

DOI: 10.7652/xjtuxb201711019

## 融合改进 A\* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划

程传奇, 郝向阳, 李建胜, 张振杰, 孙国鹏  
(信息工程大学导航与空天目标工程学院, 450001, 郑州)

**摘要:** 针对移动机器人路径规划全局最优、实时避障的需求, 提出了一种融合改进 A\* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划方法。首先, 基于传统 A\* 算法, 结合 Manhattan 和 Euclidean 距离, 设计了一种优化的启发搜索函数; 然后, 利用关键点选取策略, 剔除冗余路径点和不必要的转折点; 最后, 融合动态窗口法, 构造了顾及全局最优路径的评价函数, 基于该评价函数, 应用动态窗口法, 进行实时动态路径规划, 在保证规划路径全局最优性的基础上, 提高了平滑性及路径规划的局部避障能力。实验结果表明: 与传统 A\* 算法相比, 所提算法规划的路径更平滑, 可实时动态避障, 且能输出控制参数, 这利于机器人的自动控制; 与动态窗口法相比, 所提算法能够保证规划路径的全局最优性, 路径长度由 28.879 m 缩短为 22.285 m。该研究对于移动机器人自主导航的应用具有重要的参考价值。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; A\* 算法; 动态窗口法; 动态避障

**中图分类号:** TP242.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2017)11-0137-06

### Global Dynamic Path Planning Based on Fusion of Improved A\* Algorithm and Dynamic Window Approach

CHENG Chuanqi, HAO Xiangyang, LI Jiansheng, ZHANG Zhenjie, SUN Guopeng  
(School of Navigation and Aerospace Engineering, Information Engineering University, Zhengzhou 450001, China)

**Abstract:** To meet the requirements of global optimal and real-time obstacle avoidance in mobile robot path planning, a novel method based on the fusion of improved A\* algorithm and dynamic window approach is proposed. Combining Manhattan distance with Euclidean distance, a more appropriate heuristic function is designed for A\* algorithm. Then a key node culling scheme is introduced into the traditional A\* algorithm to remove the redundant nodes. An evaluation function considering globally optimal path is constructed. The dynamic window approach based on the evaluation function is applied to perform real-time dynamic path planning to guarantee the smoothness of path and the local obstacle avoidance ability as holding the global optimality of path. The experimental results demonstrate that compared with traditional A\* algorithm, the smoother path is found, the ability of dynamic obstacle avoidance is more obvious and the control parameters for robots are obtained. The proposed method outperforms traditional dynamic window approach in guaranteeing the global optimality of path planning, and the path distance reduces from 28.879 m to 22.285 m.

收稿日期: 2017-04-04。 作者简介: 程传奇(1989—), 男, 博士生; 郝向阳(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2015AA7034057A); 国家自然科学基金资助项目(61173077)。

网络出版时间: 2017-07-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20170727.1115.002.html>

**Keywords:** mobile robot; path planning; A\* algorithm; dynamic window approach; dynamic obstacle avoidance

路径规划是机器人领域的一个研究热点,目的是在有障碍物环境中按照某种评价指标寻找一条从起始点到目标点的最优无碰撞路径<sup>[1-3]</sup>。针对机器人路径规划已开展了大量研究,包括基于采样的Voronoi图方法、快速搜索随机树方法等<sup>[4-5]</sup>,基于节点的Dijkstra、A\*算法、D\*算法等<sup>[6-7]</sup>,基于模型的人工势场法、动态窗口法等<sup>[8-10]</sup>,基于生物启发式的神经网络、遗传算法、蚁群算法等<sup>[11-14]</sup>。

A\*算法广泛应用于移动机器人自主路径规划,但该算法规划的路径曲率非连续,导致在转折点处运动参量发生跳变,不利于机器人的控制。文献[15]提出了一种A\*算法的改进策略,简化了路径,且能计算出拐点处机器人的旋转方向和角度,但不具备动态避障能力。文献[16]提出了一种融合人工势场法与蚁群算法的全局路径规划算法,提高了蚁群算法收敛速度,增强了局部避障能力,但计算复杂度较大,且无法保证规划路径的曲率连续变化。动态窗口法通过在线实时规划路径,具有良好的避障能力,适用于动态环境中机器人自主导航,但该方法不满足全局最优的路径规划。

针对以上问题,本文提出了一种融合改进A\*算法和动态窗口法的全局动态路径规划方法。基于传统A\*算法,设计了一种关键点选取策略,剔除冗余路径节点及不必要的转折点。在此基础上构造了顾及全局最优路径的评价函数,并基于该评价函数应用动态窗口法进行实时路径规划,从而在保证规划路径全局最优的基础上,使得路径更加平滑,同时提高了局部避障能力。

## 1 改进的A\*算法

A\*算法是一种全局路径规划算法,利用全局地图信息定义一个代价函数,并基于该代价函数搜索最优路径节点,同盲目型搜索算法相比,提高了效率。A\*算法中的代价函数定义为

$$f(n) = s(n) + h(n) \quad (1)$$

式中: $s(n)$ 为起始点到达当前节点的实际代价值; $h(n)$ 为当前节点 $n$ 到目标点的代价估计值(启发函数)。

### 1.1 优化启发函数

A\*算法是一种启发式搜索算法,启发函数 $h(n)$ 直接影响A\*算法的路径规划性能。设当前节点 $n$

到目标节点的实际代价值为 $H(n)$ , $h(n) < H(n)$ 时搜索节点多,运算效率低,但可搜索到最优路径; $h(n) = H(n)$ 时是理想情况,沿最短路径进行搜索,且效率最高; $h(n) > H(n)$ 时搜索节点少,运算效率高,但通常难以搜索到最优路径。

传统A\*算法使用Manhattan距离或Euclidean距离定义启发函数,即

$$h_M(n) = |n_x - g_x| + |n_y - g_y| \quad (2)$$

$$h_E(n) = ((n_x - g_x)^2 + (n_y - g_y)^2)^{1/2} \quad (3)$$

式中: $n_x, n_y, g_x, g_y$ 为当前节点和目标点。A\*算法每次搜索当前节点的8邻域栅格,考虑到两轮机器人的操控,故这两种启发函数设计都不是最优选择。因此,结合Manhattan和Euclidean距离,本文设计了一种更接近实际代价值 $H(n)$ 的启发函数,即

$$h(n) = \begin{cases} 2^{1/2} d_x(n) + d_y(n) - d_x(n), & d_y(n) > d_x(n) \\ 2^{1/2} d_y(n) + d_x(n) - d_y(n), & d_x(n) > d_y(n) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $d_x(n) = |n_x - g_x|$ ;  $d_y(n) = |n_y - g_y|$ 。

### 1.2 关键点选取策略

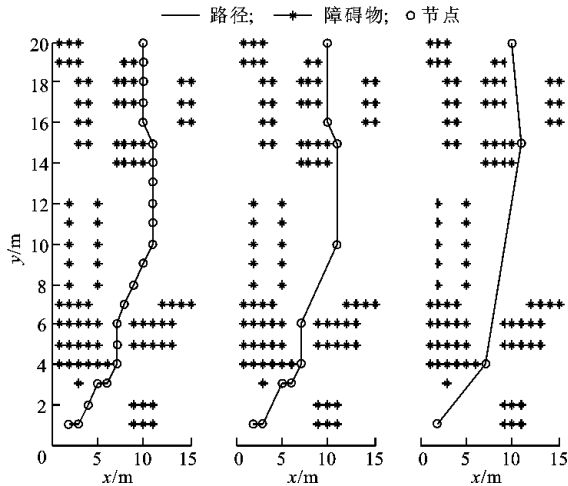
A\*算法规划出的最优路径中包含诸多冗余点及不必要的转折点,不利于机器人的控制。针对此问题,提出了一种关键节点选取策略,具体实施步骤如下。

(1)提取关键转折点。从规划路径第2个节点开始,若当前节点与前1节点及其父节点在同一直线上,则前1节点为冗余点,删除冗余点,更新路径;依次遍历所有路径节点,删除冗余点,最终获取仅包含起点、转折点、终点的路径序列。

(2)删除冗余转折点。提取转折点后,轨迹中仍可能存在冗余点。设提取关键转折点后的路径点为 $\{P_k | k=1, 2, \dots, n\}$ ,连接 $P_1 P_3$ ,若 $P_1 P_3$ 不经过障碍物,即线段 $P_1 P_3$ 到障碍物的距离大于预设阈值,则继续连接 $P_1 P_4$ ,直到 $P_1 P_k (k=3, 4, \dots, n)$ 经过障碍物,则把 $P_{k-1}$ 与 $P_1$ 连接起来,同时删除中间冗余点,更新路径;从节点 $P_2$ 重复上述操作,直到路径中没有冗余转折点。关键点选取策略的实验结果如图1所示,可知应用关键点选取策略的算法明显优于优化传统A\*算法。

## 2 动态窗口法

动态窗口法的主要思想<sup>[9]</sup>是:在速度空间(线速



(a)传统 A\* 算法 (b)提取关键转折点 (c)删除冗余转折点  
图 1 关键点选取策略的实验结果

度和角速度)中采样多组速度,并模拟机器人在这些速度下一定时间间隔内的轨迹。获取多组轨迹后,根据评价指标,选取最优轨迹所对应的速度驱动机器人运动。

### 2.1 机器人运动模型

动态窗口算法中需要模拟机器人的运动轨迹,故需已知机器人的运动模型。线速度和角速度的变化反映了机器人的运动,一组  $(v_t, \omega_t)$  表征了一段轨迹。假设机器人在时间间隔  $\Delta t$  内作匀速直线运动,故运动模型为

$$\begin{cases} x = x + v_x \Delta t \cos \theta_t - v_y \Delta t \sin \theta_t \\ y = y + v_x \Delta t \sin \theta_t + v_y \Delta t \cos \theta_t \\ \theta_t = \theta_t + \omega_t \Delta t \end{cases} \quad (5)$$

### 2.2 速度采样

在速度二维空间中存在无穷多组速度对  $(v, \omega)$ ,但可根据机器人自身限制及环境因素,对采样速度范围进行约束。模拟实验中速度采样结果如图 2 所示。

(1)机器人最大、最小速度约束为

$$V_m = \{(v, \omega) | v \in [v_{\min}, v_{\max}] \wedge \omega \in [\omega_{\min}, \omega_{\max}]\} \quad (6)$$

(2)电机加减速约束:机器人在模拟前进时间间隔内,存在由于加速度带来的最大、最小速度

$$\begin{aligned} V_d = \{(v, \omega) | v \in [v_c - \dot{v}_b \Delta t, v_c + \dot{v}_a \Delta t] \wedge \\ \omega \in [\omega_c - \dot{\omega}_b \Delta t, \omega_c + \dot{\omega}_a \Delta t]\} \end{aligned} \quad (7)$$

式中: $v_c, \omega_c$  为当前速度; $\dot{v}_a, \dot{\omega}_a$  为最大加速度; $\dot{v}_b, \dot{\omega}_b$  为最大减速度。

(3)制动距离约束<sup>[9]</sup>:为保证机器人安全,在最大减速度条件下,当前速度应能在撞击障碍物之前

减速为 0,则

$$\begin{aligned} V_a = \{(v, \omega) | v \leq (2 \text{dist}(v, \omega) \dot{v}_b)^{1/2}, \\ \omega \leq (2 \text{dist}(v, \omega) \dot{\omega}_b)^{1/2}\} \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\text{dist}(v, \omega)$  为  $(v, \omega)$  对应轨迹上离障碍物的最近距离。

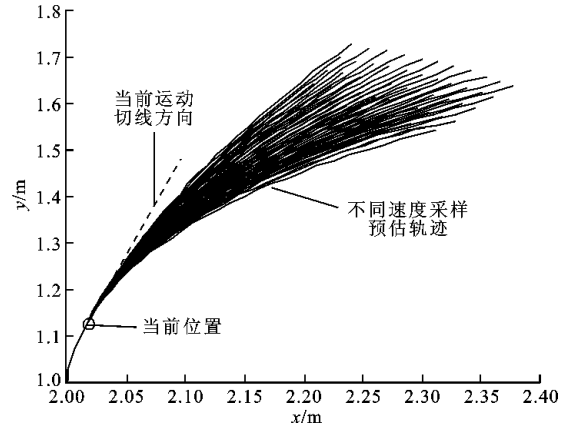


图 2 速度采样结果

### 2.3 评价函数

速度空间内有若干组采样速度是可行的,因此需设计评价函数选取最优轨迹。评价函数的设计准则为:局部导航中,使得机器人尽量避开障碍,朝向目标快速前进。设计的评价函数为

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \text{head}(v, \omega) + \beta \text{dist}(v, \omega) + \gamma \text{vel}(v, \omega)) \quad (9)$$

式中: $\text{head}(v, \omega)$  为方位角评价函数,表示在当前速度下,模拟轨迹终点方向与目标之间的方位角偏差; $\text{dist}(v, \omega)$  为速度对应轨迹上离障碍物的最近距离; $\text{vel}(v, \omega)$  为当前速度大小评价函数; $\sigma$  为平滑函数; $\alpha, \beta, \gamma$  为 3 项的加权系数。

## 3 融合算法

动态窗口法根据移动机器人检测到的局部窗口环境信息,通过在线实时规划路径,检测窗口滚动前进,具有良好的避障能力。但是,该方法回避了全局路径最优的路径规划要求,存在陷入局部最优的致命问题,故采用改进 A\* 算法进行全局路径规划,融合动态窗口法进行局部避障,以保证动态规划路径的全局最优性。

为避免动态窗口算法陷入局部最优,设计了一种顾及全局最优路径的动态窗口评价函数

$$G(v, \omega) = \sigma(\alpha \text{PHead}(v, \omega) + \beta \text{dist}(v, \omega) + \gamma \text{vel}(v, \omega)) \quad (10)$$

式中: $\text{PHead}(v, \omega)$  为模拟轨迹终点方向与当前目标点之间的方位角偏差。当前目标点是机器人前进方

向上距离当前点最近的全局最优路径序列点。此评价函数使得局部路径规划遵循全局最优路径轮廓,从而保证全局最优。本文算法流程如图3所示。

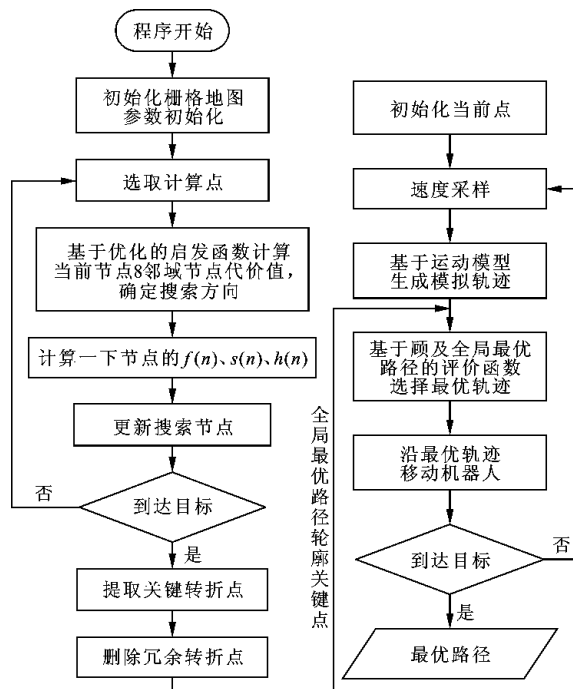


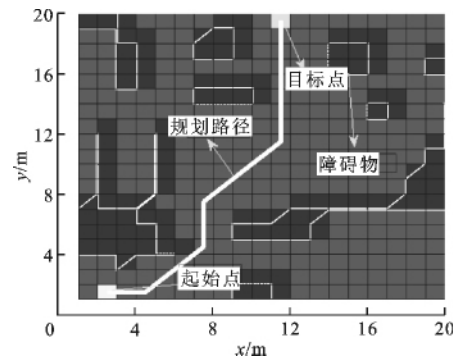
图3 本文算法流程图

## 4 实验

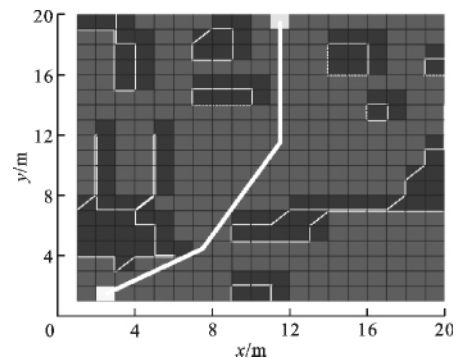
为验证本文算法的有效性,在栅格地图场景(20 m×20 m,网格间距为1 m)下进行2组实验,障碍物覆盖率为31%。实验中,起点坐标为(2.5 m, 1.5 m),目标点坐标为(11.5 m, 19.5 m)。实验2为在实验1基础上加入动态障碍物,以验证本文算法的动态避障性能。实验参数设置如下:最大线速度为1.0 m/s,最大角速度为20.0°/s,最大线加速度为0.2 m/s<sup>2</sup>,最大角加速度为50.0°/s<sup>2</sup>,线速度分辨率为0.01 m/s,角速度分辨率为1.0°/s,时间分辨率为0.1 s,预测周期为3.0 s,评价函数参数 $\alpha=0.05$ , $\beta=0.2$ , $\gamma=0.1$ 。

分别采用传统A\*算法、本文提出的加入关键点提取策略的改进A\*算法、动态窗口算法、势场蚁群算法<sup>[16]</sup>和本文所提融合算法进行路径规划,实验各类算法的路径规划结果如图4所示。由图4可知:传统A\*算法能够规划出一条全局最优路径(路径长度为22.899 5 m),而引入关键点选取策略的改进A\*算法,能够明显改善路径,不仅删除了传统A\*算法路径中的冗余点,且路径长度优于传统A\*算法(路径长度为21.893 2 m);与A\*算法相比,动态窗口算法规划路径较平滑,但动态窗口法规划的

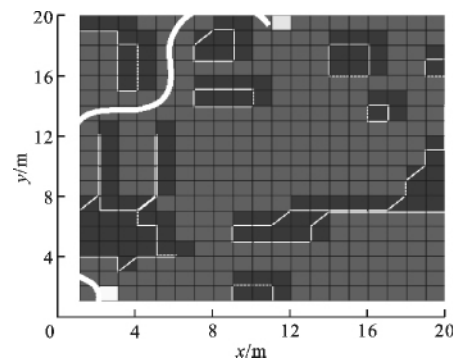
路径非全局最优;与动态窗口算法相比,由于使用了顾及全局最优路径的评价函数,本文算法可保证全局最优;与传统A\*算法相比,本文算法不仅路径长



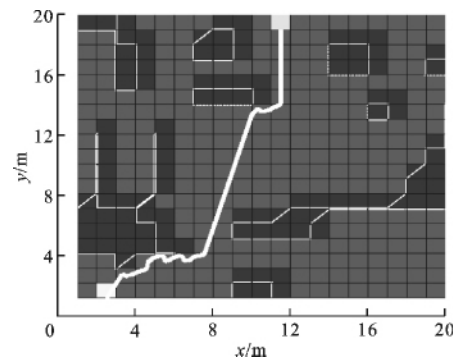
(a) 传统A\*算法



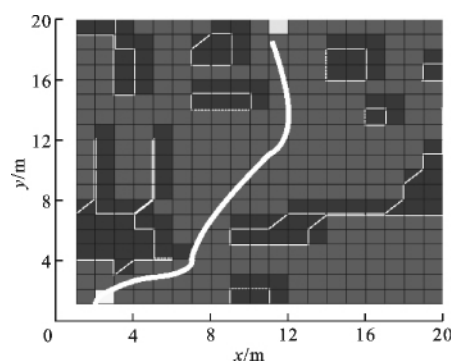
(b) 本文改进A\*算法



(c) 动态窗口法

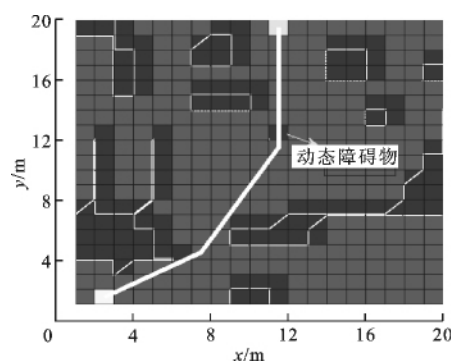


(d) 势场蚁群算法

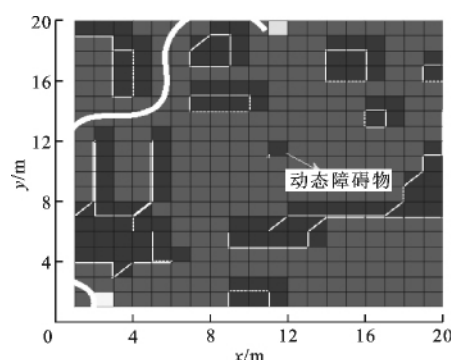


(e) 本文所提融合算法

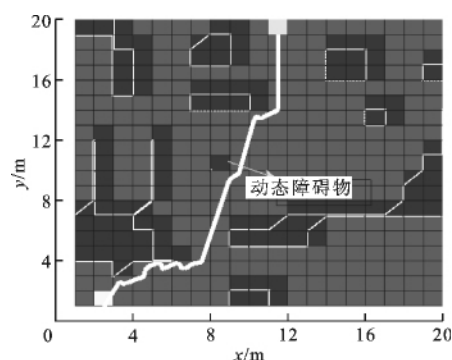
图 4 算法路径规划结果



(b) 本文改进 A\* 算法



(c) 动态窗口法



(d) 势场蚁群算法

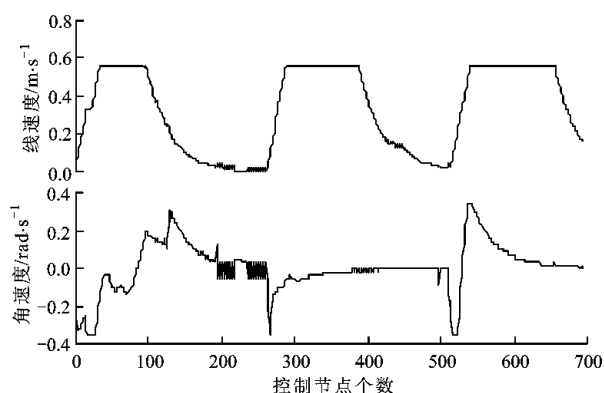
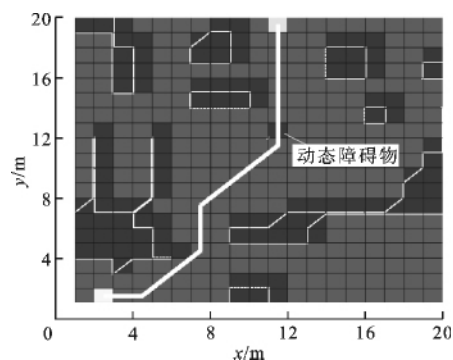
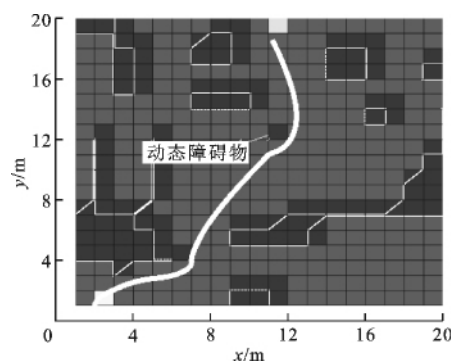


图 5 算法路径规划反馈的机器人实时控制参数

在实验 1 的基础上,加入动态障碍物点(11.5 m, 12.5 m),由于势场蚁群算法原始规划路径并未通过(11.5 m, 12.5 m),故在势场蚁群算法实验中设置动态障碍物点(8.5 m, 10.5 m),算法动态避障实验结果如图 6 所示。由图 6 可知, A\* 算法及改进



(a) 传统 A\* 算法



(e) 本文所提融合算法

图 6 算法动态避障实验结果

的 A\* 算法无法规避突然出现的障碍物,动态窗口法规划的路径非全局最优,势场蚁群算法可绕过动

态障碍物,但规划路径仍存在曲率变化不连续的问题,而本文算法可动态避障,绕过障碍物前进到目标点,且规划的路径能保持全局最优性,达到了设计算法的预期目的。

## 5 结 论

针对机器人路径规划问题,提出了一种融合改进 A\* 算法和动态窗口法的全局动态路径规划方法。设计了一种关键点选取策略,能够去除传统 A\* 算法规划路径序列中的冗余点,从而提高路径规划性能;基于动态窗口算法,构造了一种顾及全局最优路径的评价函数,可避免动态窗口算法陷入局部最优,保证路径规划的全局最优性;与传统 A\* 算法相比,本文算法规划的路径更加平滑,可实时避障;与动态窗口算法相比,可保证规划路径的全局最优;与文献[16]相比,本文所提算法实时性更好,规划路径曲率变化连续,且可输出运动控制参数,更利于移动机器人的反馈控制。

由于需要对 A\* 算法进行全局规划,而 A\* 算法的计算复杂度随空间维数呈指数增加,因而对于高维大场景的实时路径规划,本文方法还需要进一步改进。

## 参考文献:

- [1] HART P E, NILSSON N J, RAPHAEL B. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths [J]. IEEE Transactions on Systems Science & Cybernetics, 1968, 4(2): 100-107.
- [2] STENTZ A. Optimal and efficient path planning for partially known environments [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1994: 3310-3317.
- [3] EEELE A J, RICHARDS A. Path-planning with avoidance using nonlinear branch-and-bound optimization [J]. Journal of Guidance Control & Dynamics, 2015, 32(2): 384-394.
- [4] BHATTACHARYA P, GAVRILOVA M L. Roadmap-based path planning-using the voronoi diagram for a clearance-based shortest path [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2008, 15(2): 58-66.
- [5] KOTHARI M, POSTLETHWAITE I. A probabilistically robust path planning algorithm for UAVs using rapidly-exploring random trees [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2013, 71(2): 231-253.
- [6] SOLTANI A R, TAWFIK H, GOULERMAS J Y, et al. Path planning in construction sites: performance evaluation of the Dijkstra, A\*, and GA search algorithms [J]. Advanced Engineering Informatics, 2002, 16(4): 291-303.
- [7] 张彪, 曹其新, 王雯珊. 使用三维栅格地图的机器人路径规划 [J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(10): 57-61.  
ZHANG Biao, CAO Qixin, WANG Wenshan. An algorithm for mobile robot path planning based on 3D grid map [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(10): 57-61.
- [8] MONTIEL O, SEPGLVEDA R, OROZCO-ROSAS U. Optimal path planning generation for mobile robots using parallel evolutionary artificial potential field [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 79(2): 1-21.
- [9] FOX D, BURGARD W, THRUN S. The dynamic window approach to collision avoidance [J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 1997, 4(1): 23-33.
- [10] SEDER M, PETROVIC I. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles [C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1986-1991.
- [11] GLASIUS R, KOMODA A, GIELEN S C A M. Neural network dynamics for path planning and obstacle avoidance [J]. Neural Networks, 1995, 8(1): 125-133.
- [12] 朱大奇, 孙兵, 李利. 基于生物启发模型的 AUV 三维自主路径规划与安全避障算法 [J]. 控制与决策, 2015, 30(5): 798-806.  
ZHU Daqi, SUN Bing, LI Li. Algorithm for AUV's 3D path planning and safe obstacle avoidance based on biological inspired model [J]. Control and Decision, 2015, 30(5): 798-806.
- [13] 雷伟军, 程筱胜, 戴宁, 等. 基于改进遗传算法的多模型加工路径规划 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(11): 153-161.  
LEI Weijun, CHENG Xiaosheng, DAI Ning, et al. Multi-model machining path planning based on improved genetic algorithm [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(11): 153-161.
- [14] 潘杰, 王雪松, 程玉虎. 基于改进蚁群算法的机器人路径规划 [J]. 中国矿业大学学报, 2012, 41(1): 108-113.  
PAN Jie, WANG Xuesong, CHENG Yuhu. Improved ant colony algorithm for mobile robot path planning [J]. Journal of China University of Mining & Tech-

nology, 2012, 41(1): 108-113.

- [15] 王殿君. 基于改进 A\* 算法的室内移动机器人路径规划 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2012, 52(8): 1085-1089.

WANG Dianjun. Indoor mobile-robot path planning based on an improved A\* algorithm [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2012, 52(8): 1085-1089.

- [16] 刘建华, 杨建国, 刘华平, 等. 基于势场蚁群算法的移动机器人全局路径规划方法 [J]. 农业机械学报, 2015, 46(9): 18-27.

LIU Jianhua, YANG Jianguo, LIU Huaping, et al. Robot global path planning based on ant colony optimization with artificial potential field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(9): 18-27.

(编辑 赵炜)

(上接第 70 页)

- [3] BURGDORFER A. The influence of the molecular mean free path on the performance of hydrodynamics gas lubricated bearing [J]. Basic Eng Trans ASME, 1959, 81: 94-99.

- [4] ROY S, RAJU R. Modeling gas flow through micro channels and nan pores [J]. Journal of Applied Physics, 2003, 93(8): 4870-4879.

- [5] MCHENLY M J, GALLIS M A, BOYD I D. Empirical slip and viscosity model performance for microscale gas flow [J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2005, 49(11): 1169-1191.

- [6] 孙江龙, 吕续舰, 郭磊, 等. 微尺度流动研究的简要综述 [J]. 机械强度, 2010, 32(3): 502-508.

SUN Jianglong LV Xujian, GUO Lei, et al. Brief summarization of micro-scale flow research [J]. Journal of Mechanical Strength, 2010, 32(3): 502-508.

- [7] KENNARD E H. Kinetic theory of gases [M]. New York, USA: McGraw-Hill, 1938: 148-150.

- [8] 张海军, 祝长生, 杨琴. 黏度效应对气体径向微轴承性能的影响 [J]. 中国电机工学报, 2009, 29(29): 84-88.

ZHANG Haijun, ZHU Changsheng, YANG Qin. Effect of effective viscosity on performance of micro gas journal bearings [J]. Proceeding of the CSEE, 2009, 29(29): 84-88.

- [9] 宁方伟, 龙威, 公玲, 等. 稀薄条件下平板间润滑气膜内速度滑移现象分析 [J]. 机械强度, 2016, 38(186): 738-743.

NING Fangwei, LONG Wei, GONG Ling, et al. Analysis of velocity slip between flat in lubrication film under conditions of thin gas [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016, 38(186): 738-743.

- [10] 张文明, 孟光, 周健斌. 微机电系统压膜阻尼特性分析 [J]. 振动与冲击, 2006, 25(4): 41-45.

ZHANG Wenming, MENG Guang, ZHOU Jianbin. Damping analysis of MEMS film [J]. Journal of Vibration and Shock, 2006, 25(4): 41-45.

- [11] VEIJOLA T, KUISMA H, LAHDENPERA J, et al. Equivalent-circuit model of the squeezed gas film in a silicon accelerometer [J]. Sensors and Actuators: A, 1995, 48: 239-248.

- [12] 杨琴, 刘宇陆, 张海军, 等. 气体稀薄效应对微机电系统(MEMS)气体轴承-转子系统不平衡响应的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(7): 134-139.

YANG Qin, LIU Yulu, ZHANG Haijun, et al. Influence of gas rarefaction effect on unbalance response of micro-electro-mechanical (MEMS) gas bearing-rotor system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(7): 134-139.

- [13] 刘强, 张从鹏. 直线电机驱动的 H 型气浮工作台运动平台 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1540-1546.

LIU Qiang, ZHANG Congpeng. H-type air-bearing motion state driven by linear motors [J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(10): 1540-1546.

(编辑 荆树蓉)