

服装参数化设计中的碰撞检测技术研究

陈 龙¹⁾ 陆国栋¹⁾ 邓卫燕¹⁾ 张东亮²⁾

¹⁾ (浙江大学 CAD&CG 国家重点实验室, 杭州 310027) ²⁾ (Digital Fashion Ltd 大阪)

摘 要 服装参数化设计中的碰撞检测属于静态碰撞检测, 具有精确性和实时性的要求, 服装约束系统的有效性也需要维护。将服装参数化模型分为 4 个层次, 针对各个层次提出不同的碰撞检测要求。碰撞检测对约束求解产生影响, 通过改变约束求解顺序或改变约束链, 达到对约束系统有效性的维护。分片构建具有统一拓扑结构的服装初始网格曲面, 利用分片细分技术构造服装显示网格曲面, 通过对显示曲面的碰撞检测来提高碰撞检测精度, 相应地依赖于显示曲面的服装款式切割线, 也需要映射到服装初始网格曲面上。服装曲面细分碰撞对速度产生影响, 利用分片分区技术并综合多种方法提高碰撞检测速度。对服装曲面的自碰撞检测和具有约束的碰撞精确反应, 也给出了多种解决方法。实例表明, 本文的算法是健壮和有效的, 并在开发的服装 3 维设计系统中得到应用。

关键词 服装 3D 设计 参数化 碰撞检测 曲面细分 约束求解

中图分类号: TP391 TS941.26 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2008)01-0162-08

Research of Collision Detection Technology Based on Garment Parametric Design

CHEN Long¹⁾, LU Guo-dong¹⁾, DENG Wei-yan¹⁾, ZHANG Dong-liang²⁾

¹⁾ (State Key Laboratory of CAD&CG, Zhejiang University, Hangzhou 310027) ²⁾ (Digital Fashion Ltd, Osaka, Japan)

Abstract Collision detection technology for parametric garment design is static collision detection. It asks for the property of precision, timing and validity of constraint system. The parametric garment model is set into four layers, so different demand for collision detection is put forward to aim at every layer. Collision has an effect on constraint solution, so maintaining validity of constraint system is accomplished by modifying constraint solution sequence or constraint chain. Constructing garment initial mesh with unified topology, subdividing the initial surface to get display mesh by piecewise technology, precision is improved when collision detection is carried out based on display mesh. Garment style cutting line lying on the display mesh also needs to be projected onto the initial mesh. Speed of collision detection is affected by subdivision, so sub-area and piecewise technology and all kinds of collision detection techniques are adopted to satisfy the need of timing. At last self collision detection and collision response with some constraints are also discussed. This algorithm is robust and effective, which is shown in the examples, and has been integrated into a garment design system.

Keywords garment 3D design, parameterization, collision detection, surface subdivision, constraints solution

1 引 言

3 维服装计算机辅助设计, 在造型、款式设计, 以及操作等方面有着 2 维计算机服装设计无法比拟的优越性, 引起了越来越多学者的兴趣, 相关技术大多得到研究。其中, 作为基础技术的服装造型设计主要

包括曲面造型与 3D 编辑、曲面碰撞检测等技术。

1.1 服装曲面造型

Au 建立了统一拓扑结构的人体模型^[1], 将这种方法借鉴到服装曲面构造中, 构建具有统一拓扑结构的服装模型。Wang 在对人体模型特征点的自动识别基础上, 建立了 3 维服装的特征网格, 并用网格细分的方法建立了 3 维服装的网格曲面^[2]。徐文鹏

等人基于人体特征识别, 利用样条曲线为基本元素构建并求解服装几何元素之间的约束关系图, 同时以这些样条曲线构建参数化曲面, 通过对参数化曲面的双线性插值建立具有统一拓扑的参数化服装网格曲面^[3]。李基拓提出了服装参数化模型的草图编辑方法^[4]。具有固定拓扑的网格曲面在服装参数化设计和可重用性设计方面具有较大优势, 并得到广泛采用。

1.2 碰撞检测

服装 3D 草图交互设计碰撞检测为静态碰撞检测, 由于服装 3D 草图设计是新兴技术, 目前文献提出的技术大多是应用于服装模拟动态碰撞检测^[5-7], 较少涉及服装草图编辑静态碰撞检测。服装交互设计碰撞检测与服装模拟碰撞检测相比有以下一些不同之处:

(1) 大多数服装模拟碰撞检测需要满足力学约束和几何约束, 而交互设计碰撞检测需要满足各种尺寸、几何、拓扑约束。

(2) 碰撞检测算法大多要求在速度和精度之间取得平衡, 服装交互编辑中的静态碰撞侧重精确性要求, 而服装模拟动态碰撞检测侧重速度要求。

(3) 服装草图设计有着复杂的交互操作手段, 由此处理的曲线曲面很复杂, 算法要处理各种特殊情况。

服装编辑中的静态碰撞检测技术要满足服装参数化约束系统求解的有效性、交互设计服装曲面的精确性、交互操作的实时性。为了达到这些要求, 本文采用李基拓的服装草图编辑方法^[4]和徐文鹏的约束求解方法^[5]作为服装造型基础算法, 同时将文献[5]的标号做了修改。本文首先将服装参数化模型分层, 针对各个层次和静态碰撞检测要求, 提出服装编辑静态碰撞检测多项技术: 通过改变约束链或约束求解顺序维护碰撞检测过程中约束系统有效性; 利用曲面分片细分技术提高碰撞检测精度; 利用分区技术和多种加速方法提高碰撞检测速度。对于服装曲面可能会出现自碰撞, 本文也进行了讨论。为了达到碰撞检测的精确性和连续性, 多种碰撞反应方法用来处理各种特殊情况。

2 服装参数化设计与碰撞检测

2.1 服装参数化模型的分层技术

具有统一固定拓扑的服装参数化模型是分层构

建与编辑的。根据模型层次对象的不同, 可以将服装模型分为特征节点层、交互曲线层、约束关系层、网格曲面层, 如图 1 所示。特征节点层的元素是指服装曲线的控制点, 服装交互曲线层的元素是指服装的特征环和轮廓线, 约束关系层的元素是指控制节点层元素和交互曲线层元素之间存在的各种约束。服装造型设计中的约束主要分为共点、共面、对称、自对称 4 种拓扑约束, 相互定向的几何约束和服装参数化设计的特征尺寸约束。通过对服装样条曲线的插值, 生成服装网格曲面层的网格元素。

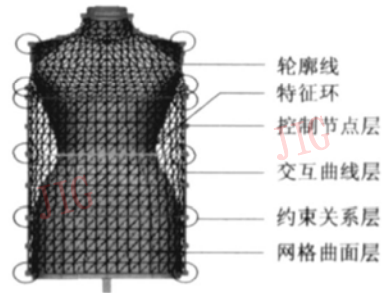


图 1 服装参数化模型层次图

Fig 1 Hierarchy 1 of parameterized model for garment

2.2 服装参数化模型的碰撞检测

服装参数化模型各个层次对碰撞检测的要求是不同的, 因此, 碰撞检测需要分层进行, 在低层次的元素进行碰撞检测后, 才能进入高层次的碰撞检测, 如图 2 所示。

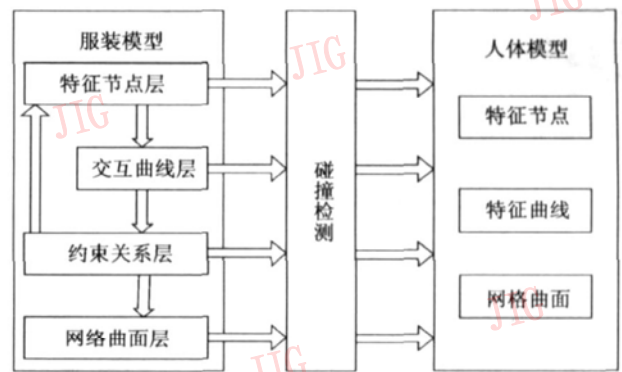


图 2 分层碰撞检测示意图

Fig 2 Figure for layered-collision detection

控制节点层和交互曲线层对碰撞检测的精度有较高要求, 网格曲面层对碰撞检测的速度和精度均有较高要求。约束关系层的碰撞检测是检查约束元素如特征节点层节点元素和交互曲线层曲线元素在碰撞检测后是否满足约束, 约束层的碰撞检测会改变约束求解顺序, 要求碰撞检测不能破坏原有几何

元素之间的约束。由于碰撞检测会造成约束的不满足,只能通过循环求解,如图 2 中约束关系层和特征节点层的箭头所示。节点层和曲线层的碰撞检测本文不作为主要考虑对象,本文主要考虑约束关系层碰撞检测对约束求解的干涉和网格曲面层碰撞检测的精度和速度提高。

2.3 碰撞检测对参数化模型约束求解的影响

服装编辑过程实质就是一个不断求解服装参数化模型元素约束并进行碰撞检测的一个过程。在通过轮廓线和横截面编辑衣服时,操作过程分为以下两步:

(1) 根据约束来拖动被选择的控制点或控制线,这些控制点和控制线相对于人体或服装自身做碰撞检测,由此确定被选择的控制点和控制线。

(2) 依据第 1 步中得到的控制几何元素,通过约束关系求解其他的控制点和控制线,并对这些控制点和控制线做相对于人体或服装碰撞检测。

在上述两个步骤中,都有可能出现的问题是:对元素施加碰撞检测以后,可能会破坏元素满足的其他约束。服装样条曲线中存在如图 3 所示曲线约束系统。曲线 c_1 和曲线 c_4 在点 p_2 处要求共点,此时无论是 p_2 , c_1 , c_4 中的哪一个人体做碰撞检测,都有可能破坏掉共点这个约束。

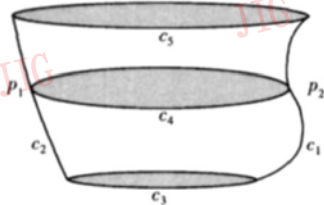
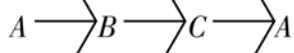


图 3 碰撞干涉约束求解过程示意图

Fig 3 Figure for constraint solution combined with collision interference

在服装系统求解过程中,先对第 1 步中被选择的控制元素 A 施加约束并对其进行碰撞检测,然后将 A 作为约束系统求解的起点进行第 2 步,在第 2 步中,对于单向的约束环,碰撞检测对求解顺序不会发生影响,而对封闭的约束环一旦发生碰撞,约束求解顺序就会发生循环或突变。如有约束链:



若先根据约束关系依次求出 B 、 C ,要求在每求解出某一元素,就要对其进行碰撞检测。在对 C 进行碰撞检测后,可能会破坏掉 C 与 A 的约束关系,这时需要改变 A 并重新对约束链进行求解。这个

循环求解迭代过程直到对 C 进行碰撞检测后不再破坏与 A 的约束关系才停止。图 3 中 p_1 , c_4 , p_2 , c_5 形成循环约束链,在对其求解时,就可能会碰到这种情况。循环迭代求解加大了约束求解的难度,也可以采取将曲线约束元素劈分求解的方法将封闭约束链变为单向约束链。如将封闭链 p_1 , c_4 , p_2 , c_5 中的元素 c_4 , c_5 分为左右两段,封闭约束链变为两个单向约束链 c_4 , p_1 , c_5 和 c_4 , p_2 , c_5 , 就可以对约束链进行单向求解。

3 提高网格碰撞检测精度

3.1 服装曲面分片细分碰撞检测技术

服装编辑通过对服装样条线的编辑操作实现。样条线的大范围运动造成服装曲面的大范围变动,服装曲面的网格边长大范围变动。网格稀疏造成服装表面不光滑,服装外观效果差,同时因服装三角形网格某些边长较长时会发生碰撞失效现象;网格过密造成不必要的计算量,影响服装编辑速度,同时狭小三角形过多造成网格曲面在展开时的效果不好。为了达到精确性和实时性的统一,自适应细分网格成为首选。建立服装初始网格曲面 M_0 ,在服装网格曲面编辑过程中,根据精度的需要,对这些分片后的子网格曲面进行细化和简化,从而得到疏密合理的网格,形成一系列网格曲面 M_j :

$$\dots, M_{-1}, M_0, M_1, \dots$$

下标 j 的正负性,表明网格比 M_0 稀疏还是稠密。考虑到服装设计的通用性,细分曲面显然没有固定拓扑方便,同时对曲面的细分和简化操作对速度的影响较大。本文通过构造两张曲面——初始服装曲面 M_0 和局部细分曲面 M_1 。一般情况下操作曲面 M_0 ,当某个区域曲面需要细分时,将该区域的网格曲面进行细分,然后连接已经细分的曲面和未细分的曲面构建 M_1 ,这样既具有自适应细分曲面的优点,对速度影响又不会太大。在网格变形完成后,先对网格曲面 M_0 和人体进行碰撞检测,再对 M_1 进行碰撞检测操作,此时只需要对 M_1 和 M_0 中不同的顶点做碰撞检测。把 M_1 作为显示曲面,就可得到具有外观真实性的服装曲面。

利用曲面分片技术构建 M_0 和 M_1 ,可以进一步减小计算量。利用人体扫描和特征识别技术构建人体网格^[1]。人体网格的构建需要反映人体表面的形状变化,若在单一的整个网格曲面上表征这种曲

率的变化无疑是困难的, 采用分片构造技术则可以降低曲面构建的难度, 并且有利于网格形状的控制, 人体表面分片情况如图 4。将人体曲面顶点法向偏移, 同时通过一些特殊处理, 就可以得到拓扑和人体曲面相同的服装分片曲面。服装曲面分片构建, 在服装曲面编辑或碰撞检测时, 就可以分片进行。



图 4 人体分片着色图

Fig 4 Figure for colored piece-wise of mannequin

在服装子面片生成以后, 需要将这些子面片拼接起来。子面片 P 、 Q 拼接为面 N 的快速连接可以按照以下步骤来进行。

(1) 构造面 N 的点链表和面链表, 将面 P 和面 Q 顶点链表所有的点全部存入面 N 的顶点链表中, 面 P 和面 Q 面链表所有的面全部存入新面 N 的面链表中。重新设置 N 点链表中点的编号, 并对 N 面链表中对应的点序号做出相应的改变。

(2) 给定点重合的阈值, 依次搜寻面 N 点链表中所有点, 若有两个重合点, 设第 1 个点序号为 A , 第 2 点序号为 B , 标记第 2 点为 $true$ 并将第 2 点的序号改为 A , 此处不考虑多于两个点重合的情况。遍历面 N 的面链表, 将所有出现序号 B 的地方改为 A 。

(3) 重复步骤 2 直到面 N 中所有重合点都标记完成。

(4) 在面 N 点链表中剔除标记为 $true$ 的顶点。

(5) 构造面 N 的边链表。每个三角面有 3 条边, 遍历面链表, 构造出面 N 的有向边链表。若要求构造面 N 的无向边链表, 则只需在边链表中剔除由两个顶点构成的两条有向边中的一个即可。

3 2 服装分片细分曲面生成

服装网格具有以下要求: (1) 良好的光顺性和可展性; (2) 细分网格要保持特征信息, 如特征点位置、特征尺寸等; (3) 网格具有边界, 同时要求边界

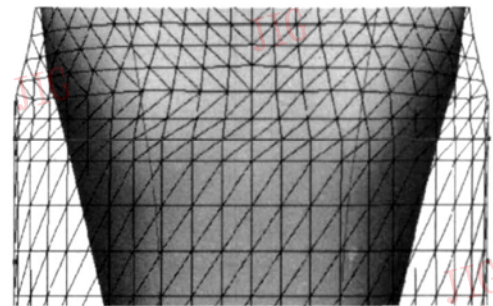
过渡光滑。通过对细分方法的比较, 选用插值细分的 $\sqrt{3}$ 细分方法来实现本文的细分方法^[8]。在分片细分曲面拼接为服装曲面时, 为了保持曲面分片的完整性, 防止出现 T 型网格, 规定所有的边界边在细分过程中不进行边交换操作。

细分新生点是通过插值得到的, 插值规则如下:

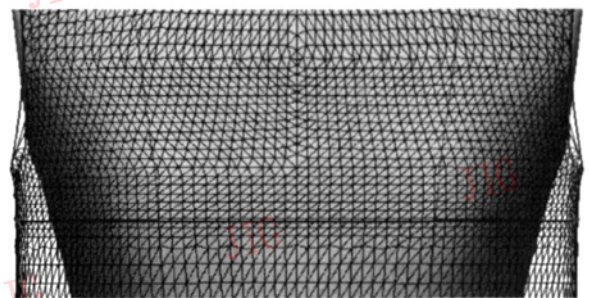
$$p_m^{k+1} = (p_a^k + p_b^k + p_c^k) / 3$$

$$p_i^{k+1} = (1 - n\beta)p_i^k + \beta \sum_{i=0}^{n-1} p_i^k \tag{1}$$

式 (1) 中, 点 p_a^k, p_b^k, p_c^k 表示 k 次细分后网格中三角形的 3 个顶点, p_m^{k+1} 表示第 $k+1$ 次细分过程中产生的一个新点, p_i^{k+1} 表示第 $k+1$ 次细分过程中对 k 次细分后网格点的更新, p_i^k 表示点 p_i^{k+1} 的一级邻域点。本文网格的非边界点的邻接点数为 6 在式 (1) 中 β 取值 $1/18$ 。为了充分满足服装曲面网格的特征, 在对原始网格细分两次即细化 9 倍以后, 就可以得到如图 5 (b) 中的网格。由于固定拓扑层网格已经比较光滑, 为便于两层网格的信息映射, 在细分时, 对非新生成的点不作更新。



(a) 细分前



(b) 细分后

图 5 细分前后服装网格示意图

Fig 5 Gament mesh before and after subdivision

在生成细分曲面时, 为了防止误差累积, 我们总是先对固定拓扑的服装初始网格变形, 在变形完成之后依据一定规则选取子面片进行剖分。需要剖分的依据规则主要有以下几点:

(1) 特征尺寸拉长为标准服装特征尺寸值的某一阈值, 此时生成的服装相对于标准服装模型变化已经较大, 网格已经比较稀疏, 需要进行细分加密。

(2) 同一子面片内部相邻三角形之间的法向量夹角小于某一阈值, 此时网格表面会产生较突起或尖锐的表面特征。

(3) 在某一个网格内部, 网格边长的最大值大于或边长的最小值小于边长的平均值某一阈值, 此时网格边长非常不均匀。

(4) 服装网格边长大于与之相对应的人体网格边长某一阈值, 该片服装网格曲面需要细分。

服装款式设计中必不可少的服装款式切割线是绘制在显示表面上的, 固定拓扑曲面更便于保存款式切割线设计信息, 需要将存在于显示表面上的款式切割线的信息映射到固定拓扑曲面即服装初始网格曲面上。通过纪录切割线的端点、切割线与网格边的交点在服装网格曲面三角面上的重心坐标, 当服装模型的几何外形发生变形时, 通过重心坐标, 可以实时地更新服装的款式。通过构建细分后的曲面与细分前的曲面之间的映射关系, 将存在于细分表面上的切割线的信息映射到初始网格曲面上, 如图 6 所示。设细分前网格为 M_0 , 细分后网格为 M_1 。

图 6 中, 点 A, B, C 为 M_0 上的网格顶点, 点 D, E 为细分过程中生成的网格顶点, 边 DE 为边交换而生成, 同时删除原始边 BC 。映射的目的是将 M_1 上的切割线信息即曲线 c 和 M_1 网格边交点如图 6 中的点 i 映射到 M_0 中去, 这样在重新读取文件时, M_1 及切割线信息都可以重新生成出来。

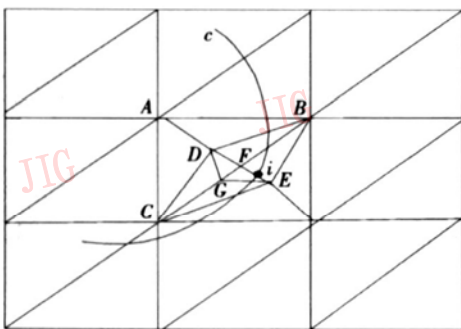


图 6 双层网格映射图

Fig 6 Projection between two level meshes

点 i 可以按照如下步骤进行映射:

(1) 过 DE 的中点 F , 取以边 BC 为共边的两个三角面的法向量的平均值为法向量, 作平面 Π 。

(2) 求平面 Π 与 BC 的交点 G , 连接 DG 和 EG , 得到三角形 DEG 。

(3) 求点 i 在三角形 DEG 中的重心坐标。将通过切割线得到的切割点分为两类, 位于发生边交换的边上和位于没有发生边交换的边上, 前一类可以通过以上步骤得到, 而后一类由于直接位于 M_0 上, 故不需要映射, 直接存储。这样所有的切割线信息都可以在完成读取 M_0 之后得到恢复。

4 提高网格碰撞检测速度

4.1 服装曲面分区碰撞检测技术

服装和人体的碰撞检测是属于柔性体和刚体的碰撞检测, 由于人体曲面和服装曲面的空间复杂性, 同时考虑到服装编辑的随意性与复杂性, 根据人体的拓扑特征进行碰撞检测分区。由于裤子的碰撞检测处理相对上衣来说要简单一些, 故本文主要依据上衣来进行, 但在人体分区时考虑到裤子碰撞检测的需要。碰撞检测共分为如图 7 (a) 所示的几个部分。在进行碰撞检测时, 根据高度值进行切环, 图 7 (b) ~ (d) 分别表示了特殊区域得到的切环。碰撞检测可以根据横截面形状做出如表 1 所示的处理方法。

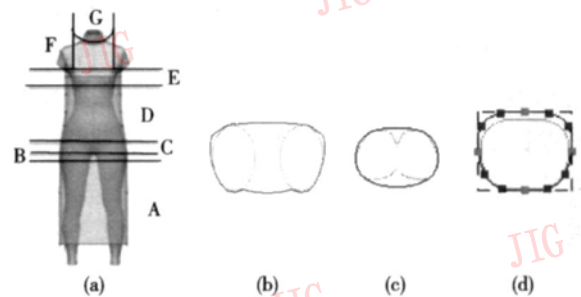


图 7 碰撞检测分区及横截面图

Fig 7 Partition and cross section for collision

表 1 碰撞检测的人体分区和处理方法

Tab 1 Method of partition for body and treatment for collision detection

编号	名称	处理方法
A	腿部	裙子属于两个环和一个环的碰撞, 见图 7 (b), 若是裤子则相对简单, 如图 7 (d)
B	裆部	裙子或上衣此处处理较为简单, 裤子则需考虑自碰撞情况
C	臀部	一个大环和两个半环的碰撞, 如图 7 (c)
D	腹部	处理简单, 两个环的碰撞检测, 如图 7 (d), 但由于环形状的复杂性, 需要考虑自碰撞
E	胸部	人体曲率变化大, 常需要细分碰撞
F	肩部	需要满足各种要求, 同时人体曲面复杂, 需要特殊处理
G	颈部	颈部衣服的拉动范围较大, 需要考虑自碰撞

4 2 简化的基本元素相交测试算法

碰撞检测问题实质是将某一几何体位于另一几何体内部的点、线、面识别出来并做一定的处理。最精确的碰撞检测测试是将两个几何体所有面基元体进行相交测试,但其计算量巨大,不符合交互编辑的实时性要求。本文采用计算量较小的线线碰撞和点面碰撞两种检测方法。点面碰撞一般转化为线面碰撞。

如图 8 所示, p 为待检测点, 三角面的法向量为 n 。 p 沿 n 的正反两个方向分别延伸 w_1 和 w_2 的长度得到 p_1 和 p_2 两个点。 p_i 为线 p_1p_2 与三角面的交点, 由图 8 知, 此时点 p 应该在三角面的“内部”。

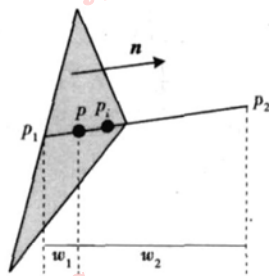


图 8 点面碰撞检测示意图

Fig 8 Figure for collision between point and triangle

如图 9 (a), 图中 P_1P_2 为检测点沿其法向量正负方向延伸得到的线段, sp 为交点。线线测试计算量小, 可以大大加快运算速度, 但有一定误差, 可以证明, 在曲率变化不大的区域, 如人体的腹部, 腿部, 线线测试误差是很小的, 其误差不超过 $0.25 * \|P_{22}P'_{22}\|$ 。点面测试运算量较大, 但结果精确。在碰撞点反应时, 需要交点向人体外偏移某宽松量, 线线测试的误差一般小于这个宽松量, 线线测试的结果是可以接受的。

人体的腿部和腹部一般按照线线碰撞测试进行, 而其他部分按照点面测试进行。

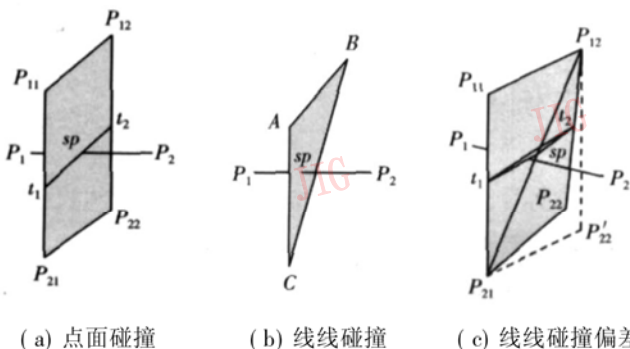


图 9 基本几何元素相交测试图

Fig 9 Figure for basic geometric elements intersection test

4 3 其他加速算法

若人体曲面的面数为 m , 服装曲面点数为 n , 碰撞检测的时间复杂度将是 $O(mn)$ 。碰撞检测加速目的就是减少 m 和 n 。对人体分片分区碰撞检测是减少 m , 这里的加速算法是充分利用服装曲面特点减少 n 。本文采用的加速方法主要有以下几种:

(1) 分片边界检测法。服装样条曲线将服装曲面分为多片区域, 服装曲面是对这些区域进行插值得到, 如果样条曲线在编辑过程中变动很小, 则得到的服装曲面在编辑过程中变化也很小。样条线的变动是通过对控制点的变动量检测得到。若样条线的控制点位置变动小于一定阈值, 则可断定样条线变动不大。对于变动很小的曲面区域是不需要对其进行碰撞检测。由于每条控制线影响范围有限, 通过这种方法, 可以减少需要检测的元素。

(2) 惰性点识别法。每次变形完成以后, 记录下网格顶点的位置。如果编辑后生成的网格顶点位置相对于编辑前网格顶点位置变化量小于一定的阈值, 称这些点为惰性点。这些惰性点不进行检测。

(3) AABB 包围盒加速法。对于基本元素相交测试中的线线相交测试和点面相交测试, 可以先求取检测对象的 AABB 包围盒, 如果包围盒相交则进一步对元素相交测试。

5 自碰撞与碰撞反应

5 1 自碰撞

服装造型过程中的自碰撞分为两部分: 样条线的自碰撞和网格点的自碰撞。服装曲面在臀部以下裆部以上部位的特征环在拖动编辑过程中会产生自相交的情况, 这时可以将轮廓线离散形成小线段的集合, 对这些小线段进行两两相交测试, 若出现自相交的情况则停止编辑。当曲面网格点曲率发生大变化时, 会出现反折的情况, 如图 10 中所示。

尽管网格点初始生成时不会产生自相交, 但在碰撞反应时则可能会产生自碰撞的情况。对于服装这种自碰撞情况, 可以通过指定反应方向来处理。如图 10 (a), 将特征环从中间凹陷处分为两部分, 分别求取两部分的几何中心, 如图中的 C_1 和 C_2 点。若存在网格曲面上的点 A 、 B , 在对 A 、 B 做碰撞检测时, 求取 C_1A 和人体的交点作为 A 点在人体上的映射点, 要求 A 点的反应方向与其在人体曲面上映射点的方向夹角小于 90° 。图 10 (b) 中为不发生自碰撞

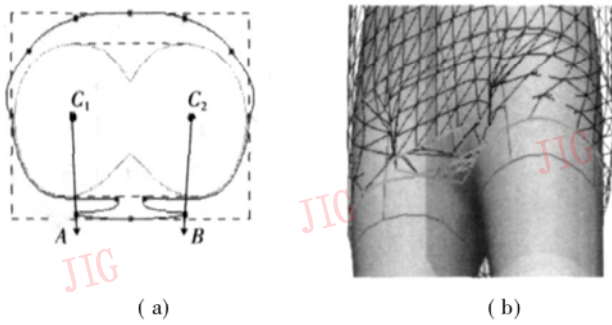


图 10 自碰撞检测

Fig 10 Self-collision detection

情况的网格。

5.2 碰撞反应

由于网格顶点采取静态碰撞, 会突然改变点的位置, 造成网格顶点的跳动或者约束的不满足, 需要特殊处理, 即网格顶点碰撞反应方向具有约束条件。根据约束情况可以分为 3 类: 法线方向的反应, 法向方向某分量的反应, 指定方向的反应。

(1) 对于没有约束要求的网格顶点反应方向, 可以直接沿其顶点法向量偏移。顶点法向量为经过该顶点的所有三角平面法向量的几何平均值。

(2) 指定反应方向的碰撞反应有 3 种情况。第 1 种情况, 如图 11 所示。网格曲面的边界一定有轮廓线存在, 轮廓线要精确反应网格边界, 边界网格顶点在碰撞反应后必须仍然位于该轮廓线上, 即图中的 A 点是正确的反应点, 而 A' 就是错误的反应点。这时以视图的视角方向 P_1P_2 作为碰撞反应方向。人体分区 F 部分需要作此处理。

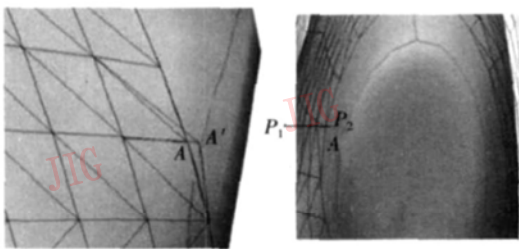


图 11 指定反应方向的碰撞反应

Fig 11 Collision response with given direction

第 2 种情况, 可能会发生自碰撞的网格顶点。由于横截面的变形复杂, 特别是腹部 D, 插值生成的网格顶点容易发生自碰撞。服装网格顶点与人体三角面片进行点面碰撞测试时, 将人体三角面片的法线方向指定为碰撞反应方向, 可以避免发生自碰撞或者碰撞反应方向错误。

第 3 种情况, 对于人体分区 A、B、C 部分, 都需要做此处理。如图 12 中所示分别为人体腿部、裆部、腹部的截面环, 图中黑点为环的局部中心点, 中心点为环上点的坐标平均值, 黑线为反应方向。

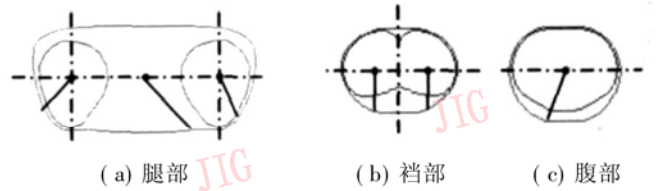


图 12 人体 A、B、C 分区碰撞检测图

Fig 12 Collision for the part A、B、C on body

中心点的求取步骤如下:

① 根据环的左右极值点确定环的全局中心点, 如图 12(a) 和图 12(c) 中的全局中心点。

② 全局中心点把环分为两部分, 分别求取两部分的局部中心点。如果局部中心点到全局中心点的长度 w 大于环宽度 W 的 $1/2$ 则保留所有中心点, 如图 12(a) 所示; 如果 w 小于或等于 W 的 $1/2$ 判断环的凸凹性, 若为凹环, 则去掉全局中心点, 保留局部中心点, 如图 12(b), 如果是凸环, 则去掉局部中心点, 保留全局中心点, 如图 12(c)。

(3) 对于等值面上的点, 为了保证碰撞后仍然在等值面上, 在垂直于等值面的反应方向分量上不能有偏移。如图 13 中的网格顶点, 在碰撞检测前位于同一高度等值面上, 在碰撞中令其反应方向在高度方向的分量为 0。

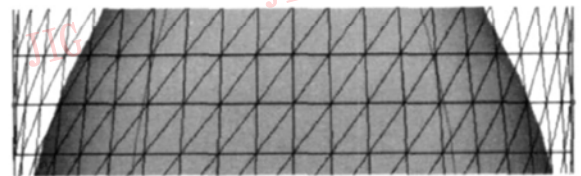


图 13 指定法线方向某分量的碰撞反应

Fig 13 Collision response with same coordinate of the given normal

6 实例与结论

本文算法在 3 维服装设计系统中得到应用, 实践证明该算法是有效的。图 14 中 (a)、(b) 是出现需要细分的网格顶点, 由图知, 经过碰撞检测后, 顶点不会进入人体, 但很多边都进入了人体, 导致服装外观效果极差。图 14 中 (c)、(d) 经过本文算法后, 效果大大改善。尽管本文算法能够满足参数化造型

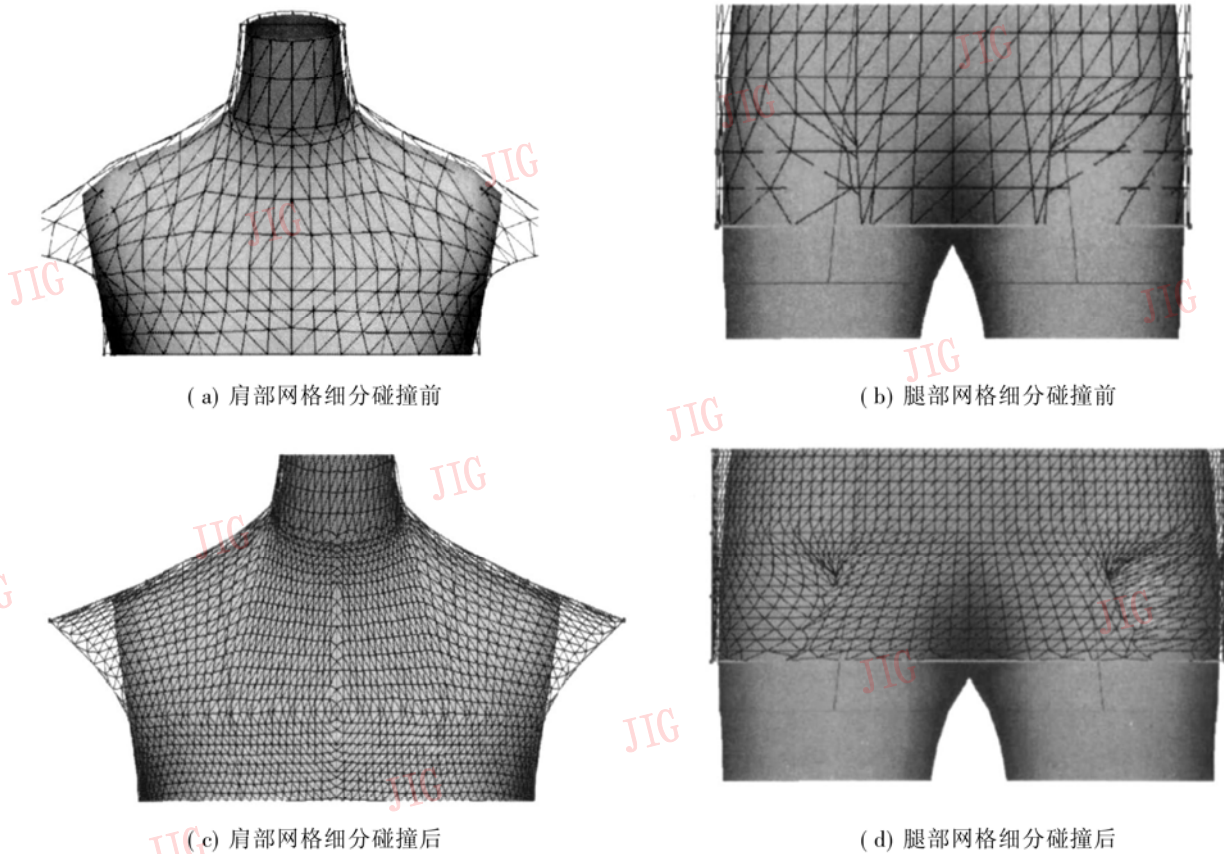


图 14 实例图

Fig 14 Examples for collision detection

系统中碰撞检测技术的性能要求,但同时两张曲面进行操作,不可避免造成一定的速度损失,进一步的工作是生成根据曲率自适应细分的服装曲面造型技术和设计信息重用化技术及研究细分曲面的碰撞检测技术。同时,本文仅仅考虑了服装编辑中的静态碰撞。针对动画人体服装编辑中的动态碰撞是今后要考虑的方向。在自碰撞中,本文没有考虑物料的厚薄,这也是今后要考虑的方向。

参考文献 (References)

- 1 Au C, Yuen M. Feature-based reverse engineering of mannequin for garment design [J]. *Computer-Aided Design*, 1999, 31(12): 751~759.
- 2 Wang C C L, Wang Y, Yuen M. Feature based 3D garment design through 2D sketches [J]. *Computer-Aided Design*, 2002, 35(7): 659~672.
- 3 Xu Wen-peng, Lu Guo-dong, Wang Jian, *et al*. Research of geometric constraints description and solving technique in apparel CAD [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(5): 1054~1059. [徐文鹏, 陆国栋, 王剑等. 三维服装 CAD 中几何约束表达及其求解技术研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(5): 1054~1059.]
- 4 Li Ji-tuo, Lu Guo-dong, Zhang Dong-liang. Individuality based garment surface modeling through a 3D interactive sketch [J]. *Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics*, 2005, 17(11): 2512~2517. [李基拓, 陆国栋, 张东亮. 基于草图交互的个性化服装曲面生成方法研究 [J]. *计算机辅助设计与图形学学报*, 2005, 17(11): 2512~2517.]
- 5 Van den Bergen G. Efficient collision detection of complex deformable models using AABB trees [J]. *Journal of Graphics Tools*, 1997, 2(4): 1~14.
- 6 Ericson C. *Real-time Collision Detection* [M]. Boca Raton: Press LLC, 2004.
- 7 Teschner M, Kimm erle S, Heidelberger B, *et al*. Collision detection for deformable objects [J]. *Computer Graphics Forum*, 2005, 24(1): 61~81.
- 8 Kobbelt Leif. sqrt(3)-subdivision [A]. In *SIGGRAPH 2000 Proceedings* [C], New Orleans, Louisiana, USA, 2000, 103~112.