

1-8-2019

## Physically-based Interactive Virtual Clothing Animation Simulation

Shi Min

*1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;*

Junzheng Wang

*1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;2. Institute of Computing Technology, Beijing 100190, China;*

Tianlu Mao

*1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;2. Institute of Computing Technology, Beijing 100190, China;*

Yaning Liu

*1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;;2. Institute of Computing Technology, Beijing 100190, China;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

## Physically-based Interactive Virtual Clothing Animation Simulation

### Abstract

**Abstract:** Realistic effective clothing animation simulation involves many factors, including the lifelike animation rendering, stable animation modeling, interaction control of the adjustable parameter and so on. An interactive clothing animation method based on physics is studied. *According to the content feature of model and animation resources, we design an effective way of storage and provide the interface to adjust the parameters interactively. We build implicit constraint dynamics system, accelerated collision detection and the constrained optimization calculation model, and calculate clothing animation. The simulation based on Unity 3D engine is rendered to present garment animation simulation effect under different virtual light.* Experiment results show that our virtual clothing animation platform has superior interactivity, stability and visual fidelity.

### Keywords

clothing animation, interactive, clothing dynamics, collision detection, collision response

### Recommended Citation

Shi Min, Wang Junzheng, Mao Tianlu, Liu Yaning. Physically-based Interactive Virtual Clothing Animation Simulation[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(7): 2583-2592.

# 基于物理的可交互性虚拟服装动画模拟

石敏<sup>1</sup>, 王俊铮<sup>1,2</sup>, 毛天露<sup>2</sup>, 刘亚宁<sup>1,2</sup>

(1.华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206; 2.中国科学院计算技术研究所, 北京 100190)

**摘要:** 逼真有效的服装动画模拟, 涉及真实稳定的动画建模与渲染、可调节参数的交互控制等多个因素。研究了一种基于物理的可交互式虚拟服装动画方法。根据模型以及动画资源的内容特性设计有效的存储方式, 并提供可交互控制的参数调整接口。构建隐式约束动力学系统、碰撞检测加速与约束优化计算模型, 并进行布料动画计算。采用 Unity 3D 引擎对仿真数据进行渲染, 展示不同场景下的模拟效果。实验显示, 本文的虚拟服装动画平台具有良好的交互性, 稳定性和视觉逼真度。

**关键词:** 服装动画; 可交互; 服装动力学; 碰撞检测; 碰撞响应

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2018) 07-2583-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201807019

## Physically-based Interactive Virtual Clothing Animation Simulation

Shi Min<sup>1</sup>, Wang Junzheng<sup>1,2</sup>, Mao Tianlu<sup>1,2</sup>, Liu Yaning<sup>1,2</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Institute of Computing Technology, Beijing 100190, China)

**Abstract:** Realistic effective clothing animation simulation involves many factors, including the lifelike animation rendering, stable animation modeling, interaction control of the adjustable parameter and so on. An interactive clothing animation method based on physics is studied. According to the content feature of model and animation resources, we design an effective way of storage and provide the interface to adjust the parameters interactively. We build implicit constraint dynamics system, accelerated collision detection and the constrained optimization calculation model, and calculate clothing animation. The simulation based on Unity 3D engine is rendered to present garment animation simulation effect under different virtual light. Experiment results show that our virtual clothing animation platform has superior interactivity, stability and visual fidelity.

**Keywords:** clothing animation; interactive; clothing dynamics; collision detection; collision response

## 引言

服装动画是计算机动画技术的主要研究分支之一。它模拟并展现虚拟服装随时间和外界条件变化而产生的形变, 在影视、游戏和服装工业等领域

广泛应用。服装作为一种柔性物体, 在外部受力及其自身内力的作用下, 会发生复杂的变形, 出现弯曲、拉伸和褶皱等现象。构建物理有效且视觉逼真的服装动画模型, 是一个颇具挑战的问题。经过多年的研究, 从早期的简单布料建模发展到目前的复杂服装建模, 许多方法已经可以模拟出比较满意的虚拟服装运动。但由于现实世界环境的多样性和复杂性, 即使一个很偶然的极端外部力, 也可能使模拟的虚拟服装动画效果失真。此外, 不同场景光照



收稿日期: 2017-07-27 修回日期: 2017-12-04;  
基金项目: 国家自然科学基金(61300131, 61532002),  
中国科学院国防科技创新基金(CXJJ-15M022), 中国  
科学院重点部署项目(KFZD-SW-407);  
作者简介: 石敏(1975-), 女, 山西, 博士, 副教授,  
研究方向为虚拟现实、计算机视觉。

<http://www.china-simulation.com>

• 2583 •

情况下的渲染效果以及可交互性的动画控制,也是影响服装动画视觉感受和动画有效性以及可用性的主要因素。

随着服装动画技术的日益成熟,其不同应用领域的商业软件也逐渐问世。在虚拟试衣领域,国外的 MyVirtualModel, MyStyleRules 等产品已投入运营。这类软件不仅可以通过调整人体尺寸以及服装尺寸,达到个性化的试衣需求,还可以自由搭配衣服配饰,通过设置的虚拟人参数确定服装的型号。近年来,国内的淘宝、优衣库以及好买衣等也相继进入虚拟试衣市场,提供在线试衣服务。目前的虚拟试衣软件,通常会降低服装动画的逼真度,以满足应用实时性的需求。此外,大多在线试衣封装了仿真参数等相关接口,其交互控制性不够灵活。在服装工业领域,软件 MARVELOUS DESIGNER 提供了由二维衣片生成三维服装的功能,并可以在虚拟人体上进行服装穿着效果的展示。由于该软件注重于服装款式的设计,因此动画模拟中选用了较简单的碰撞处理方法,而忽略了临界接触状态下的动画稳定性。在游戏、动画制作行业, Fox、Bullet 以及 Phys X 等游戏引擎具备了布料模拟功能, 3ds Max 和 Maya 等建模软件也以插件的形式提供了布料动画的建模与绘制,但模拟往往需要调节大量参数,工作量较大。综上所述,一个有效的服装动画平台,不仅需要物理真实稳定的动画建模,而且需要视觉真实的渲染效果以及可交互的控制方法。

本文研究了一种基于物理的可交互式虚拟服装动画方法。首先,根据模型以及动画资源的内容特性设计有效的存储方式,并提供可交互控制的参数调整接口。其次,采用一种约束动力学计算方法,对服装进行动画建模;利用包围盒与代表三角形方法对碰撞检测进行加速,并采用半全局约束优化的碰撞响应方法,消除服装动画的穿透现象。最后,基于 Unity 3D 引擎,对每一帧动画仿真数据进行渲染,展示不同场景光照下的服装动画模拟效果。

## 1 相关工作

### 1.1 布料运动建模

布料运动建模技术是服装动画的基础内容,通常基于几何建模或者物理受力求解方法,模拟布料在真实世界的变形状态。

几何建模方法常用于模拟布料局部或服装整体的造型<sup>[1-6]</sup>,虽然效率较高,但由于几何法根据布料的几何特性建立经验方程来模拟布料,使得生成的布料动画褶皱较规则,尤其在连续布料动画中显得较为失真。

物理法通过建立物理受力模型及标准动力学方程或拉格朗日方程,求解各时刻的布料变形状态<sup>[1]</sup>。最经典的是离散质点模型<sup>[7-11]</sup>,即将服装顶点看作离散质点进行受力分析,通过求解运动方程得到服装动画。Cirio<sup>[12-13]</sup>, Zhao 等<sup>[14]</sup>实现了基于纱线模型的服装模拟,也取得不错的实验效果。此外, Daviet 等<sup>[15]</sup>在摩擦力的处理上取得新进展,使服装和人体的交互作用显得更为逼真。采用物理法需要考虑的关键的问题是模型复杂性、计算稳定性以及求解效率。

为了提高物理方法的稳定性,一种有效的方法是把服装动画中的刚性成分作为约束,以拉格朗日乘子和约束力的形式增加到动力学系统中,并通过求解约束动力学系统得到布料最终变形状态。Goldenthal<sup>[16]</sup>和 Ye<sup>[17]</sup>等把布料拉伸作为约束,解决了服装动画中的过度拉伸问题; Otaduy 等<sup>[18]</sup>则把服装动画中的位置冲突作为约束,较好地模拟了高速度、大步长的服装动画效果。

### 1.2 碰撞处理技术

布料动画中的碰撞处理技术,是为了避免服装与三维物体之间或者服装自身之间出现穿透的状况,主要包括碰撞检测和碰撞响应两种技术。

层次包围盒法是经典的碰撞检测加速技术,早期主要用于刚体动画<sup>[19-20]</sup>,通过层次数据结构和剪切技术排除明显不会发生碰撞的对象。后来为了进

行布料等柔性物体的碰撞检测, Wong<sup>[21]</sup>, Curtis<sup>[22]</sup>, Zheng<sup>[23]</sup>等构建了不同类型的层次包围盒, 以剔除布料上一部分不会发生碰撞的三角形, 加快碰撞检测速度。由于需要存储层次包围盒, 因此该方法需要带来额外的内存开销。

碰撞响应方法通常包括斥力法、动量法以及基于约束的碰撞响应方法。Moore<sup>[24]</sup>, Tang 等<sup>[25]</sup>计算布料与场景的穿透深度, 并对布料施加一个与之成正比的斥力来避免碰撞。Mirtich 等<sup>[26]</sup>用动量定理描述布料与人体、布料与布料本身的碰撞, 计算二者动量的改变量。Harmon<sup>[27]</sup>, Otaduy<sup>[28]</sup>等把碰撞约束条件以约束力的形式整合到布料运动方程组中, 并求解方程组。

本文采用约束动力学进行服装运动建模, 采用 AABB 包围盒以及代表三角形法进行碰撞检测的加速, 并对运动中可能遇到的临界接触情况进行分析与处理, 以保证碰撞检测不被遗漏。在此基础上, 运用动量法与半全局约束优化结合的方法, 实现有效的碰撞响应。

## 2 技术框架

本文提出一种基于物理的可交互性虚拟服装动画方法, 主要包括三方面的技术: 资源管理、服装动画建模与计算以及服装动画渲染。其技术框架如图 1 所示。

### 1) 资源管理

在服装动画仿真中, 首先需要对动画生成所需要的资源进行有效存储与管理。动画资源主要包括两类: 静态资源, 即服装、场景模型、材质和仿真

参数等; 动态资源, 主要指虚拟人运动数据。本文根据资源不同的内容特性, 分别建立相应的存储格式, 并提供可交互的布料仿真参数接口。

### 2) 服装动画建模

动画建模与计算是服装动画中最核心的内容。本文采用约束动力学方法求解服装在重力和内部力作用下产生的形变, 采用 AABB 包围盒以及代表三角形方法进行碰撞检测的优化加速, 最后基于动量法和半全局约束优化的碰撞响应法进行碰撞点的位置修正。

### 3) 服装动画渲染

渲染主要通过光照和材质贴图等的共同作用, 实现最终的视觉效果。作为服装动画仿真的最后环节, 是影响视觉感知逼真度的重要因素。本文选用 Unity 引擎, 基于 PBR(Physically-based rendering) 进行整个场景及动画帧的渲染。由于光是一种复杂的现象, 同时具有波和粒子的属性, 而 PBR 遵循能量守恒以及 Fresnel 反射等物理原理, 其渲染机制与光线在现实中的行为一致, 因此可以保证渲染效果的逼真性。

## 3 资源管理

### 3.1 静态资源管理

静态资源包括: 场景和服装等静态模型、材质贴图以及布料仿真参数。具体存储为: 1) 服装以及场景模型, 选用 OBJ 格式, 文件格式如图 2 所示, 分别存储模型的顶点、法线、纹理坐标和材质等信息; 2) 布料仿真参数, 选用文本格式, 主要仿真参数如表 1 所示。

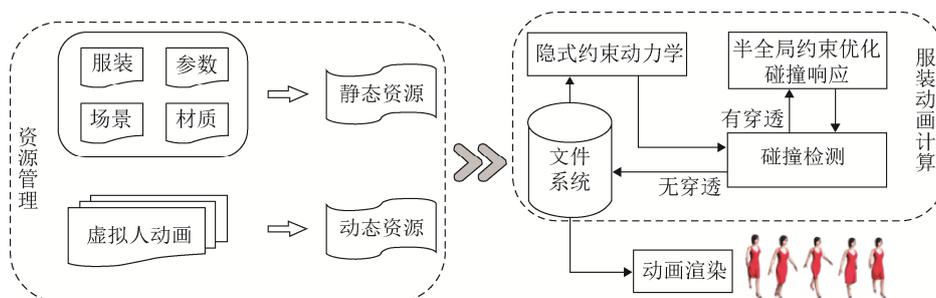


图 1 服装动画技术框架

Fig. 1 Technological framework of clothing animation

v	几何体顶点	(Geometric vertices)
vt	贴图坐标点	(Texture vertices)
vn	顶点法线	(Vertex normals)
p	点	(Point)
l	线	(Line)
f	面	(Face)
g	组名称	(Group name)
s	光滑组	(Smoothing group)
mg	合并组	(Merging group)
o	对象名称	(Object name)
usemtl	材质名称	(Material name)
mtllib	材质库	(Material library)

图 2 Obj 文件结构  
Fig. 2 Obj file structure

表 1 仿真参数接口  
Tab. 1 Simulation parameter interface

BendCoef	弯曲弹簧系数	StructDamp	伸缩弹簧 阻尼系数
BendDamp	弯曲弹簧 阻尼系数	Damper	阻尼系数
ShearCoef	剪切弹簧系数	VertexMass	质点质量
ShearDamp	剪切弹簧 阻尼系数	Gravity	重力加速度
StructCoef	伸缩弹簧系数	SimulationDeltT	仿真帧间隔

本文设计了仿真参数接口以供交互, 并把经验所得的成套参数存成文本文件, 便于快速获取不同质感的布料; 3) 材质贴图, 选用 JPG 或者 PNG 等图片格式; 4) 着色器, 选用 Unity Shader 记录贴图、光照等信息的混合方式, 从而控制渲染器生成不同质感的三维图像, 其文件结构如图 3 所示。

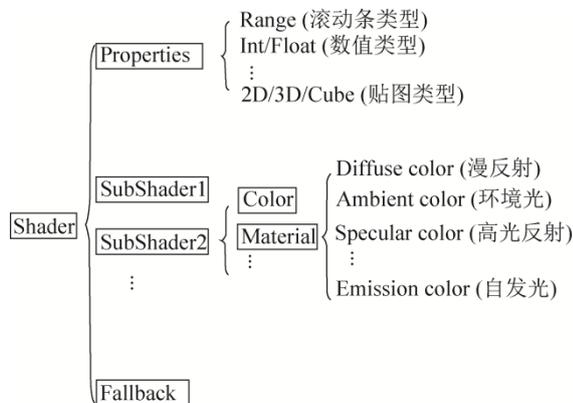


图 3 Unity Shader 文件结构  
Fig. 3 Unity Shader file structure

图 3 分为 3 个部分: 属性 Properties, 定义代码段的输入类型及数量; 子着色器 SubShader, 定义着色器的渲染规则, 包括漫反射、环境光和自发光等; Fallback, 用来处理所有的 SubShader 都不能运行时的情况。

### 3.2 动态资源管理

选用 FBX 格式存储虚拟人体动画。FBX 文件保存一个场景, 在场景树根节点 FbxScene 下, 包含全局设定 FbxGlobalSettings、几何网络 FbxMesh、相机 FbxCamera 和光源 FbxLight 等节点, 并由动画层 FbxAnimLayer 存储人体运动信息, 如图 4 所示。首先从 FBX 文件中分离出骨骼运动, 以便可以将同一段骨骼运动数据复用于不同的人体模型上。分离出骨骼运动之后, 将骨骼驱动的人体动画按帧间隔存储到二进制文件中, 如图 5 所示。

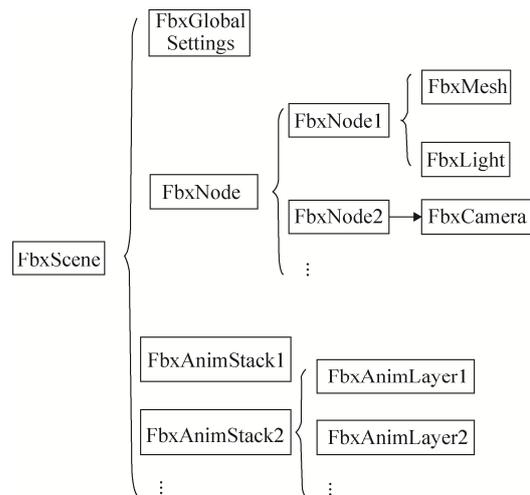


图 4 FBX 文件结构  
Fig. 4 FBX file structure

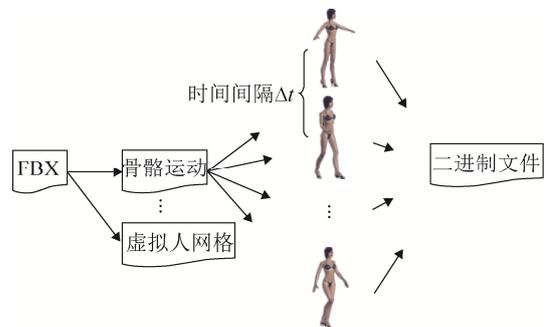


图 5 虚拟人动画处理  
Fig. 5 Virtual human animation processing

## 4 服装动画计算

### 4.1 布料动力学方程

本文基于简化质点弹簧模型分析布料受力<sup>[29]</sup>。为了保证系统稳定性, 将系统中的“无拉伸”刚性成分以及碰撞等抽取出来定义为约束, 并将约束以拉格朗日乘子的形式增加到动力学系统中。设布料系统包含  $n$  个离散质点,  $\mathbf{x}$  是  $3n \times 1$  维的状态矢量,  $\mathbf{v}$  是  $3n \times 1$  维的速度矢量,  $\mathbf{M}$  是  $3n \times 3n$  的质量矩阵,  $\mathbf{f}$  表示力矢量,  $\mathbf{g}(\mathbf{x})$  是由  $m$  个成员构成的约束矢量, 每一个成员表示一个几何约束, 约束矢量表示为  $\mathbf{g}(\mathbf{x}) = (g_1(x), g_2(x), \dots, g_m(x))^T$ , 维度是  $m \times 3n$ , 则增加约束项的约束动力学方程如下表示:

$$M\dot{\mathbf{v}} = \mathbf{f} + \nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})^T \lambda \quad (1)$$

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}) = 0 \quad (2)$$

式中:  $\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})$  是约束梯度;  $\lambda$  是  $m \times 1$  维的拉格朗日乘子, 分别确定了约束力的方向和大小,  $\nabla_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x})^T \lambda$  为约束力。

设系统在  $t_i$  时刻的状态为  $\mathbf{x}(t_i)$  和  $\mathbf{v}(t_i)$ , 则每一步速度更新规则如下:

$$A \cdot \Delta \mathbf{v} = \mathbf{b} \quad (3)$$

式中:  $A$  和  $\mathbf{b}$  分别为:

$$A = M - \Delta t \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} - \Delta t^2 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{x}} \quad (4)$$

$$\mathbf{b} = \Delta t \mathbf{f}_i + \Delta t^2 \frac{\partial \mathbf{f}}{\partial \mathbf{v}} \mathbf{v}_i \quad (5)$$

基于更新之后的速度  $\mathbf{v} = \mathbf{v}_i + \Delta \mathbf{v}$ , 即可计算布料下一时刻的变形姿态  $\mathbf{x} = \mathbf{x}_i + \mathbf{v} \cdot \Delta t$ 。

设系统在  $t$  时刻的约束矢量  $\mathbf{g}(\mathbf{x}(t))$ ,  $\hat{\mathbf{x}}(t + \Delta t)$  是求解得到的无约束下的系统状态, 则可以得到系统在  $t + \Delta t$  时刻的约束状态  $\mathbf{x}(t + \Delta t)$ :

$$\mathbf{x}(t + \Delta t) = \hat{\mathbf{x}}(t + \Delta t) + \Delta_{\mathbf{x}}\mathbf{g}(\mathbf{x}(t))^T \lambda (\Delta t)^2 M^{-1} \quad (6)$$

### 4.2 碰撞检测

布料的碰撞大致可以归为两类: “点-三角形”相交以及“边-边”相交, 如图 6 所示。基于连续碰撞检测, 可以判断一段时间内是否有穿透发生。但由于布料柔软易变形的特殊材质特性, 运动过程中出现的碰撞非常频繁, 碰撞情况也非常复杂。当

待检元素之间处于临界接触状态时, 采用单纯的连续检测方法很容易发生漏检, 导致灾难性的后果。

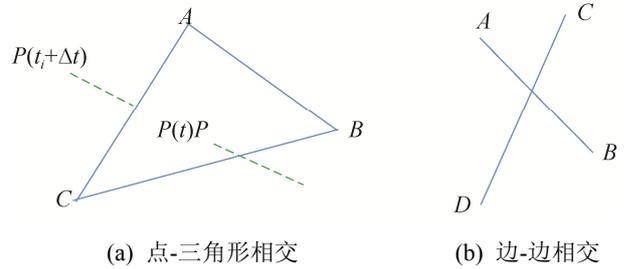


图 6 点-三角形相交和边-边相交  
Fig. 6 Point-triangle intersection and edge-edge intersection

为此, 在连续碰撞检测的基础上, 对 3 种临界状态进行了离散碰撞处理: 1) 在一个时间段的起始时刻  $t_i$  与末端时刻  $t_{i+1}$ , 判断  $P$  离三角形  $ABC$  的距离, 如果该距离小于给定阈值  $\delta$ , 则认为其产生了碰撞; 2) 在一个时间段的起始时刻  $t_i$  与末端时刻  $t_{i+1}$ , 如果边  $AB$  与  $CD$  的距离小于一定的阈值, 则也认为其发生了碰撞。3) “点-三角形”碰撞检测中, 如果在某时间段  $[t_i, t_{i+1}]$  内, 三角形的两条边  $AB$  与  $AC$  夹角很小, 则二者接近于平行。这三种情况, 只在端点时刻进行碰撞检测, 而忽略连续时间段内的碰撞检测, 以此保证计算稳定性。

为了提高检测效率, 本文采用 AABB 包围盒技术剔除不必要的相交测试, 在剩下可能产生碰撞的区域, 为每个待测元素标记一个代表三角形。图 7 所示, 把点  $v_1$  只分配给  $tri_2$ , 由于三角形  $tri_3 \sim tri_4$  没有分配, 所以只需要对三角形  $tri_2$  与  $tri_1$  进行碰撞检测, 从而避免了重复的相交测试。

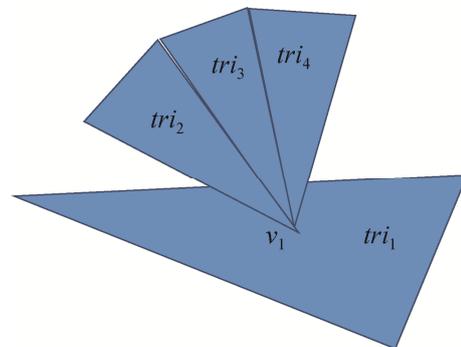


图 7 代表三角形方法  
Fig. 7 Representative-triangle method

## 算法1 碰撞检测算法

```

if 三角形  $tri_i$  与三角形  $tri_j$  都分配到了至少一个“特征”
    if  $tri_i$  与  $tri_j$  的包围盒有碰撞
        找出  $tri_i$  中的点的包围盒, 将这些包围盒与  $tri_j$  的包围盒进行相交测试
        if 有碰撞
            then 进行点-三角形包围盒相交测试, 得到碰撞信息
        找出  $tri_j$  中的点的包围盒, 将这些包围盒与  $tri_i$  的包围盒进行相交测试
        if 有碰撞
            then 进行点-三角形相交测试, 得到碰撞信息
        end
    对  $tri_i$  与  $tri_j$  中的边的包围盒进行碰撞检测
    if 有碰撞
        then 进行边-边相交测试, 得到碰撞信息

```

## 4.3 碰撞响应

当检测到布料碰撞发生时, 需要立即修改相应区域的速度、位置, 以避免布料发生不真实的穿透。首先基于动量法修改碰撞元的速度, 然后再进行约束修正。

## (1) 动量法响应

对于“点-三角形”碰撞, 设点  $P$  质量为  $m$ , 在三角形  $x_1x_2x_3$  上的碰撞点为  $P'$ , 记  $P' = \omega_1x_1 + \omega_2x_2 + \omega_3x_3$ ,  $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$ , 其动量记为  $I = \frac{m}{2}V_N$ ,  $V_N$  是碰撞点  $P'$  的速度在碰撞三角形法线方向  $\hat{n}$  上的投影, 则三角形各顶点以及  $P$  点的速度响应后速度如下:

$$\tilde{I} = \frac{2I}{1 + \omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2} \quad (7)$$

$$\vec{v}_i^{\text{new}} = \vec{v}_i + \omega_i(\tilde{I}/m)\hat{n}, i = 1, 2, 3 \quad (8)$$

$$\vec{v}_i^{\text{new}} = \vec{v}_4 - (\tilde{I}/m)\hat{n} \quad (9)$$

对于“边-边”碰撞, 设边  $x_1x_2$  与边  $x_3x_4$  的叉积为  $\hat{n}$ , 碰撞点落在边  $x_1x_2$  和  $x_3x_4$  上的相对位置分别为  $P$  和  $P'$ , 记  $P = (1-a)x_1 + ax_2$ ,  $P' = (1-b)x_1 + bx_2$ 。

假定  $P$  与  $P'$  点质量均为  $m$ , 方向  $\hat{n}$  上动量为  $I$ , 则两边的每个端点在响应之后的速度如下:

$$\tilde{I} = \frac{2I}{a^2 + (1-a)^2 + b^2 + (1-b)^2} \quad (10)$$

$$\vec{v}_1^{\text{new}} = \vec{v}_1 + (1-a)(\tilde{I}/m)\hat{n} \quad (11)$$

$$\vec{v}_2^{\text{new}} = \vec{v}_2 + a(\tilde{I}/m)\hat{n} \quad (12)$$

$$\vec{v}_3^{\text{new}} = \vec{v}_3 - (1-b)(\tilde{I}/m)\hat{n} \quad (13)$$

$$\vec{v}_4^{\text{new}} = \vec{v}_4 - b(\tilde{I}/m)\hat{n} \quad (14)$$

布料发生碰撞后, 切向上摩擦力的大小与法向上的作用力成正比, 方向与相对速度的方向相反, 如式(15)计算。其中,  $\mu$  是库仑摩擦系数,  $\vec{v}_T^{\text{pre}}$  是计算摩擦力之前的切向相对速度。

$$\vec{v}_T = \max(1 - \mu \frac{\Delta V_N}{|\vec{v}_T^{\text{pre}}|}, 0) \vec{v}_T^{\text{pre}} \quad (15)$$

## (2) 半全局约束修正

首先为每个碰撞设置一个碰撞影响力因子, 值越大, 碰撞产生的影响力越大。在“检测-响应”的多次迭代计算过程中, 碰撞影响力动态变化。当影响力超过指定的响应阈值时, 将其加入约束集; 当影响力衰减到小于指定阈值时, 则将其从约束集中摒弃。由于该方法产生的约束集并不完全等价于经典全局约束方法的约束集, 近似于半全局约束优化。

半全局约束法的约束条件是基于作用力的动态变化而变化的。设约束集大小为  $N$ , 第  $j$  个约束的作用力初值为  $E_j^0$ , 第  $i$  次迭代中其作用力表示为  $E_j^i$ , 则该碰撞在第  $i+1$  次迭代中的影响力计算方法是: 若第  $i+1$  次迭代中, 该碰撞没有出现, 则其影响力衰减为上一次的  $a$  倍, 即,

$$E_j^{i+1} = a \cdot E_j^i \quad (16)$$

式中:  $a$  为衰减系数, 且  $a \in (0, 1)$ ; 若第  $i+1$  次迭代中, 该碰撞仍然出现, 则其影响力  $E_j^{i+1} = a \cdot E_j^i + E_j^0$ 。当  $E_j^{i+1} \geq E_j^0$  时, 仍将其保留在约束集中。

## 5 系统实现与应用实例

在上述算法和技术的基础上, 我们开发了三维服装动画系统, 其研发平台是 Unity3D 引擎以及 Visual Studio 2008 编译环境, 图 8 和图 9 给出了系统架构和主界面图。

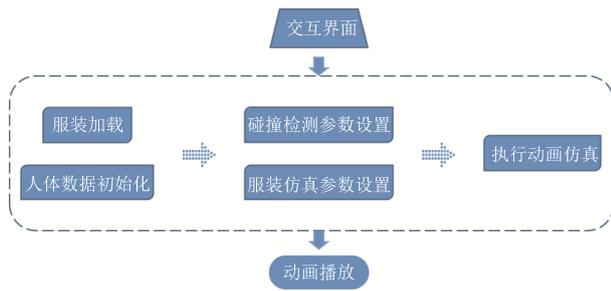
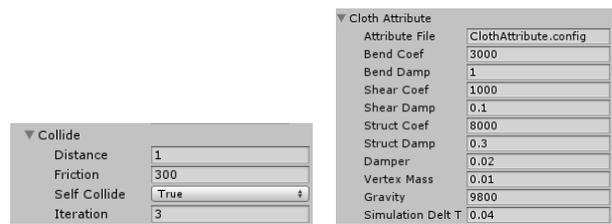


图 8 系统架构图

Fig. 8 System architecture diagram



(c) 碰撞检测参数

(d) 服装仿真参数

图 10 系统主要功能

Fig. 10 System main function

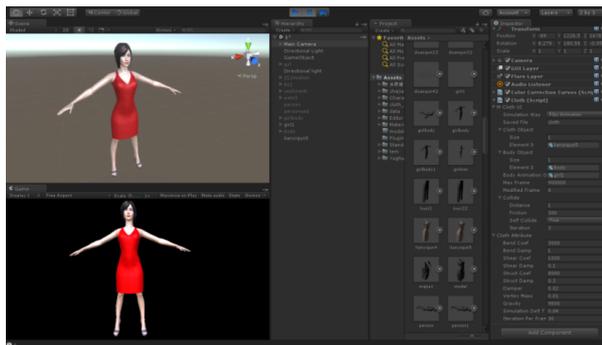


图 9 系统界面

Fig. 9 System interface

系统主要包括三部分功能：加载人机交互界面、初始化信息并执行动画仿真、播放动画。各部分功能具体为：1) 加载人机交互界面。支持服装和人体位置的选定以及调整，即根据服装和人体模型的三维空间位置，调整使它们相互匹配，并选定至交互接口中；支持人体动画预览，如图 10(a)和图 10(b)所示；支持模拟参数设定，以获得不同属性的服装布料以及理想的服装自碰撞和人体-服装碰撞效果，如图 10(c)和 10(d)所示；2) 初始化信息并执行动画仿真。根据用户选定的仿真对象，读取服装三维拓扑信息，逐帧载入人体动画数据，根据用户设定的数值大小，设置碰撞检测参数和服装仿真参数，并将所有数据加入仿真系统计算；3) 播放服装动画功能。提供人体动画和已计算存储的服装动画的同步播放，即逐帧渲染它们至计算机屏幕上。

本系统与其他服装动画系统相比，在人机交互友好度、物理逼真度以及临界接触状态下的系统稳定性等方面，具有较大优势。下面以虚拟人动画的复用、仿真参数的设置，动画效果的呈现为例，进行动画结果分析。

实验 1：人体运动数据在多个虚拟人体上的复用。为实现虚拟人动画的复用，使同一人体运动数据在多个虚拟人上呈现，建立了动画和虚拟人接口，如图 10(a)示。将动画集成到 Animator 组件，然后把任意相同骨骼的虚拟人和 Animator 组件分别输入至图 11(a)的 Character 和 HumanAnimator 接口处。运动数据复用结果如图 11 所示。



图 11 骨骼运动数据复用

Fig. 11 Reuse of skeleton movement data

仿真参数设置接口。为更方便地调参，本文设计了参数读取接口，如图 10(c)和图 10(d)所示，可以通过 AttributeFile 接口读取整套参数，也可以设该接口为空，直接从界面中的其他接口读取参数数值。

实验 2：布料悬垂模拟。实验模拟了一块垂直下落的方布，在重力、桌子的支撑力以及内部力作用下，该方布运动中会产生大量的自碰撞，其褶皱效果如图 12(a)和 12(b)所示。

实验 3：边界处理。本实验采用了 4 个柱子，分别是圆柱体、细长方体、三棱柱体以及圆锥体，



(a) 选定模拟对象

(b) 人体动画预览

它们的尖锐棱角可以和布料产生充分的碰撞。当布料与特别尖锐的模型产生碰撞时,容易使布料和模型发生穿透现象,如图12(c)。增加上文中提到的临界接触处理,有效避免了该穿透,如图12(d)所示。

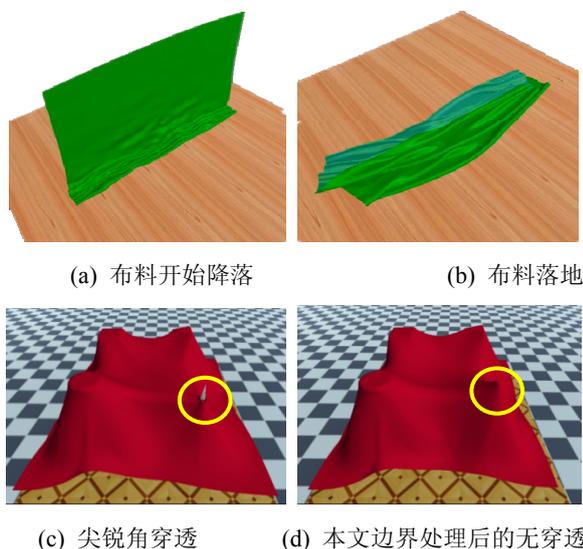


图12 方布动画

Fig. 12 Animation of a piece of cloth

实验4:裙装动画。采用两套裙子模型,单层裙子和多层裙子。单层裙子紧贴人体躯干,因此自碰撞较少,和人体碰撞较多。与之相比,多层裙子具有更大的自重,自碰撞较多。如图13所示,裙装运动具有较好的视觉逼真度。



图13 裙装动画

Fig. 13 Skirt animation



## 6 结论

本文提出一种基于物理的可交互虚拟服装动画方法,从资源管理,服装动画计算和动画渲染三个方面提高方法的交互性和逼真性。实现的动画系统具有以下优势:(1)通过合理管理仿真参数等静态资源,提供更多调节接口,使服装动画计算更加方便;通过管理虚拟人动画的动态资源,使虚拟人动画的复用更加便利,也为之后的调用做好了准备。(2)构建了基于隐式约束的动力学系统,碰撞处理模型中包括了临界状态处理以及半全局约束优化的碰撞响应,使计算的服装动画不仅效果逼真,在遇到极端受力时不失真。(3)选用Unity引擎,基于PBR渲染服装,使服装动画在更接近于真实的光照条件下得以呈现。

本方法不足之处在于:由于基于物理的服装动画方法需要进行大量数值求解,因此不适合要求实时性的应用;本文涉及的参数交互仅体现于服装顶点位置的求解部分,对于如何设置服装绘制的相关参数没有进行研究和实验论证,仅仅把服装同其余模型在同样参数下绘制;此外,本文设计的参数接口可以在一定范围内调整布料材质,改变布料的硬

度,但不能模拟所有布料,如毛线,羽绒服等;本方法仅能作用于虚拟人和服装已经匹配的情况,若输入的虚拟服装与虚拟人体无法有效匹配,比如服装太小,无法套到人体身上,可能会得到不好的实验结果。

### 参考文献:

- [1] 石敏, 毛天露, 夏时洪等. 布料动画方法研究进展及问题[J]. 计算机学报, 2012, 35(12): 2446-2458.  
Shi Min, Mao Tianlu, Xia Shihong, et al. Advances and Challenges in Cloth Animation[J]. Chinese Journal of Computers, 2012, 35(12): 2446-2458.
- [2] Weil J. The synthesis of cloth objects[C]//Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH. DBLP, 1986: 49-54.
- [3] Ng H N, Grimsdale R L. GEOFF-A geometrical editor for fold formation[M]//Image Analysis Applications and Computer Graphics. Springer Berlin Heidelberg, 1995: 124-131.
- [4] Stumpp T, Spillmann J, Becker M, et al. A Geometric Deformation Model for Stable Cloth Simulation[C]// The Workshop on Virtual Reality Interactions and Physical Simulations, Vriphys 2008, Grenoble, France. DBLP, 2008: 39-46.
- [5] Chen M, Tang K. A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation[J]. The Visual Computer(S0178-2789), 2010, 26(6): 853-863.
- [6] Rohmer D, Popa T, Cani M P, et al. Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles[J]. ACM Transactions on Graphics (S0730-0301), 2010, 29(6): 1-8.
- [7] Etmuss O, Gross J, Strasser W. Deriving a Particle System from Continuum Mechanics for the Animation of Deformable Objects[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics(S1077-2626), 2003, 9(4): 538-550.
- [8] Provot X. Deformation Constraints in a Mass-Spring Model to Describe Rigid Cloth Behavior[J]. Proceedings of Graphics Interface, 1995, 23(19):147-154.
- [9] Choi K J, Ko H S. Stable but responsive cloth[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2002, 21(3): 604-611.
- [10] Zhou C, Jin X, Wang C C L. Efficient and Stable Simulation of Cloth Undergoing Large Rotations[J]. Computing in Science & Engineering (S1521-9615), 2008, 10(10): 30-40.
- [11] Volino P, Magnenat-Thalmann N, Faure F. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation [J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2009, 28(4): 1-16.
- [12] Cirio G, Lopez-Moreno J, Miraut D, et al. Yarn-level simulation of woven cloth[J]. Acm Transactions on Graphics (S0730-0301), 2014, 33(6): 1-11.
- [13] Cirio G, Lopez-Moreno J, Miraut D, et al. Efficient simulation of knitted cloth using persistent contacts[C]//ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation. ACM, 2015: 55-61.
- [14] Zhao S, Luan F, Bala K. Fitting procedural yarn models for realistic cloth rendering[J]. Acm Transactions on Graphics(S0730-0301), 2016, 35(4): 1-11.
- [15] Daviet G, Bertails-Descoubes F, Casati R. Fast cloth simulation with implicit contact and exact coulomb friction[C]//Eurographics Symposium on Computer Animation, New York: ACM, 2015: 197.
- [16] Goldenthal R, Harmon D, Fattal R, et al. Efficient simulation of inextensible cloth[J]. Acm Transactions on Graphics(S0730-0301), 2007, 26(3): 49.
- [17] Ye Juntao. Simulating Inextensible Cloth Using Impulses [C]//Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, 2008: 1901-1907.
- [18] Otaduy M A, Rasmus T, Denis S, et al. Implicit Contact Handling for Deformable Objects [J]. Computer Graphics Forum(S0167-7055), 2009, 28(2): 559-568.
- [19] Hubbard P M. Collision Detection for Interactive Graphics Applications[J]. IEEE Transactions on Visualization & Computer Graphics (S1077-2626), 1995, 1(3): 218-230.
- [20] S J Adelson, L F Hodges. Generating exact ray-traced animation frames byreprojection[J]. IEEE Computer Graphics and Applications (S0272-1716), 1995, 15(3): 43-52.
- [21] Wong S K, Baciú G. A randomized marking scheme for continuous collision detection in simulation of deformable surfaces[C]//Vrcia 2006 ACM International Conference on Virtual Reality Continuum and ITS Applications, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong, China, June. DBLP, 2006: 181-188.
- [22] Curtis S. Fast collision detection for deformable models using representative-triangles[C]//Symposium on Interactive 3d Graphics and Games. ACM, 2008: 61-69.
- [23] Zheng C, James D L. Energy-based self-collision culling for arbitrary mesh deformations[J]. Acm Transactions on Graphics(S0730-0301), 2012, 31(4): 1-12.

