

高锐涛, 资乐, 胡炼, 等. 农场道路图层构建和农机转移路径规划方法与试验 [J]. 华南农业大学学报, 2025, 46(2): 256-264.
GAO Ruitao, ZI Le, HU Lian, et al. Methods and experiments of farm road layer construction and farm machinery transfer path planning[J]. Journal of South China Agricultural University, 2025, 46(2): 256-264.

农场道路图层构建和农机转移路径规划方法与试验

高锐涛, 资乐, 胡炼, 何杰, 汪沛, 黄培奎, 谢佳生, 刘善琪

(华南农业大学 工程学院, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】针对农场内农机转移依赖人工驾驶或人工打点及规划耗时费力且不满足无人化应用需求等问题, 提出一种无人农场农机转移路径规划方法。【方法】利用 ArcGIS 构建农场道路图层和路网, 进行仿真试验; 开发基于图论的 Dijkstra 双向搜索的转移路径规划算法, 利用 Python 进行单、双向搜索仿真; 搭建基于 web 平台的转移路径规划系统。【结果】在路网的仿真中, 农机在 0.7 m/s 的速度下从机库到田块、田块到田块、田块到机库的行驶距离分别为 241.57、74.46 和 75.66 m, 对应时间分别为 345.10、106.37 和 108.09 s。Dijkstra 算法的单、双向搜索用时分别为 0.632 和 0.216 s, 在运算效率上双向搜索较单向搜索提升了 65.82%。基于 web 平台的转移路径规划系统的农机以 0.7 m/s 的速度从机库到田块、田块到田块和田块到机库进行了实车道路试验, 路径与农机实际路径采样点的算术平均值差绝对值小于 0.1 m, 可以满足无人农场农机的转移要求。相对于人工打点, 转移路径规划系统的路径规划效率更高。【结论】构建的农场道路图层、路网和转移路径规划系统, 满足无人农场农机的道路转移需求。研究结果可为无人农场的农机转移路径提供技术支持。

关键词: 无人农场; 农场道路图层; 路网; 转移路径规划系统

中图分类号: S220.2; TP391.41

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2025)02-0256-09

Methods and experiments of farm road layer construction and farm machinery transfer path planning

GAO Ruitao, ZI Le, HU Lian, HE Jie, WANG Pei, HUANG Peikui, XIE Jiasheng, LIU Shanqi

(College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】A path planning method for unmanned farm machinery transfer is proposed to address the problems of relying on manual driving or manual management and planning, which are time-consuming, labor-intensive, and do not meet the requirements of unmanned applications. 【Method】ArcGIS was used to construct farm road layers and networks, and simulation experiments were conducted. A Dijkstra bidirectional search transfer path planning algorithm based on graph theory was developed, single and bidirectional searches were simulated using Python. A transfer path planning system based on a web platform was built.

【Result】In the simulation of the road network, the distances traveled by agricultural machinery from the hangar to the field, from the field to the field, and from the field to the hangar at a speed of 0.7 m/s were 241.57, 74.46 and 75.66 m respectively, with corresponding time of 345.10, 106.37 and 108.09 s. The single and bidirectional search time of Dijkstra's algorithm were 0.632 and 0.216 s respectively, and the computational

收稿日期: 2024-05-01 网络首发时间: 2024-11-22 14:17:51

首发网址: <https://link.cnki.net/urlid/44.1110.S.20241122.0922.002>

作者简介: 高锐涛, 教授, 博士, 主要从事农机装备研究, E-mail: greater@scau.edu.cn; 通信作者: 胡炼, 研究员, 博士, 主要从事智能农机装备和无人农场研究, E-mail: lianhu@scau.edu.cn

基金项目: 广东省科技计划(2023B0202010023); 井冈山农高区省级科技专项“揭榜挂帅”项目(20222-051252)

efficiency of bidirectional search was improved by 65.82% compared to unidirectional search. The transfer path planning system for agricultural machinery based on the web platform conducted real vehicle road tests at a speed of 0.7 m/s from the hangar to the field, from the field to the field, and from the field to the hangar. The absolute arithmetic mean difference between the sampling points of the path and the actual path of the agricultural machinery was less than 0.1 m, which met the transfer requirements of unmanned farm agricultural machinery. Compared to manual marking, the path planning efficiency of the transfer path planning system was higher. 【Conclusion】 The constructed farm road layer, road network and transfer path planning system meet the road transfer needs of unmanned farm machinery. The research results can provide the technical support for the transfer path of agricultural machinery in unmanned farms.

Key words: Unmanned farm; Farm road layer; Road network; Transfer path planning system

智慧农业是现代农业的高级形式,无人农场是实现智慧农业的重要途径,智能农机是无人农场的技术支撑^[1-3]。无人农场在耕种管收方面要求农机在机库和田块、田块和田块间实现自主高效转移^[4]。当前农场道路的打点往往依靠人工,不能实现路径点的智能搜索,耗时费力;而直接使用第三方地图,经纬度会存在一定的位置和精准度误差^[5],不能适应无人化农场的应用需求。因此,农场路网模型的构建是实现农机转移路径的关键。

无人机获取农场图像在智慧农业中应用广泛^[6],路网也已逐渐普及。路鹏伟^[7]构建了一个充电站的双向排队和定价激励机制,并采用优化后的遗传算法为电动汽车驾驶者提供多样化的行车路线选择。王艳东等^[8]根据道路要素的SM_HD距离、方向夹角构建了一种基于匹配置信度的路网几何特征融合方法。陈亮^[9]基于格网模式道路网的内外形态特征,选定30种不同模式,定义了3个关键指标,为道路网格模式的识别与综合分析奠定了基础。周筝等^[10]提出了一种基于充电站路网拓扑结构的电动汽车充电路径规划方法。李宏伟等^[11]提出一种基于ArcGIS路网结构与交通拥挤度分析的电动汽车充电负荷预测方法。刘纪平等^[12]提出了一种从大规模粗糙轨迹数据中自动生成路网的方法。温廷新等^[13]通过引入K-means聚类对客户进行聚类,构建了时变路网下带软时间窗的电动汽车多温共配路径优化模型。Liu等^[14]提出一种多属性评价和修正的城市路网关键节点分类识别方法,采用动态分类法和TOPSIS对路网节点进行属性聚类,并对路网节点重要性进行综合评价。Zhang等^[15]提出了一项名为多条件生成对抗网络的技术。Chen等^[16]提出一种基于路网敏感特征的轨迹聚类方法。周旦等^[17]提出一种基于改进的DBSCAN聚类算法和灰色综合评价法的出租车寻客路径优化方法。以上研究大部分是针对OSM地图对城市道

路设计的路网,因农机的转移所需的位置精度较高,经纬度点的精度需达到cm级,第三方地图爬取的数据源中经纬度点的精度较低,会导致路网准确度存在偏差,因此,不适用于农场的路网模型构建和农机的转移路径规划。

汪胡青等^[18]设计了QoS多播路由算法和协议,应用Dijkstra算法来确定从源点到目标点且时延最小的路径。Qing等^[19]提出了一种基于AS/RS系统的在矩形环境中找到所有等距最短路径的改进Dijkstra算法。Sedeño-Noda等^[20]提出了一种包括剪枝策略和双向搜索的算法。Makariye^[21]使用Dijkstra算法的最短路径来解决流量问题和大量的请求。Fan等^[22]在存储结构和搜索区域方面进行改进,提高了Dijkstra算法在路径规划中的效率。Noto等^[23]提出了一种在短时间内尽可能接近Dijkstra方法的获得路径的方法。阎逸飞^[24]提出了在ArcGIS中将缓冲区工具与ArcScan栅格矢量化工具相结合的方法。上述算法大多数是基于Dijkstra的单向路径搜索,未涉及到农场道路算法研究,也没有结合其他算法建立一个整体的系统去实现目标搜索,此外还存在应用场景单一等问题。

针对农机在农场内的转移依赖人工驾驶或人工打点及规划耗时费力且不能满足无人化应用需求等问题,本文致力于研究农机的道路转移路径规划,利用ArcGIS构建农场道路图层和路网模型,并通过ArcGIS对农场路网进行3次仿真试验,验证农场路网的可行性;开发一种基于图论的Dijkstra双向搜索的路径规划算法,将其与道路节点匹配、最短路径生成、经纬度转平面坐标、路径文件创建等功能结合,搭建基于web平台的转移路径规划系统,以农机为试验对象,实现农机从起点到终点的转移;并对人工打点与转移路径规划系统的路径规划效率进行对比。以期为农机转移路径的规划提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 农场道路图层构建

1.1.1 道路边界信息提取 制作农场道路图层前, 从无人农场的高精度地图中获取道路边界的经纬度点, 遵守关键特征取点原则, 如机库、下田口、弧形等, 直线段和曲线段的取点遵循同一原则; 通过获取农场道路直线和曲线段的经纬度点, 构建无人

农场道路图层。农场道路边界的提取如图 1 所示。

1.1.2 点、线、面矢量图层的构建 ArcGIS 是一个集成地图制作、空间分析和数据管理功能的地理信息分析平台。本文基于道路边界的经纬度点, 通过 ArcGIS 创建了包括点、线、面的农场道路矢量图层。在 ArcGIS 分析中, 采用 WGS84 作为地理坐标系, 通过点集转线方法将矢量点图层转换成封闭矢量线图层; 点集转线方法的示意图见图 2。

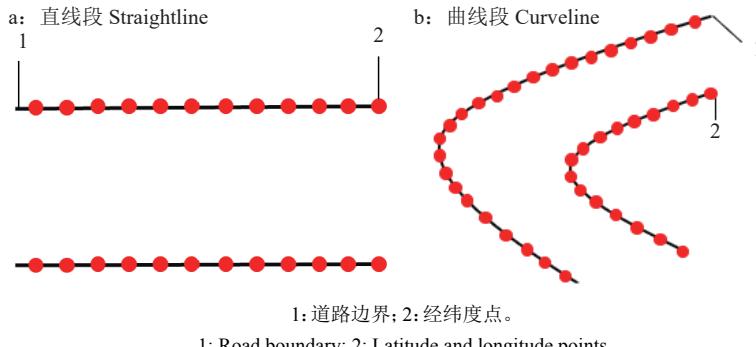


图 1 农场道路边界的提取

Fig. 1 Extraction of farm road boundaries

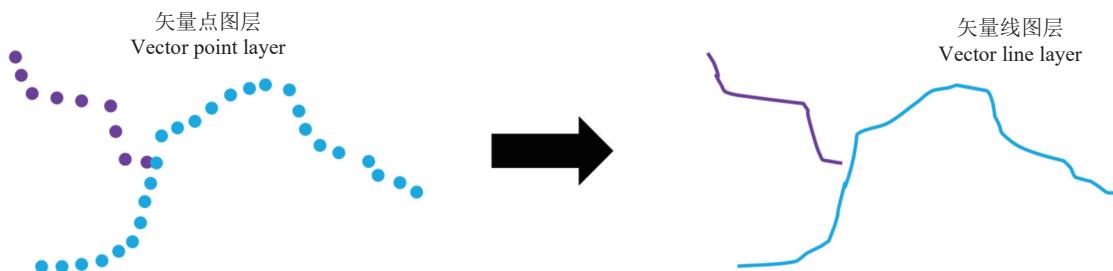


图 2 点集转线方法的示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the point set to line method

矢量线图层由无数个矢量点图层依次连接而成, 通过要素转面的方法基于线图层生成矢量面图层, 由不同要素组合的封闭图形生成的面图层用不同的颜色表示; 线图层转面图层方法的示意图见图 3。

通过以上 2 种方法分别将矢量点图层转换为矢量线图层, 矢量线图层转换为矢量面图层。农场道路的点、线、面图层如图 4 所示。

1.1.3 车道中心线的提取与拓扑检查 车道中心线的提取是一个几何计算的过程, 根据农场道路宽度进行车道中心线提取^[19], 并确保车道中心线的合理性和连续性。提取方法是通过计算点到道路边界的距离, 识别局部最大值以形成中轴线, 即车道中心线。

拓扑检查车道中心线是否存在错误, 以便后续路网模型构建。错误主要有 3 种: 要素重叠 (即多个要素重叠在一起)、要素悬挂 (即单独出现或未与其他要素相连接的要素) 和伪节点 (要素的端点应与

其他要素相连接)。车道中心线的端点应在连接处与多条线相交, 若端点仅与一条线条相交则同样是错误的^[25], 由图 5a 可知端点处只与一条线连接, 可能产生伪节点的错误, 图 5b 为端点处与多条线连接, 保证拓扑的准确性。车道中心线的生成及拓扑检查如图 6 所示。

1.2 农场路网模型构建

1.2.1 路网模型表达式 农场路网中路段起点和终点的经、纬度坐标分别为 (lon_1, lat_1) 和 (lon_2, lat_2) , 路段的长度为 l , 农机的转移速度为 v , 农机路段行驶所花的时间为 t , 路网模型计算公式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} G = [p(r), l(r), \phi_{lr}] \\ p(r) = \{p_i, x_i, y_i | i = 1, 2, \dots, n\} \\ l(r) = \{(p_i, p_j), p_i, p_j \in p(r)\} \\ \phi_{lr} = \{l_{ij} | (p_i, p_j) \in l(r)\} \end{array} \right., \quad (1)$$

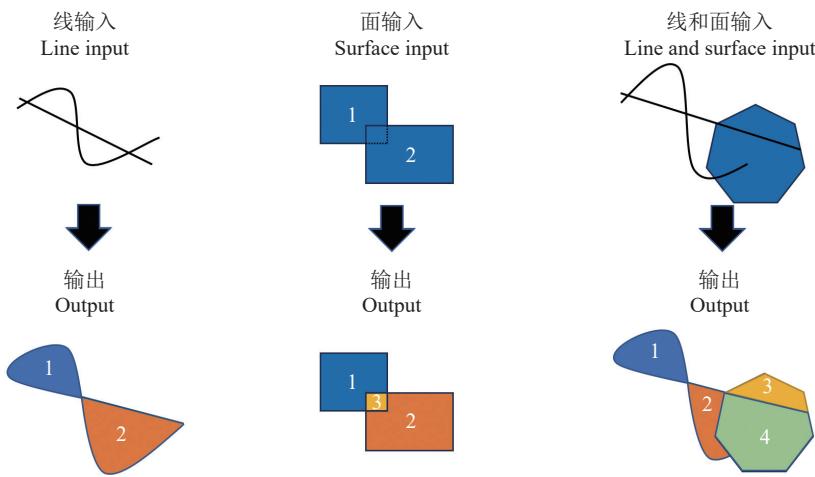


图3 要素转面方法的示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the method of turning the elements to faces

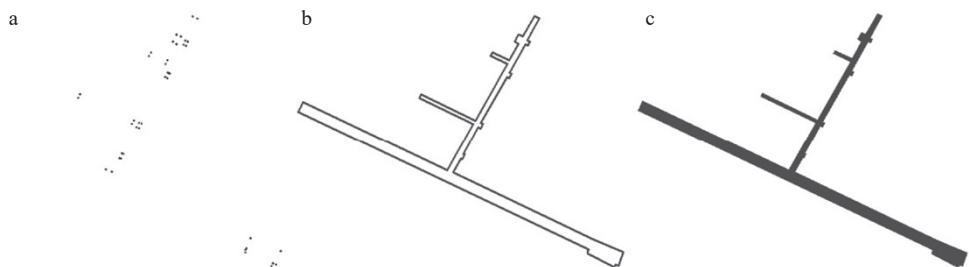


图4 农场道路点(a)、线(b)、面(c)矢量图层

Fig. 4 Vector layers of points (a), lines (b) and surfaces (c) of farm roads

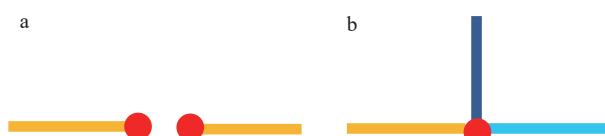
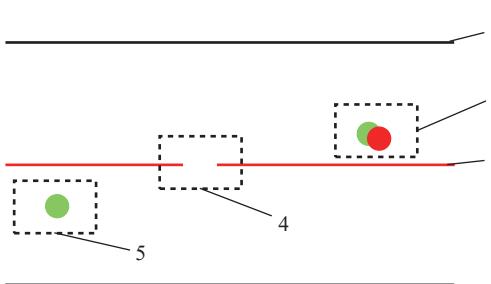


图5 端点与一条(a)和多条(b)线相交的示意图

Fig. 5 Schematic diagram of intersection of endpoints with one and more lines



1: 道路边界; 2: 车道中心线; 3: 重叠; 4: 伪节点; 5: 悬挂。

1: Road boundary; 2: Lane centerline; 3: Overlap; 4: Pseudo-node; 5: Suspension.

图6 车道中心线的生成及拓扑检查

Fig. 6 Lane centerline generation and topology checking

式中, $p(r)$ 表示道路节点; n 表示道路节点总数; x_i 、 y_i 分别表示道路节点 i 的横、纵坐标; $l(r)$ 表示路段; ϕ_{lr} 表示道路长度局部邻接矩阵; l_{ij} 表示起止节点 p_i 、 p_j 之间路段的长度。

在路网中选取具有一定特殊性的部分道路构成局部道路节点图, 局部路网中有 5 个道路节点, 6 个道路路段, 如图 7 所示。

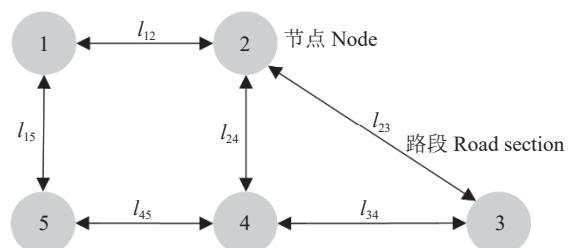


图7 局部路网模型

Fig. 7 Local road network model

路网模型的局部邻接矩阵(ϕ_{lr})表达式为:

$$\phi_{lr} = \begin{bmatrix} 0 & l_{12} & \infty & \infty & l_{15} \\ l_{21} & 0 & l_{23} & l_{24} & \infty \\ \infty & l_{32} & 0 & l_{34} & \infty \\ \infty & l_{42} & l_{43} & 0 & l_{45} \\ l_{51} & \infty & \infty & l_{54} & 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中, ∞ 表示 2 个道路节点之间距离无穷大, 即该两道路节点之间不连通。

1.2.2 路段信息生成 在路网属性表中创建长度、速度和时间等字段, 利用 ArcGIS 的字段计算器与

Python 脚本语言的集成功能, 通过编写 Python 代码, 在 ArcGIS 的表达式中调用 Python 函数, 计算得到长度、速度和时间。

首先将路段两端点的经纬度转换为弧度, 利用 Haversine 公式计算路段两端点之间的距离, 每一条路段的起点和终点都是农机转移长度 (l), 地球的平均半径为 r ; 具体计算式为:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = (\text{lon}_2 - \text{lon}_1) \frac{\pi}{180^\circ} \\ b = (\text{lat}_2 - \text{lat}_1) \frac{\pi}{180^\circ} \\ c = \sin\left(\frac{b}{2}\right)^2 + \cos(\text{lat}_1)\cos(\text{lat}_2)\sin\left(\frac{a}{2}\right)^2, \quad (3) \\ d = 2\arctan2(\sqrt{c}, \sqrt{1-c}) \\ l = rd \end{array} \right.$$

式中, a 、 b 分别表示路段的起点和终点经、纬度之差的弧度; d 表示起点和终点之间的弧度。

时间 (t) 计算公式为:

$$t = \frac{l}{v}, \quad (4)$$

式中, l 表示农机行驶在每一条路段的位移, m; v 表示农机的行驶速度, m/s。

1.3 转移路径规划系统

1.3.1 基于路网的 Dijkstra 双向搜索 双向 Dijkstra 算法同时从起点和终点开始执行, 直至两者在某个节点处找到交汇的最短路径。该算法用 d_f 和 d_r 分别记录正向和反向算法中节点至起点和终点的距离, 用 μ 表示最短路径长度, 方法参考文献 [26]。搜索的基本步骤见图 8。

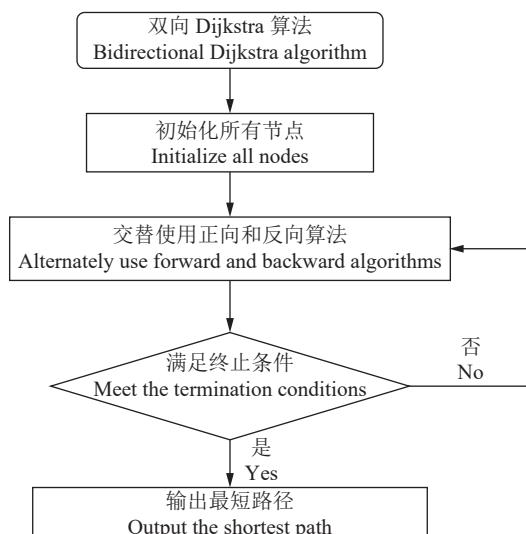


图 8 双向 Dijkstra 搜索流程图

Fig. 8 Bidirectional Dijkstra search flowchart

1.3.2 系统开发 基于 web 平台的转移路径规划系统搭建需写入道路节点的匹配、最短路径的生成、经纬度转平面坐标、路径文件创建等功能算法, 具体介绍如下。

定义路径规划算法的节点接口, 包含路网道路节点的经纬度信息; 只需要输入起点和终点的经、纬度, 算法将基于 WGS84 坐标系, 自动解析经、纬度字符串为单独的经度和纬度值。在算法规划中, 节点接口算法以 JSON 的形式读取路网的道路节点, 显示路网的属性内容, 包括道路节点的特征、ID、节点名称及其对应的数据。

利用 Network X 图分析工具, 将匹配成功的 2 个道路节点输入网络图, 基于路段距离计算两点间的最短路径。基于图论的 Dijkstra 算法, 针对由经度和纬度构成的 2 个图 (分别记为 G1 和 G2) 执行双向搜索。G1 代表基于经度的网络图, 其中起始节点设定为 lon_1 , 终止节点为 lon_2 , 网络中每段路的距离统一用变量 l 表示。类似地, G2 代表基于纬度的网络图, 其起始节点为 lat_1 , 终止节点为 lat_2 。通过读取 G1 和 G2, 确定 2 个图中道路节点的最短路径, 算法遍历最短路径的所有节点, 并将其以列表形式存储。

在实现最短路径生成功能的基础上, 进一步定义坐标转换接口, 处理和转换道路节点坐标。该接口定义了 2 个独立的列表: 经度和纬度列表。通过这 2 个列表, 依次提取经过高斯投影转换后的平面坐标点, 并将这些坐标点列表化。计算每个平面坐标点相对于源点的差值, 并将这些差值汇总至一个新的列表中。基于这些差值, 算法在平面坐标系上进行描点, 最终将这些点按顺序连接, 形成一条可视化的路径线, 即农机从起点到终点的最短转移路径。

算法的每次执行均依据当地实时时间生成 1 个 TXT 格式的路径文件。该文件的创建需以下参数: 路径文件名称、机具的作业幅宽、路径模式、转弯模式、起点坐标以及工作模式等。所有这些参数均为路径规划过程中的关键输入, 生成的路径文件将被存储于 web 平台的路径管理中。此外, 文件中每一路段均由 2 个节点坐标和转弯等标志位信息组成, 以确保路径的准确性和农机的转移效率。

转移路径规划系统的开发基于无人农场云管控 web 平台进行, 系统功能设计分为 4 个核心模块: 第 1 个是图层上传模块, 包括上传路网道路节

点和路段的图层数据;第2个是路径文件命名模块,用于设定路径文件的名称,需遵守无特殊符号的规则;第3个是路径起点和终点标记模块,在已上传的图层中交互式地点击选择路径的起点和终

点;第4个是地块关联模块,根据无人化农场的具体地块名称,选择与起点和终点相对应的地块。具体转移路径规划系统界面如图9所示。

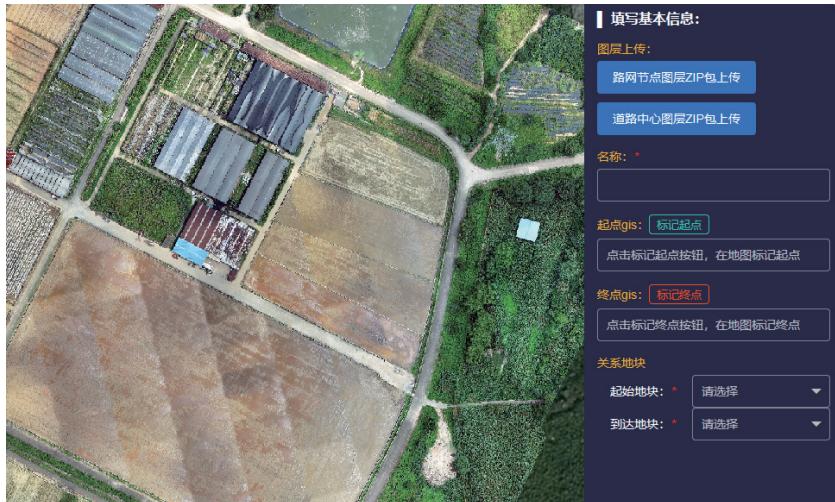


图9 转移路径规划系统界面

Fig. 9 Transfer path planning system interface

2 结果与分析

2.1 农场路网和 Dijkstra 双向搜索

本研究通过 ArcGIS 的 Network Analyst 功能,对华南农业大学增城教学科研基地的道路进行路网制作,路网数据包含 20 条路段及 18 个道路节点,路段和道路节点的序号及路网结构图如图 10 所示。在 Python 中对农场路网运行 Dijkstra 双向搜索

结果表明,Dijkstra 算法的单向搜索用时 0.632 s,双向搜索用时 0.216 s,在运算效率上 Dijkstra 算法的双向搜索较单向搜索提升了 65.82%。

华南农业大学增城基地的路网字段信息包括坐标点、长度、速度和时间。通过路网模型构建两点间的最短路径,并针对农机从起点到终点的转移进行最短路径的仿真分析。在路网模型中设定农机的起点和终点,然后运用内嵌算法求解两点间的最

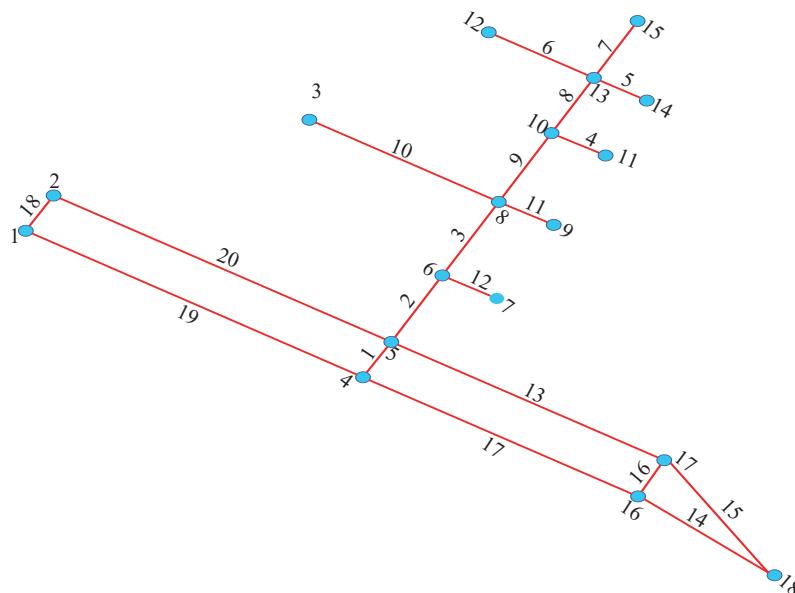


图10 无人农场路网结构图

Fig. 10 Structure chart of the unmanned farm road network

短路径。仿真分析针对农机从机库到田块、田块到田块以及田块到机库进行, 确定最短的农机转移路径。仿真结果见表 1。

表 1 农机转移路径的权值

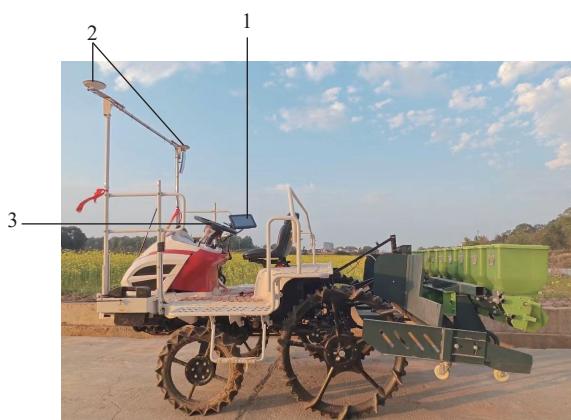
Table 1 Weights of agricultural machinery transfer paths

| 路径名 | <i>l/m</i> | <i>v/(m·s⁻¹)</i> | <i>t/s</i> |
|--------------|------------|-----------------------------|------------|
| 机库—田块 | 241.57 | 0.7 | 345.10 |
| Hangar-field | | | |
| 田块—田块 | 74.46 | 0.7 | 106.37 |
| Field-field | | | |
| 田块—机库 | 75.66 | 0.7 | 108.09 |
| Field-hanger | | | |

由图 10 可知, 农机从当前起点到达各个目标点的路径都有一一对应的路段和节点。由表 1 可知农机在 0.7 m/s 的速度下从机库到田块、田块到田块、田块到机库的行驶距离分别为 241.57、74.46 和 75.66 m, 时间分别为 345.10、106.37 和 108.09 s; 因此, 基于无人农场路网规划的农机转移路径是最短路径。

2.2 道路试验

道路试验以洋马 YR60D 型直播机为对象, 采用路径追踪精度为 2.5 cm 的北斗导航定位系统, 基于 64 位 Windows11 操作系统、AMD Ryzen7 7840HS with Radeon 780M Graphics@3.80 GHz 处理器、32 GB 运行内存的联想笔记本电脑, 搭配转移路径规划系统进行道路试验。洋马 YR60D 型直播机如图 11 所示。



1: 车载屏显示终端; 2: 双 GNSS 天线; 3: 电动方向盘。

1: Vehicle screen display terminal; 2: Dual GNSS antenna; 3: Power steering wheel.

图 11 洋马 YR60D 型直播机

Fig. 11 Yanmar YR60D direct seeding machine

将完成的路网数据源文件(包括不同格式的道路节点和路段数据)上传至转移路径规划系统。每

次生成路径时, 需写入唯一文件名、路径起止点及其所属地块, 生成后, 保存路径至 web 平台的路径管理。最短路径生成如图 12a、12c、12e 所示, 系统路径与实际路径如图 12b、12d、12f 所示。

对转移路径规划系统路径和农机实际转移路径进行等距多点采样($X_1, \dots, X_n; Y_1, \dots, Y_n$), 计算各点的算术平均值($\bar{X}、\bar{Y}$)并对比, 以评估路径的重合度及转移路径规划系统的准确性。

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i + \dots + X_n)}{n} \\ \bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i + \dots + Y_n)}{n} \end{array} \right. . \quad (5)$$

若转移路径规划系统路径采样点的算数平均值 \bar{X}_L 、 \bar{Y}_L 和农机实际转移路径采样点的算数平均值 \bar{X}_S 、 \bar{Y}_S 的值相同或差值为-0.1~0.1 m, 则认为两路径近乎重合, 转移路径规划系统生成的路径是准确的, 即:

$$\left\{ \begin{array}{l} -0.1 \leq \bar{X}_L - \bar{X}_S \leq 0.1 \\ -0.1 \leq \bar{Y}_L - \bar{Y}_S \leq 0.1 \end{array} \right. . \quad (6)$$

在华南农业大学增城教学科研基地, 农机以 0.7 m/s 的速度对转移路径系统生成的机库到田块、田块到田块和田块到机库的路径进行了 3 组实车道路试验。

农机从机库到田块、田块到田块和田块到机库的转移路径规划系统路径与农机实际转移路径的算数平均值差值绝对值<0.1 m, 实际转移路径与转移路径规划系统路径趋于重合, 路网的设计满足无人农场的农机转移要求。

在农场的转移路径规划中, 人工打点需要多人协助进行实地打点、收集数据和手动记录, 而且初次使用打点器的人员存在速度缓慢和效率较低等问题, 同时从人工打点到完成路径规划涉及多个步骤, 需要较长时间来完成打点和路径规划; 而转移路径规划系统仅需单人操作, 操作步骤为路径命名、选择起点和终点、生成路径, 通过简单的步骤生成路径到 web 平台的路径管理中, 然后通过平台下发路径, 农机开始运行。

因此, 转移路径规划系统能快速生成路径, 节约时间, 操作简单, 减少人力需求, 降低劳动强度。总体来说, 相较于人工打点规划路径, 转移路径规划系统在时间效率、操作速度、简化步骤和减少人力方面具有明显优势。

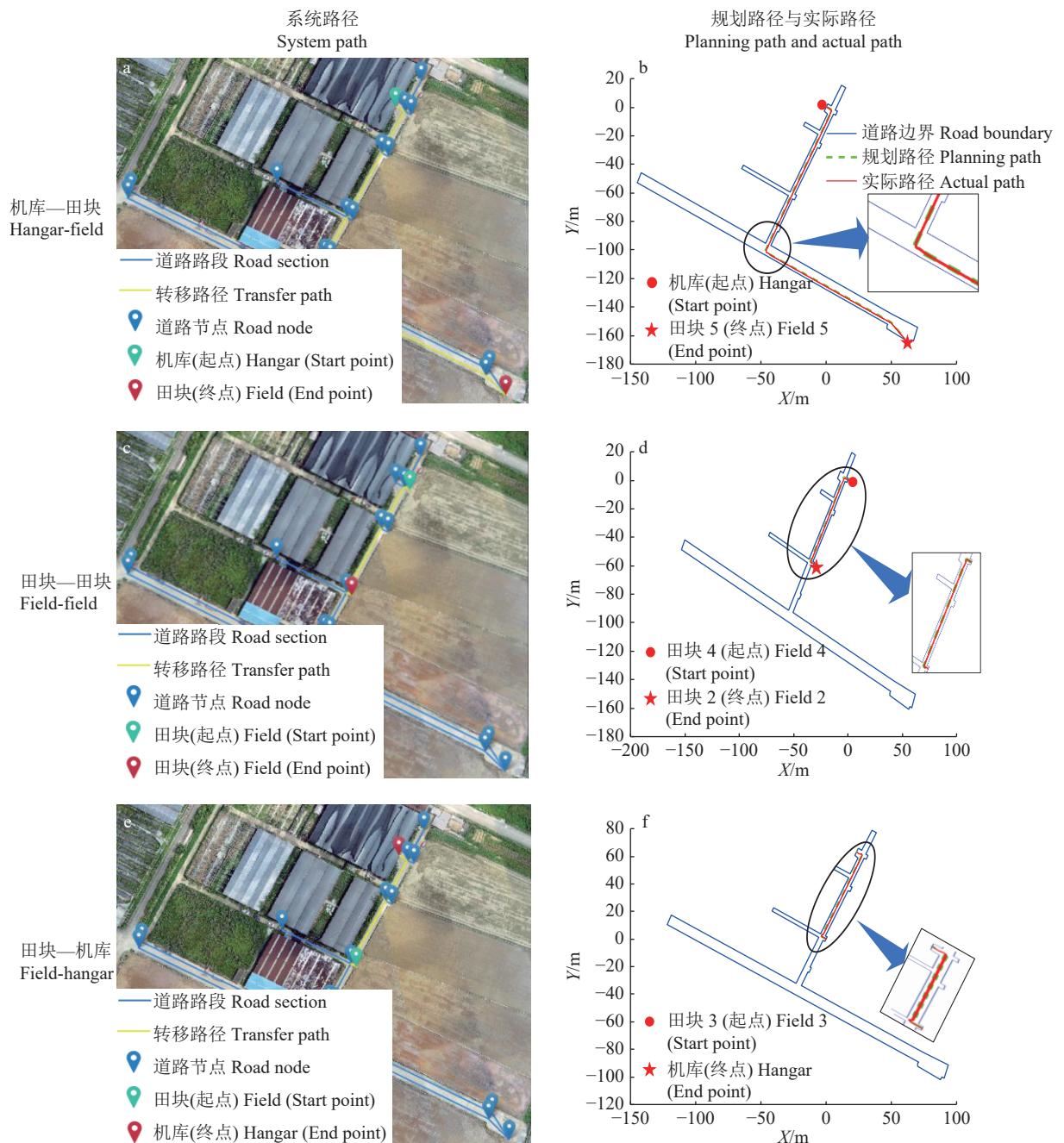


图 12 系统生成路径与实际路径
Fig. 12 System-generated path and actual path

3 结论

1) 本文提出了农场道路图层的构建方法, 合理地规划和处理车道中心线并进行拓扑检查, 计算了农场路网的信息, 基于图论建立了适用于农场路网的 Dijkstra 双向搜索方法, 并对其运算时间和效率在 Python 中进行了仿真试验。Dijkstra 的双向搜索法用时 0.216 s, 相较 Dijkstra 算法的单向搜索用时 (0.632 s), 运算效率提升了 65.82%。

2) 结合高斯投影、路径点组合、图论方法、双向 Dijkstra 搜索、路径文件创建、路径可视化等, 搭

建了转移路径规划系统, 利用此系统生成农机从起点到终点的最短路径, 通过平台下发路径, 实现农机转移。

3) 在 ArcGIS 中对路网模型进行了 3 次路径仿真试验, 并在华南农业大学增城教学科研基地进行了实车道路试验。试验结果表明在 0.7 m/s 时, 农机实际转移路径与转移路径规划系统的路径趋于重合, 路网设计满足无人农场的农机转移要求, 验证了转移路径规划系统的可行性, 实现了农机从起点到终点的转移。转移路径规划系统规划路径相较于人工打点在时间效率、操作速度、减化步骤及减少

人力方面具有明显优势。但本文对于农场路网的深层研究未进行细致探讨, 探究在复杂环境中的路径转移规划效率、实现路径规划的动静态结合模式是未来的工作重点。

参考文献:

- [1] 罗锡文, 廖娟, 胡炼, 等. 我国智能农机的研究进展与无人农场的实践[J]. *华南农业大学学报*, 2021, 42(6): 8-17.
- [2] 罗锡文. 农场是数字农业的实现途径之一[J]. 大数据时代, 2021(10): 13-19.
- [3] 车刚, 陈正发, 秦泗君, 等. 建三江水稻智慧农场技术创新与应用[J]. *现代农业装备*, 2023, 44(3): 77-80.
- [4] 罗锡文, 胡炼, 何杰, 等. 中国大田无人农场关键技术研究与建设实践[J]. *农业工程学报*, 2024, 40(1): 1-16.
- [5] 吴晓明, 邢廷炎, 钱建平, 等. 面向车辆监控的 LBS 地图可视化技术研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2016, 32(1): 100-104.
- [6] 张攀, 刘经南. 通用化高精地图数据模型[J]. *测绘学报*, 2021, 50(11): 1432-1446.
- [7] 路鹏伟. 车路网协同下的电动汽车充电路径规划研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2021.
- [8] 王艳东, 何国雄, 吴晨琛, 等. 基于匹配置信度的路网几何特征融合方法研究[J]. *测绘与空间地理信息*, 2024, 47(1): 9-12.
- [9] 陈亮. 道路网格网模式识别的关键指标设计[J]. *测绘与空间地理信息*, 2024, 47(1): 193-195.
- [10] 周筝, 龙华, 李帅, 等. 多因素下基于路网拓扑的电动汽车充电路径规划策略[J]. *四川大学学报(自然科学版)*, 2024, 61(1): 229-238.
- [11] 李宏伟, 宋玉峰, 李帅兵, 等. 基于 ArcGIS 路网结构与交通拥挤度分析的电动汽车充电负荷预测方法[J/OL]. 电网技术, [2024-01-25]. <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1420>.
- [12] 刘纪平, 张用川, 徐胜华, 等. 一种顾及道路复杂度的增量路网构建方法[J]. *测绘学报*, 2019, 48(4): 480-488.
- [13] 温廷新, 李可昕, 赵琳琳, 等. 时变路网下电动汽车冷链配送路径规划研究[J]. *大连理工大学学报*, 2022, 62(6): 641-649.
- [14] LIU C, YIN H, SUN Y, et al. A grade identification method of critical node in urban road network based on multi-attribute evaluation correction[J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(2): 813.
- [15] ZHANG Y, LI X, ZHANG Q. Road topology refinement via a multi-conditional generative adversarial network[J]. *Sensors*, 2019, 19(5): 1162.
- [16] CHEN C, YE Z, HU F, et al. Vehicle trajectory-clustering method based on road-network-sensitive features[J]. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2021, 41: 2357-2375.
- [17] 周旦, 孙家煜, 顾国斌, 等. 基于轨迹数据的出租车司机寻客路径优化方法[J]. *重庆交通大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(1): 83-90.
- [18] 汪胡青, 孙知信. 基于 Dijkstra 算法的多约束多播路由算法的研究[J]. *计算机技术与发展*, 2011, 21(12): 5-8.
- [19] QING G, ZHENG Z, YUE X. Path-planning of automated guided vehicle based on improved Dijkstra algorithm[C]//2017 29th Chinese Control and Decision Conference (CCDC). IEEE, 2017: 7138-7143.
- [20] SEDEÑO-NODA A, COLEBROOK M. A biobjective Dijkstra algorithm[J]. *European Journal of Operational Research*, 2019, 276(1): 106-118.
- [21] MAKARIYE N. Towards shortest path computation using Dijkstra algorithm[C]//2017 International Conference on IoT and Application (ICIOT). IEEE, 2017: 1-3.
- [22] FAN D K, SHI P. Improvement of Dijkstra's algorithm and its application in route planning[C]//2010 Seventh International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery. IEEE, 2010, 4: 1901-1904.
- [23] NOTO M, SATO H. A method for the shortest path search by extended Dijkstra algorithm[C]//Smc 2000 Conference Proceedings. 2000 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. IEEE, 2000, 3: 2316-2320.
- [24] 阎逸飞. 基于缓冲区的道路中心线提取方法与应用[J]. *地理空间信息*, 2023, 21(11): 36-38.
- [25] 王小龙, 张黎明, 闫浩文, 等. 利用哈尔变换和高斯随机数进行矢量空间数据坐标加密[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2022, 47(11): 1946-1955.
- [26] 陆文琦, 谷远利, 李萌, 等. 基于预处理的点到点最短路径计算方法[J]. *山东科学*, 2018, 31(2): 64-71.

【责任编辑 霍 欢】