

# 基于 Voronoi 图的移动空划分

陈金业, 李 毅, 孙青云

(四川大学 计算机学院, 四川 成都 610065)

**摘 要:** 随着我国航空母舰的出现, 固定空域已不能满足需要, 随之产生了移动空域的概念, 移动空域具有相对移动性。在对管制员工作负荷和移动空域各类型限制条件研究的基础上, 综合使用 Voronoi 图对移动平台周边的空域进行划分, 形成相对于平台划分的空域。根据类型, 移动空域可分为禁止区、危险区、限制区和责任区。充分利用 Voronoi 图的简易性, 在此基础上重新构造移动空域划分算法, 并给出仿真实验结果, 验证了该算法在移动空域划分中的可行性, 通过比较给出了传统算法的不足。

**关键词:** 移动空域; Voronoi 图; 实验

**中图分类号:** TP39

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1673-629X(2014)02-0055-04

**doi:** 10.3969/j.issn.1673-629X.2014.02.013

## Division of Mobile Airspace Based on Voronoi Diagram

CHEN Jin-ye, LI Yi, SUN Qing-yun

(College of Computer Science, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** The concept of mobile airspace emerges with the emergence of aircraft carriers, and the mobile airspace is locomotive relative to the aircraft carriers. Considering the controller's workload and the types of the mobile airspace, a method of dividing the airspace comes, which is based on the Voronoi diagram. The airspace is divided into forbidden area, dangerous area, restricted area and responsibility area. Duing to the facility of the Voronoi diagram, give the new division algorithm, and present the experimental results to verify the feasibility of this algorithm, pointing out the defects through comparison.

**Key words:** mobile airspace; Voronoi diagram; experiment

## 0 引 言

随着航空运输业的快速发展, 航空器数量越来越多, 由于恶劣天气、资源紧张等原因出现的交通拥堵成为空中交通系统面临的严重问题, 这样就不可避免地产生大量的航班延误, 并因此造成了较大的经济损失和安全隐患。

目前固定空域划分方法比较成熟, 利用 Voronoi 图<sup>[1]</sup>和加权 Voronoi 图<sup>[2]</sup>对空域进行规划。但是随着移动平台的出现, 仅仅利用这些方法已不能满足需要。文中在基于 Voronoi 图划分空域的基础上, 结合各类型移动空域的限制条件和管制员的工作负荷, 对算法进行改进, 最终确定扇区的位置。由于各类型空域形状可能不同, 因此划分的移动空域之间可能会有间隔, 这打破了扇区线性原则, 具有很大的灵活性。

## 1 移动空域概念及分类

### 1.1 移动空域的基本概念

移动空域管理是空中交通管理领域提出的一个新空域管理理念。移动空域要有一个移动平台, 空域的位置是相对平台划分的, 并在一定时间内由相应的管制员负责管理。图1是移动空域显示图。图(a)表示  $t=t_1$  时平台在位置  $P_1$ , 空域的显示示意图; 图(b)表示  $t=t_2$  时平台在位置  $P_2$ , 空域的显示示意图 ( $t_1 < t_2$ )。

如图1所示, 空域可以划分为不同的形状, 包括圆形、椭圆、扇形、矩形、多边形。

### 1.2 移动空域的划分类型

根据空域类型, 可分为限制区、责任区、危险区、禁止区, 在各类型空域下又可划分为不同子空域。空域的具体划分类型<sup>[3-6]</sup>如下:

限制区:是规定一些条件限制航空器的飞行,比禁止区低的一种空域。在该空域内,航空器的飞行并非是绝对禁止,在得到限制区空域管理部门许可的情况下,航空器可以穿越该空域。限制区是否有危险,由飞行员自身判别和推测是不够的。此种类型空域的建立一般不是长期的,所以让有关各方知道该空域在何时,何高度上限制航空器的飞行,又在何时将停止存在才是最重要的。一般只在某些时间段有作用,其他时段对飞行器无任何影响,在显示图上用 R 表示。限制区又可分为任务飞行区域、集合区域、加油区域、起降区域和训练区域。在基于移动平台划分的移动空域中,只有限制区才可以添加到飞行计划的航线中。

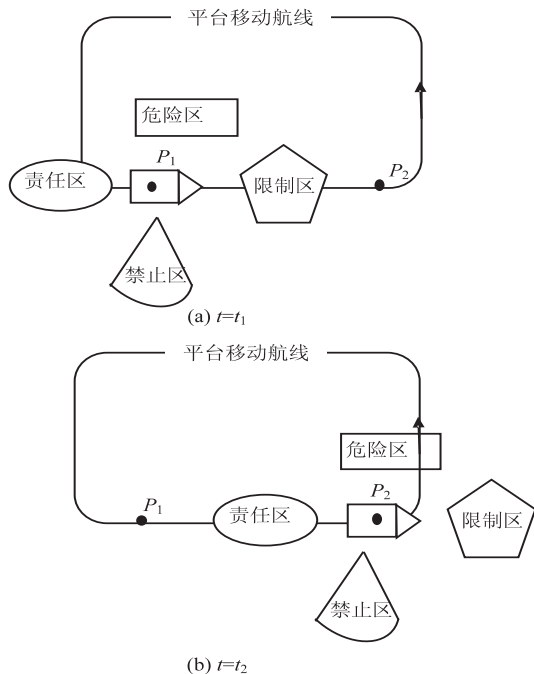


图 1 移动空域显示图

责任区:主要负责管理一些事务,包括防空识别区、平台管制区域和平台管制地带。

危险区:是在某些规定时间段内对航空器的飞行有危险的区域,在所有限制性空域中,危险区是约束、限制最少的。该区域保护被允许在其内运行的航空器,可能会影响其他航空器的运行。ICAO 规定,在公海区域,只能建立危险区,对公海飞行施加更多的限制是没有这个权限的。在显示图上用 D 表示。危险区可分为对空射击区域,空中放油区和空中投弹区。

禁止区:是任何飞行活动被禁止的区域,除非有特别紧急的情况,否则将遭受致命的灾难,在显示图上用 F 表示。

## 2 基于移动平台的移动空域划分

### 2.1 移动空域的划分流程

空域是一个国家宝贵的资源,为了能充分地利用

空域,使飞行器更加安全顺畅的飞行,在基于平台的空域设计中,使用了移动空域的概念。图 2 为移动空域的划分<sup>[7-9]</sup>流程图。

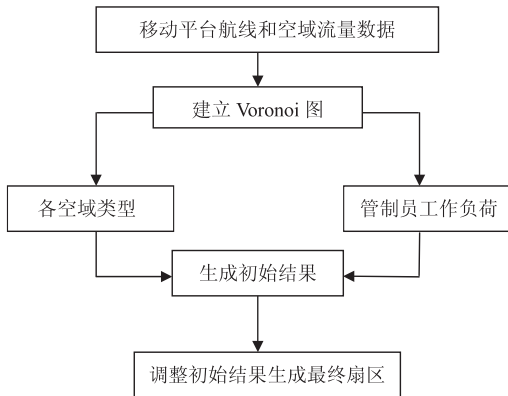


图 2 移动空域划分流程图

### 2.2 Voronoi 图及空域划分算法

#### 2.2.1 Voronoi 图的概念

Voronoi 图<sup>[10-13]</sup>在计算几何领域中是一种几何结构,也是分割空间的一种方法,最早由俄国数学家 M. G. Voronoi 于 1908 年提出,并以他的名字命名的。Voronoi 图是针对平面  $n$  个离散点而言的,它将平面分成几个区域,每个区域包括一个点,该区是到该点距离最近点的集合。

图 3 为平面中  $n$  个点的 Voronoi 图,虚线表示点  $P_m$  与其余各点的连线,选取平面内两个点  $P_m, P_n, L_1$  为线段  $P_m P_n$  的垂直平分线,  $L_1$  将  $P_m$  和  $P_n$  所在平面分成两个,在半平面选一点  $P$ , 则  $P_m$  所在半平面中具有  $|PP_m| < |PP_n|$ 。  $L_2, L_3, L_4$  和  $L_5$  分别是其余各连线的垂直平分线。

对于平面上  $n$  个点的点集  $S$ , 定义  $V(P_m) = \cap H(P_m, P_n)$ , 即  $V(P_m)$  表示比其他点更接近  $P_m$  的点的轨迹是  $n-1$  个半平面的交集,它是一个不多于  $n-1$  条边的凸多边形区域,称为关联于  $P_m$  的 Voronoi 多边形或关联于  $P_m$  的 Voronoi 多边形域。

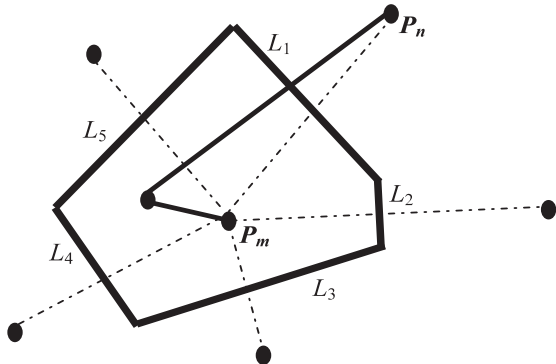


图 3 平面上  $n$  个点的 Voronoi 图

对点集  $S$  中的每个点作一个 Voronoi 多边形, 这样  $n$  个 Voronoi 多边形组成的图形称为 Voronoi 图, 记做  $Vor(S)$ 。

### 2.2.2 算法描述

在移动平台的航线区域上,以移动空域边界上的航路点和在该空域范围中航线交叉点为节点,建立一点集  $P = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}$ ,  $P_i \in R^2$  且  $P_i \neq P_j$  for  $i \neq j$ ,  $i, j \in \{1, 2, \dots, n\}$ , 作  $P_i P_j$  连线的垂直平分线,平面被分成两半,用  $H_i(P_i, P_j)$  表示  $P_i$  一侧的半空间,称  $V(P_i) = \bigcap_{j \neq i} \{P \mid d(P, P_i) \leq d(P, P_j)\}$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为  $R^2$  空间中与  $P_i$  关联的 Voronoi 域,集合  $\gamma(P) = \bigcup_{i=1}^n V(P_i)$  为点集  $P$  生成的平面 Voronoi 图。

划分 Voronoi 图用到的数据结构有:

PL: Voronoi 图的各项点坐标;

EL: 生成的边,边表中记录该边左右侧相应区域编号;

UL 和 DL 分别表示扫描已通过点集的上限和下限。

算法:

1) 在平面上将  $n$  个输入点按  $x, y$  坐标字典式排序,编号为  $P_0, P_1, P_2, \dots, P_{n-1}$ ;

2) 初始化垂直扫描线在点  $P_0$  处,此时  $UL = \{P_0\}$ ,  $DL = \{P_0\}$ ,  $PL = \emptyset$ ,  $EL = \emptyset$ ;

3) 如果  $P_1, P_2, \dots, P_{i-1}$  点已完成划分,此时垂直扫描线到达点  $P_i$ , if ( $i=n$ ), 算法结束,否则

(1) if 表  $UL = \{P_0\}$ , 则左支撑点  $K_1 = P_0$ , 右支撑点  $K_2 = P_0$ , 转(3);

else 延长 UL 中除  $P_0$  外的各节点对应的边,各边将当前垂直平分线分成不同部分,确定  $P_i$  位于哪部分,由此确定左支撑点  $K_1$ 。将边  $P_i K_1$  加入 UL, 删除位于  $K_1$  后面的边。

(2) 对 DL 表做同样的处理,找到当前点集的  $K_2$  支撑点,更新 DL。

(3) 做  $P_i K_1$  连线的垂直平分线记为  $L$ , 计算  $L$  和  $V(K_1)$  各边的交点。

如果没交点,就在图中画出该边,  $P_i$  划分完成,  $i+1$ , 返回 3)。

如果和边  $e_1$  有交点记作  $V_1$ , 则添加以  $V_1$  为终点的垂直平分线  $L_j$  到 EL,  $EL = \{L_1, L_2, \dots, L_j\}$  和  $V_1$  添加到点表 PL, 将  $e_1$  的另一侧编号赋给  $K_1$ 。

(4) 如果左右支撑点不相等,就一直做下边的工作。

计算  $P_i K_1$  的垂直平分线与  $K_1$  关联的 Voronoi 域各边的交点, 设与边  $e_2$  的交点为  $V_2$ , 将  $V_2$  加入 PL 中, 将  $V_1 V_2$  连线的边加入 EL 中, 将  $e_2$  另一边空域编号赋给  $K_1$ , 令  $e_1 = e_2$ ,  $v_1 = v_2$ 。

(5) 此时  $K_1 = K_2$ , 从  $V_1$  开始, 做  $P_i K_1$  连线的垂直平分线, 更新 PL 和 EL,  $P_i$  划分完成,  $i+1$ , 返回 3)。

移动空域的划分:

首先由飞行计划确定以移动平台为中心、半径为  $R$  的空域, 以及临时空域的面积  $S_k$ , 移动空域划分在以  $P$  为圆心、半径为  $R$  的范围内。

目前移动空域可分为禁止区、危险区、限制区和责任区这四类不同的临时空域, 以后可能会添加新的临时空域类型。则

$$a[k] = \frac{L + \sum_{j=1}^m M_j}{S_k / \pi R^2} \quad (1)$$

式中,  $k$  为相对于平台划分的第  $k$  个临时空域;  $L$  表示在该临时空域范围中的工作负荷;  $M_j$  为根据 Voronoi 图划分的第  $j$  个固定空域的工作负荷;  $m$  为该临时空域覆盖范围中固定空域的个数。根据移动空域类型的不同, 在数组中最终确定要划分的移动空域位置, 当临时空域为禁止区时, 取  $\max(a[k])$  中的  $k$  值; 当临时空域为责任区时, 取  $\min(a[k])$  中的  $k$  值; 当临时空域为危险区或限制区时, 取最接近  $\text{medi}(a[k])$  的  $k$  值;  $k$  值确定之后移动空域随之也就确定了。

## 3 实验分析

如图 4 所示, 移动平台在坐标  $(0, 0)$ , 空域范围为相对于平台  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$ , 图中黑色的圆点表示航路交叉点, 虚线为航路交叉点的连线, 实线为连线的垂直平分线。图 4 为模拟相对于移动平台  $50 \text{ km} \times 50 \text{ km}$  范围划分出的 Voronoi 图。

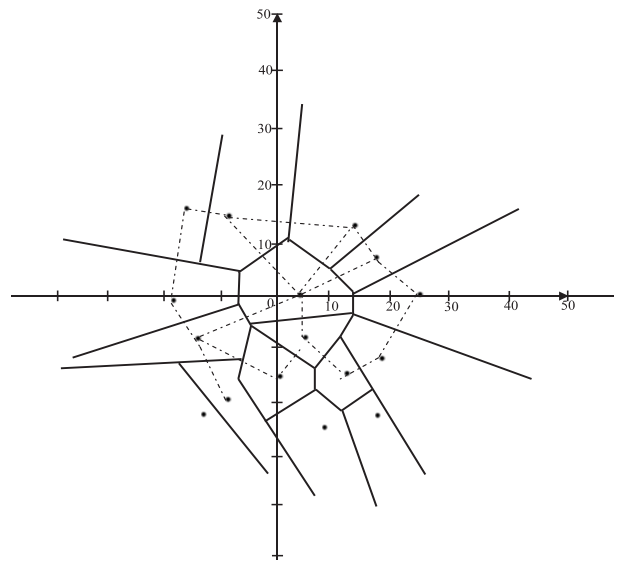


图 4 Voronoi 图划分空域

从飞行计划中读出各类型移动空域的工作负荷、空域面积以及形状, 同时, 统计出相对于移动平台周围范围内, 各个固定空域的工作负荷<sup>[12]</sup>。实验中, 以划分禁止区为例, 空域形状为扇形, 面积为  $127.17 \text{ km}^2$ ,

$R$  为 50 km,实验过程中各个移动空域的具体数据如表 1 所示。

表 1 实验数据

空域序号 $k$	移动空域负荷 $L/s$	固定空域负荷	$a[k]$
①	1.625	23.83	1 571.296
②	1.625	33.042	2 139.938
③	1.625	42.364	2 715.370
④	1.625	25.176	1 654.382
⑤	1.625	47.236	3 016.111
⑥	1.625	19.266	1 289.567
⑦	1.625	35.316	2 280.308

分析表 1 中的数据,利用  $\text{medi}(a[k])$  确定禁止区最终的位置。图 5 中⑤表示最终确定的禁止区,虚线为实验过程中划分的禁止区。

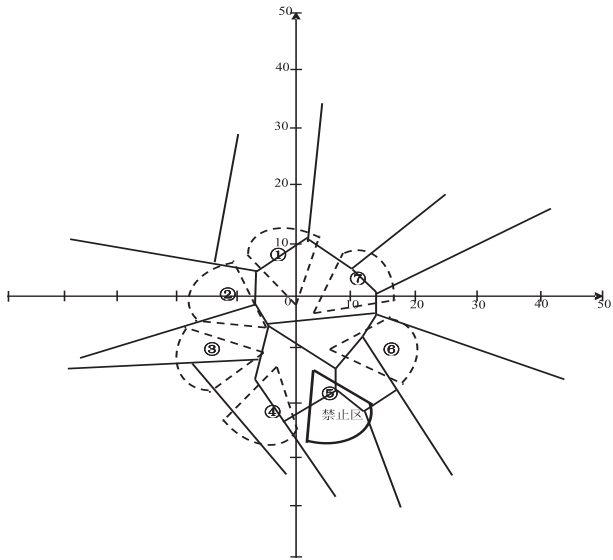


图 5 禁止区划分图

危险区、限制区和责任区利用同样的思路划分,在这不再详细划分。实验结果表明,该算法比传统的划分空域算法更具优越性。传统的划分空域的方法是根据飞行计划中空域的形状,直接使用鼠标在三维实景图中画点,计算机根据这些点来生成计划中空域的形状,用这种方法划分空域,点的选择具有随意性,划分的空域面积是手动决定的,没有考虑到该移动空域覆盖范围中固定空域的管制员工作负荷,并且空域划分完之后是不能够通过鼠标来拖动的。

文中的算法首先要根据飞行计划确定空域的形状和空域类型,之后用户只需在平台周围区域中点击鼠标,计算机就会根据算法自动在视景图的适当位置划分出该空域,该算法考虑到了移动空域覆盖范围内固定空域中管制员的工作负荷,在一定程度上减少了航

空器之间的冲突;同时,为了避免划分出的空域出现重叠现象,用户可以通过拖动鼠标将移动空域放在合适的位置,比传统的划分移动空域方法更方便,更具有灵活性。然而该算法也存在一定的缺陷,在某种程度上限制了用户选择移动空域位置的自由。

4 结束语

根据平台的移动性将平台周边的空域划分为移动空域,在实验中,验证了这种方法的可行性。文中介绍了移动空域的概念、空域类型、移动空域的划分算法以及对该算法的仿真实验,并比较了该算法和传统的划分移动空域的方法。文中重点介绍了移动空域划分算法和对该算法的实验验证。

参考文献:

[1] 赵文婷,彭俊毅. 基于 Voronoi 图的无人机航迹规划[J]. 系统仿真学报,2006,18(z2):159-162.

[2] 叶媛媛,闵春平,沈林成,等. 基于 Voronoi 图的无人机空域任务规划方法研究[J]. 系统仿真学报,2005,17(6):1353-1355.

[3] 卢璐. 论空域扇区的合理划分[J]. 科协论坛:下半月,2013(1):151-152.

[4] 宗大伟,唐月红,韩松臣. 关于空域扇区的优化划分[J]. 常熟理工学院学报(自然科学版),2007,21(2):6-8.

[5] 刘松. 美国机场及空域容量评估概况[J]. 空中交通管理,2003(3):59-61.

[6] Ehrmanntraut R. Airspace design process for dynamic sectorisation[C]//Proc of digital avionics systems conference. [s. l.]:[s. n.],2007.

[7] 中国军事大辞海编写组. 中国军事大辞海[M]. 北京:中国线装书局,2010.

[8] 腾英元,高申坤. 基于动态空域管理的安全性研究[J]. 沈阳航空航天大学学报,2011,28(4):63-66.

[9] 孙晓鸣. 陆战场空域综合管理[J]. 指挥信息系统与技术,2011,2(3):62-65.

[10] 刘振,史建国,高晓光. Voronoi 图在航迹规划中的应用[J]. 航空学报,2008,29(Sup):s16-s18.

[11] 王新生,李全,郭庆胜,等. Voronoi 图的扩展、生成及其应用于界定城市空间影响范围[J]. 华中师范大学学报(自然科学版),2002,36(1):107-111.

[12] Zhi Hongan. Generation algorithm and application of Matlab-based Voronoi diagram with urban obstacles[C]//Proc of AIMSEC. [s. l.]:[s. n.],2011:2123-2125.

[13] Lupu M. Traffic complexity of intersecting flows of aircraft under variations of pilot preferences in maneuver choice[C]//Proc of CDC. [s. l.]:[s. n.],2010:1190-1193.

基于Voronoi图的移动空划分

作者：[陈金业](#)，[李毅](#)，[孙青云](#)，[CHEN Jin-ye](#)，[LI Yi](#)，[SUN Qing-yun](#)

作者单位：[四川大学 计算机学院, 四川 成都, 610065](#)

刊名：[计算机技术与发展](#)

ISTIC

英文刊名：[Computer Technology and Development](#)

年，卷(期)：2014(2)

本文链接：[http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_wjfz201402014.aspx](http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_wjfz201402014.aspx)