

王伟, 张彦斐, 宫金良. 基于蚁群-BFS 算法的复杂环境下农业机器人全区域覆盖研究 [J]. 华南农业大学学报, 2021, 42(3): 119-125.
WANG Wei, ZHANG Yanfei, GONG Jinliang. Study on the whole area coverage of agricultural robot in complex environment based on ant colony-BFS algorithm [J]. Journal of South China Agricultural University, 2021, 42(3): 119-125.

基于蚁群-BFS 算法的复杂环境下 农业机器人全区域覆盖研究

王 伟¹, 张彦斐², 宫金良¹

(1 山东理工大学 机械工程学院, 山东 淄博 255000;

2 山东理工大学 农业工程与食品科学学院, 山东 淄博 255000)

摘要:【目的】以路径重复率为优化目标解决农业机器人在数字生态农场中的全区域覆盖问题。【方法】首先, 将栅格地图中的障碍物进行膨胀处理, 在此基础上进行矩形分区以及分区合并操作; 然后, 通过改进的蚁群算法规划分区间的遍历顺序、通过改进的广度优先搜索 (Breadth first search, BFS) 算法规划分区间终点与起点的衔接路径, 从而实现机器人全区域覆盖。2 种算法的具体改进方案为: 分别通过人工免疫算法与粒子群算法改进遗传算法的选择与交叉算子, 并将改进后的选择算子、交叉算子、原遗传算法变异算子与蚁群算法相结合改进传统蚁群算法信息素更新方法; 建立动态函数以简化 BFS 算法规划的路径。【结果】仿真结果表明, 改进蚁群算法收敛时的迭代次数较传统蚁群算法减少了 83.1%, 路径长度相比减少了 4.8%; 由改进的蚁群算法与改进的 BFS 算法规划的机器人遍历路径重复率是传统蚁群算法和 BFS 算法的 56%, 且农业机器人能实现对农田区域的 100% 覆盖。【结论】本研究提供了一种农业机器人在复杂环境的数字生态循环农场中进行全遍历覆盖的解决方案。

关键词: 路径重复率; 农业机器人; 蚁群算法; 旅行商问题; 广度优先搜索算法

中图分类号: S2; TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2021)03-0119-07

Study on the whole area coverage of agricultural robot in complex environment based on ant colony-BFS algorithm

WANG Wei¹, ZHANG Yanfei², GONG Jinliang¹

(1 School of Mechanical Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China;

2 School of Agricultural Engineering and Food Science, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China)

Abstract: 【Objective】To solve the whole area coverage problem of agricultural robot in digital ecological farm with path repetition rate as the optimization target. 【Method】Firstly, the obstacles in the raster map were expanded and rectangular partitioning was performed and the partitions were merged. Then, the improved ant colony algorithm was used to calculate the traversal order among partitions, and the improved breadth first search (BFS) algorithm was used to calculate the connecting path between the end point and the starting point between partitions. By this way, the whole area coverage of robot could be achieved. The improvement schemes

收稿日期: 2020-09-14 网络首发时间: 2021-03-29 17:13:21

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20210329.1001.002.html>

作者简介: 王 伟 (1996—), 男, 硕士研究生, E-mail: 2639594282@qq.com; 通信作者: 宫金良 (1976—), 男, 副教授, 博士, E-mail: gjlwing@qq.com

基金项目: 国家自然科学基金 (61303006); 山东省引进顶尖人才“一事一议”专项经费; 山东省重点研发计划项目 (2019GNC106127); 淄博市生态无人农场研究院项目 (2019ZBXC200)

of the two algorithms were as following: The selection and crossover operators of genetic algorithm were improved by artificial immune algorithm and particle swarm optimization algorithm respectively. The improved selection and crossover operators, mutation operator of original genetic algorithm and ant colony algorithm were combined to improve the pheromone updating method of traditional ant colony algorithm. The dynamic function was established to simplify the path planned by BFS algorithm. 【Result】 The simulation results showed that the number of iterations and path length of the improved ant colony algorithm were 83.1% and 4.8% less than those of the traditional ant colony algorithm. The path repetition rate of the improved ant colony algorithm and the improved BFS algorithm was 56% of the traditional ant colony algorithm and BFS algorithm, and the agricultural robot could achieve 100% coverage of farmland. 【Conclusion】 This study provides a solution for agricultural robots to perform the whole area coverage in digital ecological circular farm with complex environments.

Key words: path repetition rate; agricultural robot; ant colony algorithm; travelling salesman problem; breadth first search algorithm

数字生态循环农业可解决我国农业发展存在的农药和化肥使用过量及利用率低、劳动力成本昂贵、农业废弃物难处理、生态环境恶化、农产品质量下降等问题,将成为未来农业发展的主流方向^[1-2]。实现农业机器人在拥有复杂环境的数字生态循环农业农场中的全区域覆盖是数字农业的研究趋势之一,有利于降低农业机器人在农田中遍历的路径重复率、提高农业机器人的工作效率。

近些年来,国内外学者围绕机器人在工作区域中的全区域覆盖问题展开了大量的研究^[3-4],Choi等^[5]设计了一种基于内螺旋和限制逆距离转换的在线全覆盖算法;Kapanoglu等^[6]将模板法和遗传算法相融合解决机器人的全覆盖路径规划问题;李楷等^[7]提出了一种基于回溯法的全覆盖路径规划算法,在通过 West-move first 算法实现局部区域覆盖的基础上通过改进的 A*算法规划出一条从死点到回溯点的光滑无障碍路径;曹翔等^[8]使用不同的函数值表示障碍物、已覆盖栅格和未覆盖栅格,引入方向信度函数对栅格信度函数值进行优化并根据栅格信度函数进行遍历路径规划,该方案在环境较复杂的工作区域中遍历时难以保证对工作区域的全覆盖;聂杨^[9]将环境地图栅格化并划分子区域,通过机器人依次遍历相邻子区域完成对环境地图的覆盖,但在环境复杂且子区域较多时该方案易引起较大的路径重复率。

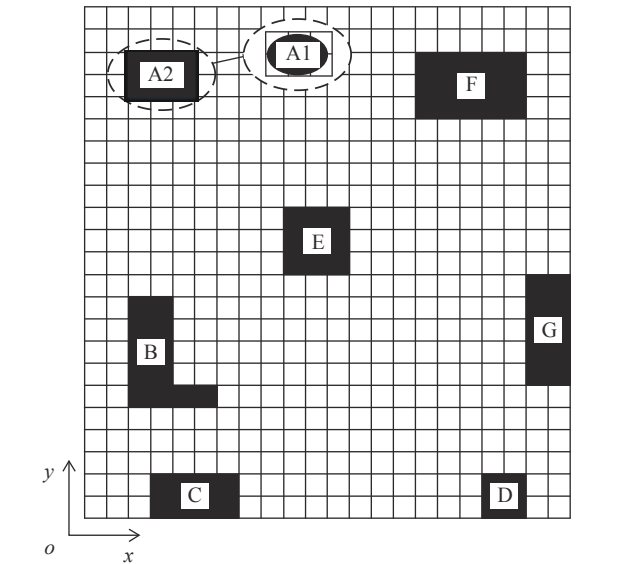
本文通过栅格分区的方法简化数字生态农业农场中复杂的工作环境,在此基础上从优化路径重复率的角度出发分别通过改进的蚁群算法和广度优先搜索 (Breadth first search, BFS) 算法规划机器人在分区间的遍历顺序与分区间的衔接路径,以此

实现农业机器人对农田工作区域的全覆盖。

1 栅格化环境建模与矩形分区

1.1 建立栅格地图

农田栅格化以及各障碍物膨胀结果如图 1 所示。农业机器人的工作环境多遍布电线杆、固定安装的传感器等异形障碍物。为减少农业机器人在复杂环境农田中遍历时产生的路径重复率,本文通过栅格法对农场的环境进行建模,并根据农业机器人的工作范围设置栅格图中单元格的单位长度。对障



A1 表示膨胀处理前的障碍物; A2 表示膨胀处理后的 A1; B、C、D、E、F 和 G 表示膨胀处理后的障碍物
A1 represents the obstacle before expansion treatment; A2 represents the A1 after expansion treatment; B, C, D, E, F and G represent obstacles after expansion treatment

图 1 栅格地图
Fig. 1 Raster map

碍物边缘线与栅格边缘线不重合的情况进行膨胀运算,即不满 1 个单元格的障碍物按 1 个单元格处理。

1.2 划分矩形分区

农业机器人在复杂环境农田中遍历时容易遗漏部分工作区域以及出现较高的路径重复率的问题^[10],对此本文在对障碍物进行膨胀处理的基础上根据障碍物的大小、形状以及位置划分农田中的矩形区域以简化农田中复杂的工作环境,矩形分区方

法具体方案为:对于膨胀处理后不是矩形或正方形的障碍物,设置纵向虚拟分割线沿 x 轴正方向扫描,在不规则障碍物边界的 y 值发生变化时留下虚拟分割线标记,通过此方法将不规则障碍物划分为多个矩形障碍物(图 2a);对于 2 个障碍物横向或纵向边界坐标相等的情况,设置对应的横向或纵向连接线;对于矩形或正方形障碍物,过障碍物的左上角顶点与右下角顶点画垂直于 x 轴、 y 轴的分区线。

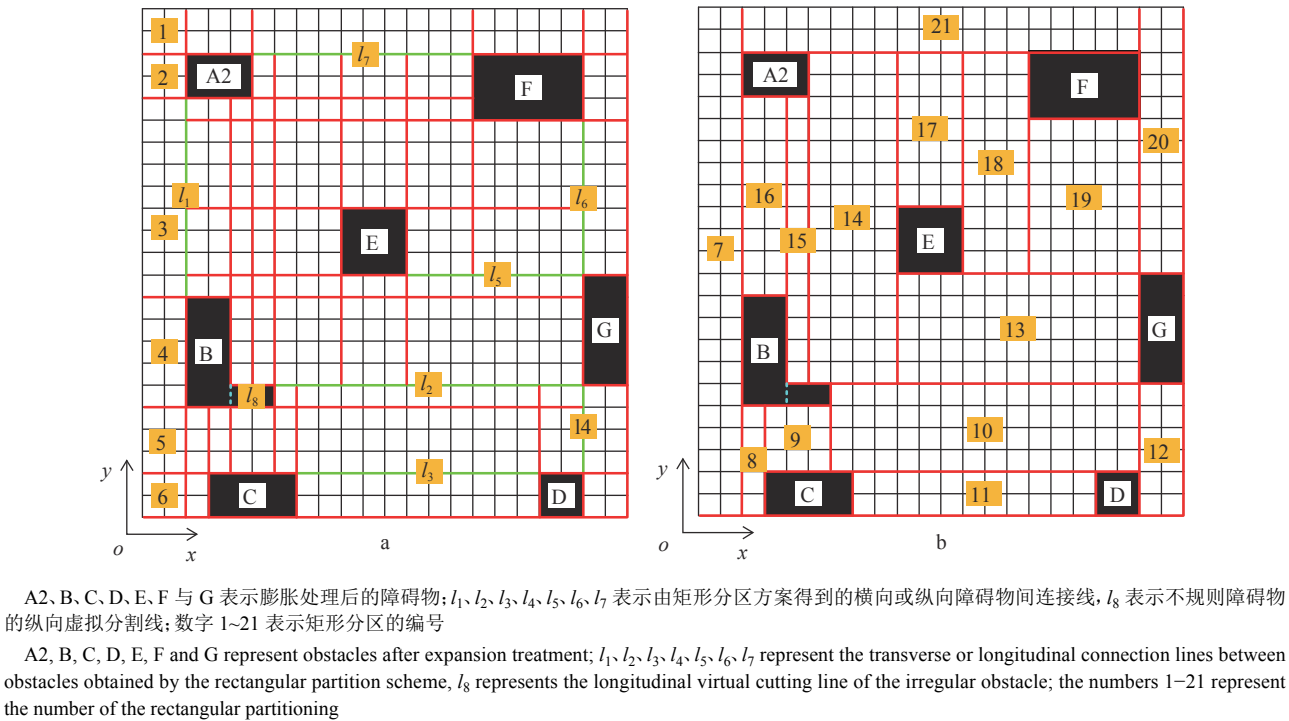


图 2 矩形分区 (a) 与矩形分区合并 (b) 结果

Fig. 2 The results of rectangular partition (a) and merge of partitions (b)

对相邻分区边缘线长度相等的情况进行分区的合并操作,优先合并可纵向合并的分区,之后再合并可横向合并的分区,合并结果如图 2b 所示。

2 优化分区间遍历顺序

2.1 旅行商问题模型

农业机器人在矩形分区间以及分区内遍历完成对农田工作区域的全覆盖。为减少机器人的路径重复率,需要确定遍历各分区时的最佳遍历顺序,这本质上是一个旅行商问题 (Travelling salesman problem, TSP),即将所有矩形分区归一化为由分区中心点代表的质点,在此基础上寻找一条遍历所有质点且所有质点均遍历一次的最短路径,可由数学模型进行表示。

在栅格化环境建模图中易知质点 i 与质点 j 之间的距离 d_{ij} 。假设对栅格地图进行矩形分区以及分

区合并之后有 n 个分区,则遍历所有质点的最短距离 (R) 计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} x_{ij}, \tag{1}$$

其中,若质点 i 、 j 的连线位于最短遍历回路上则 x_{ij} 为 1, 否则为 0^[11]。为保证所求最短路径遍历所有质点且最终路线形成独立闭环,需添加以下约束^[12]:

$$\text{s. t. } \begin{cases} \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \\ \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \\ \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} x_{ij} \leq |S| - 1, 2 \leq |S| < n - 1 \end{cases}, \tag{2}$$

式中, S 表示所有质点的非空子集, $|S|$ 表示集合 S 所包含的顶点数。

2.2 基于蚁群算法的分区间遍历顺序

本文通过蚁群算法求解旅行商问题。蚁群算法通过蚂蚁群体以正反馈的形式在质点间迭代遍历以寻找相对最优质点间遍历路径。蚁群算法中蚂蚁 k 在一段路径中遍历时会留下信息素同时该段路径中的信息素浓度也会按一定速率挥发^[13], 则 t 时刻质点 i 、 j 连线路径的信息素浓度 $\tau_{ij}(t)$ 更新公式为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}, \tag{3}$$

式中, ρ 为信息素挥发因子, 介于 0~1, $\Delta\tau_{ij}$ 为第 t 次迭代中经过路径 i 、 j 的蚂蚁所留下的信息素, 计算公式如下:

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k, \tag{4}$$

式中, $\Delta\tau_{ij}^k$ 为第 k 只蚂蚁在路径 i 、 j 上留下的信息素, 计算公式由信息素强度 (Q) 与该蚂蚁在第 t 次迭代中遍历所有质点的路径长度 (L_k) 组成^[14]:

$$\Delta\tau_{ij}^k = Q/L_k, \tag{5}$$

通过状态转移概率确定蚂蚁 k 在第 t 次迭代时由质点 i 转到质点 j 遍历的概率 (p_{ij}^k) 计算公式为:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha (\eta_{ij})^\beta}{\sum_{k \in \text{allowed}} \tau_{ik}^\alpha(t) (\eta_{ik})^\beta}, & j \in \text{allowed}_k \\ 0, & \text{其他} \end{cases}, \tag{6}$$

式中, 为防止蚂蚁 k 重复遍历质点, 建立蚂蚁 k 遍历的禁忌表 tabu_k 用以记录蚂蚁 k 遍历过的城市, 则 $\text{allowed}_k = \{n - \text{tabu}_k\}$, 其中记录 k 遍历的质点; η_{ij} 表示质点 i 、 j 的路径启发函数, $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$; α 与 β 分别表示信息素与启发函数的权重系数^[15]。

2.3 基于粒子群-遗传算法的信息素更新方法

针对蚁群算法易陷入局部最优解以及算法运行前期工作效率较慢的问题, 本文分别通过人工免疫算法与粒子群算法改进遗传算法的选择与交叉算子, 并将改进后的选择与交叉算子与原遗传算法变异算子与蚁群算法相结合改进传统蚁群算法信息素更新方法, 具体改进方案如下:

2.3.1 选择算子 蚂蚁在质点间遍历完 1 次之后会形成 1 个由质点遍历顺序代表的可行解。为提高算法的收敛速度, 需通过路径代价与多样性指数构建适用度函数并通过轮盘赌选择算子对适用度值较低的可行解进行筛选。为提高可行解集的多样性、避免算法陷入局部最优解, 本文通过人工免疫算法中抗体浓度^[16]的概念反向定义可行解 (r) 的多样性指数 (H_r):

$$H_r = \sum_{p=1}^m \sum_{q=1}^n h_q^{p,r} / m, \tag{7}$$

$$h_q^{p,r} = \begin{cases} 0, & \text{if } h_q^p = h_q^r \\ 1, & \text{if } h_q^p \neq h_q^r \end{cases}, \tag{8}$$

式中, p 表示可行解, $p \in [1, m]$, q 表示可行解中的基因位数, $q \in [1, n]$ 。

通过 Euclidean 距离定义可行解 (r) 的路径代价 (L_r):

$$L_r = \sum_{q=1}^{n-1} \sqrt{(x_q - x_{q+1})^2 + (y_q - y_{q+1})^2}, \tag{9}$$

则可行解 (r) 的适用度函数 (f_r) 为:

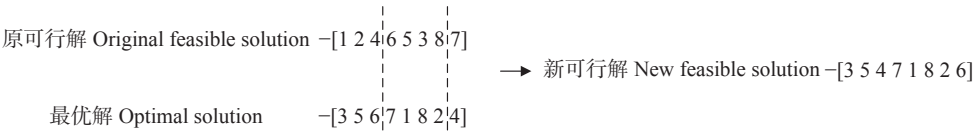
$$f_r = \lambda_1 H_r / (\lambda_2 L_r), \tag{10}$$

式中, λ_1 、 λ_2 表示权重系数, 且 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

2.3.2 交叉算子 粒子群优化算法在处理 TSP 时通过各可行解向全局最优解靠拢实现群体收敛, 具有较高的群体收敛速度。本文将粒子群算法的思想与遗传算法交叉算子相结合, 即在蚂蚁种群迭代完一次之后, 将各可行解以一定的概率与当前迭代中适用度值最大的可行解进行交叉操作, 以此获得优质基因片段。具体交叉过程如图 3 所示。选择可行解中的 2 个位置, 采用部分映射^[17-18]的方法将 2 个父代解的部分结构加以替换重组而生成新可行解。

2.3.3 变异算子 在交叉操作之后继而进行可行解的变异操作, 以防止蚁群算法陷入局部最优解, 如图 4 所示, 以一定的概率变动可行解的某些基因座上的基因值完成变异操作。

将选择、交叉变异后的新可行解代入公式 (3)、



数字表示分区编号, 间隔开的 1 组分区编号表示 1 种分区间遍历顺序

Each number represents the partitioning number, and the interval partitioning numbers in a group represents a traversal order among partitionings

图 3 交叉操作

Fig. 3 Interlace operation

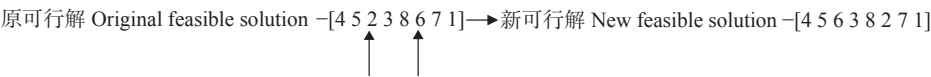


图 4 变异操作

Fig. 4 Mutation operation

(4)、(5) 以更新各路径信息素并继续进行蚁群算法的下一迭代。

3 分区间的衔接遍历

选择下个分区 4 个顶点中距离上个分区遍历终点较近的顶点作为下个分区遍历的起点，而上分区终点与下分区起点可能相距较远，本文从路径代价最优的角度出发通过改进的 BFS 算法^[19] 规划分区间终点与起点的衔接路径。

BFS 算法由起点 (x, y) 出发，按照向上 $(x, y+1)$ 、向下 $(x, y-1)$ 、向左 $(x-1, y)$ 、向右 $(x+1, y)$ 4 个方向搜索邻接点，再根据 4 个方向搜索邻接点的邻接点，以此类推直至到达终点。BFS 算法的工作过程如图 5 所示。由图 5 可知，BFS 算法找到的最短路径均由平行于坐标轴的直线组成，并未实现真正意义上的路径最优，本文根据两点之间直线最短的原则在 BFS 算法路径规划的基础上设计路径简化方案，即：设置一质点 α_e 在路径中自起点至终点遍历，易得第 e 次迭代时该质点与起点之间连线的动态函数；对障碍物边缘进行膨胀操作，即定义一个

无穷小的方块 N ，将 N 沿障碍物边缘遍历，得到边缘膨胀之后的障碍物 M 。满足条件：

$$f_e(x) \cap M \neq \emptyset. \tag{11}$$

则记录第 e 次迭代的线段 $f_e(x)$ 、迭代终点 α_e ，并以 α_e 作为新起点并重复以上过程，直至质点遍历至终点。则改进后的遍历路线由各阶段 $f_e(x)$ 衔接组成。

4 算法仿真与结果

4.1 改进的蚁群算法仿真

在矩形分区合并的基础上，将各分区归一化为由分区中心点代表的质点，分别由传统蚁群算法与改进蚁群算法确定各质点间的遍历顺序，以算法运行时间一致设置两算法的蚂蚁数量、信息素与启发函数权重因子、迭代次数、信息素强度 Q 等初始参数。2 种算法历代群体最短路径随迭代次数的变化曲线如图 6 所示，2 种算法在质点间的路径遍历图见图 7。

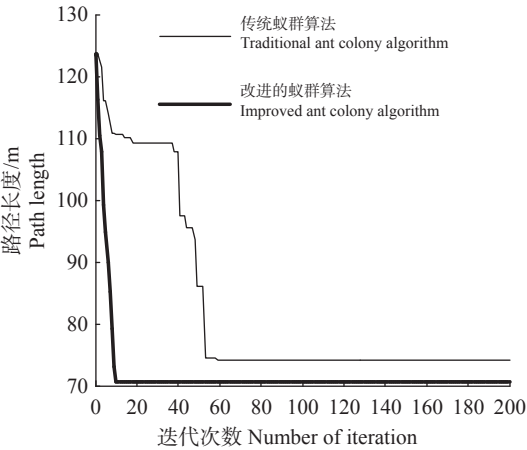
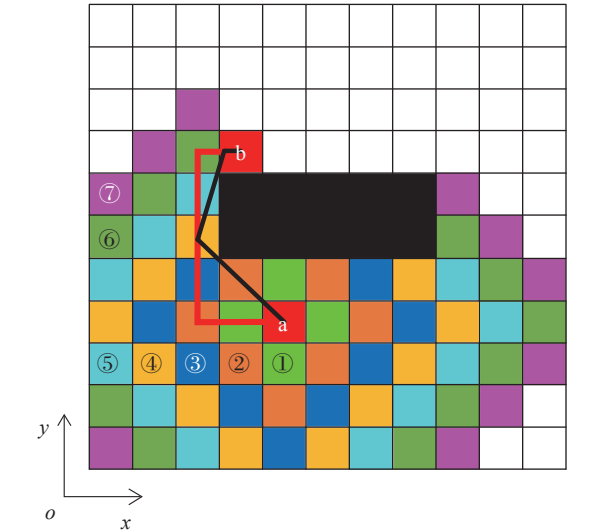


图 6 2 种算法最短路径长度随迭代次数的变化曲线
Fig. 6 The variation curve of the shortest path length with the number of iterations of two algorithms

由图 6 可知，本文改进的蚁群算法在第 10 代时已收敛且最短路径长度为 70.27 m，传统蚁群算法在第 59 代时收敛，最短路径为 73.82 m。改进蚁群算法收敛时的迭代次数较传统蚁群算法减少了 83.1%，路径长度相比减少 4.8%。证明本文通过个体多样性定义蚁群算法适应度函数与通过遗传算法、粒子群算法与蚁群算法相结合设置信息素更新方法的方案可提高蚁群算法的收敛速度、以及蚁群



a、b 分别为遍历的起点与终点；①~⑦代表的不同颜色的方格表示 BFS 算法搜索的顺序；黑色矩形表示障碍物；红色粗实线为 BFS 算法规划的路径，黑色粗实线为改进的 BFS 算法规划的路径

In this figure, a and b are the starting and ending points of the traversal respectively; The squares with different colors represented by ①~⑦ represent the search order of BFS algorithm; The black rectangle represents the obstacle; The red solid line is the path planned by BFS algorithm, the black solid line is the path planned by the improved BFS algorithm

图 5 BFS 算法工作原理图

Fig. 5 Diagram of BFS algorithm working principle

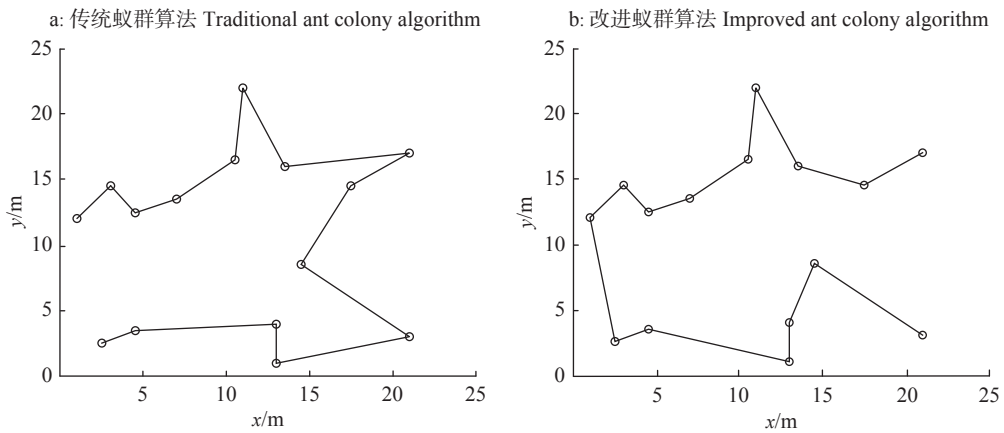


图 7 2 种算法的质点间路径遍历图

Fig. 7 The graph of path traversal among particles of two algorithms

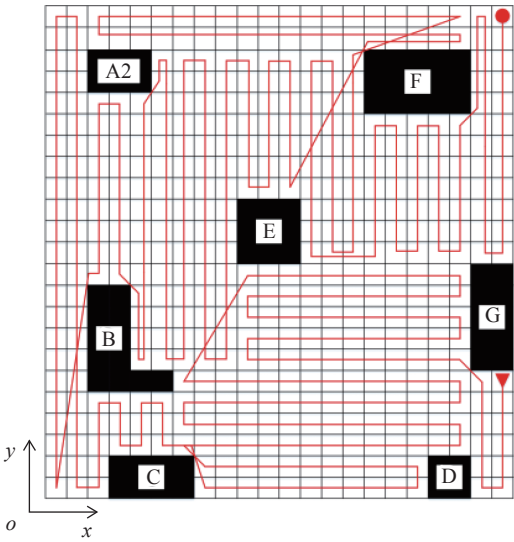
算法跳出局部最优解的能力。

4.2 机器人路径遍历仿真

为减少机器人的转弯次数，机器人在分区内遍历时沿矩形分区的长边作往返式遍历。通过传统蚁群算法、改进的蚁群算法与传统 BFS 算法、改进的 BFS 算法 4 种算法之间两两搭配出 4 种路径遍历方式，统计农业机器人在 4 种路径遍历方法下的路径重复率。

由表 1 可知在质点间遍历顺序一致时，由改进的 BFS 算法统计出的路径重复率分别是传统 BFS 算法的 90% 和 80%，证明本文设置的路径简化方案有利于减少农业机器人工作时的路径重复率；在衔接路径方案一致时，质点间遍历距离越大路径重复率越高，由改进蚁群算法统计出的路径重复率分别是传统蚁群算法的 70% 与 62%，证明优化分区间的遍历顺序可降低农业机器人在农田中遍历的路径重复率；由改进的蚁群算法与改进的 BFS 算法规划的机器人遍历路径重复率是传统蚁群算法与 BFS 算法的 56%。

在矩形分区合并的基础上通过改进的蚁群算法与改进的 BFS 算法规划的遍历路线如图 8 所示，由图 8 可知，农业机器人能实现对农田工作区域 100% 的覆盖。



图中红色三角形与红色圆形分别表示整个遍历路径的起点与终点，红色线条为本文规划的遍历路径；A2、B、C、D、E、F 与 G 表示膨胀处理后的障碍物

In this figure, the red triangle and the red circle respectively represent the starting and ending points of the entire traversal path, the red line is the traversal route planned in this paper; A2, B, C, D, E, F and G represent obstacles after expansion treatment

图 8 机器人路径遍历图

Fig. 8 Robot path traversal diagram

表 1 4 种路径遍历方法下的农业机器人路径重复率
Table 1 The path repetition rate of agricultural robot under four path traversal methods

仿真试验算法 Simulation test algorithm	质点间遍历距离/m Ergodic distance between particles	重复率/% Repeatability	
		传统BFS算法 Traditional BFS algorithm	改进BFS算法 Improved BFS algorithm
传统蚁群算法 Traditional ant colony algorithm	73.82	19.60	17.73
改进蚁群算法 Improved ant colony algorithm	70.27	13.81	11.06

5 结论

针对传统蚁群算法收敛速度慢、易陷入局部最优的问题，通过建立多样性指数与引入粒子群算法的方式改进遗传算法的选择与交叉算子，并通过选择、交叉与变异操作建立改进的蚁群算法信息素更新方法。仿真结果表明，改进蚁群算法收敛时的迭

代次数与算法规划的路径长度较传统蚁群算法分别减少了 83.1% 与 4.8%。

针对农业机器人在复杂农田环境下的全区域覆盖问题, 通过改进的蚁群算法解决栅格分区中分区间的遍历顺序问题, 通过建立动态函数改进的 BFS 算法以此进行跨区域衔接路径规划。仿真结果表明, 在矩形分区环境建模的基础上通过改进的蚁群算法与改进的 BFS 算法相结合规划的遍历路径其路径重复率为 11.06%, 且可实现对农田区域 100% 的覆盖。

参考文献:

[1] LAN Y B, CHEN S D. Current status and trends of plant protection UAV and its spraying technology in China[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 1-9.

[2] PATHAK R, BARZIN R, BORA G C. Data-driven precision agricultural applications using field sensors and unmanned aerial vehicle (UAVs)[J]. International Journal of Precision Agricultural Aviation, 2018, 1(1): 19-23.

[3] 唐东林, 袁波, 胡琳, 等. 储罐探伤爬壁机器人全遍历路径规划方法[J]. 工程设计学报, 2018, 25(3): 253-261.

[4] 李伟莉, 赵东辉. 基于栅格法与神经元的机器人全区域覆盖算法[J]. 机械设计与制造, 2017(8): 232-234.

[5] CHOI Y H, LEE T K, BAEK S H, et al. Online complete coverage path planning for mobile robots based on linked spiral paths using constrained inverse distance transform[C]//Proceedings of IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Missouri, USA: IEEE, 2009: 5788-5793.

[6] KAPANOGLU M, OZKAN M, YAZICI A, et al. Pattern-based genetic algorithm approach to overage path planning for mobile robots[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

[7] 李楷, 陈永府, 金志勇, 等. 基于回溯法的全覆盖路径规

划算法[J]. 计算机工程与科学, 2019, 41(7): 1227-1235.

[8] 曹翔, 俞阿龙. 移动机器人全覆盖信度函数路径规划算法[J]. 智能系统学报, 2018, 13(2): 314-321.

[9] 聂杨. 智能割草机器人的关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.

[10] 张堂凯. 已知环境下智能清洁机器人路径规划研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2017.

[11] 谭阳. 求解广义旅行商问题的若干进化算法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.

[12] 马慧茹, 赵峰, 贾利民, 等. 基于随机机会约束规划模型的旅行商问题及其求解算法[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(S1): 179-183.

[13] 陈志, 韩兴国. 改进蚁群算法在移动机器人路径规划上的应用[J]. 计算机工程与设计, 2020, 41(8): 2388-2395.

[14] 周兰凤, 杨丽娜, 方华. 基于蚁群算法的滑移预测路径规划研究[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2020(4): 72-78.

[15] 王槐彬, 彭雪, 周诗源, 等. 机器人导航路径的动态分级蚁群算法规划策略[J]. 机械设计与制造, 2020(6): 95-99.

[16] YANG D D, JIAO L C, NIU R C, et al. Investigation of combinational clustering indices in artificial immune multi-objective clustering[J]. Computational Intelligence, 2014, 30(1): 115-144.

[17] SAHIN O, AKAY B. Comparisons of metaheuristic algorithms and fitness functions on software test data generation[J]. Applied Soft Computing, 2016, 49: 1202-1214.

[18] TIAN T, GONG D W. Test data generation for path coverage of message-passing parallel programs based on co-evolutionary genetic algorithms[J]. Automated Software Engineering, 2016, 23(3): 469-500.

[19] 彭紫微. 面向多种体系结构的 BFS 算法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2018.

【责任编辑 霍 欢】