

摘要: 碰撞检测是图形学、仿真、人工智能、虚拟现实和动画领域中的一个重要技术难点和计算资源消耗点, 行业对碰撞检测算法已经进行了比较深入的研究。本文着重介绍碰撞检测算法的总体分类和相对应的适用场景, 重点从虚拟现实技术应用的角度分析了常用的基于图形的实时碰撞检测算法, 对层次包围盒法和空间分割法的优劣进行了比较。最后总结提出了算法研究中存在的问题以及未来的发展方向。

关键词: 虚拟现实; 碰撞检测; 层次包围盒; AABB; OBB

0 引言

碰撞检测用于判断一对或多个模型在特定三维区域内的同一时间是否占有相同区域。它是虚拟现实、动画、计算机仿真等领域不可回避的问题之一。在虚拟现实研究中, 角色与障碍物、角色与角色、障碍物与障碍物之间的碰撞检测是运动规划和碰撞后效果展现的基础, 模型必须能够对碰撞检测的结果如实做出合理地响应, 即做出碰撞后效果, 否则模型间就会产生穿透现象, 影响虚拟场景的真实性。总体上讲, 进行碰撞检测的目的主要有三个: 检测模型之间是否会发生碰撞; 确定发生或即将发生碰撞的位置; 动态地查询模型间距离。本文将对碰撞检测算法总体分类进行阐述, 着重介绍虚拟现实技术中最常用的基于图形的实时碰撞检测算法。

1 碰撞检测算法分类

从计算机图形学提出后, 研究人员在碰撞检测领域做了很多有意义的工作, 提出了一系列成熟的检测算法, 并开发了相应的软件工具。根据应用领域的不同,碰撞检测需求也不尽相同, 由此提出了多种类型的碰撞检测算法。总体上可以将算法分为两大类: 1) 静态干涉检测算法。主要用于检测静止状态下各模型之间是否发生干涉的算法, 如机械零件装配过程中的干涉检查等。这类算法对实时性要求不高, 但对精度要求非常高。2) 动态碰撞检测算法。主要检测虚拟现实场景中模型随着时间变化, 在给定空间是否与其他模型发生碰撞的情况, 如子弹与地面的碰撞, 汽车与树的碰撞等。动态碰撞检测算法又可分为离散碰撞检测算法和连续碰撞检测算法。

从本质上说, 离散碰撞检测算法的每一离散时间点上采用通过类似静态干涉检测算法的方法来实现, 但它注重算法效率, 如果空间中存在大量独立存在的模型,将对计算机本身造成很大的资源负担。由于此算法基于离散数据进行计算, 所以此类算法自身也存在一些问题, 如检测中的穿刺现象和遗漏情况等。但由于检测过程的实时性是虚拟现实技术应用的基本需求, 因此离散碰撞检测算法仍是碰撞检测算法研究的重点和热点。此外, 通过自适应步长技术^[1]可以在一定程度减少离散检测算法的不足。为了克服离散碰撞检测算法的不足, 连续碰撞检测算法对模型的运动过程进行建模, 构造出一条连续的运动路径, 再基于该路径判断模型之间的碰撞情况。文献^[2]提出了采用任意间隔的运动插值技术来规划模型的运动。通过用户界面或动态模拟器确定模型运动过程中的几个位置, 再在几个位置之间做运动插值, 把模型复杂的运动过程简化为一系列简单的刚性运动。但此类算法一般涉及到四维时空问题或结构空间精确地建模, 通常计算速度较慢, 还需要做进一步地研究才能适用于大规模场景中的实施碰撞检测。

目前, 大部分实时性好的碰撞检测算法都属于离散碰撞检测算法。纵观这些算法, 大致可分为基于图形和基于图像的算法两类。前者对模型三维结构进行求交运算, 后者对模型二维投影的图像及深度信息进行求交运算。基于图形的碰撞检测算法上, 研究人员已经做了大量的工作, 构建了层次包围盒算法和空间分割算法等成熟算法。基于图像的算法优势在于可通过图形硬件(GPU) 来分担 CPU 的压力, 特别是近几年图形硬件技术的飞速发展, 图形硬件在性能不断提高的同时还具备了可编程的功能, 使得基于图像的碰撞检测算法进入了一个新的发展阶段^[3]。

就虚拟现实系统而言, 根据系统设计目标的不同,大体可以划分为两类, 一类是面向产品性能仿真验证, 从产品的极端使用条件考虑, 在恶劣条件、 错误操作条件下发现产品设计上的缺陷, 以改进设计方案, 为产品设计提供参考; 另一类是面向行业培训, 这类系统主要用以培训一线人员。由于使用场景不同, 二者对碰撞检测算法的要求差异较大, 前者要求碰撞检测的高精度,后者则更强调系统的实时性。 本文主要对实时性更强的基于图形的离散碰撞检测算法展开分析。

2 实时碰撞检测算法分析

基于图形的实时碰撞检测算法主要分为层次包围盒法和空间分割法两类。这两类算法都使用了层次结构模型, 目标都是减少需要进行相交测试的几何模型数目来提高算法的实时性。由于空间分割法存储量大、 灵活性差, 通常适用于环境中模型分布比较均匀的碰撞检测;层次包围盒法则应用更为广泛, 适用于复杂环境中的碰撞检测。

2.1 层次包围盒法

层次包围盒法是碰撞检测算法中广泛使用的一种方法, 它在计算机图形学多个领域中得到深入的研究。其基本思想是利用体积略大而几何特性简单的包围盒来近似地描述复杂的几何对象, 进而通过构造树状层次结构逼近对象的几何模型, 直到几乎完全获得对象的几何特性, 在对模型进行碰撞检测时, 先对包围盒求交, 由于求包围盒的交比求模型的交简单, 因此可以快速排除许多不相交的模型, 若相交则只需对包围盒重叠的部分进行进一步的相交测试, 从而加速了算法。

假设模型 A 和 B 要进行碰撞检测, 则首先建立他们的包围盒树。包围盒树中, 根节点为每个模型的包围盒, 叶节点则为构成模型的基本几何元素 (如三角面片), 而中间节点则为对应于各级子部分的包围盒。层次包围盒碰撞检测算法的核心就是通过有效的遍历这两棵树, 以确定在当前位置下, 对象 A 的某些部分是否与对象 B 的某些部分发生碰撞。层次包围盒法的核心是如何构造包围盒树及快速地进行碰撞检测。目前比较典型的包围盒类型包括包围球、轴向包围盒 AABB、方向包围盒 OBB 以及离散方向多面体 k - DOPs 等。

包围球^[4]是简单性好紧密性差的一类包围盒, 一个给定对象的包围球被定义为包含该对象的最小球体。计算给定对象的包围球, 首先需分别计算对象基本元素集合中所有元素顶点的 x、y、z 坐标均值以确定包围球的球心, 再由球心与三个最大值坐标所确定的点与点之间的距离计算半径 r。包围球间的相交测试也相对比较简单, 对于两个包围球 (c1, r1) 和 (c2, r2), 如果球心距离小于半径之和, 则两个包围球相交, 否则不相交。

轴向包围盒 AABB^[5]是最早的一类包围盒, 在碰撞检测的研究中使用得最广, 一个模型的 AABB 被定义为包含该对象且边平行于坐标轴的最小正六面体。对于给定的对象, 它的 AABB 仅需六个标量描述, 即组成模型基本集合元素顶点的 x 坐标、y 坐标以及 z 坐标的最大值和最小值。AABB 间的重叠测试比较简单, 两个 AABB 重叠当且仅当他们在三个坐标轴上的投影区间均重叠, 则它们是相交的。

OBB 层次包围盒^[6]是紧密性好、相交测试复杂的一类包围盒。一个给定对象的 OBB 被定义为包含该对象且相对于坐标轴方向任意最小的正六面体。OBB 最大特点在于方向的任意性, 这使得它可以根据被包围对象的形状特点尽可能紧密地包围对象, 但同时也使得它的相交测试变得复杂。OBB 间的相交测试基于分离轴理论, 若两个 OBB 在一条轴线上的投影不重叠, 则这个轴被称为分离轴, 若一对 OBB 见存在一条分离轴, 则可以判定这两个 OBB 不相交, 否则它们是相交的。

由于 AABB 和包围球的紧密性相对差, 而 OBB 的重叠测试和节点修改耗费相对较高, 离散方向多面体 k - DOPs 算法^[7]提出了一种折中方案。K - DOPs 是一种凸多面体, 它的面是由一些平行平面所确定的, 平面的外法向是从空间中 k 个固定方向中选取的, 利用这些平面来包裹模型。由于是采用空间中的固定方向作为包围平面的法向量, k - DOPs 也称为固定方向凸包 FDH。当 k = 6 时, 6 - DOPs 的六个面的法向分别由 3 个坐标轴的正负向确定, 就转化为 AABB 包围盒。当 k 足够大时, k - DOPs 就发展为模型的凸包。当 k 取值越大时, 包围盒与所包围模型的贴近程度越好。因此 k 值的选择要根据碰撞检测的不同需要而定, 在碰撞检测的简单性和包裹模型的紧密性之间平衡。

2.2 空间分割法

空间分割法是将整个虚拟空间划分成等体积的规则单元格, 以此将场景中的模型分割成更小的群组, 并只对占据了同一单元格或相邻单元格的几何对象进行相交测试。一般来说, 空间分割法在每次碰撞检测时都需要确定每个模型占有的空间单元。如果场景中不可动的模型很多, 可以预先划分好空间单元格并确定每个模型占有的空间单元。当有模型运动时, 只需要重新计算运动模型所占有的空间就可以了。

Ganter 和 Isarankura 提出了一种空间分割技术的方法^[8], 这种空间分割技术将包含模型的空间划分为独立的子空间, 将所有的测试限制在两个模型的重叠局部区域来进行, 并在重叠区域内的所有子空间内都按照最小、最大值来排序, 从而进一步减少检测的时间。

空间分割法适合于模型分布较为均匀的场景, 在采用均匀网格分割时空间分割与对象无关, 使得它特别适合变形体对象。变形体对象会在运动中发生形变, 包围盒法需要重新构建或者更新围体树, 重新构建整个数据结构的时间耗费巨大; 而均匀空间分割的关键问题是确定适当的单元格尺寸。适当选择单元格尺寸, 可使算法的计算能保持一定的准确度又不致代价太大。

与包围盒法相比, 空间分割法在计算效率上具有一定优势, 但当场景中的模型密集, 分布不均时, 单元格需要进一步分割, 单元格之间的交测和存储都需要较大空间, 计算效率急剧下降。由于存储量的敏感, 使它的应用领域受到很大限制。

3 结束语

基于图形的碰撞检测算法发展非常成熟, 形成了许多典型的算法, 如层次包围盒法和空间分割法等, 但算法本身受场景复杂度的影响较大。在保证算法精确度高的前提下, 进一步提高算法的实时性一直是研究人员追求的目标。所以算法的研究一方面要优化自身的构造; 另一方面要充分利用如图形硬件 (GPU) 加速处理技术和并行计算方法的优势。目前基于图形硬件加速计算正在开创一个新的时代。国外有一批研究者正在进行该方面的研究, 包含了碰撞检测领域; 国内在这方面的研究尚属起步阶段, 成果较少。

基于图像的碰撞检测算法属于较新的一类算法。但曾经由于受到图形硬件发展的限制, 研究进展相对比较缓慢。随着图形硬件的发展才得以重新进入研究者的视野, 国外有一批研究者正在进行该方面的研究, 包含了碰撞检测领域, 国内在这方面的研究尚属起步阶段, 成果较少。CPU 与 GPU 间的负载平衡问题有待进一步研究, 以提高算法效率。该类算法由于其本身的优势, 特别是随着图形硬件的飞速发展, 具有广阔的研究前景和研究价值。

总之, 碰撞检测技术仍有许多方面需要进一步探讨和研究, 包括复杂模型之间的碰撞、框架与框架之间的空间一致性问题。因此, 需要研究人员不断仔细钻研, 拓宽思路, 设计出更高效的算法, 才能满足虚拟场景中大量复杂模型之间碰撞检测实时性的要求。

参考文献

- [1] DINGLIANA J, O'SULLIVAN C. Graceful degradation of collision handling in physically based animation [J] . ComputerGraphics Forum, 2000, 19 (3): 239-247.
- [2] REDON S, KHEDDAR A, COQUILLART S. CONTACT: arbitrary in - between motions for continuous collision detection [C] // Proceedings of IEEE ROMAN: IEEE, 2001, 106-111.
- [3] COHEN J, LIN M, MANOCHA D, et al. I - COL - LIDE: An interactive and exact collision detection system for large-scale [C] / / Proceedings Symposium onInteractive 3D Graphics. 1995, 189-196.
- [4] LIN M C, GOTTSCHALK S. Collision detection between geometric models: a survey [C] // Proc of IMACConference on Mathematics of Surfaces. 1998: 37-56.
- [5] PALMER I. J, GRIMSDALE R. L. Collision Detectionfor Animation Using Sphere - Trees [J] . ComputerGraphics Forum, 1995. 14 (2): 105-116.
- [6] 马登武, 叶文 . 基于包围盒的碰撞检测算法综述 [J]. 系统仿真学报, 2006. 18 (4) : 1058-1061.
- [7] KLOSOWSKI J. T, HELD M. Held, MITCHELL J. S. B, et al. Efficient Collision Detection Using Bounding Volume Hierarchies of k - DOPS [J] . IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 1998. 4 (1): 21-36.
- [8] GANTER M. A, ISARANKURA B. P. Dynamic Collision Detection Using Space Partitioning [J] . Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 1993. 115 (1): 150-155.