

基于 UAV 地面站避让系统的地理围栏算法设计与仿真

强明辉^{1,2,3}, 把翠芳¹

(1. 兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050; 2. 甘肃省工业过程先进控制重点实验室, 兰州 730050; 3. 兰州理工大学 电气与控制工程国家级实验教学示范中心, 兰州 730050)

摘要:防止无人机闯入禁飞空域在技术层面的研究主要是感知与规避系统,而感知与规避技术发展尚未成熟。文中提出了一种无人机基于地理围栏的地面站避让系统模型,设计优化地理围栏算法,通过划分禁飞区域,定义围栏事件,设置触发事件判断无人机是否闯入禁飞区域;搭建半实物仿真平台,在MatLab环境下对地理围栏算法进行仿真验证。结果表明,地理围栏算法能够准确判断无人机是否闯入禁飞区,可以指导地面站避让系统的软件设计,避免无人机闯入禁飞区域。

关键词:无人机;感知与规避;禁飞空域;地理围栏;多面体

中图分类号:TP273;V279 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9944(2018)07-0010-05

Design and Simulation of Geo-fencing Algorithm Based on UAV Ground Station Avoidance System

QIANG Ming-hui^{1,2,3}, BA Cui-fang¹

(1.College of Electrical and Information Engineering,Lanzhou University of Technology,Lanzhou 730050,China;2.Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes,Lanzhou 730050,China;3.National Demonstration Center for Experimental Electrical and Control Engineering Education,Lanzhou University of Technology,Lanzhou 730050, China)

Abstract:The research on preventing UAVs from entering the forbidden airspace is mainly based on the sense and avoid system,but the development of sense and avoid technique is not mature. A ground avoidance system model of UAV is put forward,and the algorithm and optimization of geo-fencing is designed. By dividing the no fly area, defining the fence events and setting the trigger events to judge whether the UAV enters the no fly area. To build a semi physical simulation platform based on MatLab simulation for geo-fencing algorithm,simulation results show that the method can accurately judge whether the UAV into the no fly zone,can guide the ground station monitoring system software design to avoid UAV entering the no fly zone.

Key words:unmanned aerial vehicle(UAV);perception and avoidance;no fly airspace;geo-fencing fence;polyhedron

随着功能越来越先进的新式无人机不断涌现,同时也带来诸多安全隐患^[1],如自身设备安全问题、社会安全问题。无人机在机场附近飞行威胁民航客机的起降,在国家机关和军队驻地等敏感区域进行

航拍,窃取、危害国家安全,以及无人机操作不当闯入人群密集区域,造成人身伤害等。因此,防止无人机进入禁飞区域,实现无人机的安全应用是无人机发展的一个关键问题,其中感知与规避系统^[2-3]在目

收稿日期:2018-04-04;修订日期:2018-05-20

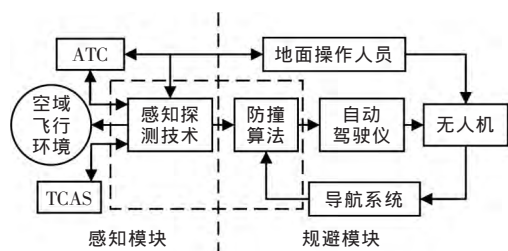
作者简介:强明辉(1960—),男,本科,教授级高工,研究方向为过程控制、检测技术等;把翠芳(1991—),女,硕士,研究方向为智能控制、无人机安全。

前的研究中扮演了至关重要的角色。

无论是陆基的还是机载的感知与规避系统,都旨在为无人机及其操作人员提供“看见与避让”以及飞行的保障技术,然而目前国内外的感知与规避技术目前发展尚未成熟。其技术难点有以下两方面原因:①由于低空慢速微型无人机的发展,尤其体型越来越小,对其的防御和打击很难实现精、准、快。②在无人机的感知探测技术方面,由于现代无人机的机体结构广泛选用复合材料等性能良好的材料制作,一些无人机本身具有雷达隐身功能或者动力装置为电动机、活塞式发动机,其红外信号的特征极弱,而且低空慢速微型无人机的体型越来越小,使得无人机很难被雷达、声学、光学、红外线的探测器发现。在使用时无人机还可以自主规避固定的雷达站和防空区域。因此实现对无人机的感知探测变得困难。

1 无人机感知与规避系统

目前,典型的无人机避让禁飞区的体系是无人机感知与规避系统,系统模型如图1所示。



ATC—空中交通管制;TCAS—空中交通防撞系统

图1 无人机感知与规避系统模型

Fig.1 UAV sense and avoid system model

该系统的难点是感知模块中感知探测技术和防撞算法模块中的防撞算法。具体如下:

1)感知探测有雷达、视觉、EO/IR(光电/红外)等技术。但是,探测性能受到无人机姿态影响而存在盲区,如在坡度转弯时视场将随着侧倾角在水平面上转动从而导致很多入侵机无法被探测。探测范围、扫描角速度、更新率和信号质量等均需要进一步改进提高。

2)防撞算法可归纳为2种:一种是采用几何算法,通过分析无人机和入侵机在几何空间的相对运动关系,按照冲突探测与解脱实施被动式防撞。另一种是转化为最小安全间隔约束条件下的航迹规划问题,采用航迹规划算法、根据感知探测的入侵

机的状态信息主动规划从当前位置到目标位置的无碰撞安全航迹。这2种算法在实施性和效率上尚有待提高。

综上,针对感知与规避系统的技术缺陷,文中提出了一种无人机基于地理围栏的地面站避让系统,将地理围栏技术^[4]——一种主动式的地理位置服务——应用于无人机地面站,预先划定禁飞区域(静态地理围栏),地面站接收无人机的定位信息,利用地理围栏算法解算判断无人机是否进入禁飞区域,并设置进入禁飞区立即会通知地面站操作人员,操控无人机避让。其中地理围栏算法的研究与优化对于无人机在空域的融合以及安全飞行有很大的研究意义。

2 基于地理围栏的地面站避让系统模型

基于地理围栏的地面站避让系统实现的具体过程是,通过在无人机地面站系统中,引入地理围栏、定义围栏事件,在地理信息系统 GIS(geographic information system)平台的支持下,首先在地面站电子地图中划分禁飞区域,然后由无人机机载 GPS 定位模块实时向地面站传送无人机位置信息,利用地理围栏算法解算无人机位置与预划分禁飞区域的位置关系,从而判断无人机是否进入禁飞区域,若未进入且没有进入禁飞区域的趋势,则无人机正常飞行;若进入禁飞区域,则通知地面操作人员,向飞行控制系统传达返航或避让指令,进而实现无人机对禁飞区域的避让。基于地理围栏的地面站的避让系统原理如图2所示。

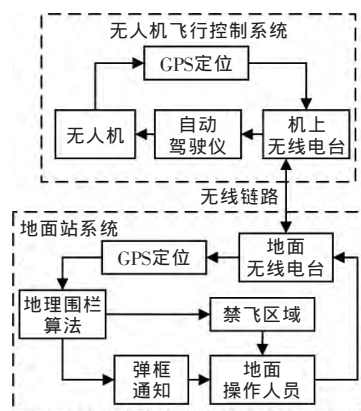


图2 地面站的避让系统模型

Fig.2 Avoid system model of ground station

所研究的新型无人机避让禁飞区域的系统中,地理围栏算法的设计是关键,具体研究设计适合该

系统的地理围栏算法过程分为 2 步:①研究常用的典型多边形地理围栏;②优化多边形地理围栏,使得系统的避让准确度更高。

3 地理围栏算法

3.1 常用多边形围栏算法

实际应用中,禁飞区域的不规则性,而且地理围栏侧重于对区域边界的界定,可以准确勾勒出小区、写字楼等特定坐标的实际形状、区域,因此地理围栏一般为不规则的多边形区域。具体分为 2 个阶段:①使用 R 树索引^[5]快速检测无人机测试点是否在最小边界矩形内,并由最小边界矩形将多边形分割嵌套;②根据 X 值将交叉点进行排序。整理出所有交叉点后。判断交叉点与测试点的关系,如果测试点的值将在 2 个排序点之间,那么它将位于多边形内部^[6],否则位于多边形外部。

多边形^[6]由一条闭合的路径所界定,由有限的直线段组成,用点 P_1, \dots, P_n (其中 $n=1, 2, \dots$) 来表示。多边形的顶点逆时针排序如图 3 所示。图中, $P_1P_2, \dots, P_{n-1}P_n, P_nP_1$ 为多边形的边; P_n 为多边形的顶点; I_p 为多边形与直线的交点。默认规则是逆时针顺序为正,顺时针顺序为负。

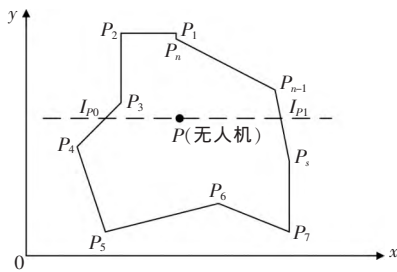


图 3 多边形的顶点逆时针排序

Fig.3 Vertex reverse clockwise ordering graph of a polygon

由图可见,逆时针排列多边形顶点,其坐标分别为 $P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), \dots, P_n(X_n, Y_n)$ 。假设无人机测试点为 $P(x, y)$,通过点 P 画 1 条垂直于 y 轴的直线;多边形的每个点是具有 X 坐标和 Y 坐标的位置,将其应用于地理围栏,可以将 X 坐标视为经度,将 Y 坐标视为纬度。算法描述如下:

①划定多边形区域,找出所选多边形的左、右、最上面和最下面的顶点。

②获取多边形的最小边界矩形并将其添加到 R 树^[5]。

③多边形的边数为 poly_n ,具体由第 1 个点 P_1 依

次连接到最后 1 个点 P_n 再与点 P_1 连接构成。

④将无人机测试点 P 的 y 坐标与多边形每组两两相交边的 2 个顶点的 Y 坐标进行比较,检查是否介于这两边的坐标之间,即

$$Y_{\min} \leq y \leq Y_{\max} \quad (1)$$

式中: Y_{\min} 为 2 个顶点中较小的; Y_{\max} 为 2 个顶点中较大的。

⑤利用光线投射法,绘制垂直光线通过测试点,与多边形的两边会有交点。将测试点左右两侧的任意交点分别记为点 I 和点 E ,根据斜率的方程

$$K_{IE} = \frac{Y_{\text{last}} - Y_{\text{start}}}{X_{\text{last}} - X_{\text{start}}} \quad (2)$$

求出斜率 K_{IE} ,带入方程

$$x_p = x_{EP_0} + (y_p - y_{EP_0}) / K_{IE} \quad (3)$$

求出测试点 P 的 x 坐标值。

⑥根据 X 值将多边形的交点进行排序。

⑦判断测试点与多边形的位置关系。如果测试点的 x 值在 2 个排序点的 X 值之间,那么测试点位于多边形内部,否则位于多边形外部。

其中最小边界矩形框的解法如图 4 所示。定义 P, S, T 的坐标分别为 $P(X_p, Y_p), S(X_s, Y_s), T(X_t, Y_t)$ 。当 P 在点 S 的右边和点 T 的左边时,判断点 P 和线 ST 的位置关系的方法为

$$K_{ST} = \frac{Y_t - Y_s}{X_t - X_s} \quad (4)$$

式中: K_{ST} 为线 ST 的斜率。

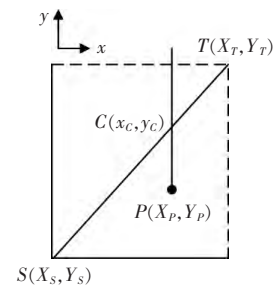


图 4 最小矩形边框

Fig.4 Minimum rectangular border

从 R 树索引中获得多边形的最小矩形边界框后,再检查判断无人机测试点与最小矩形边界框的位置关系。如果无人机测试点在最小矩形边界框的内部,则计算公式为

$$y_c = Y_s + \frac{Y_t - Y_s}{X_t - X_s} (X_p - X_s) \quad (5)$$

式中: y_c 为垂直光线与线 ST 交点 C 的坐标。

如果 $y_c > Y_p$ 且垂直光线与多边形的边交叉,那

么与多边形的交点数+1,并且继续检测多边形的下一条边;如果 $y_c > Y_p$ 且垂直光线与多边形的边没有交叉,则直接检测多边形的下一条边。当检测结束,若交点总数是奇数,即可判断无人机测试点 P 在多边形外部。

3.2 优化地理围栏算法

目前常用的地理围栏算法多用于应用程序等场景,二维空间的平面围栏即可满足需求。无人机的飞行域为三维空间,以此针对无人机有限的飞行空域中禁飞区域的划定,除了经纬度,还需要有高度的规定,使得地理围栏的功能更加精准,性能更加优越。

在常用地理围栏的算法基础上,添加高度参数进行算法优化。具体的实现过程有2部分:①利用八叉树算法^[7],快速检测无人机测试点是否在最小边界长方体内,并由八叉树算法将多面体分割嵌套;②如果多面体在最小边界长方体内部,则继续判断。

无人机测试点在多面体地理围栏内部的充分必要条件是:多面体每个表面上任意一点到无人机测试点 P 的向量和该平面法向量的数量积 ≤ 0 。其中,全部等于0表明 P 在多面体地理围栏的边界线上;全部小于0表明 P 在多面体地理围栏的内部。

长方体地理围栏是典型的多面体地理围栏。假设,无人机定位的GPS位置信息为 $P(X_0, Y_0, Z_0)$,经过坐标转换算法,无人机在电子地图上的位置信息为 $P(X'_0, Y'_0, Z'_0)$ 。设,长方体地理围栏由 $A(X_A, Y_A, Z_A), A'(X'_A, Y'_A, Z'_A), B(X_B, Y_B, Z_B), B'(X'_B, Y'_B, Z'_B), C(X_C, Y_C, Z_C), C'(X'_C, Y'_C, Z'_C), D(X_D, Y_D, Z_D), D'(X'_D, Y'_D, Z'_D)$ 依次连接构成,如图5所示。(规定长方体每个面的法向量朝外)那么长方体地理围栏算法规则如下:

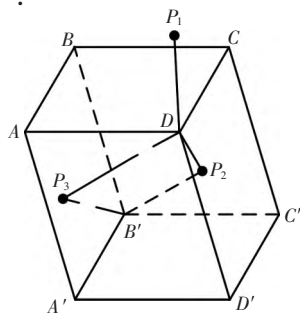


图5 空间测试点与长方体位置关系

Fig.5 Positional relation between point and hexahedron in space

规则1 分别求出长方体顶点 D 到点 P 的向量和长方体以点 D 为顶点的3个表面法向量的数量积,这3个表面分别是面 $DCC'D'$,面 $DABC$ 和面 $DAA'D'$ 。在循环求数量积的过程中,如果数量积大于0,循环中断,直接可以判断无人机测试点在长方体地理围栏外部,如图5中 P_1 点所示。循环结束,若3个数量积中存在等于0的值,则测试点在长方体地理围栏内部;否则,转到规则2继续进行判断。

规则2 分别求出长方体顶点 A' 到点 P 的向量和长方体以点 A' 为顶点的3个面(即面 $A'B'BA$,面 $A'D'DA$ 和面 $A'D'C'B'$)法向量的数量积。在循环求数量积的过程中,如果数量积大于0,则循环中断,直接可判断无人机测试点在长方体地理围栏外部,如图5中 P_3 点所示。若数量积存在等于0的值,无人机测试点在长方体地理围栏外部,如图5中 P_2 点。

4 地理围栏算法仿真与分析

为了验证提出的地理围栏算法及其优化算法的有效性,通过已经建立的无人机地面站的避让系统模型,在地面站半实物平台^[8]中,对2种地理围栏算法进行MatLab仿真验证。地面站系统半物理仿真平台结构如图6所示。

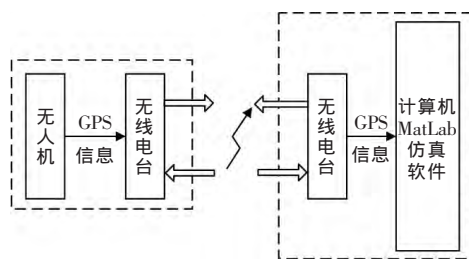


图6 地面站系统半物理仿真平台结构

Fig.6 Semi physical simulation platform structure of ground station system

小型无人机飞行使用GPS实现导航。GPS目前采用WGS-84坐标系,而地理围栏建立检测过程需要在电子地图上进行操作。由于电子地图往往采用BJ-54坐标系,因此需要进行坐标转换^[9]。无人机GPS坐标信息经过坐标转换之后,再通过MatLab软件进行算法仿真^[10]验证。地理围栏算法工作流程如图7所示,具体如下:

1)矩形地理围栏算法仿真。矩形地理围栏参数设置为

$$P_0(1000, 500), P_1(3000, 500) \\ P_2(1000, 3000), P_3(1000, 1000)$$

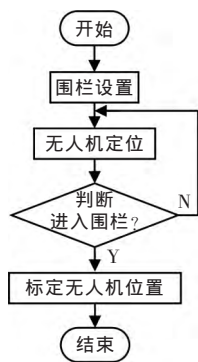


图7 地理围栏算法流程

Fig.7 Flow chart of geo-fencing algorithm

无人机的 GPS 位置信息为 $P(3000, 2500, 1500)$ 。经过地理围栏算法解算, 进行判断, 其仿真结果如图 8 所示。

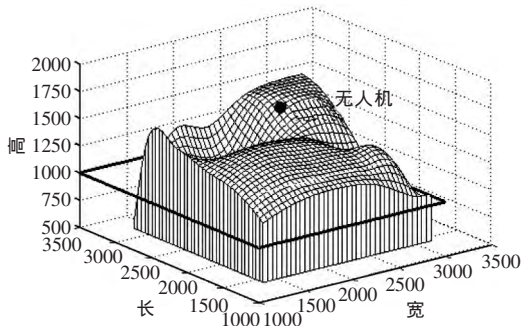


图8 矩形方法仿真

Fig.8 Rectangular method simulation

2) 长方体地理围栏算法仿真。设置长方体围栏参数为

$A(3500, 500, 2000), A'(3500, 500, 500)$
 $B(3500, 3000, 2000), B'(3500, 3000, 500)$
 $C(1000, 3000, 2000), C'(1000, 3000, 500)$
 $D(1000, 1000, 2000), D'(1000, 1000, 500)$

无人机的 GPS 位置信息经过坐标转换为 $P(3000, 2500, 1500)$, 经过地理围栏算法解算, 进行判断。仿真结果如图 9 所示。

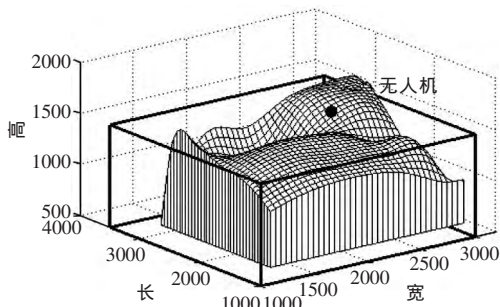


图9 多面体算法仿真

Fig.9 Polyhedron algorithm simulation

仿真结果表明, 这 2 种算法均具有可行性, 而优化算法可以更加精细地划分地理围栏网格, 符合无人机的空间需求, 尤其对于城市复杂的地理结构, 可以在空间上提供更加准确的围栏边界, 更符合实际应用, 从而提升设计研究的无人机地面站避让系统的避让精确度与安全水平。

5 结语

针对无人机带来社会安全问题, 以及无人机感知与规避系统在技术上的难点, 研究设计了一种无人机飞行区域地理围栏管理的新方法。地理围栏作为一种接近式触发服务, 能根据无人机系统的需求自定义触发规则如触发范围、形状、无人机行为等。该方法解决了无人机感知和避让系统的若干缺陷, 基于地理围栏的地面站避让系统, 创新地利用地理围栏算法与无人机的机载定位导航系统的结合, 无需雷达等其它探测机载设备, 解决了感知探测技术的难点, 更加具有实际应用性; 该系统相比无人机感知与避让系统, 操作实现更容易, 利用地理围栏优化算法还可以实现禁飞区域在空间中的精确划分, 使得无人机准确避让; 该系统具有扩展性, 可以将地理围栏算法嵌入无人机飞行控制系统, 进而完善系统的自主性, 提升智能化水平。

参考文献:

- [1] 李春锦. 无人机系统的运行管理[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011.
- [2] 刘慧颖, 白存儒, 杨广珺. 无人机自主防撞关键技术与应用分析[J]. 航空工程进展, 2014, 5(2): 141-147.
- [3] 张瑞红. 无人机感知与规避技术研究进展[J/OL]. 中文科技期刊数据库(文摘版): 工程技术, 2016(8): 00027.
- [4] 向华. 一种实时地理位置数据分析技术的探索与实现[J]. 城市勘测, 2016, 31(2): 11-14.
- [5] Zhang Z B, Zhang J P, Yang J, et al. A new approach to creating spatial index with R-tree[C]//International Conference on Machine Learning and Cybernetics. IEEE, 2007: 2645-2648.
- [6] 周德培. 判定点是否在多边形内部的算法[J]. 北京理工大学学报, 1995, 15(4): 437-440.
- [7] 姚新宇, 黄柯棣. 半实物仿真系统的实时性分析[J]. 计算机仿真, 1999, 16(4): 51-54.
- [8] 姚顽强, 郑俊良, 陈鹏, 等. 八叉树索引的三维点云数据压缩算法[J]. 测绘科学, 2016, 41(7): 18-22.
- [9] 徐卫明, 赵俊生. GPS 测量坐标转换实用性问题分析[J]. 测绘工程, 2000, 9(2): 10-15.
- [10] 杨湘龙, 王飞, 冯允成. 仿真优化理论与方法综述[J]. 计算机仿真, 2000, 17(5): 1-5.