

# 基于 R 树空间索引的植保无人机与植保作业匹配算法

杨 泽, 郑立华<sup>\*</sup>, 李民赞, 杨 玮, 孙 红

(中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083)

**摘 要:** 为了充分保障植保作业的科学分配和植保无人机资源的合理配置, 设计了一套高效的植保无人机植保作业匹配算法, 为用户提供无人机与植保作业的快速匹配。为适应植保作业的并发性、时效性和准确性要求高的特点, 该算法基于 R 树空间索引技术设计, 实现了植保作业的区域查询功能与智能化无人机植保作业推荐功能。无人机植保作业匹配算法允许用户在地图上搜索任意矩形范围内的植保作业, 也可以根据植保无人机用户当前位置和用户偏好推荐最佳的植保作业。该文在植保无人机作业匹配算法基础之上实现了植保无人机租赁与智能化调度系统, 系统测试与分析表明, 基于 R 树的无人机植保作业匹配算法具有较高的灵活性、准确性、高效性和动态性等优势, 单次 R 树查询服务器响应时间低于 1 ms, 能够实现高效且精确合理的植保作业查询与匹配。

**关键词:** 无人机; 索引; 算法; 匹配; 植保作业; R 树空间索引技术; 智能化调度

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.014

中图分类号: S252+.3; P208

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-Supp.1-0092-07

杨 泽, 郑立华, 李民赞, 杨 玮, 孙 红. 基于 R 树空间索引的植保无人机与植保作业匹配算法[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 92-98. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.014 http://www.tcsae.org

Yang Ze, Zheng Lihua, Li Minzan, Yang Wei, Sun Hong. Matching algorithm for plant protecting unmanned aerial vehicles and plant protecting jobs based on R-tree spatial index [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 92-98. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.014 http://www.tcsae.org

## 0 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<sup>[1-3]</sup>。植保无人机在水田、高秆作物间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等问题, 近几年发展迅猛<sup>[4-6]</sup>。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>[7-9]</sup>。但植保无人机高昂的价格, 令广大农民难以承受, 这也成为我国植保无人机推广的一大阻力。

为了应对广大农民无力购买和维护植保无人机的现状, 设计一个植保无人机租赁与调度平台, 一方面为没有无人机的用户提供无人机植保作业服务的租赁, 另一方面充分利用闲置的植保无人机, 对于优化资源配置和保障农作物植保具有重要意义和实用价值。植保无人机合理高效调度的关键技术在于: 实现植保作业与植保无人机的最佳匹配算法。

植保无人机飞行监视系统面向 2 类用户: 未拥有植保无人机但具有迫切植保作业需求的用户(植保作业用

户)、拥有闲置植保无人机的用户(植保无人机用户)。植保无人机用户在平台注册, 提供每架无人机的型号、飞行参数、植保作业参数等信息; 植保作业用户在平台上发布植保作业, 具体包括植保作业的地点、地块范围、预期开始与结束时间、作业类型、报酬等内容。植保作业供无人机用户筛选, 也可获取对应每架无人机擅长作业类型的植保作业推荐。无人机植保作业匹配算法是保障以上功能实现的核心。

对应于病虫害爆发的特殊性, 植保作业同时上线的数量可能非常巨大, 因此, 一个高效的植保作业筛选匹配算法与管理方法非常重要, 它能够帮助系统对庞大的数据进行有效处理和计算, 提升系统效率, 实现植保无人机与植保作业的快速匹配。

本文首先尝试了基于行政区划的匹配算法, 根据植保作业所在行政区划进行筛选和匹配<sup>[10]</sup>。利用行政区划编码进行前缀匹配, 实现省市县三级筛选和匹配。但是, 测试发现, 6 位地理编码本质上是一维索引, 当数据量比较大时, 该匹配算法性能即不能满足需求。而且中国行政区划大都是不规则图形, 在进行筛选时容易出现遗漏, 且行政区划粒度较粗大, 不能满足高精度高效率匹配要求。同时, 基于行政区划的匹配算法无法实现跨区域筛选, 缺乏灵活性。

研究继而分析了无人机植保作业的特点, 认为可以从以下几个方面同时改进匹配算法: 1) 引入一种数据结构, 便于存储管理空间数据; 2) 引入一种搜索匹配算法, 提高查询植保作业的效率; 3) 实现较为灵活的植保作业查询功能和智能化无人机植保作业匹配功能。

前人针对地图点到点的矢量目标匹配方法研究成果

收稿日期: 2016-12-02 修订日期: 2017-01-08

基金项目: 北京市科委重大专项(D1511000012150002); “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0200703)

作者简介: 杨 泽, 男(汉族), 内蒙古呼和浩特人, 研究方向为计算机科学与技术。北京 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 100083。Email: 421826500@qq.com

\*通信作者: 郑立华, 女(汉族), 天津人, 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。北京 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 100083。Email: zhenglh@cau.edu.cn

为本文匹配算法设计提供了可贵的借鉴。董俊等<sup>[11]</sup>采用了改进的 Dijkstra 最短路径算法研究了从定点到定点的最短路径规划问题, 得到了一条用于 GPS 导航的最短路径。受此启发, 利用最短路径算法查找距离植保无人机组最近的路程最近的植保作业, 可以得到成本最小的匹配方案。静态最短路径算法的代表性算法包括 Dijkstra 算法和 A\* (A Star) 算法<sup>[12]</sup>。Dijkstra 算法实用性强, 性能稳定, 是最常见最有效的最短路径算法。A\* 算法采用启发式函数寻找距离起点具有最小代价的终点, 算法效率比 Dijkstra 更快<sup>[13]</sup>。但分析发现, 在无人机植保作业匹配过程中, 路径最短并不是唯一的成本限制条件, 还有一个重要条件是合理匹配, 因为不同机型的无人机所适应的作业类型也不同, 为植保作业选择理想的机型以及理想的调度距离将是最优的解决方案。而最短路径算法无法提供高效的空间数据索引方式, 不能实现高效便捷的空间数据管理, 且仅能找出路程最近的植保作业, 缺乏灵活性。

空间索引是一种能够存储实际地理对象及其关系的数据结构, 并能够有效地提升空间数据的查询效率<sup>[14]</sup>。利用空间索引技术, 可以加快地理对象的搜索匹配, 既能查询任意区域内的实际地理对象, 又可以找出目标点附近的地理对象。国内外学者已经做了比较多的研究, 姚驰<sup>[15]</sup>利用格网索引和几何特征研究了地理实体多尺度匹配方法, 构建了基于格网索引的空间位置指标。赵彬彬<sup>[16]</sup>围绕多尺度地图空间目标匹配问题, 提出一套从空间索引到层次匹配方法, 再到匹配结果定量评价的较为完整的空间目标匹配理论方法。

对比多种方案可以发现, 空间索引技术具有较高的实用性、高效性、灵活性和智能性, 满足植保无人机作业匹配需求, 因此本文基于空间索引技术设计了植保无人机作业匹配算法, 以期实现高效、智能、合理和实用的植保无人机与植保作业的快速匹配。

## 1 材料与方法

### 1.1 R 树空间索引

#### 1.1.1 空间索引技术

空间索引技术是指依据地理要素或对象的位置、形状或对象之间的某种空间关系, 按一定的顺序排列的一种数据结构, 它包括地理对象的标识, 外接矩形以及指向地理对象的指针 3 大部分<sup>[17]</sup>。空间索引的目的是为了在地理信息系统 (geographic information system, GIS)<sup>[18]</sup>中快速检索到希望获得的地理对象, 从而提升空间操作的速度和效率。

尽管空间索引技术由很多特定的数据结构和相应的算法构成, 但基本原理相似, 即采用区域分割原理, 把空间划分为若干区域, 这些区域具有唯一标识。常见的高效空间索引方法一般是自顶向下、逐级划分, 从而形成树状空间索引结构。常见的空间索引技术有网格索引、KD 树索引、四叉树索引和 R 树索引<sup>[19-22]</sup>等。在众多空间索引技术中, R 树以其动态性、聚集性和高效性, 成为当今最流行、最成熟、运用最广泛的空间索引技术<sup>[23]</sup>。

#### 1.1.2 R 树空间索引技术

R 树是一种采用对象界定技术的高度平衡树, 是在 B

树的基础上的  $k$  维空间自然扩展<sup>[24-25]</sup>。R 树最初于 1984 年由 Guttman 提出<sup>[26]</sup>, 人们在此基础上又提出了多种改进方案, 经过 20 年的发展, 不断产生的 R 树变体已经逐渐形成了一个 R 树家族。其中, 比较著名的变体有 R+树<sup>[27]</sup>、R\*树<sup>[28]</sup>以及 Hilbert R 树<sup>[29]</sup>等等。

R 树是一种完全动态的空间索引数据结构, 插入、删除和查询可以同时进行, 并且不需要周期性重建。R 树由中间结点和叶结点组成, 叶结点存储的是实际空间对象的最小边界矩形 (minimum bounding rectangle, MBR), 以及指向实际空间对象的指针, 而不是直接存储实际的空间对象。根结点和中间结点存放本结点指向的各子结点的指针和包含子结点的目录矩形信息。R 树的主要算法包括: 插入、查询、删除、分裂等<sup>[30]</sup>。

### 1.2 算法开发和测试试验设计

无人机植保作业匹配算法集成于由作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, 客户端运行于浏览器之上。本算法采用面向对象方法设计, 使用 Python 和 JavaScript 语言编码实现。同时, 借助百度地图 API (application programming interface, API) 实现数据的可视化。编程平台采用 Windows 操作系统以及 Django 框架。测试使用浏览器包括 Firefox、Chrome 以及 IE 浏览器。

无人机植保作业匹配系统在服务器端使用 Python 语言实现, 具体包括 R 树的构建、插入与查询操作、数据库操作等, 为前端提供数据基础; 客户端使用 JavaScript 语言实现, 具体包括数据的显示、提取, 并利用百度地图 API 实现数据的可视化。

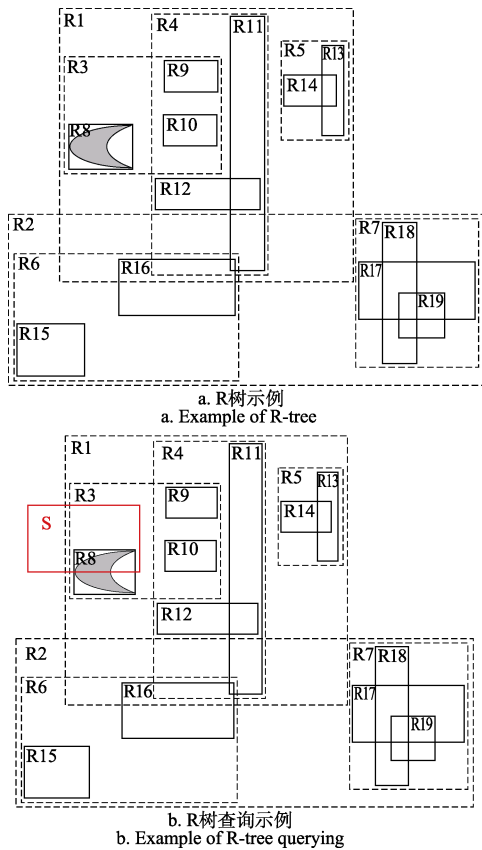
为了测试无人机植保作业的匹配算法, 本文利用脚本向平台数据库添加了尽量多的符合本平台数据要求的模拟数据, 包括近千条无人机数据和模拟的植保作业数据条。模拟的植保作业数据中, 主要包括作业的类型如喷粉药、液态药、植物类型如高秆植物、果树等、地理位置、时间、地块边界等; 模拟的无人机数据中, 主要包括植保无人机的喷药方式, 地理位置, 载重量等信息。在生成这些模拟数据时, 每一种类型的作业和无人机, 都随机分布在不同的地理位置上, 但主要集中在华北区域。本文通过对模拟数据的计算, 获得了植保作业的推荐匹配结果, 并对结果进行了分析。

## 2 设计与实现

### 2.1 R 树构建

为了利用 R 树技术来索引系统中的植保作业, 以实现植保作业的高效查询, 首先需要设计植保作业导入 R 树的方法。本文设计了 2 种导入方式, 一是在用户创建植保作业地块边界时, 在存入数据库的同时插入到 R 树中; 二是系统执行定期任务, 周期性的将所有未过期的植保作业插入重新构建的 R 树。R 树以文件的形式存储在磁盘上。

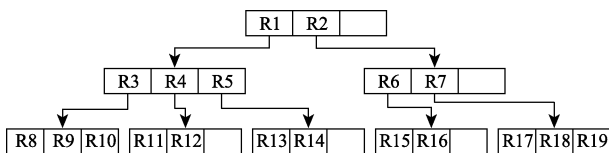
实际的地块边界是一个任意的多边形, 在导入 R 树前, 需算出该多边形的最小边界矩形, 然后连同该地块边界在数据库中的唯一标识, 一起存入 R 树中。图 1a 所示即为 R 树示例, 图 1b 为 R 树查询示例。



注：R8~R19 为包含实际地理对象(灰色月牙区域)的最小边界矩形，为第三级虚拟空间对象；R3~R7 为包含一部分邻近的三级虚拟空间对象的最小边界矩形，为二级虚拟空间对象；R1~R2 为包含一部分邻近的二级虚拟空间对象的最小边界矩形，为一级虚拟空间对象。S 框为查询范围。  
 Note: R8-R19 are third level MBRs (level minimum bounding rectangle) which include actual geography objects (the moon shape area in Fig.1); R3-R7 are second level MBRs which include part of third level MBRs; R1-R2 are first level MBRs which include part of second level MBRs. The frame S is querying scope.

图 1 R 树说明图例  
 Fig.1 Example for explaining R-tree

图 1a 中月牙形区域代表实际地理对象，它被它的最小边界矩形 R8 所包围。与 R8 类似，图中 R9 至 R19 也是实际地理对象的最小边界矩形，它们组成了 R 树中的叶结点。其中，R8 与 R9、R10 距离比较近，将它们围成一个更大的区域 R3，R3 就是它们的父结点。同理，R11 与 R12 组成一个更大的区域 R4，R13 与 R14 组成 R5 等等。而 R3、R4、R5 又可以组成更大的区域 R1，由此一级包围一级，最终形成树结构。由图 1 可以看到，R 树中存储的最小边界矩形是允许重叠的。图 1 中各节点在 R 树中的位置见图 2 所示。



注：R1~R19 所对应的地块见图 1。  
 Note: Areas R1-R19 are shown in Fig.1.

图 2 R 树结构图  
 Fig.2 Structure diagram of R-tree

图 2 中，由 R1 和 R2 组成树的根结点。R1 有 3 个子结点：R3、R4 和 R5。R1 中除了指向子结点的指针外，

还存储着能够将 R3 至 R5 包围起来的最小边界矩形。同理，R3 也有 3 个子结点 R8、R9 和 R10。R8 至 R19 是叶结点，它们存储着实际地理对象的最小边界矩形和指向实际地理对象的指针。

R 树存在多种变体。如 R+ 树为了避免 R 树由于兄弟结点重叠而引起的多路径查询问题，要求目录矩形之间不得重叠，如图 1 中，R3 与 R4 重叠的现象在 R+ 树中不会出现。这样做的目的是提高查找性能，但代价是分裂操作复杂，增加了空间开销，树的深度也会增加，继而又降低查询性能。植保作业时时效性强，经常的增删操作再加上复杂的分裂操作，给系统增加了很多无谓的开销。又如 R\* 树要求最小化矩形的重叠面积，同样提高查找性能但又增加了 R 树的构造时间，同时极大地提高了系统的复杂性，因此不适用于本系统。

R 树是一种完全动态的空间索引数据结构，插入、删除和查询可以同时进行，并且不需要周期性重建。R 树灵活的动态特性非常适合无人机植保作业，为植保无人机快速、高效的植保作业区域查询，植保作业和无人机动态添加和删除均提供了支撑，也为植保无人机植保作业匹配以及功能扩展奠定了基础。

2.2 R 树数据导入

无人机植保作业导入 R 树算法流程如图 3 所示。在获取了 R 树和待插入的条目 E 以后，首先调用叶子选择算法，找到 E 合适的插入位置，然后判断这个位置是否有足够的空间，如果有，则插入 E；如果没有，则该叶子结点一分为二，这 2 个结点包含了所有原来叶子结点中的条目与新条目 E。插入 E 后需调整树结构，主要是调整各结点的目录矩形，并向上传递，该操作也可能造成分裂。如果结点分裂向上传播，可能导致根结点的分裂，此时需要创建新的根结点，并包含原来根结点分裂后的 2 个结点。

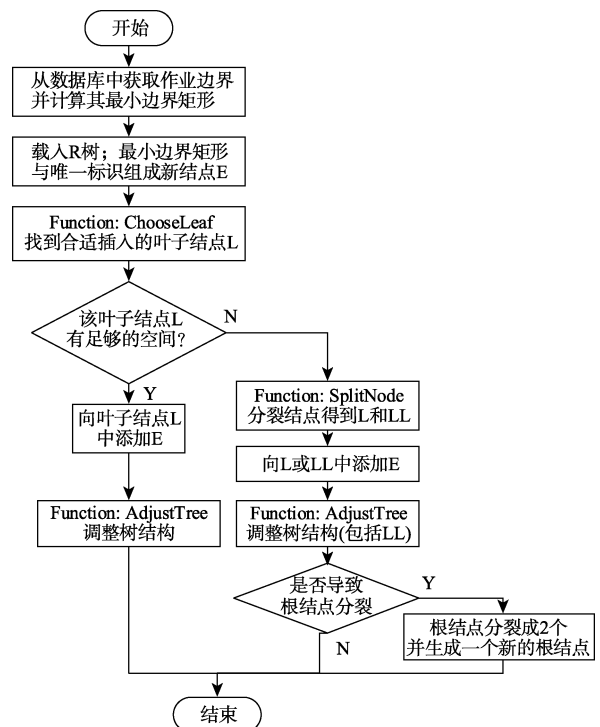


图 3 植保作业导入 R 树算法流程  
 Fig.3 Workflow of plant protection job inserting into R-tree

### 2.3 基于 R 树的无人机植保作业区域查询

R 树的查询算法是一个递归过程。设查询区域为  $S$ ，从 R 树根结点开始，如果当前结点不是叶结点，则依次判断该结点中各单元所代表的区域是否与  $S$  相交，如果相交，则以该单元所指的子结点为根，重复上面的操作；如果当前结点是叶结点，如果叶结点中的某空间对象与  $S$  相交，则表明其满足搜索条件。图 1b 表示了查询过程，查询区域为  $S$ ，经判断，根结点中  $R1$  与  $S$  相交，在  $R1$  的子树中， $S$  与  $R3$  相交，最终  $S$  落在  $R8$  上，即  $R8$  为满足查询区域  $S$  的结果， $R8$  所指向的实际地理对象即为目标结果。

为了方便用户查找植保作业，设计并实现了基于 R 树的植保作业区域查找功能，同时利用百度地图 API 实现区域选择和数据可视化。植保作业区域查询工作流程如图 4 所示。

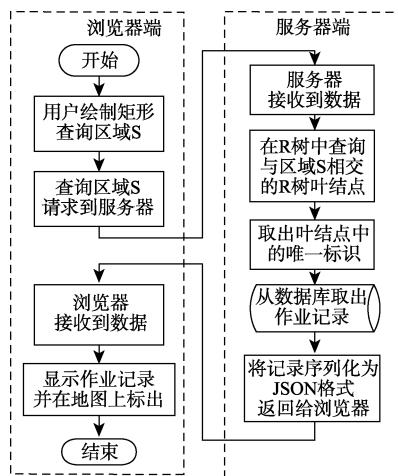


图 4 植保作业区域查询工作流程

Fig.4 Workflow of plant protection job region querying

如图 4 所示，用户进入植保作业区域查询页面后，在百度地图窗口选择绘制矩形，通过鼠标拖拽绘制出一个任意大小任意比例的矩形；抬起鼠标后，页面将通过 Ajax 技术向服务器发送该矩形范围，并请求与该矩形相交的作业数据。服务器接收到查询范围后，载入 R 树，查询与该矩形相交的植保作业地块，如查询到，则根据其唯一标识到数据库中查询植保作业详细信息，然后将结果返回页面。页面将查询到的植保作业通过表的形式展示，并在百度地图中，标出植保作业的边界。

### 2.4 基于 R 树的无人机植保作业匹配推荐算法

植保无人机用户或植保作业用户在编辑资料时，可以选择自己所在位置的行政区划（比如北京市海淀区）。因此系统可以根据用户所在的位置，向用户推荐附近的符合用户需求的目标。当使用行政区划作为用户位置时，平台使用该行政区划的中心点 GPS 坐标作为用户位置，利用这个坐标，可以在 R 树中查询附近的植保无人机或植保作业。

由于植保作业有多种类型，如喷洒液态农药或粉状农药等，而植保无人机的类型更是多种多样，不同的无人机适宜不同的植保作业类型。同时，不同的植保用户可以有自己的偏好，例如农药类型等。在植保作业推荐过程中，首先按照用户偏好对推荐结果进行排序，按照

无人机用户的实际需求进行匹配；如果用户未设置偏好，算法则根据该用户的植保无人机类型匹配适宜的植保作业并进行排序。

图 5 所示为使用行政区划定位的植保无人机用户匹配植保作业的植保作业推荐功能流程。

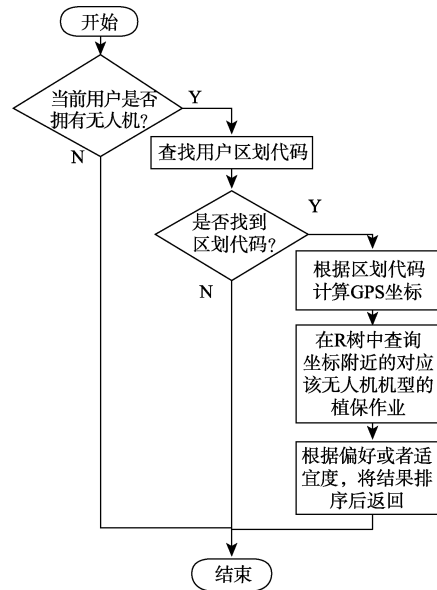


图 5 无人机植保作业推荐功能流程

Fig.5 Workflow of plant protecting job recommendation with unmaned aerial vehicles

植保作业推荐功能流程详细算法步骤如下。

- 1) 判断当前植保无人机用户是否在本系统已经注册过植保无人机，如果已有注册植保无人机，运行下一步；如果没有则退出。
- 2) 查找当前用户的位置，如果找到，则运行下一步；如果没有找到，则给出提示后退出。
- 3) 根据用户位置，查找对应 GPS 坐标。
- 4) 载入 R 树文件，在 R 树中查询离该坐标最近的若干 R 树叶结点，取出叶结点存储的唯一标识，在数据库中取出对应的植保作业记录，通过植保作业类型进行筛选。
- 5) 如果用户设置了偏好选项则根据用户设置对结果进行排序；如果用户未设置偏好选项，则根据无人机适宜的植保作业类型对结果进行排序。
- 6) 将筛选出的对应该无人机机型的植保作业结果返回给用户。

该推荐功能可以在植保无人机用户登录时触发运行，也可以由用户随时点击植保作业推荐页面，查看匹配推荐作业。

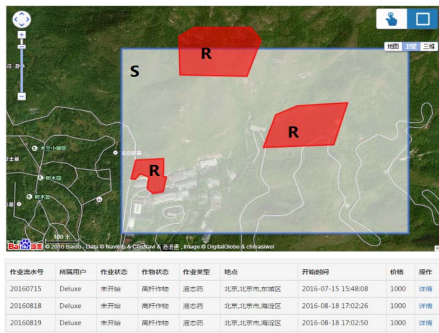
## 3 结果与分析

无人机植保作业匹配算法使用 Python 语言实现，运行在系统服务器上。经过测试，即使在配置较低的服务器上，该算法仍能够同时处理 2 000 个并发请求。其中，基于 R 树的作业查询算法，处理单个请求时，服务器响应时间低于 1 ms；植保作业批量导入 R 树的操作，导入 1 000 条作业，耗时 950 ms。得益于 R 树的动态性，R 树可以读写同时进行，因此 R 树的插入操作并不会影响查询操作。同时，服务器引入了基于 RabbitMQ 的消息队列技



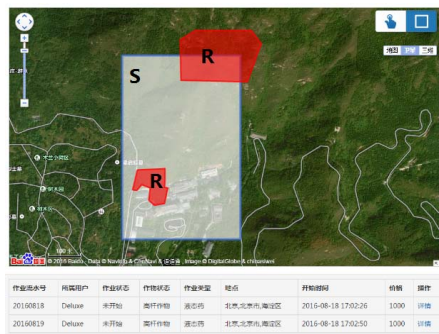
术, 利用消息队列技术可使 R 树插入、批量导入等实时性要求低的后台操作在系统空闲时运行, 保证了主系统的性能要求。系统的高效性保障了无人机作业匹配便捷高效。

图 6 所示为植保作业区域查询结果实例(海淀区某村镇果园区域内)。图 6a 中白色半透明矩形区域为用户绘制的查询区域, 3 个深色多边形是模拟的 3 个植保作业地块边界, 地图下方的表格显示对应的 3 条查询到的作业信息。植保无人机用户选择任一条作业, 点击详情, 即可查看该作业的详细信息并选择申请执行该作业。



a. 植保作业区域查询结果 1

a. Result 1 of plant protecting job region querying



b. 植保作业区域查询结果 2

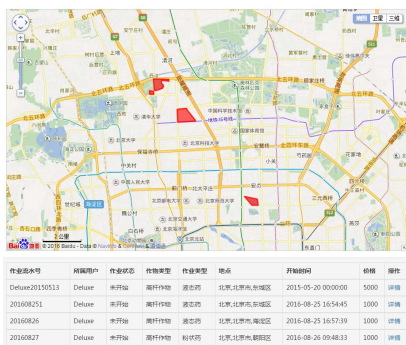
b. Result 2 of plant protecting job region querying

注: 图为北京海淀区某地植保作业区域查询结果; S 框为查询范围; R 框为查询到的植保作业对应地块。

Note: Fig.6 is the result of region querying in Haidian, Beijing; Frame S is querying scope; Frames R are the fields of plant protection jobs in the result.

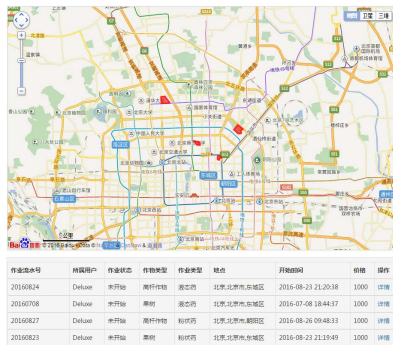
图 6 植保作业区域查询及结果

Fig.6 Plant protecting job region querying and its results



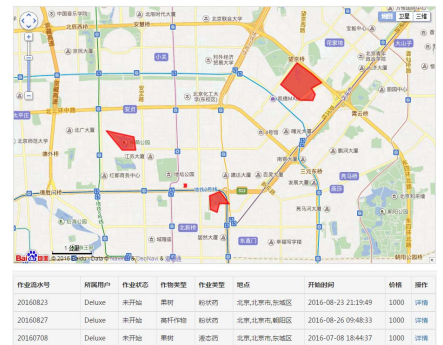
a. 北京海淀区推荐结果

a. Recommendation result in Haidian, Beijing



b. 北京东城区推荐结果 1

b. Recommendation result 1 in Dongcheng, Beijing



c. 北京东城区推荐结果 2

c. Recommendation result 2 in Dongcheng, Beijing

注: 图为北京某地植保作业推荐结果, 图中的多边形框为查询到的植保作业对应地块。

Note: Fig.7 is the result of plant protecting job recommendation in Beijing. The polygon frames are the fields of plant protection jobs in the result.

图 7 无人机植保作业匹配推荐结果

Fig.7 Plant protecting job recommendation result with unmanned aerial vehicles

为了验证区域查询功能的准确性, 在图 6a 的基础上, 改变了矩形查询区域的大小与位置, 重新绘制查询区域, 如图 6b 所示, 矩形缩小后, 只查询到 2 条作业记录。对比图 6a 和图 6b 可得结论, 无人机植保作业匹配系统仅会搜索到与输入的查询区域相交的作业地块, 换言之, 无人机植保作业匹配系统可以搜索到任意查询区域内的全部作业地块, 结果准确。

无人机植保作业推荐功能也只会推荐与用户当前位置最近的若干条满足无人机作业特点的植保作业。如图 7a 所示, 当前用户位置为北京市海淀区, 进入植保作业推荐页面后, 直接显示出在北京海淀区附近的 4 条植保作业记录。

为了验证植保作业推荐功能的准确性和实用性, 更改了用户的当前位置。在图 7a 中, 用户位置为北京市海淀区某位置, 因此系统会搜索距离该位置最近的 4 条满足无人机作业特点的植保作业; 而在图 7b 中, 用户当前位置变为北京市东城区某位置, 平台推荐结果则发生了变化。这表明, 无人机植保作业匹配算法能够搜索距离目标位置最近的符合无人机作业特点植保作业, 具有较好的实用性。

此外, 为用户推荐的植保作业还可经过智能排序。植保作业有不同类型, 如喷洒药剂、粉剂。作物类型也有不同的分类, 如高秆作物、低矮作物、果树等。而植保无人机的机型更是种类繁多, 不同的无人机适合的植保作业也不同。无人机植保作业匹配系统可以根据植保无人机用户的植保无人机机型, 或者是植保作业用户自己的偏好设定, 将用户附近的匹配目标按照匹配度排列。匹配度权重设计如下: 用户偏好>无人机适宜的植保类型>无人机适宜的作物类型。

如图 7c 所示, 在更换为另一个位置在北京市东城区的植保无人机用户后, 搜索到图 7c 中的 3 条植保作业, 但因该用户的植保无人机的配备更适合喷洒粉剂, 因此粉剂类型的植保作业排在前面。无人机植保作业匹配推荐算法可以根据用户的位置、用户的偏好和无人机的属性为用户推荐最为合适的作业, 由此可见, 该算法较好的智能性和实用性。

综上所述, 基于 R 树空间索引技术的无人机植保作业匹配算法, 具有较高的聚集性、动态性灵活性、准确性和高效性, 满足无人机植保作业匹配实际需要。

#### 4 结 论

本文研究并实现了一种基于 R 树空间索引技术的高效、可靠的无人机植保作业匹配算法, 经过模拟测试, 得出结论如下:

1) 基于 R 树空间索引技术的无人机植保作业匹配算法能够满足不低于 2 000 的并发请求并提供毫秒级的反应速度, 大大提高了系统的植保作业查询与匹配速度, 具有高效性。

2) 无人机植保作业匹配算法具有灵活、快捷方便、计算量小、精确度高等特性, 可以查找任意区域内的植保作业, 保障了系统的实用性。

3) 无人机植保作业匹配算法可以自动地、准确地、快捷地为植保作业用户匹配附近符合植保作业需求的植保无人机, 并进而按照用户偏好或者作业类型为植保作业用户推荐适宜的无人机, 增加了系统的智能性。

#### [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 with English abstract)
- [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, 28(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, 28(9): 46-49, 112. (in Chinese with English abstract)
- [3] 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 with English abstract)
- [4] 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 with English abstract)
- [5] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 基于空间质量平衡法的植保无人机施药雾滴沉积分布特性测试[J]. 农业工程学报, 2016, 32(24): 89-97. Wang Changling, He Xiongkui, Wang Xiaonan, et al. Distribution characteristics of pesticide application droplets deposition of unmanned aerial vehicle based on testing method of spatial quality balance[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(24): 89-97. (in Chinese with English abstract)
- [6] 王昌陵, 何雄奎, 王潇楠, 等. 无人植保机施药雾滴空间质量平衡测试方法[J]. 农业工程学报, 2016, 32(11): 54-61. Wang Changling, He Xiongkui, Wang Xiaonan, et al. Testing method of spatial pesticide spraying deposition quality balance for unmanned aerial vehicle[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(11): 54-61. (in Chinese with English abstract)
- [7] 刘婷婷. 北京市植保无人机推广前景与发展建议[J]. 农业工程, 2014(增刊 2): 17-19, 21. Liu Xingtao. Promotion prospect and development suggestion of unmanned aerial vehicle for plant protection in Beijing[J]. Agricultural Engineering, 2014(Supp.2): 17-19, 21. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张逊逊, 许宏科, 朱旭. 低空低速植保无人直升机避障控制系统设计[J]. 农业工程学报, 2016, 32(2): 43-50. Zhang Xunxun, Xu Hongke, Zhu Xu. Design of obstacle avoidance control system for low altitude and low speed eppo unmanned helicopter[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(2): 43-50. (in Chinese with English abstract)
- [9] 徐博, 陈立平, 谭戎, 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 with English abstract)
- [10] 朱虹, 邢立强. 全国行政区划代码标准应用现状及管理服务模式探究[J]. 中国标准化, 2012(4): 72-75. Zhu Hong, Xing Liqiang. Analysis on application status of management service model and research on codes for the administrative divisions of the People's Republic of China[J]. China Standardization, 2012(4): 72-75. (in Chinese with English abstract)
- [11] 董俊, 黄传河. 改进 Dijkstra 算法在 GIS 导航应用中最短路径搜索研究[J]. 计算机科学, 2012(10): 245-247, 257. Dong Jun, Huang Chuanhe. Research on shortest path search of improved dijkstra algorithm in GIS navigation application[J]. Computer Science, 2012(10): 245-247, 257. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王树西, 吴政学. 改进的 Dijkstra 最短路径算法及其应用研究[J]. 计算机科学, 2012, 39(5): 223-228. Wang Shuxi, Wu Zhengxue. Improved Dijkstra shortest path algorithm and its application[J]. Computer Science, 2012, 39(5): 223-228. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李擎, 谢四江, 童新海, 等. 一种用于车辆最短路径规划的自适应遗传算法及其与 Dijkstra 和 A\* 算法的比较[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(11): 1082-1086. Li Qing, Xie Sijiang, Tong Xinhai, et al. A self-adaptive genetic algorithm for the shortest path planning of vehicles and its comparison with Dijkstra and A\* algorithm[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(11): 1082-1086. (in Chinese with English abstract)
- [14] 熊才权, 马乐乐, 孙贤斌. 空间索引技术研究[J]. 计算机技术与发展, 2010, 20(10): 219-223. Xiong Caiquan, Ma Lele, Sun Xianbin. Research on the technology of spatial index[J]. Computer Technology & Development, 2010, 20(10): 219-223. (in Chinese with English abstract)
- [15] 姚驰. 基于网格索引与几何特征的多尺度面状地理实体匹配方法研究[D]. 南京: 南京师范大学, 2012. Yao Chi. The Research on Match Method of Multi-scale Geographic Entity Based on Grid Index and Geometric Features[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [16] 赵彬彬. 多尺度矢量地图空间目标匹配方法及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2011. Zhao Binbin. A Study on Multi-scale Vector Map Objects Matching Method and Its Application[D]. Changsha: Central South University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [17] 陶志刚, 赵敬道, 谭建成. 地理空间索引技术研究[J]. 测绘学院学报, 2002, 19(1): 73-75. Tao Zhigang, Zhao Jingdao, Tan Jiancheng. The researching of technique on geographic spatial index[J]. Journal of

- Geomatics Science and Technology, 2002, 19(1): 73–75. (in Chinese with English abstract)
- [18] 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.
- [19] 郑玉明, 廖湖声, 陈镇虎. 空间数据库引擎的 R 树索引[J]. 计算机工程, 2004, 30(5): 38–39.  
Zheng Yuming, Liao Husheng, Chen Zhenhu. R-tree index in a spatial database engine[J]. Computer Engineering, 2004, 30(5): 38–39. (in Chinese with English abstract)
- [20] 赵园春, 李成名, 赵春宇. 基于 R 树的分布式并行空间索引机制研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6): 38–41, 81.  
Zhao Yuanchun, Li Chengming, Zhao Chunyu. Research on the distributed parallel spatial indexing schema based on R-Tree[J]. Geography and Geo-Information Science, 2007, 23(6): 38–41, 81. (in Chinese with English abstract)
- [21] 钟频. 无人机气流振动下飞行航迹规划建模仿真[J]. 计算机仿真, 2016, 33(5): 74–77.  
Zhong Pin. Modeling and simulation of flight path planning under the airflow vibration of unmanned aerial vehicle (UAV)[J]. Computer Simulation, 2016, 33(5): 74–77. (in Chinese with English abstract)
- [22] 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), Penang: IEEE, 2012: 322–327.
- [23] 周帆. 基于 R-树的空间数据索引技术的研究与实现[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2009.  
Zhou Fan. Research and Implement of Spatial Data Index Technology Based on R-tree[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2009. (in Chinese with English abstract)
- [24] 张明波, 陆锋, 申排伟, 等. R 树家族的演变和发展[J]. 计算机学报, 2005, 28(3): 289–300.  
Zhang Mingbo, Lu Feng, Shen Paiwei, et al. The evolvement and progress of R-tree family[J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(3): 289–300. (in Chinese with English abstract)
- [25] Lu Hongjun, Ooi B C. Spatial indexing: Past and future[J]. IEEE Data Engineering Bulletin, 1993, 16(3): 16–21.
- [26] Guttman A. R-tree: A dynamic index structure for spacial searching[J]. Proceedings of Acm Sigmod, 1984, 204(2): 47–57.
- [27] Sellis T, Roussopoulos N, Faloutsos C. The R+-tree: a dynamic index for multi-dimensional data[C]// In: Proceedings of the 13<sup>th</sup> VLDB, Brighton, England, 1987: 507–518.
- [28] Beckmann N, Kriegel H P, Schneider R, et al. The R\*-tree: An efficient and robust access method for points and rectangles[J]. Acm Sigmod Record, 1990, 19(2): 322–331.
- [29] Kamel I, Faloutsos C. Hilbert R-tree: An improved R-tree using fractals[C]// International Conference on Very Large Data Bases. Morgan Kaufmann Publishers Inc. 1999: 500–509.
- [30] 余登峰. 基于 R 树的空间数据索引技术研究及实现[D]. 北京: 中国地质大学, 2006.  
Yu Dengfeng. The Research and Implement of Spatial Date Index Technology Base on R-tree[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2006. (in Chinese with English abstract)

## Matching algorithm for plant protecting unmanned aerial vehicles and plant protecting jobs based on R-tree spatial index

Yang Ze, Zheng Lihua<sup>\*</sup>, Li Minzan, Yang Wei, Sun Hong

(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China  
Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** Compared with the traditional plant-protecting machine, plant protection unmanned aerial vehicle (UAV) has advantages of high efficiency, high performance, good precision and good spraying effect. Most importantly, the promotion of physical protection is very significant. In order to fully guarantee that the plant protecting assignments can be allocated scientifically and the plant protecting UAV resources can be deployed efficiently, as well as for meeting the needs of plant protecting spray jobs, a high efficient algorithm for matching UAVs with plant protecting jobs was designed, and a high effective plant protecting assignments scheduling system was developed. The system can not only provide the UAV users with appropriate matching plant protecting assignments, but also help to find the appropriate matching UAVs for the users who need to rent the specific UAVs to carry out plant protection spray. In this paper, the existing technologies were analyzed and compared to find out which one could be used to fulfill matching algorithm for UAVs and assignments, the features of plant protection assignment for UAV were clarified, and a matching algorithm for UAV and its plant protection assignment based on the R-tree spatial indexing was designed. The R-tree is a completely dynamic spatial index of data structure, and sub-algorithms such as node inserting, deleting and querying operations are mutually independent. The matching algorithm for plant protection assignment includes the algorithms of inserting plant protecting assignment into the R-tree, querying plant protection assignment from the R-tree, and deleting some assignment when it is finished or canceled. By using the matching algorithm, the plant protection assignment intelligent recommendation system was developed, and it mainly included the region querying function and intelligent recommendation function. The region search function allows UAV users to search all the plant protection assignments within the scope of any rectangle dragged on the map. Meanwhile the intelligent recommendation function based on the user's current location can recommend the UAV users with the plant protection assignments nearby which meet the UAV's spray features, and also can help the users who have the specific plant protecting assignment to find the right UAVs to rent. We built the entire system by using Django web framework and programmed with Python language and JavaScript language. The results of system test showed that the matching algorithm for UAVs and their plant protection assignments based on the R-tree could handle more than 2 000 concurrent requests at the same time even in a lower configuration server. The querying algorithm's response time was less than 1 ms when processing a single request. The test of plant protection job inserted into the R-tree in batches showed that inserting 1 000 jobs took less than 1 s, and thanking to the dynamic nature of the R-tree, we could read and write the R-tree at the same time, so the insertion of the R-tree did not affect the query operation. It illustrates that the algorithm is flexible, accurate, dynamic and highly efficient, and it can be used to match UAVs with the corresponding appropriate plant protecting assignments reasonably and intelligently.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles; indexing; algorithms; matching; plant protection assignment; R-tree spatial index technique; intelligent scheduling