

虚拟装配环境中碰撞检测算法的研究综述与展望

潘仁宇 孙长乐 熊 伟 王海涛

(大连海事大学船舶机电装备研究所 大连 116023)

摘 要 虚拟装配系统可对机电产品进行装配仿真,生成装配顺序与装配轨迹,而碰撞检测技术正是对装配顺序与装配轨迹的正确性进行验证。把虚拟装配环境的碰撞检测算法归类为:基于时间域的碰撞检测算法、基于几何空间的碰撞检测算法、基于图像空间的碰撞检测算法。对这几类算法的研究现状进行了综述,根据研究现状分析了碰撞检测算法中存在的问题及研究难点,并对碰撞检测算法的研究趋势进行了展望。

关键词 虚拟装配,碰撞检测,虚拟现实

中图法分类号 TP391.41 文献标识码 A

Survey and Prospect of Collision Detection Based on Virtual Assembly Environment

PAN Ren-yu SUN Chang-le XIONG Wei WANG Hai-tao

(Institute of Ship and Electromechanical Equipment, Dalian Maritime University, Dalian 116023, China)

Abstract The virtual assembly system can simulate the electromechanical products to generate the assembly sequence and assembly track, and the collision detection technology is used to verify the correctness of assembly sequence and assembly track. The collision detection algorithms in virtual assembly environment mainly include algorithm based on the time, algorithm based on geometric space and algorithm based on image space. A survey on the present situation of these algorithms was proposed. At last, the current problems, future research direction and difficulties of collision detection algorithm were discussed and analyzed based on the survey.

Keywords Virtual assembly, Collision detection, Virtual reality

近年来,虚拟现实技术的兴起给工业发展带来了新的契机,人们将虚拟现实技术应用于机电产品的装配设计,由此诞生了虚拟装配技术。虚拟装配系统对机电产品在设计之后、生产之前进行装配仿真,生成零部件的装配轨迹和装配顺序,对机电产品设计的合理性及可装配性进行验证,降低了产品的生产成本和研发周期,从而提高了产品的竞争力。

在虚拟装配环境中,当两个零部件发生触碰并按照约束条件进行装配时,应当满足现实世界中的物理法则,即两个零部件不能发生相互穿透或共享同一区域。要满足上述要求,虚拟装配环境必须能实时、精确地判断零部件之间是否发生碰撞。

碰撞检测在 3D 游戏、机器人路径规划等众多领域都有着重要的应用,鉴于人眼识别画面帧的速度慢于计算机刷新的速率,在游戏、路径规划中的碰撞检测对实时性的要求要高于对准确性的要求,而虚拟装配系统需要在执行装配仿真过程中对零部件间是否发生干涉做出精确实时的判断与响应,因此虚拟装配系统对碰撞检测的实时性和精确性都有着严格的要求。

1 基于虚拟装配的碰撞检测问题描述

虚拟装配环境中的碰撞检测问题可以如此描述:碰撞检

测功能的输入包含两种对象:1)静态的环境对象,可以是待装配的零部件、已装配的零部件;2)动态对象,即要进行装配的零部件。环境对象在虚拟装配环境中的位姿不发生变化,而动态对象可以在虚拟装配环境中自由运动,其位姿受用户的输入设备控制。碰撞检测功能的输出为当动态对象向静态的环境对象运动并进行装配的过程中是否与静态的环境对象发生碰撞,如果发生碰撞,确定其碰撞对象、在何时碰撞、何处碰撞。

随着虚拟装配环境中对象数量和复杂度的增加,执行碰撞检测的难度也大大提高,同时用户又要求与虚拟环境进行实时、精确地交互,因此虚拟装配环境对碰撞检测算法提出了更为严苛的要求。

2 碰撞检测算法的研究现状

碰撞检测算法可以分为基于时间域和空间域两类主流算法。

2.1 基于时间域的碰撞检测算法

碰撞检测算法从时间域上可分为静态、离散和连续的碰撞检测算法。静态的碰撞检测算法的目标是在某一时间点或物体不发生运动的情况下检测对象之间是否发生碰撞,这类

本文受国家自然科学基金资助项目(51305052),中央高校基本科研业务费专项资金(3132016064,3132016353)资助。

潘仁宇(1991—),男,硕士生,主要研究方向为虚拟装配,E-mail:panrenyusmile@163.com;孙长乐(1978—),男,博士,讲师,主要研究方向为CAD模型重用、虚拟装配、协同设计技术;熊伟(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为机械电子、虚拟装配;王海涛(1973—),男,博士,副教授,主要研究方向为气动技术、虚拟装配。

算法对碰撞检测的实时性要求较低,但对精确性的要求较为严格,从而其计算复杂度较高。

随着研究的不断深入,能处理运动模型的碰撞检测算法成为各国学者研究的焦点。离散碰撞检测算法应运而生,此类算法在时间轴的每个离散点 t_0, t_1, \dots, t_n 上不断地对场景中所有物体进行检测以判断是否发生碰撞。Larsen 等利用一种基于扫掠球的离散碰撞检测算法^[1],通过对扫掠球之间距离的判断来获得对象之间的碰撞信息。Rober 等针对柔性体之间的干涉问题提出了一种离散的代数方法^[2],该算法可以实现穿透深度的计算和自交检测,且检测精度较高。从整个时间轴上来看,虽然离散的碰撞检测算法在每一时间离散点通过类似于静态碰撞检测算法的方法来实现干涉检查,但其更注重算法的效率,同时算法时间的离散性可能导致离散时间点内发生的碰撞不能被检测或已经产生了穿透现象。

为了解决离散碰撞检测算法存在的问题,连续碰撞检测算法成为研究的热点。连续碰撞检测算法一般涉及四维时空及精确结构建模问题。Redon 等提出了连续的碰撞检测算法^[34],该算法在一定程度上解决了因时间离散化而产生的漏检问题,但其较高的计算复杂度在执行碰撞检测时会增加计算机的内存,计算速度较慢,尤其是在大规模场景中无法进行实时的碰撞检测,需要对该算法的计算复杂度及精度进行进一步的改进,才能应用于复杂场景中的碰撞检测。

基于时间域的碰撞检测算法由于其计算的精度有限,因此无法处理拟装配环境中精确的干涉问题。由于此类碰撞检测算法的实时性要优于精确性,其在某些领域仍具有较高的研究价值,目前应用于游戏、场景漫游等环境中的碰撞检测。

2.2 基于空间域的碰撞检测算法

基于空间域的碰撞检测算法可分为基于几何空间和基于图像空间的碰撞检测算法两大类。从 20 世纪 90 年代至今,随着计算机图形学和计算机硬件的高速发展,对这两类算法的研究进入了一个新的阶段。

2.2.1 基于几何空间的碰撞检测算法

基于几何空间的碰撞检测算法可以分为以下几类:

1) Tang 等提出了一种把扫掠算法和裁剪算法相结合的碰撞检测算法^[5],很好地解决了刚性体和易变形体之间的碰撞检测问题,其精度高于基于时间域的碰撞检测算法。Corrales 等提出了一种基于包围球扫掠体的碰撞检测算法并将其应用于机器人安全运行路径规划中^[6],该方法用机器人骨架以及包围球扫掠体来表达机器人模型,简化了机器人的表达结构;并利用动态包围体算法对机器人的最小运动距离进行了计算。

2) 沈学利等提出了基于包围盒和空间分割的混合碰撞检测算法^[7],该算法从全局上提高了算法的执行速度,但在处理不同复杂度场景中的碰撞问题时很难保证一致的效率。

3) Xing 等把 AABB 和排序算法相结合^[8],相比于二进制网格树,排序算法和 AABB 树有效地减少了碰撞检测的时间,而且该算法能实现自交的检测。Chang 等提出了将包围球与 OBB 层次包围体树相结合的碰撞检测算法^[9],该算法利用分离轴解决了包围球发生碰撞时其内部的 OBB 没有发生实际碰撞的问题,有效避免了漏检现象的发生,加快了检测的速度。美国和瑞典的学者将包围盒应用于无规则运动对象间的碰撞检测^[10],通过不断更新节点及对节点有效性的判断来

遍历包围体层次树,最终把碰撞对确定为相应的几何图元,且遍历节点时利用时间相干性减少了节点的遍历个数,内存的消耗问题得到了改善。

4) Schroker 等提出了一种基于欧氏距离的碰撞检测算法^[11],该算法将碰撞检测问题简化为对对象间距离的求解,该算法在处理静态碰撞检测问题时能够快速获得对象间的距离信息,但在处理动态对象间的干涉问题时有一定的局限性。韩国的 Kim 提出了用于计算管状面或者圆环面间距离的算法^[12],算法中运用了遍历所有解的方法来得到最小距离,结果的精度较高,但在处理复杂环境的碰撞检测问题时其计算效率会有所下降。

5) GJK 与 Minkowski 和、差方法是基于单纯形的碰撞检测算法中的经典算法。GJK 算法由 Gilbert 等提出^[13]。算法的本质为计算凸体间的距离,该算法本身不具有执行效力,往往与 Minkowski 和、差相结合,通过两凸体的 Minkowski 差的位置来判断两凸体的位置关系。张应中等提出了一种基于 GJK 的凸多面体连续碰撞检测算法^[14],从实验数据可以看出,该算法效率高、稳定性好,但由于支撑映射的限制,该算法适用于包围盒这类简单图形的碰撞检测。

6) 潘海鸥等提出了针对机器人的并行包围体层次树碰撞检测算法^[15],从上、中、下 3 个层次设计并行架构,整体上提高了算法的执行效率。杜鹃等针对复杂场景中碰撞检测无法满足实时性的问题,提出了基于数据分块思想的并行碰撞检测算法^[16],每个处理器处理一个数据块的包围盒更新,提升了碰撞检测速度,并且该算法有较好的兼容性。

7) 刘海平等提出了基于混合人工鱼群的凸多面体碰撞检测算法^[17],在求解凸多面体距离问题上,运用混合人工鱼群算法和模式搜索法求解带约束条件的非线性规划问题,此算法在计算时间和精度上相比于基于距离的碰撞检测算法有很大的提高。Zhao 等将遗传算法利用到基于 K-DOP 包围盒的碰撞检测中^[18],有效地减少了层次包围体更新节点所消耗的时间,在被检测物体为变形体时其效率尤为突出。付跃文等提出了一种基于多智能体粒子群的快速碰撞检测算法^[19],该算法利用多智能体粒子群算法求解特征对间距离的非线性优化问题,从全局上提高了碰撞检测的效率,满足碰撞检测实时性的要求。

在基于几何空间的碰撞检测算法中,扫掠算法和空间分割算法是面向多个对象的碰撞检测算法,适用于碰撞检测的预处理阶段;基于层次包围盒、基于距离、基于凸体、基于并行以及基于智能优化等的算法是面向两个对象间碰撞检测的优秀算法,适用于精确碰撞检测阶段。

2.2.2 基于图像空间的碰撞检测算法

基于图像空间的碰撞检测算法主要涉及下列两种算法:基于图像空间的快速相交技术;将 GPU 视为与 CPU 一样的处理器,加速几何、数学的计算,在缓冲区依据颜色值与深度值正确地查询光栅化对象,从而判断对象之间是否相交。

各国学者对基于图像空间的碰撞检测算法进行了大量并富有成效的研究,其中基于图像空间的快速相交技术大多以投影法为基础。Wang 等提出了基于轮廓投影的碰撞检测算法^[20],利用多面体在空间任意平面投影区域的重叠情况以及 OpenGL 中的深度缓存器和模板缓存器所存储的信息来判断多面体之间是否发生碰撞,适用于基于虚拟现实的粗略碰撞

检测。Li 等提出了基于切片投影的碰撞检测算法^[21],通过在若干水平面内两对象的投影有无重叠区域来判断对象间是否发生碰撞,且此算法适用于碰撞检测的预处理阶段以及 3D 游戏场景中的碰撞检测。Shen 等提出了基于投影并行的碰撞检测算法^[22],该算法利用投影转换矩阵把三维空间中非规则对象投影到二维平面转化为规则图形,通过对多个面的二维图形的求交来判断对象间是否发生碰撞,从整体上提高了检测的效率。黎自强等提出了基于投影分离的快速碰撞检测算法^[23],该算法通过凸多面体中心投影及对准投影分离面集合的遍历来判断凸多面体之间是否发生碰撞,投影分离面的思想很大程度上提高了检测的效率,但该算法较难适用于凸多面体实时运动情况复杂的场景。张智等在借鉴黎自强算法思想的基础上,提出了一种基于棱线投影分离的凸多面体碰撞检测算法^[24],通过在准投影分离线方向上的投影将 3D 问题转化为 2D 问题,结合分离投影,将 2D 问题转化为 1D 问题,完成碰撞检测。该算法检测精度较高,对只做平移运动的物体之间的碰撞检测响应速度较快,但不适用于复杂场景中的检测。

以投影法为基础的快速相交算法试图将 3D 碰撞检测问题转化为 2D 碰撞检测问题,以此来简化计算过程和实现难度,提升虚拟环境在执行碰撞检测时的效率,但这种相交问题的转化过程较为复杂,且涉及到大量解析几何的基础理论,研究过程较为缓慢。目前此类算法大多数应用在精度要求不高的虚拟场景中,由于相对较为轻载的计算代价,其在处理复杂场景中对象的干涉问题时仍具有一定的优势。

Nicolin 等提出了一种通过改善和优化 GPU 的性能来提高碰撞检测效率的思想^[25],借助高性能的 GPU 对几何图元的快速分解能力,降低了 CPU 的载荷并加快了碰撞检测的速度,此类算法适用于碰撞检测的预处理阶段。Kim 等提出了 HPCCD 算法^[26],该算法是一种基于多核 CPU 和 GPU 图形加速与层次包围体的方法,适用于柔性模型的连续碰撞检测,能够解决由三角面片构成的柔性体之间的干涉问题,不能返回精确的碰撞点。于海军等提出了一种基于图像空间的快速碰撞检测算法^[27],该算法综合了 GPU、OBB 包围盒、RE-CODE 算法在处理碰撞检测问题时所具有的优势,提高了碰撞检测的效率,且能处理复杂度较高的虚拟装配环境中的碰撞检测问题。

此类算法的优点较明显:1)通过计算机硬件 GPU 加速图形的渲染,减轻 CPU 的负荷,提高了算法的效率;2)算法适用于各种场景,对场景的复杂度无特殊要求;3)在复杂度相同的场景中,碰撞检测时间较为平稳。同时基于图像空间的碰撞检测算法也存在普遍的缺点:1)当对象处于分离状态时,算法可能出现错误的相交信息;2)由于该算法借助于计算机硬件,应当考虑如何与 CPU 平衡计算负担;3)该算法只能处理凸体之间的碰撞检测。

以 GPU 为基础的图像空间碰撞检测算法通过分担 CPU 的载荷及对图像的快速处理来提升整体算法的运行效率,但算法不具有精确计算的能力,所以此类算法目前多用于碰撞检测的预处理阶段。

3 碰撞检测算法的分析

从虚拟装配环境应用于机电产品的装配设计开始,各国研究者就对碰撞检测算法进行了大量的研究,直至今日,基于

时间域的碰撞检测算法计算量较大,计算速度慢,进行碰撞检测的虚拟环境越复杂,其无法满足实时性的缺点暴露得越明显。基于空间域的碰撞检测算法利用计算机图形学及硬件所独有的优势,在处理虚拟环境中的碰撞检测问题时其计算效率和精度都有了大幅度的提高,在应用于虚拟装配环境的碰撞检测算法中,基于空间域的碰撞检测算法正在替代基于时间域的碰撞检测算法成为主流。

对于复杂机电产品而言,其需要进行碰撞检测的零部件数量多达上万个,这就对虚拟装配环境在执行碰撞检测时的实时性和结果的精确性提出了更高的要求。基于空间域的碰撞检测算法在处理三维空间中对象间的干涉检测时,一定程度上满足了基于时间域碰撞检测算法所不能满足的要求。

上述算法在应用于虚拟装配环境的碰撞检测功能时,都能展现其各自的优点,但也存在着不足。大多数碰撞检测算法都不能满足虚拟装配环境对实时性和精确性的双重要求,于是各国研究者采用粗略碰撞检测和精确碰撞检测相结合的方法,在粗略碰撞检测阶段利用轻载低代价的计算快速剔除不可能发生碰撞的对象,在精确碰撞检测阶段对少数潜在发生碰撞的对象进行重载精确地计算来确定其是否发生碰撞,从整体上提高了检测的效率,而检测精度又在虚拟装配环境可接受范围之内。这种粗精结合的碰撞检测策略越来越多地应用于虚拟装配环境,只需在粗略碰撞检测阶段和精确碰撞检测阶段分别加入不同的算法,整体算法的实时性和精确性就大不相同,以此来寻找实时性和精确性相互折中且满足虚拟装配环境要求的算法。

4 展望

碰撞检测是虚拟装配环境中的关键技术,直接影响装配仿真是否为“真”的问题。在分析了基于虚拟装配环境的碰撞检测算法的研究现状和问题的基础上,现对碰撞检测未来的发展趋势进行如下展望。

空间投影方法更多地应用于碰撞检测算法的研究。目前大多数以投影法为基础的算法把三维空间中的相交问题向二维平面转化,这样计算过程会大大简化,但该转化过程往往比较复杂,尤其是当待处理对象由非规则的曲线曲面构成时。目前以空间投影为基础的碰撞检测算法大多数应用于碰撞检测的预处理阶段,但依托于 GPU 对图形渲染能力的加强及投影曲线求交算法的进步,投影降维的思想在未来会应用于精确碰撞检测阶段,对虚拟环境中的对象是否真的发生碰撞给出精确的判断。

基于大数据算法的碰撞检测算法及基于云平台的虚拟装配环境伴随着互联网的发展将成为研究热点。工业及科技发展的需求使机电产品的复杂度大大增加,进而虚拟装配环境中待检测对象的数量及复杂度也在不断地增加,计算机对海量数据的存储和计算都直接影响装配仿真的效率和精度,大数据算法可以对待计算的数据进行归类处理,使计算过程得到简化。同时,复杂机电产品的研制往往需要多个企业协同开发,基于云平台的虚拟装配系统为企业提供一个合作交流的平台,共同对产品进行装配仿真及零部件的碰撞检测,对设计的误差和装配问题进行及时的修正,以此来提高产品的研发效率。

基于 GPU 等计算机硬件的碰撞检测算法将成为研究的

热点。随着计算机图形学及计算机硬件的迅猛发展,基于计算机 CPU 和 GPU 等图形处理硬件的碰撞检测算法会越来越多地应用于虚拟装配环境,对三维对象的图形及图像进行更快速的处理,以此来提高虚拟装配环境的运行效率。

虚拟现实技术的进步会推动碰撞检测算法的发展。虚拟现实技术作为一种新的产品研制途径,其现代制造业中的应用已经成为必然的趋势,而复杂机电产品在设计之后、生产之前的装配仿真更是必不可少的一环,碰撞检测作为虚拟装配环境的关键技术一直是研究的热点和难点,虚拟现实技术的快速发展在一定程度上会促进碰撞检测技术的进步。

笔者认为对基于 GPU 及计算机硬件的碰撞检测算法的研究是未来一段时间内各国研究者的研究焦点,而大数据算法和基于云平台的协同式开发是虚拟装配系统中碰撞检测算法研究的一个必然趋势,尤其是以云平台为基础的虚拟装配系统的建立将标志着碰撞检测算法的成熟及涉及的相关标准的规范化。

结束语 碰撞检测是虚拟装配系统对产品进行装配仿真时涉及的一种关键技术,直接影响仿真是否为“真”的问题。本文对国内外主流碰撞检测算法进行了综述,且对不同类型的碰撞检测算法的特点及应用场景进行了概述,并对基于虚拟装配环境的碰撞检测算法的研究难点做出了分析,同时对其未来的研究方向进行了展望。

参 考 文 献

- [1] Larsen E, Gottschalk S, Lin M C, et al. Fast proximity queries with swept sphere volumes[R]. Technical Report TR99-018, Department of Computer Science, University of North Carolina, 1999
- [2] Bridson R, Fedkiw R, Anderson J. Robust treatment of collisions, contact and friction for cloth animation[J]. ACM Transactions on Graphics (ToG), 2002, 21(3): 594-603
- [3] Tang M, Yoon S, Tang M. Adjacency-based culling for continuous collision detection[J]. Visual Computer, 2008, 24(7): 545-553
- [4] Corrales J A, Candelas F A, Torres F. Safe human-robot interaction based on dynamic sphere-swept line bounding volumes[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(1): 177-185
- [5] 沈学利, 吴琼. 基于包围盒和空间分割的混合碰撞检测算法[J]. 计算机工程, 2012, 38(6): 256-258
- [6] Yi K C, Bernard M, et al. Continuous collision detection for composite quadric models[J]. Graphical Models, 2013, 76(5): 566-579
- [7] Chang J W, Wang W, Kim M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy[J]. Computer-Aided Design, 2010, 42(1): 50-57
- [8] Larsson T, Akenine-Möller T. A dynamic bounding volume hierarchy for generalized collision detection[J]. Computers & Graphics, 2006, 30(3): 450-459
- [9] Hans P S, Matthias J, et al. Guaranteed collision detection with tolerated motions[J]. Computer Aided Geometric Design, 2014, 31(7): 602-612
- [10] Kim K J. Minimum distance between a canal surface and a simple surface[J]. Computer-Aided Design, 2003, 35(10): 871-879
- [11] Gilbert E G, Johnson D W, Keerthi S S. A fast procedure for computing the distance between complex objects in three-dimensional space[J]. IEEE Journal on Robotics and Automation, 1988, 4(2): 193-203
- [12] Zheng Y, Chew C M, et al. A GJK-based approach to contact force feasibility and distribution for multi-contact robots[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2011, 59(3/4): 194-207
- [13] 潘海鸿, 戴骏, 陈琳, 等. 多机器人并行动态包围体层次树碰撞检测算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2014, 26(11): 1948-1956
- [14] 杜鹏, 唐敏, 童若锋. 多核加速的并行碰撞检测[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2011, 23(5): 833-838
- [15] 刘海平. 基于混合人工鱼群的凸多面体碰撞检测研究[J]. 计算机科学, 2014, 41(S1): 61-63
- [16] Zhao W, Li L. Improved K-DOPs collision detection algorithms based on genetic algorithms[C]// 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT). IEEE, 2011, 1: 338-341
- [17] 付跃文, 梁加红, 李猛, 等. 基于多智能体粒子群的快速碰撞检测算法研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8): 1876-1880
- [18] Wang H R, Liu X L, Liu J. The contour projection based collision detection algorithm[C]// 2009 International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, 2009, 3: 1611-1615
- [19] Li X, Zhong Z, Lu Z. Collision detection algorithm based on slice projection[C]// 2009 International Conference on Mechatronics and Automation. IEEE, 2009: 671-675
- [20] Xue-li S, Tao L. Fast collision detection based on projection parallel algorithm[C]// 2010 2nd International Conference on Future Computer and Communication (ICFCC). IEEE, 2010, 1: V1-179-V1-182
- [21] 黎自强. 凸多面体快速碰撞检测的投影分离算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2010, 22(4): 639-646
- [22] 张智, 邹盛涛, 李佳桐, 等. 凸多面体碰撞检测的棱线投影分离算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 27(8): 1407-1415
- [23] Nicolin Govender, et al. Collision detection of convex polyhedra on the NVIDIA GPU architecture for the discrete element method[J]. Applied Mathematics and Computation, 2014, 267: 810-829
- [24] Kim D, Heo J P, et al. HPCCD: Hybrid parallel continuous collision detection using CPUs and GPUs[J]. Computer Graphics Forum, 2009, 28(7): 1791-1800
- [25] 于海军, 马纯永. 基于图像空间的快速碰撞检测算法[J]. 计算机应用, 2013, 33(2): 530-533
- [26] Redon S, Kheddar A, Coquillart S. CONTACT: Arbitrary in-between motions for collision detection[C]// 10th IEEE International Workshop on Robot and Human Interactive Communication. IEEE, 2001: 106-11
- [27] Redon S, Kheddar A, Coquillart S. Fast continuous collision detection between rigid bodies[J]. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing, Inc, 2002, 21(3): 279-287