

# 采用胶囊体进行三维城市模型的实时碰撞检测

许伟平<sup>1</sup> 朱庆<sup>1</sup> 张叶廷<sup>1</sup>

(1 武汉大学测绘遥感信息工程国家重点实验室,武汉市珞喻路129号,430079)

**摘要:**针对复杂三维城市模型动态可视化中实时碰撞检测的可靠性和高性能需求,充分顾及离散检测与连续检测的特点,建立了视点运动空间的胶囊体模型,并定义了其描述参数,提出了基于该模型进行实时碰撞检测的两步检测算法。其中,预检测用来提高计算效率,而精检测则有力地保证了检测的准确性。利用典型的虚拟建筑环境进行实验,证明了该算法的有效性。

**关键词:**碰撞检测;三维城市模型;胶囊体

**中图分类号:**P208

为了增强三维场景的逼真度和用户交互的沉浸感,碰撞检测与响应已成为虚拟环境中一个重要的组成部分。在虚拟城市环境中,观察者的行为往往比在现实世界中具有更大的自由度,不局限于特定的道路,可以自由穿行和飞越<sup>[1]</sup>。当然,在一个建筑物、植被以及各种设施密集的三维城市环境中,各种交互漫游一般都应遵循自然的约束,其中及时准确地检测出视线前方的障碍物是碰撞检测研究的基本问题,它可以避免用户在漫游时遭遇“穿墙而过”的现象,使用户以更自然的方式与城市环境中的对象进行交互。因此,本文所研究的碰撞主要发生在动态的观察视点与静态的场景对象之间。

碰撞检测一般分为静态干涉检测和动态碰撞检测<sup>[2]</sup>,其中,动态碰撞检测算法又可以分为离散碰撞检测算法和连续碰撞检测算法<sup>[2-4]</sup>。目前,关于离散碰撞检测研究的重点就是降低其算法的复杂度,常见的策略有层次包围盒法、空间分割法、动态距离跟踪算法等<sup>[5]</sup>。针对单步检测中由固定时间步长导致的碰撞遗漏现象而自适应步长技术和预测技术效率不高的情况<sup>[6]</sup>,本文结合离散和连续碰撞检测算法,基于视点球单步在空间移动所形成的精确扫描体模型——胶囊体,在保证检测精确性的基础上,利用包围盒技术设计了两步检测法来提高复杂场景中的检测效率。

## 1 视点运动空间的胶囊体模型

在基于时间采样的三维城市交互漫游中,若把视点简化为一个球体,把城市中具体对象的几何模型剖分为三角形,那么每一时间步内的静态干涉检测就是视点球与三角形的相交测试<sup>[7]</sup>。由于漫游时,视点的移动速度是可变的,因此,如果采用上述方法,当速度很大时,就有可能出现在某一时间步内视点球穿过了三角形而未检测到的情况,即“穿透”现象(见图1)。为了避免这种情况的发生,本文采用连续碰撞检测算法中的扫描体技术来提高检测的精确度,这时的静态干涉检测将是视点球在该时间步内运动所形成的扫描体与三角形的相交测试。

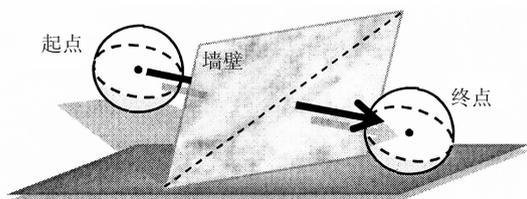


图1 视点球单步移动中发生的穿透现象  
Fig. 1 Crossing Phenomenon in One-step Movement of the Viewpoint Sphere

视点球在每一时间步的运动路径可以近似看成是一条线段,起点位置和终点位置也是已知的,满足了连续碰撞检测算法的要求。显然,视点球沿线段在空间移动形成的扫描体是一个形似胶囊的几何体,简称胶囊体。描述胶囊体需要三个参数:视点起始位置  $P$ 、视点终止位置  $Q$  和半径  $r$ ,如图 2 所示。其中,  $r$  体现了视点与几何模型所能接近的最短距离,根据人类视觉原理,穿行漫游一般可取视线高度为最近的视距,如  $1\sim 2$  m。当视点与某几何模型之间的动态距离小于  $r$  时,就会发生碰撞。

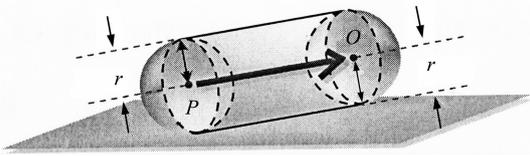


图 2 胶囊体描述参数的说明

Fig. 2 Illustration of Capsule's Description Parameters

## 2 基于胶囊体模型的两步碰撞检测算法

基于胶囊体模型的两步碰撞检测算法流程图 3 所示。

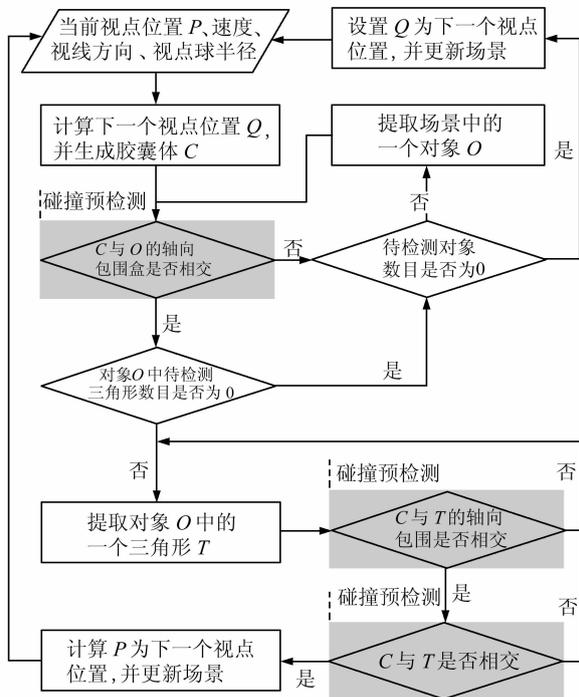


图 3 基于胶囊体的两步检测算法流程

Fig. 3 Flow Chart of the Two-step Detection Algorithm Based on Capsule

在每一时间步开始前,首先根据当前视点的相关参数预先计算出按照当前速度和视线方向行进到时间步结束时的视点位置  $Q$ ,然后根据用户设置的视点球半径  $r$  得到胶囊体  $C$ 。在经过基于  $C$  的预检测和精检测之后,若检测到会有碰撞发生,则仍把  $P$  设置为时间步结束时的视点位置,即当前视点位置在该时间步内保持不动,避免了视点穿越障碍物;若没有检测到碰撞发生,则移动视点到预先计算出的位置  $Q$ ,然后更新场景。

### 2.1 碰撞预检测

复杂三维城市模型中的对象数量多,且分布不均匀,但在某一时间步内能与胶囊体  $C$  发生碰撞的对象却并不多。因此,预检测对于提高检测效率极为关键。为了尽快排除不相交的对象,首先对胶囊体  $C$  和对象  $O$  的轴向包围盒 (axis-aligned bounding box, AABB) 进行相交测试。轴向包围盒被定义为包含该对象且边平行于坐标轴的最小六面体<sup>[8]</sup>,它包含 6 个参数,即 XYZ 方向的最大值和最小值。因此,它们之间的相交测试最多只需要 6 次比较运算,简单易行。

一般在三维城市环境中,所有对象的 AABB 是已知的。而  $C$  的 AABB 求法如下:先求出  $P$ 、 $Q$  两处视点球的轴向包围盒  $B_1$  与  $B_2$ ,比较  $B_1$  与  $B_2$ ,分别求出 3 个坐标轴方向的最大、最小值即可。

若  $C$  和  $O$  的轴向包围盒相交,还不能确定  $C$  是否与  $O$  本身相交,需要进一步测试。此时将对象进行三角形拆分,执行三角形  $T$  与  $C$  的相交测试。在一个复杂对象中,三角形的数目是大量的,而在某一时间步内与  $C$  发生碰撞的三角形却不多,因此,同样利用  $T$  和  $C$  的 AABB 相交测试来提高检测效率。 $T$  的 AABB 可以通过比较  $T$  三个顶点的坐标值大小来确定包围盒的 6 个参数。

### 2.2 碰撞精检测

由于直接进行胶囊体  $C$  与三角形  $T$  的相交测试很困难,因此,本文选择将  $C$  拆分为 3 个部分:位于  $C$  中间的,轴线为  $PQ$ 、底面半径为  $r$  的圆柱体;位于  $C$  两端的,球心分别为  $P$  与  $Q$ 、半径都为  $r$  的两个半球体。只要  $T$  与其中任意一部分相交,则必与  $C$  相交。

#### 2.2.1 圆柱体 $Y$ 与三角形 $T$ 的相交检测

文献[9]详细阐述了  $Y$  与  $T$  相交测试的算法,它应用了  $T$  与任意简单几何体  $V$  进行相交检测的一种基础算法。本文对该算法进行了相关改进:① 在边界检测之前加入了点检测,即检测边界端点(即  $T$  的三个顶点)是否在  $Y$  内。它作为边界检测的预检测,有效地提高了检测效率。同时,它提

前排除了边界检测中“边界端点都在Y内,而T与V被视为不相交”的特殊情况。如图4(a)所示,若能判断 $\triangle ABC$ 中的点B或C在圆柱体内,则无需进行边界检测,可以直接判定T与Y相交。②在固定边穿透检测之前加入了轴线穿透检测,即判断轴线是否穿过T。它作为固定边穿透检测的预检测,提高了检测效率。另外,它提前排除了固定边穿透检测中“T所在平面的法向量与PQ平行”的特殊情况。如图4(c)所示,若能判断轴线PQ穿过了 $\triangle ABC$ ,则无需进行固定边穿透检测,可以直接判定T与Y相交。

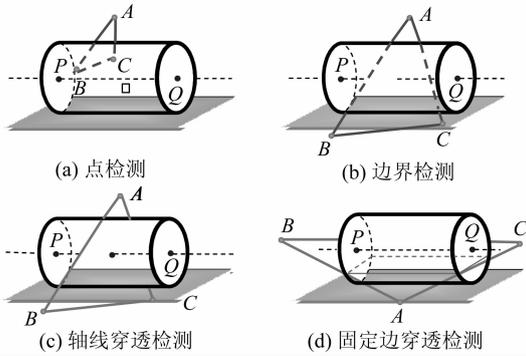


图4 圆柱体与三角形的相交检测过程  
Fig. 4 Procedure of the Cylinder/Triangle Intersection Test

### 2.2.2 球体S与三角形T的相交检测

S与T的相交测试,其几何本质是比较球心C到T的最短距离d与半径r的大小<sup>[10]</sup>。若 $d > r$ ,则S与T不相交;反之相交。因此,计算d是S与T相交测试的关键。设球心C在T所在平面上的投影为 $C'$ ,显然,若 $C'$ 在T内,则 $d = |CC'|$ ;若 $C'$ 不在T内,需要在T内寻找另外一点F,使得 $|CF|$ 最短。下面用反证法证明F肯定位于T的三边上,而不会位于T内部。

如图5所示, $C'$ 不在T内,假设F位于T内,则线段 $C'F$ 必然与T有一个交点 $F'$ 。显然,

$|CF| > |CF'|$ ,即F不是T内距离C最近的点,与假设矛盾,反证完毕。因此,只需要求出C到T每条边的最短距离 $d_1, d_2, d_3$ ,就能得到 $d = \min(d_1, d_2, d_3)$ 。

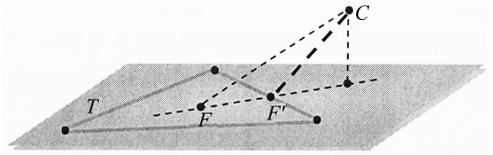


图5 利用反证法证明点F位于三角形边上  
Fig. 1 To Prove the Point F is on the Edges of Triangle by Contradiction

## 3 实验结果

基于虚拟地理环境平台软件VGEIS 6.0实现了两步检测算法,并分别以典型的科技园区现代建筑环境和寺庙古建筑环境作为三维场景,验证了该算法的有效性,如图6所示。



(a) 科技园区环境中与路灯的碰撞检测(半径 $r=1.0$  m) (b) 寺庙环境中与屋顶的碰撞检测(半径 $r=2.0$  m)

图6 不同场景中的碰撞检测效果  
Fig. 6 Results of the Collision Detection in Different Scenes

本文方法由于提高了碰撞检测的精确性,从而能有效地避免复杂场景中的“穿透现象”。如图7所示,若利用传统视点球进行碰撞检测,视点在对待检测墙壁运动的过程中,将在第四时间步内发生穿透,严重影响场景的真实感。而本文的算法则保证了视点会在第三时间步后停止运动。

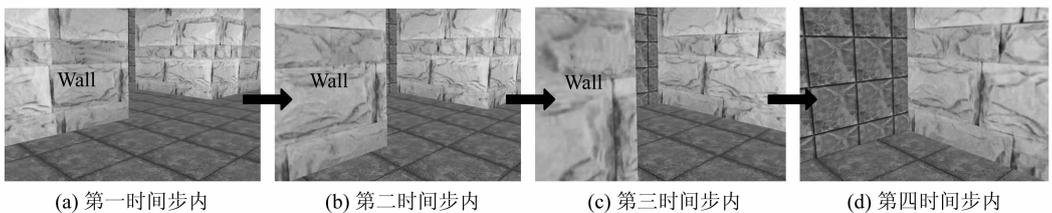


图7 不同时间步内利用传统视点球进行检测的效果

Fig. 7 Results of the Detection by the Traditional Viewpoint Sphere in Different Time Steps

如表1所示,本文算法采用胶囊体模型进行精确的碰撞检测,与传统简约的视点球算法相比,

其效率和漫游时能够达到的帧率仍能保证漫游的流畅性。

表 1 与视点球检测算法的效率对比及不同漫游条件下帧率的对比

Tab. 1 Comparison of Efficiency with the Detection Algorithm by the Viewpoint Sphere and Frames Per Second Among Different Roaming Conditions

场景名	检测目标	总三角形数量/个		检测到目标的时间/s		漫游帧率/ $f \cdot s^{-1}$		
		场景	目标	利用视点球	利用胶囊体	不进行碰撞检测	采用视点球检测	采用胶囊体检测
科技园区	路灯	172 795	1 680	0.000 5	0.000 8	30	28	25
寺庙环境	复杂古建筑	1 500 052	30 819	0.016 0	0.020 0	26	25	22

## 4 结 语

本文针对大规模三维城市环境动态可视化中对碰撞检测的实时性需求,充分顾及离散检测与连续检测的特点,建立了视点移动空间的胶囊体模型,并优化改进了两步检测算法,保证了检测的精确性和有效性。下一步工作将深入研究碰撞后的响应机制,力求最大程度上增强三维场景的逼真度和用户交互的沉浸感。

### 参 考 文 献

- [1] 石教英. 虚拟现实基础及实用算法[M]. 北京:科学出版社,2002
- [2] 邹益胜,丁国富,许明恒,等. 实时碰撞检测算法综述[J]. 计算机应用研究,2008,25(1):8-9
- [3] 王志强,洪嘉振,杨辉. 碰撞检测问题研究综述[J]. 软件学报,1999,10(5):545-551
- [4] Cameron S. Collision Detection by Four Dimensional Intersection Testing[J]. IEEE Transactions on

- Robotics and Automation, 1990, 6(3): 291-302
- [5] 高春晓,刘玉树. 碰撞检测技术综述[J]. 计算机工程与应用,2002,38(5):9-11
- [6] 黄通浪,唐敏,董金祥. 一种快速精确的连续碰撞检测算法[J]. 浙江大学学报(工学版),2006,40(6):1 051-1 052
- [7] 刘惠义,邱云,张春红. 虚拟视景交互漫游系统的实时碰撞检测方法研究[J]. 河海大学学报,2005,33(3):339-341
- [8] 周云波,闫清东,李宏才. 虚拟环境中碰撞检测算法分析[J]. 系统仿真学报,2006,18(1):103-104
- [9] ERIT. A Collection of Efficient and Reliable Intersection Tests[J]. Journal of Graphics Tools,1997,2(4):25-44
- [10] Nettle P. Generic Collision Detection for Games Using Ellipsoids [OL]. <http://www.fluidstudios.com/publications.html>,2000

第一作者简介:许伟平,硕士生,主要研究方向为虚拟地理环境。  
E-mail: xuweipin123456@163.com

## Real-Time Collision Detection Algorithm Using Capsule to Model 3D City

XU Weiping<sup>1</sup> ZHU Qing<sup>1</sup> ZHANG Yeting<sup>1</sup>

(1 State Key Laboratory of Information Engineering in Surveying, Mapping and Remote Sensing, Wuhan University, 129 Luoyu Road, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** To achieve high reliability and performance of real-time collision detection in dynamic visualization of complicated 3D city models, the capsule primitive is defined to model the viewpoint's moving 3D space, and a two-step collision detection algorithm based on the capsule is proposed. This algorithm concerns with both the advantages of discrete and continuous detections, in which the first step of pre-detection significantly increases the computational efficiency, while the second step of intensive detection potently ensures the detection precision. The experimental result shows that the proposed algorithm is effective.

**Key words:** collision detection; 3D city models; capsule