

文章编号: 1006-2467(2011)07-0985-05

基于 VRML 节点树的双臂移动 机器人碰撞检测及优化

刘 忠, 曹其新, 朱笑笑, 王雯珊

(上海交通大学 机械系统与振动国家重点实验室, 上海 200240)

摘 要: 针对双臂移动机器人三维仿真中存在大量非凸模型而无法精确进行实时碰撞检测, 提出了基于虚拟现实建模语言(VRML)节点树实现凸分解的方法. 利用分解得到的单位形体的顶点数据, 使用 Quickhull 算法构造应用于 V-Clip 算法的凸多面体, 实现虚拟环境中模型与机器人之间的精确碰撞检测. 为了提高碰撞检测的效率, 优化仿真过程中碰撞检测的实时性, 采用了包围盒技术. 实验结果表明: 该方法具有良好的实时性和较高的碰撞检测精度.

关键词: 双臂移动机器人; 碰撞检测; 虚拟现实建模语言; V-Clip 算法; 包围盒

中图分类号: TP 242. 6 **文献标志码:** A

Collision Detection and Optimization of Dual-Arm Mobile Robot Based on Node Tree of VRML

LIU Zhong, CAO Qi-xin, ZHU Xia-xiao, WANG Wen-shan

(State Key Laboratory of Mechanical System and Vibration,
Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: A large number of non-convex models exist in three-dimensional simulation environment for dual-arm mobile robots, it is impossible to realize accurate real-time collision detection. This paper proposed a method to implement convex decomposition of non-convex models based on node tree of VRML. Pass vertices returned by convex decomposition to Quickhull algorithm to create convex polyhedron that used for V-Clip collision detection algorithm to realize accurate real-time collision detection. In order to improve the efficiency of collision detection to enhance real-time simulation, bounding box is used. The results show that this method can make real-time collision detection and has great precision.

Key words: dual-arm mobile robot; collision detection; virtual reality modeling language(VRML); V-Clip algorithm; bounding box

机器人与虚拟环境间以及机器人自身关节之间的碰撞检测是双臂移动机器人三维仿真的关键问题, 是机器人执行任务和路径规划的基础. 因此, 一

个完善的机器人仿真系统必须满足一定精度的实时碰撞检测. 在三维仿真中常用的碰撞检测算法均为面向凸体的碰撞检测算法, 而在机器人三维仿真中

收稿日期: 2010-09-06

基金项目: 机械系统与振动国家重点实验室重点项目(MSV-MS-2010-01); 教育部博士点基金资助项目(20090073110037); 教育部重大项目培育资金项目(708035)

作者简介: 刘 忠(1987-), 男, 河南省信阳市人, 硕士生, 研究方向为机器人三维仿真环境创建及碰撞检测.

曹其新(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel): 021-54748985; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

无论是机器人关节还是环境模型, 大多均为非凸多面体, 无法直接应用到碰撞检测算法中. 针对该问题, 目前常用的处理方法主要有 2 种:

(1) 对非凸模型进行重新建模, 使用形状较为简单的凸模型代替该非凸模型参与碰撞检测^[1]. 该方法不具备普适性, 一旦检测对象改变, 就需要重新建立检测对象的替代模型, 增加了仿真前的工作量. 同时, 由于非凸模型的替代模型往往跟自身差别较大, 使得检测精度也较低.

(2) 对非凸模型构造层次包围体树, 包括包围球树、AABB 层次树、OBB 层次树等^[2-4]. 通过逐层进行包围体之间的相交测试, 判断模型是否直接发生碰撞. 该方法同样不具有普适性, 需要一定的预处理时间, 并且检测效率和精度并不高.

双臂移动机器人作为服务机器人的一种, 其工作环境较为复杂, 使用场合灵活多变, 这就要求使用的碰撞检测方法应具有普适性, 避免检测前大量的准备工作. 同时, 很多仿真过程均要求较高的检测精度, 上述 2 种方法都不能达到要求.

针对上述问题, 本文提出了一种基于虚拟现实建模语言 (Virtual Reality Modeling Language, VRML) 节点树实现凸分解的方法. 利用分解得到的单位形体的顶点数据, 使用 Quickhull 算法^[5] 构造应用于 V-Clip 碰撞检测算法^[6] 的凸多面体, 从而实现碰撞检测. 所使用的 VRML 模型均为 Solidworks 等三维建模工具所导出, 该方法只需在对机器人和环境模型建模时对精度要求较高的部分做适当分割, 在导出 VRML 时分割出的各部分在 VRML 中以树状节点表示. 由该节点树凸分解生成碰撞检测单元的过程完全由程序自动完成, 避免了碰撞检测前大量的前期准备工作. 同时, 为了提高碰撞检测的效率, 采用了包围盒技术, 使得仿真过程的实时性得到了明显改善.

1 基于 VRML 节点树的碰撞检测

1.1 利用 VRML 节点树构造碰撞检测单元

为了保证仿真过程的实时性, 采用的碰撞检测算法应具有较高的检测效率. V-Clip 算法的基础是 Lin-Canny 算法, 它是目前处理凸体之间碰撞检测最快速有效的算法之一, 算法效率相对 F-Collide 和 Enhanced GJK 有明显改善, 而且具有很好的鲁棒性. V-Clip 进行碰撞检测的基本单位为 PolyTree, 进行碰撞检测首先要提供构造 PolyTree 的凸多面体.

VRML 是一种用于建立真实世界场景或人们

虚构的三维世界场景建模语言, 它具有平台无关性. 在双臂移动机器人的仿真中使用 VRML 语言来创建环境和机器人模型, 可使仿真过程更接近真实场景.

仿真中代表机器人关节和环境模型的 VRML 都具有如图 1 所示的树状节点结构, 其中包含了多个 Transform 节点和 Shape 节点. Transform 节点表示坐标系统的转换, 如移动或转动; Shape 节点包含了模型的几何、颜色和材质等信息. 碰撞检测需要用到的就是包含在 Shape 中的顶点信息. 由 VRML 模型构造该模型碰撞检测单元的流程如图 2 所示.

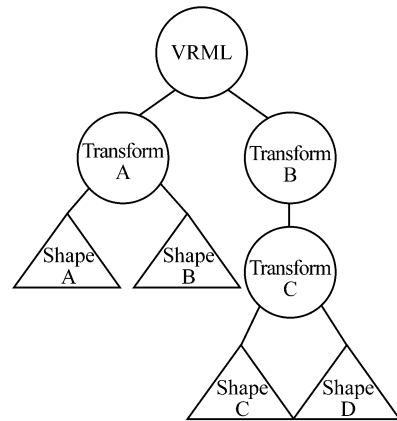


图 1 VRML 树状节点结构

Fig. 1 Tree node structure of VRML

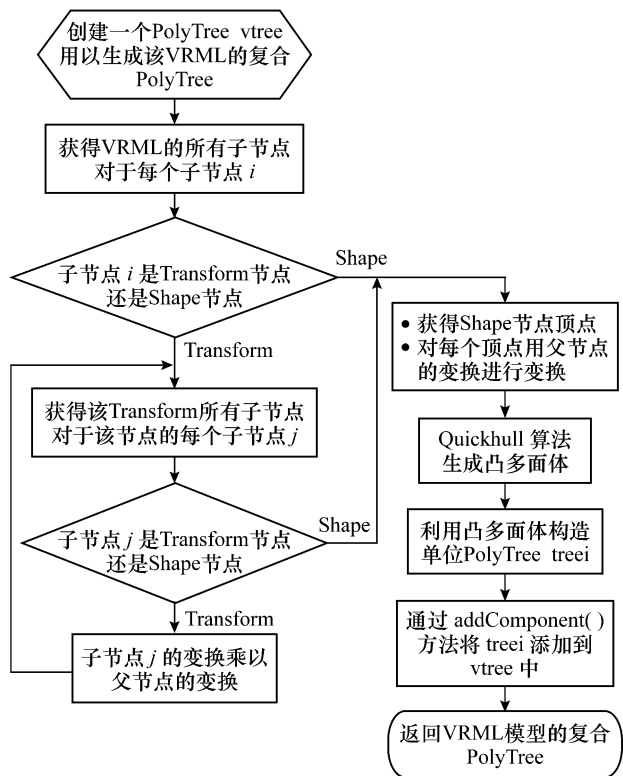


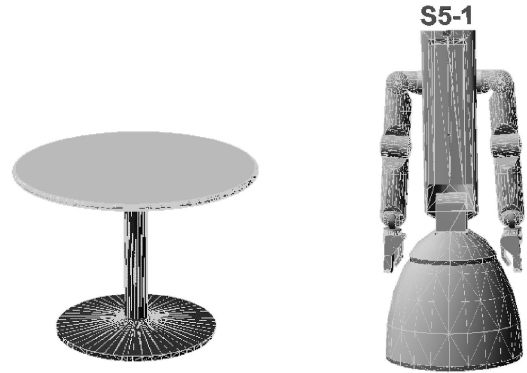
图 2 由 VRML 构造 PolyTree 流程图

Fig. 2 Process of constructing a PolyTree from VRML

通过递归读取 VRML 中每个 Shape 的顶点数据, 对每个 Shape 中的顶点分别利用 Quickhull 算法构造包围该 Shape 的最小凸多面体, V-Clip 以此凸多面体创建对应于该 Shape 的单位 PolyTree. 由于仿真过程中以整个 VRML 模型为检测单位, 每个模型中各 Shape 生成的单位 PolyTree 必须通过复合, 组成代表该模型的复合 PolyTree 参与检测. 图 3 中机器人和圆桌表面的白色网格是由 Quickhull 算法生成的凸多面体顶点连线构成. 由图可见, 该方法构造的 PolyTree 可以较为精确地反映检测对象的外形轮廓, 从而保证碰撞检测的精度.

1.2 机器人与环境之间及其自身关节间的检测

为了简化编程, 使仿真系统更具有柔性, 在实现机器人和环境之间碰撞检测时有必要将整个虚拟环境和机器人分别作为一个整体参与检测. 这要把



(a) 圆桌 PolyTree 轮廓 (b) 机器人 PolyTree 轮廓
图 3 VRML 模型的 PolyTree 轮廓

Fig. 3 Outlines of PolyTree constructed from VRML

每个 VRML 模型对应的复合 PolyTree 再次复合, 如图 4 所示.

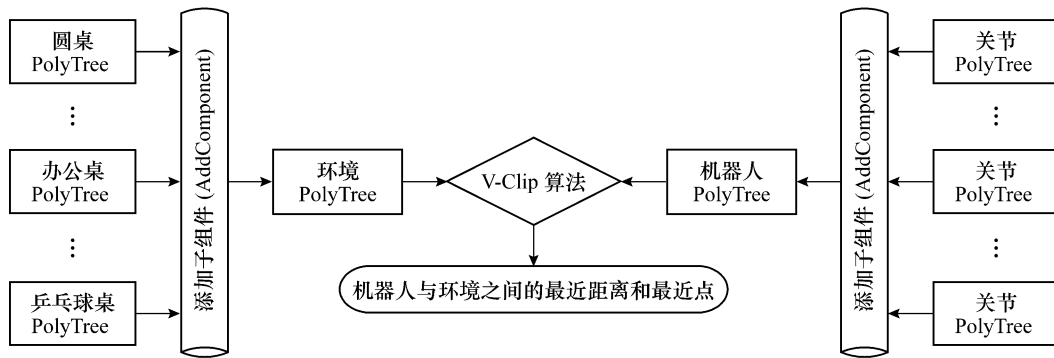


图 4 机器人与环境之间的检测

Fig. 4 Collision detection between virtual environment and robot

环境内模型多为静止不动的模型, 因此只需读取一次位置信息, 构造好整个环境的复合 PolyTree 之后就不需再更新. 而机器人是一个运动的物体, 各个关节的相对位置时刻发生变化. 因此, 在机器人运动的每一帧, 执行自身的碰撞检测之前都要对机器人的各关节位置信息重新获取, 并对代表整个机器人的复合 PolyTree 进行更新.

在对机器人自身关节间的碰撞检测中, 由于其自身关节间几何约束和运动范围的限制, 一些关节之间不可能发生碰撞, 略去对这些关节之间的碰撞检测可以提高机器人自身关节间碰撞检测的效率. 如图 3(b) 所示, 机器人手臂的上臂和下臂之间, 抓手与上下臂之间以及上半身和下半身之间由于运动自由度和几何约束的限制, 均不可能发生碰撞, 可以略去相应的碰撞检测. 对于图 3(b) 所示的机器人来说, 仅需要执行下列三部分碰撞检测: 左手臂与右手臂之间、左手臂与身体之间、右手臂与身体之间的检测.

2 碰撞检测效率的优化

从 Lin-Canny 算法改进的 V-Clip 算法是碰撞检测效率最高的算法之一^[6-7], 但是随着仿真环境复杂化, 机器人运动过程中每一帧需要执行的碰撞检测对数就会显著增加, 碰撞检测时间消耗必然会受到很大影响. 因此, 对碰撞检测的效率进行优化显得尤为必要. 而提高检测效率最为有效的方法就是减少每一帧的碰撞检测对数.

V-Clip 在实现复合 PolyTree 之间的碰撞检测时并不是以复合 PolyTree 直接检测, 而是遍历各个复合 PolyTree 的子 PolyTree, 最终以各叶节点的单位 PolyTree 来检测. 假设环境中 E 个模型, 第 i 个模型含有单位 PolyTree 个数为 E_i , 设机器人有 R 个关节, 每个关节有 R_j 个单位 PolyTree, 在机器人与环境的碰撞检测中, 每一帧需要执行的检测对数为

$$p = \sum_{i=0}^E \sum_{j=0}^R E_i R_j \quad (1)$$

设机器人左手臂有关节 L 个, 第 k 个关节有 L_k

个单位 PolyTree 身体有 B 个关节, 第 x 个关节有 B_x 个单位 PolyTree. 由于左右手关节为对称模型, 每一帧需要执行的自身关节间的碰撞检测对数为

$$q = \left(\sum_{k=0}^L L_k \right)^2 + 2 \sum_{k=0}^L \sum_{x=0}^B L_k B_x \quad (2)$$

采用包围盒技术, 利用 VRML 模型的顶点, 由 Quickhull 算法为每一个 VRML 模型构造一个包围该模型的最小凸多面体, 利用其构建一个单位 PolyTree. 设定一个阈值, 当机器人与模型之间的距离大于该阈值时, 仅执行机器人关节和模型的包围盒所对应的单位 PolyTree 之间的检测; 反之, 执行机器人关节与模型对应的复合 PolyTree 之间的检测. 当机器人与所有模型之间的距离均大于指定阈值时, 参与到碰撞检测中的单位 PolyTree 数量等于 VRML 模型的数量, 即

$$p = ER \quad (3)$$

$$q = L^2 + 2LB \quad (4)$$

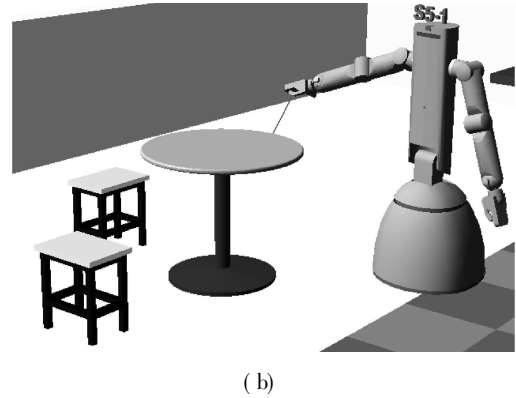
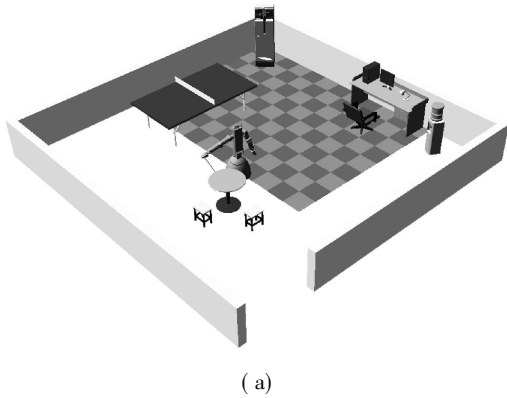


图 5 机器人与整个虚拟环境之间的检测

Fig. 5 Collision detection between robot and entire environment

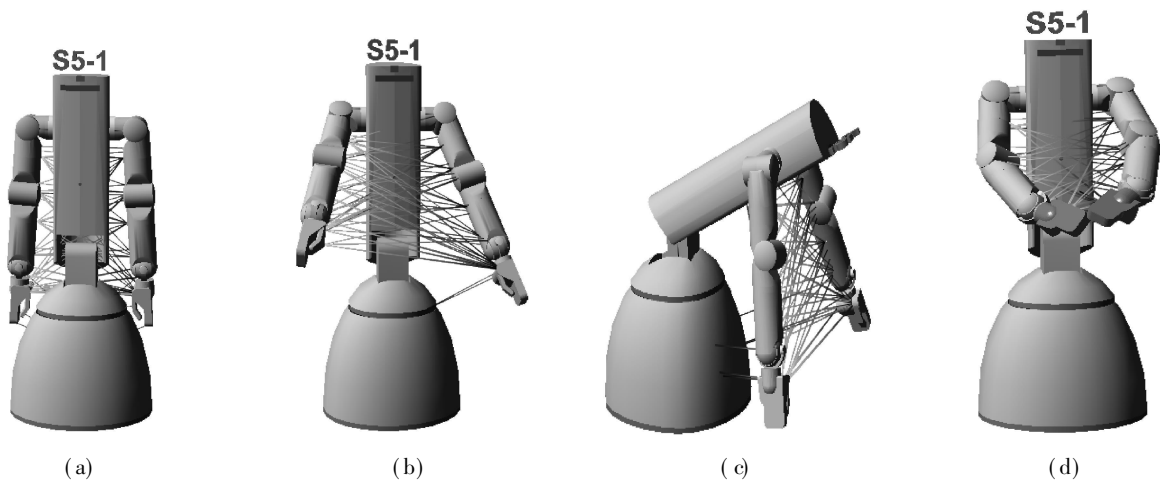


图 6 机器人自身的碰撞检测

Fig. 6 Self-collision detection of robot

因此, 可以肯定, 碰撞检测效率将大幅提高.

3 仿真实验及结果分析

本文在上海交通大学与日本安川电机联合开发的基于 Java 和 Java3D 的服务机器人三维仿真平台 3DViewer 上进行了实验验证. 硬件配置为: Intel (R) Core(TM) 2 Duo CPU T5670 1.8 GHz; 内存 1 GB; 操作系统为 Windows 7 企业版(32 位). 实现了机器人与虚拟环境之间的碰撞检测, 如图 5 所示. 机器人与环境模型之间的直线反映两者之间最近点.

机器人自身关节间的碰撞检测如图 6 所示, 每条连线均表示两检测关节之间的最近点, 一旦有碰撞发生, 相应的 2 个关节颜色将改变以发出警示. 在检测的每一帧, 除用连线表示最近点外, 控制台输出相应的距离信息, 并在碰撞将要发生时给出警告.

表 1、2 给出了该仿真实验中环境模型和机器人关节中所包含的基本形体数. 根据式(1)~(4), 优化

前 $p = 3\ 621, q = 1\ 595$. 优化后最好情况下 $p = 231, q = 135$.

表 1 环境 VRML 模型中基本形体个数

Tab.1 Number of shapes in environment VRML models

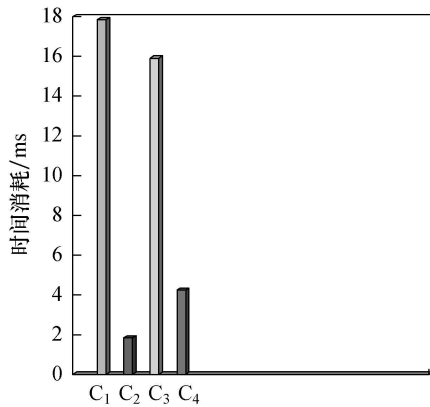
模型名称	PolyTree 个数	模型名称	PolyTree 个数
空调	5	书桌	6
乒乓球桌	12	台灯	4
圆桌	3	电脑主机	3
显示器	3	饮水机	4
方凳	3	旋转椅	5

表 2 机器人关节 VRML 模型中基本形体个数

Tab.2 Number of shapes in robot joints VRML models

关节名称	PolyTree 个数	关节名称	PolyTree 个数
body_lumbar_J1	1	Arm_J2	3
body_lumbar_J2	8	Arm_J3	4
body_vehicle	4	Arm_J4	4
Gripper_gripper	3	Arm_J5	2
Gripper_g_thumb	4	Arm_J6	1
Arm_J1	3	Arm_J7	5

图 7 所示为采用层次包围盒前后采样 1 000 次平均一帧碰撞检测所耗时间对比. 由图可见, 采用了包围盒之后碰撞检测效率大幅度提高.



C₁—优化前与环境之间检测; C₂—优化后与环境之间检测
C₃—优化前自身关节之间检测; C₄—优化后自身关节之间检测

图 7 碰撞检测时间消耗对比

Fig.7 Comparison of the time consuming during collision detection

4 结 语

本文针对双臂移动机器人仿真中碰撞检测存在大量的非凸模型, 提出了基于 VRML 节点树实现凸分解的方法, 实现了虚拟环境中模型与机器人之间以及机器人自身关节之间的碰撞检测. 同时采用了层次包围盒技术来优化碰撞检测的效率. 实验结果表明, 该方法使仿真过程具有较高的实时性和检测精度.

参考文献:

[1] 周友行, 邹湘伏, 何清华. 多臂机器人关节间的碰撞检测研究[J]. 中国工程机械学报, 2003, 1(1): 16-21.
ZHOU You-hang, ZOU Xiang-fu, HE Qing-hua. Study on collision detection of multi-boom robot's joints [J]. **Chinese Journal of Construction Machinery**, 2003, 1(1): 16-21.

[2] Chang J W, Wang W P, Kim M S. Efficient collision detection using a dual OBB-sphere bounding volume hierarchy [J]. **Computer-Aided Design**, 2010, 42(1): 143-154.

[3] Larsson T, Akenine-Möller T. Bounding volume hierarchies of slab cut balls [J]. **Computer Graphics Forum**, 2010, 28(8): 2379-2395.

[4] Larsson T, Akenine-Möller T. A dynamic bounding volume hierarchy for generalized collision detection [J]. **Computers & Graphics**, 2006, 30(3): 450-459.

[5] Bradford C B, Dobkin D P, Huhdanpaa H. The quick-hull algorithm for convex hull[R]. Geometry Center Technical Report GCG53, 1993.

[6] Brian M. V-Clip: Fast and robust polyhedral collision detection[J]. **ACM Transaction on Graphics**, 1998, 17(3): 177-208.

[7] Cameron S. A comparison of two fast algorithms for computing the distance between convex polyhedral[J]. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, 1997, 13(6): 915-920.

下期发表论文摘要预报

一种 Ad Hoc 中基于拓扑变换的改进信任度估计模型

王 堃^{a,b}, 郭 篁^{a,b}, 吴 蒙^b, 杨 震^b

(南京邮电大学 a. 物联网学院; b. 宽带无线通信与传感网技术教育部重点实验室, 南京 210003)

摘 要: 针对无线 Ad Hoc 网络中虚假推荐对信任度准确性造成的恶意影响的问题, 提出了 1 种基于拓扑变换的信任度估计模型. 分析与仿真结果表明, 该模型的全局信任度具有迭代收敛性, 加载此抵御虚假推荐的信任模型能更有效地激励节点协作, 分组成功接收率和平均丢包数都有 1 定改善, 同时更适合较大规模的网络.