

基于 WebGIS 的农机多机协同导航服务平台设计

李 寒¹ 钟 涛¹ 张可意² 王 焱² 张 漫²

(1. 中国农业大学智慧农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为向多台农业机械协同作业应用场景提供地图和导航服务支持,设计并开发了基于 WebGIS 的农机多机协同导航服务平台,该平台由 GIS 服务和农机调度 2 个功能模块组成。GIS 模块基于 GeoServer 和 JavaWeb 提供网页端地图服务,在显示农场地图、实时标注农机位置的同时,也提供多农机导航结果的可视化显示功能;农机调度模块以路径规划算法和任务分配算法为核心,负责提供导航服务,在用户输入任务列表并调用服务的情况下,以 GeoJSON 格式返回各农机的任务分配以及路径规划结果。此外,为了筛选出满足平台需求且性能最优的算法,针对路径规划算法设计了算法性能对比实验,在导航距离近、中、远的 3 条路径上分别测试了基于 A*、Bellman - Ford、Dijkstra、Floyd 和 SPFA 5 种算法的路径规划算法,并对不同算法的执行时间和最优路径长度进行了对比;针对任务分配算法设计了不同任务数量场景下的仿真对比实验,在任务数量为 8、10、14、18 的场景下分别测试了基于蚁群算法和遗传算法的任务分配算法,并对两者的执行速度和最优路径长度进行了对比。结果表明:基于 Dijkstra 算法的路径规划算法在结果最优的前提下执行速度最快,平均单次执行时间为 0.25 ms。基于遗传算法的任务分配算法可以有效降低多机协同的路径代价,相较于随机生成的工作序列,路径代价减少 50% ~ 54%;相较于基于蚁群算法的任务分配算法,农机最佳路径长度减少 19% ~ 36%,执行时间减少 51% ~ 66%,平均执行时间在 1 s 以内。开发的多机协同导航服务平台通过使用 Dijkstra 算法和遗传算法分别进行路径规划和任务分配,能够基本满足多机协同作业的实时性需求。

关键词: 农业机械; 多机协同; 导航; 任务分配; 路径规划; WebGIS

中图分类号: S126 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2022)S1-0028-08

Design of Agricultural Machinery Multi-machine Cooperative Navigation Service Platform Based on WebGIS

LI Han¹ ZHONG Tao¹ ZHANG Keyi² WANG Yan² ZHANG Man²

(1. Key Laboratory of Smart Agriculture System Integration, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China

2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to provide map and navigation service support for multi-agricultural machinery cooperative operation application scenarios, a multi-machine cooperative navigation service platform based on WebGIS was designed and developed. The platform consisted of two functional modules: GIS service and agricultural machinery scheduling. The GIS module provided web-side map services based on GeoServer and JavaWeb. While displaying the farm map and marking the location of agricultural machinery in real time, it also provided the visual display function of the navigation results of multiple agricultural machinery; the agricultural machinery scheduling module took the path planning algorithm and task allocation algorithm as the core, and responsible for providing navigation services. When the user provided the task list and invoked the service, it returned the task assignment and path planning results of each agricultural machine in GeoJSON format. In addition, in order to screen out the algorithm

收稿日期: 2022-06-28 修回日期: 2022-08-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD2000604)和北京市创新训练项目

作者简介: 李寒(1986—),女,副教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cau_lihan@cau.edu.cn

通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

that met the platform requirements and had the best performance, algorithm performance comparison experiment were designed. The path planning algorithms based on A*, Bellman-Ford, Dijkstra, Floyd and SPFA were tested on three paths with short, medium and far navigation distances respectively, and the execution time and optimal path length were recorded and compared; for the task allocation algorithm, simulation comparison experiments under different task number scenarios were designed. The task allocation algorithms based on ant colony optimization and genetic algorithm were tested under the scenarios of 8, 10, 14 and 18 tasks respectively, and the execution speed and optimal path length of the algorithms were recorded and compared. The results showed that the path planning algorithm based on Dijkstra algorithm had the fastest execution speed under the premise of optimal results, and the average single execution time was 0.25 ms. The task assignment algorithm based on genetic algorithm can effectively reduce the path cost of multi-machine collaboration. Compared with the randomly generated work sequence, the path cost was reduced by 50% ~ 54%; compared with the algorithm based on ant colony optimization, the optimal path length was reduced by 19% ~ 36%, the execution time was reduced by 51% ~ 66%, and the average running time was within 1 s. The developed multi-machine cooperative navigation service platform can basically meet the real-time requirements of multi-machine cooperative operation by using Dijkstra algorithm and genetic algorithm for path planning and task allocation.

Key words: agricultural machinery; multi-machine collaboration; navigation; task assignment; path planning; WebGIS

0 引言

随着农业生产的机械化和现代化,农机自动驾驶技术已成为智慧农业的重要组成部分,可以有效降低人力成本,实现农机的高效、精准作业^[1]。多机协同作业是农机自动驾驶领域的关键技术之一^[2-3],对促进农业生产和提升农机智能化、规模化作业水平具有重要意义。

多机协同广泛应用于多无人机协同控制^[4-6]、多机器人路径规划^[7-8]等领域。WANG 等^[9]基于改进的多目标优化算法提出了异构多无人机协同任务分配的一种可行解;李响^[10]利用遗传算法对蚁群算法中的信息素参数进行求解,有效地改进了蚁群算法容易陷入局部最优解的缺点,在多机器人任务分配问题上获得了更好的寻优性能;BAUMANN 等^[11]基于模块化思想提出了多机器人协同作业的分布式功能框架;GIORDANI 等^[12]开发了一种分布式的匈牙利算法用于解决多机器人的任务分配问题。

在农业领域,面向无人农场的多机协同研究仍相对较少,同时相较于无人机和机器人,农机实际作业情况更为复杂^[13-17],需要同时考虑农机位置、农机作业状态以及作业功能等问题。如何为机群合理分配任务、规划农机作业路径,是提高多机协同工作效率的关键问题之一,高效的规划策略可以有效地提升农机的实际作业效率、降低系统耗能^[18-23]。王猛等^[24]基于改进合同网算法提出了一种同种农机机群动态作业任务分配方法,曹如月等^[25]基于蚁群算法实现了农机作业的任务分配和任务序列规划模

型。JENSEN 等^[26]基于 Dijkstra 算法提出了用于解决运粮车-收获机协作模型的路径规划方法。SEYYEDHASANI^[27]提出了一种多农机调度方案,将多台农机的任务分配问题转换为车辆路径问题,并利用禁忌搜索对问题进行求解。

虽然国内外在多农机导航方面已经取得了一定的成果,但基本集中于算法理论研究以及监控管理平台设计部分,在多机协同任务分配和路径规划导航算法如何应用于平台方面的工作仍需进一步开展和实践。本文拟设计一套基于 JavaWeb 和 WebGIS 技术的多机协同导航服务平台,可视化地实时显示农机的位置信息和农场地图的同时,为多台农机协作完成田间多任务的场景提供导航算法决策和软件平台支持。

1 系统总体设计

1.1 系统结构设计

本文拟设计的多机协同导航服务平台总体结构如图 1 所示。车载终端用于采集农机位置及状态信息,通过无线网络(如 4G 网络)将采集到的农机状态及位置信息发送至服务器并存储在数据库中。用户通过浏览器向服务器端发送调用地图服务以及调用规划算法等请求,服务器根据用户请求返回相应的地图数据和算法规划结果,从而实现多农机的协同作业规划。多机协同导航服务平台在导航系统中为农机在地块间的路径规划提供算法决策支持,优化农机作业路径的同时也提高了农机的整体作业效率。

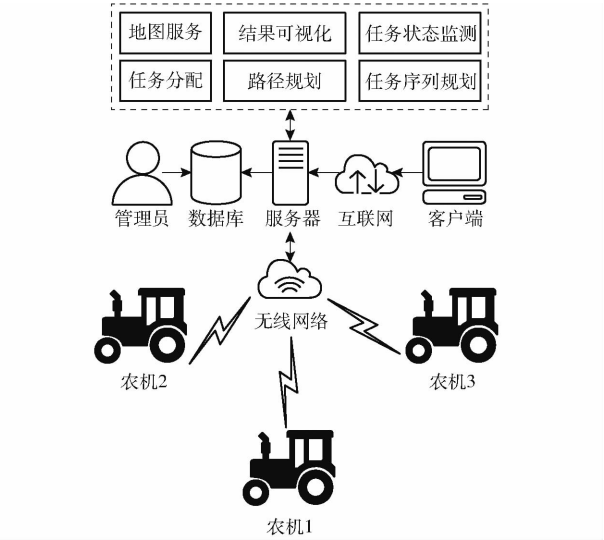


图1 多机协同导航服务平台总体结构示意图

Fig.1 Overall structure diagram of multi-machine cooperative navigation service platform

1.2 平台功能设计

多机协同导航服务平台主要分为 GIS 服务和农机调度 2 个模块,具体功能模块的划分见图 2。其中 GIS 服务包括地图显示、农机状态以及规划结果可视化 3 部分;农机调度则包括信息获取及处理、多机协同调度两部分。

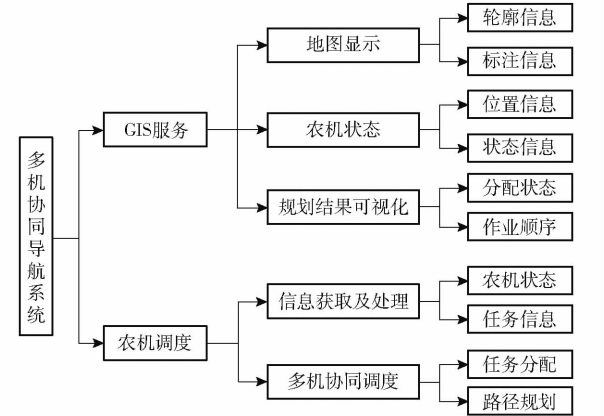


图2 导航服务平台功能模块设计

Fig.2 Function module design of navigation service platform

GIS 服务在多机协同导航服务平台中发挥着前端的作用,是用户与系统交互的入口,其核心功能在于为用户提供可视化的地图服务。目前 WMS(Web map service)和 WMTS (Web map tile service)是比较常用的两种地图服务,WMS 提供数据可动态更新的地图服务,WMTS 提供静态的地图服务。相较于 WMS,WMTS 牺牲了定制地图的灵活性换取了数据加载的速度。考虑到农场地图对精细度要求相对较高,地图资源较大,地块信息不经常更新等因素,本文选取 WMTS 作为主要的服务提供手段。

农机调度是多机协同导航服务平台的核心功能模块,其设计目的在于通过调用算法为每台参与协作的农机提供合理的任务分配以及路径规划服务,同时需要对算法的结果以及算法的执行速度进行优化和均衡,以保证为农机提供及时、合理的任务分配和路径规划策略。

1.3 平台功能实现流程设计

本研究所设计的功能模块的实现流程如图 3 所示,GIS 服务和农机调度模块分别基于 GIS 和 JavaWeb 技术实现。

GIS 服务方面,在实地采集到农场地块及边界的经纬度数据并收集整理成 csv 文件后,利用 QGIS 进行数据的筛选和地图的绘制,绘制完成后基于 PostgreSQL 数据库及 PostGIS 插件完成地图数据的存储,之后便可基于 GeoServer 进行地图的发布,从而提供地图服务。

农机调度基于 MVC 框架搭建,具体实现流程如图 4 所示。在收到前端页面用户提交的包含导航请求、起点和终点索引的表单后,navigationServlet 首先向 RoadService 类发送请求,RoadService 通过 RoadDao 类执行 SQL 语句访问数据库、获取 Json 格式的道路节点信息并解析为各道路、地块节点的邻接矩阵,然后将邻接矩阵返回至 navigationServlet。之后,navigationServlet 以邻接矩阵和起终点索引为参数调用多农机调度算法并获得规划路线的道路节

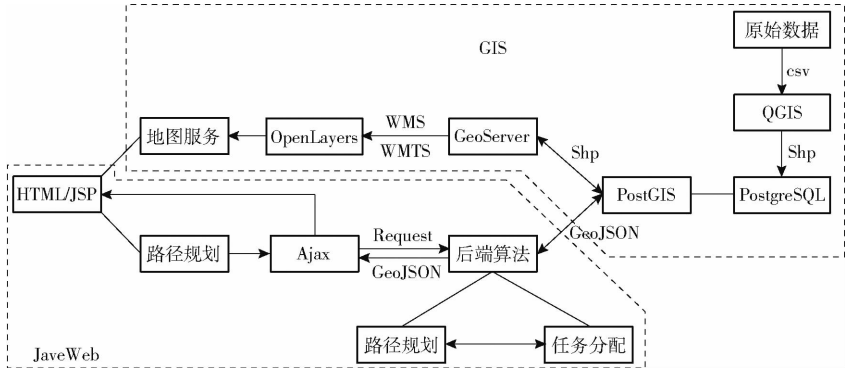


图3 平台功能实现整体流程图

Fig.3 Overall process design of platform function realization

点索引列表,接着将道路节点索引列表交由 GeojsonFactory 类并基于索引和道路节点经纬度的对应关系打包成 GeoJSON 格式的字符串返回前端,最后前端利用后端回传的数据完成地图图层的渲染和更新,从而实现农机调度的可视化展示。

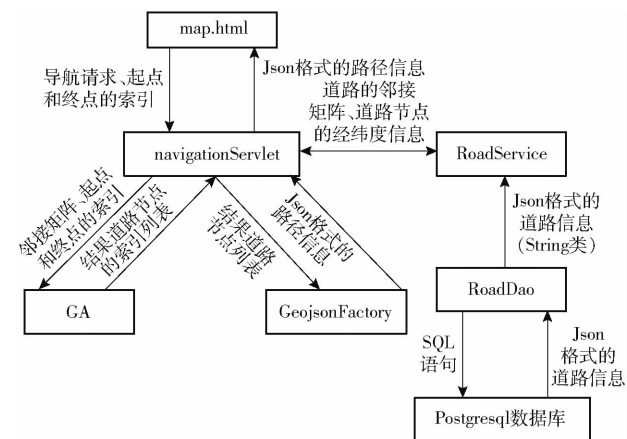


图4 平台功能实现整体流程图

Fig. 4 Process design of agricultural machinery dispatching

2 农机调度算法设计

2.1 路径规划算法

2.1.1 设计目的

路径规划算法需要解决的问题是如何求出农机从某一点出发,到另一点的最短路径,以降低农机在地块间移动的路径代价,提高农机的作业效率。

由于任务分配算法执行过程中也需频繁调用路径规划算法,所以在此应用场景下路径规划算法需要在保证结果准确的前提下尽可能减少算法的时间复杂度。

2.1.2 算法设计

在无人农场不同地块单个农机路径导航的应用场景下,可以将地块抽象成一个点,从而将整个农场抽象成一幅无向连通图,农机在 2 个地块间的导航即可转换为求解连通图中 2 个节点的最短路径。

Dijkstra 算法^[28]可以很好地解决这个问题,由于要同时计算最短路径和生成导航路线且道路点位较多,计算起点到连通图其他所有节点的最短距离时间较长。所以在 Dijkstra 算法的基础上做出了如下改动:①引入了父节点数组,每次对节点距离进行刷新时,都会利用父节点数组记录该点的前置节点信息(即上一次循环中确认到起点最短距离的节点),当求出起点到终点的最短距离时,可利用父节点数组进行路径回溯,并生成起点到终点的最短路径。②求出起点到终点的最短距离后直接终止算法,并利用父节点数组回溯输出生成路径。

该算法执行流程如图 5 所示。

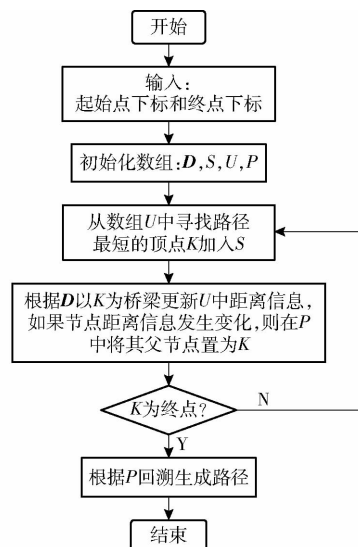


图 5 路径规划算法执行流程图

Fig. 5 Execution flow chart of path planning algorithm

图 5 中, D 为无向连通图中所有点的二维带权邻接矩阵。对于矩阵中的值, 如果两点相连则为两点之间距离, 不相连则为 -1 ; S 为已经确定距离起点最短距离的点集, 记录点的下标和该点与起点最短距离, 该集合初始状态下只包含起点; U 为尚未确定距离起点最短距离的点集, 记录点的下标和当前状态该点与起点的距离。如果当前状态不可达起点则距离值为无穷, 该集合初始状态下包含无向连通图中除起点外其他所有节点; P 为记录每个节点在距离起点最短路径上的前置节点, 在算法结束时用于回溯生成起点到该节点的最短路径。

2.2 任务分配算法

2.2.1 设计目的

任务分配算法需要解决的问题是如何将任务合理分配给当前可用的农机,并合理规划任务执行顺序,以使所有农机的作业总路径最短,从而找到全局最优的解决方案。

任务分配问题的难点在于在实际应用场景下,如何在合理的时间范围内寻找到最优解。在信息量日益增多的复杂生产环境下,寻找最优解花费的时间和资源成几何式增长,这也促使了启发式算法的产生。启发式算法可以在可接受的时间和空间代价下给出待解决组合优化问题的多个可行解,在实际应用场景中可根据代价函数对可行解进行筛选,从而得到在时间允许范围内的最优可行解。

2.2.2 算法设计

在本研究中基于遗传算法实现了任务分配算法,将每个任务序列视为一个染色体,无向连通图中每个代表地块的节点视为一个基因单位,总路径长度视为染色体的适应度值,在多次种群演化中选取适应度值最低(即路径代价最小)的染色体作为最

优可行解。出于对算法执行时间的考虑,在种群演化过程中以任务序列相邻点间的欧氏距离之和作为个体的适应度,在达到最大迭代次数之后再对适应度最低的个体对应的任务序列采用路径规划算法计算实际路径长度。

本文设计的算法执行流程如图 6 所示,具体步骤为:①随机生成 N 个任务序列构成初始种群 T 。②计算种群中每个个体适应度。③单点交叉,并将新生成的个体加入种群。④变异,并将新生成的个体加入种群。⑤轮盘赌选择 N 个个体构成新种群。⑥如果达到最大迭代次数则结束算法并筛选最优个体,否则跳转至步骤②继续循环。

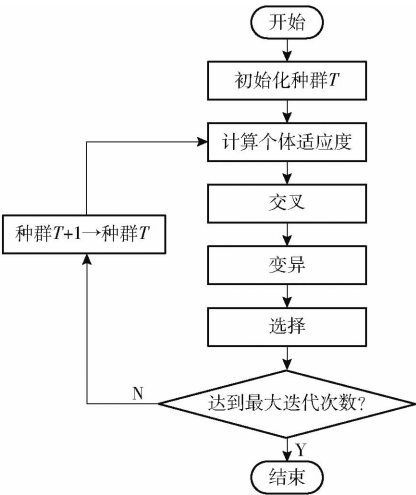


图 6 任务分配算法执行流程图

Fig. 6 Execution flow chart of task allocation algorithm

3 系统实现与测试

平台基于操作系统 Microsoft Windows 10 开发,服务器操作系统为 Centos 7,数据库选用 PostgreSQL,网页发布基于 B/S 架构,并以 war 包的形式完成页面的动态部署。

平台具体实现流程为:①利用 QGIS 对农场实地采集的道路、地块信息进行数据清洗,绘制农场矢量地图并对农场可行驶道路进行标定,分别以 Shp 和 GeoJSON 的格式进行发布。②以 IntelliJ IDEA 作为开发平台,选用 JAVA 作为开发语言,设计并开发多机协同导航服务平台。③选用 PostgreSQL 进行数据库开发,利用 PostGIS 插件完成矢量地图、道路信息的存储。④基于 Dijkstra 算法和遗传算法进行多农机算法的设计和开发,与平台和数据库进行对接,完成前后端的交互并进行测试,实现地块间多机协同作业的任务分配和路径规划。

3.1 GIS 服务

3.1.1 数据清洗

地图数据来源于中国农业大学涿州实验农场的

电子地图测绘数据,但由于测绘时存在信号遮挡、设备不稳定等因素,所以仍存在部分噪点,为了保证调度算法可视化时农机位置以及规划路线不出现明显偏差,需要在数据清洗阶段对此类不合理数据进行处理,本研究中选用采集数据与卫星地图进行对比的方法通过 QGIS 对地图数据进行清洗,农场卫星图和数据清洗流程过程如图 7、8 所示。



图 7 农场卫星图

Fig. 7 Farm satellite image

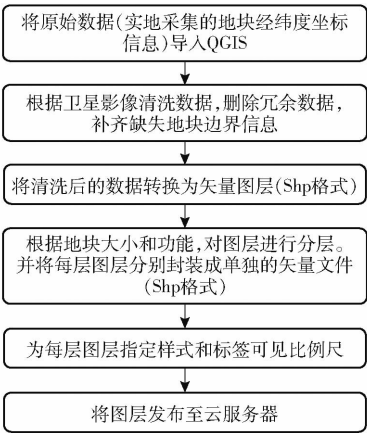


图 8 数据清洗流程图

Fig. 8 Data cleaning process

3.1.2 地图绘制及发布

地图绘制包括电子地图绘制和道路信息标定两部分。

在电子地图绘制部分,经过数据清洗后得到了包括大小地块以及各类设施在内的 46 个矢量地图文件,考虑到服务器提供地图服务时的负载问题,首先根据地块尺寸和功能将所有地图文件划分为 4 类,并按类分别进行组合,之后将组合后的 4 层地图同时部署至服务器的同一图层组内,提供服务链接供用户调用。地图绘制结果如图 9 所示。

在道路信息标定方面,考虑到算法的执行速度和执行结果,需要在尽可能地减少参与运算的节点的同时保证道路信息的完整性和合理性,所以采用了 1 个关键节点标记 1 个地块、2 个普通节点描述 1

条直线、多个密集节点描述曲线的绘制策略,绘制结果如图 10 所示。

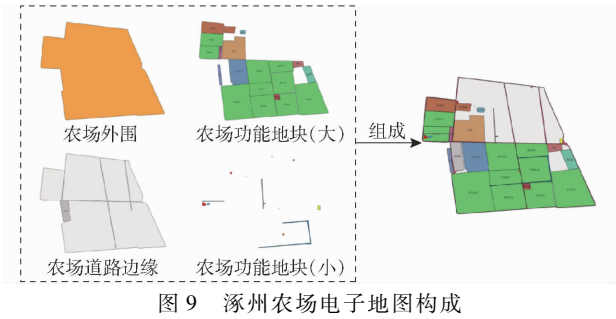


图 9 涿州农场电子地图构成

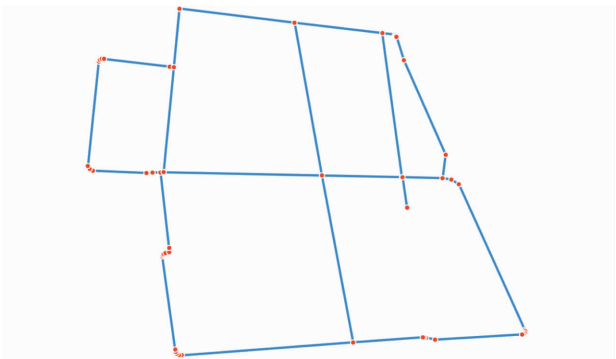


图 10 涿州农场道路信息标定示意图

Fig. 10 Road information calibration diagram of Zhuozhou farm

3.1.3 规划结果可视化

服务器收到农机调度申请以及传输的任务需求列表后,首先采集当前所有可用农机的位置信息,之后将任务需求列表和农机的位置信息打包作为输入调用调度算法。算法执行完毕后,服务将算法的执行结果处理成 GeoJSON 格式的数据返回浏览器端并交由浏览器渲染。浏览器端可视化结果如图 11 所示。



图 11 多农机导航结果可视化示意图

Fig. 11 Visualization of navigation results of multiple agricultural machines

图 11 中不同农机的作业任务通过颜色和着色地块名称下方第 1 个数字进行区分,同一农机分配任务的作业顺序通过着色地块名称下方的第 2 个数

字进行指示。以图 11 为例,1 号农机的作业顺序为:1 号农田→2 号农田;2 号农机的作业顺序为:9 号农田→13 号农田;3 号农机的作业顺序为:16 号农田→11 号农田。

3.2 算法仿真与分析

为了确定算法的参数以及验证算法的实用性和有效性,针对路径规划算法设计了多种算法的性能分析对比实验,针对任务分配算法设计了不同任务数量下的仿真实验,从算法执行速度以及计算结果的优劣对平台的导航服务性能进行评价。

3.2.1 算法仿真

(1) 路径规划算法

根据单农机点对点导航这一应用场景分别基于 Dijkstra、A*、Bellman – Ford、Floyd 和 SPFA (Shortest path faster algorithm) 实现了路径规划算法,以涿州农场地块间导航为例进行对比实验。本文分别选取相距距离短、中、长的 3 组地块为例,测试各算法在不同距离下的性能并进行对比,其中路径长度是根据规划路径上相邻道路节点的经纬度利用半正矢公式 (Haversine formula) 进行距离换算,并最后求和得出。实验结果见表 1。

表 1 路径规划算法对比实验结果

Tab. 1 Comparative experimental results of path planning algorithms			
路径	算法	路径长度/m	平均单次执行时间/ms
11 号农田→16 号农田	A *	289. 07	0. 11
	Bellman – Ford	289. 07	1. 10
	Dijkstra	289. 07	0. 17
	Floyd	289. 07	3. 18
	SPFA	289. 07	0. 22
1 号温室→13 号农田	A *	1 017. 66	0. 36
	Bellman – Ford	783. 68	1. 11
	Dijkstra	783. 68	0. 33
	Floyd	783. 68	2. 22
	SPFA	783. 68	0. 36
1 号农田→8 号农田	A *	1 372. 71	0. 91
	Bellman – Ford	989. 01	1. 34
	Dijkstra	989. 01	0. 24
	Floyd	989. 01	2. 69
	SPFA	989. 01	0. 26

由表 1 可以看出,A* 算法虽然速度相对较快,但在路径较长的情况下难以收敛至最优解,Bellman – Ford 算法、Floyd 算法虽然能收敛至最优解,但执行速度相对较慢,Dijkstra 和 SPFA 算法在执行结果和时间上差异较小,但 Dijkstra 算法在执行速度上略快于 SPFA 算法。基于以上分析可得,单个农机需要从某个地块导航至另一个地块时,基于 Dijkstra

算法的路径规划算法能在最短的时间内计算出最优的结果,平均单次执行时间为 0.25 ms,综合性能表现最佳,可以满足多机协同导航服务平台对于单农机点对点导航的实时性需求。

(2)任务分配算法

涿州农场中共有 18 个功能地块,为了控制变量,将农机数量设定为 5,每台农机最大承接任务数设定为 5,测试过程中任务数量和农机的位置信息不发生变化,分别选取不同任务数的场景进行测试,任务列表随机产生。为确保系统使用的任务分配算法性能相对较优,分别用基于蚁群算法^[25]和遗传算法实现的任务分配算法进行仿真实验,迭代次数和初始种群数分别统一设置为 500 和 100。

实验结果如表 2 所示,其中随机工作序列平均路径长度为遗传算法初始化种群时所有个体的平均路径长度,最佳路径长度为任务分配算法最优个体所对应的路径长度。

表 2 任务分配算法仿真实验结果

Tab.2 Simulation results of task allocation algorithm

算法	任务数量	随机工作序列平均路径长度/m	最佳路径长度/m	执行时间/s
遗传算法	8	3 762.53	1 824.52	0.583
蚁群算法			2 823.30	1.210
遗传算法	10	4 554.56	2 291.71	0.728
蚁群算法			2 831.03	1.772
遗传算法	14	6 512.96	3 253.28	0.661
蚁群算法			4 944.26	1.987
遗传算法	18	8 158.03	3 764.54	0.798
蚁群算法			5 883.44	2.346

以任务数量为 8 的实验为例,有任务需求的地块列表为:1 号温室、2 号温室、8 号农田、13 号农田、14 号农田、荒地、萝卜地、水池农田。5 台农机初始停放位置邻近地块为:2 号农田、车库、16 号农田、9 号农田、11 号农田。

遗传算法分配结果为:1 号农机,起始点→荒地→1 号温室→2 号温室。2 号农机,起始点→水池农

田。3 号农机,起始点。4 号农机,起始点→13 号农田→萝卜地→14 号农田。5 号农机,起始点→8 号农田。

利用路径规划算法分别求出每个农机执行分配的任务序列的最短路径长度并加和,即可得到当前农机状态下完成任务列表的最佳路径长度,即 1 824.52 m。

基于不同任务数量下的任务分配仿真实验结果可以得出,任务分配算法可以较为明显地减少农机完成相同任务的路径代价,相较于随机生成的任务序列,路径代价减少 50%~54%。同时基于遗传算法的结果在不同任务数量的情况下结果都优于基于蚁群算法的结果,农机最佳路径长度减少 19%~36%,执行时间减少 51%~66%,均有较明显的改善。平均执行时间在 1 s 以内,基本能够满足多机协同导航服务平台对多农机任务分配的实时性需求。

4 结论

(1)基于 JavaWeb 和 WebGIS 开发了多机协同导航服务平台,可以为多农机协同作业应用场景提供地图服务和导航服务支持。

(2)对基于 Dijkstra 算法的路径规划算法和其他 4 种参考算法进行了对比实验。结果表明,基于 Dijkstra 算法的路径规划在保证结果准确性的前提下执行速度最快,平均单次执行时间为 0.25 ms,能满足多机协同导航服务平台对于单农机点对点路径规划的实时性需求。

(3)选取了不同数量的任务对基于遗传算法的任务分配算法进行了仿真对比实验。结果表明,任务分配算法能有效降低多农机协作的总路径代价,相较于随机生成的任务序列,路径代价减少 50%~54%;相较于基于蚁群算法的任务分配算法最佳路径长度减少 19%~36%,执行时间减少 51%~66%,平均执行时间在 1 s 以内,能基本满足多机协同导航的实时性需求。

参 考 文 献

[1] 谢斌,武仲斌,毛恩荣.农业拖拉机关键技术发展现状与展望[J].农业机械学报,2018,49(8):1-17.
XIE Bin, WU Zhongbin, MAO Enrong. Development and prospect of key technologies on agricultural tractor[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 1-17. (in Chinese)

[2] 胡静涛,高雷,白晓平,等.农业机械自动导航技术研究进展[J].农业工程学报,2015,31(10):1-10.
HU Jingtao, GAO Lei, BAI Xiaoping, et al. Review of research on automatic guidance of agricultural vehicles[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10): 1-10. (in Chinese)

[3] 张漫,季宇寒,李世超,等.农业机械导航技术研究进展[J].农业机械学报,2020,51(4):1-18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1-18. (in Chinese)

[4] 赵畅,刘允刚,陈琳,等.面向元启发式算法的多无人机路径规划现状与展望[J].控制与决策,2022,37(5):1102-1115.
ZHAO Chang, LIU Yungang, CHEN Lin, et al. Research and development trend of multi-UAV path planning based on metaheuristic algorithm[J]. Control and Decision, 2022, 37(5): 1102-1115. (in Chinese)

- [5] 唐灿,宗望远,黄小毛,等. 农用无人机多机多田块作业路径规划算法[J]. 华中农业大学学报, 2021, 40(5): 187–194.
TANG Can, ZONG Wangyuan, HUANG Xiaomao, et al. Path planning algorithm for cooperative operation of multiple agricultural UAVs in multiple fields[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2021, 40(5): 187–194. (in Chinese)
- [6] 张哲,吴剑,代冀阳,等. 基于改进 A* 算法的多无人机协同战术规划[J]. 兵工学报, 2020, 41(12): 2530–2539.
ZHANG Zhe, WU Jian, DAI Jiyang, et al. Cooperative tactical planning for multi-UAVs based on improved A* algorithm[J]. Defence Technology, 2020, 41(12): 2530–2539. (in Chinese)
- [7] 万逸飞,彭力. 基于协同多目标算法的多机器人路径规划[J]. 信息与控制, 2020, 49(2): 139–146.
WAN Yifei, PENG Li. Multi-robot path planning based on cooperative multi-objective algorithm[J]. Information and Control, 2020, 49(2): 139–146. (in Chinese)
- [8] 张辰,周乐来,李贻斌. 多机器人协同导航技术综述[J]. 无人系统技术, 2020, 3(2): 1–8.
ZHANG Chen, ZHOU Lelai, LI Yibin. Overview of multi-robot collaborative navigation technology[J]. Unmanned Systems Technology, 2020, 3(2): 1–8. (in Chinese)
- [9] WANG J, JIA G, LIN J, et al. Cooperative task allocation for heterogeneous multi-UAV using multi-objective optimization algorithm[J]. Journal of Central South University, 2020, 27(2): 432–448.
- [10] 李响. 基于蚁群优化的多机器人任务分配方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2020.
LI Xiang. Research on multi-robot task assignment method based on ant colony optimization[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2020. (in Chinese)
- [11] BAUMANN C, MARTINOLI A. A modular functional framework for the design and evaluation of multi-robot navigation[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2021, 144: 103849.
- [12] GIORDANI S, LUJAK M, MARTINELLI F. A distributed algorithm for the multi-robot task allocation problem[M]. Berlin: Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010: 721–730.
- [13] 曹如月,李世超,季宇寒,等. 多机协同导航作业远程管理平台开发[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(10): 92–99.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Development of remote monitoring platform for multi-machine cooperative navigation operation[J]. Journal of China Agricultural University, 2019, 24(10): 92–99. (in Chinese)
- [14] 王猛,赵博,刘阳春,等. 基于多变异分組遗传算法的多机协同作业静态任务分配[J]. 农业机械学报, 2021, 52(7): 19–28.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Static task allocation for multi-machine cooperation based on multi-variation group genetic algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(7): 19–28. (in Chinese)
- [15] UTAMIMA A, DJUNAIDY A. Agricultural routing planning: a narrative review of literature[J]. Procedia Computer Science, 2022, 197: 693–700.
- [16] GU J, SU T, WANG Q, et al. Multiple moving targets surveillance based on a cooperative network for multi-UAV[J]. IEEE Communications Magazine, 2018, 56(4): 82–89.
- [17] LIU X, XU S. Multi-UAV Cooperative navigation algorithm based on federated filtering structure[C] // 2018 IEEE CSAA Guidance, Navigation and Control Conference (CGNCC), 2018.
- [18] CAO R, LI S, JI Y, et al. Task assignment of multiple agricultural machinery cooperation based on improved ant colony algorithm[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 182: 105993.
- [19] WANG Y, HUANG G Q. A two-step framework for dispatching shared agricultural machinery with time windows[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2022, 192: 106607.
- [20] 王猛. 农机多机协同作业任务分配关键技术研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2021.
WANG Meng. Research on key technologies on farm task allocation for multi-machine cooperative operation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2021. (in Chinese)
- [21] 周俊,何永强. 农业机械导航路径规划研究进展[J]. 农业机械学报, 2021, 52(9): 1–14.
ZHOU Jun, HE Yongqiang. Research progress on navigation path planning of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 1–14. (in Chinese)
- [22] 翟志强,王秀倩,王亮,等. 面向主从跟随协同作业的导航路径规划方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(增刊): 542–547.
ZHAI Zhiqiang, WANG Xiuyan, WANG Liang, et al. Collaborative path planning for autonomous agricultural machinery of master slave cooperation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(Supp.): 542–547. (in Chinese)
- [23] 梁亚杰,杨丽丽,徐媛媛,等. 不确定场景下无人农机多机动态路径规划方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(21): 1–8.
LIANG Yajie, YANG Lili, XU Yuanyuan, et al. Dynamic path planning method for multiple unmanned agricultural machines in uncertain scenarios[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(21): 1–8. (in Chinese)
- [24] 王猛,赵博,刘阳春,等. 同种农机机群动态作业任务分配方法[J]. 农业工程学报, 2021, 37(9): 199–210.
WANG Meng, ZHAO Bo, LIU Yangchun, et al. Dynamic task allocation method for the same type agricultural machinery group[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(9): 199–210. (in Chinese)
- [25] 曹如月,李世超,季宇寒,等. 基于蚁群算法的多机协同作业任务规划[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 34–39.
CAO Ruyue, LI Shichao, JI Yuhan, et al. Multi-machine cooperation task planning based on ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 34–39. (in Chinese)
- [26] JENSEN M A F, BOCHTIS D, SØRENSEN C G, et al. In-field and inter-field path planning for agricultural transport units[J]. Computers & Industrial Engineering, 2012, 63(4): 1054–1061.
- [27] SEYYEDHASANI H. Using the vehicle routing problem (VRP) to provide logistics solutions in agriculture[D]. Kentucky: University of Kentucky, 2017.
- [28] DIJKSTRA E W. A note on two problems in connexion with graphs[J]. Numerische Mathematik, 1959, 1(1): 269–271.