**北京航空航天大学计算机学院**

**硕士学位论文开题报告**

**论文题目**：虚拟试衣关键技术研究与实现

**专 业**：计算机科学与技术

**研究方向**：计算机图形学

**研 究 生**：贾博

**学 号**：SY1206327

**指导教师**：吴壮志

**北京航空航天大学计算机学院**

2013年12月8日

目录

1 论文选题的背景与意义 1

1.1 论文的选题背景 1

1.2 论文的选题意义 2

2 国内外研究现状及发展动态 2

3 论文的研究内容及拟采取的技术方案 4

3.1 研究目标 4

3.2 研究内容 4

3.3 拟采取的技术方案 5

4 关键技术 6

4.1 质点-弹簧模型 6

4.2 质点受力分析 7

4.3 基于Verlet的改进梯形法 9

4.4 基于AABB包围盒的碰撞检测 10

5 论文研究计划 11

6 主要参考文献 11

**虚拟试衣关键技术研究与实现**

# 论文选题的背景与意义

## 论文的选题背景

布料、衣服等织物在现实世界中必不可少，和人们的日常生活密切相关。而如何在计算机中仿真出逼真的布料和衣服动画效果，是当今计算机图形学中的一个研究热点，已有大约20多年的历史[[[1]](#endnote-3),[[2]](#endnote-4)]。布料仿真技术的发展有力地促进了其它可变形体仿真技术的向前发展。伴随着布料等可变形体仿真的不断深入研究和计算机硬件性能的提升，衣服动画逐渐成为了新的研究趋势[[[3]](#endnote-5),[[4]](#endnote-6)]。衣服动画可用于动画、游戏、电影等多种娱乐行业，也能够用于服装计算机辅助设计与计算机辅助制造(Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacture， CAD/CAM)等行业，也可以用于虚拟衣服实时试穿。本文就是将衣服动画用于虚拟试衣，准确及时地反馈衣服尺寸是否合身、搭配是否协调，并将其应用到在线试衣系统，革新传统的服装试穿方式，这对新兴的网络服装销售行业具有进一步的推动作用。

衣服动画的应用前景非常广阔，但也面临着巨大的技术障碍。除了布料仿真中的研究难点外，仿真速度也是衡量衣服动画算法好坏的关键因素。提升3D仿真与显示技术的一个重要方面，就是要在提高仿真视觉效果的同时，能够将仿真效果及时地展示给用户，即实时显示。由于自然界的复杂性和认知的有限性，如何运用计算机精确地表达出布料的物理特性是研究者需要急待解决的问题之一，也是保证仿真效果真实性的关键。首先，从不同的角度可以将布料的力学和物理特性分成不同种类。从布料纤维的属性分有棉、麻、丝、合成纤维等；从布料结构上有直径型、内纤维型、纱线型；从纱线结构可以分为织布、针织布、非织布；从布料的形状可以分为紧型和松型。这诸多的属性对布料的刚度，弯曲性，虚拟效果至关重要。其次，衣服随着人体在运动的过程中，空气浮力对衣服形态的影响也将增加，成为高精度仿真中不得不考虑的重要因素。在计算机中一般通过釆样等手段以离散的方式近似表示连续体的物理特性，而且数值求解过程也会不可避免地引入误差，导致仿真系统会出现不稳定的现象。为了得到逼真的视觉效果，一般每个物理模型的元素量都在数千甚至百万。特别在基于物理模型的可变形体仿真中，对每个元素都需要求解动力学方程，而且还需要处理元素之间的自碰撞、物体之间的相互碰撞等问题，这将严重影响着衣服动画仿真与显示的实时性能。仿真效果的真实性和虚拟显示的实时性一直是衣服动画技术中的两大研究热点和难点，长期制约着3D虚拟衣服动画在现实世界中的应用范围。

## 论文的选题意义

随着计算机硬件水平的发展，基于动力学的3D虚拟服装仿真，由于其逼近真实的仿真效果，在越来越多的领域得到了广泛研究和应用。如何利用计算机与几何数学、物理等最新技术建立3D服装模型，并在计算机中虚拟仿真出现实世界中服装随人体运动的视觉效果即衣服动画，得到了广大研究者的关注[[[5]](#endnote-7),[[6]](#endnote-8)]，已成为计算机图形学领域的研究热点之一。

3D虚拟衣服动画技术的应用前景广阔，得到了国内外研究人员的广泛重视和探索，己经取得了一定的成果。但在仿真效果的真实性与实时性方面还有待提高，且大多还停留在实验室阶段，缺乏广泛的实际应用系统。所以，发展此方面的理论研究与产业化应用具有十分重要的意义。

# 国内外研究现状及发展动态

就虚拟服装的发展过程而言，20世纪 80年代的工作集中于虚拟服装的二维展示。进入 20 世纪 90 年代，许多专家及科研机构开始研究虚拟服装的三维展示。虚拟服装的三维展示与二维演示相比，相对较复杂。

最初的布料运动模拟通常都采用纯几何模型，Weil[[[7]](#endnote-9)]最早采用悬链线及其几何变换模拟悬垂布料；之后，Agui等人[[[8]](#endnote-10)]用一系列空心圆柱体模拟了弯曲的衣袖；Hinds等[[[9]](#endnote-11)]使用几何裁片对衣服进行交互式设计；Ng和Grimsdate等[[[10]](#endnote-12)]使用双层几何模型，用衣服层和皮肤层表示服装，模拟特殊情况下布料的变形；Hadap等[[[11]](#endnote-13)]采用纹理与几何相结合的方法模拟衣服上的褶皱。Stumpp[[[12]](#endnote-14)]提出一种自适应形状匹配方法模拟布料变形，可以保持较高的计算效率；Chen等人[[[13]](#endnote-15)]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；Rohmer等人[[[14]](#endnote-16)]利用几何方法模拟了服装面上的褶皱。几何法无需求解复杂的动力学方程组，计算稳定，生成动画的效率也很高。但几何法的固有特性，使得它模拟的褶皱比真实效果更加规则、均匀，且比较适合于模拟布料静止变形状态（如布料悬垂效果），对于合成的连续布料动画缺乏动感。

连续体模型，即将布料看作分片连续的物体，运用连续体力学理论进行运动状态求解。Feynman[[[15]](#endnote-17)]提出了悬垂布料的静力学模型，并由此仿真得到布料在悬垂状态下的效果；Terzopoulos[[[16]](#endnote-18)]等人利用连续介质力学的理论，提出了弹性变形模型；Terzopoulos在后续的研究工作中[[[17]](#endnote-19),[[18]](#endnote-20)]，又引入了布料的粘弹性、弹塑性、断裂处理等非弹性变形模型；Carignan等人[[[19]](#endnote-21)]在此基础上，研究了基于虚拟人体的衣服制作与动画技术；和Terzopoulos不同，Volino等人[[[20]](#endnote-22)]提出了另一种弹性变形模型，该模型基于连续弹性力学原理，可以用于常见的三角网格对象；Eischen等人[[[21]](#endnote-23)]先釆用了几何准确的非线性薄板基本原理对布料建模，之后基于四边形曲边的有限单元法求解偏微分方程；Cirak[[[22]](#endnote-24)]提出了基于细分基函数的有限单元法；Etzmuss等人[[[23]](#endnote-25)]提出了一种基于平面应力假定的线性有限单元法，将弯曲变形独立于平面内的拉伸变形和剪切变形，并采用转动应变来表示任意的刚度变换，通过隐式积分法进行数值求解，可以用于布料的动态仿真。Thomaszewski等人[[[24]](#endnote-26)]提出了一种基于正弦细分有限元的一致弯曲模型，可以有效重构不同材质或不同精度布料的特征化弯曲变形行为。连续体模型可以构建布料应变-应力之间复杂的非线性关系，真实地反映不同布料的材质特性，从而保证生成动画效果的逼真性，但是计算复杂性与计算代价通常很高，系统性能难于保证。

离散质点模型，将布料看作一组离散质点的集合，布料的力学行为通过质点之间的相互作用力进行描述，布料面的形状通过邻接质点之间的几何形状来表示，大部分都是从粒子系统发展而来[[[25]](#endnote-27)]。Breen等人[[[26]](#endnote-28),[[27]](#endnote-29),[[28]](#endnote-30)]提出了基于粒子模型的悬挂布料仿真方法，他根据织物的微观结构进行空间离散化处理，将织物的纱线交点看成是一个个粒子，即假定织物是由大量的粒子组成的。Eberhardt[[[29]](#endnote-31)]在Breen的基础上，进一步对粒子系统进行了改进，以便能够用于仿真常见的布料动画。Provot[[[30]](#endnote-32)]提出了经典的质点-弹賛模型；Volino[[[31]](#endnote-33)]等基于质点-弹簧模型，利用三角网格变形几何关系提出了一种可以更加精确描述布料特性的模型；Baraff等人[]将伸缩形变和剪切形变归结在三角面片内，而将弯曲变形归结于共边的两个相邻三角面片上，并采用大步长的半隐式积分法进行数值求解，有效地解决了变形约束、阻尼、碰撞等问题，在稳定性和高效性之间取得了较好的折衷。Choi [[[32]](#endnote-34)]在Baraff的半隐式框架基础上提出了失稳模型(Immediate Buckling Model)，有利于产生更加丰富的布料褶皱，稳定性也有所提高；在Choi的工作基础上，Zhou等人[[[33]](#endnote-35)]考虑了布料大旋转变形中可能导致的震荡问题，对模型进行了修正，将质点平移和质点旋转运动进行分离，保证了布料大旋转运动的稳定性；。与连续体模型相比，离散质点模型采用相对简洁的力学形式描述了布料变形的动力学特性，计算复杂性相对较低，是实时交互性应用中的主流方法。

混合模型，以实时性为研究目标，将物理法和几何法有机地结合在一起，在不降低逼真性的前提下，提高计算效率。Volino[[[34]](#endnote-36)]提出了一种关于布料皱褶的几何建模方法，综合考虑了仿真变形和皱褶。对于网格顶点的皱招幅度，首先取其相邻边的均值，再通过三角网格刨分就可获得更加细腻的效果。Hadap[[[35]](#endnote-37)]在物理仿真中，结合皱裙图案和局部变形，可在粗粒度网格上生成更丰富的皱裙细节。Oshita[[[36]](#endnote-38)]的生成皱褶方法，则通过三角刨分技术向布料网格插入更多细节来实现。Kang等人[[[37]](#endnote-39),[[38]](#endnote-40)]先基于物理模型仿真得到关键节点，之后在几何处理阶段采用皱裙三次样条曲线插值得到骨架节点，进而由骨架节点得到内部节点，有效地提高了布料仿真的真实感；Cordier等人[[[39]](#endnote-41)]则针对衣服仿真提出了相应的混合建模方法，对于衣服的紧密区域、松散区域、浮动区域分别采用不同的模型进行仿真，有效降低了系统的计算量。

# 论文的研究内容及拟采取的技术方案

## 研究目标

布料和服装在人们的日常生活中占了重要部分，有效且逼真地模仿布料的运动和形变已成为计算机图形学及计算机辅助设计等领域的一个热点课题。本文的主要工作，就是要深入研究3D穿衣动画系统中的理论难题和技术障碍，探索更加先进的3D衣服动画模型和数值求解算法，以期在仿真的真实性和实时性等方面进一步取得突破，使得普通用户可以在未来借助电脑看到试穿衣服的动画效果，判断衣服尺寸是否合身、搭配是否协调。

## 研究内容

本文的主要研究内容包括：建立三维服装的物理仿真模型、数值求解动态布料微分方程、碰撞检测算法、碰撞响应策略。

1. 服装的物理仿真模型

仿真模型的目的是用一个模型快速而真实的呈现布料的运动效果。3D虚拟衣服动画中首先要建立衣服的物理表示模型，模型特性与真实布料的接近程度，直接关系着仿真效果的逼真程度和性能好坏，是衣服仿真中研究的重点和难点。

1. 数值计算方法

由于在计算机中无法使用数学几分方法精确地对数学模型求解，因为运算量太大，实际应用中一般采用数值积分方法对常微分方程组按照一定的时间步长求得近似解，所以选择合适有效的数值方法对一个高效率的布料模拟系统十分关键。在基于动力学原理的衣服仿真中，衣服的组成元素一般至少成千上万甚至百万，计算量庞大，因此数值积分的收敛速度快慢和稳定性直接影响着衣服动画系统的仿真性能。

1. 碰撞检测

3D虚拟场景仿真中，需要检测不同物体间是否发生了相互碰撞，以免发生进一步的穿透现象，导致仿真的视觉效果严重失真。当物体的表面不规则时，计算量非常庞大，特别是对于布料、衣服等织物很容易发生变形的这类可变形体，情况就更加复杂，严重影响仿真的实时性能。对于布料、衣服等可变形体的仿真，还需要检测织物和自身是否发生了自碰撞，由于织物的形状可能在不规则的连续变化、可变形体的元素量也大、而且表示模型复杂，这些因素将导致衣服仿真系统的实现复杂度高。

1. 碰撞响应

在检测到碰撞发生后，物体的运动状态必须做出改变，以防止发生物体间互相穿透的现象，运动状态如何改变则要考虑模拟的环境，物体本身的运动状态以及物体性质等诸多方面的因素。布料的碰撞反应比起刚体和一般的柔体更为复杂，布料与其他物体发生碰撞后并不会出现刚体的反弹现象，而是出现诸如附着，滑行等各种独特的运动形式，这就更加增加了布料模拟的困难程度。

## 拟采取的技术方案

1. 服装的物理仿真模型

基于物理的布料模拟方法可以模拟出布料复杂的形变和运动状态，并且能够反映出多种布料的不同的物理特性。物理模型按照模拟布料结构的方式可分为两大类：连续质点模型和离散质点模型。连续质点模型一般计算量巨大或者只适用于特定的场景，使用范围较窄，所以本文中采用离散质点模型。

离散质点模型中，最经典的模型是由Provot建立的质点-弹簧模型[]，该模型由个质量相同的虚拟质点构成的矩形网格，质点无体积，质点之间用自然长度不为零、无质量的弹簧连接，各个质点的运动符合牛顿定律。该模型简单易用，算法容易实现，计算效率较高，因此本文中采用质点-弹簧模型。

1. 数值积分

离散质点模型是将织物离散化粒子集合的系统，通过对该系统建立微分方程，用数值微分方法求解该方程，常用的方法有显示，隐式和混合三大类。显示欧拉法，是一阶方法，舍入误差为，特点是计算简单，运算速度快，但同时也存在计算精确度低，误差相对较大且不稳定的问题；梯形法，是隐式的二阶公式，根据当前项和它的后项来计算下一项，具有二阶的准确性，误差为；四阶Runge-Kutta法，是一种单步的高精度显示算法，具有的误差，精确度较高，但计算复杂，运算速度要慢很多；Verlet方法[[[40]](#endnote-42)]，主要用于动力分子学，粒子的速度是隐含给出的，这种方法比较稳定，计算速度与显示积分方法的速度相同，而且精度高于显示积分法。本文采用的是Verlet与梯形法结合的方法。

1. 碰撞检测

碰撞检测算法种类很多，适用于不同几何背景，多数情况下对所实现的虚拟场景中的几何特性有相当大的依赖性。碰撞检测一般可分为基于层次包围盒的碰撞检测算法[[[41]](#endnote-43)]、基于空间划分的碰撞检测算法[[[42]](#endnote-44),[[43]](#endnote-45)]、和基于图像空间的碰撞检测技术[[[44]](#endnote-46),[[45]](#endnote-47)]等三类。本文采用的是AABB包围盒方法，计算简单，速度较快。

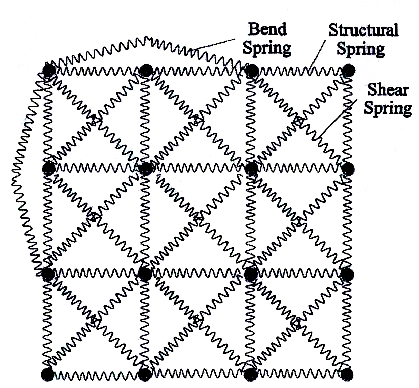
1. 碰撞响应

按照目前研究者常用的碰撞响应方式，一般有顶点位置投射和惩罚力等方法。顶点位置投射法就是在检测出碰撞发生时，把碰撞点的位置投射到两碰撞体的表面，防止进一步发生穿透。这种方法比较适合于无需显式计算物体运动速度的Verlet等数值方法中，物体运动更加符合实际的碰撞现象。惩罚力法则是在检测出碰撞发生时，通过对物体施加碰撞响应惩罚力的方式避免穿透现象的发生，惩罚力的方向和物体表面的法向量相同，大小一般和穿透深度呈正比关系，也可以取某个定值。这种方式实现简单，也符合现实世界中对碰撞现象的物理受力分析与响应过积。然而，碰撞响应惩罚力的真实大小一般很难确定，这使得仿真系统很容易出现数值不稳定的现象。本文采用的是惩罚力法。

# 关键技术

## 质点-弹簧模型

在质点-弹簧模型中，模型并不被视为由连续的表面所组成，而被视为由质点和弹簧组成的一种非连续的结构，构成整块布料的形状，质点间的相互关系归结为质点间的弹簧作用，如所示。

图4‑1‑

基于四边形网格的质点-弹簧模型

弹簧主要分为3类：结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧，如所示。结构弹簧（Structural Springs），也称为伸展弹簧（Stretch Springs），是为了保持质点间初始状态时的距离，模拟布料内经纬两个方向的作用力，弹性系数很大，以阻止布料在经纬两个方向过度的拉压变形；剪切弹簧（Shearing Springs），是为了防止织物在自身平面过渡和不真实的变形，而给织物的一个剪切力，用于模拟布料内倾斜方向的作用力，弹性系数较大，以阻止斜向的过渡变形并模拟布料的伸展性；弯曲弹簧（Bending Springs），是为了防止织物过分的不自然弯曲，连接的是经纬两个方向相间隔的两质点，用于模拟布料在弯曲或折叠时的抗弯曲性能，其弹性系数较小，在仿真中有时甚至可以不考虑。

***j***

***i***

***Pi,j***

***Pi+1,j***

***Pi,j+1***

***Pi,j***

***Pi,j***

***Pi+1,j***

***Pi,j+1***

***Pi+1,j+1***

***Pi+2,j***

***Pi,j+2***

***Pi,j***

(a)弹簧质点模型

(b)结构弹簧

(c)剪切弹簧

(d)弯曲弹簧

图4‑2质点-弹簧模型和3中弹簧类型

## 质点受力分析

质点的位置受布料内部弹簧的弹性力和织物外部受力的影响。为了使布料能够运动起来，需要质点进行受力分析，质点所受的力分为内力和外力，内力主要为布料内部弹簧质点间的作用力，即弹性力，包括结构力、剪切力、弯曲力，外力包括重力、惩罚力、空气阻力、用户定义的力。根据牛顿第二定律，对于质点有：

(‑)‑

其中，是质点的质量，是其加速度，是该质点所受的外力，是该质点所受的内力。假设质点是通过弹簧与质点相连接的另一个质点，则质点所受该弹簧的拉（压）力可由虎克定律计算得到：

(‑)

其中，是连接质点和的弹簧的弹性系数，是某时刻该弹簧的矢量，是弹簧的原长，和是该时刻质点和的位置。

质点和之间的弹簧阻尼力（对质点的作用）定义如下：

(‑)

其中，是连接和的弹簧的阻尼系数，和分别是质点和的速度。

对于复杂的弹簧/阻尼器-质点模型，我们可以得到质点所受的内力：

(‑)

其中，是与质点相连接的质点总数。

一个粒子组成的系统，三种内力可以表述为，

(‑)

其中，、、分别是使与质点相连的结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧所产生的拉伸力、剪切力和弯曲力，、、分别代表与质点相连的结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧的数量。

质点所受的外力包括重力、空气阻尼力和支持力，重力为：

(‑)

其中为质点的质量，为重力加速度。

空气阻力为：

(‑)

其中为空气阻力系数，为粒子运动速度矢量。

支持力的大小应该和弹簧内力、重力、阻尼力等其他力的合力在当前接触点处的物体对象分量大小相等，方向为物体法线方向：

(‑)

式中为比例系数，当人体表面和衣服质点发生穿透时，应大于1，需要根据穿透深度等具体情况确定。

基于物理建模的布料仿真一般被认为是随时间变化的偏微分方程，经过离散化以后，可以当做常微分方程来进行数值求解。对任意一个质点，其空间位置向量的运动方程可以表示为：

(‑)

## 基于Verlet的改进梯形法

传统的梯形法公式，在第一次迭代时采用显式欧拉法求得预测值，在我们的改进算法中，则换用Verlet公式[]进行初值预测，对应的迭代公式如(4‑10)所示：

(‑)

具体地，在基于质点-弹黃模型中的布料仿真和衣服动画中，可以首先通过Verlet公式计算预测值：

(‑)

之后，利用梯形法进行数次迭代之后，即可得到质点在下一时刻较为精确的位移近似值，迭代公式如下，

(‑)

式中，表示质点在第次迭代后得到的下一时刻位移，是第次迭代得到的下一时刻质点速度，、、分别表示质点在当前时刻的加速度、速度、位移，是质点在上一时刻的位移，为数值积分的时间步长。

改进后的梯形算法除了发挥Verlet方法在误差上的优势外，另一优势在于Verlet可以省去对速度的计算，以进一步减少计算量和累积误差。

由于我们不可能无限制地迭代下去以求得真实的精确解，为此，当迭代值的误差限小于某个值时，就可以认为是得到了对精确值的最佳近似，即满足了某个极限条件：

(‑)

## 基于AABB包围盒的碰撞检测

AABB（Aligned Axis Bounding Box）沿坐标轴的包围盒，包含几何对象且各边平行于坐标轴的最小六面体，根据物体的形状和状态取得坐标、、方向上的最大最小值就能确定包围盒最高和最低的边界点。

AABB间的相交测试比较简单，两个AABB相交当且仅当它们在三个坐标轴上的投影区间均相交，通过投影，可将三维求交问题转化为一维求交问题。关于AABB树的建立有两种建立方式：自顶向下、自底向上。本文采用的是自顶向下的建立方式，首先将物体对象或者所有元素所占据的整个空间作为AABB树根节点，之后沿着空间体的最长轴划分为左右两个子节点，之后继续再对这些子节点分别沿着各自的最长轴进行左右划分，这样最终将得到一个AABB 二叉树结构，如图4‑3所示：

图4‑3 AABB模型顶点BVH树

# 论文研究计划

|  |  |
| --- | --- |
| 时间 | 工作内容 |
| 2013.10 - 2013.11 | 查阅文献，了解技术框架 |
| 2013.12 - 2014.03 | 研究并搭建程序基本框架 |
| 2014.03 - 2014.05 | 研究并实现衣服物理模型 |
| 2014.05 - 2014.06 | 研究并实现数值积分算法 |
| 2014.06 - 2014.09 | 研究并实现碰撞检测策略 |
| 2014.09 - 2014.10 | 测试并优化 |
| 2014.10 - 2014.12 | 撰写论文 |

# 主要参考文献

1. [] P. Volino, N. Magnenat-Thalmann, Virtual clothing, theory and practice.Springer. 2000. [↑](#endnote-ref-3)
2. [] K.J. Choi, H.S. Ko. Research problems in clothing simulation.Computer-Aided Design. 2005, 37(6):585-592. [↑](#endnote-ref-4)
3. []Y. Meng, P.Y. Mokb, X. Jin. Interactive virtual try-on clothing design systems. Computer-Aided Design. 2010, 42(4):310-321. [↑](#endnote-ref-5)
4. [] 周川. 布料动画关键技术研究[博士论文]. 浙江:浙江人学. 2009. [↑](#endnote-ref-6)
5. [] D. Baraff,A. Witkin. Large steps in cloth simulation. Computer Graphics (SIGGRAPH ’98). 1998,43-54. [↑](#endnote-ref-7)
6. [] C.N. Ngoc,S. Boivin. Nonlinear cloth simulation.Institut National De Recherche En InformatiqueEt En Automatique (INRIA). 2004, 1-27. [↑](#endnote-ref-8)
7. [] WeilJ.Thesynthesis of clothobjects [A].Proceedings of ACM SIGGRAPH 86[C]. 1986:49-54. [↑](#endnote-ref-9)
8. [] Agui T, Nagao Y, Nakajma M. An expression method of cylindrical cloth objects: an expression of folds of a sleeve using computer graphies[J]. Trans.Soc.of Electronics, Information and Communications, 1990, J73-D-II(7): 1095-1097. [↑](#endnote-ref-10)
9. [] HindsBK, MccartneyJ. Interactive garment design[J]. The Visual Computer, 1990, 6(2): 53-61. [↑](#endnote-ref-11)
10. [] NgHN,GrimsdateRL.Computer graphics techniques for modeling cloth[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5): 28-41. [↑](#endnote-ref-12)
11. [] HadapS, BangerterE,VolinoP,etal.Animating wrinkles on clothes[A]. Proceedings of IEEE Visualization 1999[C]. IEEE Computer Society,1999: 175-182. [↑](#endnote-ref-13)
12. [] Stumpp T, Spillmann J, Becker M, Teschner M.A geometric deformation model for stable cloth simulation.Proceedings of Virtual Reality Interactions and Physical Simulations. Grenoble, France, 2008: 39-46. [↑](#endnote-ref-14)
13. [] Chen M, Tang K. A fully geometric approach for developable cloth deformation Simulation. The Visual Computer, 2010, 26(6-8): 853-863. [↑](#endnote-ref-15)
14. [] Rohmer D, Popa T, Cani M P, Hahmann S, Sheffer A. Animation wrinkling: Augmenting coarse cloth simulations with realistic-looking wrinkles. ACM Transactions on Graphics, 2010, 29(6):157. [↑](#endnote-ref-16)
15. [] C. Feynman.Modeling the appearance of cloth [D]. Cambridge, MA, USA: Massachusetts Institute of Technology, 1986. [↑](#endnote-ref-17)
16. [] D. Terzopoulos, J. Piatt, A. Barr, K. Fleischer. Elastically defonnable models. Computer Graphics. 1987,21(4):205-214. [↑](#endnote-ref-18)
17. [] D. Terzopoulos, K. Fleischer. Deformable models. The Visual Computer. 1988, 6(4):306-331. [↑](#endnote-ref-19)
18. [] D. Terzopoulos, K. Fleischer.Modeling inelastic deformation: viscolelasticity, plasticity, fracture. Computer Graphies (ACM SIGGRAPH ’88). 1988, 269-278. [↑](#endnote-ref-20)
19. [] M. Carignan, Y. Yang, N. Magnenat-Thalmann. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes. Computer Graphics (ACM SIGGRAPH '92). 1992,99-104. [↑](#endnote-ref-21)
20. [] P. Volino, M. Courchesne, N. Magnenat-Thalmann.Versatile and efficient techniques for simulating cloth and other deformable objects. Computer Graphics (ACM SIGGRAPH,95). 1995, 137-144. [↑](#endnote-ref-22)
21. []J.W. Eischen, S. Deng, T.G. Clapp.Finite-element modeling and control of flexible fabricparts.IEEE Computer Graphics and Applications. 1996,16(5):71-80. [↑](#endnote-ref-23)
22. [] F. Cirak, M. Ortiz, P. Schroder. Subdivision surfaces: A new Paradigm for thin-shell finite-element analysis. International Journal for Numerical Methods in Engineering.2000, 47:2039-2072. [↑](#endnote-ref-24)
23. [] O. Etzmuss, M. Keckeisen, W. Straper.A fast finite element solution for cloth modelling. Proceedings of Pacific Graphics. 2003:244-251. [↑](#endnote-ref-25)
24. [] Thomaszewski B, Wacker M, StraBer W. A consistent bending model for cloth simulation with corotational subdivision finite elements/Proceedings of the 2006 ACM SIGGRAPH/Eurographics Symposium on Computer Animation(SCA’ 06). Vienna, Austria, 2006: 107-116. [↑](#endnote-ref-26)
25. [] W.T. Reeves.Particle systems—a technique for modeling a class of fuzzy objects. ACM Transactions on Graphics (SIGGRAPH|83), 1983,2:91-108. [↑](#endnote-ref-27)
26. [] D.E. Breen, D.H. House, RH.Getto.A physically-based particle model of woven cloth.The Visual Computer.1992, 8:264-277. [↑](#endnote-ref-28)
27. [] D. Breen, D. House, M. Wozny.Predicting the drape of woven cloth using interacting Particles [A]. Proceedings of ACM SIGGRAPH ’94. 1994:365-372. [↑](#endnote-ref-29)
28. [] D. Breen, D. House, M. Wozny.A Particle-based model for simulating the draping behavior of woven cloth.Textile Research Journal. 1994,64(11):663-685. [↑](#endnote-ref-30)
29. [] B. Eberhardt, A. Weber, W. Strasser. A fast, flexible, particle-system model for cloth draping. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16(5):52-59. [↑](#endnote-ref-31)
30. [] X. Provot. Deformation constraint in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior.Proceedings of Graphics Interface. 1995,147-154. [↑](#endnote-ref-32)
31. [] P Volino, N. Magnenat-Thalmann.Developing simulation techniques for an interactive clothing system.IEEE International Conference on Virtual Systems and Multimedia. 1997, 109-118. [↑](#endnote-ref-33)
32. [] Choi K J, Ko H S. Stable but responsive cloth. ACM Transactions on Graphics, 2002, 21(3): 604-611. [↑](#endnote-ref-34)
33. [] Zhou C, Jin X G, Wang C L. Efficient and stable simulation of cloth undergoing large rotations. Computing in Science and Engineering, 2008, 10(4): 30-40. [↑](#endnote-ref-35)
34. [] P. Volino, N. Magnenat-Thalmann.Fast geometric wrinkles on animated surfaces.In WSCG'99. 1999. [↑](#endnote-ref-36)
35. [] S. Hadap, E. Bangerter, P. Volino, N. Magnenat-Thalmann. Animating wrinkles on clothes. Proceedings of IEEE Visualization. 1999:175-182. [↑](#endnote-ref-37)
36. [] M. Oshita,A. Makinouehi. Real-time cloth simulation with sparse particles and curved faces.Proceedings of Computer Animation. 2001:220-227. [↑](#endnote-ref-38)
37. [] Y.M. Kang, J.H. Choi, H.G. Cho, D.H. Lee.An efficient animation of wrinkled cloth with approximate implicit integration.The Visual Computer. 2001, (3):147-157. [↑](#endnote-ref-39)
38. [] Y.M. Kang, H.G. Cho.Bilayered approximate integration for rapid and plausible animation of virtual cloth with realistic wrinkles.Proceedings of Computer Animation. 2002, 203-214. [↑](#endnote-ref-40)
39. [] F. Cordier, N. Magnenat-Thalmann.Real-time animation of dressed virtual humans.Computer Graphics Forum. 2002, 21(3):327-336. [↑](#endnote-ref-41)
40. [] L. Verlet. Computer ‘experiments’ on classical fluids: I. Thermo dynamical properties of Lennard-Jones molcules. Physical Review. 1967, 159(1):98-103. [↑](#endnote-ref-42)
41. [] J.T. Klosowski, M. Held, J.S.B. Mitchell, H. Sowizral, K. Zikan.Efficient collision detection using bounding volume hierarchies of k-DOPs.IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 1998,4(1):21-37. [↑](#endnote-ref-43)
42. [] D.L. Zhang. M.M.F. Yuen. Collision detection for clothed human animation. Proceedings of the 8th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications (PG '00). 2000,328-337. [↑](#endnote-ref-44)
43. []D.L. Zhang. M.M.F. Yuen. A coherence-based collision detection method for dressed human simulation.Computer Graphics Forum. 2002, 21(1):33-42. [↑](#endnote-ref-45)
44. [] T. Vassilev, B. Spanlang,Y. Chrysanthou. Fast cloth animation on walking avatars. Computer Graphics Forum. 2001, 20(3):260-267. [↑](#endnote-ref-46)
45. [] B. Heidelberger, M. Teschner, M. Gross. Detection of collisions and self-collisions using image-space techniques. Proceedings of WSCG 2004, 12(1): 145-152. [↑](#endnote-ref-47)