

# 柔性织物三维动态模拟中的网格剖分研究<sup>\*</sup>

刘 宁, 高成英, 罗笑南

(中山大学信息科学院计算机应用研究所, 广东 广州 510275)

**摘 要:** 论述了基于弹簧质点模型的柔性织物在三维动态模拟中网格剖分问题, 针对剖分子区域的划分、子区域间拼接光顺性和任意区域下的二维剖分算法进行了研究, 提出了一种解决此类问题的方法。

**关键词:** 弹簧质点模型; 多区域分割; 多边形扫描线算法

**中图分类号:** TP391 **文献标识码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2002) 05-0105-03

织物的真实感仿真和动画模拟, 一直是近年来计算机图形学的热点。众多的计算机图形学家经过近20年来的研究, 已经建立了多种织物仿真模型<sup>[1]</sup>, 各种织物模型由于其建模的方式不同, 因而适用的范围亦不同。

其中基于物理方法的弹簧质点织物仿真模型, 因其模型简单易用、算法容易实现、计算效率高, 因而应用较广。笔者在三维织物动态模拟的实现中, 就应用了该模型。在应用该模型时, 第1步就是要将织物离散网格化, 对一般布匹的动画模拟, 由于其形状规则, 受力均匀, 因而容易实现。但对于三维服装的模拟缝合过程, 因其形状的不规则性和受力的不均匀性, 导致不能直接对其进行剖分, 并且最终剖分的好坏, 极大地影响最后模拟的效果和速度。剖分过细, 会因点数过多, 加大处理机运算量, 影响模拟速度; 剖分过粗, 影响最终模拟效果。针对上述情况, 本文提出了先将主区域进行子区域分割, 再进行不同精度网格剖分的方法, 有效提高复杂形变区域的模拟精度, 并由于减少了小形变区域网格剖分数量, 降低了相应的计算量。

## 1 弹簧质点模型

弹簧质点模型<sup>[2]</sup>是将织物表示为一个个质点的集合, 质点之间的相互关系归结为质点间的弹簧作用。弹簧分为结构弹簧、弯曲弹簧和剪切弹簧3类。利用弹簧质点模型(图1), 可以描述出织物最基本的3种机械属性, 即: 拉伸、剪切、弯曲。通过对这3种弹簧的弹性系数的调整来模拟不同材质织物的三维效果。

## 2 二维织物初始切分区域的划分

在二维衣片向三维服装缝合模拟过程中, 特别是在衣片的缝合阶段, 各个部分受力和形变情况是

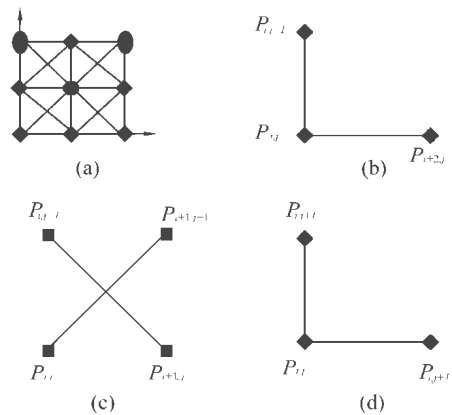


图1 弹簧质点模型及3种弹簧类型

Fig. 1 Mass-spring model and three kinds of spring  
(a) 弹簧质点模型; (b) 结构弹簧;  
(c) 剪切弹簧; (d) 弯曲弹簧

不相同的。因此, 不能直接对其采用统一大小网格进行简单二维剖分, 而是要根据衣片材质确定剖分网格大小(剖分系数 $\epsilon$ ), 根据衣片形变情况来确定要剖分的二维区域D。

**2.1 初始切分子区域分割** 为了更好地进行模拟, 采取将衣片进行子区域分割的方法, 根据衣片位置、受力和形变情况, 分割成不同子区域。然后针对形变程度大的区域, 采用密集网格剖分, 细致模拟形变计算。而对形变程度小的区域, 采用粗网格剖分, 以降低计算量。

因此, 将衣片分割为主区域 $D_m$ (包含整个衣片的区域)和 $D_{s1}, D_{s2}, \dots$ 等初始切分子区域, 其中 $D_m = \sum D_{si}$ , 在每个初始切分子区域 $D_s$ 中, 保证其形变和受力情况基本相似。并保留每个子区域的分割边界信息。

**2.2 剖分系数处理** 根据衣片的材质、形变和受

\* 收稿日期: 2001-12-07

作者简介: 刘宁(1973年生), 男, 博士生; E-mail: ln\_email@263.net

力等情况, 选择区域剖分数  $\epsilon_{s1}$ 、 $\epsilon_{s2}$  (其中  $\epsilon_{s1}$ 、 $\epsilon_{s2}$  相对应与子区域  $D_{s1}$ 、 $D_{s2}$ ) 来进行衣片子区域的剖分。再根据初始切分子区域剖分数来确定主剖分数  $\epsilon_m$ 。在实际动态模拟中, 根据材质情况, 一般对于弹性系数大的衣片, 由于其形变程度较小, 相应的剖分数  $\epsilon$  较大, 反之亦然。切分子区域剖分数  $\epsilon_{si}$  的选取主要考虑衣片材质和局部区域形变程度 2 个方面。由于剖分虽然是在各个子区域上进行, 但各个子区域是在同一个衣片上的不同部分, 所以剖分数需要考虑到子区域间的拼接光顺性因素, 并由于切分子区域上进行剖分是对主区域剖分后子区域上的细化剖分, 故需要满足以下 2 个条件:

$$\begin{cases} \epsilon_m \geq \max\{\epsilon_{si}\} & i = 1 \cdots n, n \text{ 为切分区域个数} \\ \epsilon_m = u\epsilon_{si} & i = 1 \cdots n, u \text{ 为整数} \end{cases}$$

根据实际情况, 在考虑到优化区域间光顺拼接算法时, 一般采用  $u=2^m$  ( $m$  为整数)。

### 3 基于二维扫描线算法进行初始切分区域的剖分

根据所要剖分的初始子切分区域和剖分数, 可以利用扫描线算法对主区域和切分区域进行剖分, 进而构造弹簧质子模型的网格形式。

#### 3.1 衣片区域二维剖分

(1) 主区域剖分。依据主剖分数  $\epsilon_m$  对衣片整体区域  $D_m$  进行剖分, 保存主区域剖分节点的坐标信息。

(2) 最终剖分子区域转换。为保证三维服装动态缝合过程中各子区域拼接处的光顺性, 还需要根据主区域剖分节点对初始切分子区域进行进一步转换。主要有以下步骤: 首先, 将初始切分子区域的各个顶点用离它最近的主剖分节点替换; 然后, 把初始切分子区域间的边界用最近的主区域剖分单元边界来代替; 最后, 根据新形成的边界重新进行子区域剖分, 形成最终剖分子区域。

此步骤会产生一定的误差, 主要是由于转换时子区域边界点被主剖分交点代替造成的。但由于在实际模拟的过程中, 主剖分网格非常细, 顶点的位移误差相应较小。因此, 这步造成的误差对于最终的三维模拟实际影响不大。

(3) 最终剖分子区域剖分。根据形成的最终剖分子区域和相应的剖分数, 利用扫描线方法对子区域进行二维剖分。

下面以女衬衣衣片为例说明分割的步骤:

(1) 女衬衣衣片肩部、背部为形变比较大的区域, 需要进行区域分割, 因此, 将衣片分割为  $D_{s1}$ 、 $D_{s2}$ 、 $D_{s3}$  和  $D_{s4}$  共 4 个初始分割区域, 并用

主区域利用主剖分数进行二维剖分, 见图 2 (a)。

(2) 利用主区域剖分后的交点信息对子区域边界进行重新分割, 形成最终剖分子区域。并将子区域  $D_{s1}$ 、 $D_{s2}$ 、 $D_{s3}$  用  $\epsilon_{s1} = \epsilon_{s2} = \epsilon_{s3} = 0.5\epsilon$  进行二维剖分  $D_{s4}$  用主剖分数进行剖分, 即  $\epsilon_{s1} = \epsilon_m$ 。

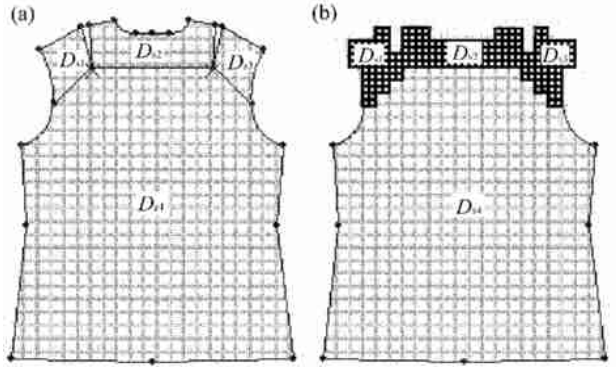


图 2 区域分割示例

Fig. 2 Illustration of partition

(a) 主区域分割和剖分; (b) 子区域的剖分

3.2 基于二维多边形扫描线法的剖分算法 由于剖分区域很多是一些非常不规则的封闭多边形, 加之织物材料本身经向和纬向的要求, 并且根据弹簧质子模型所需要的初始条件, 所以在剖分时应尽量使所形成的网格基本保持为矩形域。然而, 虽然对任意二维多边形的剖分已有很多成熟算法, 但它们不适宜应用在二维衣片的剖分上。笔者在多边形扫描线算法的基础上, 引入了二维多边形扫描线算法。该算法在剖分任意多边形时, 由于分别采用一组互相垂直的扫描线, 因此在衣片区域内部可以保持较好经、纬方向的矩形网格。但由于衣片边界的复杂性 (存在一些特殊的锐角、钝角和曲线), 在扫描剖分后会形成一些不规则的三角域, 需要进行特殊处理。并且在实际应用时, 还要考虑到对应衣片的缝合对位关系, 对缝合边界作一些处理。

(1) 二维扫描线剖分算法原理。二维多边形扫描线算法基本思想是根据区域的剖分数, 使用相应矩形域作为剖分网格。分别以经向、纬向扫描线来扫描区域。依序求取所有纬向扫描线和区域边界的交点, 再沿经向扫描线方向依序取网格点的方法, 实现了针对不规则任意多边形区域的剖分。

(2) 剖分算法具体步骤。设区域  $D_i$  的边界顶点为  $P_j (j = 1, 2, \dots, N, N$  为顶点个数),  $\epsilon_i$  为相应区域的剖分数。

1) 利用扫描线算法对多边形区域进行经向、纬向扫描。

① 按  $P_j$  的  $y$  坐标从小到大的顺序排序, 生成数组  $D_{\text{scan}}Y[i][j]$  ( $j = 1, 2, \dots, N$ )。

② 若  $D_{\text{scan}}Y[i][j+1] - D_{\text{scan}}Y[i][j] > \epsilon$  ( $j = 1, 2, \dots, N-1$ ), 以  $\epsilon_i$  为区间剖分系数, 则继续对  $(D_{\text{scan}}Y[i][j+1] - D_{\text{scan}}Y[i][j])$  区间进行剖分, 最终使得剖分区间的间隔小于  $\epsilon_i$ , 将生成细分区间的每个  $y$  值按从小到大的顺序插入数组  $D_{\text{scan}}Y[i][j]$  中, 取下一对相邻顶点, 重复第 ② 步骤);

③ 最终求出的  $D_{\text{scan}}Y[i][j]$  为相应第  $i$  区域的网格数组;

④ 同上述方法, 亦可求得经向扫描线数组  $D_{\text{scan}}X[i][j]$  ( $j = 1, 2, \dots, M$ )。

2) 构造四边域网格: 求每一纬向扫描线和区域边界的交点, 计算出扫描线与区域的交点个数, 确定扫描线相应类型, 进而可以判定其是否在所扫描区域的内部。裁去落在区域之外的部分; 再沿纬向扫描线方向, 结合经向扫描线的值, 构造四边域网格。由于剖分区域不规则性, 纬向扫描和区域边界相交可能会有多种情况, 依据交点个数及类型, 确定区域内网格单元边界, 沿横向扫描线方向依序在边界内取网格点, 构造四边域。这样就去掉落在区域之外的网格单元, 免去了额外的求交判定计算, 节省了计算开销。

3.3 缝合预处理 由缝合约束条件<sup>[3]</sup>, 根据指定的对应缝合边和对应点来重新调整边界单元的网格划分, 只有当 2 条缝合边长度一致、对应缝合点个数相同且离散单元的对位长度相同时, 缝合预处理工作结束。

#### 4 二维衣片的三维缝合过程模拟

(1) 将剖分好的样片交互地放置在人体模型附近的初始位置。

(2) 根据服装裁剪片的缝合信息, 在样片的对应缝合边上加载缝合力。综合缝合外重力和衣片上各质点间内部弹力, 利用弹簧质点模型, 依次在主剖分区域和子区域进行迭代计算。这样, 二维衣片将逐步变形, 并逐渐被缝合在一起。

(3) 衣片缝合边之间足够靠近时, 衣片将会和人模及衣片自身发生碰撞<sup>[4]</sup>, 使得服装继续形变, 系统通过碰撞响应处理继续调整衣片的外形, 最终吻合人体形态, 显示出真实的着装效果。

由于采用了衣片子区域分割技术, 将整个衣片分割为多个相邻的子区域, 利用不同的剖分系数进行剖分, 一方面可降低动态缝合模拟中计算复杂度和数据存储空间, 而且对于形变大的区域加细剖分, 可以更好进行动态模拟。对于剖分系数和子区域边界处理, 保证了不同剖分系数下相邻切分子区域拼接的光顺性。并采用基于二维扫描线算法的区域剖分, 离散多边形区域, 能充分满足内部网格整齐规则和边界网格特殊处理的要求, 使得整个算法剖分速度快、效率高。

#### 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] PROVOT X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior[J]. Proc of Graphics Interface, 1995, 147-154.
- [3] CARRIGAN M, YANG Y, THALMANN N M, et al. Dressing animated synthetic actors with complex deformable clothes [J]. Computer Graphics (Proc. SIGGRAPH), 1992, 26(2): 99-104.
- [4] MOORE M, WILHELMS J. Collisions detection and response for computer animation[J]. Computer Graphics (Proc. Siggraph), 1998, 22(4): 289-298.

## Meshs Generation Research of Flexible Cloth in 3D Dynamic Simulation

LIU Ning, GAO Cheng ying, LUO Xiao nan

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

**Abstract:** This paper deals with flexible cloth based on mass-spring model mesh generation methods in dynamic simulation. It mainly researches three problems: partition initial region, connection between sub regions and 2D mesh algorithm of arbitrary topology regions. It also presents a method to solve this kind of problems.

**Key words:** mass-spring model; multi region; division polygon scan method