 7(a)~(c)风速依次为 10、20、40 m/s。

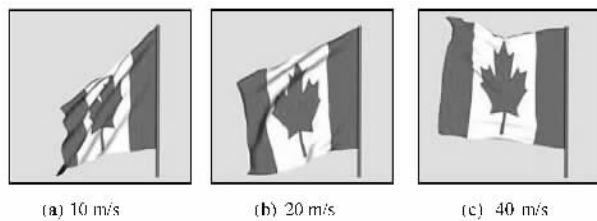


图 7 旗帜在风外力作用下飘动的效果

Fig.7 Flow effect of the banner under the wind power

3.3 织物与简单几何实体碰撞

仅判断质点的几何位置并进行响应会影响检测精度,造成绘制缺陷,为此将球体的碰撞检测半径设置为大于其实际的几何半径,可以有效避免网格边的穿透。图 8 示出织物模拟过程中相对于环境几何体的碰撞处理问题,在保证系统稳定性的条件下,以本文 2.1 和 2.2 的碰撞检测和响应策略可以得到满意的仿真效果。

4 三维服装动态实时仿真

4.1 二维衣片三角网格化

考虑到任意衣片形状的生成以及多个衣片之间的有效缝合拼接,织物物理模拟的质点弹簧模型以三角网格作为几何载体,因此要完成由轮廓定义的衣片到平面三角形网格的转化。此外,二维交互相对比较直观,用户在平面设计阶段通常定义了衣片之间的连接关系,所以引入了一个二维边界缝合过

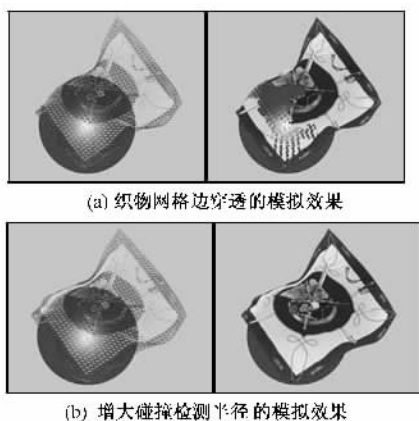


图 8 增大球体碰撞检测半径避免织物网格边穿透的模拟效果

Fig. 8 Simulation effect of avoiding cloth penetration by increasing sphere radius of collision detection. (a) Simulation effect of cloth penetration; (b) Simulation effect of increasing collision radius

程,其并非真正意义上的衣片缝合,只是设置和计算相关的连接信息,最后传递到三维系统做进一步的处理。

4.1.1 衣片三角剖分和优化

首先对衣片轮廓以一定的间距进行离散化采样,连接所有采样点形成一个平面多边形。之后的三角化过程如下:先在绘制背景平面均匀生成预定义密度的网格,通过包含性测试找到位于轮廓多边形内的所有网格顶点,连同已有的边界采样点构成一个平面点集,然后在其上计算 Delaunay 三角化剖分。对于一个凹多边形轮廓,该剖分实质上是基于最近点意义下 Voronoi 图的对偶图,会有多余包含的面积,这里增加了一个后处理步骤进行排除:计算每一个剖分三角形重心并针对轮廓多边形进行检测,如果包含在外,则为不合理三角形予以删除,最后所有剩余三角形构成衣片的离散网格,如图 9 所示。

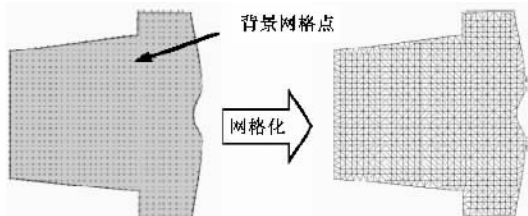


图 9 二维衣片三角网格化

Fig. 9 2-D cloth patch triangularize

得到衣片网格后,在二维平面生成用于物理模拟的织物质点弹簧系统。首先依据已有的网格拓扑关系可以构造不同的弹簧类型,包括拉伸剪切弹簧

和弯曲弹簧,同时确定每一段弹簧的自由长度。将每一个网格顶点标记为质点,计算质点质量。由于三角剖分产生的网格并不规则,不能将每一个质点设置为相同的质量,一种合理的处理方法是基于面积进行估算:

$$m_i = \rho \sum_{k=0}^n \frac{Area_k}{3} \quad (9)$$

式中: m_i 为第 i 个质点的质量; $Area_k$ 为与该质点相关的第 k 个三角形的面积; ρ 为用户定义的外部参数,是用于当前衣片的织物密度,即单位面积的质量。

4.1.2 二维缝合设置

缝合信息实质上是定义一组边界顶点对应关系。通过交互选择衣片网格边界上的 3 个顶点确定 1 条边和对齐方向,缝合基于这样的 2 条边,并要保证它们有相同的离散化采样点数目,生成缝合线的结果如图 10 所示。

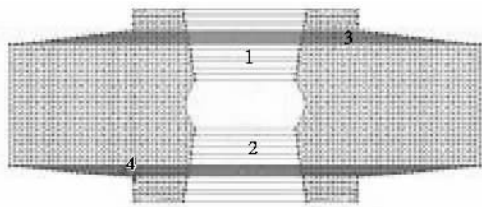


图 10 二维衣片的缝合信息定义

Fig. 10 Defining information of 2-D cloth patch seaming

4.2 基于物理的三维衣片虚拟缝合

衣片之间的缝合信息源于二维平面设计系统。在三维空间,通过用户交互,将服装各个衣片网格排放在与人体模型保持一定距离的位置,然后进行基于物理模拟的衣片缝合。

引入缝合点和源点的概念。缝合点是模拟过程结束后所有衣片相关边界点的公共替代点,除了位置信息外,还包括质点质量,并且有多重纹理坐标,分别对应其在不同衣片被替代点的值。通常,缝合点涉及 1 组或多组缝合,与其相关的衣片边界顶点数目称为缝合点的度。源点是缝合被替代点,通常为衣片边界顶点。

提供所有衣片以及完整的缝合信息后,计算所有缝合点的方法很简单,首先对于每个与缝合相关的边界点生成一个缝合点,然后基于缝合信息进行归并,缝合过程中,相关边界点的运动并非基于物理模拟,而是沿着某一个约束向量进行几何平移,最终达到目标位置。

缝合点的位置为其所有相关衣片边界顶点位置

的平均为

$$P_{seam} = \sum_{i=1}^N p_i / N \quad (10)$$

如图 11(a)所示,对于度为 2 的缝合点,其目标位置是 2 个源点连接线段的中点。度为 3 的缝合点,目标位置是由 3 个源点构成的三角形的重心,约束向量分别由源点指向缝合点,见图 11(b)。对于度更高的缝合点,其机制是一致的。

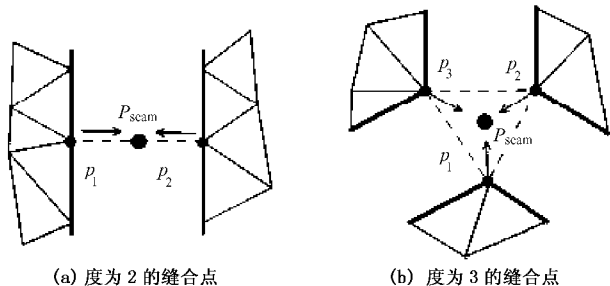


图 11 三维衣片源点合并的例子

Fig. 11 Example of seaming 3-D cloth patches. (a) Degree of suture point is two; (b) Degree of suture point is three

基于物理模拟的衣片缝合需要涉及特定的人体模型,并且要解决碰撞或穿透问题。把人体模型看作是静止刚体,采用空间剖分方法来处理其与织物可变形体之间的碰撞。

缝合前对人体模型的处理。图 12(a)、(b)分别为原始模型连同它的网格,图 12(c)为模型顶点沿法向偏移得到的一个外包围体,该外包围体用来消除网格之间的“边-边”和逆向“点-三角形”碰撞检测。

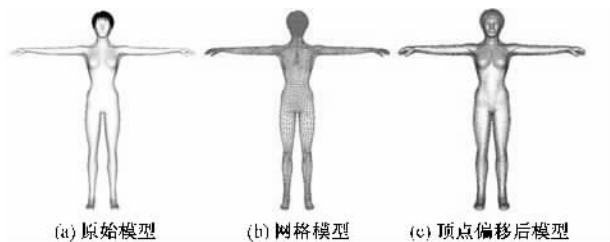


图 12 人体模型及附加包围体

Fig. 12 Mannequin and additional box. (a)Original mannequin; (b)Mesh model; (c) Mannequin after vertex offset

图 13 示出对长裙进行缝合的例子。图 13(a)为动画序列中顺序截取的 4 帧,为了尽可能保持系统的稳定,仅设定了微小的重力加速度值,因此衣片没有自然下垂。图 13(b)为设置纹理图案后服装自然垂坠的网格和面绘制结果,三维缝合完成后,可以进行相应的静态着装展示,通过改变视角、花色图案和调整物理参数(如增加风力)来实现特定的仿真效果。



图 13 对长裙缝合的例子

Fig. 13 Example of seaming skirt. (a) Seaming skirt mesh; (b) Setting texture and adding acceleration of gravity

4.3 流体外力作用下的服装展示效果

图 14 示出增加风力提高模拟的真实感。用户可以交互调整风的强度和方向,并以不同视角观察整体效果。

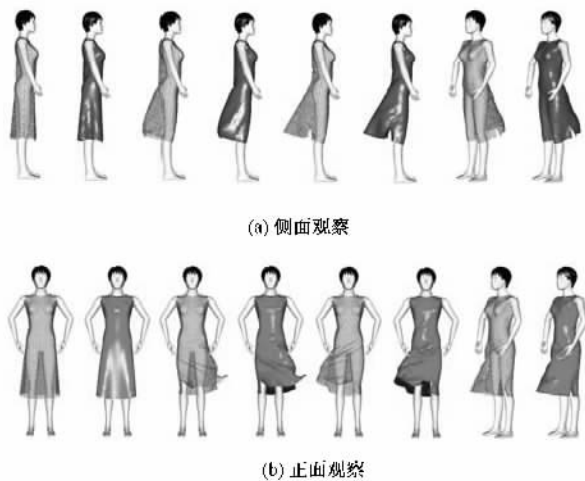


图 14 调整仿真环境中的风力强度和风向来增强模拟真实感

Fig. 14 Enhance photorealistic by adjusting wind power and direction in simulation environment. (a) Examine from side; (b) Examine from front

5 结 语

建立织物的三维仿真物理模型,重点需要解决系统的稳定性和实时性等关键问题。弹簧内力及其偏导是引发系统震荡和微分方程数值解发散的主要

原因,需要避免相关的显式计算。本文给出了一个织物约束质点弹簧模型,与已有建模方法不同的是,该模型并不包含对内力和质点速度项的显式计算,直接通过逆向动力学约束来模拟内力,进而避免了对它的显式计算。重力等外力都作为相对约束引入,Verlet 积分器针对外力进行运动求解。弹簧内力和碰撞响应分别作为弹簧长度相对约束和质点位置绝对约束引入。该模型可以采用较大的时间步长生成织物动画,总体计算量小,在保证系统稳定性的前提下有较高的计算效率,能够满足服装仿真应用的速度需求。

FZXB

参考文献:

- [1] Weil J. The synthesis of cloth objects [J]. Computer Graphics, 1986, 20(4): 49 - 54.
- [2] Terzopoulos D, Platt J, Barr A H, et al. Elastically deformable models [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 205 - 214.
- [3] Xavier Provot. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [C] // Proceedings of Graphics Interface. Quebec: Canadian Information Processing Society, 1995: 147 - 154.
- [4] Volino P, Magnenat Thalmann N. Developing simulation techniques for an interactive clothing system [C] // Proc. of the 1997 International Conf. On Virtual Systems and MultiMedia. Washington DC: IEEE Computer Society, 1997: 109 - 118.
- [5] Cordier F, Magnenat-Thalmann N. Real-time animation of dressed virtual humans [C] // Computer Graphics Forum, Washington DC: Blackwell Publishers, 2002: 327 - 336.
- [6] Kang Y M, Choi J H, Cho H G, et al. An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration [J]. The Visual Computer Journal, 2001, 17(3): 147 - 157.
- [7] Kang Y M, Cho H G. Approximate Integration for Rapid and Plausible Animation of Virtual Cloth with Realistic Wrinkles [C] // Proceedings of Computer Animation, Washington DC: 2002: 203 - 211.
- [8] Kang Y M, Choi J H, Cho H G, et al. Real-time animation technique for flexible and thin objects [C] // International Conferences in Central Europe (WSCG ' 00). Plzen: University of West Bohemia Publisher, 2000: 322 - 3292.