



李文峰,徐蕾,杨琳琳,等. 基于改进蚁群算法的农业机器人多田块路径规划方法与试验[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4):823-834.
LI Wenfeng,XU Lei,YANG Linlin,et al. Multi field path planning method and experiment of agricultural robot based on improved ant colony algorithm[J].
Journal of Nanjing Agricultural University,2024,47(4):823-834.

基于改进蚁群算法的农业机器人多田块路径规划方法与试验

李文峰¹,徐蕾¹,杨琳琳¹,刘文荣¹,潘坤¹,李超^{2*}

(1.云南农业大学云南省作物智慧生产国际联合实验室,云南 昆明 650201;2.云南省气象台,云南 昆明 650034)

摘要:[目的]针对丘陵地区因田块碎片化和障碍物影响农业机器人作业的情况,提出一种基于改进蚁群算法和A*算法相结合的多田块路径规划方法。[方法]通过无人机构建农田遥感影像,利用栅格法对农田进行环境建模,再进行子区的划分与合并,在蚁群算法中引入区域启发函数,对不同区域内的移动代价作区分,通过人工增加最优路径中的信息素浓度并建立自适应信息素挥发系数,对信息素更新方法进行改进,以此求解作业子区的最优遍历顺序,利用具有启发式搜索功能的A*算法进行子区连接路径规划,最终实现多田块路径规划。[结果]MATLAB仿真试验结果表明,在子区数量为40时,采用改进蚁群算法进行规划的平均路径长度比传统的蚁群算法减少了3.19%,平均迭代收敛次数减少了79.5%;在路径遍历仿真试验中,农业机器人遍历路径覆盖率能达到100%,路径重复率为6.48%。利用农田无人机遥感影像和田间作业参数进行自然环境的仿真试验,进一步验证了该方法的有效性。[结论]本研究提出的方法能有效解决丘陵地区农业机器人多田块路径规划问题,可为丘陵地区农业机器人大面积作业提供路径参考与技术支持。

关键词:多田块;路径规划;改进蚁群算法;最优遍历顺序;农业机器人

中图分类号:S24;TP242

文献标志码:A

文章编号:1000-2030(2024)04-0823-12

Multi field path planning method and experiment of agricultural robot based on improved ant colony algorithm

LI Wenfeng¹,XU Lei¹,YANG Linlin¹,LIU Wenrong¹,PAN Kun¹,LI Chao^{2*}

(1.Yunnan International Joint Laboratory of Crop Intelligent Production,Yunnan Agricultural University,Kunming 650201,China;
2.Yunnan Meteorological Observatory,Kunming 650034,China)

Abstract:[Objectives]In response to the impact of fragmented fields and obstacles on agricultural robot operations in hilly areas, this study aimed to propose a multi field block path planning method based on a combination of improved ant colony algorithm and A* algorithm. [Methods] By using drones to construct remote sensing images of farmland, using grid method to model the environment of farmland, and then dividing and merging sub regions, a region heuristic function was introduced into the ant colony algorithm to distinguish the movement costs in different regions. The pheromone update method was improved by manually increasing the concentration of pheromones in the optimal path and establishing an adaptive pheromone volatilization coefficient, in order to solve the optimal traversal order of job sub intervals. The A* algorithm with heuristic search function was used for sub region connection path planning, ultimately achieving multi field path planning. [Results]The MATLAB simulation test results showed that when the number of sub regions was 40, the average path length planned using the improved ant colony algorithm was reduced by 3.19% compared to the traditional ant colony algorithm, and the average iteration convergence number was reduced by 79.5%. In the path traversal simulation experiment, the coverage rate of the agricultural robot's traversal path could reach 100%, and the path repetition rate was 6.48%. The effectiveness of this method was further verified through simulation experiments of natural environment using remote sensing images of agricultural drones and field operation parameters. [Conclusions]The method proposed in this study could effectively solve the multi field path planning problem of agricultural robots in hilly areas, and provided path reference and technical support for large-scale operation of agricultural robots in hilly areas.

Keywords:multiple fields;route planning;improved ant colony algorithm;optimal traversal order;agricultural robot

中国耕地面积约38%位于丘陵地区,广泛分布在西南、东北、西北地区,严重阻碍了农机化和智能化的发展^[1-2]。近年来,智能农业装备的研究和应用受到了广泛重视与关注^[3-4]。丘陵地区农田结构与平原

收稿日期:2024-01-11

基金项目:云南省重大科技专项(202202AE090021)

*通信作者:李超,硕士,高级工程师,研究方向为农业气象,E-mail:lichaoynnan@163.com。

地区存在差异,其农田具有面积小、破碎、分布杂乱且存在陡坡区域的特点,全国农业机械化率达71%,而丘陵地区农业机械化率不足50%,这给农业机械路径规划方法带来了挑战,解决丘陵地区多田块全区域的路径规划问题,优化农机作业路线,减少工作区域的重复率,是丘陵地区农机自动化、智能化作业的关键^[5-7]。

路径规划是现代智能农业机械实现自主导航移动和作业的三大关键技术之一^[8-9],其决定农机工作总消耗并影响实际农机工作的作业效率和作业质量^[10]。在农业生产中多田块全区域的路径规划生成的遍历路径可用于农机进行特定作业,例如,喷药、播种和施肥等^[11-12]。对于单一田块的路径规划方法,常采用根据真实农田数据以及农机作业参数,生成平行导航直线后通过圆弧连接不同的导航直线,以生成农机作业路径。Nilsson等^[13]将农田的覆盖轨迹表示为主要作业区域轨迹、地头通道以及转弯轨迹,以构建虚拟路网图,再基于网络图进行覆盖路径规划,试验证明该方法对于各类型单一田块都具有普适性;Jeon等^[14]提出一种存在封闭田块边界的拖拉机全自动路径规划方法,开发适用于各种转角的多边形稻田的边界转弯算法,田间试验表明该算法提高了路径覆盖率;郭典新等^[15]针对割草机的全覆盖路径规划问题,开发全覆盖式路径规划算法,对回行式和往复式的路径规划方法进行改进,提高了割草机的工作效率;Santoro等^[16]以甘蔗收割问题为研究对象,采用整数规划模型对收割机的路径进行优化,缩短了作业时间,有效节约了机械收割的燃油和劳动力等成本费用。现有的多田块路径规划研究中多将大范围内的田块按照一定方法分解成若干田区,再利用智能算法求解遍历顺序,以实现农田的最优遍历。马全坤等^[17]利用栅格法进行环境建模并进行区域划分,通过记忆模拟退火算法搜索出任务最优目标点行走顺序,仿真试验结果表明,该算法规划的路径曼哈顿距离比原算法减少了9.4%;Shen等^[18]提出了一种自主作业的覆盖路径规划方案,基于能耗模型,搜索农业机器人的最优驱动角度,通过遗传算法对农田进行有序连接,仿真试验结果表明,该方法能在一定程度上减少能耗。

综上所述,现有的研究大多针对单个大田块的路径规划,而少数对于多田块全区域路径规划的研究中,通常采用直线距离作为代价,而未将丘陵地区存在的陡坡和断层区域考虑在内,农机无法直接跨越陡坡与断层区域,且农机在作业区域与道路中的移动代价不同,只以距离作为代价,会影响多田块全区域的路径规划效果。丘陵地区农田碎片化严重,农机在作业时需在田块间频繁转移,现有的路径规划方法适用性大大降低,增加了农机作业时间与成本。

针对以上问题,本研究提出一种基于改进蚁群算法与A*算法的多田块全区域路径规划方法,利用无人机构建农田遥感影像,通过栅格法进行环境建模,然后根据子区的划分与合并,将复杂多变的大田环境进行简化;通过改进蚁群算法求解遍历顺序,并以距离和区域为代价,得到农业机器人在子区间的最优遍历顺序,利用A*算法进行子区连接路径规划,对子区间存在斜坡或者断层区域的情况进行路径修正,最终完成多田块全区域路径规划。

1 环境建模

1.1 建立环境地图

丘陵山区的农田常由田间道路、斜坡等分割为不同的田块,且分布有电线杆、树木、农田设施等障碍物。本研究选择具有典型特征的农田场景进行规划研究。首先利用栅格法^[19]对农田真实环境进行取样,将复杂作业环境处理成一组带有二值信息的栅格(图1),栅格大小以农业机器人的工作范围为准,将不含有任何障碍物的栅格(白色栅格)定义为自由栅格;含有障碍物但未被完全填满的栅格定义为部分障碍栅格;被障碍物完全填满的栅格(黑色栅格)定义为完全障碍栅格;含有田间道路的栅格(蓝色栅格)定义为道路栅格。考虑到丘陵地区普遍存在的陡坡或者断层在作业时候的处理方式上与障碍物和道路情况均不同,本研究将含有断层区域的栅格定义为阶梯区域栅格(红色栅格)。

1.2 障碍物膨胀

为防止智能算法陷入局部最优,提高路径规划的效率,将部分障碍栅格膨胀处理^[20]为完全障碍栅格。膨胀运算步骤是将结构元素A中心点平移到X的图像域内的某一点(x,y),若结构元素A的像素与目标物体至少有一个像素相交,则保留(x,y)像素点,由此实现图像中的物体边界向外扩张^[21-22]。将图1的农田场景将部分障碍物栅格作为结构元素A,进行膨胀处理,结果如图2所示。

遍历路径中经过且只经过1次,本质上是一个旅行商问题(TSP)^[25]。图3中各子区可视为由子区中心点代表的顶点,所经过的顶点顺序即为子区间的最优遍历顺序。

蚁群算法因其具有强鲁棒性和良好的寻优能力,在二维图上的搜索效果好。算法流程^[26]如下:

蚂蚁 $k(k=1,2,\dots,m)$ 由位置 i 转移到位置 j ,采用随机原则,转移概率 $P_{ij}^k(t)$ 如公式(1)所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t)}, & j \in allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $allowed_k = \{0, 1, \dots, n-1\}$ 表示蚂蚁 k 下一可行节点的位置; τ_{ij} 为当前节点与可行节点路径上的信息素轨迹强度; η_{ij} 为距离启发因素,由当前位置与目标位置的距离决定; α 和 β 分别为信息激励因素和期望激励因素值,起调节信息素浓度和距离启发因素的作用; $\tau_{ij}(0) = Q$ (Q 为常数),即在初始时刻,环境中所有路径具有相同的信息素浓度。

蚂蚁在完成1次路线搜索循环后,下次搜索开始时的信息素浓度按如下公式(2)—公式(4)更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+1) \quad (2)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t, t+1) \quad (3)$$

$$\Delta\tau_{ij}^k(t, t+n) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过的路径 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中: ρ 为信息素挥发系数; $\tau_{ij}(t)$ 为上一时刻路径 (i, j) 的信息素浓度; $\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1)$ 为第 k 只蚂蚁从时间 t 到 $t+1$ 过程中,释放在路径 (i, j) 上的信息素量; L_k 为第 k 只蚂蚁在本次循环所经过的路径长度; Q 为常数。

蚁群中的每只蚂蚁根据上文所述规则重复进行搜索并更新参数,直至搜索到一条从起点到终点的最优路径。

2.4 子区间连接规划

改进蚁群算法求解子区间最优遍历顺序存在不连续的情况,也就是说农业机器人完成一个子区内的遍历工作后,行进至下个子区继续遍历前,需对前一子区遍历终点和下一子区遍历起点之间路径进行规划,实现路径连续。为了使连接路径最短,本研究选择子区中距离前一子区终点最近的顶点栅格作为该子区的起始点,采用高效的启发式搜索A*算法规划机器人子区间的连接路径。

A*算法通过建立从子区遍历终点到下个子区遍历起点的评价函数,规划两点之间的最优路径,其启发函数表达式如公式(5)所示为:

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (5)$$

式中: $f(n)$ 是从初始状态(起点位置)经由状态 n (当前位置)到目标状态(目标位置)的代价估计,代表每个可能试探点的估值。它由2部分组成:一部分为 $g(n)$,它表示从初始状态到状态 n 的实际代价;另一部分为 $h(n)$,它表示从状态 n 到目标状态的最佳路径的估计代价。实际代价 $g(n)$ 是由Dijkstra算法求得的当前位置到起点位置的最短距离,估计代价 $h(n)$ 使机器人始终向着目标位置移动,而估计代价函数主要有2种方法:欧几里得距离与曼哈顿距离,因欧几里得距离计算过程中伴随着平方与开根号运算,需要使用浮点数,性能较差,故本研究采用的估计代价函数 $h(n)$ 是曼哈顿距离,在平面上,坐标点 (x_1, y_1) 与坐标点 (x_2, y_2) ,其曼哈顿距离计算公式如公式(6)所示:

$$h(n) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (6)$$

将当前位置 (x, y) 周围的8个栅格坐标代入代价函数计算路径代价,选取代价最小的栅格作为下一步移动的栅格,以移动后的栅格为当前位置,继续使用该方法重复上述搜索过程直至当前位置与目标位置重合。

2.5 路径修正

如果田块间路径规划出现跨越障碍物或阶梯区域的情况,则需对该情况做路径修正。本研究根据无人遥感影像可以获取子区边界点的高程信息,通过相连子区间相近边界点之间的高度差,可以判断子区

间是否存在阶梯区域。若存在障碍物,则路径按贴近障碍物栅格的边做直线转弯(图 5-a),以免机器人与障碍物发生碰撞;若路径存在跨越阶梯区域时,则分别以上一子区遍历终点与下一子区遍历起点向道路线做垂线,以此作为转移路径(图 5-b)。

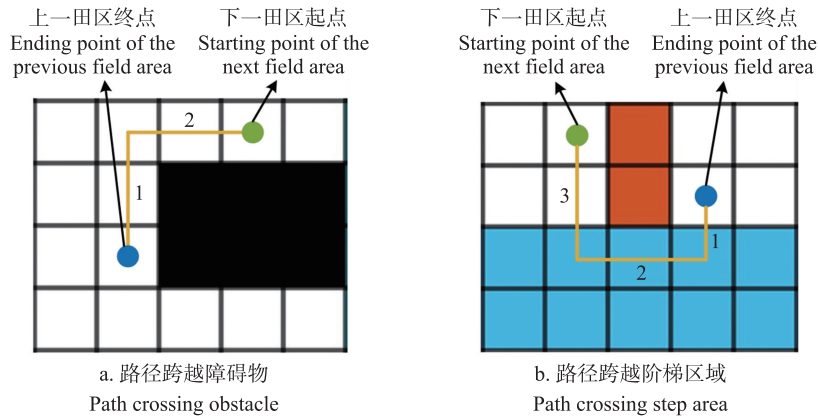


图 5 路径修正示意图

Fig. 5 Schematic diagram of route correction

3 改进蚁群算法

3.1 改进概率转移函数

在传统的蚁群算法中,当蚂蚁在地图中寻找最优路径时,环境分为可以通行和不可通行 2 种情况,其进行路径选择是由不同节点间路径中信息素浓度 $\tau_{ij}^\alpha(t)$ 与节点之间的距离 2 个因素决定的。节点之间的距离受距离启发函数 $\eta_{ij}^\beta(t)$ 影响,而本研究考虑到农业机器人在子区遍历的过程中,行驶的环境包括农田、道路、障碍物以及阶梯区域,障碍物和阶梯区域为不可通行的情况,在环境为可通行的情况下,机器人在农田中行驶与道路上行驶的难易程度、通行时间不同,这时只考虑信息素浓度与距离因素具有一定的局限性。因此需要对概率转移公式进行改进,引入区域启发函数,提升蚂蚁在选择路径时选择较易通行区域(道路)的概率,改进后的概率转移函数如公式(7)所示:

$$P_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t) \eta_{ij}^\beta(t) d_{ij}^\gamma(t)}{\sum_{s \in allowed_k} \tau_{is}^\alpha(t) \eta_{is}^\beta(t) d_{is}^\gamma(t)}, & j \ni allowed_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中: $d_{ij}^\gamma(t)$ 为区域启发函数; γ 为区域启发因子。

3.2 改进信息素更新方法

通过人工额外释放已发现最优路径上的信息素并提出一种信息素挥发系数,对信息素更新的方法进行改进。传统的蚁群算法中信息素的浓度决定蚂蚁的转移状态,每只蚂蚁在寻找路径的过程中,释放的信息素浓度相同,导致最优路径与其他路径中的信息素浓度相差不大,造成算法不易收敛。本研究在每次迭代的过程中,对蚂蚁已发现的最短路径人工添加释放额外的信息素。信息素更新公式如公式(8)—公式(11)所示:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) + e \Delta \tau_{ij}^{br}(t) \quad (8)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t, t+1) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k(t, t+1) \quad (9)$$

$$\Delta \tau_{ij}^k(t, t+n) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 在本次循环中经过的路径 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{br}(t) = \begin{cases} \frac{1}{L_{br}}, & \text{本次循环中的最优路径 } (i, j) \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

式中: L_{br} 为最短路径长度; $\Delta\tau_{ij}^{br}(t)$ 为本次循环中人工额外释放在最优路径 (i,j) 上的信息素量; e 为用于控制人为释放信息素的权重参数,取值范围为 $[0,1]$ 。

信息素挥发因子 ρ 决定信息素留在一条路径上的时间和强度,其对算法在路径中的寻优性能有重要影响。传统的蚁群算法 ρ 通常取固定的常数,若 ρ 设定的值过大,则会使路径上的信息素挥发速度过快,进而导致算法的全局搜索能力减弱;若 ρ 设定的值过小,信息素挥发速度过慢,则容易使算法陷入局部最优,算法难以寻找到全局最优路径。上述过程中,每次循环对蚂蚁找到的最优路径进行人工释放额外的信息素,会使该路径上留下的信息素浓度不断积累,蚂蚁都集中到该路径上,易使算法陷入局部最优、全局搜索能力减弱等问题。本研究提出了一种自适应信息素挥发系数,使挥发系数随迭代次数变化,其公式为:

$$\rho(t) = \frac{T}{T+t} \times e^{\frac{t}{40}} \quad (12)$$

式中: t 为当前迭代次数; T 为最大迭代次数。

由公式(12)可得,在迭代初期,迭代次数 t 较小时, ρ 值相对较大,提高算法的全局搜索能力,避免陷入局部最优;随着迭代的不断进行,迭代次数 t 增加, ρ 值逐渐减小,算法的收敛速度加快。

3.3 改进蚁群算法的步骤

本研究算法的执行步骤如图6所示。

①初始化蚁群算法的各项参数,设置蚂蚁只数、初始启发因子、初始信息素因子等参数;

②利用栅格法对农田环境进行建模;

③蚂蚁开始搜索路径,利用改进概率转移规则计算蚂蚁选择下一节点的概率;

④统计每一只蚂蚁个体经过的农田路径及长度,更新禁忌表,判断蚂蚁是否完成搜索,若是,进入⑤;若否,返回③;

⑤根据本研究的更新信息素方法对信息素进行更新,继续迭代,判断迭代次数是否达到最大,若是,进入⑥;若否,返回③;

⑥结束算法,输出最优结果。

3.4 子区遍历顺序仿真试验

本研究通过MATLAB仿真软件对传统蚁群算法、改进蚁群算法、模拟退火算法以及遗传算法进行对比试验仿真分析,并对传统蚁群算法与改进蚁群算法在不同子区数量下路径规划的最短路径长度与迭代收敛次数进行仿真试验分析,以验证改进后的蚁群算法的搜索能力与收敛速度以及该算法在求解农业机器人最优路径遍历顺序的效果。

根据调参经验:蚁群数量最好为目标数量的1.5倍,信息素常量 Q 一般设定在 $[10,10\ 000]$,信息素因子 α 一般设定在 $[0,5]$,启发函数因子 β 一般设定在 $[0,5]$,最大迭代次数一般设定在 $[100,500]$ 。经过多次试验分析,蚁群算法参数设置:蚂蚁数量 m 分别设为30、45、60,其余参数设定一致,信息素常量 Q 为50,信息素因子 α 为2.5,距离启发函数因子 β 为4,区域启发因子 γ 为1,最大迭代次数设定为200,信息素权重参数 e 为0.2时,算法具有较好的性能。

在试验参数设置完毕后,对传统蚁群算法与改进蚁群算法进行仿真试验,对随机生成的3组分别有20、30、40个子区的坐标,求解3组坐标点间最优遍历顺序,在进行20次仿真试验后,对最短路径长度与迭代收敛次数求平均值,统计结果如表1所示。对传统蚁群算法、改进蚁群算法、模拟退火算法以及遗传算法在40个子区的平均最短路径长度以及最优遍历顺序进行对比,对比结果如图7和表2所示。

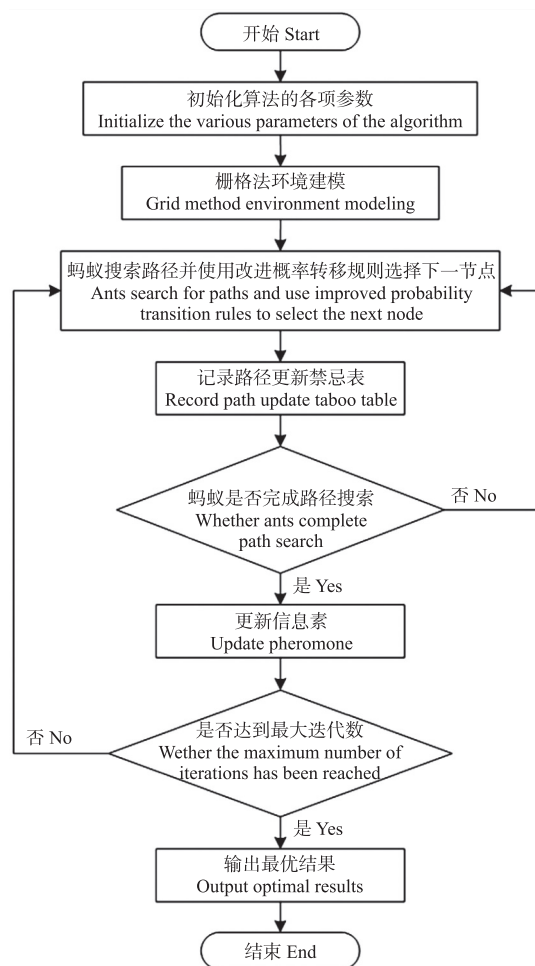


图6 本研究算法执行流程图

Fig. 6 Algorithm execution flow chart of this study

表 1 蚁群算法改进前后对不同子区数量的路径规划结果

Table 1 Path planning results of different areas before and after the improvement of ant colony algorithm

子区数量 Number of sub areas	改进前平均最短路径长度/m Average shortest path length before improvement	改进后平均最短路径长度/m Average shortest path length after improvement	改进前平均迭代收敛次数 Average iteration convergence times before improvement	改进后平均迭代收敛次数 Average iteration convergence times after improvement
20	8 915.6	8 786.6	39	6
30	11 709.4	11 427.4	57	10
40	18 214.7	17 632.9	112	23

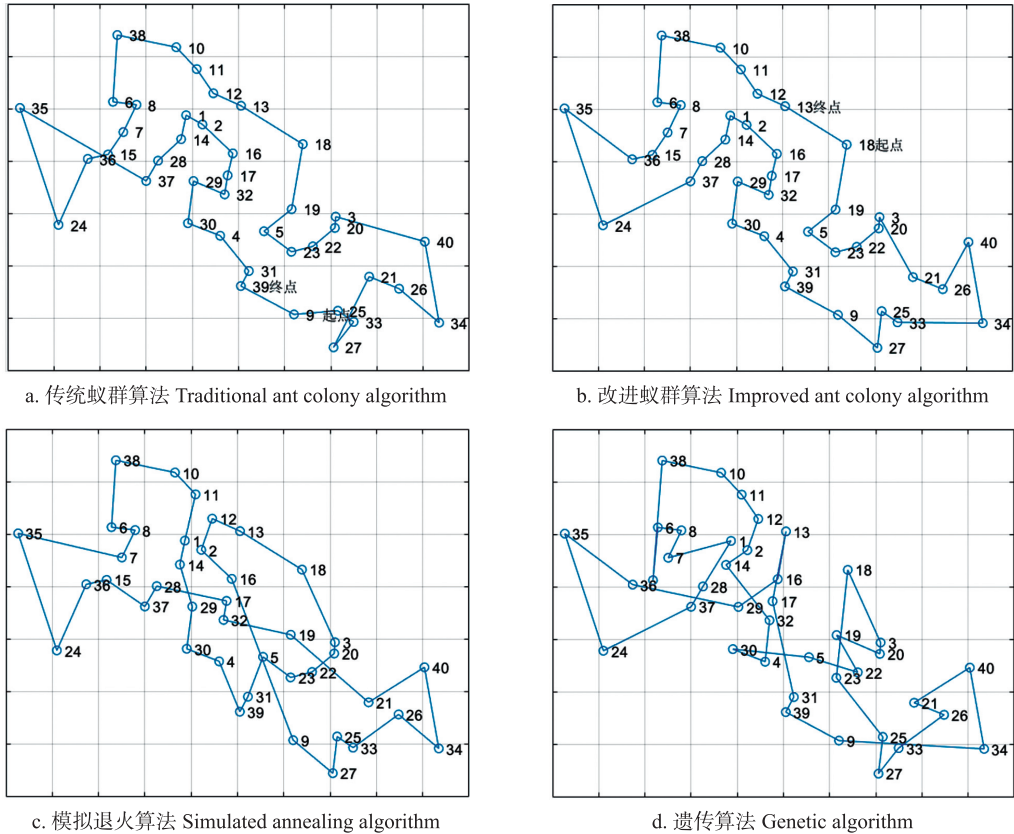


图 7 4 个路径规划算法在求解 40 个子区的最优遍历顺序

Fig. 7 Four path planning algorithms for solving the optimal traversal order of 40 sub areas

表 2 4 个路径规划算法在 40 个子区的路径规划对比

Table 2 Comparison of four path planning algorithms in 40 sub areas

方法 Method	平均最短路径长度/m Average shortest path length	最优遍历顺序 Optimal traversal order
传统蚁群算法 Traditional ant colony algorithm	18 214.7	35-24-36-15-7-6-8-6-38-10-11-12-13-18-19-5-23-22-20-3-40-34-26-21-27-33-25-9-39-31-4-30-29-32-17-16-2-1-14-28-37
改进蚁群算法 Improved ant colony algorithm	17 632.9	35-24-37-28-14-1-2-16-17-32-29-30-4-31-39-9-27-25-33-34-40-26-21-3-20-22-23-5-19-18-13-12-11-10-38-6-8-7-15-36
模拟退火算法 Simulated annealing algorithm	20 836.1	35-24-36-15-37-28-17-32-19-21-40-34-26-33-25-27-9-16-2-12-13-18-3-20-22-23-5-31-39-4-30-29-14-1-11-10-38-6-8-7
遗传算法 Genetic algorithm	22 381.7	35-24-37-28-1-7-8-6-15-38-10-11-12-2-14-32-4-30-5-22-19-20-3-18-23-25-27-33-26-21-40-34-9-39-31-17-16-13-29-36

通过表 1、表 2 和图 7、图 8 的对比结果可知,模拟退火算法与遗传算法在以平均最短路径作为指标时,效果相对于传统蚁群算法和改进蚁群算法相差较大,改进蚁群算法相比于传统蚁群算法的最短路径长度均缩短,算法迭代收敛次数方面减少,采用改进后的蚁群算法提高了遍历顺序规划质量,增强了跳出局部最优解的能力。在 20、30、40 个子区时,改进蚁群算法迭代收敛次数比传统蚁群算法减少了 84.6%、82.5%、79.5%。在子区数量为 40 时,改进蚁群算法与传统蚁群算法的最优遍历顺序如图 8 所示,其路径平均长度缩短了 3.19%,在不同的 40 个子区,改进蚁群算法相比于传统蚁群算法的最短路径长度均缩短,

进一步验证了改进蚁群算法在优化问题中的有效性。

4 多田块路径规划试验

为验证本文提出的多田块全区域路径规划方法的有效性,分别在存在复杂障碍物的多田块仿真环境以及实际的多田块无人机遥感影像下进行路径规划仿真试验。本研究的仿真试验均在 MATLAB2017 中进行,CPU 为 R7-4800H,内存 16 GB。

4.1 模拟环境下的多田块仿真试验

模拟环境下的多田块仿真试验在图 3 子区划分与合并完成的基础上,求解子区间的最优遍历顺序结果如图 9 所示,对改进蚁群算法进行求解,得到最短距离为 94.4733。使用 A* 算法进行子区间连接规划,并对跨越障碍物与阶梯区域的路径进行修正,沿各子区长边进行往复式区域覆盖路径规划,最终实现整个模拟环境的多田块路径规划。通过该方法得到的农田环境遍历规划路径如图 10 所示。

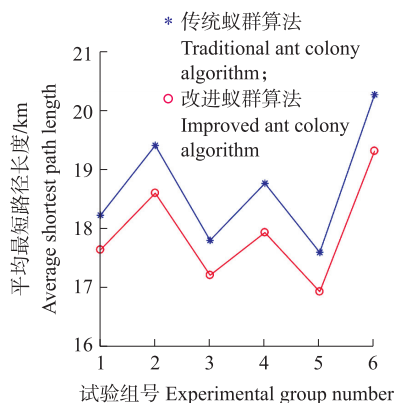


图 8 蚁群算法改进前后在不同的 40 个子区的平均最短路径长度对比

Fig. 8 Comparison of average shortest path length in different 40 sub areas before and after the improvement of ant colony algorithm

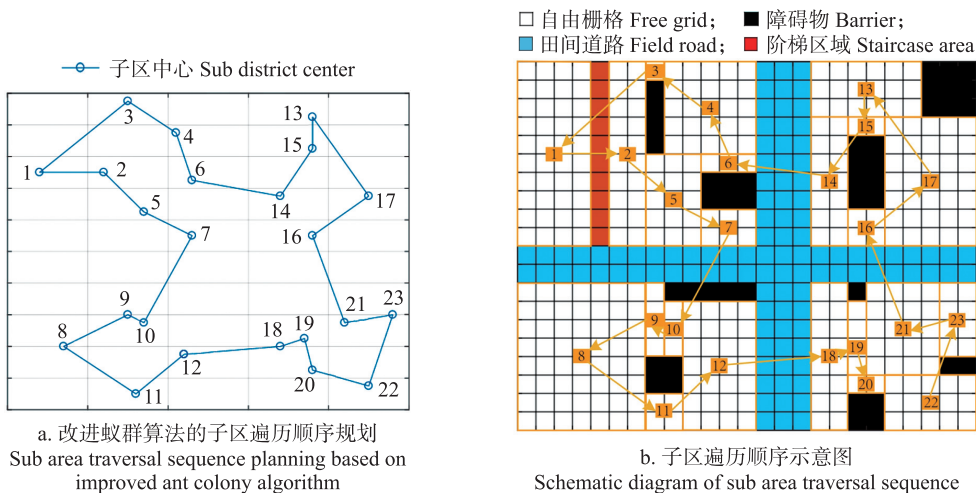


图 9 子区间遍历顺序结果

Fig. 9 Subinterval traversal sequence result

由图 10 遍历路径规划图可知,整个农田区域由 500 个栅格组成,其中自由栅格有 343 个,道路栅格有 104 个,阶梯区域栅格有 10 个,障碍物占的完全障碍物栅格和不完全障碍物栅格共有 43 个,工作区域覆盖率接近 100%,全区域路径重复率为 6.48%。

4.2 自然环境的多田块仿真试验

自然环境下的仿真试验选择云南农业大学后山农场部分区域(102.7547°E, 25.1396°N),其中农田地图的构建采用大疆创新生产的 Phantom 4 Pro 无人机进行影像采集。无人机进行航线规划与采集,飞行高度 20 m,采集时间为 14:00—16:00,在采集时选择无风适合飞行的天气。在遥控器中框选需要进行作业的农田区域,按照《无人机航摄技术要求》中规定的标准,设置好航线参数后无人机按航线逐张采集农田影像,将影像导入 DJI Terra 软件(图 11-a),在 PC 机中进行

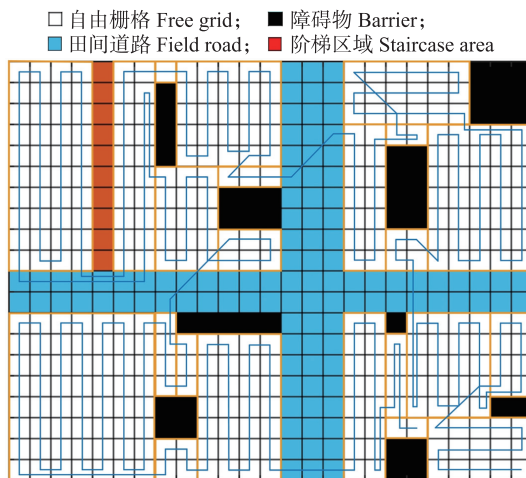
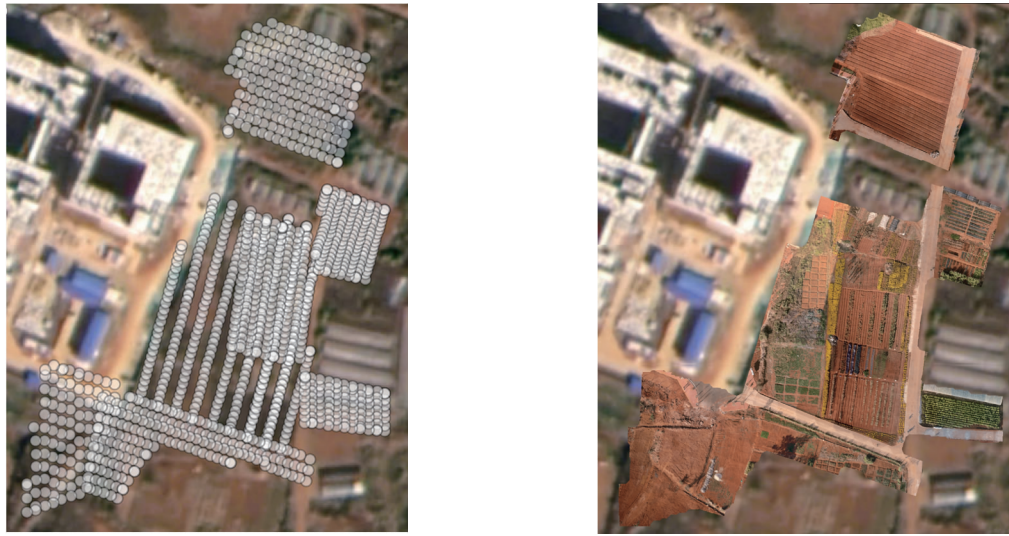


图 10 遍历路径规划图

Fig. 10 Traversing path planning diagram

二维重建,生成厘米级精度的二维正射影像(图 11-b)。无人机在采集农田影像时,开启了其网络 RTK 功能,使其在采集农田影像时具有较高的定位精度,地物匹配更加准确,并选择 WGS-84 坐标系作为农田影像采集的坐标系统。



a. 无人机按航线采集的农田影像
Image of farmland acquired by UAV according to route

b. 二维重建生成的正射影像
Orthographic image generated by 2D reconstruction

图 11 农田地图构建

Fig. 11 The building of farmland map

图 11-a 中的白点代表无人机在此处进行了影像采集。The white dot in figure 11-a indicates that the UAV has carried out image acquisition here.

无人机遥感影像、子区轮廓以及序号设定如图 12 所示,作业区域由 11 组子区组成,各子区参数如表 3 所示。参考翟卫欣等^[27]的参数设定方法,设置农业机器人的作业行间距为 2 m,最小转弯半径为 1 m。

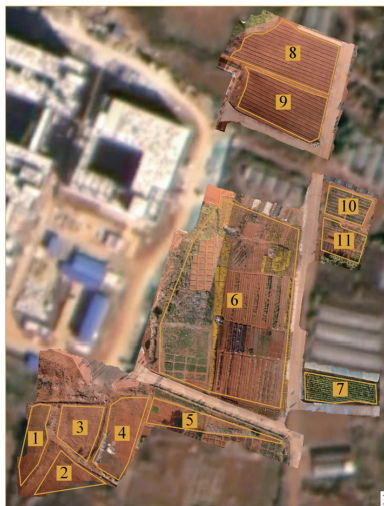


图 12 试验地的无人机遥感影像

Fig. 12 UAV remote sensing images of the test site

1~11 为子区序号。1-11 are the sub area number.

表 3 试验地的子区数据参数

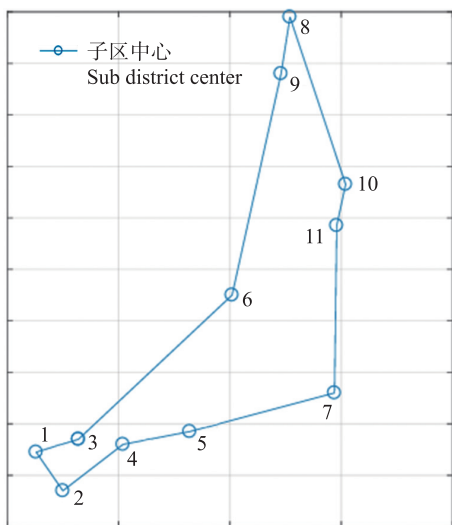
Table 3 Sub area data parameters of the test site

子区序号 Sub area number	面积/m ² Area	周长/m Perimeter	边界点数量 Number of boundary points
子区 1 Sub area 1	392.8	101	8
子区 2 Sub area 2	381.6	99	4
子区 3 Sub area 3	529.4	91	5
子区 4 Sub area 4	734.6	117	10
子区 5 Sub area 5	591.8	158	8
子区 6 Sub area 6	5 808.1	301	7
子区 7 Sub area 7	482.2	100	6
子区 8 Sub area 8	1 217.8	148	12
子区 9 Sub area 9	1 052.7	138	8
子区 10 Sub area 10	340.5	74	5
子区 11 Sub area 11	354.4	79	6

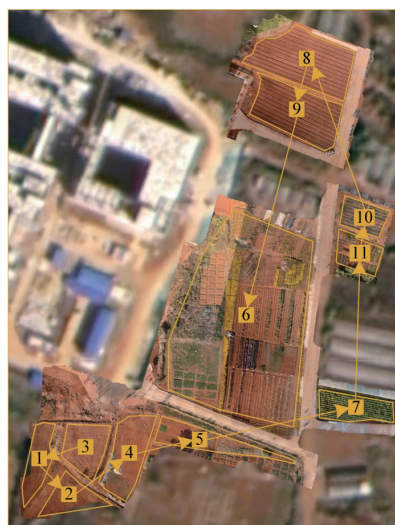
利用无人机遥感影像提取子区边界点的高度信息,判断子区间的阶梯区域。结果显示试验地块子区 10 与子区 11 之间存在阶梯区域,以子区边界线中的最长边作为作业方向,采用往复式区域覆盖路径规划生成单个子区的作业路径后,根据 A* 算法按蚁群算法求解的多田块遍历顺序(图 13)进行子区间连接路径规划,得到无人机遥感影像下多田块路径规划(图 14),工作区域覆盖率接近 100%。

将本研究与自适应升温模拟退火算法^[28]和基于能耗模型与遗传算法结合的方法^[18]进行田块最优遍历顺序、路径长度进行对比,由表 4 可得,本文提出的方法相比于自适应升温模拟退火算法和能耗模型与

遗传算法结合方法的最短路径长度分别缩短了 1.1% 和 3.9%, 表明本方法能够有效降低路径长度。



a. 改进蚁群算法的子区遍历顺序规划
Sub area traversal sequence planning based on improved ant colony algorithm



b. 子区遍历顺序示意图
Schematic diagram of sub area traversal sequence

图 13 改进蚁群算法的多田块遍历顺序仿真结果

Fig. 13 Simulation results of multi field block traversal sequence based on improved ant colony algorithm

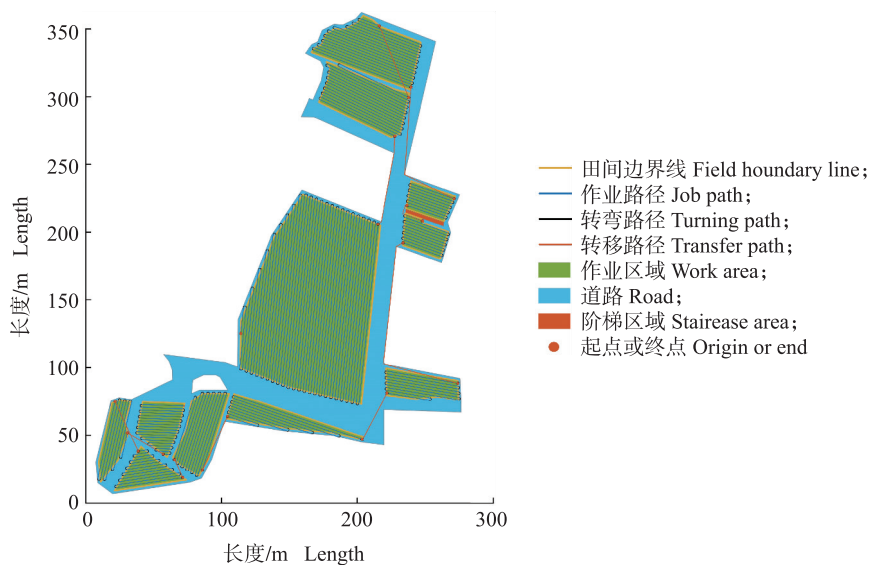


图 14 试验地多田块路径规划仿真结果

Fig. 14 Simulation results of multi field path planning in test site

白色区域代表该区域存在障碍物或无人机未进行影像采集。The white area in the figure represents the presence of obstacles or the drone not performing image acquisition in the area.

表 4 3 种多田块路径规划方法的对比

Table 4 Comparison of three multi field path planning methods

方法 Method	最优遍历顺序 Optimal traversal order	最短路径长度/m Shortest path length
本文 This paper	3-1-2-4-5-7-11-10-8-9-6	519.96
自适应升温模拟退火算法 Adaptive heating simulated annealing algorithm ^[28]	5-2-1-3-4-6-9-8-10-11-7	525.33
能耗模型与遗传算法结合 Combination of energy consumption model and genetic algorithm ^[18]	2-1-3-4-5-6-8-9-10-11-7	540.27

5 结论

1) 本研究提出了一种改进蚁群算法与 A* 算法结合的农业机器人多田块全区域的路径规划方法,通过改进蚁群算法对子区的遍历顺序进行规划。针对传统的蚁群算法容易陷入局部最优以及收敛速度慢的问题,引入区域启发函数并改进信息素更新方法,以提高算法的全局搜索能力与收敛速度,防止局部最优,缩短了搜索时间。MATLAB 仿真试验表明,在子区数量为 40 时,改进蚁群算法所规划的平均路径长度较传统的蚁群算法减少了 3.19%,平均迭代收敛次数减少了 79.5%。

2) 本研究提出的改进蚁群算法与 A* 算法结合的路径规划方法能够实现多田块的路径规划。根据无人机构建的农田遥感影像进行栅格地图的构建,在对障碍物膨胀处理的基础上,进行子区的划分与合并。通过改进蚁群算法搜索机器人在子区间的最优遍历顺序,利用具有启发式搜索的 A* 算法进行子区连接路径规划,并对田块间存在阶梯区域的情况进行路径修正,最终实现多田块路径规划。MATLAB 仿真试验表明,该算法的机器人路径规划重复率为 6.48%。利用实际的农田无人机遥感影像和田间作业参数进行自然环境的仿真试验,工作区域覆盖率接近 100%,进一步验证了该方法的有效性。

参考文献 References:

- [1] 崔鑫宇,崔海波,马振,等. 几何路径跟踪组合算法及其农业机械自动导航应用[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2023,4(3):24-31.
Cui X Y, Cui B B, Ma Z, et al. Integration of geometric-based path tracking controller and its application in agricultural machinery automatic navigation[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2023, 4(3): 24-31 (in Chinese with English abstract).
- [2] 张隆梅,刘岗微,齐彦栋,等. 农业机械无人驾驶系统关键技术研究进展[J]. 智能化农业装备学报(中英文),2022,3(1):27-36.
Zhang L M, Liu G W, Qi Y D, et al. Research progress on key technologies of agricultural machinery unmanned driving system[J]. Journal of Intelligent Agricultural Mechanization, 2022, 3(1): 27-36 (in Chinese with English abstract).
- [3] 郑倩,李鹏云,周迪. 基于文献计量学的智慧农业研究现状及趋势分析[J]. 华中农业大学学报,2023,42(3):29-38.
Zheng Q, Li P Y, Zhou D. Current status and trend of studying smart agriculture based on bibliometric analysis[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2023, 42(3): 29-38 (in Chinese with English abstract).
- [4] Wang S, Su D, Jiang Y Y, et al. Fusing vegetation index and ridge segmentation for robust vision based autonomous navigation of agricultural robots in vegetable farms[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 213: 108235.
- [5] 王红君,叶荣,赵辉,等. 基于改进的烟花-蚁群算法和 B 样条曲线的农业机器人路径规划[J]. 科学技术与工程,2021,21(7):2730-2736.
Wang H J, Ye R, Zhao H, et al. Agricultural robot path planning based on improved fireworks-ant colony algorithm and B-spline curve[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2730-2736 (in Chinese with English abstract).
- [6] Thakur A, Venu S, Gurusamy M. An extensive review on agricultural robots with a focus on their perception systems[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2023, 212: 108146.
- [7] 刘波,杨长辉,熊龙焯,等. 果园自然环境下采摘机器人路径识别方法[J]. 江苏农业学报,2019,35(5):1222-1231.
Liu B, Yang C H, Xiong L Y, et al. Path recognition method of picking robot based on orchard natural environment[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2019, 35(5): 1222-1231 (in Chinese with English abstract).
- [8] 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 M, Ji Y H, Li S C, 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 with English abstract).
- [9] 陈盛德,廖玲君,徐小杰,等. 中国植保无人机及其施药关键技术的研究现状与趋势[J]. 沈阳农业大学学报,2023,54(4):502-512.
Chen S D, Liao L J, Xu X J, et al. Research status and trends of plant protection UAV and its key technology of spraying in China[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(4): 502-512 (in Chinese with English abstract).
- [10] 陈凯,解印山,李彦明,等. 多约束情形下的农机全覆盖路径规划方法[J]. 农业机械学报,2022,53(5):17-26,43.
Chen K, Xie Y S, Li Y M, et al. Full coverage path planning method of agricultural machinery under multiple constraints[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(5): 17-26, 43 (in Chinese with English abstract).
- [11] 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 J, He Y Q. 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 with English abstract).
- [12] 肖茂华,李亚杰,汪小岳,等. 水产养殖尾水处理技术与装备的研究进展[J]. 南京农业大学学报,2023,46(1):1-13. DOI:10.7685/jnau.202201028.
Xiao M H, Li Y J, Wang X C, et al. Research progress of aquaculture tailwater treatment technology and equipment[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2023, 46(1): 1-13 (in Chinese with English abstract).

- [13] Nilsson R S,Zhou K. Method and bench-marking framework for coverage path planning in arable farming[J]. *Biosystems Engineering*,2020,198:248–265.
- [14] Jeon C W, Kim H J, Yun C, et al. Design and validation testing of a complete paddy field-coverage path planner for a fully autonomous tillage tractor[J]. *Biosystems Engineering*,2021,208:79–97.
- [15] 郭典新,高龙琴,李志昂,等. 割草机器人全覆盖式路径规划平台设计与实现[J]. *现代制造工程*,2018(11):50–53.
Guo D X,Gao L Q,Li Z A, et al. Mowing robot full coverage path planning platform design and implementation[J]. *Modern Manufacturing Engineering*,2018(11):50–53(in Chinese with English abstract).
- [16] Santoro E,Soler E M,Cherri A C. Route optimization in mechanized sugarcane harvesting[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*,2017,141:140–146.
- [17] 马全坤,张彦斐,宫金良. 基于记忆模拟退火和 A* 算法的农业机器人遍历路径规划[J]. *华南农业大学学报*,2020,41(4):127–132.
Ma Q K,Zhang Y F,Gong J L. Traversal path planning of agricultural robot based on memory simulated annealing and A* algorithm[J]. *Journal of South China Agricultural University*,2020,41(4):127–132(in Chinese with English abstract).
- [18] Shen M W, Wang S Z, Wang S, et al. Simulation study on coverage path planning of autonomous tasks in hilly farmland based on energy consumption model[J]. *Mathematical Problems in Engineering*,2020,2020:4535734.
- [19] 张天瑞,吴宝库,周福强. 面向机器人全局路径规划的改进蚁群算法研究[J]. *计算机工程与应用*,2022,58(1):282–291.
Zhang T R,Wu B K,Zhou F Q. Research on improved ant colony algorithm for robot global path planning[J]. *Computer Engineering and Applications*,2022,58(1):282–291(in Chinese with English abstract).
- [20] 刘昂,蒋近,许迪文. 基于 A* 和鸽群算法的快速无人机航路规划[J]. *飞行力学*,2020,38(3):34–40,51.
Liu A,Jiang J,Xu D W. Path planning of UAV delivery using A* and pigeon swarm algorithm[J]. *Flight Dynamics*,2020,38(3):34–40,51(in Chinese with English abstract).
- [21] Das A,Ghoshal D. Extraction of eye region of human face based on corner detection and dilation operation[J]. *Topics in Intelligent Computing and Industry Design*,2020,2(2):16–19.
- [22] Zha W S,Yan S,Li D L, et al. A study of correlation between permeability and pore space based on dilation operation[J]. *Advances in Geo-Energy Research*,2017,1(2):93–99.
- [23] 周林娜,汪芸,张鑫,等. 矿区废弃地移动机器人全覆盖路径规划[J]. *工程科学学报*,2020,42(9):1220–1228.
Zhou L N,Wang Y,Zhang X, et al. Complete coverage path planning of mobile robot on abandoned mine land[J]. *Chinese Journal of Engineering*,2020,42(9):1220–1228(in Chinese with English abstract).
- [24] 刘刚,李笑,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法[J]. *农业机械学报*,2016,47(S1):21–29.
Liu G,Li X,Kang X, et al. Automatic navigation path planning method for farmland leveling based on GNSS[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*,2016,47(S1):21–29(in Chinese).
- [25] 陈加俊,谭代伦. 求解旅行商问题的探索—开发—跳跃策略单亲遗传算法[J]. *计算机应用研究*,2023,40(5):1375–1380.
Chen J J,Tan D L. Partheno-genetic algorithm based on explore-develop-jump strategy for solving traveling salesman problem[J]. *Application Research of Computers*,2023,40(5):1375–1380(in Chinese with English abstract).
- [26] 李康顺,徐福梅,张文生,等. 一种基于启发式演化算法的最优-最差蚂蚁系统[J]. *中南大学学报(自然科学版)*,2010,41(2):609–614.
Li K S,Xu F M,Zhang W S, et al. An improved best-worst ant system based on heuristic evolutionary algorithm[J]. *Journal of Central South University(Science and Technology Edition)*,2010,41(2):609–614(in Chinese with English abstract).
- [27] 翟卫欣,王东旭,陈智博,等. 无人驾驶农机自主作业路径规划方法[J]. *农业工程学报*,2021,37(16):1–7.
Zhai W X,Wang D X,Chen Z B, et al. Autonomous operation path planning method for unmanned agricultural machinery[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2021,37(16):1–7(in Chinese with English abstract).
- [28] 王伟,张彦斐,宫金良,等. 基于自适应升温模拟退火算法的农业机器人全区域覆盖策略[J]. *华南农业大学学报*,2021,42(6):126–132.
Wang W,Zhang Y F,Gong J L, et al. Whole area coverage strategy of agricultural robot based on adaptive heating simulated annealing algorithm[J]. *Journal of South China Agricultural University*,2021,42(6):126–132(in Chinese with English abstract).

责任编辑:刘怡辰