

# 基于 FDH 包围盒的布料碰撞检测\*

韩丽, 贾玥

(辽宁师范大学 计算机与信息技术学院, 辽宁 大连 116029)

**摘要:** 在布料仿真中, 碰撞检测与响应十分复杂, 很难同时具备真实感和实时性。针对此问题, 采用质点弹簧模型进行建模, 基于 FDH 包围盒提出一种快速的检测基本几何元素间碰撞的方法。通过分析点的位置向量与三角平面的夹角, 利用向量内积的性质来判断点与三角形的位置关系, 同时进行了相应的碰撞响应处理。实验结果表明, 采用该方法进行碰撞检测既保证了模拟的真实性, 同时又提高了系统的实时性。

**关键词:** 布料模拟; 质点-弹簧模型; FDH 包围盒; 碰撞检测; 碰撞响应

中图分类号: TN911.73

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2013)13-0033-04

## Collision detection of dynamic cloth simulation based on FDH bounding boxes

Han Li, Jia Yue

(College of Computer & Information Technology, Liaoning Normal University, Dalian 116029, China)

**Abstract:** In dynamic cloth simulation, collision detection and response are complicated, so that it is difficult to achieve both the realistic and the real-time. To solve this problem, we adopted the mass-spring model for cloth, and then an effective method was proposed to detect the intersection of mass and triangle accurately based on the FDH bounding boxes. The collision response is considered respectively. The experimental results demonstrate that this method is efficient and robust.

**Key words:** cloth simulation; mass-spring model; FDH; bounding boxes; collision detection; collision response

随着计算机图形学、虚拟现实和计算机动画等技术的兴起和普遍应用, 用高质量的计算机动画对极易变形的柔性物体进行真实感仿真成为当前研究的热点课题<sup>[1]</sup>。在布料动态模拟过程中, 碰撞是一个不容回避的问题, 如果不能及时地进行碰撞检测并作出相应的响应处理, 就会出现物体之间相互穿透和重叠等不真实现象<sup>[2]</sup>。碰撞检测是影响布料模拟速度的重要因素, 碰撞问题解决得好坏直接影响到布料仿真的实时性和精确性。

空间中几何模型间的碰撞检测算法一般可以分为空间分解法和层次包围盒法两大类<sup>[3]</sup>。后者的应用比较广泛且种类很多, 它的基本思想是用体积略大但形状特性简单的包围盒来近似代替几何模型, 并通过构造树状层次结构逐渐逼近对象的几何特性。若两个几何模型的包围盒不相交, 可认为两物体之间没有发生碰撞; 否则,

需要对两物体进行精确的检验。这样通过包围盒间的相交测试快速排除了不相交的基本几何元素, 从而减少了相交测试的次数。较典型的有沿坐标轴的包围盒 AABB (Axis Aligned Bounding Box) 和球包围盒 Spheres, 这两类包围盒的相交测试十分简单, 但紧密性相对较差。方向包围盒 OBB (Oriented Bounding Box) 是近些年应用比较广泛的包围盒, 它的最大特点是其方向的任意性, 这使得它可根据被包围对象的特点尽可能紧密地包围对象, 但同时造成相交测试变得复杂。固定方向凸包 FDH (Fixed Direction Hull)<sup>[4]</sup> 是一种特殊的凸包, 它既继承了凸包紧密性好的优点, 同时也可以看做 AABB 的扩展, 具有其简单性的特点。鉴于其紧密性和简单性优点, 本文采用 FDH 包围盒方法进一步优化了布料碰撞检测的过程。

本文首先建立布料的质点-弹簧分析模型, 并基于 FDH 包围盒的碰撞检测原理引入向量, 优化了基本几何

\* 基金项目: 国家自然科学基金 (61262316); 辽宁省百千万人才项目及辽宁省教育厅资助项目 (2010921090)

元素间的碰撞检测。实验结果表明,该方法进一步提高了布料与模型的碰撞检测效率,而且大大增强了布料仿真过程的实时性和真实性。

### 1 布料模型的建立

自1986年WEIL J<sup>[5]</sup>采用余弦曲线及其几何变换对悬垂布料进行模拟,大量学者研究了布料建模的方法。目前应用较为广泛的是由PROVOT X<sup>[6]</sup>提出的质点-弹簧模型,他把布料划分为矩形网格,网格交点称为质点。为了模拟布料拉伸压缩、沿平面方向剪切和平面外方向弯曲,分别设置了结构弹簧、剪切弹簧和弯曲弹簧,质点之间用这3种弹簧相连,如图1所示。

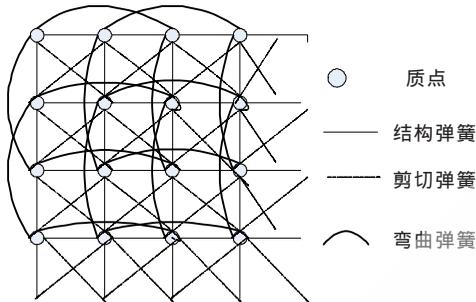


图1 质点-弹簧模型

模型中每个质点受到内力(弹簧力)和外力(重力、空气阻力、风力<sup>[7]</sup>等)的共同作用。假设质点 $i$ 在 $t$ 时刻所受合力为 $F_{\text{合}}(i)$ ,则 $t+\Delta t$ 在时刻质点 $i$ 的位移、速度、加速度由显式欧拉方法<sup>[8]</sup>给出:

$$a_{i}(t+\Delta t)=\frac{F_{\text{合}}(i)}{m_{i}} \quad (1)$$

$$v_{i}(t+\Delta t)=v_{i}(t)+\Delta t a_{i}(t+\Delta t) \quad (2)$$

$$S_{i}(t+\Delta t)=S_{i}(t)+\Delta t v_{i}(t+\Delta t) \quad (3)$$

这样,随着时间变化,综合每个质点的运动,即可呈现出整个模型所代表的布料的变形形态,反复迭代生成动态布料。

利用质点-弹簧模型可以很方便地对布料进行三角分割,每个三角形是构成布料表面的基本几何元素。

### 2 固定方向凸包(FDH)的相关概念

三维几何模型的凸包<sup>[9]</sup>就是包含该对象的最小凸多面体。固定方向凸包是一种特殊类型的凸包,它的所有面的法向量均来自一个固定的方向集合。几何模型的包围盒是包含该几何模型的一个简单几何体,它可以形成对该模型的一个粗略的估计。

FDH包围盒是由它在选定的固定方向集 $D$ 中各个方向向量上的最大延伸取得的。其中, $D$ 中的方向向量为共线且方向相反的向量对。通过遍历计算几何模型的所有顶点与固定方向集 $D$ 中的各个方向的最大点积可以得到相应的FDH包围盒,如图2所示。蛮力计算FDH的时间复杂度只有 $O(n)$ 。

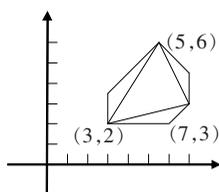


图2 FDH包围盒的构造

一个复杂的几何模型是由上万个基本几何元素构成的,若采用原始的方法对两个几何模型中的所有基本几何元素进行两两相交测试,时间复杂度将高达 $O(n^2)$ <sup>[6]</sup>,所以本文通过构造几何模型的包围盒树的层次结构来逐渐逼近几何对象。设几何模型的FDH包围盒为父节点,采用自上而下的方法构造包围盒树。

一棵FDH二叉树的构造过程如下:首先,确定分裂轴,在方向集合 $D$ 中选择使包围盒沿此轴线方向最长的一个向量作为分裂轴;然后,确定分裂平面,计算集合中所有基本几何元素的中心在分裂轴上的投影中值,此值作为分裂轴上分裂点划分父节点,这样父节点一分为二;接下来,分别以这两个节点为基,继续分裂直到最小的节点单元为几何模型的基本几何元素。

### 3 改进的FDH树碰撞检测算法

进行碰撞检测,首先分别为布料和其周围几何对象的三角化模型建立相对应的FDH包围盒二叉树,然后对两棵二叉树进行遍历判交,这样可先排除对象间一定不相交的部分,从而只对包围盒相交的部分进行基本几何元素间的精确检测,并对发生碰撞的部分进行碰撞响应处理。本文采用FDH包围盒,依据上述思想设计了基于FDH树的碰撞检测算法。对于两棵FDH二叉树A和B,若两棵树的根节点包围盒不相交,那么可以判断两棵树不相交;若存在树A的根节点与树B的内部节点的FDH包围盒不相交,则停止向下遍历;若一直遍历到树B的叶子节点,那么继续用该叶子节点遍历树A;如果遍历到树A的叶子节点,那么进一步对基本几何元素进行检测。算法描述如下:

TraverseTree(A, B)

if (root(A)  $\cap$  root(B) =  $\Phi$ )

    return 树A与树B不相交

else if (leaf(A) and leaf(B))

    对基本几何元素进行精确求交

else if (leaf(A) and NotLeaf(B))

    for each child Cb

        TraverseTree(Cb, A)

else

    for each child Ca

        TraverseTree(Ca, B)

end if

#### 3.1 包围盒间的相交检测

使用包围盒进行碰撞检测,目的是尽早排除所有不可能相交的基本几何元素对。包围盒间的相交测试速度直接影响碰撞检测的速度。本文首先利用FDH在运动方向上的值排除一部分肯定不发生碰撞的包围盒,对于可能发生碰撞的再利用投影判交的方法作进一步检测。

以平行于 $X_0Z$ 面放置的布料与桌面碰撞为例,当布料下落时最先发生碰撞的一定是布料 $(0, -1, 0)$ 方向和

桌面(0,1,0)方向上的包围盒。因此可以选取布料包围盒(0,-1,0)方向上的FDH值 $y_c$ 与桌面包围盒(0,1,0)方向上的FDH值 $y_d$ ,若 $y_c > y_d$ ,则布料包围盒与桌面包围盒一定不发生碰撞。若 $y_c \leq y_d$ ,则观察两个包围盒的投影区间的相交情况:如果两向量集合在某个方向上的投影区间不相交,则两包围盒必不相交;若在所有方向上的投影区间都相交,那么两包围盒相交,但并不说明布料与桌面一定发生碰撞,还要对基本几何元素作进一步检测。采用这种方法可以在进行投影判交之前先排除一部分不可能相交的包围盒,省略很多不必要的投影比较,当几何模型的点比较多时明显地提高了检测效率。

### 3.2 基本几何元素的碰撞检测

通过FDH包围盒间的相交测试之后,排除了肯定不会发生碰撞的区域,但对于包围盒发生碰撞的区域,尚不能确定包围盒内的基本几何元素之间是否发生碰撞<sup>[10]</sup>。此时有必要进行基本几何元素间的碰撞检测。本文利用质点-弹簧模型模拟布料运动并以三角网格作为布料的基本几何元素,同时对场景中几何模型也进行了三角化分割,这样基本几何元素间碰撞转化为三角形间求交问题,此类问题可归结为点-三角形碰撞检测问题。

现有的点-三角形碰撞检测方法是求解一个三元一次方程组或求解多个一元一次方程的方法来确定基本几何元素之间的距离<sup>[11]</sup>,从而判断两者是否发生碰撞,计算比较复杂。本文提出一种新的点-三角形碰撞检测方法,通过分析点的位置向量与三角平面的夹角来判断点与三角形的位置关系,从而得出是否发生碰撞。

如图3和图4所示,假设 $\triangle ABC$ 、 $\triangle DEF$ 分别为两模型的基本几何元素,其中点B是最可能发生碰撞的点,为碰撞粒子,则问题转化为检测点B与 $\triangle DEF$ 的碰撞情况。图3为在第 $k$ 个时间步长 $\triangle ABC$ 和 $\triangle DEF$ 的相对位置,其中点N为点B在面DEF上的投影。若到了 $k+1$ 步,点B运动到 $B'$ 位置,那么判断点B与 $\triangle DEF$ 是否相交的算法描述如下:

$$(1) \text{ 计算 } N_1 = \overrightarrow{BN} \cdot \overrightarrow{BB'}$$

(2) 若 $N_1 \neq 0$ ,即点B运动方向与 $\triangle DEF$ 的法线成一定角度,此时转入步骤(4);否则,计算 $N_2 = \overrightarrow{BB'} \cdot \overrightarrow{B'D'}$ 。

(3) 若 $N_2 > 0$ ,则点 $B'$ 在 $\triangle DEF$ 上方,两基本几何元素没有发生碰撞,转入步骤(7);否则,两基本几何元素碰撞,转入步骤(6)。

$$(4) \text{ 计算 } N_3 = \overrightarrow{NB'} \cdot \overrightarrow{NB'}$$

(5) 若 $N_3 > 0$ ,点 $B'$ 在 $\triangle DEF$ 上方,两基本几何元素没有发生碰撞,转入步骤(7);否则,两基本几何元素碰撞。

(6) 对两个基本元素进行相应的碰撞响应处理。

(7) 算法结束。

通过上述步骤就可以很容易地判断两个基本几何元素间是否相交,若有相交还要进行相应的碰撞响应。

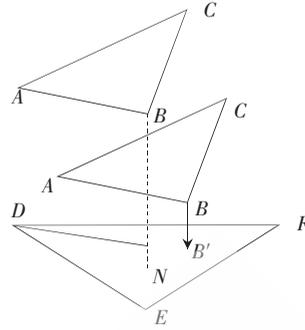


图3 点B平行于法线运动

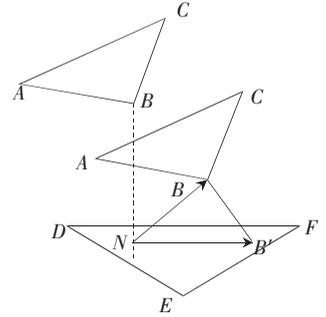


图4 点B与法线成一定角度运动

## 4 碰撞响应

碰撞响应是碰撞检测问题的重要组成部分,当检测到点-三角形发生碰撞后,随即需要解决的是碰撞后的调整问题,使碰撞后的状态更符合真实情况,这种处理称为碰撞响应<sup>[12]</sup>。

通常的碰撞响应是在几何模型周围设置一个向量场或是当布料与几何模型发生碰撞时,给布料的粒子施加一个向外的瞬间足够大的力。由于这些力或向量场不是实际存在的,因此都会造成一定程度的不真实感,使布“浮”在几何模型的周围或是弹离几何模型<sup>[13]</sup>。通常碰撞响应的方向和大小取决于碰撞的弹性系数和表面摩擦系数等属性,鉴于此,本文采用了如下碰撞响应处理方法。

碰撞被看作是非完全弹性的(质点在碰撞中损失能量),假设质点以速度 $v$ 与平面发生碰撞,平面法向量为 $n$ ,速度 $v$ 被分解为垂直于平面的速度 $v_n$ 和平行于平面的速度 $v_t$ ,在发生碰撞时质点与三角形可能会相互发生摩擦,设摩擦系数为 $k_f$ :

(1) 当 $k_f = 0$ 时,质点在三角形平面上作无摩擦滑动,此时质点碰撞后的速度为:

$$v' = v_t - k_f v_n \quad (4)$$

其中, $v_n = (v \cdot n)n$ , $v_t = v - v_n$ , $v$ 为碰撞前的速度, $k_f$ 为反弹系数。

(2) 当 $k_f \neq 0$ 时, $v'$ 需考虑摩擦力的影响,质点与平面产生相互摩擦,摩擦力对质点相对于三角形的水平运动速度起阻尼作用,此时质点的速度衰减 $v''$ 为:

$$v'' = v' - k_f \|v_n\| u' \quad (5)$$

其中, $u' = v' / \|v'\|$

由此,可根据不同情况获得碰撞后质点的速度,进而获得该时间步长后质点的新位置,有效处理碰撞,逼真地模拟布料运动。

## 5 实验结果及分析

本文在奔腾IV 2.8 GHz,1 GB内存的PC上,以OpenGL图形库为基础,使用VC++作为开发环境进行仿真。首先定义布料和碰撞对象的初始位置,然后布料在各种内力和外力的共同作用下向下运动,实现了具有不同质点个数的布料与桌子和球体的碰撞检测和碰撞响应实验。

图5是布料与桌子的碰撞检测,可见图中布料自然下垂,在方形桌子的棱角处十分自然,并产生了真实的褶皱效果。图6、图7为各种状态下的布料与不同数量的球体的碰撞检测,模拟效果自然逼真。

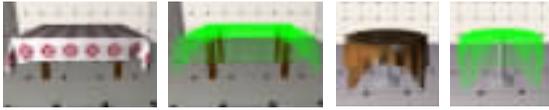


图5 布料与桌子的碰撞检测

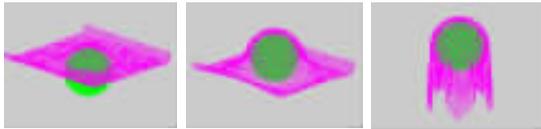


图6 布料包裹球体过程



(a)与单个球体碰撞 (b)与多个球体碰撞 (c)与球体和地面碰撞  
图7 布料与球体的碰撞检测

分别使用传统方法与本文提出的检测方法对基本几何元素间的碰撞进行检测,其中处理一帧画面所需时间如表1所示。可见处理时间均小于传统方法,保证了系统的实时性。

表1 传统方法与本文方法处理一帧画面所需时间(ms)

方法	质点数目			
	15×15	25×25	30×30	50×50
传统方法	12.17	16.02	17.43	22.86
本文方法	8.11	10.68	12.78	15.27

本文基于质点,弹簧模型建立FDH包围盒,实现了布料与几何模型的碰撞检测及响应。在进行基本几何元素间的碰撞检测时,利用向量内积的性质判断点-三角形是否发生碰撞,从而省去了对点到平面距离等繁复的运算的求解。实验结果表明,采用本文方法模拟布料与几何模型的碰撞,在产生自然逼真模拟效果的前提下,使得系统实时性有较大的提高。

#### 参考文献

[1] 沈才樑,李伟,余立丰,等.基于局部自适应混合积分的

动态布料模拟快速方法[J].计算机应用研究,2012,29(7):2740-2742.

- [2] 陈晔,徐乃平.真实感布仿真中布与刚体的碰撞检测及修正[J].软件学报,2001,12(12):1874-1880.
- [3] 汤亮,曹卫星,朱艳.作物可视化中的碰撞检测及相应研究[J].计算机科学,2011,38(10):263-284.
- [4] 魏迎敏,王涌,吴泉源,等.碰撞检测中的固定方向凸包围盒的研究[J].软件学报,2001,12(7):1056-1062.
- [5] WEIL J. The synthesis of cloth objects[J]. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 1986,20(4):49-54.
- [6] PROVOT X. Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behavior[J]. Proceedings of Graphics Interface,1995:147-154.
- [7] LING L, DAMODARAN M, GAY K L. A model for animating cloth motion in air flow [C]. TENCON'94. IEEE Region 10's Ninth Annual International Conference, 1994:118-122.
- [8] 金一庆,陈越,王冬梅.数值方法[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [9] 汪嘉业,王文平,屠长河,等.计算机几何及应用[M].北京:科学出版社,2011.
- [10] 赵慧青.虚拟服装设计中的布料仿真与碰撞检测算法研究[D].成都:成都理工大学,2008.
- [11] 罗谦.基于三角网格的变形体碰撞检测算法研究[D].杭州:浙江大学,2006.
- [12] BRIDSOU R, FEDKIW R, ANDERSON J. Robust treatment of collisions,contact and friction for cloth animation [A]. Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series, ACM SIGGRAPH, SanAntonio,Texas, 2002:594-603.
- [13] 顾尔丹,许端清,王靖斌,等.结合一种面-面碰撞检测算法的服装动态模拟[J].计算机辅助设计与图形学学报,2002,14(11):1036-1040.

(收稿日期:2013-04-16)

#### 作者简介:

韩丽,女,1973年生,博士,副教授,主要研究方向:计算机图形学、计算机辅助设计。

贾玥,女,1987年生,硕士研究生,主要研究方向:计算机图形学、计算机动画。