

# 基于 Unity3D 的计算机虚拟试衣 测量系统设计与实现

张煜, 陈天星, 陈力, 李文鹏

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610000)

**摘要:** 在 Unity3D 引擎环境下, 针对虚拟试衣系统中由建模法生成的人体模型难以实现大量个性化定制的问题, 提出了一种使用 BlendShape 算法调整人体各局部特征尺寸, 并通过人体特征轮廓曲线约束调整过程的解决方案; 该方案由一个基础人体模型向一组极限模型进行过渡变形得到大量个性化人体; 为了实现动态试衣, 研究了服装基于弹簧-质点模型的布料仿真与碰撞处理过程, 由 Verlet 积分求解的特殊性, 通过一组球形碰撞器实现了不同体型的人体模型试穿相同的服装, 其结果相较于静态着装避免了穿透现象并提升了真实感。

**关键词:** 虚拟试衣系统; 人体特征轮廓曲线; 弹簧-质点模型

## Design and Implementation of Computer Virtual Fitting Test System Based on Unity3D

Zhang Yu, Chen Tianxing, Chen Li, Li Wenpeng

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610000, China)

**Abstract:** In the environment of Unity3D, aimed at the difficulty in personalized customization in virtual fitting system, by human models generated by modeling method, a solution using Blend shape algorithm is put forward to adjust the size of each part of the human bodies, the process of which is restricted by profile curves of human body. From this solution, a large number of customized human models can be built by transition from a basic body model to a set of limit models. To achieve dynamic fitting, The cloth simulation and collision processing of clothes based on Mass-Spring model is deeply studied. For the particularity of solving by Verlet integral, different body models' trying on the same clothes is realized through a set of spherical Colliders. Compared to static fitting, this solution avoids penetration and enhances realism.

**Keywords:** virtual fitting system; profile cross section of human feature; Mass-Spring model

### 0 引言

虚拟试衣系统是利用计算机技术模拟服装真实穿着于人体的一种应用。其主要使用在电子商务领域, 用户可根据虚拟试穿的效果挑选商品。因此, 系统中的三维人体需要能够让用户根据自身尺寸进行个性化定制。但对于获取三维人体的主要途径之一的建模法, 存在不适用于大量个性化建模, 难以集成到实际的开发软件的问题<sup>[1]</sup>。另一方面, 系统中服装的真实感在于对它的布料模拟。其中最为广泛使用的是 Provot 等<sup>[2]</sup>提出的弹簧-质点模型, 由该模型的一种试衣方式是将服装试穿转化为衣物 2D 裁片缝合过程中与人体的碰撞响应的问题<sup>[3]</sup>。另一种试衣则是将服装视作整体进而局部调整避免穿透, 如 Yongjoon 等<sup>[4]</sup>将原有服装与人体的关系映射到不同人体上, Jituo 等<sup>[5]</sup>将服装整体变形后与 T 字型人体对齐实现着装等等。本文结合 Unity3D 设计实现虚拟试衣系统, 针对人体建模法存在的问题提出了一种解决方案, 并研究了服装的布料仿真与碰撞处理, 使其适用于人体动态试衣。

### 1 人体模型的变形算法设计

三维人体模型常用的变形算法大致有 Skeleton-Based 变形算法<sup>[6]</sup>与 FFD 自由变形算法<sup>[7]</sup>, 它们的基本特性如表 1 所示。

表 1 常用的人体变形算法

算法名称	Skeleton-Based	FFD
变形原理	能量优化	嵌入简单网格
应用范围	人体姿态	人体轮廓
特点	需要对大型稀疏线性方程组进行求解或进行非线性优化, 时间复杂度高	模型变形随意性大, 需要用户大量的参与手工调整, 较为繁琐

由于 Skeleton-Based 变形算法主要用于处理人体姿态的调整, 而本文讨论的系统需要对人体轮廓外形进行控制, 因此不适合使用。另外, FFD 自由变形算法因其需要大量的用户参与调整, 故也不适用。为了变形人体轮廓外形, 本文引入一种常用于制作人物面部表情的 BlendShape 算法<sup>[8]</sup>进行控制。它描述了一组模型间的线性变化关系, 定义如下:

$$m = \sum_{k=0}^n \omega_k b_k \quad (1)$$

其中:  $m$  指的是最终形状的顶点向量集,  $b_k$  代表一个变形通道中目标形状的顶点向量集,  $\omega_k$  是第  $k$  个变形通道内的影响

收稿日期: 2017-06-29; 修回日期: 2017-07-24。

**作者简介:** 张煜(1992-), 男, 福建三明人, 硕士研究生, 主要从事计算机图形学方向的研究。

陈天星(1968-), 男, 浙江诸暨人, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事计算机图形学, CAD, PDM, 计算机仿真方向的研究。

权重, 范围是 (0, 1)。设模型网格为  $M = (V, E, F)$ ,  $V$  代表模型的顶点向量集,  $V = \{v_i \in R^3\}$  描述顶点的位置坐标信息,  $E = \{e_i\}$ ,  $F = \{f_i\}$  是模型的边界集与三角面集, 其中  $e_i = (v_{i,0}, v_{i,1})$  与  $f_i = (v_{i,0}, v_{i,1}, v_{i,2})$  描述了模型表面的几何连接关系与拓扑信息。

考虑单通道的变形, 即  $m_0 = \omega_0 b_0$ , 设原模型  $M_{source} = (V_0, E_0, F_0)$ , 当权重  $\omega_0$  为 0 时, 原模型不变形, 而当  $\omega_0$  为 1 时, 原模型变化到  $M_{target} = (b_0, E_0, F_0)$ , 即变化过程中仅仅变更模型的顶点位置信息, 并不影响几何连接关系与拓扑信息。当  $\omega_0$  介于 (0, 1) 之间时, 原顶点集  $V_0$  的各顶点与目标顶点集  $b_0$  相对应的顶点沿直线方向线性插值得到  $M_{source}$  至  $M_{target}$  过渡变化的中间模型, 如图 1 所示。



图 1 单通道变形过程

对于多通道变形  $m = \sum_{k=0}^n \omega_k b_k$ , 它是一个线性叠加的过程, 每个通道均描述了一种由原模型到该通道目标模型的变化过程。为了便于人体模型的调节, 我们避免了组合变形, 即任意通道  $b_i, b_j$  它们对原模型变形部分的顶点子集  $b'_i \cap b'_j = \emptyset$ ,  $M_{source}$  经过组合变形的示意图如图 2 所示。由此  $M_{source}$  经过  $i$  次叠加变形  $m = \sum_{k=0}^i \omega_k b_k$  后得到的模型  $M_i$  在叠加第  $i+1$  次变形时, 因  $b_{i+1}$  与原模型变化的顶点子集  $b'_{i+1}$  和前  $i$  次变化的顶点子集无交集, 而不变的顶点子集不参与插值运算, 所以线性叠加互不影响。因此我们可以在不同的变形通道内对人体的各个局部特征进行变化。

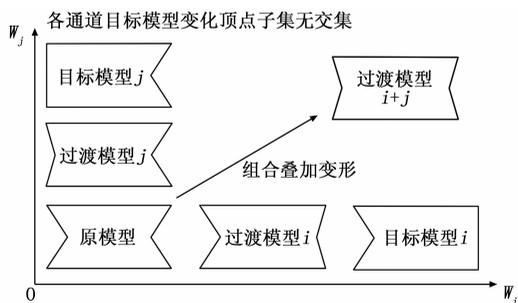


图 2 多通道变形过程

## 2 系统的总体方案设计

虚拟试衣系统的总体框架图如图 3 所示。系统分为人体模型个性化定制模块与服装展示模拟模块两部分。

第一部分的核心支持是人体变形子模块, 它负责处理人体模型的轮廓变形, 在由参数化控制子模块进一步控制之后得到的个性化人体将进入服装展示模拟模块, 该模块负责把静态着装后的服装进行布料仿真, 并让人体与布料化的服装参与碰撞处理完成动态试衣过程。

## 3 系统各模块设计与实现

### 3.1 人体模型个性化定制模块

建模生成三维人体的主要途径有基于体素法建模、基于

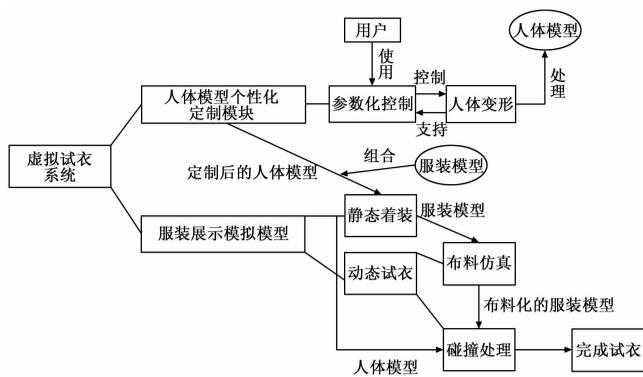


图 3 系统总体框架图

NURBS 曲面建模、以及在 3dsMax、Maya 等软件中利用多边形建模生成蒙皮骨骼绑定的人体模型的方法。本文使用的是第三种方法建立的人体模型。

### 3.1.1 人体模型的变形实现

由章节 1 对人体变形的讨论, 我们的实现步骤如下:

1) 对人物模型需要调节的部位, 如前臂、胸部、腰部、臀部及腿部等分别在不增减顶点个数的前提下, 通过调整顶点位置获得最大变形形状和最小变形形状, 即原模型  $M_{source}$  经调整得到  $M_{前臂最大}, M_{前臂最小}, M_{腰部最大}, M_{腰部最小}$  等等一组模型, 为了让调整过程更为平滑, 我们借助了 ZBrush 软件来调节顶点位置。

2) 我们并未直接控制顶点集的插值过程, 而是使用了 3dsMax 软件的 morph 变形器得到中间过渡模型, 它以分段插值的方式优化了变形过程, 并且修正了顶点插值过程中的法线变化, 得到的模型更为平滑光滑。将  $M_{source} \rightarrow M_{前臂最大}, M_{source} \rightarrow M_{前臂最小}$  等模型变化过程分别在 3dsMax 软件的 Morph 变形器内建立单独的变形通道。

3) 将模型与相关变形通道导入 Unity3D 后, 使用接口函数 `SetBlendShapeWeight()` 对插值权重  $\omega$  进行控制。

以人体前臂由原模型变形到我们调整的最大前臂模型为例, 结果如图 4 所示, 依次取权重  $\omega$  为 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 可以看出变形过程较为平滑。因此, 由一个基础模型与一组极限模型, 通过对不同变形通道的权重  $\omega$  加以控制即可得到大量个性化的人体模型。

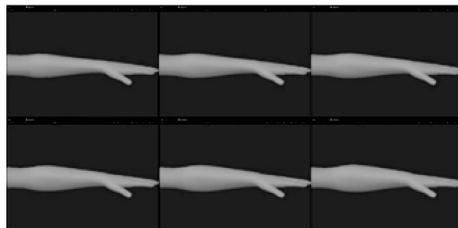


图 4 人体前臂部分变形过程

### 3.1.2 人体模型的参数化控制

为了让用户输入如腰围等人体特征尺寸时能够得到相应的体型, 我们希望找到与输入值对应的插值权重  $\omega$ 。因此我们需要获得人体特征轮廓曲线<sup>[9]</sup>, 由于 Unity3D 并不支持模型的布尔运算, 而且人体模型的网格顶点并不总在一个平面内, 以人体腰部的参数化控制为例, 我们的解决方法如下:

1) 在 3dsMax 中手工的选择一组邻近人体特征位置的点集, 如图 5 所示, 将该组点集及其连接边组成的新网格导入 Unity3D 后, 遍历新网格的顶点集, 根据顶点三维空间坐标相同可找到人体模型网格内相对应的顶点集  $V_{腰部特征}$ 。

2) Unity3D 中使用的是  $y$  轴向上的左手坐标空间, 将  $V_{腰部特征}$  中的所有点忽略  $y$  坐标映射到  $xOz$  空间, 对  $z \geq 0$  的点集  $V_{xOz}^{z \geq 0}$  与  $z \leq 0$  的点集  $V_{xOz}^{z \leq 0}$  分别进行 3 次样条插值, 二者处理方式相同。

以  $V_{xOz}^{z \geq 0}$  进行讨论, 排序  $V_{xOz}^{z \geq 0}$  内的点  $v_i = (x_i, z_i)$  使之满足  $x_{\min} = x_0 < x_1 < x_2 \dots x_n = x_{\max}$ 。

在区间  $[x_i, x_{i+1}] (i = 0, 1, \dots, n)$  构造:

$$S_i(x) = a_i + b_i(x - x_i) + c_i(x - x_i)^2 + d_i(x - x_i)^3 \quad (2)$$

由  $S_i(x_i) = z_i$ 、一阶导数  $S'_i(x)$ 、二阶导数  $S''_i(x)$  在区间  $[x_{\min}, x_{\max}]$  连续, 以及自然边界条件  $S''_{\min}(x) = 0, S''_{\max}(x) = 0$  求解得到 3 次样条曲线。因  $V_{腰部特征}$  不够密集, 为了计算曲线长度, 我们在每个区间  $[x_i, x_{i+1}] (i = 0, 1, \dots, n)$  内均匀增加 6 个点构造点集  $V'_{腰部特征}$ , 绘制曲线如图 6 所示, 以该曲线描述人体腰部特征。

3) 对  $V'_{腰部特征}$  内所有在几何位置上相邻的两点  $v_i, v_j$ , 计算二范数的累加值  $\sum \| (v_i - v_j) \|^2$  可近似得到曲线长度  $L_{腰部轮廓}$ 。

由上述步骤, 我们给出人体模型参数化控制过程: 设变形前曲线长度为  $L_0$ , 通过判断用户的输入值  $L_{输入}$  与  $L_0$  的大小关系找到相应的变形通道, 插值权重  $w$  由 0 开始循环查找, 当经过  $k$  次循环, 我们重复步骤 2)、3) 计算在插值权重  $w = \Delta$  下的当前曲线长度  $L_{当前}$ , 若满足  $|L_{当前} - L_{输入}| \leq \sigma$ , 循环查找终止, 认为此时的  $w$  即为用户输入的对应该值, 其中  $\Delta$  为循环增量,  $\sigma$  为预设误差限。

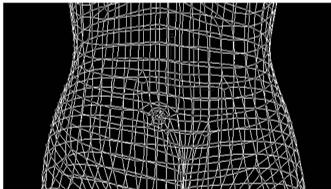


图 5 在腰部网格手工选择一组点集

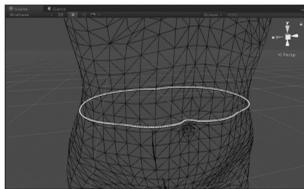


图 6 人体腰部特征轮廓曲线

### 3.2 服装的展示模拟模块

#### 3.2.1 服装的静态着装

我们参考了文献[4]的实验初始条件, 即约束在试衣开始前要求服装能够匹配人体原模型。将服装导入 Unity3D 后, 它以蒙皮骨骼绑定的网格形式渲染, 我们重新绑定其骨骼为人体模型的骨骼, 即可实现静态着装。

#### 3.2.2 服装的布料仿真

为了达到更真实的着装效果, 需要对服装进行布料仿真。我们采用 Provot 等[2]提出的弹簧-质点模型, 如图 7 所示, 每个质点与相邻质点形成结构弹簧, 与网格对角线上的质点形成剪切弹簧, 与间隔的质点在横向、纵向上形成弯曲弹簧。其中, 剪切弹簧保持了对角线上质点之间的面内相对位移, 避免了质点沿对角线方向的过度拉伸, 弯曲弹簧则使得布料仿真中的褶皱效果更为理想。我们将服装的所有网格顶点当作是质点, 对每个质点由牛顿第二定律有:

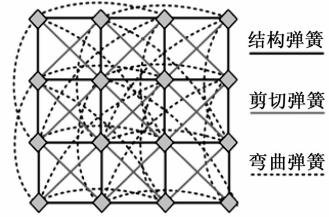


图 7 弹簧-质点模型

$$F = ma = F_{内} + F_{外} \quad (3)$$

式中,  $F_{内}$  是质点与连接弹簧间的变形合力, 可表示为  $F_{内} = \sum F_{结构} + \sum F_{剪切} + \sum F_{弯曲}$ 。在弹簧的弹性限度范围内, 根据胡克定律有:

$$F_{内} = \sum_{i,j \in R} k_{i,j} (\|x_i - x_j\|^2 - l_{i,j}) \frac{x_j - x_i}{\|x_i - x_j\|^2}$$

式中,  $R$  表示与该质点连接成弹簧的质点集,  $k_{i,j}$  表示该质点  $i$  与质点  $j$  间的弹簧劲度系数,  $x_i, x_j, l_{i,j}$  表示该质点  $i$  与质点  $j$  的空间位置与弹簧原长, 我们限定弹簧的拉伸上限, 以避免弹簧的内力过大而导致“超拉伸”现象。对式 (3) 中的  $F_{外}$ , 我们仅考虑重力与空气阻尼力, 即  $F_{外} = G + F_{阻}$ , 其中, 重力  $G = mg$ , 阻尼力用来减缓质点运动的剧烈程度, 让系统更快达到平衡, 阻尼力可表示为  $F_{阻} = -c_d v_t$ ,  $c_d$  为空气阻尼系数。

为了实现仿真, 每个时刻都需重新计算质点的受力情况, 将式 (3) 写成微分形式:

$$F = m \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} = F_{内}(S, t) + F_{外}(S, t),$$

对该方程的求解通常采用数值积分的方式。我们选择 Verlet 积分进行求解, 其精度较高, 稳定性好。设  $S(t)$  表示质点在  $t$  时刻的位置, 将  $S(t + \Delta t)$  与  $S(t - \Delta t)$  进行泰勒展开, 可得:

$$S(t + \Delta t) = S(t) + v(t) + \frac{a(t)}{2} \Delta t^2 + o(\Delta t^4) \quad (4)$$

$$S(t - \Delta t) = S(t) - v(t) + \frac{a(t)}{2} \Delta t^2 + o(\Delta t^4) \quad (5)$$

由式 (4) 与式 (5) 相加可得质点在  $t + \Delta t$  时刻的位置表达式:

$$S(t + \Delta t) = 2S(t) - S(t - \Delta t) + a(t) \Delta t^2 \quad (6)$$

注意到 Verlet 积分中速度是隐式给出的, 而空气阻力  $F_{阻} = -c_d v_t$ , 因此将式 (6) 改写为  $S(t + \Delta t) = (2 - c_d)S(t) - (1 - c_d)S(t - \Delta t) + a(t) \Delta t^2$ 。

由于 Verlet 积分的运行不是自启动的, 我们将初始条件  $S(t) = S_0, v(t) = 0, a(t) = g$  代入式 (4) 作为仿真的开始条件。时间步长  $\Delta t$  在迭代过程中取为定值。

#### 3.2.3 服装的碰撞处理

由式 (6) 可知, 仿真过程中的质点速度被自动调整, 我们可以直接调整积分迭代后的质点位置来简化碰撞处理过程[10]。我们采用球形碰撞, 它是一种最为简单的碰撞形式, 且检测容易。设碰撞球半径为  $r_{碰撞球}$ , 质点半径为  $r_{质点}$ , 当质点位置与碰撞球心位置满足  $\|S_{质点} - S_{碰撞球心}\|^2 > |r_{碰撞球} + r_{质点}|$ , 认为此时碰撞未发生对质点位置不作处理, 反之当  $\|S_{质点} - S_{碰撞球心}\|^2 \leq |r_{碰撞球} + r_{质点}|$ , 认为此时碰撞发生, 将质点沿  $S_{质点} - S_{碰撞球心}$  的方向移动一段距离  $S_{调整} = \partial (|r_{碰撞球} + r_{质点}| - \|S_{质点} - S_{碰撞球心}\|^2)$  使该质点尽可能的位于碰撞球之外, 式中  $\partial$  为调整参数。为了让球形碰撞能够实现

服装的试穿, 我们布置一组碰撞球来近似拟合需要发生碰撞的人体边缘区域, 如图 8 所示。每个质点在当前积分迭代结束后得到的  $S(t + \Delta t)$  将与这组碰撞球逐一进行上述的碰撞处理来最终确定下一时刻质点的位置  $S'(t + \Delta t) = S(t + \Delta t) + \sum S_{调整}$ 。

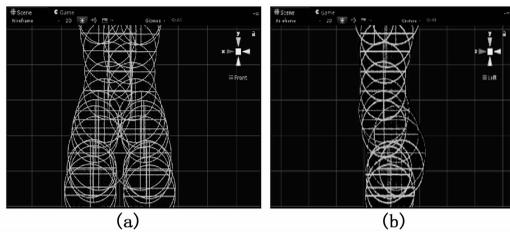


图 8 一组碰撞球近似拟合人体边缘

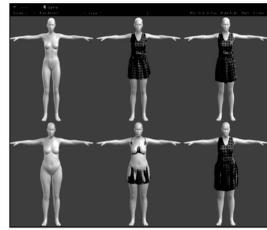


图 10 不同体型下服装试穿结果

料仿真与碰撞处理后, 相同的服装能够在不同体型的人体上进行试穿, 并且仿真运行过程中质点不断调整位置使得服装呈现出形态的小幅变化, 这种动态试衣的效果相对于静态着装更具有真实感。因此, 本文讨论的系统能够满足虚拟试衣系统对人体个性化定制与服装试穿的需求, 较好的模拟了服装真实穿着

于人体的效果。但系统并非完全自动化, 对于动态试衣过程中手工参与碰撞器调整的部分需要进一步完善, 使其能够伴随人体变形自动更新。

### 6 结束语

本文提出一种由 BlendShape 算法控制人体各局部特征变形的方案, 该方案使得各特征的调整互不影响, 变形过程自然平滑, 通过叠加不同特征的变形能够解决人体建模法存在的难以得到大量个性化模型的问题。接着引入人体特征轮廓曲线实现参数化控制变形过程, 使其更适用于虚拟试衣系统。并对服装进行布料仿真, 采用一组球形碰撞器近似拟合人体边缘实现了不同体型人体的动态试衣。

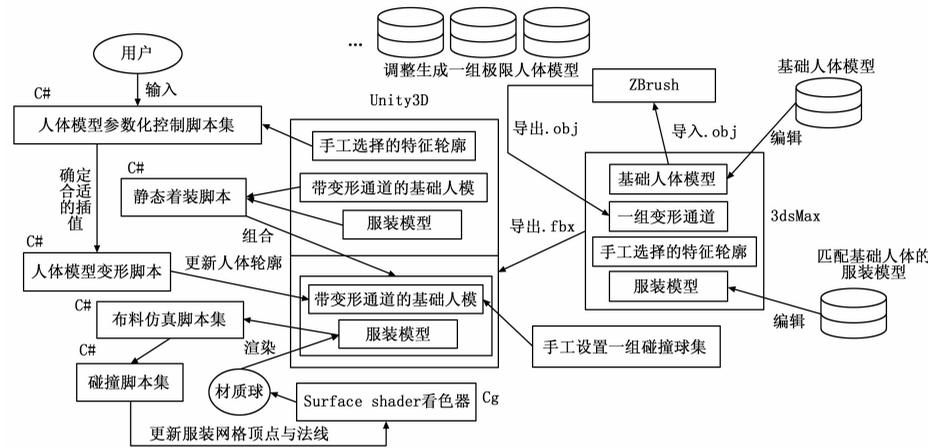


图 9 虚拟试衣系统集成 workflow

## 4 系统的集成与实现

虚拟试衣系统集成的工作流如图 9 所示。我们将基础人体模型与相关变形通道、服装模型、手工选择的特征轮廓分别以 .fbx 文件格式导入 Unity3D。在 Unity3D 中首先实现人体模型的静态着装, 参数化控制脚本集在用户与手工选择的特征轮廓的输入下控制变形脚本更新着装后的人体轮廓外形, 接着我们设置碰撞球集并让静态着装后的服装进行布料仿真与碰撞处理。最后, 我们将积分迭代、碰撞处理后的服装网格顶点位置信息、法线信息传入到服装材质所用的着色器中实现布料化服装的实时渲染。系统中除着色器由 Cg 语言编写, 其他脚本均使用 C 语言进行编写并运行在 CPU 上。

## 5 系统的测试与评价

### 5.1 系统测试环境的搭建

系统测试环境的搭建如图 10 所示, 依次为原人体模型、原人体模型静态着装与动态着装、变更体型后的人体模型、变更体型后人体的静态着装和动态着装。我们在人体肩部区域取较大的弹簧劲度系数以限制质点运动, 实现服装的固定。当变更体型后, 手工将适应原模型的碰撞球集进行位置和大小调整以贴合新的人体轮廓形状。

### 5.2 系统评价

由图 10 可以看出, 适应原人体模型的服装在变更体型的人体上静态穿着出现了穿透现象, 而服装经过 3.2 节讨论的布

### 参考文献:

- [1] 陈 亮, 赵曙光, 张丽娟, 等. 虚拟三维服装展示的发展历史与研究热点 [J]. 纺织学报, 2011, 32 (10): 153-160.
- [2] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [J]. Graphics Interface, 1995, 23 (19): 147-154.
- [3] 陈青青. 三维虚拟服装缝合技术及布料仿真的研究与实现 [D]. 厦门: 厦门大学, 2009.
- [4] Lee Y, Ma J, Choi S. Automatic pose-independent 3D garment fitting [J]. Computers & Graphics, 2013, 37 (7): 911-922.
- [5] Li J, Ye J, Wang Y, et al. Fitting 3D garment models onto individual human models [J]. Computers & Graphics, 2010, 34 (6): 742-755.
- [6] Yan H B, Hu S M, Martin R. Skeleton-based shape deformation using simplex transformations [J]. Springer Berlin Heidelberg, 2006, 4035: 66-77.
- [7] 李 健, 李鹏坤, 丁露露. 基于区域控制的三维人体模型个性化定制 [J]. 陕西科技大学学报, 2009, 27 (3): 130-133.
- [8] Lewis J P, Anjyo K. Direct-manipulation Blendshapes [J]. Computer Graphics & Applications IEEE, 2010, 30 (4): 42-50.
- [9] 姚 砾, 李奥琼, 王慧洁. 个性化人体特征曲线驱动的三维服装变形 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (7): 426-432.
- [10] 文 静. 基于 GPU 的布料实时运动仿真研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2009.