

基于物理模型的交互式服装实时动画

沈超 沈明忻 赵杰煜

(宁波大学信息与工程学院, 宁波 315211)

摘要 提出了一种用于实现基于物理模型的交互式服装实时动画的方法。由于基于物理的服装模型本身与碰撞检测涉及大量的计算,因此随人体运动的交互式服装实时动画一直是一个具有挑战性的课题。为了提高模拟性能,首先简化经典的“质点-弹簧”模型,并利用“半刚性-复杂摆”模型经向与纬向约束分开计算的优点;其次,在服装与人体之间的碰撞检测采用椭圆包围盒的检测方法,并根据碰撞检测本身存在的局部性,通过时间与空间相关性来加速。实验结果证明,本文方法与传统的方法相比,大量减少了计算,完全可以实现随人体运动的交互式服装实时动画。

关键词 基于物理的建模 服装 虚拟现实

中图法分类号: TP391.9 **文献标识码**: A **文章编号**: 1006-8961(2007)02-0266-06

Physically Based Real-time Animation of Interactive Garment

SHEN Chao, SHEN Ming-xin, ZHAO Jie-yu

(Faculty of Information Science and Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211)

Abstract In this paper, a new real-time interactive garment simulation based on physical model is proposed. The animation of interactive garment of moving body in real-time has always been a great challenge in the field of computer graphics because the computation of the garment model and collision detection is very lumping. In order to improve the performance, we firstly simplify the classical “particle-spring” model, and utilize the advantages of the processing separately of longitudinal and latitudinal restriction in “semi-rigid-complex pendulum” model; According to temporal and geometric coherence, we accelerate the collisions detection between the body and the garment because the collision detection is very local. The experimental results show that the computational complexity reduce rapidly and the movement of interactive garment can be simulated in real-time.

Keywords physically based modeling, clothing, VR

1 引言

交互式的服装模拟是虚拟现实应用中的核心技术之一,并且已经对服装设计和动画中虚拟角色着装领域产生了很大的影响,同时也可把相关产品放到 Internet 上,使网上选购服装真正成为可能^[1]。

在计算机图形学领域,对织物动画的研究已经历了 20 多年。目前,对基于物理模型的交互式服装实时动画的模拟通常分为下面 3 个步骤:(1)建立人体模型;(2)建立服装形变模型;(3)对服装模型

与人体模型之间进行碰撞检测和碰撞处理。对于人体模型本文没有进行深入研究,仅仅采用 Rudomin^[2]的方法实现它们。服装模型建立方法通常有:几何方法,基于物理的方法和上述两种方法的混合。最简单的基于物理的方法是“质点-弹簧”模型^[3,4],这个模型的优点在于:(1)基于服装的几何结构和物理属性;(2)能模拟服装的形变且计算方法简单;但此模型只计算相邻质点间的弹力,因此用很少的时间来计算形变,从而形变存在局部性的问题,最终导致超弹性问题以及迭代时间步长变大时显式迭代不稳定的问题。Baraff^[5]提出了一种隐式

收稿日期:2006-10-13;改回日期:2006-11-02

第一作者简介:沈超(1978~),男。现为宁波大学计算机应用技术专业硕士研究生。主要研究方向为虚拟现实和图像图形处理等。

E-mail: nbac163@163.com

迭代的方法从而解决了上述不稳定问题,然而此方法在每一迭代时间步需解一个非常大的线性方程组,因此不能应用于交互式实时服装模拟。Desbrun^[6]和Kang^[7]对Baraff方法的进行简化并预先计算这个线性方程组,从而大大减少了计算时间,提高了模拟性能;然而,对于由大量质点构成的服装,此简化会产生错误^[8],因此也不能应用于交互式服装模拟。Provot^[3]提出了一种动态逆向约束形变的方法来修正弹簧的超弹性问题,此方法通过多次迭代来快速的传播形变,因此具有较好的稳定性。

对于服装与人体模型的碰撞检测,传统方法是通过对分别组成二者模型的多边形之间直接相交测试的方法来检测^[9];并且此方法一般可使用层次包围盒方法^[5,10]来加速;但由于服装与人体模型本身由大量的多边形构成,使得相交测试的计算量非常大;并且由于模型本身处于运动中,难以用包围盒实时描述,因此该方法对实时交互式服装模拟来讲太复杂了^[9]。空间细分的方法不仅被应用于3维空间与人体模型,而且也被应用于服装模型^[11,12];但由于此方法只能在当前帧进行检测,因此不能应用于快速的交互式实时模拟。Vassilev's^[13]基于图形空间的碰撞检测方法大大提高了检测速度,然而此方法不仅需要特殊硬件来加速而且需对被服装覆盖的人体模拟的每一骨骼部分做特别处理。Rudomin^[2]提出了一种较好的方法,将人体模型的各个骨骼部分用相应的椭圆包围,然后通过检测服装质点是否与这些椭圆包围盒发生碰撞来简化碰撞检测。

本文的工作是要建立基于物理模型且与人体模型相结合的交互式服装实时动画,但如何提高动画模拟性能呢?本文主要从服装模型与碰撞检测这两方面来减少计算量,提高性能。在服装模型方面,本文根据服装本身的物理特性来简化经典的“质点-弹簧”模型,并利用“半刚性-复杂摆”模型^[14]经向与纬向分开计算的优点;在服装模型与人体模型的碰撞检测方面,采用高效的椭圆包围盒^[2]的检测方法,并根据碰撞检测本身存在的局部性,以及时间与空间相关性来加速。

2 经典“质点-弹簧”模型的简化

经典“质点-弹簧”模型^[3](如图1)将织物离散成网格,每一网格结点是一个有质量的质点,而相邻的质点间通过无质量且其长度不能为零的弹簧连接,从而

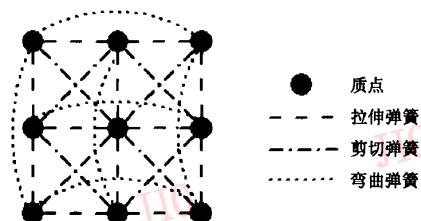


图1 质点-弹簧模型

Fig.1 Mass-spring cloth model

能够将物理规律(如牛顿第二定律)等应用于质点上。

相邻质点间连接的弹簧一般有3种类型^[3]:拉伸弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧,分别用于相关的拉伸力、剪切力和弯曲力的计算。

“质点-弹簧”模型能真实的模拟织物的运动^[4,5],但它仍无法满足实时动画的要求(特别是质点数目较大的情况),因此本文先从模型本身的角度来分析,来简化此形变模型从而减少计算量,提高模拟性能。

2.1 “质点-弹簧”模型简化思想介绍

上面简介了“质点-弹簧”模型,下面从服装模型本身以及与人体的关系来细述简化的原因:

(1) Jeff Lander^[15]详细介绍了各类型弹簧的作用,并说明了引入这些不同类型弹簧的原因:如剪切弹簧是为了控制织物的基本形状,使剪切织物更加困难;弯曲弹簧是为了防止织物掉在地上时不会滚成一团,使弯曲织物更加困难;

(2) 剪切弹簧和弯曲弹簧仅仅只在一定区域起作用^[16],所起作用也非常小;

(3) “质点-弹簧”模型只计算相邻质点间的力,因此用很少时间来计算形变,导致模型的形变具有局部性。

(4) 对于模型的弹簧超弹性问题用Provot^[3]的方法来修正,使弹簧形变保持原长的10%。

(5) 合体是着装的基本要求,而合体与人体对服装的支持区有密切关系^[17](支持区在上半身是肩围,在下半身是臀围),因此可假定服装质点在贴合区是固定在人体模型上的。

(6) 在运动过程中,人体运动会引起对服装的牵引和压迫^[17],即服装随着人体的运动而运动,但不可能使服装发生大的形变,并且服装本身形变具有局部性。

从上述几点可假设,随人体运动的服装的形状是基本保持不变的,因此本文对质点-弹簧模型的剪

切弹簧与弯曲弹簧进行忽略, Oshita^[18] 等也赞同这种观点, 并进行了概括, 指出如果引入了剪切与弯曲弹簧, 织物就会变成橡皮, 在其实现中也只考虑了拉伸弹簧。

2.2 经向与纬向的约束分开计算

微软中国研究院^[14] 提出的“半刚性-复杂摆”模型, 用半刚性样条来模型经向与纬向的形变, 且将织物的经向和纬向的形变约束分开计算, 从“降维”的思维来大大减少计算量, 提高模型的性能。而本文采用简化的“质点-弹簧”模型, 仅仅考虑拉伸弹簧, 因此也可采用经向与纬向分开计算的优点。为了均衡整体与局部的关系以及简化形变模型, 可将质点按经向与纬向分层, 然后分开计算约束。

2.3 简化的模型

简化“质点-弹簧”模型如图2, 描述如下:

(1) 模型离散成一个 $m \times n$ 质点组成的网格, 将经向上黑色小球表示的质点称为第1层质点, 而将纬向上阴影小球表示的质点称为第2层质点;

(2) 在第1层质点间仅使用拉伸弹簧来连接, 弹簧无质量, 且自然长度不为零;

(3) 先计算第1层质点的约束, 即计算其合力后确定其速度、加速度与位置; 再由第1层质点的速度与位置来确定第2层质点的速度与位置^[14];

(4) 通过 Provot^[3] 的长度调整方法来修正弹簧的“超弹性”问题。

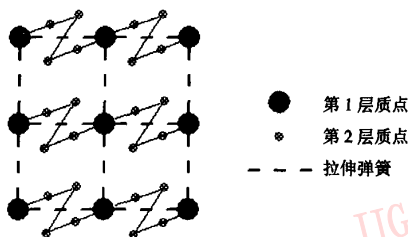


图2 简化的质点-弹簧模型

Fig. 2 Simplifying mass-spring cloth model

对于模型的数值计算方法本文采用显式迭代的方法, 因为此迭代方法比较简单, 只要迭代时间步长取得足够小, 具有较好的稳定性, 且速度较快(较隐式迭代节省了很多时间)。

3 简化模型的受力分析

服装模型受到内部和外部力的作用, 内部力本系统中主要指弹簧拉伸力; 外部力一般包括重力、风

力、空气阻力等; 但在本文服装动画中, 由于服装模型与人体模型之间存在摩擦力, 并随着人体模型的运动, 根据运动学与动力学原理可知, 外部力还包括人体模型对服装模型产生的惯性力。因此服装模型的每一质点在 $t + \Delta t$ 时刻可用下式来计算合力:

$$F^{t+\Delta t} = -ma^{t+\Delta t} - k(v^t + a^{t+\Delta t}\Delta t) - kv_p^{t+\Delta t} + mg + F_{\text{internal}}^{t+\Delta t} \quad (1)$$

其中, $ma^{t+\Delta t}$ 是人体模型运动时对服装质点产生的惯性力; $k(v^t + a^{t+\Delta t}\Delta t)$ 是人体模型运动产生的空气阻力; $kv_p^{t+\Delta t}$ 是服装质点相对于人体模型的运动产生的空气阻力; mg 是质点的重力; $F_{\text{internal}}^{t+\Delta t}$ 是服装的弹簧内力。因为服装模型采用显式迭代, 因此 Δt 非常小, 根据一级泰勒级数, 可近似计算公式(1)中各部分力(即使用 t 时刻的速度与加速度代替 $t + \Delta t$ 时刻的速度与加速度), 则 $v_p^{t+\Delta t} \approx v_p^t$, $ma^{t+\Delta t} \approx ma^t$;

根据 $\Delta x = v^t\Delta t + a^t\Delta t^2/2$,

则 $v^t + a^t\Delta t/2 \approx v(t) + a^{t+\Delta t}\Delta t$;

因此合力的式(1)可转化为下式:

$$F^{t+\Delta t} = -ma^t - k(v^t + a^t\Delta t/2) - kv_p^t + mg + F_{\text{internal}}^t \quad (2)$$

4 经线和纬线方向的约束模型

在本文的服装模型中, 首先计算经线方向(第1层质点)的约束即整体的运动形变, 然后计算纬线方向(第2层质点)的约束即局部的运动形变。

4.1 经线方向的约束

在经线方向上的质点间通过拉伸弹簧相连接, 因此计算较“半刚性-复杂摆”模型简单, 因“半刚性-复杂摆”模型需进行坐标变换及力的3维分解。

(1) $i = n$, n 是模型质点的数目;

(2) 对每一质点按式(2)计算合力;

(3) 根据公式 $v^{t+h} = v^t + ha^t$, $x^{t+h} = x^t + hv^{t+h}$ 计算每一质点的速度与位置;

(4) 通过 Provot^[3] 的动态逆向约束形变的方法调整质点的位置与速度。

通过上述计算过程, 即可确定第1层质点的位置。

4.2 纬线方向的约束

通过经向的约束, 已求得第1层质点的位置, 并用 Provot 方法保证经向上的伸缩率小于10%。

纬向上相邻的第1层质点间的质点仅起协调经线质点间形变的作用, 且其无质量, 但其可自由运

动。第2层质点的运动受到以下3个条件的限制:

(1) 对每一第2层质点,仅在第1层相邻质点确定的这条边和这条边的平均法线构成的面上运动;

(2) 每一第2层质点的速度由第1层相邻质点的速度确定,然后在上述的平面上投影;

(3) 对于第2层质点间的“越弹性”问题,通过Provot的动态逆向约束形变的方法进行调整。

根据第1层质点的位置与速度,然后通过上述纬向的约束计算,即可确定第2层质点的位置,从而决定整个模型的运动和形状。

5 人体模型的建立

本文的实时服装动画的基础是实时角色动画,当前实时角色动画技术主要有3种类型:关节动画、单一网格模型动画、蒙皮骨骼动画。本文的人体模型及人体动画就是使用蒙皮骨骼动画的技术实现的。

蒙皮骨骼动画可看作是关节动画和单一网格模型动画的结合。在蒙皮骨骼动画中,一个角色由作为皮肤的单一网格模型和按照一定层次组织起来的骨骼组成。其中,骨骼按照角色的特点组成一个层次结构且骨骼层次描述了角色的结构;皮肤则作为一个网格蒙在骨骼上,规定角色的外观,皮肤的每一顶点受到一个或多个骨骼的影响(通过骨骼对其的影响权重);而动画文件中的关键帧一般保存着骨骼的位置与朝向等信息。对于某一时刻各个骨骼的新位置与新朝向,可通过在动画序列中相邻的两个关键帧间的插值可确定;然后按照皮肤网格中各顶点中保存的影响它的骨骼索引和相应权重信息可计算出该顶点的新位置,这样就实现了蒙皮骨骼动画。

Rudomin^[2]就是通过蒙皮骨骼动画的原理建立了人体模型,并用椭圆包围盒对骨骼进行包围,最早提出此方法的是Wilhelms^[19]。用此方法实现的动画真实、速度快,并且易于碰撞处理(易于计算,易于做重叠测试与结点修改)。本文也采用此方法,对蒙皮骨骼动画当前有很多现成的软件工具可使用,如Maya,3DMax等。

5.1 人体模型的蒙皮骨骼的形成

为了实现真实的人体动画,因此本文采用3Dmax软件形成人物角色动画的骨骼、皮肤(如图3所示)。

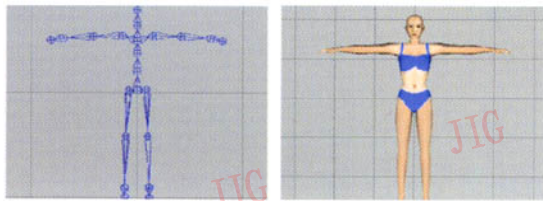


图3 人物角色的骨骼、皮肤

Fig. 3 The character's skeleton and skin

5.2 椭圆包围盒的形成

本文对人体模型的近似表示而形成的椭圆包围盒,是为了加快碰撞检测的速度。因此本文对椭圆包围盒的形成,必须要满足以下几个条件:

- (1) 椭圆包围盒要尽量逼近人体模型;
- (2) 椭圆包围盒的大小和位置关系应与骨骼、皮肤相对应,且层次结构一致;
- (3) 椭圆包围盒绑定在相对应骨骼上,并随骨骼的运动而运动。

为了达到这几个要求,本文的椭圆包围盒的形成主要通过包围球的缩放与旋转、平移得到,从而克服包围球与物体的逼近程度相当糟糕^[20]的缺点。因此通过对此包围球进行收缩与旋转、平移,从而最大程度的逼近人体模型,本文最后形成的椭圆包围盒如下图:

6 碰撞检测

在交互式的服装实时动画中,服装必然与人体模型发生连续的碰撞,如何快速处理碰撞成为系统的瓶颈之一。由于本文已采用Rudomin^[2]的方法建立人体模型,将人体模型的各部分用椭圆包围盒来包围(如图4),因此碰撞只需检测服装质点与椭圆包围盒是否发生碰撞,从而避免了大量的质点与质点、质点与线以及质点与面之间的碰撞检测,检测效率大大提高。

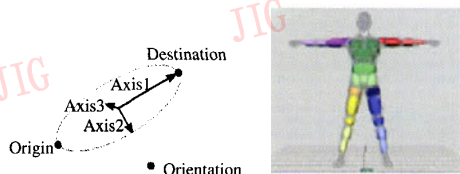


图4 本文人物角色的椭圆包围盒

Fig. 4 Character's ellipsoid boundings

本文的工作主要是根据碰撞的特性,提出了一些加速的方法,从而来减少计算量,提高计算效率。

(1) 根据碰撞存在的局部性特点(服装背部的质点不可能与腿部发生碰撞),为服装质点形成预碰撞椭圆包围盒列表,为每一质点大大减少了需检测的碰撞;

(2) 由于本文服装模型采用显示迭代的方法,因此迭代时间步长较小,根据碰撞存在时间与空间的相关性^[21],本文在每次碰撞检测后为服装质点自动生成已发生碰撞椭圆包围盒列表,在下次碰撞检测时将首先与已发生碰撞椭圆包围盒列表中的椭圆包围盒进行检测。

(3) 将椭圆盒包围转变为包围球^[22]来进行碰撞检测。

本文用上述的加速方法来提高检测的性能,但如果检测到碰撞,需做出相应的碰撞响应。由于通过改变质点的力的大小的碰撞响应方法在有些模拟时间步很难实现^[23],因此本文通过改变质点的位置与速度的大小来处理碰撞响应^[6,9,24]。当检测到碰撞后,首先确定质点与当前碰撞椭圆包围盒的圆心所在的直线,再确定此直线与椭圆的表面相交的点,将质点直接移到此相交的点;同时考虑椭圆包围盒是没有弹性的,因此将质点与圆正交速度分量置为零。

7 结 论

本文的测试环境中,是通过一个穿着裙子行走的虚拟人来测试本文交互式服装动画的性能。图 5 是实时模拟结果的部分图像。其中人体模型使用蒙皮骨骼动画原理建立,使用了 25 骨骼连接,且通过 15 个椭圆包围盒包围;而人体模型上着装的裙子由 837 质点构成。系统用 Java3D 语言实现且在 DimensionTM5150-n 机器测试(Intel P IV 3.0GHz CPU, 256M GeForce™ 6800 video card, 1GB NECC DDR@533MHz SDRAM);表 1 列出了本文模拟的性能。

从表 1 可知,本文采服装模型简化的方法使每帧平均迭代时间减少到原来的 74%,而采用碰撞检测的加速算法使每帧平均碰撞时间减少到原来的 40%,最后取得了平均 66fps 高性能;从图 5 可知,本文基于物理模型的交互式服装动画真实、逼真,褶皱

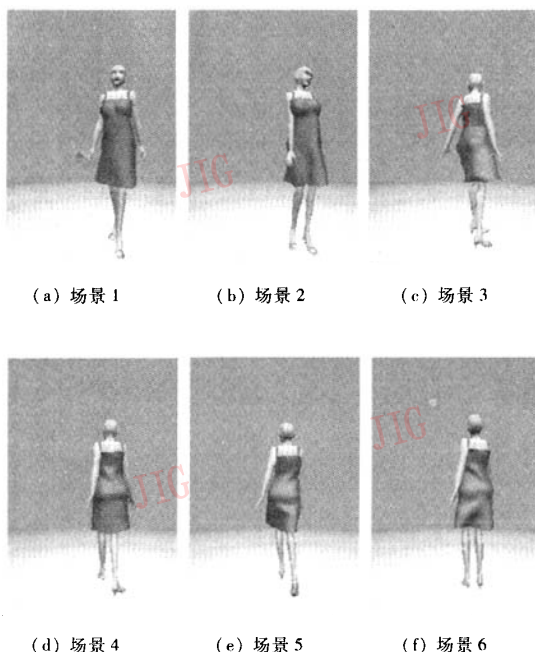


图 5 实时交互式服装模型

Fig. 5 Interactive garment simulation in real-time

表 1 实验结果的模拟性能

Tab. 1 The simulation performance of the test results

使用方法	计算时间 (ms/f)			fps
	迭代	碰撞	总时间	
经典质点-弹簧模型 + 未优化碰撞算法	9.29	6.64	15.93	46
简化质点-弹簧模型 + 已优化碰撞算法	6.87	2.59	10.82	66

显明,随着人体的运动服装实时与其进行交互,并在外力的共同作用下表现栩栩如生的效果。

因此,本文的方法具有性能高,真实性强的特点,完全可应用于实时动画。

综上所述,本文通过服装模型简化与碰撞检测算法的加速,大大减少了计算时间,实现了一个高效的交互式服装动画系统。本文系统采用 Java3D 语言编程实现,因此提出的交互式服装动画的实时模拟方法,可直接通过 IE 浏览器应用于服装相关电子商务,计算机动画,虚拟现实等领域,有着良好的应用前景。下一步的工作,是将模拟方法应用于多层服装的实时模拟;通过 GPU 等硬件来加速模拟的渲染速度以及 2 维服装 CAD 系统结合建立 3 维虚拟服装设计系统等。

参考文献 (References)

- 1 Ng H N, Grimsdale R L. Computer graphics techniques for modeling cloth [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5): 28 ~ 41.
- 2 Rudomin I, Castillo J. Real-time clothing: geometry and physics [J]. Journal of WSCG, 2002, 10(3): 45 ~ 48.
- 3 Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [A]. In: Proceeding of Graphics Interface '95 [C], Québec, Canada, 1995: 147 ~ 155.
- 4 Choi K, Ko H-S. Stable but responsive cloth [A]. In: Proceedings of the 29th annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques(2002)[C], San Antonio, TX, USA, 2002: 604 ~ 611.
- 5 Baraff D, Witkin A. Dynamic simulation of non-penetrating flexible bodies [J]. Journal of Computer Graphics (SIGGRAPH '92), 1992, 26(2): 303 ~ 308.
- 6 Desbrun M, Schröder P, Barr A. Interactive animation of structured deformable objects [A]. In: Proceedings of Graphics Interface '99 [C]. Kingston, Ontario, Canada, 1999: 1 ~ 8.
- 7 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, 2001, 17(3): 147 ~ 157.
- 8 Volino P, Magnenat-Thalmann N. Comparing efficiency of integration methods for cloth animation [A]. In: Proceeding of Computer Graphics International 2001 [C], Hong-Kong, 2001: 257 ~ 266.
- 9 Provot X. Collision and self-collision handling in cloth model dedicate to design garments [A]. In: Proceedings of Graphics Interface '97 [C], Kelowna, BC, 1997: 177 ~ 189.
- 10 Lin M, Gottschalk S. Collision detection between geometric models: a survey [A]. In: Proceedings of the 8th IMA Conference of Mathematics of Surfaces [C], Birmingham, UK, 1998: 37 ~ 56.
- 11 Meyer M, DeBunne G, Desbrun M, *et al.* Interactive animation of cloth-like objects in virtual reality [J]. The Journal of Visualization and Computer Animation, 2001, 12(1): 1 ~ 12.
- 12 Zhang D, Yuen M-M. Collision detection for clothed human animation [A]. In: Proceeding of the 8th Conference of Pacific Graphics and Applications [C], Hong Kong, 2000: 328 ~ 337.
- 13 Vassilev T, Spanlang Y, Chrysanthou Y. Fast cloth animation on walking avatars [A]. In: Proceeding of Eurographics '01 [C], Manchester, USA, 2001, 20(3): 260 ~ 267.
- 14 Xu Y-Q, Cheng C-Y, Shi J-Y, *et al.* Physically based real-time animation of curtains [R]. Technical Report MSR-TR-2000-34, Beijing: Microsoft Research, 2000.
- 15 Lander J. Devil in the Blue-Faceted Dress: Real-time Cloth Animation [DB/OL]. http://www.gamasutra.com/features/20000327/lander_01.html, 2000-02-27.
- 16 Eddy B, Ascher U. Decomposing cloth [A]. In: Proceeding of ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation [C], Grenoble, France, 2004: 153 ~ 161.
- 17 Sun Yue. Garmentso · Somatology [M]. Shanghai: Publishing Company of China Textile University, 2002: 89 ~ 121. [孙跃. 服装 · 人体 [M]. 上海: 中国纺织大学出版社, 2002: 89 ~ 121.]
- 18 Oshita A, Makinouchi. Real-time cloth simulation with sparse particles and curved faces [A]. In: Proceedings of Computer Animation 2001 [C], Seoul, Korea, 2001: 220 ~ 227.
- 19 Wilhelms J. Animals with anatomy [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1997, 17(3): 22 ~ 30.
- 20 House D-H, Breen D-E. Particle representation of woven fabrics [M]. Cloth Modeling and Animation. Alaska: Publishers of Science and Technology, 2000: 55 ~ 78.
- 21 Cohen J, Lin M, Manocha D, *et al.* An inter-active and exact collision detection system for large-scale environments [A]. In: Proceedings of Acm Interactive 3D Graphics Conference [C], Monterey, California, USA, 1995: 189 ~ 196.
- 22 Paul N. Generic Collision Detection for Games Using Ellipsoids [DB/OL]. http://www.gamasutra.com/features/20010324/melax_01.html, 2002-07-02.
- 23 Terzopoulos D, Platt D, Barr A, *et al.* Elastically deformable models [J]. Computer Graphics, 1987, 21(4): 205 ~ 214.
- 24 Eberhardt B, Weber A, Strasser W. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping [J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5): 52 ~ 59.