

可变形物体间的精确碰撞检测方法研究

张忠辉, 丑武胜

ZHANG Zhong-hui, CHOU Wu-sheng

北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100083

School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China

E-mail: zhangzhonghui006@163.com

ZHANG Zhong-hui, CHOU Wu-sheng. Research on precise collision detection between deformable objects. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(1): 176-178.

Abstract: This paper presents an algorithm of particle-based precise collision detection for deformable object. Firstly, LBG vector quantization is applied for partitioning objects' surface into several areas. Each area is then assigned with a particle. When two objects are approaching each other, get a pair of the closest particles. In order to detect precise collision position, it needs to calculate the minimum distance between the corresponding triangles of the closed particles on neighboring object. If the minimum distance is shorter than some value, then collision between objects occurs in the closest point on the corresponding triangles. The experiments show that the algorithm is suitable for deformable objects collision detection in haptic interaction simulation.

Key words: deformable object; collision detection; particle; triangle mesh; minimum distance

摘要: 针对可变形物体, 提出了一种基于粒子的精确碰撞检测算法。首先用 LBG 矢量量化技术将物体的表面划分成几个小区域, 然后在每个区域中分别选择一个点作为检测粒子。当一个物体接近另一个物体时, 找出两物体上靠得最近的粒子对。为了得到精确的碰撞位置坐标, 进一步计算靠得最近的顶点的相关三角面片之间的最短距离。若此距离小于某个给定的阈值, 则可认为两物体在相关三角面片上的最近点处发生了碰撞。仿真实验验证了该算法能有效处理虚拟力交互仿真中的可变形物体的碰撞检测。

关键词: 可变形物体; 碰撞检测; 粒子; 三角面片; 最短距离

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.01.054 文章编号: 1002-8331(2009)01-0176-03 文献标识码: A 中图分类号: TP391.9

1 前言

碰撞检测是计算机动画、计算机仿真、机器人、虚拟现实等多领域的关键问题之一。快速而准确的碰撞检测对提高与人交互的虚拟环境的真实感至关重要, 尤其对于需要力触觉感知的虚拟环境。在虚拟力建模中, 碰撞检测是虚拟力计算的关键, 碰撞检测的结果是计算虚拟力的根据, 也是虚拟环境中物体操作和路径规划的基础。在虚拟力交互仿真中, 碰撞检测往往是系统计算效率的瓶颈^[1]。

目前对刚体之间的碰撞检测算法的研究已趋向成熟, 但对可变形物体碰撞检测的算法研究较少, 尤其是对准确性和对实时性的考虑。对于可变形物体的碰撞检测主要有如下几种主要算法, 即层次包围盒, 空间分割, 随机方法, 距离场, 图像空间方法。包围盒的种类有这样几类: 沿坐标轴的包围盒 AABB (Axis-Aligned Bounding Box)、包围球 (Sphere)、沿任意方向包围 OBB (Oriented Bounding Box)、固定方向包围 FDH (Fixed Directions Hulls)。OBB 是比较常用的一种类型, 但 OBB 树的更新太慢, 不适合用于包含可变形物体的复杂环境中。在可变形对象环境中, FDH 的使用最为常见, 但变形后包围盒层次的调整更新仍是碰撞检测的瓶颈, 如何提高 FDH 树的更新速度

仍有待进一步研究^[2]。当对象较少且均匀分布于空间时, 空间分割方法效率较高; 当对象较多且距离很近时, 需进行单元格的进一步递归分割, 并需要大量的单元格相交测试和存储空间, 效率明显降低。空间分割由于存储量大及灵活性不好, 使用不如包围盒层次法广泛^[3]。随机方法虽能获得有意义的接触信息用于处理碰撞, 但不能用于精确的碰撞检测^[4]。距离场方法只能用于在非交互应用中检测碰撞和自身碰撞。由于变形几何体距离场必须在运行时间内更新, 所以相对于交互应用的要求, 距离场方法仍不够快^[5]。图像空间的缺点是方法不能提供准确的碰撞信息, 而这些信息在基于物理特性的仿真环境中用于进一步计算碰撞响应是必需的^[6]。

由于在虚拟力交互仿真中, 碰撞检测的速度要达到 300 Hz 以上才能维持虚拟力的稳定性, 故碰撞检测算法必须简单高效, 不需要更新大量的数据结构, 而且还能提供准确的碰撞信息^[7]。文献[8-9]提出了一种基于粒子的碰撞检测方法。该方法使用分布于物体表面上的粒子作为主要的碰撞“探测器”。在物体发生形变时只需计算粒子间的距离, 得到粒子间的相互作用力, 而并不需更新或重建包围盒层次树。但是, 当两个不同的物体相互靠近时, 粒子在引力的作用下只能在三角面片的顶点之

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60775051); 虚拟现实技术国家重点实验室资助。

作者简介: 张忠辉(1984-), 男, 硕士研究生, 主研领域: 虚拟现实技术; 丑武胜(1969-), 男, 教授, 主研领域: 虚拟现实技术, 机器人遥控操作等。

收稿日期: 2008-06-26 修回日期: 2008-09-08

间移动,故该方法得到的最终碰撞位置只能是在各顶点处,并不能得到精确的碰撞位置。本文对此进行了改进,在检测到碰撞发生在哪个顶点处后,找出该顶点相关的三角面片,再计算其与另一物体的相关三角面片的最短距离及最近点,从而得到精确的碰撞位置。最后通过仿真实验验证了算法的实时性和准确性。

2 算法简述

首先将物体的表面划分成几个小区域,然后在每个区域中分别选择一个点作为检测粒子,粒子只能在他自己的区域中移动。不同物体上的粒子之间会产生吸引力,所以当一物体接近另一个物体时,相应表面上的粒子就会相互靠拢。当粒子不再移动时,找出两物体上靠得最近的粒子对,为了得到精确的碰撞位置坐标,进一步计算靠得最近的顶点的相关三角面片之间的最短距离。若此距离小于某个给定的阈值,则可认为两物体在相关三角面片上的最近点处发生了碰撞。如图1所示。

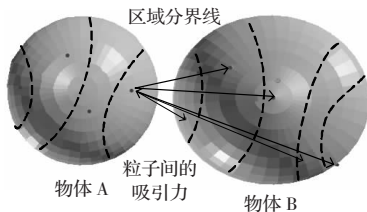


图1 基于粒子的碰撞检测

当物体变形以后,只需重新计算粒子之间的作用力即可。该算法只适用于具有邻近拓扑结构信息的三角面片模型,且在变形时拓扑结构不会改变。对于小变形,碰撞检测时不需再重新划分区域。故该算法非常适用于虚拟力的交互仿真中的碰撞检测。

3 精确碰撞检测

3.1 区域划分

用LBG矢量量化技术对模型的顶点进行分组。邻近的顶点应该属于同一组(区域),且划分的区域数至少应该为模型凸出数的两倍,这样有利于粒子的移动和更有效的检测。

矢量量化是一种数据压缩技术,他能有效地应用矢量中各分量之间的相互关联性来对矢量进行分类,从而达到区域划分的目的^[10]。矢量量化把全部的 K 维输入矢量 X 根据最小失真原则映射为若干个 K 维的量化矢量 Y 。用LBG算法^[11]设计仅含4个码矢的码书,再对设计好的4个码矢乘以扰乱系数进一步扩大码数。经过循环,即可得到所要求的含 N 个码矢的初始码书,最后用LBG算法迭代,即可将所有的输入矢量分成 N 组。

LBG算法主要由最佳划分和最佳码矢两部分组成。

最佳划分:先给定某个码书,寻找源矢量的最佳划分,使平均失真最小。平均失真是所有输入矢量到码书的距离的平均值。

最佳码矢:在给定划分条件下,寻找最佳码书,使平均失真最小。

(1)给定初始码书 $C_2^{(0)} = \{y_0^{(0)}, y_1^{(0)}, \dots, y_{N-1}^{(0)}\}$,令迭代次数 $n=0$,给定相对误差门限 $\varepsilon(0 < \varepsilon < 1)$ 。

(2)用码书中的各码矢作为质心,根据最佳划分原则把矢量集 X 划分成 N 组,其中 $R^{(n)} = \{R_0^{(n)}, R_1^{(n)}, \dots, R_{N-1}^{(n)}\}$ 满足:

$$R_i^{(n)} = \{v | d(v, y_i^{(n)}) = \min_{0 \leq j \leq N-1} d(v, y_j^{(n)}), v \in X\}$$

(3)计算平均失真

$$D^{(n)} = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} \min_{0 \leq j \leq N-1} d(x_i, y_j^{(n)})$$

判断相对误差是否满足

$$\left| \frac{D^{(n-1)} - D^{(n)}}{D^{(n)}} \right| \leq \varepsilon$$

若满足,则停止算法,矢量被分成了 N 组。若不满足,则转步骤(4)。

(4)根据最佳码书条件,计算各区域的质心

$$y_i^{(n+1)} = \frac{1}{\|R_i^{(n)}\|} \sum_{v \in R_i^{(n)}} v$$

由这 N 个新质心 $y_i^{(n+1)}, i=0, 1, \dots, N-1$ 形成新码书 $C^{(n+1)}$,置 $n=n+1$,转步骤(2)进行循环迭代。

3.2 移动粒子

划分好表面区域以后,在每个区域内放置一个粒子,粒子只能位于自己区域内的顶点上。碰撞检测时,先计算出各粒子之间的距离,然后再计算出不同物体上的粒子之间的吸引力,以及粒子所在位置的邻近顶点受到的其他物体上的粒子的吸引力,并将粒子移动到受到最大吸引力的那个顶点上去^[8]。当粒子移动到最有可能发生碰撞的顶点上时,便会停止移动。

3.3 精确位置检测

当粒子不再移动时,找出两物体上靠得最近的粒子对,为了得到精确的碰撞位置坐标,故需计算靠得最近的顶点的相关三角面片之间的最短距离。若此距离小于某个给定的阈值 μ ,则可认为发生碰撞。

空间两点 $P_1=(x_1, y_1, z_1)$ 和 $P_2=(x_2, y_2, z_2)$ 之间的欧拉距离为:

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}$$

空间中两三角形的最短距离求法:设空间中有两个三角形 ABC 和 DEF ,先分别求下列6个距离:

- (1)线段 AB 到三角形 DEF 的最短距离;
- (2)线段 BC 到三角形 DEF 的最短距离;
- (3)线段 CA 到三角形 DEF 的最短距离;
- (4)线段 DE 到三角形 ABC 的最短距离;
- (5)线段 EF 到三角形 ABC 的最短距离;
- (6)线段 FD 到三角形 ABC 的最短距离。

这6个距离中的最小值,就是三角形 ABC 到三角形 DEF 的最短距离。

空间中一条线段到空间中一个三角形的最短距离求法:设空间中有一条线段 PQ 和一个三角形 ABC 。分别求出下列5个距离:

- (1)线段 PQ 到线段 AB 的最短距离;
- (2)线段 PQ 到线段 BC 的最短距离;
- (3)线段 PQ 到线段 CA 的最短距离;
- (4) P 点到三角形 ABC 的最短距离;
- (5) Q 点到三角形 ABC 的最短距离。

然后比较这5个距离的大小,其中最小的一个,就是线段 PQ 到三角形 ABC 的最短距离。

空间中两条线段之间的最短距离求法:假设两条直线的参数形式方程为:

$$L_0(s) = P_0 + s d_0$$

$$L_1(t) = P_1 + t \mathbf{d}_1$$

设 $C_0 = P_0 + t \mathbf{d}_0$ 和 $C_1 = P_1 + t \mathbf{d}_1$ 为两直线上的最近点, 他们之间的距离即为最短距离。设 $\mathbf{v} = C_0 - C_1$, \mathbf{v} 同时垂直于 L_0 和 L_1 。

$$\|\mathbf{v}\| = ((P_0 - P_1) + (s \mathbf{d}_0 - t \mathbf{d}_1)) \cdot ((P_0 - P_1) + (s \mathbf{d}_0 - t \mathbf{d}_1))$$

这是一个关于 s 和 t 的二次函数。对于求线段/线段之间的距离的情形, 可将定义域限制在 $[0, 1] \times [0, 1]$ 内。首先计算线段所在的无限直线上的最近点, 即 s_c 和 t_c 。如果这两个值都在线段的参数 s 和 t 的定义域内, 那么就已得到两线段之间的最短距离。由于定义域由 4 条边所包围, 如果 s_c 和 t_c 中有一个位于该区域之外, 那么就必须在定义域的边界边上寻找最接近于点 (s_c, t_c) 的点。该参数最近点对应的直线上的点即为两线段的最短点, 最终可得到两线段之间的最短距离^[12]。

空间中一个点到空间中一个三角形的最短距离求法: 通过空间点向三角形所在平面做垂线, 再将该垂线的参数形式方程和平面方程联立求解, 就可以求得垂足。接下来再判断垂足是否落在三角形的三边围成的闭区域内。若垂足落在三角的三边围成的闭区域内, 空间点到三角形的最短距离, 就是空间点到三角形所在平面的垂直距离。若垂足不落在三角形 ABC 三边围成的闭区域内。这时, 分别求空间点到三角形的三条线段的最短距离, 然后比较这 3 个距离的大小, 其中最小的一个, 就是空间点到三角形最短距离^[13]。

4 仿真实验

为了验证基于粒子的可变形物体的精确碰撞检测算法, 本文进行了实验。实验的硬件配置: 采用 P4 2.4 G CPU、512 M 内存、ELSA GLADIAC FX 7362E 图形显示卡的计算机进行虚拟示教环境的搭建, 采用 PHANTOM desktop 作为力觉交互设备, 软件环境采用 Visual C++6.0、OpenGL 和 GHOST SDK^[14] 结合开发的力觉伺服仿真环境。如图 2 所示, 检测两个球体的精确碰撞位置, 物体表面上的点即为用于检测碰撞的粒子, 黑色线段为两物体的最短距离。图 3 为居中的那个球体变形后, 运用该算法后仍能实时检测出两物体是否碰撞。

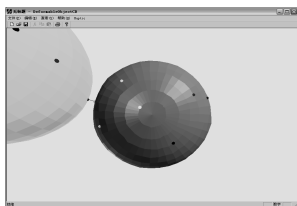


图2 物体变形前的碰撞检测

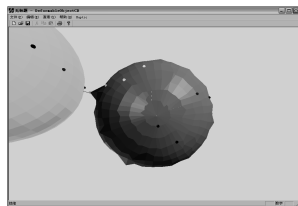


图3 物体变形后的碰撞检测

算法的时间复杂度主要取决于区域划分和碰撞检测所花费的时间。对每个物体表面进行区域划分的时间复杂度为 $O(kMN)$, 其中 k 、 M 和 N 分别为迭代的次数、顶点数和粒子数。然而此过程属于预处理过程, 在每次物体变形时并不需要重新划分区域, 故算法主要取决于精确碰撞检测所耗费的时间。

在算法中碰撞检测的时间复杂度是 $O(N^2)$, 在计算精确碰撞位置时, 相关三角面片之间的最短距离计算的时间复杂度是 $O(RS)$, 其中 R 、 S 分别为两物体上的碰撞顶点的相邻三角面片数。从中可以看出, 碰撞检测的复杂度与物体的三角面片总数无关, 而只与比三角面片总数小很多的粒子数有关, 故算法非常适用于拥有大量三角面片的模型快速碰撞检测。图 4 显示了具有不同数量级三角面片数的模型的碰撞检测所耗费的时间。

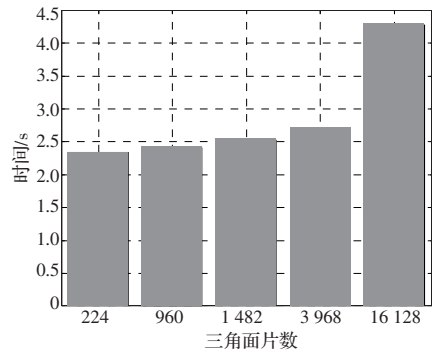


图4 不同三角面片数的模型碰撞检测所耗费的时间

5 结论

提出了一种基于粒子的精确碰撞检测算法。该算法不仅适用于刚体, 而且由于不需要像层次包围盒方法那样在物体每次变形后更新层次包围盒, 故该算法适合于对可变形物体的碰撞检测。在用粒子快速检测到大致碰撞位置后, 还运用了计算几何相关算法对三角面片之间的最短距离及其精确的最近点进行了检测和计算, 为下一步的虚拟力计算打下了基础。经实验证明, 该方法检测碰撞位置具有高效性和精确性, 适合于虚拟力交互仿真中的碰撞检测。

参考文献:

- [1] 陈学文. 力觉交互仿真相关技术的研究与实现[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2005.
- [2] 梁小红, 刘少强. 虚拟环境中的软体碰撞检测技术综述[J]. 计算机与数字工程, 2007, 35(3): 24-28.
- [3] 李焱, 卢晓军, 贺汉根. USSCD: 一个基于均匀空间分割的快速碰撞检测算法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(12): 1444-1449.
- [4] Lnm C, Canny J F. Efficient Collision Detection for Animation[C]// Proc 3rd Euro-graphics Workshop on Animation and Simulation Cambridge, 1992.
- [5] Fuhrmann A, Sobottka G, Grob C. Distance fields for rapid collision detection in physically based modeling[C]// Proceedings of GraphiCon, Moscow, 2003: 58-65.
- [6] 范昭炜, 万华根, 高曙明. 基于图像的快速碰撞检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2002, 14(9): 805-810.
- [7] 王党校, 张玉茹, 王玉慧, 等. 实时力觉交互中的虚拟力计算及渲染方法[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(7): 1494-1498.
- [8] Senin M, Kojekine N, Savchenko V, et al. Particle-based collision detection[C]// EUROGRAPHICS, 2003.
- [9] Saenghaengtham N, Kanongchaiyos P. A Collision Detection Algorithm Using Particles Sensor[C]// IEEE, 2006.
- [10] 孙圣和, 陆哲明. 矢量量化技术及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002: 211-230.
- [11] Linde Y, Buzo A, Gray R M. An algorithm for vector quantizer design[J]. IEEE Transactions on Communications, 1980, 28(1): 84-95.
- [12] Sunday D. Distance between lines, segments, and the closest point of approach[EB/OL]. <http://www.softurfer.com>.
- [13] Schneider P J, Eberly D H. 计算机图形学几何工具算法详解[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005: 297-310.
- [14] GHOST SDK Programmer's guide version 4.0[Z]. SensAble Technologies, Inc. 2002.