

# 基于射线检测算法的无人机植保作业电子围栏设计

杨 泽 郑立华 李民赞 孙 红 杨 玮

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 保障植保无人机执行喷洒作业时不越过作业地块边界,是保证植保无人机作业安全性与高效性的必要前提。设计了一种高效可靠的无人机植保作业电子围栏,能够实时检测无人机是否越界,并在有越界风险时及时发出预警。首先,算法根据作业地块边界、无人机飞行速度等关键要素确定电子围栏报警模型并由此生成安全边界。当无人机飞行在安全边界内时,算法不对其进行越界检测;当无人机飞行于安全边界与作业边界之间时,算法将进行越界检测并同时发出预警,提示无人机操作人员随时准备控制无人机改变航向;当无人机飞行于作业边界之外时,将反馈越界标志,提供给飞行控制系统或无人机操作人员介入控制。测试表明:无人机植保作业电子围栏能够实现高效、可靠的飞行监测,实时检测植保无人机飞行是否越界,并在有越界风险时及时发出越界预警。

**关键词:** 植保无人机; 电子围栏; 地块边界; 越界检测; 越界预警

**中图分类号:** TP393.09    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1000-1298(2016)S0-0442-07

## Design of Electronic Fence of UAV for Plant Protection Assignment Based on Ray Method

Yang Ze Zheng Lihua Li Minzan Sun Hong Yang Wei

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** It is very important and necessary to ensure plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) not to cross its working field border when it is performing spray job. Meanwhile, it is the key technology for farmers to keep their working UAVs safe and with high working efficiency. In order to guarantee the security and efficiency of working plant protection UAV, a highly efficient and reliable electronic fence system was designed and developed based on ray method, which could be used for detecting whether the UAV had crossed its working field's border, and giving a warning in time when there was cross-border trend. The basic idea of the method was to generate a safety border inside the working field's original border based on the area of field border and UAV's flying speed. When the UAV was detected to fly inside the safety boundary, there was no need for cross-border detection; when the UAV was detected to fly between its working field's border and its safety border, it was needed to proceed detecting whether the UAV was going to cross the working field's border, and a warning should be triggered by electronic fence system if the UAV was going to cross the border. The system would throw an exception when the UAV was out of its working field's border. The system was tested and the results showed that the developed electronic fence system for plant protection UAV could be used to detect UAVs' flying state in real time, and monitor whether plant protection UAVs crossed their working border and give a warning in time whenever there was any cross-border trend.

**Key words:** plant protection unmanned aerial vehicle; electronic fence; field border; cross-border detection; cross-border warning

收稿日期: 2016-07-20 修回日期: 2016-08-14

基金项目: 北京市科委重大专项(D1511000012150002)

作者简介: 杨泽(1992—),男,硕士生,主要从事计算机科学与技术研究,E-mail: 421826500@qq.com

通信作者: 郑立华(1969—),女,教授,博士生导师,主要从事农业信息化与精细农业系统集成研究,E-mail: zhenglh@cau.edu.cn

## 引言

随着科技的快速发展以及人们环保意识、安全意识的不断提高,无人机逐渐走入国内农业植物保护领域。植保无人机在水田、高秆作物作业和应对爆发性病虫害等方面已经表现出突出的优势,而且可以应对农村劳动力减少的问题,近几年发展迅猛。轻型植保无人直升机具有作业效率高、无需专用起降机场、减少人身药害的几率、减轻农民劳动强度、节省农药使用量、降低农药残留等优点<sup>[1]</sup>。

从世界范围来看,农业航空较发达的国家主要有美国、俄罗斯、澳大利亚、加拿大、巴西、日本、韩国等。这些国家在无人机监管方面,已经做了很多的工作,获得了较好的成绩。比如日本,农业植保无人机和无人机操作人员都需要在网上统一注册,实现统一管理<sup>[2]</sup>。

国内外对于无人机的监控,大多采用地面站的形式<sup>[3]</sup>。地面站功能复杂,集飞行控制和监视于一体,但终端比较大,不适用于普通用户。为了方便普通用户,降低使用成本,需开发简便的无人机飞行监视系统,运行于浏览器之上,用户只要能上网就可以对无人机进行管理和监视。

对于植保无人机来说,安全问题尤其重要。因此,在植保无人机飞行监视方面,既需要实现无人机飞行轨迹可视化,又需要对无人机飞行状况异常及时预警,以确保植保无人机工作在允许飞行范围之内。为保证植保无人机的飞行安全和执行植保作业的质量,有必要研究并实现一套高效实用的无人机植保作业电子围栏系统,以能实时检测无人机是否越界,并在有越界风险时及时发出预警。

本文根据植保无人机作业过程中的实际需求,设计一套植保无人机电子围栏系统,主要包括安全边界生成算法、无人机相对位置检测算法和越界检测算法 3 部分。

## 1 材料与方法

### 1.1 开发平台及方法

本算法采用面向对象方法设计,使用 JavaScript 语言编码实现。同时,借助百度地图 API 实现了地块边界和飞行轨迹的可视化。

编程平台采用 Windows 操作系统以及 JQuery 框架。测试用浏览器包括 Firefox、Chrome 以及 IE 浏览器。

### 1.2 电子围栏测试实验设计

电子围栏系统集成于笔者开发的植保无人机飞行监视平台,该平台是基于 Web 的信息管理和监视

系统。电子围栏系统使用 JavaScript 语言编写,运行于客户端浏览器之上,同时基于 Ajax 技术每秒向服务器请求无人机的飞行数据一次,同时检测无人机是否越界或者是否有越界可能。

在进行模拟实验时,选择了北京市海淀区某种植园内的一个地块,进行无人机模拟喷洒实验,用水代替农药模拟喷药过程。在模拟飞行的同时,通过地面站的浏览器监视无人机飞行,并监视其越界情况。

### 1.3 电子围栏系统设计

#### 1.3.1 电子围栏系统结构

电子围栏系统由安全边界生成算法、无人机相对位置射线检测法以及越界检测算法 3 部分组成,如表 1 所示。其中,射线检测法用于判断点与多边形的相对位置,是本系统算法的核心;越界检测算法用于预测无人机将要越界的位置,并计算当前位置与越界位置之间的距离;安全边界生成算法用于加速本算法,无人机在安全边界之内,则不需进行越界检测。

表 1 子算法列表

Tab. 1 List of algorithms

算法名称	算法用途	核心方法	位置
安全边界生成算法	生成安全边界,加速电子围栏计算	一般多边形内缩算法	前部
射线检测法	计算无人机与边界的相对位置	射线法	中部
越界检测算法	检测无人机是否有越界趋势	射线与线段相交算法	后部

植保无人机电子围栏系统控制流程如图 1 所示,算法步骤如下:

(1) 获取基于 GPS 坐标的作业边界,生成多边形边界 polygon。

(2) 由安全边界算法,根据 polygon 生成安全边界 polygon\_s,安全边界 polygon\_s 为边界 polygon 的同心等比缩小。

(3) 获取植保无人机飞行数据,需要无人机至少两点位置数据。

(4) 根据射线检测法,判断植保无人机与边界 polygon 以及安全边界 polygon\_s 的相对位置,通过判断,如果:植保无人机在安全边界之内,则不需越界预警;植保无人机在外边界之外,则已越界,抛出异常;植保无人机在两个边界之间,则根据当前方向,判断无人机可能越界的位置,若无人机位置与可能越界的位置之间的距离小于警戒距离,则发出预警。

#### 1.3.2 安全边界生成算法

植保无人机飞行于多边形作业地块边界之内,

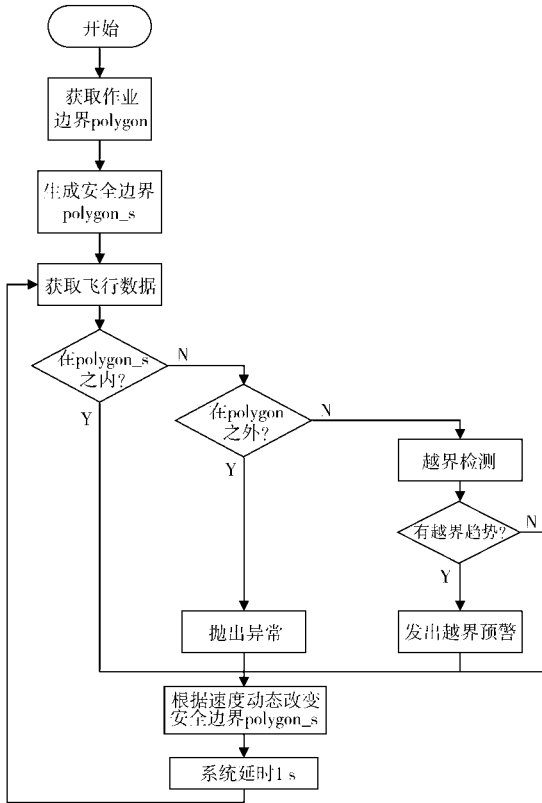


图1 电子围栏系统流程图

Fig. 1 Flow chart of electronic fence algorithm

当无人机有越界趋势的时候,根据越界检测算法,发出越界预警。然而,只有当无人机飞行于靠近边界的位置时,才可能有越界的趋势,所以当无人机没有靠近边界时,并没有进行越界检测的必要。因此,需根据原始边界生成一个安全边界,当无人机飞行于安全边界之内时,无需进行越界检测。

农用地块边界的形状为一般多边形,即可能为凸多边形,也可能为凹多边形,但不会是自交多边形。为了生成安全边界,对于凸多边形,用边界点的坐标之和除以点数,得到凸多边形的类似中心点,然后使边界点向中心点的方向内缩一定比例,即可产生向内缩小的多边形。然而对于凹多边形,用该方法产生的中心点有可能落在多边形之外,因此不适用。

为了生成凸多边形和凹多边形都可以适用的内缩算法,本文引入了平行线算法。该方法根据线段的方向,可以在线段的某一侧生成一条平行线。把该算法扩展到多边形上,在顺时针或逆时针方向上的每一条边都利用该方法,可得到多边形每一条边的向内的平行线,然后把相邻的边的平行线产生交点连接起来,即可得到内缩多边形。安全边界生成算法流程如图2所示。

安全边界生成算法步骤如下:

(1) 读取原始多边形的每一条边。

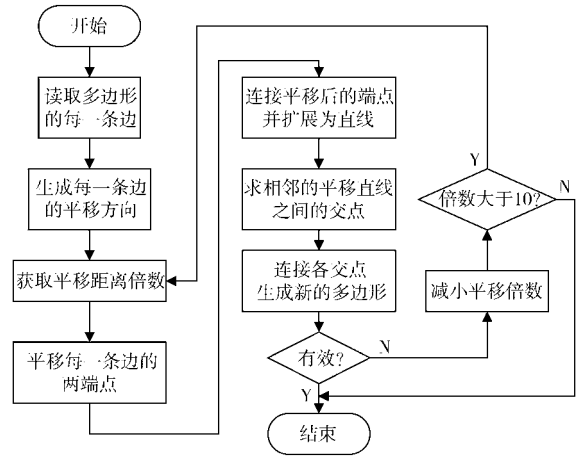


图2 安全边界生成算法流程图

Fig. 2 Flow chart of safety border generation algorithm

(2) 生成每一条边的两端点平移方向,即线段法线方向。

(3) 平移每一条边的两端点,连接平移后的两端点,生成平移后的线段。

(4) 将线段扩展成直线,求相邻直线产生的交点。

(5) 连接各个交点,生成内缩多边形。

### 1.3.2.1 多边形内缩算法

多边形内缩算法的核心是平行线算法。而平行线算法主要在于计算线段的单位法向量,法向量方向即线段的平移方向。

已知线段两端点  $P_1(x_1, y_1)$  和  $P_2(x_2, y_2)$ ,  $\mathbf{n} = (A, B)$  是  $P_1P_2$  线段的法向量,则  $P_1$  到  $P_2$  的向量和法向量  $\mathbf{n}$  之间的乘积为 0,即:  $(x_2 - x_1, y_2 - y_1) \times (A, B) = 0$ ,整理得  $A(x_2 - x_1) + B(y_2 - y_1) = 0$ ,又由于可得  $P_1P_2$  的长度  $l_{P_1P_2} = ((x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2)^{1/2}$ ,则可得单位法向量  $(A, B) = \left( -\frac{y_2 - y_1}{l_{P_1P_2}}, \frac{x_2 - x_1}{l_{P_1P_2}} \right)$ 。将直线向法向量的方向平移,即可得到平行线。

利用生成的法向量平移直线时,平行线与原线的距离为坐标系上的单位 1,即端点在平移的时候,平移一个单位距离。在平移端点时,可以乘以一个倍数,增加或者减少平移的距离。用到 GPS 坐标点时,一个单位的平移距离,对于农用地块来说过大。经纬度坐标精确到 0.000 01 时,精度可以近似为 1 m。因此在读取每一条边的端点信息的时候,将坐标点乘以  $10^5$ 。此时,一个单位的平移距离可以近似为 1 m。然后根据地块的面积,乘以一个倍数,这个倍数为面积的开方,即可得到一个比较合适的内缩距离。根据植保无人机的飞行特点,农用地块边界的安全边界平移距离应该在 10 ~ 50 m 之间,因此

这个倍数可以限制在 10 ~ 50 之间。

算法要求原始边界的点按顺序排列,可以是逆时针排序,也可以是顺时针排序。计算平移方向时,如果点是按照逆时针排列的,每一条边的平移方向都会是向着多边形内平移;如果点是按照顺时针排列的,每一条边的平移方向都会是向外平移,此时将平移方向取负,即可得到向内的平行线。

### 1.3.3.2 安全边界的有效性

如果边界上的某一端点与邻边的距离小于该边的平行线距离,即多边形的某一内角或者外角的角度十分小,可能导致生成的内缩多边形发生畸变,严重时会导致安全边界超出原边界。

如果安全边界超出原边界,则安全边界无效。此时,减小平移倍数,重新生成安全边界,可解决此问题。但如果平移倍数已经最小,生成的安全边界仍无效,则放弃安全边界。

### 1.3.3.3 无人机越界检测算法

在地理信息系统、图形图像处理和游戏制作等领域,经常需要判断某点是否落在某一个任意多边形内。在解决判断某点是否落在任意多边形内这个问题时,目前比较流行的算法有 2 个:射线法和角度累加法<sup>[4]</sup>。在实际应用中,需要选用一种高效、可靠的方法来解决这个问题。

#### 1.3.3.1 角度累加法

如图 3 所示,设有一个多边形的端点为  $(a_1, a_2, \dots, a_i, a_{i+1}, \dots, a_{n-1}, a_n)$ , 任意一点  $P$ 。将  $P$  与每个端点相连,直线  $Pa_i$  记为  $L_i$ ,将  $L_i$  旋转到  $L_{i+1}$  的角度记为  $\beta_i$ ,  $L_{i+1}$  旋转到  $L_{i+2}$  的角度记为  $\beta_{i+1}$ ,以此类推(如果  $\beta_i \geq 180^\circ$ , 则令  $\beta_i = \beta_i - 360^\circ$ ; 如果  $\beta_i \leq -180^\circ$ , 则令  $\beta_i = \beta_i + 360^\circ$ )。

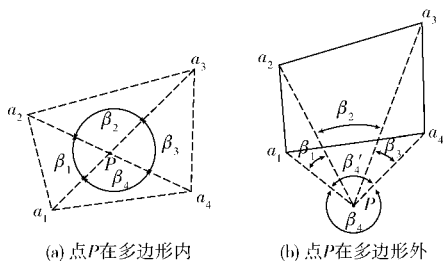


图 3 角度累加法

Fig. 3 Angle cumulative method

如图 3a 所示,点  $P$  在多边形内,则  $\sum \beta_i = 360^\circ$ ;如图 3b 所示,点  $P$  在多边形外,则  $\sum \beta_i = 0^\circ$ 。

#### 1.3.3.2 射线法

射线法是通过由点  $P$  引一条水平射线,计算水平射线与多边形交点个数的奇、偶来判断的,如果是奇数则在内,偶数则在外<sup>[5-6]</sup>。如图 4 所示,其中,

图 4a ~ 4d 为一般情况;图 4e、4f 为特殊情况,需要特殊处理。处理规则如下:对于多边形的水平边不作考虑;对于多边形的顶点和射线相交时,如果该顶点是其所属的边上纵坐标较大的顶点,则计数,否则忽略。

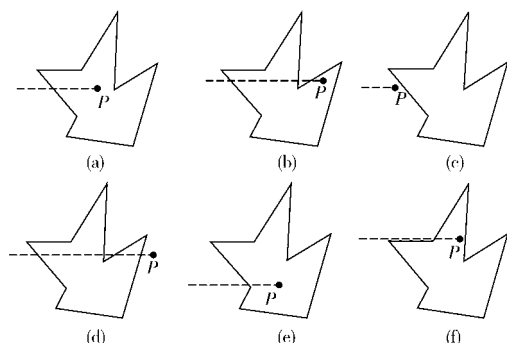


图 4 射线法

Fig. 4 Ray method

如图 4a 所示,点  $P$  在多边形内,与边的交点个数为 1;图 4b 点  $P$  在多边形内,与边交点个数为 3;图 4c 点  $P$  在多边形外,交点个数为 0;图 4d 点  $P$  在多边形外,交点个数为 4。

#### 1.3.3.3 2 种算法比较

由于多边形具有  $n$  条边,射线法需要检查每条边与射线的相交情况,所示时间复杂性为  $O(n)$ ;角度累加法要计算  $n$  次相邻  $P$  点与端点连线的夹角,所以时间复杂度也为  $O(n)$ 。但角度累加法在计算时,要运用三角函数,而射线法只用到加减乘除,所以角度累加法的时间复杂度比射线法大。

2 种算法对于自交多边形的判断,与图形学中的规定相矛盾。但在实际应用中,地块的多边形边界不可能出现自交,所以 2 种算法都适用。

综合来看,射线法思想容易理解、时间复杂度较低、效率高、适用于植保作业地块边界,因此本文选用射线法判断无人机与地块边界的相对位置。

### 1.3.4 越界检测算法设计

#### 1.3.4.1 越界检测算法的应用场景

在电子围栏算法中,多次运用了射线检测法判断点与多边形的位置关系。

无人机在执行作业时,飞行于作业边界的概率较大,越界的概率较小;在作业边界之内时,由于安全边界覆盖了原始地块边界中的大部分面积,所以无人机飞行于安全边界内的概率较大,飞行于两边界之间的概率较小。

所以首先判断无人机是否在安全边界之内,如果是,则不做下一步处理,否则继续判断是否在原始边界内;如果在边界内,则进行越界趋势检测,否则就已经越界。在这一过程中,可能用到 1 ~ 2 次射线

检测法。

在检测安全边界的有效性时,需要利用射线检测法判断生成安全边界的端点是否在原始地块边界内。如果安全边界超出原始地块边界,则安全边界无效。

当无人机飞行于原始地块边界与安全边界之间时,就需要进行越界检测。越界检测是根据无人机当前的飞行方向与速度,判断在一定时间内有无越界的可能。越界检测算法的核心是计算射线与线段是否会相交。

### 1.3.4.2 越界趋势的判定原理

已知线段  $AB$  和线段  $CD$ ,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$  各点坐标为  $(a_x, a_y)$ 、 $(b_x, b_y)$ 、 $(c_x, c_y)$ 、 $(d_x, d_y)$ 。将线段  $AB$  延  $AB$  方向伸展为射线,计算线段  $CD$  和射线  $AB$  是否会相交。算法的基本思想是,先求解两线所在的直线之间的交点,再判断交点是否在线段  $CD$  和射线  $AB$  上,所用公式为

$$r = \frac{(a_y - c_y)(d_x - c_x) - (a_x - c_x)(d_y - c_y)}{(b_x - a_x)(d_y - c_y) - (b_y - a_y)(d_x - c_x)}$$

$$s = \frac{(a_y - c_y)(b_x - a_x) - (a_x - c_x)(b_y - a_y)}{(b_x - a_x)(d_y - c_y) - (b_y - a_y)(d_x - c_x)}$$

式中,分母为两线的斜率变形式,若分母为零,则两线平行。

$s$  为两直线的交点在有向线段  $CD$  上的位置,  $s=0$  则交点与  $C$  重合,  $s=1$  则交点与  $D$  重合;  $r$  为两直线的交点在有向线段  $AB$  上的位置,  $r=0$  则交点与  $A$  重合,  $r=1$  则交点与  $B$  重合。

为判断射线  $AB$  与线段  $CD$  是否存在交点,首先判断分母是否为零,如果为零,则两线平行,如果  $r$  或  $s$  中,分子或分母同时为零,则两线重合;如果两直线不平行,则两直线有交点,首先判断交点是否在线段  $CD$  上,即  $s$  在  $0 \sim 1$  之间,如果是,则继续判断交点是否在  $AB$  的正方向上,即  $r$  是否大于  $0$  (如果  $r$  在  $0 \sim 1$  之间,那么  $B$  点就已经越界了)。

无人机在飞行时,每秒会回传 GPS 信息。在判断无人机飞行方向时,需要最新的 GPS 坐标和次新的 GPS 坐标,由这 2 个坐标得到无人机刚刚飞过的路径,从而得到无人机的飞行速度与方向。最新数据与次新数据之间的时间差不能过大,否则得到飞行方向与速度无效。

将无人机最新飞行路径,向飞行方向延伸,作为射线  $AB$ ,将植保作业多边形边界中的每一条边作为线段  $CD$ ,利用上述方法计算射线与线段是否存在交点。

如果飞行路径射线与某一边界存在交点,则计算交点与无人机之间的距离,如果距离小于警戒距

离,则发出预警。警戒距离为无人机飞行速度乘以警戒时间,算法暂定警戒时间为  $10\text{ s}$ 。

## 2 结果和分析

### 2.1 安全边界动态生成

根据图 2 所示算法生成植保无人机安全边界,如图 5 所示。图中的蓝色外边界为地块的原始边界(北京市海淀区某果园),蓝色内边界为安全边界,这 2 个多边形边界是相似且同心的。当无人机飞行于安全边界内时,没有越界趋势无需进行越界检测;当无人机飞行于两边界中时,无人机可能有越界趋势,需进行越界检测;当无人机在原始边界之外时,无人机就已经越界了。

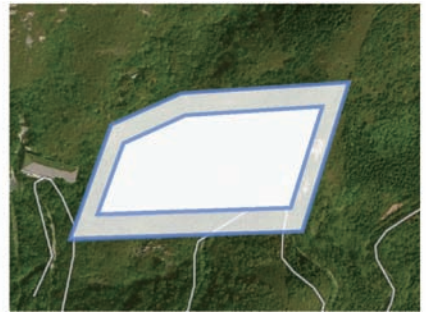


图5 安全边界示意图(北京海淀区某果园)

Fig.5 Schematic of safety border (Haidian, Beijing)

安全边界生成的关键是找到一个合适的边界内缩距离。在没有无人机飞行数据时,算法默认的内缩距离与原始地块边界的面积有关,地块面积越大,内缩距离越大;地块面积越小,内缩距离越小。

但根据地块面积来限定安全边界的内缩距离是不合适的,因为当无人机飞行很快时,无人机的越界可能就越大,对应着安全边界就应该越小。电子围栏算法中的安全边界可以根据无人机飞行速度动态改变,以增强安全边界的适应性与高效性。

为了实现高效的越界预警,在无人机没有越界趋势的时候,无需进行越界检测。当无人机飞行速度越快,则越界的趋势越明显,需要进行越界检测的范围就越大,对应着安全边界也就越小;飞行速度越慢,则越界趋势越不明显,需要进行越界检测的范围就越小,对应着安全边界就越大。

如图 6 所示,左图中无人机保持匀速飞行,安全边界不变。当无人机加快飞行速度,安全边界缩小。在右图中,最小的多边形框是最新生成的安全边界(之前的安全边界作废)。

但生成安全边界需要占用一定性能,每当速度改变一次,就重新生成一次安全边界,可能导致系统性能降低。为此,将无人机的飞行速度分为 5 级,仅当速度级别改变时,才动态生成安全边界。每一速



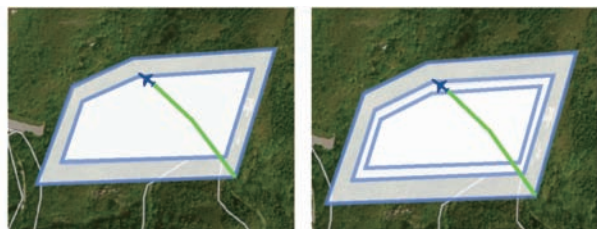


图6 安全边界动态生成

Fig. 6 Dynamic safety border

度级别对应着一个平移距离,速度越大,平移距离越大,需进行越界检测的范围就越大,对应生成的安全边界就越小。

综上所述,电子围栏系统的安全边界,可以根据无人机的飞行速度动态实时修正,可见电子围栏算法具有高度的动态性,同时提升了算法的效率。

## 2.2 植保无人机电子围栏系统性能测试

本系统算法基于 JavaScript 语言实现,运行于前端浏览器。通过 Ajax 技术,每秒钟从服务器获取一次无人机飞行数据更新,然后通过电子围栏算法检测无人机飞行越界状态。本文选择实验果园进行植保无人机飞行测试,结果表明,即使使用较低配置的服务器仍然能够同时处理 2 000 个并发请求,可以满足多个电子围栏系统的工作需求。

如图 7 所示,本文开发的电子围栏系统通过射线检测法检测到无人机飞行于安全边界内,无人机没有越界趋势,不再做进一步的越界检测。该策略大大降低了计算量,提高了系统工作效率,进一步提升了系统性能。



图7 无人机飞行于安全边界之中

Fig. 7 Picture of UAV in safety border

当系统通过射线检测法检测到植保无人机没有在安全边界内时,则利用射线检测法检测无人机是否在原始地块边界内。如图 8 所示,算法检测到无人机没有在原始地块边界内,即无人机已经越界,系统给出提示,并发出异常信息。

当系统发现无人机飞行于原始作业边界与安全边界之间时,就需要进行越界检测。通过计算无人机的飞行方向与速度,发现无人机距离其正对的边界小于警戒距离,则发出越界预警。如图 9 所示,无人机距离其正对的边界(图中左边界)小于警戒距

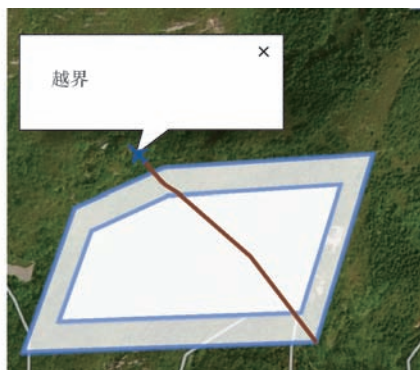


图8 无人机已经越界

Fig. 8 Picture of UAV crossed border

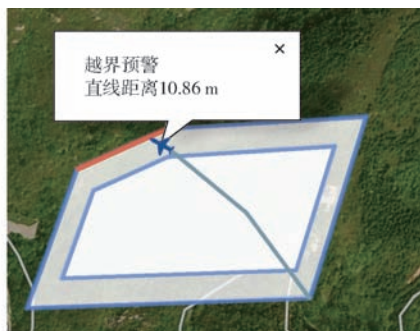


图9 无人机飞行于两边界之间且有越界趋势

Fig. 9 Picture of UAV between both borders and with trend of cross-border

离,发出预警,并在该边界上闪烁提示。

另一类情况,无人机飞行于原始作业边界与安全边界之间,但无人机并没有向越界的方向飞行。如图 10 所示,无人机距离其正对的边界(图中上边界)大于警戒距离,无人机没有或暂时没有越界可能,则无需预警。



图10 无人机飞行于两边界之间但没有越界趋势

Fig. 10 Picture of UAV between both borders and without trend of cross-border

综上所述,电子围栏算法首先通过原始地块边界和安全边界,将无人机的位置分为安全、越界、待检测 3 类,而仅第 3 类才需要进行下一步的运算,可见电子围栏算法是十分高效的。其次,在越界检测时,又要根据无人机的飞行方向与速度,依次排查每一条边,以精确判断无人机有无即将越界的可能,可见电子围栏算法是十分可靠的。

系统经过实际植保无人机飞行测试,结果表明,无人机植保作业电子围栏系统可以实现高效、可靠的无人机越界预警功能。

### 3 结论

(1)无人机植保作业电子围栏系统生成的安全边界具有主动适应性,能够根据植保无人机飞行速度实时自动修正,大大提高了系统的实用性和可靠性。

(2)无人机植保作业电子围栏系统越界检测方案和算法灵活、快捷,计算量小,精确度高,可以实时、精确地判断无人机是否越界,并在植保无人机有越界趋势时,及时给出预警。

(3)无人机植保作业电子围栏系统具有动态性、高效性和可靠性,能够保障提供给飞行控制系统和植保无人机操控人员准确的飞行状态和安全警示。

### 参 考 文 献

- 1 蒙艳华,周国强,吴春波,等.我国农用植保无人机的应用与推广探讨[J].中国植保导刊,2014(增刊1):33-39.  
MENG Yanhua, ZHOU Guoqiang, WU Chunbo, et al. Discussion on application and popularization of agricultural plant protection UAV [J]. China Plant Protection, 2014(Supp. 1):33-39. (in Chinese)
- 2 郭宝录,李朝荣,乐洪宇.国外无人机技术的发展动向与分析[J].舰船电子工程,2008(9):46-49,112.  
GUO Baolu, LI Chaorong, LE Hongyu. Development trend and analysis of the technology of the abroad UAV [J]. Ship Electronic Engineering, 2008(9):46-49,112. (in Chinese)
- 3 邹有建,肖龙鑫,陈鼎.判断某点是否在任意多边形内两种算法的比较[J].地矿测绘,2009(3):28-30,36.  
ZOU Youjian, XIAO Longxin, CHEN Ding. A contrast between two approaches to find whether the point being inside a polygon [J]. Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources, 2009(3):28-30,36. (in Chinese)
- 4 吴坚,姜虹,王小椿.快速判断点是否在自交多边形内的方法[J].系统仿真学报,2003,15(11):1592-1594.  
WU Jian, JIANG Hong, WANG Xiaochun. A method for the decision of a point whether in or not in self-intersected polygon [J]. Journal of System Simulation, 2003,15(11):1592-1594. (in Chinese)
- 5 夏仁波,刘伟军,王越超.点在平面多边形内外的判断方法[J].机械工程学报,2006,42(3):130-135.  
XIA Renbo, LIU Weijun, WANG Yuechao. Method for determining whether a certain point is inside a polygon in plane [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2006,42(3):130-135. (in Chinese)
- 6 王文成,吴恩华.判断检测点是否在多边形或多面体内的新方法[J].软件学报,2000,11(12):1614-1619.  
WANG Wencheng, WU Enhua. A new method deciding whether a point is in a polygon or a polyhedron [J]. Journal of Software, 2000,11(12):1614-1619. (in Chinese)
- 7 马少瑛.小型无人机地面站的研究与设计[D].呼和浩特:内蒙古工业大学,2009.
- 8 邱茗,邱爽,李燕.GPS汽车管理系统在油田运输中的应用[J].中国新通信,2009(11):68-70.
- 9 王颖.北京市营运车辆GPS监管平台车辆监管设计与开发[D].北京:北京工业大学,2013.
- 10 LIU Changliang. Key point of output quality control for ground frequency conversion power of UAV [J]. Electrical Engineering, 2009(12):21.
- 11 穆春阳,王晓龙,马行,等.农药喷雾飞行器越界检测算法实现[J].农机化研究,2016(4):6-10.  
MU Chunyang, WANG Xiaolong, MA Xing, et al. Research on pesticide spraying craft cross-border detection algorithm [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(4):6-10. (in Chinese)
- 12 许静,张冬宁,张学军.一种判定运动目标越界的算法[J].无线电工程,2009(11):32-34.  
XU Jing, ZHANG Dongning, ZHANG Xuejun. An algorithm for detecting the moving target beyond the boundary [J]. Radio Engineering of China, 2009(11):32-34. (in Chinese)
- 13 JOSHI N, TRIPATHY A K, SAWANT S, et al. Near real time vehicle tracking using GIS [C] // International Conference on Technologies for Sustainable Development. IEEE, 2015:1-6.
- 14 MANGIAMELI M. A GIS application for UAV flight planning [C] // Research, Education and Development of Unmanned Aerial Systems, 2013:147-151.
- 15 张东彦,兰玉彬,陈立平,等.中国农业航空施药技术研究进展与展望[J].农业机械学报,2014,45(10):53-59.  
ZHANG Dongyan, LAN Yubin, CHEN Liping, et al. Current status and future trends of agricultural aerial spraying technology in China [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014,45(10):53-59. (in Chinese)
- 16 THAMRIN N M, ARSHAD N H M, ADNAN R, et al. Simultaneous localization and mapping based real-time inter-row tree tracking technique for unmanned aerial vehicle [C] // Control System Computing and Engineering (ICCSCE), 2012:322-327.
- 17 薛新宇,兰玉彬.美国农业航空技术现状和发展趋势分析[J].农业机械学报,2013,44(5):194-201.  
XUE Xinyu, LAN Yubin. Agricultural aviation applications in USA [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(5):194-201. (in Chinese)
- 18 LEVIN E, KUPIEC S A, FORRESTER T, et al. GIS-based UAV real-time path planning and navigation [J]. Proceedings of SPIE—the International Society for Optical Engineering, 2002,4708:296-303.
- 19 徐博,陈立平,谭彧,等.多架次作业植保无人机最小能耗航迹规划算法研究[J].农业机械学报,2015,46(11):36-42.  
XU Bo, CHEN Liping, TAN Yu, et al. Path planning based on minimum energy consumption for plant protection UAVs in sorties [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(11):36-42. (in Chinese)
- 20 张建国,曹银杰.智能化电子围栏系统的设计研究[J].科技信息,2009(35):21,404.