

文章编号: 1007-791X (2009) 02-0114-06

一种提高布料表面相交处理真实性的算法

文 冬¹, 刘国华^{1,*}, 周艳红², 金顺福¹

(1. 燕山大学 信息科学与工程学院, 河北 秦皇岛 066004; 2. 河北科技师范学院 计算机系, 河北 秦皇岛 066004)

摘 要: 为了提高布料仿真中布料表面相交处理结果的真实性, 提出了一种接近真实的最小化相交轮廓线全局处理优化算法。首先进行前期的布料模型构建、初始条件的设置以及碰撞检测; 然后利用最小化相交轮廓线全局方法重点对布料表面相交情况进行了处理, 并对处理结果进行了评价和优化; 最后进行后期的碰撞响应以及绘制与显示。经过实验验证, 该方法在仿真的真实性和实时性方面均高于前人的研究, 且在布料动画领域可以提高制作的逼真性。

关键词: 布料仿真; 碰撞检测; 表面相交; 相交处理; 碰撞响应; 最小化相交轮廓线

中图分类号: TP391.9 **文献标识码:** A

0 引言

布料表面相交处理是布料仿真的一个重要分支, 布料表面相交处理的目的是在每一帧的时间范围内解决检测出的表面相交问题, 有助于碰撞响应的顺利进行, 最终改善仿真的视觉效果。由于布料几乎无厚度以及柔软的特性, 由此导致的碰撞相交处理的低效率特别是不真实性一直是困扰众多研究者多年的问题, 在满足实时性的前提下布料仿真的真实性得到了更多的关注, 对相交错误进行合适的处理决定了最终的显示效果, 因此对表面相交处理的研究是提高布料仿真真实性的关键和核心。

近年来, 随着研究群体和应用范围的扩大, 布料表面相交处理的研究出现了一些值得借鉴的成果, 同时也存在很多急需解决的问题。文献 [1] 采用依赖历史记录和全局方向定位的方法来时刻纠正由表面相交导致的方向改变, 但其方法过于复杂, 其依赖历史纪录的迭代过程影响了仿真的实时性。文献 [2] 中采用了统计方法来决定需要纠正的布料位置, 这个方法对于不受约束的布料碰撞来说比较适用, 但是一旦布料碰撞检测和响应需要整合到除布料外还包含其他物体的仿真环境中时, 布料的运动显得更加得复杂, 这样不仅导致布料与其

他物体之间的碰撞以及布料之间的碰撞, 还会导致布料的自碰撞和相交, 影响了仿真的效率和真实性。文献 [3] 中采用了完全阻止交叉发生的方法, 也使用几何方法来保留碰撞表面的皱褶样式; 保证如果在一帧时间开始时布料处于无交叉状态那么这一帧时间结束前所有的布料均处于无碰撞状态。但是, 该方法采用的是避免相交和碰撞的策略, 这并不能真实地反映布料的运动状态, 这导致一些复杂的布料仿真系统有失真感。文献 [4] 定义了一种新表面, 避免了在单一时间步骤内部分表面之间的互相穿透。为了解决在给定时间内所有可能的碰撞事件, 该文为每个碰撞粒子建立了一种无穿透运动空间。通过稳定在这个运动空间的每个粒子的速度, 能保证当前的碰撞特征对在后来的运动中将不会再次发生穿透情况。但是, 由于该文提出的方法过于繁琐, 其实时性受到质疑。文献 [5] 提出用相交轮廓最小化方法解决表面碰撞相交问题。利用对表面轮廓线的研究提高了处理相交的速度, 但是处理相交的结果仍然不够理想, 布料表面之间仍然存在少许相交情况。文献 [6] 提出了一种无历史的布料碰撞处理算法。不用考虑过去时间步骤的信息, 其方法解决了有边界的布料相交问题。使用一个全局相交分析 (GIA) 方法, 能检测到布料相交

收稿日期: 2008-09-02 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60773100; 10671170)

作者简介: 文 冬 (1980-), 男, 湖北仙桃人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为布料仿真、虚拟现实与人工智能; *通讯作者: 刘国华 (1966-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为数据库安全、模式匹配、系统仿真, Email: ghliu@ysu.edu.cn.

的区域。但是,对于一些比较复杂的情况,该文的碰撞处理算法会导致奇怪的伸展行为发生,真实性大打折扣。

从上述的研究工作来看,处理表面相交所采用的方法均不够理想,因为人们要么过度追求相交处理的效率而忽视了真实性,要么利用复杂的方法保证一定真实性的同时又使仿真的效率受到影响。究其原因,主要是快速地解决表面相交的方法还有待改进,且对表面相交处理效果的评价和优化需要深入研究;同时,在对处理效果进行评价前要再次进行碰撞检测以及评价后还要对显示的每帧图形进行控制,这为布料仿真增加了一定的难度。

因此,能否针对布料表面的相交情况实现接近真实的处理是本文研究工作的出发点。其基本思路是:针对不同的布料表面碰撞,在检测出相交的情况后,采用几何分析方法减少相交的表面区域,对于仍然存在的相交情况,再采取控制每帧图形显示的方法,使表面相交处理的效果变得更加真实。鉴于上述思路,在充分吸收最小化轮廓线方法和全局相交分析方法的优点的基础上,本文提出了一种新的最小化相交轮廓线全局处理优化算法。首先进行布料表面相交处理前期的工作,即构建布料的弹簧粒子模型和初始化布料,再进行碰撞检测;然后利用全局最小化轮廓线方法分开相交的表面,并对相交处理的结果进行评价和优化;接着进行碰撞响应以及绘制与显示。最后的实验证明该算法切实提高了仿真的真实性。

1 布料仿真基本过程

布料仿真是一个系统化的过程,除了包括布料表面相交处理这一重要环节外,还涉及到构建布料模型、碰撞检测、碰撞响应等多个环节。因此,只有每个环节之间的密切配合才能保证布料仿真的实时性、真实性和稳定性。布料仿真的流程图如图1所示。根据流程图,下面给出了布料仿真的具体过程。

步骤1 构建布料模型(采用弹簧粒子模型),初始化两块布料;

步骤2 对一帧时间段的布料表面进行计算:

步骤2.1 对该帧的布料表面的一质点进行物

理分析(合力、加速度、速度和下一步可能的位置),对弹簧进行约束;

步骤2.2 对布料整个表面一质点与另外一个布料表面进行碰撞检测:

步骤2.2.1 有碰撞,执行步骤2.3;

步骤2.2.2 没有碰撞,对下一个质点数进行处理:1)如果下一个质点的标记号小于所有质点的个数,执行步骤2;2)否则,执行步骤3;

步骤2.3 表面相交处理(详细步骤参见文章2.2部分);

步骤2.4 在进行碰撞响应前进行相交处理结果评价(即再次进行碰撞检测,对相交处理结果进行评价与优化):

步骤2.4.1 如果检测出该质点与另外一个布料表面的距离为该质点的半径(处理相交彻底的结果),接着进行碰撞响应(执行步骤2.5);

步骤2.4.2 否则,该质点仍处于碰撞状态(处理相交不彻底的结果),那该循环结束(直接执行步骤4),即后面的质点不用进行碰撞检测、处理以及响应过程,也不再对涉及到表面所有质点的这一帧进行绘制和显示。此时,系统会一直显示上一帧的图形;

步骤2.5 根据布料粒子的碰撞受力、速度和位移分析来进行碰撞响应;

步骤2.6 判断该布料表面是否所有的质点都进行了上述步骤的计算:

步骤2.6.1 如果下一个质点的标记号小于所有质点的个数,执行步骤2;

步骤2.6.2 否则,执行步骤3;

步骤3 绘制与显示(需要清除缓存里上一帧的图形,绘制与显示时要利用缓存交换函数);

步骤4 判断是否需要退出系统(即是否需要进行下一帧的计算与绘制):

步骤4.1 如果需要进行下一帧的计算与绘制,执行步骤2;

步骤4.2 如果不需要进行下一帧的计算与绘制,退出系统。

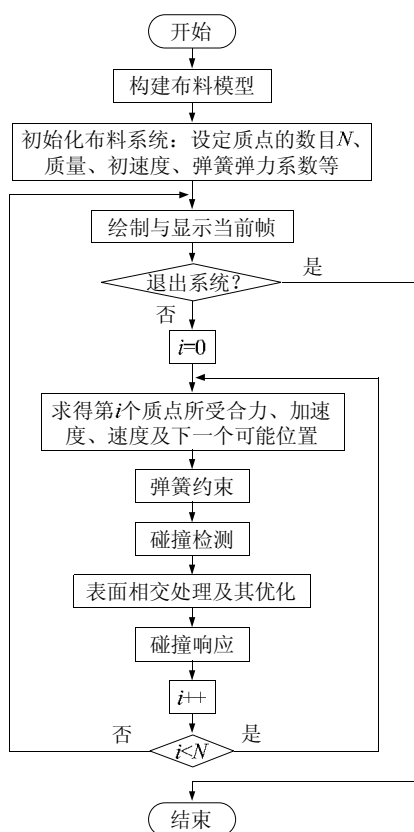


图1 布料仿真流程图

Fig. 1 Flow chart of cloth simulation

2 布料表面相交处理方法

为了系统地说明布料表面相交处理的方法与过程,文章首先对表面相交处理相关的4个重要步骤进行简要的阐述;然后,在借用前人布料模型、碰撞检测和响应研究成果的基础上,重点研究了表面相交处理的方法以及处理效果与优化。

2.1 表面相交处理相关步骤

2.1.1 构建布料模型

在构建布料模型方面采用了 Provot X 建立的弹簧粒子模型^[7]。该模型把一块织物划分为矩形网格,网格的交点被称为质点,每个质点与其相邻的质点用弹簧相连。织物的质量分布在质点上。弹簧有3类:结构弹簧、剪切弹簧和柔性弹簧。模型的结构如图2所示。

利用弹簧粒子模型可以非常方便地对布料进行分割,每个三角形或四边形是构成布料表面的基本几何单元。

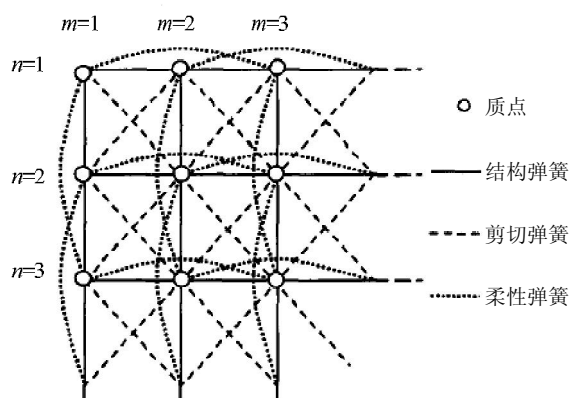


图2 弹簧粒子模型

Fig. 2 Model of spring-particle

2.1.2 碰撞检测

在碰撞检测方面采用了层次包围盒方法^[8]。它是处理碰撞检测问题的有效策略,它的设计理念是避免对所有几何基元进行穷举碰撞测试。和八叉树、二叉树空间剖分树等空间数据结构不同,它们都是对整个虚拟空间进行划分,而层次包围体是对物体或几何基元进行划分,直到达到某个叶子结点的为止。

2.1.3 表面相交处理及其优化

经过碰撞检测后,现在需要对检测出的相交情况进行处理。首先使用最小化轮廓线处理方法^[9]来减少不同布料表面相交的情况,即先判断碰撞检测的结果,如果发生了碰撞,那么让两个表面自由穿透,然后对相交的表面进行相反方向的移动,在移动的过程中使用的是几何方法,即利用对梯度的计算来快速地减小相交轮廓线长度;最后使用全局相交分析方法^[9]使整个表面相交的情况逐渐消失。然后对相交解决的效果进行判断,通过简单地进行碰撞检测后,对于一些仍然存在相交的情况,本文采取了放弃渲染和显示该帧图形的方法,仍然显示上一帧的图形,这样保证了仿真的真实性。文章2.2和2.3部分将重点阐述表面相交处理的方法以及评价与优化的方法。

2.1.4 碰撞响应

准确处理完相交的情况后,需要对布料碰撞后的真实情况进行仿真,即碰撞响应。碰撞响应目的就是要把碰撞检测和相交处理的结果整合到仿真过

程中。文章采用了动态碰撞响应的方法^[4],即先用数值积分来确定粒子在某一时刻的状态(位置和速度),同时系统事先也要设置一个初始力 F_T 、弹力大小 F_M 和摩擦系数或静摩擦系数,然后通过对各种力的计算来反映真实的碰撞效果。按上述这种方法进行碰撞响应能提高仿真效率。

2.2 最小化相交轮廓线全局处理表面相交方法

首先,在两个布料的表面上各取一到两个网格多边形,然后对它们的相交情况进行处理。

如图3所示,本文使用几何的方法构造了运动过程中的一个静态场景,几个邻接的网格多边形 B_i 相交于边 E , E 表示边的任何一个方向向量。当边 E 与网格多边形 A 相交时, A 和 B_i 之间的交线为 R_i 。下面,关注边 E 相对于多边形 A 进行移动的位移量如何改变一个多边形 B_i 和 A 之间的相交线段长度。

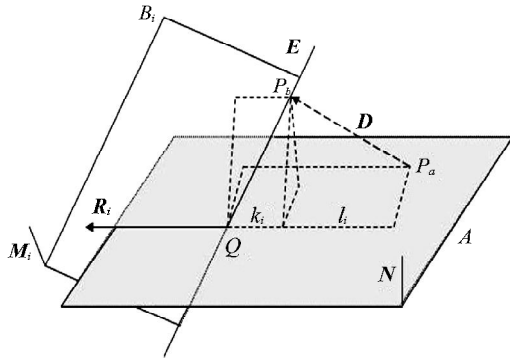


图3 表面相交处理过程几何分析图

Fig. 3 Geometrical analyse drawing of surface intersection processing course

令 N 和 M_i 作为多边形 A 和 B_i 各自的法线。那么相交线段的方向就是向量 R_i ,该向量通过 N 和 M_i 的向量积来求得,本文把它标准化成单位长度,确定它的方向。如图1所示, E 与 P_aQ 共线, N 与 P_aQ ($P_aQ=D+P_bQ$)相互垂直。于是,可得等式(1)

$$(N \cdot E)P_bQ = (N \cdot P_bQ)E = -(N \cdot D)E \quad (1)$$

根据式(1),画在多边形 A 上的相交线段长度的缩减量为 l_i+k_i ,即当边 E 相对于多边形 A 移动小位移量 D 时,边 E 和多边形 A 之间的交点在多边形 A 上从 P_a 点移动到 Q 点。因此,多边形 B 被画在多边形 A 上的相交线长度 P_aQ 被 l_i+k_i 缩减。可以按等式(2)来计算缩减量

$$l_i+k_i=P_aQ \cdot R_i=D \cdot R_i+P_bQ \cdot R_i=D \cdot R_i-\frac{N \cdot D}{N \cdot E}E \cdot R_i \quad (2)$$

同时,多边形 A 被画在多边形 B_i 上的相交线长度 P_bQ 被 k_i 缩减,两个多边形的相交点在多边形 B_i 上从 P_b 点移动到 Q 点。可以按等式(3)来计算 k_i 的值

$$k_i=P_bQ \cdot R_i=-\frac{N \cdot D}{N \cdot E}E \cdot R_i \quad (3)$$

现在,开始计算在两个相交表面上的轮廓长度的改变值。首先,增加与边 E 邻接的所有多边形 B_i 的个数,然后,通过一个来自于相对位移 D 的线性梯度向量 G 来表示在多边形 A 和所有的 B_i 上所有相交部分整个长度的缩减量,如等式(4)所示

$$\sum_i (l_i+2k_i)=G \cdot D \quad (4)$$

其中, $G=\sum_i \left(R_i - 2 \frac{E \cdot R_i}{E \cdot N} N \right)$ 。

梯度向量 G 的方向表示了这样一个方向:边 E 必须相对于多边形 A 进行移动以便得到相交轮廓长度最佳缩减量。因此,考虑到在两个碰撞面之间的相对位移 D ,同时假定一个一次近似用来保持边 E 和碰撞面之间单一的平移相交线 R_i 的方向不变,也假定相交点不会从边 E 或者多边形 A 上消失,相交轮廓线长度缩减量是 $G \cdot D$ 。

然后,本文通过对上述单个网格多边形之间的计算拓展到整个不同布料表面相交处理的计算。于是,本文引入了全局相交分析方法,它把被给相交轮廓的所有纠正方法汇聚在一起共同解决轮廓长度的全局缩减问题。对此,本文聚集了整个与所有表面相交轮廓线有联系的梯度,转变成一个单一的全局梯度。这个全局梯度表示了根据两两相交表面之间的相对位移,相交轮廓的整个长度是如何改变的。然后,由全局梯度的计算进行的碰撞纠正可以统一地应用到轮廓中包含的所有表面相交线的缩减过程中。

2.3 表面相交处理结果评价与优化

为了提高仿真的真实性,保证通过上述梯度向量的计算来比较完美地减少轮廓线,本文对相交处理结果进行了评价与优化。即对相交表面进行相交轮廓线处理后,再次进行碰撞检测,对于仍然出现

少许表面相交的情况,立即停止当前帧的绘制和显示,而重新显示前一帧图形;对于没有出现表面相交的情况,布料开始进行碰撞响应以及后续的绘制与显示。这样有效地保证了相交轮廓线减少的彻底性。即在视觉允许的范围内(显示频率大于每秒 30 帧时,人眼就能感觉到图形的显示是连贯的),可以通过牺牲每秒显示的帧数来保证显示的质量。

3 实验结果与分析

实验采用了 Window XP Professional 操作系统、VC 6.0 环境和 Open GL/GLUT 编程工具,在 PC 机(PIV 2.40 GHz,内存 1 G)上实现了一个布料表面相交处理仿真系统。实验中,碰撞物体是两块具有不同质点个数的布料,本文对 2006 年 Pascal Volino 提出的相交轮廓线最小化方法与本文方法的显示过程效果进行了比较,分别如图 4 和图 5 所示。

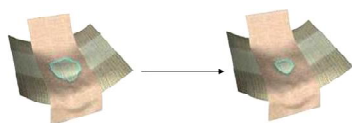


图 4 相交轮廓线最小化方法的表面相交处理过程效果图
Fig. 4 Procedure effect drawing of processing surface intersection using the method of minimizing intersection

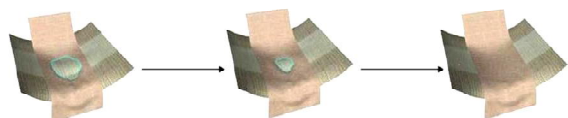


图 5 本文方法下的表面相交处理过程效果图
Fig. 5 Procedure effect drawing of processing surface intersection using the method proposed in this paper

在处理表面相交时,前人的方法很难彻底地解决相交问题,多数情况下只能处理到第 2 个状态,改进后的表面处理方法能处理到第 3 个状态。由此可见,改进后的方法在仿真的真实性方面高于前人的方法。

采用传统方法和本文提出的方法分别处理基本几何单元间的碰撞检测与相交情况,测得处理一帧画面的平均时间消耗数据,如表 1 和表 2 所示。利用表中布料在处理过程中的数据,采用两种方法,绘制处理一帧画面的平均时间随质点数目变化

的折线图,如图 6 所示。结果显示,采用本文提出的方法进行表面相交处理,系统的实时性相对于 1995 年 Pascal Volino 提出的依赖历史记录和全局方向定位的传统方法能有较大的提高。

表 1 传统方法处理一帧所需的平均时间

| Tab. 1 Required average time of processing a frame using the traditional method | | | | | ms |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| 质点数目 | 10×10 | 15×15 | 20×20 | 25×25 | 30×30 |
| 平均时间 | 9.38 | 11.16 | 14.15 | 15.64 | 17.12 |

表 2 本文方法处理一帧所需的平均时间

| Tab. 2 Required average time of processing a frame using the method proposed in this paper | | | | | ms |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| 质点数目 | 10×10 | 15×15 | 20×20 | 25×25 | 30×30 |
| 平均时间 | 7.61 | 9.23 | 10.49 | 11.24 | 12.09 |

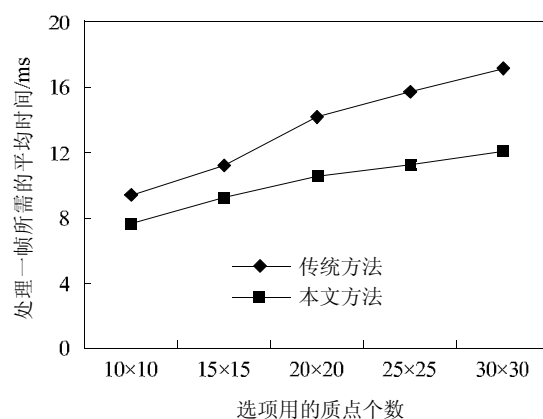


图 6 本文方法与传统方法比较

Fig. 6 Comparison of the traditional method and the method proposed in this paper

从图 6 可以看出,随质点个数的增加,处理一帧画面所需的平均时间会不断增加。尽管在保证实时的前提下,改进的方法会比传统方法处理更多的质点,但是这个质点数目是有限制的,不能无限增加。增加质点数目会使画面显示得更加细腻,更有真实感,但这样又使碰撞相交处理问题的规模加大,降低了实时性。因此,本文采用了以下方法来解决这种矛盾。当布料离视点较近或当布料运动较慢时,可以用比较精细的布料模型(如弹簧粒子模型)来显示;当布料离视点较远或当布料运动较快时,可以用比较粗糙的布料模型(如传统的简单多边形力学模型)来显示^[9]。这样,在保证显示质量的前提下,大大减少质点数目,可有效解决真实

感和实时性的矛盾,满足大部分仿真应用的要求。

4 结束语

在布料碰撞过程中对相交情况进行处理是布料仿真的难点。为了达到仿真的实时性特别是要提高仿真的真实感,本文采用前人的弹簧粒子布料模型、碰撞检测和响应的研究成果,对布料表面相交处理的最小化相交轮廓线方法进行了改进,提出了一种既逼真又快速的表面相交解决方法,使表面相交的情况将近得到彻底解决。实验结果表明,该方法有效地增强了显示的真实感,同时也提高了仿真的实时性。

但是,在处理褶皱比较严重的布料之间的碰撞相交情况时,它涉及到了复杂的碰撞检测计算和相交处理中大量的迭代运算,使本文方法的实时性受到一定的影响。因此,在保证真实性的前提下,后续的研究需要重点关注特殊情况下算法效率的进一步提高问题。

参考文献

- [1] Volino P, Magnenat-Thalmann N. Collision and self-collision detection: efficient and robust solutions for highly deformable surfaces [C] //Proceedings of the 6th EuroGraphics Workshop on Animation and Simulation, Netherlands: Springer-Verlag, 1995: 55-65.
- [2] Volino P, Magnenat-Thalmann N. Accurate collision response on polygonal meshes [C] //Proceedings of the computer animation, Massachusetts: IEEE Computer Society Press, 2000: 154-163.
- [3] Bridson R, Fedkiw R, Anderson J. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation [J]. ACM Transactions on Graphics, 2002,21 (3): 594-603.
- [4] Wingo Sai-Keung Wong, George Baci. Dynamic interaction between deformable surfaces and nonsmooth objects [J]. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 2005,11 (3): 329-339.
- [5] Volino P, Magnenat-Thalmann N. Resolving surface collisions through intersection contour minimization [J]. ACM Transactions on Graphics, 2006,25 (3): 1154-1159.
- [6] Wicke M, Lanker H, Gross M. Untangling cloth with boundaries [C] //Proceedings of vision modeling and visualization, Aachen: IOS press, 2006: 349-357.
- [7] Provot X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior [C] //Proceedings of the Graphics Interface conference '95, Vancouver: Canadian Human-Computer Communications Society, 1995: 147-154.
- [8] Mezger J, Kimmerle S, Eitzmub O. Hierarchical techniques in collision detection for cloth animation [J]. Journal of WSCG, 2003,11 (2): 322-329.
- [9] Baraff D, Witkin A, Kass M. Untangling cloth [J]. ACM Transactions on Graphics, 2003,22 (3): 862-870.
- [10] Garcia M, Robles O D, Pastora L, et al.. MSRS: A fast linear solver for the real-time simulation of deformable objects [J]. Computers & Graphics, 2008,32 (3): 293-304.

An algorithm improving authenticity of cloth surface intersection processing

WEN Dong¹, LIU Guo-hua¹, ZHOU Yan-hong², JIN Shun-fu¹

(1. College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China; 2. Department of Computer, Hebei Normal University of Science and Technology, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract: In order to improve authenticity of the results of cloth surface intersection processing of the cloth simulation, an algorithm, which is close to the real minimizing intersection-contour-lines global-handling optimization, is proposed. Firstly, pre-time process including the construction of the model of cloth, the set of initial conditions and the collision detection are researched. Then, using minimizing intersection contour lines global method, the situation of cloth surface intersection is disposed emphatically, and the results of processing are evaluated and optimized. Finally, later process including the collision response, drawing and display are researched. Experimental results show that this method is superior to previous research in two aspects: the simulation authenticity and real-time, and it can increase verisimilitude of the production in the domain of cloth animation.

Key words: cloth simulation; collision detection; surface intersection; intersection processing; collision response; minimizing intersection contour lines