

任意衣物和人体的 3D 试穿实时仿真

陈燕, 薛原, 杨若瑜*

(软件新技术国家重点实验室(南京大学), 南京 210046)

(*通信作者电子邮箱 yangry@nju.edu.cn)

摘要:近年来服饰试穿模拟的研究日趋盛行,但始终较难兼顾灵活性、真实感、实时性与完整性。因此以任意人体和任意衣物的匹配试穿为目标,设计了一种新的试穿仿真流程。首先,采用非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面自动完成可形变人体建模;然后对 3DMAX 模型进行质点重构并添加多类型弹簧,完成任意衣物建模;最后,采用 Verlet 积分完成试穿仿真,并实现了新的模型简化和三角形内点判断算法。实验结果表明,人体和衣物建模方法保证了试穿效果的多样性,而衣服模型简化和内点判断算法可将仿真性能提高约 30%,保证了实时性。

关键词:试穿仿真;可形变人体;质点弹簧模型;网格简化;实时性

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

Real-time simulation for 3D-dressing of random clothes and human body

CHEN Yan, XUE Yuan, YANG Ruoyu*

(Key Laboratory for Advanced Technology of Software (Nanjing University), Nanjing Jiangsu 210046, China)

Abstract: Recently, the research on clothing simulation is becoming hotter. But the flexibility, sense of reality, real-time and integrity are always difficult to be unified. Therefore, a new dressing simulation system was designed concerning the automatic fitting of any human body and clothes. At first, the surface of Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS) was used to complete deformable body modeling. Then, particles were reconstructed from the 3DMAX model and multi-type springs were created to complete arbitrary cloth modeling. Finally, Verlet integrator was adopted to complete dressing simulation, while a new simplification algorithm for cloth models and a new method for judging interior point with a triangle were implemented. The results show that the proposed modeling approach for body and clothes guarantees the diversity of dressing effect, and the model simplification and interior point judgment can increase the simulation performance by 30% or so, which ensures the real-time quality.

Key words: dressing simulation; deformable body; mass-spring model; mesh simplification; real-time

0 引言

近年来,三维动画游戏或电影中对虚拟服饰的真实感要求越来越高。同时,网购的盛行则激发了对虚拟衣物试穿的研究,并不断对其效果提出更高的要求。

事实上,基于物理的服装仿真动画技术一直受到国内外研究学者的广泛关注。Fuhrmann 等^[1]和 Goldenthal 等^[2]利用约束和迭代求解系统控制方程代替大型平面逼近的方法来加速衣物模拟。Stump 等^[3]在预处理中将布料网格分割为一组重叠的簇集以便仿真时将质点与之进行匹配,从而确定质点位置及偏移。该方法在簇集规模不大时计算效率较高。Volino 等^[4]则对真实布料本身的拉伸弹力进行实验测试,获取数据再进行仿真,可有效计算静态窗帘和动态动画。Chen 等^[5]提出一种基于网格插值的纯几何方法,并采用能量最小化方法求解布料或服装的最终悬垂状态,该方法稳定性较好。Feng 等^[6]通过捕捉两步之间衣物形变的关系提高仿真效率。Rohmer 等^[7]利用几何方法模拟了服装面上褶皱,采用隐式变形器计算最终精化的变形平面。孙守迁等^[8]引入约束凸包简化和预计算外围映射体的方法提高了质点穿透判断和碰撞

响应求解的速度。Guan 等^[9]将二维衣片信息输入成熟的仿真软件来获得静态的褶皱等效果,再对不同姿势或体型的人体模型穿衣后的静态仿真结果进行训练,最终实现多样化的试穿仿真。毛天露等^[10]通过骨架驱动变形(Skeleton Driven Deformation, SDD)方法模拟了紧贴人体皮肤的局部区域的服装变形。石敏等^[11]对弹性变形模型进行了各种不同的改进或约束,以尽可能趋近于布料的真实变形行为。

上述方法都在不断改进,但很多都着眼于局部算法效率提高^[1-7,11]而非设计完整系统。孙守迁等^[8]和 Guan^[9]的方法是以衣服试穿为目标的,但前者旨在获得较高的仿真效率,而未将重点放在人体和衣物的任意性上;而后的思路是通过大量的数据训练来获得良好的仿真效果。而毛天露等^[10]使用的 SDD 方法虽然简单且速度较快,但拟定各控制点的权值需要大量额外的时间。另外,基于已有的技术,出现了一些试衣镜系统^[12-13],但由于受到算法效率和数据来源等限制,文献[12]仅将衣服的二维图片贴在人物的身上,文献[13]中在侧面可发现前后两片衣服缝合处有缺陷,而带袖子的衣服在袖子处与人体不匹配。

综上,衣物试穿仿真技术在以下几个方面还有待进一步

收稿日期:2013-05-31;修回日期:2013-10-21。 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61272218, 61321491)。

作者简介:陈燕(1990-),女,安徽六安人,硕士研究生,主要研究方向:3D 服饰仿真;薛原(1990-),男,江苏徐州人,硕士研究生,主要研究方向:3D 服饰布料模拟;杨若瑜(1977-),女,安徽滁州人,副教授,博士,CCF 会员,主要研究方向:计算机视觉、三维仿真。

提高:

1) 真实人体与人体模型之间缺乏逼真和灵活的匹配对应。

2) 衣服模型获取困难且衣服类型有限。早期方法仅用矩形布料模型做实验;另一部分采用自定义的几种衣服模型,常见的如短袖 T 恤、半身裙等;还有一些通过二维衣片缝合生成三维衣服。不够实用和灵活,有时还需要额外软件介入处理。

3) 人体或衣物模型的复杂性使得碰撞检测时间过长,很多对网格面片进行基于误差矩阵的简化算法本身也较耗时;三角形求交计算和内点判断问题也还有提高的空间。

针对以上问题,本文提出了用参数控制的非均匀有理 B 样条(Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS)曲面来构造任意三维人体,并对人体各部位建立包围盒和圆柱映射表;然后在任意可下载的 3DMAX 衣服模型基础上构造邻接表并提出了一种更快速实用的衣服网格简化算法,避免了迭代积分计算过程中简化模型与原模型运动不一致的问题;最后通过优化的求交、内点判断算法来提高碰撞检测效率,最终完成实时试穿仿真。

1 人体网格生成

本文按系统内部设置的体型参数自动生成由 NURBS 曲面构成的可形变人体模型。人体共分为头部、身体、左/右大(小)臂、左/右大(小)腿这 10 个部位。每个部分都是由两个 NURBS 曲面(前后两面)构成。通过修改各部位自身参数和部位间的连接参数,就生成了不同体型和姿态的人体曲面,然后在曲面上获取任意多个点生成任意粒度的人体网格模型。

对每个部位,在其曲面的 u 、 v 方向分别取样,并获得 $(w + 1) * (q + 1)$ 个点放入集合 $S_{kl} = \{v_{ij}(x, y, z), i \in [0, w], j \in [0, q]\}$ 中,其中 v_{ij} 表示质点, $k \in [0, 9]$ 表示人体部位编号, $l \in \{0, 1\}$ 表示该部位曲面的前后。按如图 1 所示规律构造三角网格,存于 $C_k = \{V_k, T_k\}$ 中,其中, $V_k = S_{k0} \cup S_{k1}$, T_k 表示第 k 个部位的三角面片集合。最终构造的人体网格模型如图 2 所示。随后,为人体各部位建立有向包围盒(Oriented Bounding Box, OBB)。

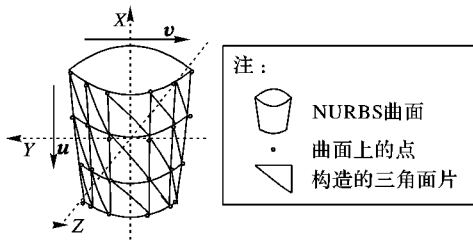


图 1 NURBS 表面上的点构成的三角网格

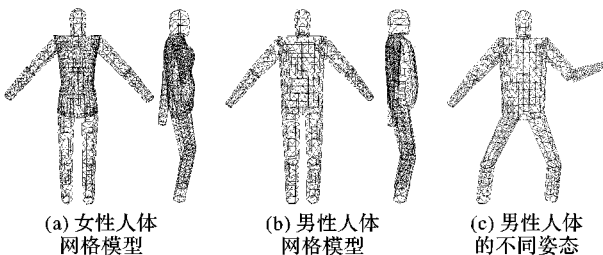


图 2 人体网格模型

2 衣服模型预处理

2.1 质点弹簧模型的构造

首先,根据衣服模型具有的点和面片信息构造邻接表;其次,依据邻接表信息建立衣服的质点弹簧模型,共包含三种弹簧:结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧。

从 3DMAX 模型恢复的网格有如下规律:1) 边 v_0v_2 和 v_1v_2 属于“近似直角边”,而 v_2v_0 则是“近似斜边”;2) 与斜边 v_2v_0 相邻接的“上”“下”两个三角形的三个顶点的排序如图 3 所示。据此拟定弹簧构造规则如下:

- 1) 所有“近似直角边”都作为结构弹簧,所有“近似斜边”都作为剪切弹簧。
- 2) 将“近似斜边”的两个邻接三角面片的第 2 个顶点连接形成另一部分剪切弹簧。
- 3) 在构造邻接表时,已经为每个点 v 的邻接点添加了不同标记,以表明是在 v 的“垂直方向”还是“水平方向”,如图 3 所示,分别将垂直方向的点之间、水平方向的点之间连接得到弯曲弹簧。

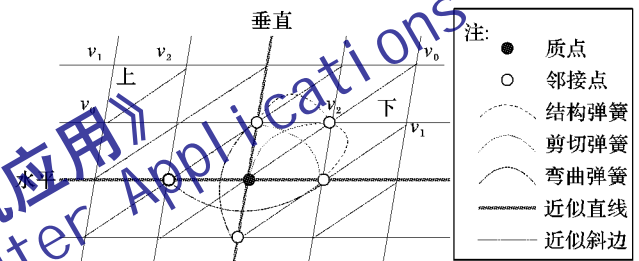


图 3 衣服三角面片的组织及弯曲弹簧的构造

2.2 衣服模型的简化

衣服模型一般都会有 2000 以上个顶点、4000 以上个三角面片,碰撞检测十分耗时。因此本文设计了简单的三角面片折叠方法对其进行有效的简化。

主流的网格模型三角面片简化算法^[8,14-15]是计算出一个新顶点并使一个三角面片消减成该顶点之后,其误差最小,这类方法耗时多,而且新顶点不一定在三角面片上。

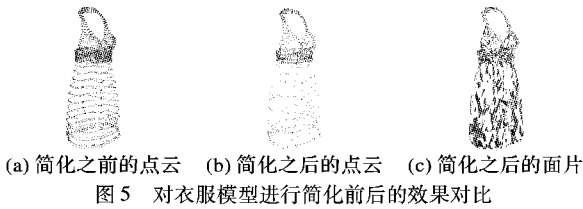
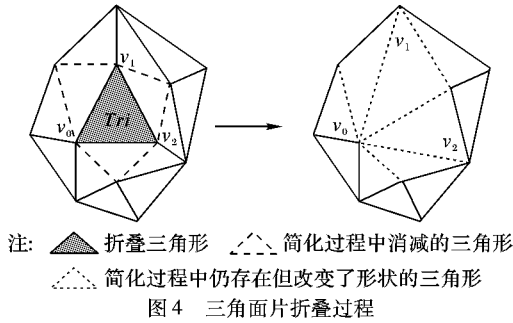
本文方法是直接选取三角面片上一个顶点,将该三角形折叠为此顶点:如图 4 所示,将 $Tri\{v_0, v_1, v_2\}$ 简化为它的顶点 v_0 ;同时,为使简化点的分布均匀,提出了基于标记恢复的多重扫描方法。简化方法具体如下:

记衣服网格模型上的所有信息集合为 $Mesh = \{P^M, E^N, T^L\}$, M 为顶点总数, N 为边总数, L 为面片总数。保留下的顶点数占衣服模型原总顶点数 M 的比率定义为“简化度”。

- 1) 设置简化度 B , 记当前剩余顶点为 $VR_{number} = M$ 。
- 2) 对当前三角面片 $Tri_{current} \in T$, 统一将其简约成它的第一个顶点, 记为 $v_{brief} = v_0$, 另记消减集合 $V_{cut} = \{v_1, v_2\}$, 且 $VR_{number} = VR_{number} - 2$ 。
- 3) 修改顶点 $v_k \in V_{cut}$ 的每个邻接面片 Tri_i 的信息, 如果 $v_j (\in Tri_i) = v_k$, 则将 v_j 修改为 v_{brief} 。最后将完全消失的三角形标记为 Tri_{brief} , 且进行 $T - Tri_{brief}$ 操作; 将形状改变的三角面片放入集合 T_{mark} 中, 下次循环不再对这些三角面片进行处理。
- 4) 修改 v_{brief} 的邻接面信息;
- 5) 如果 $(\gamma = VR_{number}/M) \leq B$, 则简化结束。否则, 检查

$T - T_{\text{mark}}$ 是否为空,若为空,则将 T_{mark} 清空,再转 2); 否则直接转 2)。

根据实验测试,不影响最终试穿仿真效果的简化度范围通常在 20% ~ 30%。以衣裙 1 为例,简化度置为 30%,其简化前后的效果如图 5 所示。



3 衣物试穿仿真

本系统最终的试穿仿真通过对人体和衣服模型进行对齐、动力学微分方程数值求解、碰撞检测和碰撞处理来完成。

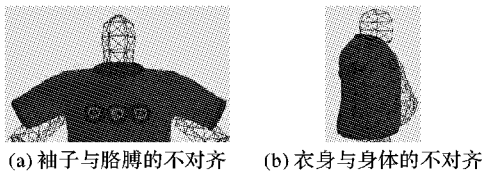
3.1 衣服与人体对齐

本文首先用简单的平移和缩放将原始衣服模型与人体进行全局位置对齐。但是人体的形态与所获得的衣服的姿态并不融合,如图 6 所示。所以还需进行局部对齐处理,如使衣袖包围胳膊等,从而更加贴近真实的穿衣效果。以图 6(b) 所示情况为例,局部对齐的步骤如下:

1) 扫描衣服身体部分的网格点,找到 z 值最小的点 $v_{z \min}$,在人体的部位找到与 $v_{z \min}$ 欧氏距离最近的点 v_{body} 。然后,从 v_{body} 出发沿 Y 轴正向找到衣领上最高点 $v_{y \max}$,记 $l_{yz} = v_{y \max} v_{z \min}$, $l_{yb} = v_{y \max} v_{\text{body}}$,计算夹角 $\theta = \langle l_{yz}, l_{yb} \rangle$ 。将衣服绕 X 轴旋转 θ° 。

2) 旋转之后,若仍有部分衣服在身体内。此时假设衣服有足够的弹性,将相关质点(作为碰撞点来处理)向身体外进行拉伸,使其紧贴身体外侧,并将这些点标记为固定点,碰撞检测时不再处理。

对齐之后的效果如图 7 所示。



3.2 质点位置求解和校正

由于隐式积分法每步计算较复杂耗时,相对而言,显式积分法更适于衣物仿真等应用。本文采用 Verlet 积分算法 (Verlet Integration Algorithm) 进行质点位置迭代计算,相比其他显式积分法(欧拉法等)更具稳定性。

首先,对衣服上的每个质点进行力的计算。实验中,只将重力和空气阻力作为外力,不考虑风力的存在,而对于内力,本系统采用孙守迁等^[8]的方法:将内力作为一个相对约束条件通过弹簧迭代校正过程来体现,可有效避免弹簧刚性问题,保持系统稳定性。

其次,用 Verlet 积分器对质点进行一个时间步长之后的位置计算:

$$p^{t+\Delta t} = 2p^t - p^{t-\Delta t} + F_{\text{External}}^t \Delta t^2 m^{\text{Inverse}} + O(\Delta t^4) \quad (1)$$

其中: Δt 为时间步长, p^t 、 F_{External}^t 分别为 t 时刻该质点位置、所受的外力。

最后,为了适用于具有大弹性的布料,对向量校正公式做了改进:根据不同类型弹簧的属性为每一个弹簧设置不同的最大拉伸长度的阈值 l_{ij}^{max} 。若当前弹簧长度超过最大值,按式(1)计算的校正向量将弹簧调整到最大值;若当前弹簧长度小于自然长度,则调整到自然长度:

$$V_{\text{correct}} = \frac{F_i - p_j}{\|p_i - p_j\|} \cdot (\|p_i - p_j\| - l_{ij}^{\text{max}}) \quad (2)$$

其中: V_{correct} 为校正向量, p_i 和 p_j 分别为弹簧校正前两端质点的位置。

按式(3) 计算校正后质点的目标位置:

$$\begin{cases} p_i^{\text{correct}} = p_i - \frac{m_i^{\text{Inverse}}}{m_i^{\text{Inverse}} + m_j^{\text{Inverse}}} \cdot V_{\text{correct}} \\ p_j^{\text{correct}} = p_j - \frac{m_j^{\text{Inverse}}}{m_i^{\text{Inverse}} + m_j^{\text{Inverse}}} \cdot V_{\text{correct}} \end{cases} \quad (3)$$

其中: m_i^{Inverse} 和 m_j^{Inverse} 是质点 i 和 j 的逆质量(质量的倒数)。

3.3 碰撞检测

将人体网格模型点沿其法向量向外扩张,使得实际碰撞检测的人体与真实人体有一定距离而无需处理“点-三角形”,即衣服质点与人体三角面片的碰撞情况。然后,对人体各部位建立圆柱映射,且划分为多个方形区域后,获得每个区域包含的三角形集合存于 T_{bodyR}^i ,使得后面的碰撞点仅需与 T_{bodyR}^i 而无需与人体全部面片进行碰撞检测和处理^[8]。

碰撞检测流程如图 8 所示,“碰撞检测处理”算法为:

记 v_{obbi} ($i \in [0,7]$) 为某个 OBB 的顶点, n_k ($k \in [0,5]$) 为该 OBB 上各面的法向量,指向包围盒外侧。

1) 对衣服上每个点 $v(x, y, z)$,若向量 $V_{\text{ov}} = v_{\text{obbi}}v$ 与 n_k 的内积 $V_{\text{ov}} \times n_k < 0$,则表明该点在 OBB 内,跳至 2); 否则结束。

2) 进一步将 v 与人体网格进行碰撞检测。经过 $v(x, y, z) \rightarrow v_{\text{local}}(x_l, y_l, z_l) \rightarrow v_{\text{local}}(r, \theta, z)$ (圆柱面坐标) 的转换,根据 θ 和 z 值确定 v 在圆柱映射表中的索引位置 index ;然后再将 v 与 $T_{\text{bodyR}}^{\text{index}}$ 中的每个面进行碰撞检测(同第 1)步)。若在人体内部,标记为“碰撞点”: $v_{\text{collision}}^{\text{index}}$,且计算出 v 在圆柱中心轴上的投影点 $v_{\text{proj}}^{\text{index}}$ 。

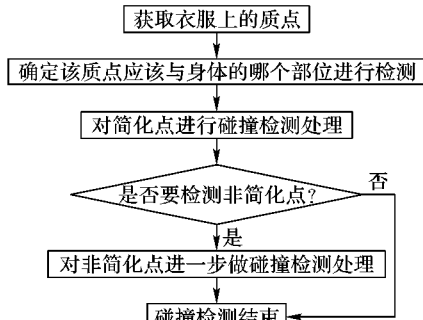


图 8 碰撞检测流程

3.4 碰撞处理

最后对衣服上所有标记的“碰撞点”做碰撞响应点定位和碰撞响应处理。

对每一个碰撞点 $v_{collision}^{index}$, 将射线 $d^{index} = v_{proj}^{index} v_{collision}^{index}$ 与 T_{bodyR}^{index} 中各三角形进行求交, 可能会出现如图 9 所示的两种情况:

1) 交点在三角面片之内; 2) 交点在三角面片之外。而只有交点是三角形的内点时才为有效的碰撞响应点。

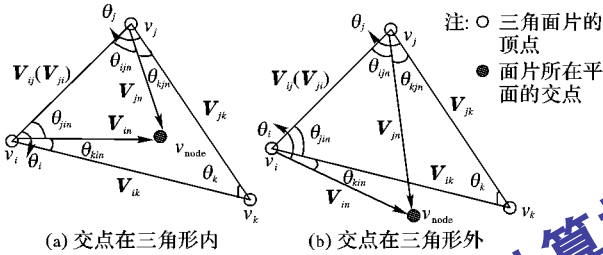


图 9 交点与三角形的两种关系

已有的内点判断方法有很多种^[16], 通过文献^[16]的论述得知, 其中比较简单有效的是面积判断法, 该方法思想是根据点在三角形内, 则该点与三角形三个顶点构成的三个小三角形的面积应该等于整个大三角形的面积这一属性进行判断。本文根据面积判断法, 进一步将判断算法改进为: 若点 v 在面片内, 则 v 与任意一个顶点的连线与该顶点相连的两条边所构成的两个角度之和等于该顶点处的三角形的内角, 具体步骤如下:

- 1) 射线 d 与三角形 $Tri(v_i, v_j, v_k, \theta_i, \theta_j, \theta_k)$ 求得的交点为 v_{node} , θ 为内角。
- 2) 记向量 $V_{in} = v_i v_{node}$, $V_{jn} = v_j v_{node}$, $V_{ik} = v_i v_k$, $V_{ij} = v_i v_j$, $V_{jk} = v_j v_k$, $V_{ji} = v_j v_i$ 。
- 3) 分别计算夹角 $\theta_{jin} = \langle V_{ij}, V_{in} \rangle$, $\theta_{kin} = \langle V_{ik}, V_{in} \rangle$, $\theta_{jyn} = \langle V_{ji}, V_{jn} \rangle$, $\theta_{kyn} = \langle V_{jk}, V_{jn} \rangle$ 。
- 4) 若 $\theta_{jin} + \theta_{kin} = \theta_i$ 且 $\theta_{jyn} + \theta_{kyn} = \theta_j$, 如图 9(a) 示, v_{node} 在三角形内, 记为碰撞响应点 $v_{respond}$; 否则, 如图 9(b) 所示, v_{node} 在三角形外, 忽略它, 继续求其他交点。

在获得了 $v_{respond}$ 之后, 将 v 的最终位置修改为:

$$p_{position} = v_{respond} + \lambda \cdot n_{normal} \quad (4)$$

其中: λ 是一个阈值参数, 用于弥补计算过程中的计算精度缺失; n_{normal} 是响应点所在三角面片上的单位法向量。

4 实验结果与分析

图 10 给出 6 种具有代表性的 3DMAX 衣服模型并以它们为样本给出实验结果和分析。



4.1 简化前后用时对比

针对图 10 中的衣服模型, 测试衣服简化前后碰撞检测所用时间如表 1 所示。

表 1 简化前后的模型数据和碰撞检测效率对比 (简化度为 30%)

实验对象	顶点个数		碰撞检测耗时/ms	
	简化前	简化后	简化前	简化后
图 10(a)	4043	1211	72.80	46.33
图 10(b)	3912	1172	78.44	57.37
图 10(c)	5702	1710	166.92	95.37
图 10(d)	7503	2250	145.93	134.47
图 10(e)	3215	963	47.83	22.98
图 10(f)	2408	722	54.40	28.69

4.2 三角形内点判断算法比较

在对大量衣服质点和人体面片进行处理时, 内点判断十分频繁。例如, 对衣裙 2 (3912 个顶点) 人体上身 (468 个面) 进行实验, 需要进行约 7500 次的内点判断。将本文方法与面积判断法进行对比, 结果如表 2 所示, 约可提高 10%。

表 2 内点判断总耗时比较 ms

实验对象	面积判断法	本文方法
图 10(a)	11.20	10.15
图 10(b)	14.04	12.68
图 10(c)	23.30	21.10
图 10(d)	33.53	30.02
图 10(e)	5.84	5.28
图 10(f)	6.88	6.16

4.3 仿真效果与分析

图 11 对不同衣服给出了不同观察角度上的仿真结果, 可以较全面地看出其试穿效果。



图 11 试穿仿真效果

对图 11 所示的实验,检测系统各模块消耗的平均时间如表 3 所示,其中“对齐之后”时间表示为对齐结束到状态平衡

之间所用的时间。在试穿效果可接受的前提下,时间步长取 0.05 s。

表 3 完整仿真效率分析表

实验对象	人体网格模型的构造时间	衣服模型的获取与重构时间	试穿仿真时间		对齐之后的每个步长计算的 平均时间
			对齐	对齐之后	
图 11(a)	53.66	7 226.96	14.43	1 689.29	41.20
图 11(b)	54.08	6 751.49	11.66	1 731.41	42.23
图 11(c)	51.90	13 653.59	15.98	2 704.10	65.95
图 11(d)	38.88	14 162.46	31.54	2 077.12	50.66
图 11(e)	43.11	* 4 584.89	* 15.03	* 1 039.74	* 25.36
		** 13 561.70	** 24.82	** 2 758.52	** 67.28
图 11(f)	43.68	* 2 793.93	* 9.91	* 1 024.34	* 24.98
		** 13 225.92	** 20.20	** 2 812.39	** 68.59

注:*表示上衣所用的时间,**表示裤子所用时间。

由表 3 可知,总体上看,各项时间随着衣服模型面片的增多而增长。衣服模型获取与重构消耗的时间占整个模拟时间的 80% 以上,但正是这一步预处理可以有效地提高后续仿真效率,仿真过程中的每步计算仅需 20~70 ms。而在应用系统中,将事先对所有衣服模型进行离线预处理和流式存取,而人体的构造和对齐均仅进行一次,在线试衣后续效果(例如用户观看旋转、抬手、叉腰等效果)仅受单步仿真效率影响,因此能够达到实时。

5 结语

本文设计并实现了一个完整的衣服试穿系统。该系统通过自定义任意人体模型和直接使用任意已有的 3DMAX 衣服模型来增加试穿的灵活性和真实性:优化了衣服模型简化方法和碰撞求交后的内点判断算法,提高了仿真效率,从而在处理较复杂的人体和衣物时,能达到更好的实时效果。在以后的工作中,本系统将针对动态人体、尺寸模拟和衣物特殊效果这三方面做进一步的研究和改进。

参考文献:

- [1] FUHRMANN A, GROSS C, LUCKAS V. Interactive animation of cloth including self collision detection[J]. *Journal of WSCG*, 2003, 11(1): 141-148.
- [2] GOLGENTHAL R, HARMON D, FATTAL R, et al. Efficient simulation of inextensible cloth[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2007, 26(3): 49.
- [3] STUMPP T, SPILLMANN J, BECKER M, et al. A geometric deformation model for stable cloth simulation[C]// *Proceedings of the 2008 Virtual Reality Interactions and Physical Simulation*. Grenoble, France: Eurographics Association, 2008: 39-46.
- [4] VOLINO P, MAGNENAT-THALMANN N, FAURE F. A simple approach to nonlinear tensile stiffness for accurate cloth simulation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2009, 28(4): 105.
- [5] CHEN M, TANG K. A fully geometric approach for developable cloth deformation simulation[J]. *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*, 2010, 26(6/7/8): 853-863.
- [6] FENG W, YU Y, KIM B. A deformation transformer for real-time cloth animation[J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(4): 108.
- [7] ROHMER D, POPA T, CANI M P, et al. Animation wrinkling: augmenting coarse cloth simulation with realistic-looking wrinkle

- [J]. *ACM Transactions on Graphics*, 2010, 29(5): 157.
- [8] SUN S Q, XU A G, HUANG Q, et al. Real-time garment simulation based on geometrically approximating character with colliding objects[J]. *Journal of Software*, 2007, 18(11): 2921-2931. (孙守迁, 徐爱国, 黄琦, 等. 基于角色几何碰撞体估计的实时服装仿真[J]. *软件学报*, 2007, 18(11): 2921-2931.)
- [9] GUAN P, REISS L, HIRSHBERG D, et al. DRAPE: DRessing Any PErson[J]. *ACM Transactions on Graphics — SIGGRAPH 2012 Conference Proceedings*, 2012, 31(4): Article No. 35.
- [10] MAO T L, XU S H, ZHU X L, et al. Real-time garment animation based on mixed model[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2010, 47(1): 8-15. (毛天露, 夏时洪, 朱小龙, 等. 一种基于混合模型的实时虚拟人服装动画方法[J]. *计算机研究与发展*, 2010, 47(1): 8-15.)
- [11] SHI M, MAO T L, WANG Z Q, et al. Cloth animation based on implicit constraint dynamics[J]. *Journal of Computer Research and Development*, 2012, 47(7): 1388. (石敏, 毛天露, 王兆其, 等. 一种有效的隐式约束动力布料动画方法[J]. *计算机研究与发展*, 2012, 47(7): 1388.)
- [12] Demo video of electronic fitting fashion mirror[EB/OL]. [2013-04-10]. http://v.youku.com/v_show/id_XNDQ2NTI2Mjg4.html. (电子试衣风尚魔镜演示视频[EB/OL]. [2013-04-10]. http://v.youku.com/v_show/id_XNDQ2NTI2Mjg4.html.)
- [13] Video of kinect-based style design system[EB/OL]. [2013-04-10]. <http://www.n-show.com.cn/video.html>. (N-show3D 体感形象搭配系统宣传片[EB/OL]. [2013-04-10]. <http://www.n-show.com.cn/video.html>.)
- [14] PENG Y H, GAO C H, HE B W. Triangle collapse algorithm based on internal angles weighted and quadric error metrics[J]. *Journal of Engineering Graphics*, 2008, 29(4): 115-119. (彭育辉, 高诚辉, 何炳蔚. 基于内角加权及二次误差度量的三角形折叠算法[J]. *工程图学学报*, 2008, 29(4): 115-119.)
- [15] ZHOU K, PAN Z G, SHI J Y. Mesh simplification algorithm based on triangle collapse[J]. *Journal of Computers*, 1998, 21(6): 506-513. (周昆, 潘志庚, 石教英. 基于三角形折叠的网格简化算法[J]. *计算机学报*, 1998, 21(6): 506-513.)
- [16] How to judge the inner point of one triangle[EB/OL]. [2013-04-10]. <http://www.cnblogs.com/cgwolver/archive/2008/07/31/1257611.html>. (如何判断一点在三角形内[EB/OL]. [2013-04-10]. <http://www.cnblogs.com/cgwolver/archive/2008/07/31/1257611.html>.)