

织物仿真三维模型的建立方法^{*}

高成英, 刘 宁, 罗笑南

(中山大学信息科学与技术学院计算机应用研究所, 广东 广州 510275)

摘 要: 织物变形仿真是近年来计算机图形学的研究热点。对当前较为流行的仿真模型的建立方法分别从几何的、物理的和混合的 3 个方面进行了综述, 并在最后对 3 种技术的优缺点进行了评价。

关键词: 织物仿真模型; 有限元; 隐式积分

中图分类号: TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 04-0111-03

织物的真实感仿真及动画模拟在三维服装设计、电脑动画、影视制作及虚拟现实等领域都有广阔的应用。自从 1986 年 Weil 使用悬链线的方法模拟出了下垂的布以来, 织物的真实感仿真及动画模拟就成为计算机图形学的一个热点, 吸引了众多学者为此进行深入研究。尤其是织物仿真模型的建立方法, 由于它是模拟织物真实感仿真和动画模拟的基础。因而计算机图形学家和纺织学家分别从不同角度, 采取了多种研究方法进行研究, 并取得了许多结果。从目前的研究结果来看, 织物仿真模型的建立方法大致有 3 种: 几何的、物理的和混合的^[1]。

1 基于几何的织物仿真模型的建立

Weil^[2] 最先提出通过拟合在悬挂点和制约点之间的悬链线来模拟布的外形。其中皱褶的生成是通过给每一个点的任意偏移量生成的。由于 Weil 采取的方法没有涉及到复杂的数学计算, 因而模拟速度是相当快的。但这种方法不足之处在于它仅能模拟悬垂的布, 不能反映出真实织物的属性。

这之后, Agui 等^[3] 和 Ng 等^[4] 分别采用纯几何变换模拟了一些特殊情况下的织物仿真。Hinds 等^[5] 设计了一个交互式的三维设计环境, 允许设计师直接在人体上进行服装设计, 衣片的外轮廓点由人体上的一定偏移量来决定, 衣片上其余点可通过合适的插值方法来生成。为了取得真实的效果, 设计师还能直接添加纹理和皱褶, 这里皱褶的产生是通过协调函数产生的。

2 基于物理的织物仿真模型的建立

基于物理特性的技术首先要对模拟对象进行三角形或四边形域的剖分, 剖分后形成的网格交点为实际研究的对象, 称为质点。对质点的物理描述一般从其受力和能量角度出发。基于能量的模拟技术主

要利用能量最小化原理, 以织物的能量为目标函数, 以人体及服装自身为约束条件, 并结合外力产生的影响, 采用最速下降法或其优化方法求解具有最小能量的柔性织物的形态。能量法适用于织物的静态模拟。基于力的模拟技术则是对质点进行力或能量的分析, 运用动力学理论, 建立质点运动的微分方程, 再通过计算微分方程的数值解, 确定质点在时间序列中的运动轨迹, 从而获取柔性织物的空间位置。基于力的模拟技术更能表现柔性织物的质感和真实外观, 因而更适用于织物的动态模拟。

采用能量法模拟柔性织物的代表性研究工作包括以下几个方面:

(1) Feynman^[5] 采用能量最小化原理模拟布料的悬垂效果。它以 2D 网格来表示在 3D 空间中的布, 布料的网格质点 $P_{i,j}$ 的能量计算同其周围的 8 个质点相关联, 由弹性薄板原理导出其能量公式, 其中能量最小化的求解采用了最速下降法。

(2) Breen^[6] 将整个织物用经线和纬线分割成一个个网格, 网格的交点看成是一个个粒子, 整块织物实际上是相应的粒子集合, 在模拟织物的悬垂过程中, 粒子和粒子之间, 粒子和周围环境之间存在相互的物理作用, 整个过程可分为以下两步。

第 1 步, 粒子在重力作用下做自由落体运动, 当织物碰到桌面或其它障碍物体, 粒子运动发生变化, 从而获得粗略的织物悬垂形状。

第 2 步, 调整粒子之间的位置, 采用优化了的最速下降法, 找到织物的最小能量状态, 即最终平衡的状态。Breen 的能量函数从 Kawabata^{*} 织物物理性能检测曲线中导出, 精确性高, 能够逼真模拟了不同材质织物的悬垂效果。不足之处是计算过于复杂, 时间太长。

^{*} 收稿日期: 2001-12-07

作者简介: 高成英 (1972-), 女, 讲师, 博士研究生; Email: spring_gcy@163.net
(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(3) Okabe 等^[1] 首先将二维服装样板映射到三维的人体模型上, 形成粗略符合人体模型的三维结构。为了加入真实织物的悬垂褶皱效果, 系统将织物的物理特性化为能量方程, 以人体模型为限制条件, 以空间各点能量最小进行大变形预测, 进而显示出平衡状态下服装应有的自然三维形状。采用可调系数梯度法 (adaptive coefficient gradient method, ACGM) 确定最小能量状态。

采用基于力的织物模拟技术, 比较具有代表性的研究工作包括:

(1) Terzopoulos 等^[7] 应用弹性力学中的薄板弹性变形方程, 提出了一个通用的弹性形变模型。该模型采用拉格朗日运动学方程描述变形体的机械运动, 其形式为:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\mu \frac{\partial r}{\partial t} \right) + \gamma \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\sigma \epsilon(r)}{q} = f(r, t)$$

这里, $r(t)$ 为物体在 t 时刻的空间位置, μ 为物体的质量, γ 为系统衰减系数, $f(r, t)$ 为物体所受的外力, $\epsilon(r)$ 为瞬间内能。模型针对连续系统, 为求解方程, Terzopoulos 等采用了半隐式的数值求解方法, 即在空间域, 将连续系统转化为基于质子-弹簧的离散结构; 在时间域, 运用有限差分法求解系统方程。事实上, 通过选用一定形式的非线性弹簧, 质子-弹簧系统可以近似等同于连续系统, 达到和连续系统同样的仿真模拟效果。因而弹性形变模型成功地模拟了织物等一系列变形曲面。但由于其采用的是有限差分法, 所以要通过将非线性的常微分方程转化为线性的代数方程组, 求解巨型稀疏线性方程方能得出结果, 由于其计算量非常大, 从而阻碍了这种方法在实际中的应用与推广。

(2) Thalmanns^[8] 及其研究小组的研究重点放在模拟裁缝缝制一件衣服的自然过程和服装二维到三维衣片的转换及三维服装的自然造型上。他们采用粒子系统, 将服装曲面离散化为一系列的质点, 点与点之间的作用力表示为微分方程; 在时间离散的过程中, 随时更新质点的位置与速度, 从而获取系统的演变, 模拟三维服装的动态。其质点的动力学运动方程基于牛顿运动定律, 对质点运动方程求解采用了最基本的欧拉方法。

Thalmanns 对柔性织物或服装动态模拟技术的最大贡献在于对柔性织物的碰撞检测及碰撞处理问题的研究上, 在一定程度上实现了服装的动态仿真及模拟。

(3) Baraff^[1] 研究工作的重点放在弹性变形模型的计算方法上。其织物剖分采用三角剖分的形式, 通过分析质点之间的内在关系, 并运用牛顿运

动学定律, 得到织物运动的偏微分方程组。不同之处在于 Baraff 采用了隐式积分方法, 使步长增大, 从而大大减少了整个计算的积分次数, 提高了计算效率。隐式迭代法较之显式求解更适合于织物的动态仿真与模拟, 在保持系统稳定同时, 能快速地使系统达到平衡状态。但由于隐式迭代法需要求解巨型稀疏线性系统, 计算复杂且耗时, 对计算机的内存和速度都有较高要求。

(4) Provat^[1] 采用经典弹簧质点模型模拟约束下的柔性织物, 织物被离散为四边域网格, 网格交点为质点, 质点与质点之间以弹簧形式相连, 弹簧分为 3 类: 结构弹簧、弯曲弹簧、剪切弹簧, 来模拟织物的机械属性。运用牛顿运动定律, 给出质子的运动方程:

$$F_{ext}(i, j) + F_{int}(i, j) = ma(i, j)$$

其中, m 为质点 $P(i, j)$ 的质量, $a(i, j)$ 为 $P(i, j)$ 的加速度, $F_{int}(i, j)$ 为质子所受的内力, 即质子 P 同周围质子之间的相互作用力, 以弹簧的弹力来近似模拟,

$$F_{int}(i, j) = - \sum_{k, l \in R} \kappa \left[\overline{P_{i,j}P_{k,l}} - \left\| \overline{P_{i,j}P_{k,l}} \right\|_0 \frac{\overline{P_{i,j}P_{k,l}}}{\left\| \overline{P_{i,j}P_{k,l}} \right\|} \right]$$

κ 为弹簧的刚性系数。由于用线性的弹簧形变模型模拟非线性的织物受力形变, 会出现失真情况, Provat 采用了基于反演动力学的直接修正法, 解决了这一问题。在求解运动方程时采用的是显式的欧拉方法。因此, 只能选择小步长, 但由于计算简单, 所以计算效率高, 速度快, 几乎达到实时效果。不足之处在于模型不够精确, 无法真实表现织物的物理属性。

3 基于混合技术的织物仿真模型的建立方法

混合技术是指将几何和物理的技术结合起来的一种织物仿真模拟技术。在这方面, 有代表性的工作为:

(1) Rudomun^[1] 提出可以通过在模拟的初始阶段采用几何方法模拟织物的初始状态来减少采用物理方法所需的时间。他提出一种将凸包形的支撑物映射到织物空间, 先裁减掉落在织物外的点, 再重新计算落在织物内的点, 形成一个三维织物的凸包。此时就有了悬垂织物的初始形状。接下来再采用 Terzopoulos' 变形模型来进一步细化织物外形。从理论上讲, 这个方法先通过几何方法来确定织物的初始形态, 然后再运用物理方法确定最终状态。计算时间上应该有很大的提高。但由于寻找一个多边体的凸包是十分耗时的。因此, 此种方法的好处并没有明显地体现。

(2) Kunitl 等^[1]提出的混合方法亦是分两步走:
①第1步是通过物理方法模拟, 织物的2个边界被逐渐靠拢, 在这个模拟阶段织物被表示为一组弹性相连的点; ②第2步是运用奇点理论来特征化最后的皱褶, 在这一阶段, 特征被定义在服装上, 它的表面通过在特征点之间构造而形成皱褶。

(3) Tsopelas^[1]主要是利用混合技术来模拟皱褶的生成, 他首先利用薄壁变形理论分析织物的受力, 然后通过弹性点上利用非均匀B样条进行插值来构造变形曲面。

4 结 论

(1) 基于几何的织物仿真技术, 仅仅注重织物的外在表示形式, 并不注重反映织物的真实属性, 而且, 基于几何的技术还常常要求一定程度的用户交互操作。几何方法一般都没有涉及到复杂的数值求解方法, 因而它们计算简单, 模拟速度快, 但一般来说只能对一些特殊情况下的织物进行模拟, 不能满足真正织物的动态仿真。

(2) 基于物理的织物仿真技术, 由于卷入了大量的偏微分方程计算和为寻找最小能量而引入的多步迭代进程, 这些都使它们在动态仿真模拟中较其它技术更加费时, 但由于基于物理的织物仿真技术可以直观选择表现织物特性的参数, 因而在织物的真实感仿真和动画模拟上都较其它技术有更好的仿真效果, 所以是目前织物仿真模型技术的主流方向。

(3) 混合技术旨在分别吸取物理技术和几何技术的优点, 它们常常用几何方法来决定模拟织物的大概形状, 以物理方法来定义更精细的结构。但就目前所出现的混合技术来说, 还仅仅是初级阶段, 它们无论是在织物模拟范围来说, 还是在几何和物理技术结合的角度来说, 都远没有达到人们所预期的目标。

织物是一种非线性材料, 大多数基于物理的模型都是基于弹性理论。它们一般考虑的是织物的宏观行为, 而没有精确地描述织物行为, 若要具体表

示到每一条线, 则需要更精确的模型。模拟速度也会大大降低。近几年, 一些图形学家还提出了一些基于有限元方法的模型, 从连续介质的本质上计算织物的变形, 而其它模型多是一种相类似的比拟。因而用这种模型进行模拟, 效果更加真实, 并且效率大大提高。虽然它目前还存在着一些有待改善的问题, 但随着它的发展, 最终很有可能成为主流的织物仿真模型方法。

织物的应用领域比较广泛: 在服装生产和纺织工程中更加注重织物的真实性效果; 而服装设计、动画和可视化领域则需要一个模拟速度快、具有基本模拟效果的模型。目前的织物变形仿真模型还不能做到精确和效率的统一, 因而在具体应用时, 需根据实际情况选择不同的织物模型。

参考文献:

- [1] NG N H, GRIMSDALE R L. Computer graphics techniques for modelling cloth[J]. IEEE Computer Graphics and Applications, 1996, 16: 36.
- [2] WELL J. The synthesis of cloth objects[J]. Computer Graphics (Proc. Siggraph), 1986, 20: 49—54.
- [3] AGUI T, NAGAO Y, NAKAJIMA M. An expression method of cylindrical cloth objects. An expression of folds of a sleeve using computer graphics[J]. Trans Soc of Electronics, Information and Communications, 1990, J73—D—II(7): 1095—1097.
- [4] HINDS B K, McCARTNEY J. Interactive garment design[J]. Visual Computer, 1990, 6: 53—61.
- [5] FEYNMAN C. Modeling the appearance of cloth[D]. Cambridge: Cambridge Mass, 1996.
- [6] BREEN D E. A particle-based model for simulating the draping behavior of woven cloth[D]. Rensselaer Polytechnic Inst, 1993.
- [7] TERZOPOULOS D. Elastically deformable models[J]. Computer Graphics(Proc. Siggraph), 1987, 21(4): 205—214.
- [8] M THALMANN N, YANG Y. Techniques for cloth animation //M THALMANN N, eds. New trends in animation and visualization[M]. UK: John Wiley & Sons, 1991: 243—256.

Methods of Simulation Cloth Modeling

GAO Cheng ying, LIU Ning, LUO Xiao nan

(Institute of Computer Application, Sun Yat sen(Zhongshan) University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Cloth modeling is a pop topic in computer graphics recently. Cloth modeling method was classified into three classes: geometrical, physical and hybrid, and their advantages and disadvantages are analysed respectively.

Key words: cloth modeling; finite element method; implicit integral