

文章编号: 1000-5862(2016)03-0312-06

基于 BIM 技术的碰撞检查软件的研究与设计

曾东海¹, 周文琼²

(1. 广东科学技术职业学院广州学院, 广东 广州 510640; 2. 广东科学技术职业学院计算机工程技术学院, 广东 珠海 519080)

摘要: 设计了一种混合云的服务架构, 通过数据适配器访问虚拟集成数据, 既能保护参与企业的数据隐私, 又能提高数据访问效率. 综合采用 AABB 层次包围盒和 GJK 算法实现碰撞检测, 既保证了碰撞检测结果的正确性, 又能够大大降低碰撞检测的时间开销. 应用软件可大幅降低设计与施工过程中出错的概率, 显著提高工程项目的建设效率.

关键词: 建筑信息模型; 碰撞检查; 多专业协同; IFC 标准

中图分类号: TP 316 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16357/j.cnki.issn1000-5862.2016.03.20

0 引言

随着建筑产业的不断升级, 与之相关的建筑信息化已逐渐汇集成一股潮流, 成为建筑行业的一个研究热点, 引起了社会各界学者的广泛关注. 由于建筑的复杂性和多专业之间综合性, 大型建筑容易出现管线的空间碰撞问题. 管线综合设计所涉及的专业众多, 包括结构、建筑、给排水、暖通及电气等, 呈现管线繁琐、设计复杂的特点. 因为各专业分别设计其管线和建筑空间的限制, 所以经常发生以下 3 类碰撞问题: 管道与管道碰撞、管道与设备碰撞、管道与结构梁碰撞^[1-2].

BIM (Building Information Modeling, 建筑信息模型) 通过数字信息来仿真模拟建筑物信息, 其核心思想是建立建筑信息模型, 涉及建筑工程项目生命周期的各种相关信息和数据. BIM 具有可视化、优化性、协调性、模拟性和可出图性等特点. 本文利用 BIM 技术构建管线碰撞检查软件, 可以导入来自于不同设计部门、不同专业的 3 维管线模型, 进行综合性和跨专业的管线碰撞检测, 分析各专业管线是否发生冲突, 并计算管线间的垂直、水平净距, 解决各软件厂商之间无法整合应用的问题, 实现了各 BIM 厂商数据的统一管理. 该软件利用 OS G 的 3 维渲染引擎与 Bullet Physics 物理引擎, 采用 MFC 应用程序框架, 应用该软件可大大降低设计与施工过程中出错的概率, 显著提高工程项目的建设效率.

1 BIM 技术

为了解决建筑工程项目中软件描述问题和数据交互问题, BIM 在建筑工程项目中应用 3 维数字技术进行统一建模, 使项目相关人(预算员、设计员和工程技术人员等)能够分享和应用各种建筑信息.

1.1 BIM 技术内涵

BIM 技术内涵包括 3 部分: (i) 数字化, BIM 表现为数字表达, 在构件属性中包含尺寸、造价等信息; (ii) 共享性, 利用 BIM 技术可以建立一个项目全生命周期资源共享平台, 为决策、设计、施工、竣工、投产运营过程中的各项决策提供依据; (iii) 协同性, 在项目运行的不同阶段, 利用 BIM 平台各单位可实现信息共享、协同作业.

1.2 目前实现 BIM 的工具软件

BIM 技术涵盖系列软件, 目前, 常用软件 BIM 软件可以概括为 13 大类: 核心建模、方案设计、几何造型、绿色分析、机电分析、结构分析、可视化软件、模型检查、深化设计、综合碰撞检查、造价管理、运营管理和发布审核.

1.3 研究现状

作为一种创新性信息协同平台, 目前 BIM 技术已在美国等西方发达国家为建筑业带来了巨大变革. 在美国政府的推动引导下, 2007 年美国国家建筑科学研究院制定了国家 BIM 标准 (National BIM Standards), 并创建了各种 BIM 协会. 建筑工程项目

收稿日期: 2015-12-17

基金项目: 广东省自然科学基金 (S2013010012920) 资助项目.

作者简介: 曾东海 (1968-), 女, 江西永新人, 副教授, 主要从事软件工程的研究.

的信息共享和协同工作目前已成为国外学者研究的热点。为实现协同和共享,Vineet R. Kamat 等研究了 3 维模型转换和显示,通过 VRML 控件进行模型显示;为实现项目管理的进度模拟,Sheryl 等利用 Microsoft Access 数据库管理系统作为数据中转平台,将研发的项目进度管理程序 Repcon 与 BIM 模型双向关联。

郭希娟等^[3]提出了基于正四面体中心投影的凸多面体 Minkowski 和优化算法,李静等^[4]提出了一种基于边面遮挡的凸剖分算法。基于凸包理论,J. M. Lien 等^[5-6]提出了旋转运动的凸多面体 Minkowski 和计算方法、基于点集的 3 维空间中 Mikowski 和边界的计算方法。H. Barki 等^[7]在基于贡献点方法的基础上给出了非凸多面体与凸多面体间进行近似 Minkowski 和计算的方法,D. Teissandier 等^[8]提出了基于锥体切分的 Minkowski 和构造算法,Christophe Weibel 等^[9]提出了一种基于贡献点的凹凸多面体的构造算法,张步英等^[10]提出了基于分裂边的凸多面体 Minkowski 和构造算法,通过极点关系分别平移两凸多面体的面,通过分裂边关系构造补面。Y. Aono^[11]给出了基于分隔构建的 Minkowski 和构造算法,W. Lei 等^[12]提出了基于卷积的 3 维 Minkowski 和构造算法。但是,多面体对的 Minkowski 和构造相对复杂,成为一个技术瓶颈。

2 碰撞检查原理

碰撞检查是判定不同对物体在同一时刻是否占有相同区域,其实质就是多面体在几何空间的求交问题。

2.1 碰撞检查算法

目前,国内外学者和研究人员针对碰撞检查做了大量研究工作,提出了有影响力的碰撞检查算法,形成了软件包。从总体上看,碰撞检查算法可划分为 2 大类:基于时间域的碰撞检查算法和基于空间域的碰撞检查算法。前者分为 3 小类:静态碰撞检查算法、离散碰撞检查算法和连续碰撞检查算法;后者划分为 2 小类:基于物体空间的碰撞检查算法、基于图像空间的碰撞检查算法;基于物体空间的碰撞检查算法根据表示模型划分为 2 小类:层次包围盒算法、空间剖分法^[13],如图 1 所示。

在基于时间域的 3 类碰撞检测算法中,静态碰撞检测算法是在所有物体呈静止状态条件下,检测各物体在 3 个坐标轴上的投影是否有重叠的算法,一般只适用于需要计算物体几何的环境,对实时

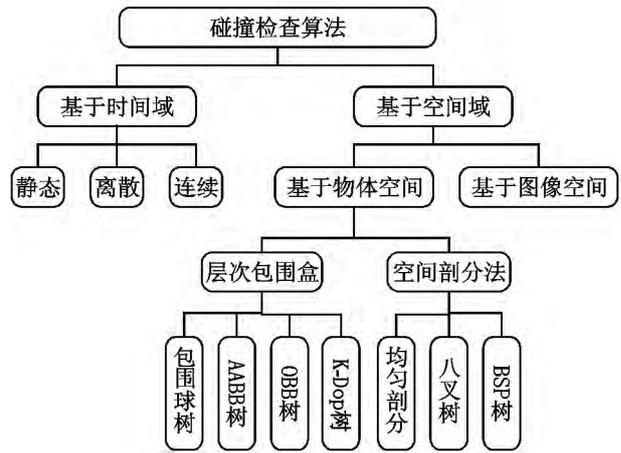


图 1 碰撞检查算法的分类图

性的要求不高;离散碰撞检测算法是连续地检测虚拟场景中各物体间是否出现相交,但因为时间的离散性,所以该算法存在着穿透、遗漏等缺陷;连续碰撞检测算法能有效解决穿透等问题,但存在实现复杂、运算开销大等问题。

包围盒算法是基于空间域中最常用的碰撞检测算法,该算法首先用体积稍大、特性简单的几何形状(简称包围盒)来近似地代替复杂的几何对象,然后再对包围盒进行碰撞检查。层次包围盒算法是一种构造树形层次结构逐步逼近物体对象几何特性的包围盒算法,由于树形数据结构的存储空间需求与相交测试的递归深度成正比,因此系统总体更新代价较低、性能良好。根据包围盒的形状,层次包围盒划分为 4 类算法:包围球树、AABB 树、OBB 树、K-Dop 树。空间剖分算法利用空间分布特性和运动物体碰撞行为的局部性,将物体场景空间剖分为若干子空间,使用列表记录每个子空间拥有的对象。目前应用较多的空间剖分法有均匀剖分、八叉树和 BSP 树,算法实现简单,其要点是划分 3 维空间时如何根据实际应用选取合适的存储结构。基于图像空间的碰撞检测算法将 3 维物体投影到 2 维图像平面上,从图像的角度进行碰撞检测,是采用以效率换精度的思想,但因为受限于图像分辨率,碰撞检测的精度难以保证。

2.2 碰撞检查的流程

为提高碰撞检查的性能,碰撞检查可将多种算法和技术综合应用,而非仅仅使用一种算法,从而形成优化的碰撞检查算法。Hubbard 将碰撞检查的流程划分为 2 个阶段:粗略阶段和详细检查阶段。

粗略阶段的主要任务是剔除大量、明显不相交的物体。该阶段主要使用 2 种算法:空间剖分算法、扫掠裁剪算法。扫掠裁剪算法首先将 3 维物体的碰

撞检查进行降维至 1 维,然后通过排序检查是否存在相交.这样使用粗略测查来排除大量、不必要的几何物体对间的碰撞检查,可以大大减少计算负荷,提高碰撞检查的速度和性能.

详细检查阶段的主要任务是根据粗略阶段检查确定的可能发生碰撞的物体几何对集合,最终明确物体几何对是否发生碰撞,可再细分为 2 个阶段:逐步求精阶段和精确求交阶段.前者主要使用 2 种算法:层次包围盒技术、空间剖分算法,后者对组成物体的三角面片之间进行精确的相交检查,该阶段算法需要返回碰撞检查的细节信息(如几何对的分隔距离、穿透深度、最近点等),这些细节信息可作后续计算(如确定物体几何对的碰撞时间、碰撞响应力、碰撞接触点等).

3 多专业碰撞检查系统的设计

目前建筑行业内通常使用 Autodesk 公司的 Revit 设计软件建立 3 维 BIM 模型,再使用 Navisworks 软件进行碰撞检查.但 Revit 通常应用于建筑设计,存在建模效率低问题,而目前国内建筑行业主要是 2 维设计,使用 Revit 软件建模与重新进行 3 维设计的工作量相当,存在重复建模、耗时耗力、使用 Navisworks 软件进行碰撞检查的成本高等问题.本文创新性提出基于 IFC(Industry Foundation Classes,工业基础类)标准的 BIM 数据库,可以导入各种设计图并进行快速转化,大大提高 3 维建模效率、降低成

本.在此基础上,进行建筑工程算体计算、施工过程成本管控等 BIM 应用.该碰撞检查软件能快、准、全地检查出 BIM 模型中各种设计问题,最大限度降低施工返工,节约成本.

3.1 基于混合云的系统服务架构

建筑工程项目是涉及多单位、多专业的综合性工程活动,信息数据来源于多个不同的参与单位,模型数据标准多源异构,给建筑工程全生命周期的数据共享、数据交换与数据管理带来一定的问题.为了保护各参与单位的私有数据安全,设计了基于混合云的系统服务架构如图 2 所示,系统分为 3 层:应用层、云服务层和数据存贮层.各参与单位将 BIM 数据通过私有云服务,存贮于本单位的中心服务器.根据签订的数据共享协议,公开该单位提供的共享数据;在公有云服务中,通过数据适配器访问虚拟集成数据,该虚拟集成数据由分布式的各单位数据服务器和公有云中心的数据服务器组成,逻辑上形成完整和系统的 BIM 数据,涵盖整个建筑项目的全生命周期.公有云中心服务器为尚未部署私有云的参与单位提供服务,并提供全局分布式数据的访问配置和访问规则.在应用层,各单位通过云服务访问数据适配器,数据适配器提供统一的数据访问和数据操作服务,解析数据访问路由,从数据存贮虚拟层获得所需的、权限许可的数据,实现数据的透明访问.混合云架构融合了公有云和私有云,既保护了企业的数据隐私,又提高了数据访问效率,是一种最佳的解决方案.

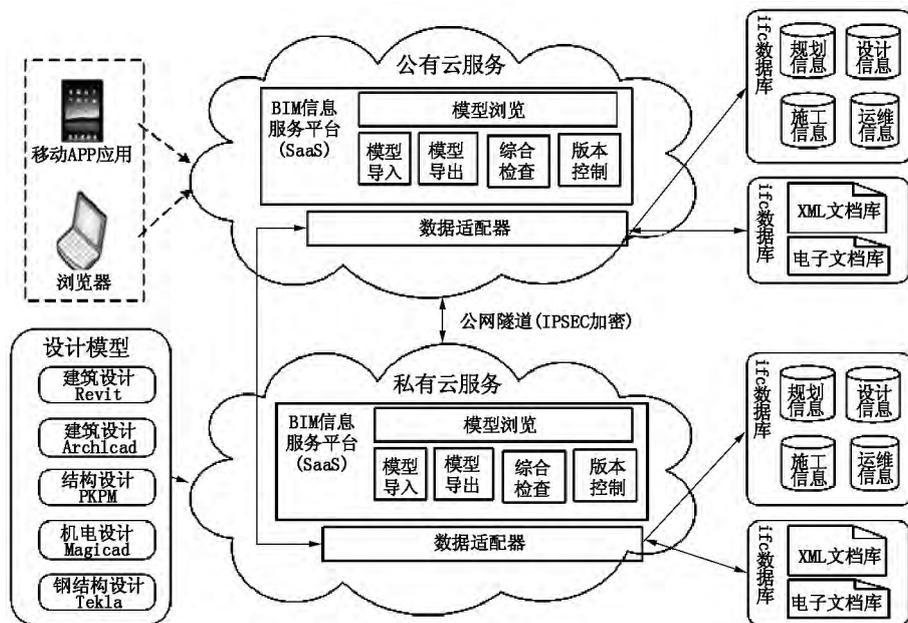


图 2 系统架构图

在数据存贮层,需要存贮结构化数据和非结构化数据,结构化数据存贮于关系数据库中,而非结构化数据存贮于文件仓库中,全局数据元数据在公共云的数据服务器被定义和管理。BIM数据层基于IFC标准,IFC模型既包括具体的建筑元素,又包括抽象的建筑概念,前者包括梁、柱、板、吊顶、家具等,后者包括计划、组织、造价、空间等。IFC模型使用描述语言Express或XML进行表述,系统对IFC数据进行API接口封装,提供对IFC模型、构件、实体的访问操作。BIM模型数据的核心内容是建筑构件数据,建筑构件通过属性来描述信息,属性划分为直接属性、反属性和导出属性,直接属性是指标量信息或集合信息(多值属性),反属性是指需要定义关联数据或参照完整性的信息,导出属性是指由其它属性计算或加工形成的信息。

为了实现公有云和私有云之间的穿越能力,实现交互操作的云框架,系统利用VPN接入协助各单位整合其在公有云和内部私有云的资源,让企业在公有云和私有云之间架起一条全封闭的信息高速公路。为了实现公网链路质量可控,提供了VPN监控、统计、告警等服务。

3.2 实体分类

建筑设计图和建筑施工图中有大量管线和图块,图块通常表达实际设备及其附件,在信息世界中则为实体。实体分为规则实体和不规则实体,前者是指可以使用数学方法进行描述的实体,后者是指不能使用数学公式精确描述,而只能用参数法定义其主要特征属性、其他部位等进行近似描述。规则实体如直风管、水管道、梁等,不规则实体如制冷机、水泵、阀门、风机、换热器等设备。

3.3 碰撞检查优化算法

基于包围盒的碰撞检查方法扩大了碰撞检查的区域,降低了碰撞检查的精度,基于包围盒算法进行碰撞检查存在自身的缺陷。Minkowski和采用精确的数值计算来确定两多面体是否相交,可以准确地检测出两个多面体是否发生碰撞,是提高碰撞检查精度的一种有效方法。

1) AABB包围盒算法。AABB包围盒算法是一种被广泛支持的包围盒算法,其包围盒的构造简单、算法经典,只需分别计算组成对象的各基本几何元素中的各个顶点在每个坐标轴上投影的最大值和最小值即可。设 (l_x, l_y, l_z) 为包围盒的最小值坐标, (h_x, h_y, h_z) 为包围盒的最大值坐标,则AABB包围盒 $R = \{(x, y, z) | l_x \leq x \leq h_x, l_y \leq y \leq h_y, l_z \leq z \leq h_z\}$ 。碰撞检查即计算AABB包围盒间的相交,2个

AABB包围盒相交当且仅当它们在各个坐标轴上的投影均重叠,因此对AABB包围盒间的相交测试最多只需进行6次比较运算,时间消耗少。

2) GJK算法。GJK(Gilbert-Johnson-Keerthi)算法的原理:2个多面体A和B的间距等价于明可夫斯基差(Minkowski差)C与原点之间的距离,即若A和B相交,则其明可夫斯基差C必定包括原点。

算法描述为:(i)初始化单形体集T(使用点集C中的最多 $c+1$ 个点);(ii)计算单形体凸包 $CH(T)$ 中具有最小范数的顶点P;(iii)若点P为原点,则明可夫斯基差C包括原点中,终止计算,返回“发生碰撞”;(iv)将T减至其最小子集 T' ,使 $P \in CH(T')$,即对于T不包含顶点P的子单形体,移除顶点;(v)设 $V = SA - B(-P) = SA(-P) - SB(-P)$ 是 $-P$ 方向上的支持点;(vi)比较顶点P与支持点V,若V在方向 $-P$ 上非极值点,则终止计算,返回“未碰撞”,AB距离=向量长度值(向量为原点指向顶点P);否则,将点V添加到集合T,返回步骤(ii)。

3) 碰撞检测优化策略。系统综合采用AABB层次包围盒和优化GJK算法实现碰撞检测,其中AABB层次包围盒算法用于快速排除场景中未发生干涉的物体对,对于包围盒算法计算后仍然干涉的物体对,用采用优化GJK算法进行准确的碰撞检测,这样既保证了碰撞检测结果的正确性,又能够大大降低碰撞检测的时间开销。

但2个多面体的Minkowski和构造相对复杂,成为技术瓶颈,限制了其应用。因此,系统提出一种基于菱形六面体的多面体直接映射方法,通过一步直接映射,该方法将凸多面体体元信息映射到2维正三角形内,从而将Minkowski和求和问题从3维空间转换到2维平面计算^[14+5]。Minkowski和构造算法伪码如下。

输入:多面体A与B的体元信息。

输出:多面体 $M = A + B$ 。

多面体 Minkowski_Sum_3D(A, B)

{ //B的坐标转换(全局 \rightarrow 局部)

for($i=0; i < n; i++$)

$fB(x, y, z) = (x -> x_0, y -> y_0, z -> z_0)$;

//对凸多面体A和B进行菱形六面体高斯映射

for($j=1; j < =2; j++$) {

Gauss_Mapping(A);

Gauss_Mapping(B);

}

//计算位于不同映射面的相邻映射点对应的

//映射边与菱形六面体棱的交点

```

for( i=0; i <= l; ++i)
    Compute_CrossoverAoint( );
//对 A 和 B 的映射点做正三角形的垂直影射
for( i=0; i < 2; ++i) {
    Triangle_Vertical_Mapping( A );
    Triangle_Vertical_Mapping( B );
}
//对 A 和 B 的上下两对叠置平面进行遍历,
//找到贡献体元对
OverlayAlane_traversal( A, B );
//对贡献体元对做矢量和, 得到其 Minkowski 和
for( i=0; i < k; ++i)
    Minkowski_Sum_2D( A, B );
}.

```

4 系统仿真与结果分析

系统仿真硬件环境配置了一台塔式服务器, CPU 为英特尔至强 E5-2603 v3 1.6 GHz 15 MB 缓存, 内存为 8 GB, 硬盘为 400 GB 固态硬盘. 软件环境配置如下: 操作系统 Windows 7 SP1; 关系数据库 SQL Server 2008; NoSql 数据库 Hadoop Hbase; 开发平台 Microsoft Visual Studio 2010; 开发语言 C++; 软件库 OpenGL、CGAL4.

为验证优化 GJK 算法的有效性及其效率, 建立 3 维场景复杂度不同的场景进行仿真. 选取具有多个大小不同的规则凸多边形和非规则凸多边形作为实验对象, 计算几何算法库 CGAL 以 C++ 库的形式, 提供了方便、高效、可靠的几何算法, 包括三角剖分、多边形、多面体、Voronoi 图等, 系统仿真数据来源于 CGAL 库提供的丰富的凸多面体数据结构.

因为精确碰撞检查算法主要有 GJK 算法和 EGJK 算法, 所以系统仿真将本文提出的优化算法分别与 GJK 算法和 EGJK 算法在执行时间上进行对比分析, 以评价优化算法的性能. 仿真过程为: 分别在给定规则凸多边形对和非规则凸多边形对的 2 种测试情况下, 每种测试情况包括 9 组测试数据(边的个数从 50~450, 每组测试边数增长步长为 50), 分别使用 3 种算法进行固定位置的两凸多边形的最短距离检测, 记录运行时间. 仿真实验结果如下: 规则凸多边形对 3 种算法的性能对比分析如图 3 所示, 非规则凸多边形对 3 种算法的性能对比分析如图 4 所示.

从图 3 和图 4 可以得出, 优化算法与 GJK 算法、EGJK 算法的时间复杂度为相同数量级; 不管在规则凸多边形环境, 还是非规则凸多边形环境, 优化

算法的复杂度基本上与多边形顶点个数成线性比例增长. 在 2 种测试环境下, 优化算法的执行时间最少, 优化算法优于 GJK 算法和 EGJK 算法. 而传统 GJK 算法时间复杂度波动较大.

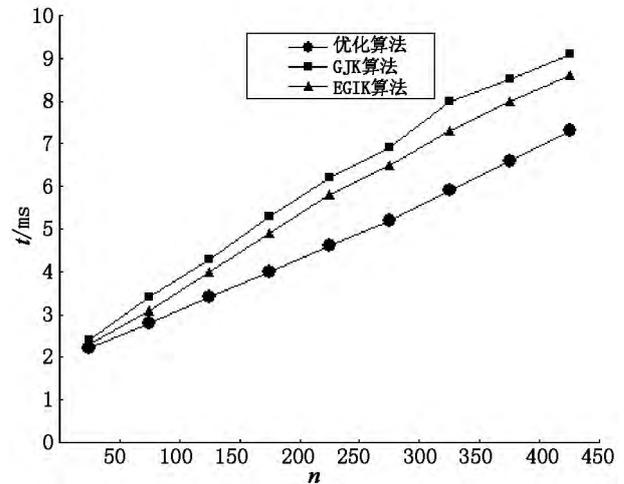


图3 规则凸多边形算法性能分析

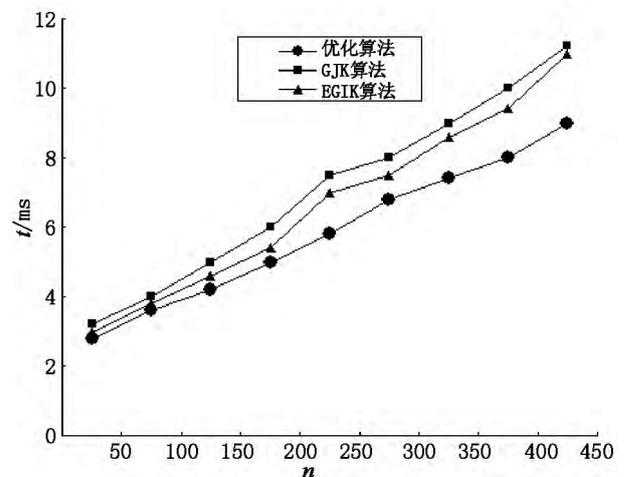


图4 非规则凸多边形算法性能分析

5 结语

本文设计与研究基于 BIM 技术的管线碰撞检查软件, 该软件支持建筑工程项目中多数据源和异构数据的管线综合碰撞检查功能, 支持建筑工程项目的多专业协同工作功能, 支持大规模场景数据管理与访问功能, 支持管线碰撞检查结果的组织与图形化显示等功能, 提出了基于 IFC 标准构建底层 BIM 数据库, 设计了一种混合云的服务架构, 通过数据适配器访问虚拟集成数据, 既能保护参与企业的数据隐私, 又提高了数据访问效率, 并分析和优化了碰撞检查算法. 碰撞检查软件是 BIM 技术应用的第一步, BIM 技术在国内建筑行业发展速度很快, 工程建设体量也很大, 随着 BIM 技术的深入和广泛应

用,必将推动国内建筑业进入革命性的时代^[16]。

6 参考文献

- [1] 刘占省,赵明,徐瑞龙. BIM技术在我国的研究及工程应用[J]. 建筑技术, 2013, 44(10): 893-897.
- [2] 何清华,潘海涛,李永奎,等. 基于云计算的BIM实施框架研究[J]. 建筑经济, 2012, 5: 86-89.
- [3] Guo Xijuan, Gao Ying, Liu Yong. Optimization algorithm for computing exact Minkowski sum of 3D convex polyhedra [J]. IJICIC, 2008, 6(4): 1401-1410.
- [4] 李静,王文成,吴恩华. 基于边/面遮挡关联性的多面体凸剖分方法[J]. 软件学报, 2008, 19(7): 1766-1782.
- [5] Lien J M. Covering Minkowski sum boundary using points with applications [J]. Computer Aided Geometric Design, 2008, 25(8): 652-666.
- [6] Lien J M. A simple method for computing Minkowski sum boundary in 3D using collision detection [J]. Springer Tracts in Advanced Robotics, 2010, 57: 401-415.
- [7] Barki H, Denis F, DuPont F. Contributing vertices-based Minkowski sum of a non-convex-convex pair of polyhedral [J]. ACM Transactions on Graphics, 2011, 3(1): 3-16.
- [8] Teissandier D, Delos V. Algorithm to calculate the Minkowski sums of 3-polytopes based on normal fans [J]. CAD Computer Aided Design, 2011, 43(12): 1567-1576.
- [9] Christophe W. Maximal f -vectors of Minkowski sums of large numbers of polytopes [J]. Discrete & Computational Geometry, 2012, 47(3): 519-537.
- [10] Zhang Buying, Guo Xijuan, Geng Qingjia, et al. A new algorithm for computing exact Minkowski sum of convex polyhedral [J]. Advances in Information Sciences and Service Sciences, 2013, 6: 154-158.
- [11] Aono Y. Minkowski sum based lattice construction for multivariate simultaneous Coppersmith's technique and applications to RSA [J]. Lecture Notes in Computer Science, 2013, 79: 88-103.
- [12] Li Wei, Sara McMains. A sweep and translate algorithm for computing voxelized 3D Minkowski sums on the GPU [J]. CAD Computer Aided Design, 2014, 46(1): 90-100.
- [13] 郑延斌,郭凌云,刘晶晶. 基于混合包围盒的碰撞检测优化算法[J]. 计算机工程与科学, 2013, 35(4): 87-92.
- [14] 耿清甲. 直接映射机制的Minkowski和算法理论研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2014.
- [15] 于海军,马纯永,张涛,等. 基于图像空间的快速碰撞检测算法[J]. 计算机应用, 2013, 37(6): 485-488.
- [16] 周文琼,潘璞,叶玫,等. 一种基于BIM/BLM的工程决策管理系统[J]. 信息技术, 2015(3): 77-81.

Research and Design of Collision Detection Software Based on BIM Technology

ZENG Donghai¹, ZHOU Wenqiong²

(1. School of Guangzhou, Guangdong Institute of Science and Technology, Guangzhou Guangdong 510640, China;

2. School of Computer Engineering Technology, Guangdong Institute of Science and Technology Zhuhai Guangdong 519080, China)

Abstract: A hybrid cloud service architecture, data adapter, access virtual integrated data, business's data privacy can be protected, improves the efficiency of data access has been designed. And also, realize collision detection by comprehensive using of AABB bounding body algorithm and GJK algorithm, both to ensure the correctness of the results of collision detection, but also can greatly reduce the time cost of collision detection. This software application can greatly reduce the probability of error in the design and construction process, significantly improve the efficiency of construction projects.

Key words: BIM; collision detection; multi-specialty collaboration; IFC Standard

(责任编辑:冉小晓)