

基于 CGAL 多雷达传感器覆盖范围仿真计算及可视化分析

牟超, 李钦富, 徐焱
(中国电子科学研究院, 北京 100041)

摘要: 如何快速、实时地计算与绘制多雷达传感器覆盖范围是目前雷达仿真的重点和难点。为解决此问题,在分析国内外研究成果基础上引入 CGAL 开源库,提出了一种解决方法,并基于典型的三角网格求交算法和 Delaunay 三角剖分算法进行了仿真分析。仿真结果充分验证了所提解决方法的有效性、合理性与实用性。

关键词: 多雷达传感器; 数据融合; 覆盖范围; 仿真; CGAL

中图分类号: V271.4; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)09-0049-05

Simulating Calculation and Visual Analysis on the Coverage of Multi-Radar Sensor Based on CGAL

MU Chao, LI Qin-fu, XU Yao
(China Academy of Electronics and Information Technology, Beijing 100041, China)

Abstract: In the present, it is difficult and important to calculate and draw the coverage of multi-radar sensor rapidly in real time. To solve the problem, on the basis of analyzing the existing research achievements, the CGAL library was introduced, and a solution was proposed. Simulation analysis was made for the typical algorithms of triangle grid intersected algorithm and Delaunay triangle subdivision algorithm. Experimental results demonstrate that the proposed method is effective, feasible and practical.

Key words: multi-radar sensor; data fusion; coverage; simulating; CGAL

0 引言

近年来,多雷达传感器数据融合^[1]相关问题研究已成为各国雷达发展的一个趋势,它把多个类型相同或不同的雷达传感器所提供的局部数据加以融合,消除数据之间的冗余和矛盾,最终形成对环境相对完整的感知描述,而有关其仿真计算及可视化分析也是一个极其重要的研究方向。

对多雷达传感器覆盖范围的仿真计算及可视化分析具有重要意义:1) 模拟作战环境,对整个雷达系统进行协同调度和仿真,满足适合雷达传感器部署位置对地理条件的要求^[2];2) 对多部雷达传感器共同探测某一防御区进行模拟仿真,提高雷达系统实战时的可靠性;3) 对多部雷达的“雷达覆盖比”^[3]进行评估,使多雷达传感器能够完全覆盖防御区;4) 使指战人员能够快速、准确地获得不同高度层的多雷达传感器覆盖

范围;5) 多雷达的实时探测可以及时发现敌情,上报目标位置,以便采取拦截措施并引导己方飞机攻击来袭目标。在国内,对雷达传感器覆盖范围的仿真研究取得了一定的成绩,文献[4]研究了在干扰条件下雷达传感器覆盖范围的二维可视化表现;文献[5]利用 OpenGL 实现了雷达传感器覆盖范围的三维可视化显示,但这仅仅局限于一种静态的工作能力,不能实时地获取不同高度层上的雷达覆盖范围。在国外,对雷达传感器覆盖范围的研究则是针对特定应用领域进行的,如美国 AGI 公司开发的卫星仿真开发包^[6](STK)可以提供对单部或多部雷达传感器的性能评估以及可视化分析,但是 STK 并没有解决多雷达重叠范围的问题。国外开发的 MountainZebra 是一个在复杂地形上处理和显示雷达数据的仿真系统,该系统能够按照地理精度对雷达传感器和地球物理域进行仿真与可视化分析。

Computational Geometry Algorithms Library^[7](CGAL)是一个用C++语言编写的计算几何算法库。目前,国内外在利用 CGAL 库来解决上述仿真计算问题方面无相关技术报道,本文创新性地引入 CGAL 库对多雷达传感器覆盖范围仿真计算及可视化分析进行研究。首先,对

收稿日期:2013-08-07

修回日期:2013-09-22

基金项目:总装“十二五”预研项目

作者简介:牟超(1988—),男,辽宁大连人,硕士生,研究方向为系统仿真设计、三维可视化仿真分析。

常见的几种雷达传感器的覆盖范围进行三维数学建模,然后,基于三角网格相交检测算法对传感器可视化模型进行相交检测,最后,对检测结果进行三维重构与可视化分析,由此实现了对上述问题的仿真研究及可视化分析。

1 典型雷达传感器覆盖范围的三维数学建模

根据雷达传感器覆盖范围形状的显著差异,常见的几种典型雷达传感器模型可以分为4种:简单圆锥体传感器(Simple Conic)、复杂圆锥体传感器(Complex Conic)、圆顶圆锥体传感器(Dome Conic)以及矩形传感器(Rectangular)。显然,这几种雷达传感器模型都可以用简单的几何体(圆锥体、四面体、球体等)组合而成。

典型雷达传感器覆盖范围的数学建模步骤如下所述:

1) 根据不同的类型,将雷达传感器模型拆分成多个简单的几何体;

2) 基于球坐标系对几何体进行数学建模,将几何体离散化为一组三维空间离散点。

球坐标是一种三维坐标系,它以坐标原点为参考点,由方位角、俯仰角和距离组成,由图1所示。

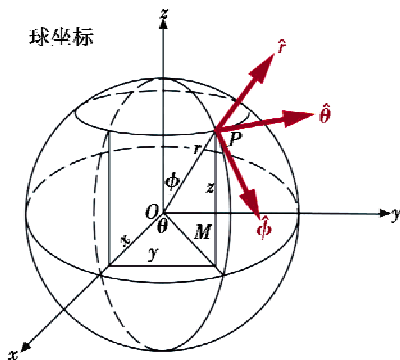


图1 球坐标系示意图

Fig.1 Spherical coordinates diagram

设 $P(x,y,z)$ 为三维空间内一点,则点 P 也可以用3个有次序的数 (r,θ,ϕ) 来确定。其中: r 为原点 O 与点 P 间的距离; θ 为有向线段 OP 与 z 轴正方向的夹角; ϕ 为从正 z 轴来看自 x 轴按逆时针方向转到 OM (OM 为线段 OP 在 xOy 面上的投影)所转过的角, M 为点 P 在 xOy 面上的投影; (r,θ,ϕ) 为点 P 的球面坐标; ϕ 为被测点 $P(r,\theta,\phi)$ 的方位角, θ 为俯仰角。球坐标系与直角坐标系转换关系为

$$x = r \cdot \sin \theta \cos \phi \quad (1)$$

$$y = r \cdot \sin \theta \sin \phi \quad (2)$$

$$z = r \cdot \cos \phi \quad (3)$$

根据球坐标公式对几何体进行建模,将几何体离散化后的三维空间离散点保存在点集容器 Point_vec 中。

3) 将离散点组织成三角网格模型,并保存该三角网格模型。

传感器覆盖范围模型的剖分角度决定了组成模型三角面的数量,剖分角度是指模型中相邻的两条经线间距或纬线间距。在建模时,使模型的经线间距与纬线间距大小相同,相邻两条经线和纬线共同组成了一个正方形,对该正方形进行对角线划分,得到两个三角形。通过这种方式,将离散点组织成三角网格模型,并采用 CGAL 内核类定义的多面体数据结构 Polyhedron 保存该三角网格模型。

2 算法分析

本文提出的解决方法分两步进行:1) 采用基于三角网格的相交检测算法对传感器互有重叠的覆盖范围进行求交计算;2) 采用基于 Delauany^[8]三角剖分算法对求交计算后的结果进行三维重构。

2.1 基于三角网格相交检测算法

基于三角网格的相交检测是计算几何中解决求交计算的有效方法之一。传感器覆盖范围模型包含了数以千计的三角面片,如果采用传统方法直接对三角形进行两两求交,会消耗大量的计算时间和硬件资源。本文采用层次包围盒方法(AABB)^[9]对模型中的三角面片进行相交检测,利用 CGAL 库中的模板类 AABB_Tree 解决了模型间的求交问题,这是仿真计算中关键的一步。

相交检测算法步骤如下所述,具体流程见图2。

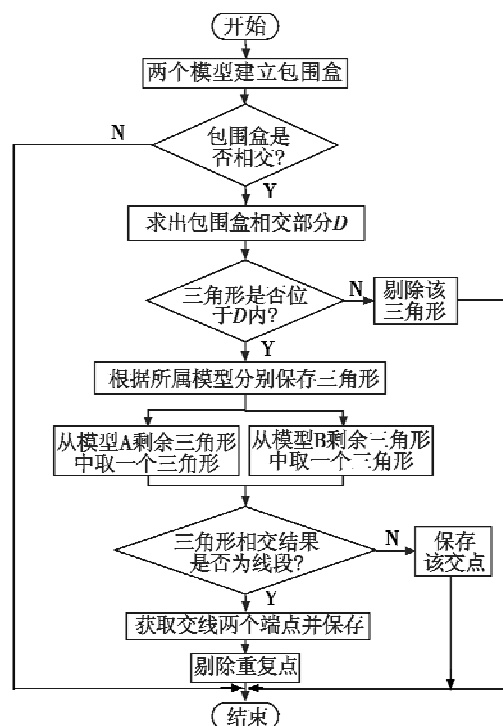


图2 求交点的算法流程图

Fig.2 Flow chart for calculating intersected points

1) 对参与求交的两个三角网格模型建立最小包围盒,并判断包围盒是否相交。如果相交,求出相交部分;否则,求交结束。

2) 分别遍历两个模型的所有三角形,判断它们是否位于两个包围盒相交的部分,如果不是,直接剔除该三角形。

3) 分别从两组剩余的三角形中各取出一个三角形,判断两个三角形的相交结果。若相交为线段,则获取并保存交线的两个端点;若相交为点,则保存该交点。

4) 保存所有交点,利用查重函数,剔除已经保存过的点。

然后,判断点与三角形的相对位置关系,从而确定点相对于可视化模型的位置关系。具体流程如图3所示。

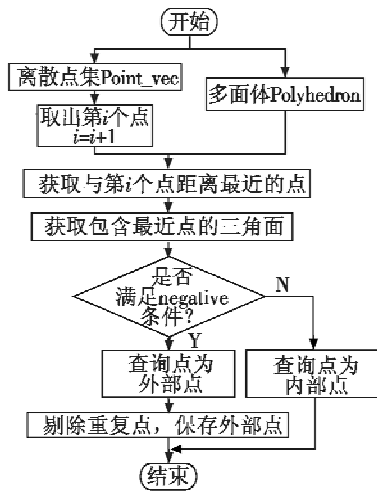


图3 判断点和平面位置关系的流程图

Fig.3 Algorithm for judging relationship between points and the plane

1) 从 Point_vec 中取出一个点,记为点 P。利用模板类 AABB_Tree 的距离查询函数,从 Polyhedron 中获取与 P 点距离最近的点,记为点 M。

2) 利用函数 Construct_support_plane 获取包含 M 点的平面,记为平面 π。

3) 利用函数 Has_on_negative_side,判断点 P 和平面 π 的位置关系。若满足 negative 条件,称点 P 为平面 π 的外部点;否则,称点 P 为平面 π 的内部点。

4) 保存所有外部点,利用查重函数,剔除已经保存过的点。

2.2 基于 Delaunay 三角剖分算法

Delaunay 三角剖分在计算几何学中占有非常重要的地位。近年来,国内外研究人员对 Delaunay 算法进行了大量的研究。目前,对二维 Delaunay 算法的研究已经较为成熟,而三维 Delaunay 算法仍然存在网格质量差、算法速度慢、稳定性差等亟需解决的问题,常见的方法

是将三维空间中 Delaunay 三角剖分问题转化为二维平面上的 Delaunay 三角剖分问题。本文借鉴同样的思想并基于 CGAL 库中的二维 Delaunay 三角剖分算法解决了三维空间中传感器覆盖范围模型的三角剖分问题。具体步骤如下:1) 对传感器覆盖范围模型求交后的结果做投影变换,将三维离散点投影到二维平面上;2) 使用二维 Delaunay 算法对投影后的离散点做三角剖分处理从而实现二维重构;3) 将二维重构结果重新投影到三维空间,完成对传感器覆盖范围模型的三维重构^[10]。

3 仿真试验分析

3.1 试验环境

硬件环境: Intel X5460 3.16 GHz CPU, 4 G 内存, NVIDIA FX1700 显卡。开发环境: Windows XP SP3, Visual Studio2010, CGAL (V3. 9), Boost (V1. 4. 7), CMake (V2. 8. 1)。

3.2 相交检测算法试验分析

根据传感器覆盖范围模型 A 和 B 剖分角度的不同,分 10 组样本对相交检测算法进行测试,如表 1 所示。

表1 十组测试样本

Table 1 Ten groups of test samples

样本类型	A 三角面数	B 三角面数	A 剖分角度/ (°)	B 剖分角度/ (°)	交点计算耗时/ s	外部点判断耗时/ s	总耗时/ s
Sample 1	50	72	36	30	1.072	0.346	1.418
Sample 2	162	144	20	21.5	1.139	0.528	1.667
Sample 3	450	288	12	15	1.438	0.711	2.149
Sample 4	648	588	10	10.5	1.761	0.935	2.696
Sample 5	800	718	9	9.5	1.912	1.249	3.161
Sample 6	1012	896	8	8.5	3.066	1.693	4.759
Sample 7	1322	1152	7	7.5	4.687	2.186	6.873
Sample 8	1800	1534	6	6.5	7.049	2.444	9.493
Sample 9	2592	2142	5	5.5	9.925	2.992	12.917
Sample 10	4050	3200	4	4.5	12.523	4.293	16.816

将交点耗时、外部点耗时以及求交总耗时进行了比较,结果如图4和图5所示。

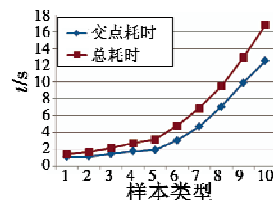


图4 交点耗时与总耗时关系

Fig.4 Relationship between intersected point consuming time and the total time

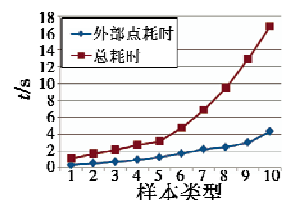


图5 外部点耗时与总耗时关系

Fig.5 Relationship between external point consuming time and the total time

其中,3种耗时的关系为

$$T_{\text{总耗时}} = T_{\text{交点}} + T_{\text{外部点}} \quad (4)$$

测试结果表明,模型的剖分角度越小,组成模型的三角面片数量越多。由表1可知,当剖分角度小于 10° 时,组成模型的三角面片数量不断增大,算法的总耗时急剧增加,不能保证算法的实时性,使算法失去了研究意义;当剖分角度大于 10° 小于 15° 时,组成模型的三角面片数不断减少,算法总耗时维持在2.3 s左右,说明在此范围内,算法耗时短,执行速度快,保证了算法的实时性;当剖分角度大于 15° 时,虽然算法耗时更短,但由于模型的剖分角度太大,导致了模型的精度下降。

表2 7组测试样本

Table 2 Seven groups of test samples

样本类型	传感器A	传感器B	A三角面数	B三角面数	A俯仰角/ $^\circ$	B俯仰角/ $^\circ$	A半径/km	B半径/km	AB间距/km	AB高度差/km	耗时/s
Sample 1	Dome Conic	Dome Conic	612	612	60	60	4	4	3	0	2.092
Sample 2	Rectangular	Dome Conic	36	612	90	60	4	4	4	0	1.437
Sample 3	Complex Conic	Dome Conic	540	612	90	90	4	4	3	0	1.898
Sample 4	Complex Conic	Dome Conic	540	612	90	90	4	4	1	0	1.875
Sample 5	Complex Conic	Dome Conic	540	612	90	90	4	4	5	0	1.973
Sample 6	Complex Conic	Dome Conic	540	612	60	70	4	4	4	2	1.934
Sample 7	Complex Conic	Dome Conic	540	612	80	80	4	4	4	3	1.866

1) 不同类型的三维可视化重构。

Sample 1为两种相同可视化类型的传感器(见图6),图7是Sample 1的重构结果。Sample 2(见图8)、Sample 3(见图10)为不同可视化类型的传感器,图9和图11分别是其重构结果。

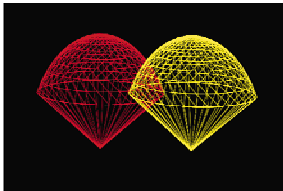


图6 Sample 1示意图
Fig.6 Schematic diagram of Sample 1

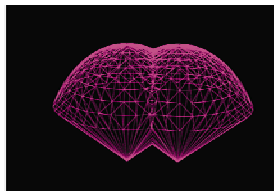


图7 Sample 1重构图
Fig.7 Reconstruction diagram of Sample 1

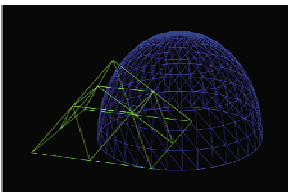


图8 Sample 2示意图
Fig.8 Schematic diagram of Sample 2

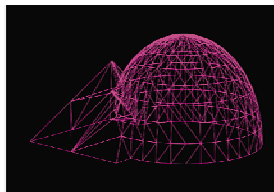


图9 Sample 2重构图
Fig.9 Reconstruction diagram of Sample 2

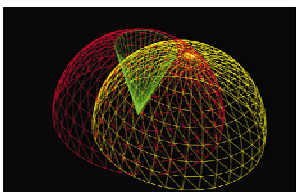


图10 Sample 3示意图
Fig.10 Schematic diagram of Sample 3

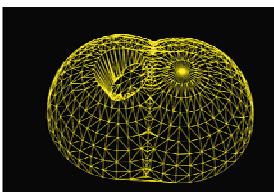


图11 Sample 3重构图
Fig.11 Reconstruction diagram of Sample 3

因此,在建模阶段,建议采用 10° 的剖分角度对传感器的覆盖范围进行建模。

3.3 Delauany 算法试验分析

为了测试算法的通用性,本文充分考虑了影响传感器覆盖范围的各种因素,从传感器类型、传感器间距离、传感器间高度差3个方面对算法进行测试与分析。根据传感器覆盖范围形状的显著差异,并考虑重构算法对三角面数量的要求,对下面剖分角度为 10° 的7组样本进行了算法测试,如表2所示。

2) 不同距离的三维可视化重构。

图12是Sample 4传感器间距为1 km时的重构结果,图11是Sample 3传感器间距为3 km时的重构结果,图13是Sample 5传感器间距为5 km时的重构结果。

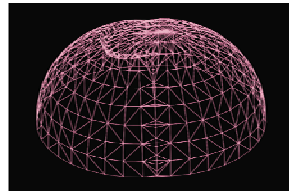


图12 Sample 4重构图
Fig.12 Reconstruction diagram of Sample 4

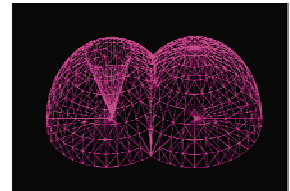


图13 Sample 5重构图
Fig.13 Reconstruction diagram of Sample 5

3) 不同高度的三维可视化重构。

图13是高度差为0 km、俯仰角为 90° 的重构结果,图14为高度差为2 km、俯仰角为 60° 的重构结果;图15是高度差为3 km、俯仰角为 80° 的重构结果。

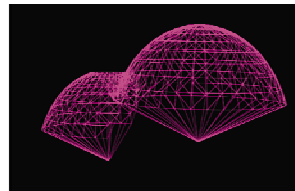


图14 Sample 6重构图
Fig.14 Reconstruction diagram of Sample 6

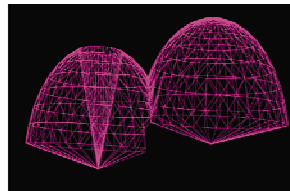


图15 Sample 7重构图
Fig.15 Reconstruction diagram of Sample 7

3组实验分别从不同类型、不同距离、不同高度3个方面对重构算法进行了测试,测试结果表明,重构结果均比较理想。由图4、图5可知,上述算法耗时短,重构速度快,执行效率高,充分保证了实时性。从重构效

果看,每组实验样本重构的三角网格正常,可视化效果好,由此验证了算法的有效性。因此,本文采用的重构算法能够有效地解决三维空间中常见的4种类型传感器覆盖范围相交重构问题。

4 结束语

针对多雷达传感器覆盖范围的仿真计算及可视化分析问题,国内没有一个通用性的解决方法。本文引入 CGAL 库,通过对常见的几种雷达传感器进行数学建模,采用基于三角网格的求交算法和 Delaunay 三角剖分算法对多个雷达传感器互有重叠的覆盖范围进行了相交性检测和三角面重构,为多雷达传感器覆盖范围的仿真计算及可视化分析提供了一种可行的解决方法。试验表明该算法实时性较强,具有一定的通用性。

后续将对多雷达传感器不同高度层上的覆盖范围进行进一步研究,主要是解决不同高度层所在平面与多雷达传感器重构体的相交问题。同时也尝试使用 CGAL 库中其他相关技术(如 Remesh、基于 Nef 的布尔操作等)解决多雷达传感器覆盖范围的仿真问题。

参考文献

- [1] 王凤朝,黄树采,韩朝超. 多传感器信息融合及其新技术研究[J]. 航空计算技术,2009,39(1):102-106.
WANG F C, HUANG S C, HAN Z C. Research on multi-sensor information fusion and new technology[J]. Aeronautical Computing Technique,2009,39(1):102-106.
- [2] 张培珍,杨根源,武志东,等. 雷达网优化部署效能评估仿真系统研究[J]. 舰船科学技术,2010,32(11):90-92.
ZHANG P Z, YANG G Y, WU Z D, et al. Study of simulation system for deployment optimization and effectiveness evaluation of radar net[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(11):90-92.
- [3] 王曙东,裴翀,郭志梅,等. 基于 SRTM 数据的中国新一代天气雷达覆盖和地形遮挡评估[J]. 气候与环境研究,2011,16(4):459-468.
WANG S D, PEI C, GUO Z M, et al. Evaluations on Chinese next generation radars coverage and terrain blockage based on SRTM data[J]. Climatic and Environmental Research, 2011, 16(4):459-468.
- [4] 张尉,程柏林,金素华. 搜索雷达探测范围的可视化技术[J]. 现代雷达,2000,22(3):44-47.
ZHANG W, CHENG B L, JIN S H. The visual technology of the detection range in search radar[J]. Modern Radar, 2000, 22(3):44-47.
- [5] 林卫明,刘德权. 利用 OpenGL 技术实现雷达探测范围的三维显示[J]. 武汉理工大学学报:交通科学与工程版,2002,26(1):72-75.
LIN W M, LIU D Q. Three-dimensional display of radar survey scope using OpenGL technique[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Transportation Science & Engineering, 2002, 26(1):72-75.
- [6] 杨颖,王琦. STK 在计算机仿真中的应用[M]. 北京:国防工业出版社,2005.
YANG Y, WANG Q. The application of STK in computer simulation [M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005.
- [7] 张明军,竺长安. 基于 CGAL 的点云三角面片重构[J]. 机械设计与制造,2007,12(12):159-161.
ZHANG M J, ZHU C A. CGAL-based reconstruction from points cloud in triangular facets [J]. Machinery Design & Manufacture, 2007, 12(12):159-161.
- [8] 余杰,吕品,郑昌文. Delaunay 三角网构建方法比较研究[J]. 中国图象图形学报,2010,15(8):1158-1167.
YU J, LÜ P, ZHENG C W. A comparative research on methods of Delaunay triangulation [J]. Journal of Image and Graphics, 2010, 15(8):1158-1167.
- [9] 郑延斌,郭凌云,刘晶晶. 混合包围盒碰撞检测算法研究[J]. 计算机工程,2012,38(13):257-259.
ZHENG Y B, GUO L Y, LIU J J. Study of hybrid bounding box collision detection algorithm[J]. Computer Engineering, 2012, 38(13):257-259.
- [10] 董箭,彭认灿,郑义东. 利用局部动态最优 Delaunay 三角网改进逐点内插算法[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2013,38(5):613-617.
DONG J, PENG R C, ZHENG Y D. An improved algorithm of point by point interpolation by using local dynamic optimal Delaunay triangulation network[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2013, 38(5):613-617.