

1963年创刊

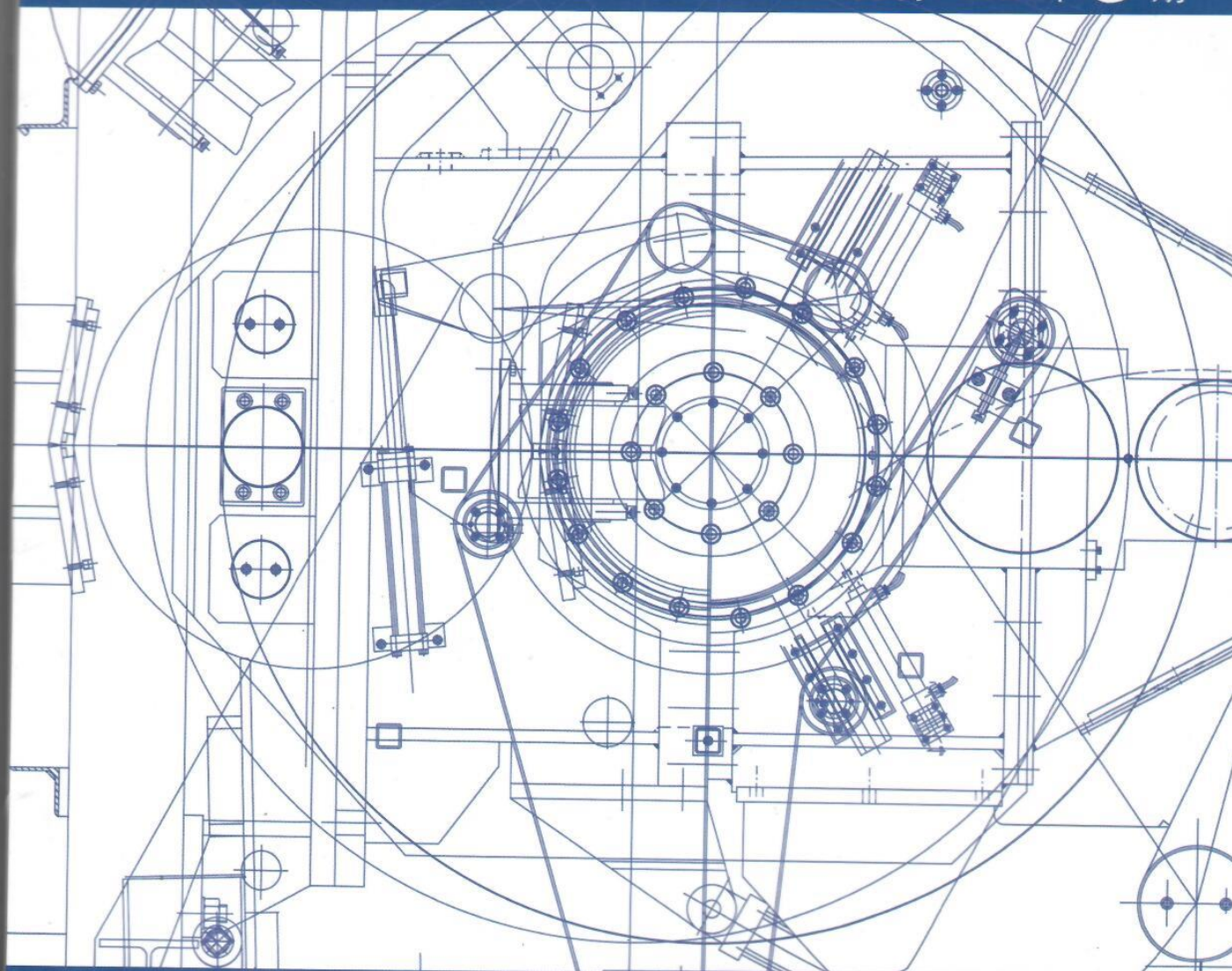
中文核心期刊

中国科技核心期刊

ISSN 1001-3997  
CN21-1140/TH



月刊 / 2021年 6 期



# 机械设计与制造<sup>®</sup>

MACHINERY DESIGN & MANUFACTURE JIXIE SHEJI YU ZHIZAO

ISSN 1001-3997



9 771001 399219

- 一种自标定的港口起重机械摄影测量方法
- 三元锂电池模块热仿真风冷优化设计
- 电控悬架用可变阻尼减振器动态特性研究
- 双丝电弧焊熔滴过渡形式对熔池影响模拟研究
- 弯曲摆动无阀式压电泵理论分析与模拟
- 高速铣削高强度钢切削力分形特征的研究
- 磁流变液阻尼托辊的设计与优化
- 可穿戴式脊柱仿生助力产品设计研究

尊敬的广大  
2021年  
工作, 现将  
本刊为  
各大院校和

订阅通道

通讯地址: 沈阳  
户名: 《机械  
开户行: 交通  
帐号: 2111  
邮编: 1100

### 数控与自动化

- 人工势场引导蚁群算法的机器人导航路径规划 .....董炫良, 赵桂清(169)
- 静电涂装的影响因素与 FLUENT 仿真 .....王战中, 杨晨霞, 张保真, 张明亮(174)
- 机器视觉在喷胶轨迹自动生成中的应用研究 .....周京博, 陈涛, 李玥华, 黄凤山(178)
- 多视角的特征关联模块划分方法 .....肖艳秋, 杨先起, 焦建强, 周坤(182)
- 蜂群算法的改进及在热膨胀系数优化上的应用 .....片锦香, 王国辉(187)
- 除锈爬壁机器人位姿分析与纠偏技术 .....孙立新, 孙志龙, 陈帮, 王伟(193)
- 染色体重组蚁群算法的机器人导航路径规划 .....毕桂(197)
- 绳驱动接地线高空拆装装置的设计与轻量化 .....王峰, 周权, 张月金, 夏义军(202)
- UBC 大数据在 PVC 涂胶膜检测技术中的应用 .....任双超, 赵时璐, 张震, 彭林志(206)
- 基于 Simulink 和 TruckSim 矿用汽车动力性换挡规律特性分析 .....赵晓宛, 李国良, 陈子谋(210)

### 数字化设计与制造

- 增强现实环境下汽车后桥虚拟拆卸系统的设计 .....徐动力, 牛强强, 陈春晓(215)
- 基于有向包围盒的三维 CAD 模型局部特征重用 .....郭艳, 华顺刚(219)
- 应用于油罐内机械臂作业的点云法矢计算算法 .....程健勇, 吴功平, 樊飞, 解建忠(222)
- 三维工艺设计中的制造特征识别方法 .....黄丰云, 刘小磊, 徐动力, 刘伟腾(228)
- 一种数控机床刀具三维轨迹数据压缩方法 .....曹晶晶, 盛步云, 张燕强, 金超(232)
- 山地鱼腥草联合收获机挖掘机构设计及试验 .....殷彦强, 尹健, 罗雨戈, 张勇(236)
- 车辆发动机散热器冷却性能匹配性分析 .....张思杨, 郭献洲(240)
- 气浮转台转子结构参数对变形的影响研究及优化设计 .....杨康宁, 龚伟, 刘有海, 阳红(245)
- 基于定位平台的大尺寸工件视觉测量技术研究 .....马平, 欧建国, 张智阳(249)
- 高速列车蓄电池箱共振可靠性优化 .....李永华, 赵传福, 高月华, 张月(253)
- 基于 TRIZ 理论的自行车停车装置创新设计与试制 .....祝志芳, 袁新宾, 张志杰, 万超(258)
- 法兰定子超声电机的几何参数优化设计 .....胡稳, 董迎晖, 吕军(262)
- 基于多体动力学与颗粒动力学耦合的挖掘载荷计算与研究 .....贺朝霞, 马跃飞, 常乐浩, 任琛(266)

### 机器人

- 四分裂架空线路作业机器人行走姿态优化方法 .....朱家乐, 吴功平, 蔡相男, 袁鑫(270)
- 超声激励下的裂纹区域温度缺陷信号特征分析 .....刘海龙, 郑飞, 吴海波(274)
- 一种新型腿部机构自由度分析与驱动输入研究 .....于千源, 饶晓波, 李朋阳, 高建设(279)
- 多旋翼无人机自适应 DUKF 姿态估计算法 .....蔡安江, 刘凯峰, 刘立博, 程彦昭(284)
- Delta 快速分拣机器人轨迹优化算法研究 .....章鸿(288)
- 未知时变环境下机器人自校正阻抗控制研究 .....曾献文, 翟敬梅(291)
- 铺丝机器人振动特性分析及辅放工件位置优化 .....牛雪娟, 武金超(296)
- 新型下肢外骨骼机器人动力学仿真 .....邓斌, 赵英朋(300)

## 编委会

### 主任委员

闻邦椿 中国科学院院士  
东北大学教授

### 副主任委员

张义民 沈阳化工大学教授  
贾振元 大连理工大学教授

### 外籍副主任委员

Kornel Ehmann 美国西北  
Manufacturing Science and  
杂志主编(美)

宋斌 新加坡制造技术

### 编委委员(按姓氏汉语拼音)

黄树涛 沈阳理工大学教授  
兰凤崇 华南理工大学教授  
李理光 同济大学教授  
刘昕晖 吉林大学教授  
毛君 辽宁工程技术大学教授  
梅雪松 西安交通大学教授  
孙道恒 厦门大学教授  
宋锦春 东北大学教授  
史铁林 华中科技大学教授  
王世杰 沈阳工业大学教授  
王时龙 重庆大学教授  
王树新 天津大学教授  
王田苗 北京航空航天大学教授  
项昌乐 北京理工大学教授  
薛开 哈尔滨工程大学教授  
奚立峰 上海交通大学教授  
朱如鹏 南京航空航天大学教授  
赵永生 燕山大学教授  
朱真才 中国矿业大学教授

## 广告索引

### 彩色版

沈阳中泽智能装备有限公司  
辽宁省机械研究院有限公司  
沈阳智勤机器人系统工程

《机械设计与制造》2021年

20

《机械工

征订

尊敬的广大读者：  
2021年  
工作，现将具  
本刊为  
各大院校和个

订阅通道：

通讯地址：沈阳市  
户名：《机械工  
开户行：交通银  
帐号：21111  
邮编：11003

Design Research on Wearable Bionic Spine-Inspired Booster Products .....  
.....LIU Yue-lin, CHENG Qin-song, WANG Yun-fei(105)

Characteristics of Ultrasonic Vibration Machining System of Surface Micro-Pits with Load Modifying  
Frequency .....CHENG Zhi-jie, WANG Jian-qing, ZHU Xi-jing, ZHOU Wen-wen(111)

Numerical Simulation Study of Fluid Mixing Process in Straight-Blade Agitated Tank .....  
..... LIU Guo-ping, ZHENG Kun(115)

Establishment and Verification of Milling Residual Stress Model for Impeller Blade .....  
.....WANG Yan-zhong, ZHANG Ya-ping, WU Ze-gang, CHEN Yan-yan(118)

Design and Analysis of the Auxiliary Electrical System Controller of Vehicle Based on CAN Bus .....  
.....MING Xian-cheng, XU Bo(122)

Research and Analysis of a Portable Digging Machine .....  
.....YANG Yong, LIANG Shang-ming, HE Ya-bo(126)

Research on Optimizing Technological Parameters of Fused Deposition Rapid Prototyping .....  
.....ZHU Zheng-hong, WANG Heng(130)

Numerical Simulation of Protective Structure with Rubber/Steel Plate .....  
.....WU Wei-dong, QIE Yan-hui, CHENG Cong, WANG Yu(134)

Study on Microstructure and Mechanical Properties of Laser Welded Joint of 6mm Thick 304 Austenitic  
Stainless Steel .....CHEN Shu-qing, WEI Xin, ZHAO Jie-kui, WANG Hao(139)

Effect of Dry Milling on Surface Residual Stress of Hardened Steel .....  
.....TANG De-wen, HE Yu-hang, WANG Li-wei, TANG Hai-long(143)

The Grinding Algorithm for the Rake Face of the Arc Edge of the Integral End Mill .....  
.....ZHANG Xiao-ran, LUO Bin, CHEN Si-yuan, CHENG Xue-feng(147)

Research on On-Machine Measurement of Helix Angle of Integral End Mill .....  
.....ZHAO Rui, CHEN Si-yuan, JIANG Lei, MA Shu-wen(150)

Dynamic Characteristics Analysis of Transmission System in Scraper Based on AO VAT  
.....SUN Ze-min, Gou Zhi-jian(155)

Spraying Robot for Trunk Protection of Urban Greening Trunk Roads .....  
.....MA Jin-ru, XIE Bing, QI Yu-ming, SONG Pei-pei(160)

Solution of Inverse Kinematics for Robots Rooted in Cloud Model Genetic and Ant Colony Algorithm  
.....GU Jia-wei, WU Gong-ping, PENG Xiang-yang, WANG Rui(164)

NC & Automation

Robot Navigation Path Planning Based on Ant Colony Algorithm Guided by Artificial Potential Field  
.....DONG Xuan-liang, ZHAO Gui-qing(169)

Influencing Factors and FLUENT Simulation of Electrostatic Coating .....  
.....WANG Zhan-zhong, YANG Chen-xia, ZHANG Bao-zhen, ZHANG Ming-liang(174)

Application of Machine Vision in the Automatic Glue Spraying Path Generation .....  
.....ZHOU Jing-bo, CHEN Tao, LI Yue-hua, HUANG Feng-shan(178)

Module Partition Method of Multi-View Feature Correlation .....  
.....XIAO Yan-qiu, YANG Xian-chao, JIAO Jian-qiang, ZHOU Kun(182)

Improved Bee Colony Algorithm and Its Application in Optimization of Thermal Expansion Coefficient  
.....PIAN Jin-xiang, WANG Guo-hui(187)

Pose Analysis and Rectification Technology of Rust-Removing Wall-Climbing Robot .....  
.....SUN Li-xin, SUN Zhi-long, CHEN Bang, Wang Wei(193)

Robot Navigation Path Planning Based on Chromosome Recombination Fish Swarm Algorithm .....  
.....BI Gui(197)

Design and Lightweight of High Altitude Installation and Disassembly Device for Cable Driven Ground  
Wire .....WANG Feng, ZHOU Quan, ZHANG Yue-jin, XIA Yi-jun(202)

Editorial Co

The chairman of the co  
Wen Tang-chun

Academician of the Chinese  
Professor of Northeastern Un

Vice chairman of the co  
Zhang Yi-min

Shenyang University of Chem  
Jia Zhen-yuan

Professor of Dalian University

Foreign vice chairman

Kornel Ehmann

Professor of Northwestern Un  
Editor of *Manufacturing Scie*

Song Bin Professor of Sing  
Manufacturing Te

Committee

Huang Shu-tao Professor

Lan Feng-chong Professor

Li Li-guang Professor

Liu Xin-hui Professor

Mao Jun Professor

Mei Xue-song Professor

Sun Dao-heng Professor

Song Jin-chun Professor

Si Tie-lin Professor

Wang Shi-jie Professor

Wang Shi-long Professor

Wang Shu-xin Professor

Wang Tian-miao Professor

Xiang Chang-le Professor

Xue Kai Professor

Xi Li-feng Professor

Zhu Ru-peng Professor

Zhao Yong-sheng Professor

Zhu Zhen-cai Professor

# 人工势场引导蚁群算法的机器人导航路径规划

董炫良<sup>1</sup>, 赵桂清<sup>2</sup>

(1. 广东省海洋工程职业技术学校, 广东 广州 510320; 2. 聊城大学, 山东 聊城 252000)

**摘要:** 蚁群算法应用于路径规划时, 算法前期信息素分布均匀, 只依赖启发信息搜索最优路径, 因此存在盲目搜索和收敛慢的问题; 蚁群算法后期由于信息素的正反馈作用, 使蚁群算法陷入局部最优时无法跳出。为了解决这些问题, 提出了改进人工势场法引导蚁群算法的路径规划方法。介绍了栅格环境建模法; 以人工势场法为基础, 给出了路径中间点选择方法, 取消了障碍物斥力而只保留目标点引力, 在目标引力下实现路径规划; 以改进人工势场法规划路径启发蚁群算法, 减少前期路径规划盲目性, 实现加快收敛的目的; 改进信息素更新方法, 使信息素遗留因子随路径优劣自适应变化。由仿真结果可以看出, 相比于蚁群算法和文献<sup>[10]</sup>势场蚁群算法, 这里算法规划路径最短、平均迭代次数最少、算法平均耗时最少。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 改进人工势场法; 蚁群算法; 启发信息

**中图分类号:** TH16; TP242 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3997(2021)06-0169-05

## Robot Navigation Path Planning Based on Ant Colony Algorithm Guided by Artificial Potential Field

DONG Xuan-liang<sup>1</sup>, ZHAO Gui-qing<sup>2</sup>

(1. Guangdong Province Vocational School of Maritime Engineering, Guangdong Guangzhou 510320, China;

2. Liaocheng University, Shandong Liaocheng 252000, China)

**Abstract:** When ant colony algorithm is used to plan path, pheromone distribution is even in the early stage, and searching optimal path relies on just heuristic information, so that the problem of blind search and slow convergence exist. Because of pheromone positive feedback effect, ant colony algorithm cannot jump out of local optimization. To solve these problems, path planning method based on ant colony algorithm guided by improved artificial potential field is proposed. Environment modeling method by grid is introduced. On the basis of artificial potential field method, intermediate point choosing method is given. Obstacle repulsion is called off and target attraction is reserved, path is planned by target attraction. Ant colony algorithm enlightened by path planned by improved artificial potential field, blindness of path planning is reduced and convergency speed is accelerated. Heuristic information refreshing method is improved, which make pheromone legacy factor change with path quality adaptively. It can be seen from simulation result, compared with ant colony algorithm and potential ant colony algorithm in essay<sup>[10]</sup>, length of path planned by algorithm in this thesis is shortest, even iteration time is least, and even time-cost is also least.

**Key Words:** Mobile Robot; Path Planning; Improved Artificial Potential Field; Ant Colony Algorithm; Heuristic Information

## 1 引言

移动机器人可以代替人类进行劳动密集型、重复性高、危险性强的工作, 移动机器人导航是其他一切工作的基础, 一条好的导航路径不仅可以减少机器人转弯磨损, 而且可以提高整体工作效率, 因此导航路径规划对提高机器人使用寿命和工作效率意义重大。

移动机器人导航包括三个关键技术: (1) 环境建模; (2) 机器

人自主定位定向; (3) 最优路径规划。这里着重研究最优路径规划方面的问题, 路径规划方法可以分为传统算法和智能优化算法两类, 传统算法包括 Dijkstra 算法、A\* 算法、人工势场法等<sup>[1-2]</sup>, 智能优化算法包括蚁群算法、遗传算法、快速搜索随机树法、粒子群算法等。文献<sup>[3]</sup>以人工势场法为基础, 在斥力函数中引入机器人与目标相对距离的高斯函数, 确保机器人能够逃出局部极值, 且在目标点稳定; 文献<sup>[4]</sup>将粒子滤波器、A\* 算法与动态窗口法结合,

来稿日期: 2020-04-27

基金项目: 山东省高等学校科技计划项目(J15LN77)

作者简介: 董炫良, (1983-), 男, 广东茂名, 硕士研究生, 讲师, 主要研究方向: 工业机器人开发与应用、机电一体化研究;

赵桂清, (1977-), 女, 山东聊城人, 硕士研究生, 副教授, 主要研究方向: 控制理论与控制工程、计算机仿真

使机器人在自主定位和构建地图同时完成路径规划;文献<sup>[6]</sup>提出了改进蚁群-A\*算法,提高了路径规划效率和路径质量。以上方法在各自设定的性能指标下均取得了较好效果。

蚁群算法初期信息素分布均匀,算法主要依赖启发信息寻优,类似于贪婪算法,收敛速度慢且极易陷入局部最优;算法中后期随着算法运行,信息素的正反馈作用使算法陷入局部最优而无法跳出,因此提出使用改进人工势场法优化蚁群算法,最终使改进蚁群算法在路径规划中耗时少,且能够规划出最优路径。

## 2 栅格法简介

鉴于栅格法原理简单、易于实现,环境适用性极强<sup>[6]</sup>,使用栅格法将抽象的工作环境转化为机器人可以识别的0-1矩阵模型。具体方法为:使用一定大小的栅格划分工作空间,对于含有障碍物的栅格称为障碍物栅格,并将其赋值为1;对于不含障碍物的栅格称为自由栅格,并将其赋值为0,这样就将抽象的二维环境转化为机器可识别的0-1矩阵。

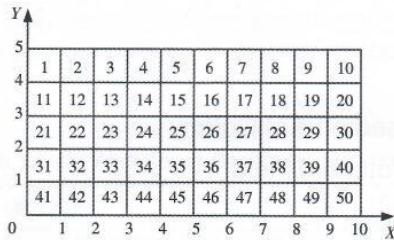


图1 栅格编码法

Fig.1 Grid Marking Method

为栅格赋不同的属性值是为了识别障碍物,而机器人路径规划与跟踪过程中需要区分不同栅格,因此还需要对栅格进行编码。栅格编码法包括坐标法和顺序编码法,顺序编码法如图1所示。路径表示时一般使用顺序码,而计算栅格距离时使用坐标法,因此必须给出两者间的转换关系:

$$\begin{cases} x_i = R_a [\text{mod}(i, N_x) - R_a / 2] \\ y_i = R_a [N_y + R_a / 2 - \text{ceil}(i / N_x)] \end{cases} \quad (1)$$

式中: $i$ —栅格的顺序码; $(x_i, y_i)$ —栅格 $i$ 的坐标; $\text{mod}$ —取余函数;

$\text{ceil}$ —向上取整函数; $N_x \times N_y$ —栅格规模; $R_a$ —栅格边长,在此取 $R_a = 1$ 。

在顺序编码方式下,路径可表示为 $\{S, p_1, p_2, \dots, p_n, G\}$ ,式中 $S$ 为路径起点, $G$ 为路径终点, $p_i$ 为路径中间栅格编号。则全局路径规划目标函数为:

$$L = \|p_1 - S\| + \sum_{i=1}^{n-1} \|p_{i+1} - p_i\| + \|G - p_n\| \quad (2)$$

式中: $L$ —路径长度; $\|\cdot\|$ —欧式距离。

## 3 栅格环境下改进人工势场法

人工势场法存在“目标不可达”“局部极值陷阱”的问题<sup>[7]</sup>,针对这两个问题,结合栅格环境,提出了改进的人工势场法。改进人工势场法思路为:首先按照起点、终点及障碍物分布情况选取中间点,而后规划起点到中间点路径,如此重复直至到达目标点。

### 3.1 中间点选取方法

中间点选取思路为:使用直线连接起始点与目标点,直线经过的障碍物设置为有效障碍物,以最后一个有效障碍物为参考选

取中间点,计算有最后一个有效障碍物紧邻的自由栅格与直线的距离,取距离最小的栅格为中间点;以此中间点为目标点,连接起点与目标点,选择中间点,如此重复直至起点与中间点之间没有障碍物;这样就得到了一系列的中间点。

记起点坐标为 $X_s = [x_s, y_s]^T$ ,终点坐标为 $X_d = [x_d, y_d]^T$ ,则起点到终点的直线 $\Sigma_i$ 为:

$$y = \frac{y_d - y_s}{x_d - x_s} (x - x_s) + y_s \quad (3)$$

有效障碍物紧邻的自由栅格 $(x_i, y_i)$ 到直线 $\Sigma_i$ 的距离定义为

$$d = \frac{|(x_d - x_s)(y_i - y_s) - (y_d - y_s)(x_i - x_s)|}{\sqrt{(x_d - x_s)^2 + (y_d - y_s)^2}} \quad (4)$$

取与直线距离最小的自由栅格为中间点栅格。

### 3.2 中间点之间的局部路径规划

人工势场法存在的“目标不可达”“局部极值陷阱”等问题,是在目标引力与障碍物斥力共同作用下产生的,鉴于在栅格环境下通过栅格属性可以实现避障,取消障碍物的斥力作用,只保留目标点的引力作用。

以机器人当前所在栅格为研究对象,临近栅格的引力方向,如图2所示。当临近栅格为障碍物栅格时,确定此方向的引力大小为 $-\infty$ ;当临近栅格为自由栅格时,引力大小为目标引力在此方向的分量。

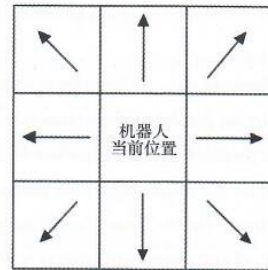


图2 引力方向

Fig.2 Attraction Direction

记机器人当前栅格为 $(x, y)$ ,其相邻8个栅格的引力方向单位向量矩阵记为:

$$\vec{E} = \begin{bmatrix} \vec{\gamma}(x-1, y+1) & \vec{\gamma}(x, y+1) & \vec{\gamma}(x+1, y+1) \\ \vec{\gamma}(x-1, y) & \vec{\gamma}(x, y) & \vec{\gamma}(x+1, y) \\ \vec{\gamma}(x-1, y-1) & \vec{\gamma}(x, y-1) & \vec{\gamma}(x+1, y-1) \end{bmatrix}$$

记目标点对机器人引力为 $\vec{F}_c$ ,则引力在相邻栅格各方向上的分量大小为:

$$\begin{bmatrix} \kappa(x-1, y+1) & \kappa(x, y+1) & \kappa(x+1, y+1) \\ \kappa(x-1, y) & \kappa(x, y) & \kappa(x+1, y) \\ \kappa(x-1, y-1) & \kappa(x, y-1) & \kappa(x+1, y-1) \end{bmatrix} = \vec{F}_c * \vec{E} \quad (5)$$

式中: $\kappa(x, y)$ —相应栅格引力分量的大小;\*—对应元素的点乘运算。

规定机器人总是朝着力最大的方向移动,则只需比较当前栅格相邻栅格的引力大小 $\kappa(x, y)$ 就能够选择下一栅格。

分析以上改进过程可以看出,由于取消了障碍物的斥力作用,只保留目标点的引力作用,所以不存在“目标不可达”“局部极值陷阱”等问题,而避开障碍物依靠识别栅格属性实现。

### 4 人工势场引导蚁群算法

改进人工势场法能够规划出由起始点至目标点的无碰路径,而路径未必最优,但是人工势场法规划出的路径具有极大的参考价值,可以引导蚁群算法进行全局路径规划。

#### 4.1 蚁群算法原理

以旅行商问题为背景对蚁群算法进行分析,记需访问的城市数量为  $n$ , 蚁群中蚂蚁数量为  $m$ , 城市  $i$  与城市  $j$  间距离为  $d_{ij}$ , 两城市间在  $t$  时刻的信息素为  $\tau_{ij}(t)$ , 则蚂蚁  $k$  在  $t$  时刻由当前城市  $i$  转移到城市  $j$  的概率  $p_{ij}^k(t)$  为<sup>[8]</sup>:

$$p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta}{\sum_{j \in allowed_k} \tau_{ij}^\alpha(t)\eta_{ij}^\beta}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \notin allowed_k \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\eta_{ij}$ —启发信息,表示蚂蚁由城市  $i$  转移到城市  $j$  的期望程度;  $\alpha, \beta$ —信息素和启发信息影响因子,代表信息素和启发因子在路径引导中的影响力,其值越大代表信息素或启发因子影响力越大,路径搜索收敛性越强,同时越容易陷入局部极值,其值越小代表路径规划随机性越大,越不容易收敛,但是容易跳出局部极值;  $allowed_k$ —蚂蚁  $k$  可以选择的城市集合,即  $allowed_k = n - tabu_k$ ,  $tabu_k$ —蚂蚁  $k$  的禁忌表,即蚂蚁  $k$  已经历的城市。

信息素更新包括全局信息素更新和局部信息素更新<sup>[9]</sup>,全局信息素更新方法只对此次循环的最优路径进行更新:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t, t+1) \quad (7)$$

式中:  $\tau_{ij}(t+1)$ — $(t+1)$  时刻路径  $ij$  上的信息素;  $\rho$ —挥发系数;  $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ —最优蚂蚁经过路径  $ij$  时释放的信息素,计算方法为:

$$\Delta\tau_{ij}(t, t+1) = \begin{cases} Q/L_k, & \forall (i, j) \in T_{bs} \\ 0, & (i, j) \notin T_{bs} \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $Q$ —信息素强度;  $L_k$ —最优路径长度;  $T_{bs}$ —最优路径。

局部信息素更新方法为蚂蚁边行走边更新信息素,方法为:

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

式中:  $\tau_{ij}(t+1)$ — $(t+1)$  时刻路径  $ij$  上的信息素,  $\rho$ —挥发系数;  $\Delta\tau_{ij}(t, t+1)$ —蚁群经过路径  $ij$  时释放的信息素;  $\Delta\tau_{ij}^k(t, t+1)$ —第  $k$  只蚂蚁经过路径  $ij$  时释放的信息素。

#### 4.2 改进启发信息

在蚁群算法前期,信息素在工作区域内均匀分布,影响蚂蚁选择路径的因素为启发信息,此时蚁群算法类似贪婪算法,容易诱导蚂蚁向错误方向搜索,陷入局部极值而无法跳出。针对这个问题,充分利用改进人工势场法规划路径这一先验信息,将人工势场法规划的路径距离引入到启发信息中。另外,随着算法迭代的进行,在信息素正反馈作用和启发信息引导的双重作用下,蚁群极易收敛而使路径多样性招到破坏,因此在启发信息中引入算法迭代次数  $N$ , 用于引导启发信息随迭代次数自适应递减。改进的启发信息为:

$$\eta_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{1}{d_{ij} + r_{jg}} \cdot \frac{N_{max} - N_c}{N_{max}}, & j \in allowed_k \\ 0, & j \notin allowed_k \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $d_{ij}$ —栅格  $i$  与栅格  $j$  之间的距离;  $r_{jg}$ —使用人工势场法得到的栅格  $j$  与目标栅格  $g$  的路径距离;  $N_c$ —当前迭代次数;  $N_{max}$ —算法最大迭代次数。

人工势场法规划路径实时性极强,将其规划的路径引入到启发信息中,可以有效引导蚂蚁的搜索过程,提高算法的搜索效率。

#### 4.3 改进信息素更新方法

在蚁群算法中,要么单独使用全局信息素更新方法,要么单独使用局部信息素更新方法。分析式(6)~式(8)可知,全局信息素更新方法只对最优路径遗留信息素,使算法收敛性极强,但是极易陷入局部最优而无法跳出;局部信息素更新方法对所有蚂蚁经历的所有路径都遗留信息素,使算法随机性过强、目的性减弱,收敛速度急剧下降。综合两种信息素更新方法的优势,提出了改进的信息素更新方法,思路是:蚂蚁在行走过程中不遗留信息素,当算法迭代一次完成后,挑选出较优的前  $1/2$  路径,按其适应度值自适应地更新信息素。将适应度函数定义为距离的倒数,即  $fit = 1/L$ 。改进的信息素更新方法为:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho)\tau_{ij}(t) + s \cdot \Delta\tau_{ij}(t, t+1) \quad (11)$$

式中:  $s$ —蚂蚁遗留信息素的调整因子,此因子随路径适应度自适应调整,方法为:

$$s = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{m/2} fit_i} \quad (12)$$

对比改进信息素更新方法与全局信息素更新方法、局部信息素更新方法可知,改进信息素更新方法选择适应度靠前的一半路径进行信息素更新,防止了全局更新法收敛过快、易陷入局部极值问题,同时对较差路径未遗留信息素,解决了局部更新法随机性过大的问题。

#### 4.4 算法流程

根据蚁群算法原理,结合对启发信息和信息素更新方法的改进,制定人工势场引导蚁群算法的流程,如图3所示。

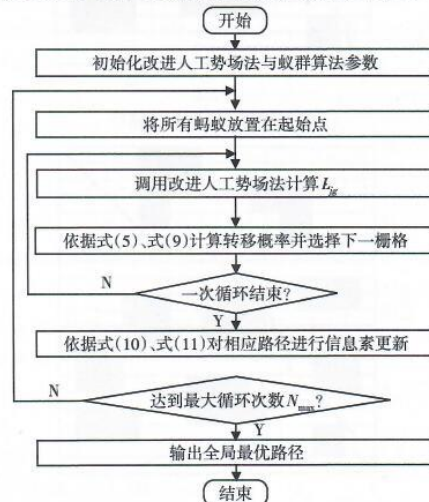


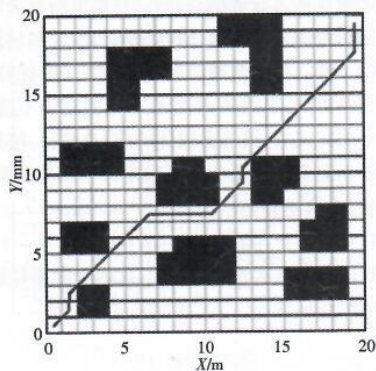
图3 人工势场引导蚁群算法流程图  
Fig.3 Flow Chart of Ant Colony Algorithm Guided by Artificial Potential Field

## 5 仿真验证

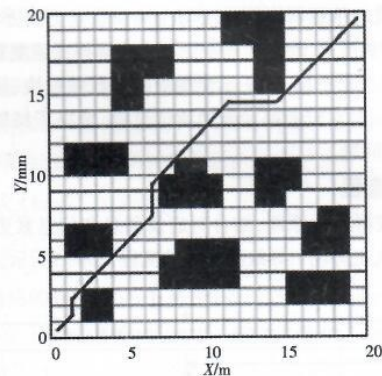
为了验证人工势场引导蜂群算法在栅格环境中路径规划的有效性,分别使用基本蚁群算法、文献<sup>[10]</sup>改进蚁群算法、人工势场引导蜂群算法在简单和复杂环境中进行路径规划。算法在 Windows 7 64bit 环境下运行,使用软件为 Matlab R2014a,计算机处理器为 Intel(R) Core(TM) i5-5200U,主频为 2.2GHz,内存为 8GB。

参数优化一般使用专家经验或反复实验确定,使用控制变量法对信息素影响因子 $\alpha$ 、启发信息影响因子 $\beta$ 、挥发系数 $\rho$ 、信息素强度 $Q$ 进行优选,以图4所示栅格环境为机器人工作环境,选择路径平均值最小值对应的参数为参数最优值,参数最终确定为: $\alpha=2, \beta=6, \rho=0.7, Q=1$ 。

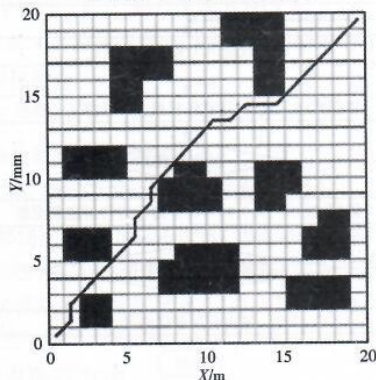
### 5.1 20×20简单环境



(a)基本蚁群算法路径



(b)文献<sup>[10]</sup>改进蚁群算法路径



(c)人工势场引导蚁群算法路径

图4 简单环境下路径规划结果

Fig.4 Path Planning Result in Simple Environment

首先仿真出 20×20 的简单栅格环境,环境中障碍物相对较少,起始栅格设置为(0,0),目标栅格设置为(20,20)。分别使用基本蚁群算法、文献<sup>[10]</sup>改进蚁群算法、人工势场引导蚁群算法进行导航路径规划,每种算法运行 100 次,取最优路径,结果如图 4 所示。

路径规划过程中,路径长度随算法迭代次数的变化过程,如图 5 所示。

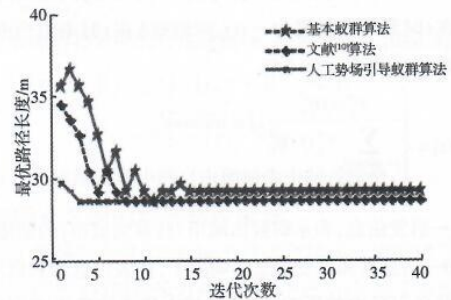


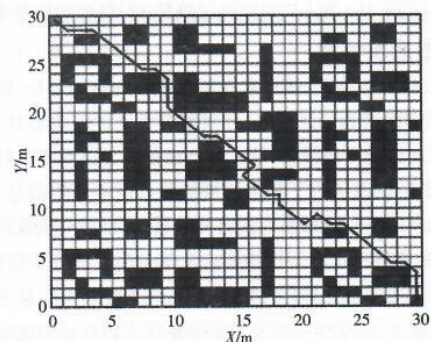
图5 最优路径长度随迭代次数变化曲线

Fig.5 Changing Curve of Optimal Path Length with Iteration

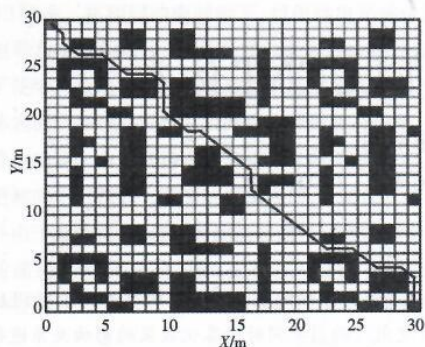
由图4、图5可以看出,基本蚁群算法最终未能找到全局最优路径,这是因为蚂蚁遇到凸形障碍物时,在启发信息的贪婪诱导下,使蚂蚁选择了从凸形障碍物下方经过,而后在信息素正反馈作用下陷入此局部最优值而无法跳出。文献<sup>[10]</sup>算法与这里人工势场引导蚁群算法都能够搜索到全局最优解,是因为人工势场法为蚁群算法提供了正确的启发信息,但是这里算法只迭代 3 次就规划出最优路径,而文献<sup>[10]</sup>算法经过 8 次迭代才规划出最优路径。这是因为文献<sup>[10]</sup>使用原始人工势场法,原始人工势场法存在的“局部最优陷阱”“目标不可达”等问题影响了蚁群规划的初始路径,最终影响了势场蚁群算法的寻优次数。经计算,基本蚁群算法最优路径长度为 29.213m,文献<sup>[10]</sup>算法和这里算法最优路径长度为 28.627m,减少了 2%。

### 5.2 30×30复杂环境

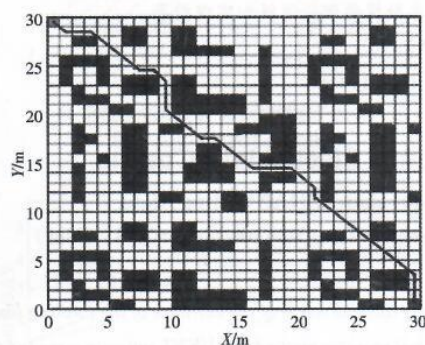
为了对比人工势场引导蚁群算法在复杂环境下与其他算法的性能,仿真出 30×30 的复杂障碍物环境,在此环境中分布着大量障碍物,起始栅格设置为(0,30),目标栅格设置为(30,0)。分别使用基本蚁群算法、文献<sup>[10]</sup>改进蚁群算法、人工势场引导蚁群算法进行导航路径规划,每种算法运行 100 次,取最优路径,结果如图 6 所示。



(a)基本蚁群算法路径



(b)文献<sup>[10]</sup>改进蚁群算法路径



(c)人工势场引导蚁群算法路径

图6 复杂环境下路径规划结果

Fig.6 Path Planning Result in Complex Environment

统计基本蚁群算法、文献<sup>[10]</sup>算法、这里算法在30×30复杂环境中最优路径长度、平均迭代次数、算法平均运行时间,结果如表1所示。

表1 不同算法规划统计

Tab.1 Planning Result Statistics of Different Algorithm

算法	最优路径长度/m	平均迭代次数	平均运行时间/s	搜索栅格覆盖率
蚁群算法	49.692	30	12.2616	57.1%
文献 <sup>[10]</sup> 算法	47.936	21	7.9159	71.23%
这里算法	45.102	11	3.3261	75.69%

表1中“搜索栅格覆盖率”是指各算法搜索到的栅格占环境中自由栅格的比重。由图6及表1可知,基本蚁群算法在复杂环境中路径规划时陷入了局部最优,这是因为蚁群算法前期单纯的启发信息使算法贪婪地向目标点运动,在陷入局部最优时,信息素的正反馈效果只能加剧“陷入局部最优”而无法跳出。这里算法在平均迭代次数、平均运行时间、最优路径长度上比文献<sup>[10]</sup>算法分别减少了47.6%、58.0%和5.9%,这是因为文献<sup>[10]</sup>使用原始人工势场法,人工势场法本身在复杂环境下存在斥力多而乱,使机器人徘徊不前,此时文献<sup>[10]</sup>算法缺少有效的人工势场引导,使得规划路径差于这里算法。在收敛次数与算法运行时间上,由于这里算法改进了人工势场法,使算法规划的初始路径就优于文献<sup>[10]</sup>算法,因此无需太多次迭代就能够找到最优值,另外,改进人工势场算法省略了斥力计算过程,也大量节省了算法运行时间。综上所述,提出的人工势场引导蚁群算法在复杂和简单环境下都能够规划出较优路径。

## 6 结论

使用人工势场法改进蚁群算法,鉴于栅格环境下可以识别障碍物,将障碍物斥力作用去除,只保留目标点的引力作用。将人工势场法规划路径引入到蚁群算法的启发信息中,并改进了信息素更新方法,使信息素遗留因子随路径优劣自适应变化。仿真结果表明,在简单和复杂环境下,人工势场引导蚁群算法都能够快速规划出最优路径。

## 参考文献

- [1] 张帅,李学仁,张鹏.基于改进A\*算法的无人机航迹规划[J].飞行力学,2016,34(3):39-43.  
(Zhang Shuai, Li Xue-ren, Zhang Peng. UAV path planning based on improved A\* algorithm[J]. Flight Dynamics, 2016, 34(3): 39-43.)
- [2] 赵东辉,李伟莉.改进人工势场的机器人路径规划[J].机械设计与制造,2017(7):252-255.  
(Zhao Dong-hui, Li Wei-li. Path planning for mobile robot based on improved artificial potential field[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(7): 252-255.)
- [3] 尹国强.基于改进人工势场法的移动机器人路径规划研究[D].天津:天津理工大学,2017.  
(Yin Guo-qiang. Research on path planning of mobile robot based on improved artificial potential field[J]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017.)
- [4] 陈卓,苏卫华,安慰宁.移动机器人SLAM与路径规划在ROS框架下的实现[J].医疗卫生装备,2017,38(2):109-113.  
(Chen Zhuo, Su Wei-hua, An Wei-ning. SLAM and path planning of mobile robot in ROS framework[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2017, 38(2): 109-113.)
- [5] 朱艳,游晓明,刘升.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 Yan, You Xiao-ming, Liu Sheng. Research for robot path planning problem based on improved Ant Colony System (ACS) algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2018, 54(19): 129-134.)
- [6] Ammar A, Bennaceur H, Châari I. Relaxed Dijkstra and A\* with linear complexity for robot path planning problems in large-scale grid environment[J]. Soft Computing, 2016, 20(10): 4149-4171.
- [7] Chen Y B, Luo G C, Mei Y S. UAV path planning using artificial potential field method updated by optimal control theory[J]. International Journal of Systems Science, 2016, 47(6): 1407-1420.
- [8] 周袅,葛洪伟,苏树智.基于信息素的自适应连续域混合蚁群算法[J].计算机工程与应用,2017,53(6):156-161.  
(Zhou Niao, Ge Hong-wei, Su Shu-zhi. Pheromone based adaptive hybrid ant colony optimization for continuous domains[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(6): 156-161.)
- [9] Zeng M R, Xi L, Xiao A M. The free step length ant colony algorithm in mobile robot path planning[J]. Advanced Robotics, 2016, 30(23): 1509-1514.
- [10] 王晓燕,杨乐,张宇.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):50-56.  
(Wang Xiao-yan, Yang Le, Zhang Yu. Robot path planning based on improved ant colony algorithm with potential field heuristic[J]. Control and Decision, 2018, 33(10): 50-56.)