

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902697

# 改进变步长蚁群算法的移动机器人路径规划\*

李志锟<sup>1,2</sup> 黄宜庆<sup>1,2</sup> 徐玉琼<sup>1,2</sup>

(1. 安徽工程大学 电气工程学院 芜湖 241000; 2. 高端装备先进感知与智能控制教育部重点实验室 芜湖 241000)

**摘要:**针对移动机器人在蚁群算法路径规划中存在陷入局部收敛且无法做到路径最优的问题,提出了改进变步长蚁群算法,使其能够在收敛迭代次数较少的情况下做到路径最优。针对蚁群算法应用在路径规划中的相关特性,优化信息素分配,降低局部信息素含量对算法的影响,避免蚁群在搜索路径时陷入局部最优,在转移概率公式中增加权重因子,提高移动机器人朝着终点方向移动的概率,有效减少蚁群收敛迭代次数,改变移动机器人移动步长,使其能在360°内自由无碰撞移动,有效缩短路径长度。仿真结果表明,在简单环境下,改进变步长蚁群算法的收敛迭代次数及最优路径长度分别为2次及28.042 m,传统蚁群算法的收敛迭代次数及最优路径长度分别为25次及29.213 m;在复杂环境下,改进变步长蚁群算法的收敛迭代次数及最优路径长度分别为2次及43.960 2 m,改进势场蚁群算法的收敛迭代次数及最优路径长度分别为16次及45.112 7 m。仿真结果验证了改进变步长蚁群算法的有效性和优越性。

**关键词:** 变步长; 蚁群算法; 信息素; 路径规划

**中图分类号:** TP242.6      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Path planning of mobile robot based on improved variable step size ant colony algorithm

Li Zhikun<sup>1,2</sup> Huang Yiqing<sup>1,2</sup> Xu Yuqiong<sup>1,2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Anhui University of Engineering, Wuhu 241000, China;

2. Provincial Key Laboratory of Detection Technology and Energy Saving Devices, Wuhu 241000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that mobile robots fall into local convergence and cannot achieve the optimal path in the path planning of ant colony algorithm, this paper proposes an improved variable-step ant colony algorithm to enable it to achieve the path with fewer convergence iterations optimal. According to the relevant characteristics of ant colony algorithm that applied in path planning, it optimizes the allocation of pheromone, reduces the impact of local pheromone content on the algorithm, avoids the ant colony from falling into the local optimum when searching the path, adds the weighting factor in the transition probability formula and increases the probability of the mobile robot moving in the direction of the end point, it effectively reduces the number of ant colony convergence iterations, changes the mobile robot's moving step length, enables it to move freely and without collision within 360°, and effectively shortens the path length. The simulation results show that: in the simple environment, the convergent iteration times and the optimal path length of the improved variable step ant colony algorithm are 2 times and 28.042 m respectively, while the convergent iteration times and the optimal path length of the traditional ant colony algorithm are 25 times and 29.213 m respectively. In the complex environment, the convergence iteration times and the optimal path length of the improved variable step ant colony algorithm are 2 times and 43.960 2 m respectively, and the convergence iteration times and the optimal path length of the improved potential field ant colony algorithm are 16 times and 45.112 7 m respectively. The simulation results demonstrate the effectiveness and superiority of the improved variable step ant colony algorithm.

**Keywords:** variable step size; ant colony algorithm; pheromone; path planning

收稿日期:2020-10-24      Received Date: 2020-10-24

\* 基金项目:国家自然科学基金(61572032)、安徽省高校自然科学研究重点项目(KJ2018A0110)、安徽工程大学研究生教育创新基金、安徽工程大学中青年拔尖人才项目(2016BJRC004)资助

## 0 引言

路径规划一直是移动机器人领域研究的关键技术之一,其研究目的主要是移动机器人在给定环境中,找到一条从起始点到终点的最优安全无碰撞路径,路径最优评估主要表现在路径的长度、算法收敛的快慢、机器人与障碍物的安全距离等方面。关于移动机器人的路径规划常用方法有人工势场法<sup>[1]</sup>、粒子群算法<sup>[2]</sup>、A\*算法<sup>[3]</sup>、遗传算法<sup>[4]</sup>、蚁群算法<sup>[5-7]</sup>等群智能优化算法。然而现有的这些算法在移动机器人移动方向局限于可进行的 8 个邻域移动,即移动机器人每一步仅仅可移动到下一个相邻的栅格,但是在移动机器人的实际路径规划中存在严重问题,因为移动机器人在复杂环境下搜索应满足 360° 方向可移动,而不应局限于 8 个方向移动,这样搜索的路径才有可能最优。

蚁群算法应用于路径规划中具有很强的鲁棒性,能够迅速的搜索出较短路径,同时也存在着局部收敛和早熟现象以及路径长度无法做到最短。为解决以上问题,文献[8]提出了移动机器人的二次路径规划及改变移动机器人的爬行步长,减少移动机器人转弯次数,提高了移动机器人的搜索效率,但是未能做到路径最短。文献[9]提出了改进势场蚁群算法,融合人工势场法对蚁群算法进行改进,改进信息素更新方式,相较于传统蚁群算法,该算法在移动机器人规划出的路径长度及收敛速度均有所提高,但是移动机器人仅能往相邻栅格移动,不能做到路径最短,且收敛迭代次数过高。文献[10]设计了多启发因素改进蚁群算法,利用非均匀初始信息素加快算法收敛,但收敛次数依然过高,不利于移动机器人在复杂环境下进行路径寻优。

为避免蚁群算法容易局部收敛,同时能实现最短路径,本文提出一种自适应步长的方法。该算法对传统蚁群算法进行改进,利用障碍物与障碍物之间的结点,自适应的调整步长,保证路径做到平滑的同时避免死锁现象<sup>[11-13]</sup>,在移动机器人转移概率公式中加入权重因子,有效提高算法收敛速度,改进信息素分配方式,优化最短路径信息素<sup>[14-16]</sup>,避免算法初期存在的移动机器人搜索能力弱的问题,在实现最短路径的同时也使得算法收敛迭代次数尽量少。

## 1 传统蚁群算法

### 1.1 算法描述

蚁群算法是利用蚂蚁觅食的行为特点而设计的一种群智能算法,蚂蚁在觅食过程中会根据路程的长度不同分泌不同量的信息素,从起点到终点的路径越短,蚂蚁分

泌的信息素就越多,蚂蚁选择这条路径的概率就越大,从而构成了一个正反馈过程,经过迭代,蚂蚁逐渐地找到较短路径。

### 1.2 栅格环境

合理的地图环境有利于建立路径规划方法及设计搜索算法,本文采用栅格法来表示地图环境,如图 1 所示。阴影部分代表障碍物栅格,移动机器人不得碰撞及通过,在栅格数组中用 0 来表示,白色部分代表自由栅格,机器人可以自由通过,在栅格数组中用 1 来表示<sup>[17-19]</sup>。

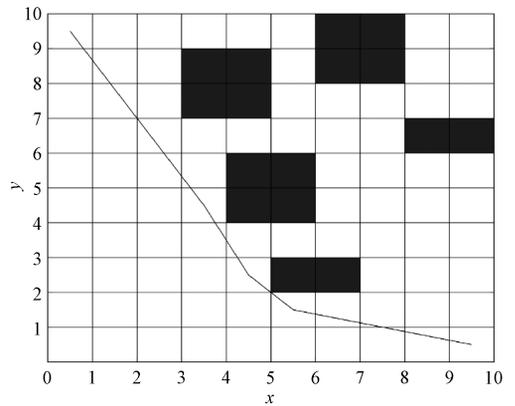


图 1 改进自适应步长路径轨迹

Fig. 1 Improved adaptive step path trajectory

假设栅格地图尺寸为 $(l \times h)$ ,起始点坐标为 $(0.5, b)$ ,终点坐标为 $(c, 0.5)$ ,其中:

$$\begin{cases} b = h - 0.5 \\ c = l - 0.5 \end{cases} \quad (1)$$

每个栅格的边长为 1 m,本文分别在简单栅格和复杂栅格环境下进行仿真模拟,其中简单栅格尺寸为边长 20 m 的正方形,复杂栅格尺寸为边长 30 m 的正方形。假设移动机器人当前所在位置坐标为 $(x, y)$ ,则根据栅格属性对每个坐标取值如下:

$$f(x, y) = \begin{cases} 0, \text{自由栅格} \\ 1, \text{障碍物栅格} \end{cases} \quad (2)$$

### 1.3 状态转移概率

根据每个节点之间的信息素浓度以及当前节点与下一节点之间的直接距离,蚂蚁从当前节点 $i$ 的坐标 $(x, y)$ 到下一个节点 $j$ 的坐标 $(r, s)$ 转移概率公式为:

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \{N - tabu_k\}} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, j \in \{N - tabu_k\} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $i$ 为蚂蚁当前位置编号; $j$ 为蚂蚁下一个将要到达的位置编号; $\alpha$ 表征信息素重要程度的参数; $\beta$ 表征启发式

因子重要程度的参数;  $\{N-tabu_k\}$  表示蚂蚁下一步将到达位置的集合;  $\tau_{ij}$  为路径  $(i,j)$  上的信息素浓度;  $\eta_{ij}$  为启发式函数, 是当前节点到终点之间的距离的倒数值, 如式(4)所示。

$$\eta_{ij} = \frac{1}{\sqrt{(x-r)^2 + (y-s)^2}} \quad (4)$$

### 1.4 信息素更新

先在每一个可行路径上设定信息素的初始值<sup>[20]</sup>, 当所有蚂蚁完成一次迭代后, 按式(5)和(6)对信息素进行相应的增加和挥发。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (5)$$

$$\Delta\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{蚂蚁 } k \text{ 经过路径 } (i,j) \\ 0, & \text{蚂蚁 } k \text{ 不经过路径 } (i,j) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  是信息素的挥发系数;  $\Delta\tau_{ij}$  是蚂蚁迭代一次后在路径  $(i,j)$  上新增的信息素;  $Q$  为信息素增加强度系数;  $L_k$  为第  $k$  只达到终点的蚂蚁走过的路径总长度。

## 2 改进蚁群算法的路径规划

### 2.1 改进转移概率公式

为了提高算法的全局搜索能力, 增加移动机器人选择距离终点更近的节点的概率, 引入一个诱导因子  $\delta$ , 提高算法的收敛速度, 改进后的转移概率公式如下:

$$p_{ij}^k = \begin{cases} \delta \cdot \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \in \{N-tabu_k\}} [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}, & j \in \{N-tabu_k\} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{d_{iz} \cdot d_{ij}}{(d_{ij} + d_{iz})^2} \quad (8)$$

$$d_{iz} = \sqrt{(x-c)^2 + (y-0.5)^2} \quad (9)$$

式中:  $d_{iz}$  表征节点  $i$  到终点的距离;  $d_{ij}$  表征节点  $i$  到下一个到达的节点  $j$  之间的距离。当节点  $j$  越接近于当前节点  $i$  与终点之间连接的直线且靠近终点, 此时  $\delta$  的取值将增大, 提高被选择的概率, 从而提高收敛速度。

### 2.2 改进信息素更新方式

为降低信息素浓度对实验结果的影响, 将信息素浓度限制在  $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$ , 当所有蚂蚁完成一次迭代后, 删掉没有达到终点的蚂蚁爬行路径, 将每只蚂蚁的有效爬行路径按照从小到大的顺序排列,  $L^1(t) \leq L^2(t) \leq \dots \leq L^m(t)$ , 根据路径长度给予不同的权重, 路径长度越短则权重越大, 全局最优解的权重为  $w$ , 第  $r$  个最优解的权重为  $\max\{0, w-r\}$ , 则改进后的全局信息素更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \sum_{r=1}^{w-r} (w-r) \cdot \Delta\tau_{ij}^r(t) + w \cdot \Delta\tau_{ij}^{gb}(t), \rho \in (0,1) \quad (10)$$

$$\Delta\tau_{ij}^r(t) = \frac{1}{L^r(t)} \quad (11)$$

$$\Delta\tau_{ij}^{gb}(t) = \frac{1}{L^{gb}} \quad (12)$$

$$\tau_{ij}(t) = \begin{cases} \tau_{\min}, & \tau_{ij} \leq \tau_{\min} \\ \tau_{\max}, & \tau_{ij} \geq \tau_{\max} \end{cases} \quad (13)$$

改进后的局部信息素更新公式如下:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \xi\tau_0 \quad (14)$$

式中:  $\xi$  和  $\tau_0$  是两个参数,  $\xi \in (0,1)$ ,  $\tau_0$  是信息素浓度的初始值;  $\rho$  是信息素挥发程度, 在迭代过程中, 信息素不断向最优路径方向增加, 提高算法收敛速度。

### 2.3 改进自适应变步长

传统蚁群算法采用单步长移动方式, 每一步只能向相邻栅格移动, 移动距离为:

$$\Gamma(i,j) = \begin{cases} 1, & |r-x| + |s-y| = 1 \\ \sqrt{2}, & |r-x| + |s-y| = 2 \end{cases} \quad (15)$$

这种单步长移动方式将会导致收敛速度慢且产生多余的折线导致路径增长, 本文采用改进的自适应变步长方式, 蚂蚁每一步移动不仅可以选择相邻栅格而且可以选择其他栅格, 大大提高算法收敛速度同时缩短路径长度。

两点之间直线最短, 蚂蚁从起始点到终点的最短长度为两点之间的连线长度, 找出此线段所经过的及与此线段相邻的所有块状障碍物, 环绕块状障碍物的空白栅格将是移动机器人优先选择到达的节点, 移动机器人将会根据改进的状态转移概率公式自适应的选择合适的步长, 不再固定的选择与当前栅格相邻的栅格, 有效缩短移动机器人爬行路径长度, 提高收敛速度, 如图1所示, 移动机器人所选择的节点为起始点到终点连线所经过障碍物及连线相邻障碍物四周环绕的空白栅格, 减少移动机器人爬行路径长度。

## 3 改进算法流程

### 3.1 改进算法步骤

本文改进的变步长蚁群算法的移动机器人路径规划步骤如下。

1) 利用栅格法对移动机器人运行环境建模, 初始化相关参数。

2) 建立邻接矩阵, 利用改进变步长蚁群算法, 找出蚂蚁在任何一个位置可到达下一个位置的集合, 并对邻接矩阵初始化。

- 3) 设置起始点及终点坐标,并建立启发式信息矩阵。
- 4) 对路线以及禁忌表等相关参数进行初始化。
- 5) 计算蚂蚁当前节点到下一节点的爬行概率,建立概率分布,利用式(7)选择下一个节点。
- 6) 根据式(14)进行局部信息素更新。
- 7) 对路径长度以及禁忌表等相关参数进行更新。
- 8) 按照路径长度的不同,分配不同的信息素浓度,限定信息素上下限,根据式(10)进行全局信息素更新。
- 9) 找出每一代最短路径,进行比较,将最短路径作为全局最优路径进行输出。

本文改进的变步长蚁群算法流程如图 2 所示。

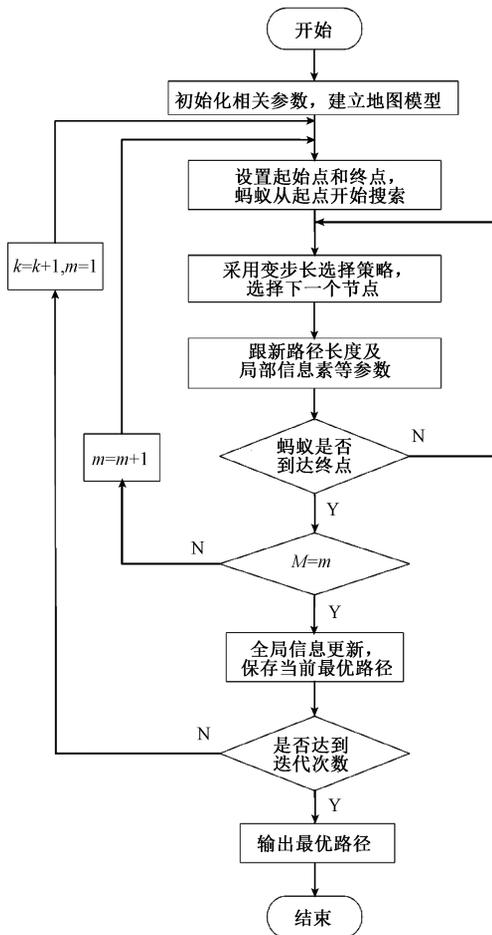


图 2 改进变步长蚁群算法流程

Fig. 2 Improved flow chart of variable step size ant colony algorithms

### 3.2 改进算法伪代码

算法参数初始化,将  $m$  只蚂蚁放置在起点  $S$  处;  
 for  $k=1$  to  $K$   
 for  $m=1$  to  $M$   
 Initialization taboo table;  
 Initialize the adjacency matrix;

Crawl route initialization;  
 State initialization;  
 Move the starting point  $S$  into the taboo table;  
 Determine whether the candidate node of ant  $m$  is in the taboo table;  
 while (The candidate node exists && ant does not reach the target point  $Z$ )  
 Perform correlation calculations to establish probability distributions  
 Select the next node according to equation (7)  
 Status updates and related record updates;  
 end  
 Local pheromone update according to equation (14);  
 end  
 Perform all pheromone updates according to equation (10);  
 end

## 4 算法仿真对比

为验证所述改进变步长蚁群算法的有效性,在 MATLAB R2018a 中进行仿真实验,计算机操作系统为 Windows 10 64 位,CPU 为 i3-3227U,主频 1.9 GHz,内存 6 G,仿真环境分为简单环境和复杂环境两种。

蚁群算法中,影响性能的参数主要有 4 个:表征信息素重要程度的参数  $\alpha$ ,表征启发式因子重要程度参数  $\beta$ ,信息素蒸发系数  $\rho$ ,信息素增加强度系数  $Q$ ,经过多次实验,本文选取  $\alpha=0.747, \beta=0.747, \rho=0.3, Q=1$ ,设定每个小栅格尺寸为  $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 。

### 4.1 简单环境仿真实验

在简单环境为  $20\text{ m} \times 20\text{ m}$  的栅格模型下进行本文改进算法和传统算法路径规划仿真实验,移动机器人在传统蚁群算法中爬行路径如图 3 所示,路径长度为  $29.213\text{ m}$ ,爬行方式为单步长爬行,路径稍长。移动机器人在本文改进算法中爬行路径如图 4 所示,路径长度为  $28.042\text{ m}$ ,爬行方式为变步长方式,相比较传统蚁群算法,本文改进算法找出的最优路径要短于传统蚁群算法。移动机器人在传统蚁群算法中收敛迭代曲线如图 5 所示,迭代次数为 25 次,显然,传统蚁群算法在迭代初期路径长度十分不稳定。移动机器人在本文改进算法中收敛迭代曲线如图 6 所示,迭代次数为 2 次,即移动机器人收敛 2 次就已经达到稳定状态,较传统蚁群算法,本文改进算法在收敛速度上大幅度提升。实验数据如表 1 所示,本文算法优势明显。

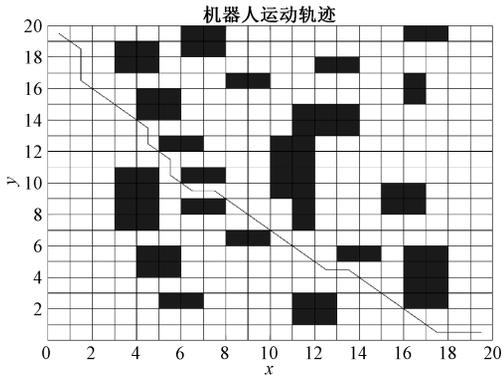


图 3 传统蚁群算法路径规划

Fig. 3 Path planning of traditional ant colony algorithm

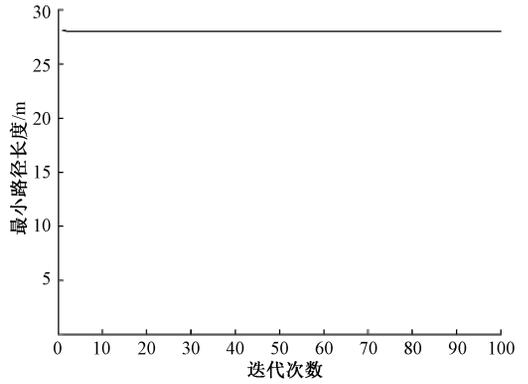


图 6 改进蚁群算法收敛曲线

Fig. 6 Improved ant colony algorithm convergence curve

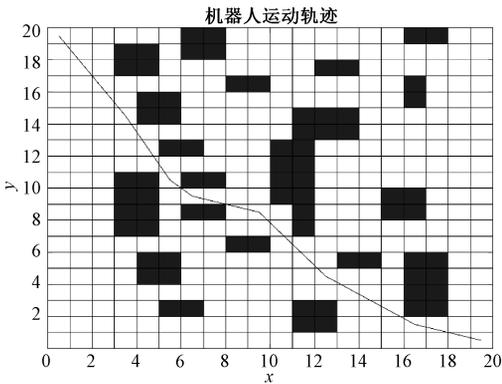


图 4 改进蚁群算法路径规划

Fig. 4 Improved ant colony algorithm for path planning

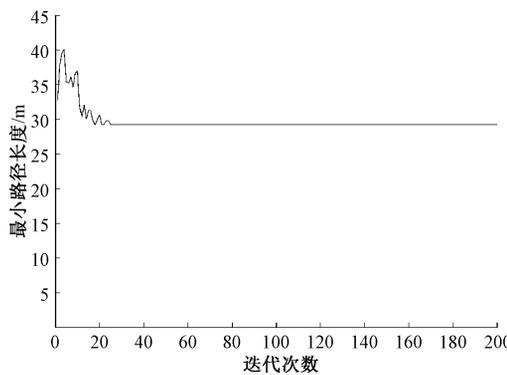


图 5 传统蚁群算法收敛曲线

Fig. 5 Convergence curve of traditional ant colony algorithm

表 1 简易环境下算法比较

Table 1 Comparisons of algorithms in simple environment

算法	最优路径长度/m	收敛迭代次数
传统蚁群算法	29.213	25
改进变步长蚁群算法	28.042	2

### 4.2 复杂环境仿真实验

为了进一步验证算法的可靠性,使用 30 m×30 m 规模复杂环境进行仿真实验,栅格地图与文献[8-9]一致。相比于文献[9-8]算法,本文改进算法在路径长度分别减少 2.6%及 0.007%,收敛迭代次数分别减少了 87.5%、66.7%。实验结果表明,在复杂环境下,本文改进算法依然具有较快的最优路径搜索能力,在算法收敛速度上,大大优于另外两种算法,有效的缩短了移动机器人收敛迭代次数。改进蚁群算法路径规划如图 7 所示,收敛曲线如图 8 所示,实验数据如表 2 所示。

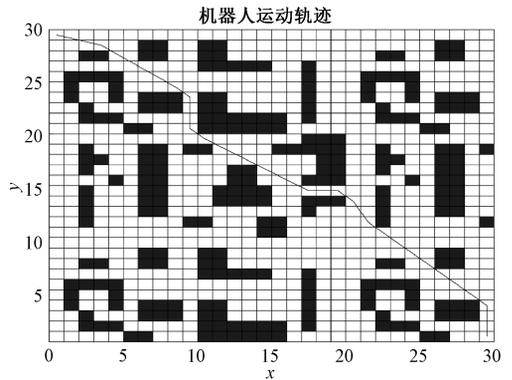


图 7 改进蚁群算法路径规划

Fig. 7 Improved ant colony algorithm for path planning

表 2 复杂环境下算法比较

Table 2 Comparisons of algorithms in complex environments

算法	最优路径长度/m	收敛迭代次数
文献[9]算法	45.112 7	16
文献[8]算法	43.963 4	6
改进变步长蚁群算法	43.960 2	2

## 5 结论

本文针对传统蚁群算法在路径规划上的不足,提出

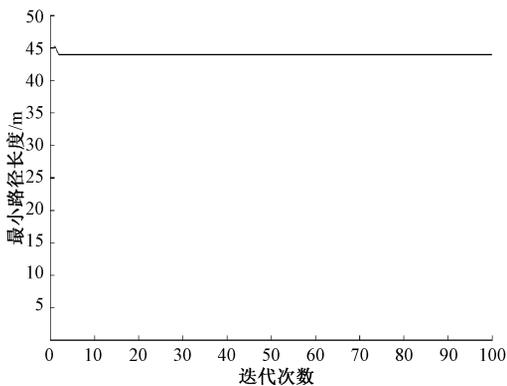


图 8 改进蚁群算法收敛曲线

Fig. 8 Improved ant colony algorithm convergence curve

了改进步长的蚁群算法。该算法根据每一次迭代的最优路径排序,重新分配信息素并设定信息素的上下限,降低信息素浓度对最优路径的影响。在状态转移概率公式中引入诱导因子,引导移动机器人朝着终点方向移动,提高移动机器人收敛迭代次数。在考虑到移动机器人的实际应用,将移动机器人移动方向调整为 $360^\circ$ 方向内任意无碰撞移动,移动机器人将根据障碍物的环绕节点,自适应的调整步长,大幅度降低最优路径长度。一方面,改善了移动机器人因步长影响搜索范围,另一方面,扩大移动机器人的搜索活动域。结果表明,本文算法的收敛迭代次数最少,最优路径长度最短,全局寻优能力最强。

### 参考文献

- [ 1 ] 陈余庆,李桐训,于双和,等. 基于势场蚁群算法的机器人全局路径规划[J]. 大连理工大学学报,2019,59(3):316-322.  
CHEN Y Q, LI T X, YU SH H, et al. Global path planning of robots based on potential field ant colony algorithm [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2019,59(3):316-322.
- [ 2 ] 杨超杰,裴以建,刘朋. 改进粒子群算法的三维空间路径规划研究[J]. 计算机工程与应用,2019,55(11):117-122.  
YANG CH J, PEI Y J, LIU P. Research on three-dimensional space path planning based on improved particle swarm optimization algorithm [J]. Computer Engineering and Applications, 2019,55(11):117-122.
- [ 3 ] 曹其新,黄先群,朱笑笑,等. 基于保留区域的分布式多机器人路径规划[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2018,46(12):71-76.  
CAO Q X, HUANG X Q, ZHU X X, et al. Distributed multi-robot path planning based on reserved area [J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, (Natural Science Edition), 2018,46(12):71-76.
- [ 4 ] 余文翌,余航宇,欧阳子路. 基于弹性网格的改进遗传算法在无人艇路径规划中的研究[J]. 中国航海,2018,41(4):101-105.  
YU W ZH, SHE H Y, OUYANG Z L. Path planning of unmanned surface vehicle based on variable mesh improved genetic algorithm [J]. Navigation of China, 2018,41(4):101-105.
- [ 5 ] JIAO Z Q, MA K, RONG Y L, et al. A path planning method using adaptive polymorphic ant colony algorithm for smart wheelchairs [J]. Journal of Computational Science, 2018,25(1):50-57.
- [ 6 ] 袁帅,邢景怡,尧晓,等. 基于概率分布区间的纳米操作机器人路径规划[J]. 控制理论与应用,2019,36(1):129-142.  
YUAN SH, XING J Y, YAO X, et al. Trajectory planning of nano-manipulation robot based on the probabilistic distribution region [J]. Control Theory & Applications, 2019,36(1):129-142.
- [ 7 ] NING J X, ZHANG Q, ZHANG CH SH, et al. A best-path-updating information-guided ant colony optimization algorithm [J]. Information Sciences, 2018,433-434(1):142-162.
- [ 8 ] 江明,王飞,葛愿,孙龙龙. 基于改进蚁群算法的移动机器人路径规划研究[J]. 仪器仪表学报,2019,40(2):113-121.  
JIANG M, WANG F, GE Y, et al. Research on path planning of mobile robot based on improved ant colony algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2019,40(2):113-121.
- [ 9 ] 王晓燕,杨乐,张宇,等. 基于改进势场蚁群算法的机器人路径规划[J]. 控制与决策,2018,33(10):1775-1781.  
WANG X Y, YANG L, ZHANG Y, et al. Robot path planning based on improved ant colony algorithm with potential field heuristic [J]. Control and Decision, 2018,33(10):1775-1781.
- [ 10 ] 李理,李鸿,单宁波. 多启发因素改进蚁群算法的路径规划[J]. 计算机工程与应用,2019,55(5):219-225,250.  
LI L, LI H, SHAN N B. Path planning based on improved ant colony algorithm with multiple inspired factor [J]. Computer Engineering and Applications, 2019,55(5):219-225,250.
- [ 11 ] 夏清松,唐秋华,张利平. 多仓储机器人协同路径规划与作业避碰[J]. 信息与控制,2019,48(1):22-28,34.  
XIA Q S, TANG Q H, ZHANG L P. Cooperative path planning and operation collision avoidance for multiple

- storage robots [J]. Information and Control, 2019, 48(1):22-28,34.
- [12] 裴振兵,陈雪波.改进蚁群算法及其在机器人避障中的应用[J].智能系统学报,2015,10(1):90-96.  
PEI ZH B, CHEN X B. Improved ant colony algorithm and its application in obstacle avoidance for robot[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2015, 10(1): 90-96.
- [13] LI Y B, SOLEIMANI H, ZOHAL M. An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 227 (1): 1161-1172.
- [14] WANG Z Q, ZHU X G, HAN Q Y. Mobile robot path planning based on parameter optimization ant colony algorithm [J]. Procedia Engineering, 2011, 15 (1): 2738-2741.
- [15] ZHONG Z S. Ant colony algorithm based on path planning for mobile agent migration [J]. Procedia Engineering, 2011,23(1):1-8.
- [16] LIU M, ZHANG F, MA Y L, et al, Evacuation path optimization based on quantum ant colony algorithm[J]. Advanced Engineering Informatics, 2016, 30 (3): 259-267.
- [17] 朱艳,游晓明,刘升,等.基于改进蚁群算法的机器人路径规划问题研究[J].计算机工程与应用,2018, 54(19):129-134.  
ZHU Y, YOU X M, LIU SH, et al. Research for robot path planning problem based on improved Ant Colony System(ACS) algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(19):129-134.
- [18] 黄辰,费继友,刘洋,等.基于动态反馈A\*蚁群算法的平滑路径规划方法[J].农业机械学报,2017, 48(4):34-40,102.  
HUANG CH, FEI J Y, LIU Y, et al. Smooth path planning method based on dynamic feedback A\* ant colony algorithm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4):34-40,102.
- [19] 徐玉琼,娄柯,李婷婷,等.改进自适应蚁群算法的移动机器人路径规划[J].电子测量与仪器学报,2019, 33(10):89-95.  
XU Y Q, LOU K, LI T T, et al. Path planning of mobile robot based on improved adaptive ant colony algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2019,33(10):89-95.
- [20] 张成,凌有铸,陈孟元.改进蚁群算法求解移动机器人路径规划[J].电子测量与仪器学报,2016,30(11):1758-1764.  
ZHANG CH, LING Y ZH, CHENG M Y. Path planning of mobile robot based on an improved ant colony algorithm[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016,30(11):1758-1764.

### 作者简介



**李志锟**,2012年毕业于荆楚理工学院,现为安徽工程大学硕士研究生,主要研究方向为移动机器人路径规划及智能算法。

E-mail: lzk52170@163.com

**Li Zhikun** graduated from Jingchu Institute of Technology in 2012. Now he is a M. Sc. candidate at Anhui Polytechnic University. His main research interest is Path planning of mobile robot and intelligent algorithm.



**黄宜庆**,2012年于东南大学获得博士学位,现为安徽工程大学副教授,主要研究方向为机器人与飞行器控制、移动机器人与路径规划。

E-mail: yiqhuang@ahpu.edu.cn

**Huang Yiqing** received his Ph. D. degree from Southeast University in 2012. Now he is an associate professor at Anhui Polytechnic University. His main research interests include robot and aircraft control, mobile robot and path planning.



**徐玉琼**,2016年于佛山科学技术学院获得学士学位,现为安徽工程大学硕士研究生,主要研究方向为机器视觉及图像处理。

E-mail: xuyuqiong0104@163.com

**Xu Yuqiong** received her B. Sc. degree from Foshan University in 2016. Now she is a M. Sc. candidate at Anhui Polytechnic University. Her main research interests include Machine Vision and Image Processing.