

基于改进人工势场法的机器人局部路径规划

张国胜, 李彩虹*, 张耀玉, 周瑞红, 梁振英

(山东理工大学计算机科学与技术学院, 山东 淄博 255000)

摘要: 针对人工势场(APF)法在机器人局部路径规划中存在的局部极小值陷阱和路径冗余等问题, 提出一种基于模糊控制(FC)和虚拟目标点改进人工势场的 FC-V-APF 算法。首先设计虚拟目标点避障策略, 并加入障碍物跨越机制和目标点更新阈值, 构建 V-APF 算法引导机器人摆脱陷阱区域; 其次提出基于累计转角和的控制策略, 帮助机器人走出多 U 型复杂陷阱; 然后针对路径冗余问题, 将 V-APF 算法与模糊控制算法相结合, 提出 FC-V-APF 算法, 通过激光雷达传感器的实时数据和权重函数对当前环境进行评估, 选取模糊控制器输出辅助力, 提前规避障碍物。最后在机器人操作系统(ROS)平台上搭建仿真环境对 FC-V-APF 算法进行路径规划性能的对比实验, 并对路径长度、运行时间和速度曲线等进行比较。实验结果表明, 所设计的 FC-V-APF 算法能够快速摆脱陷阱, 减少冗余路径, 提高路径平滑度并减少规划时间。

关键词: 机器人; 局部路径规划; 人工势场法; 虚拟目标点; 模糊控制

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0068738

Robot Local Path Planning Based on Improved Artificial Potential Field Method

ZHANG Guosheng, LI Caihong*, ZHANG Yaoyu, ZHOU Ruihong, LIANG Zhenying

(School of Computer Science and Technology, Shandong University of Technology, Zibo 255000, Shandong, China)

【Abstract】 This study proposes an improved Artificial Potential Field (APF) algorithm (called FC-V-APF) based on Fuzzy Control (FC) and a virtual target point method to solve the local minimum trap and path redundancy issues of the APF method in robot local path planning. First, a virtual target point obstacle avoidance strategy is designed, and the V-APF algorithm is constructed to help the robot overcome local minimum traps by adding an obstacle crossing mechanism and a target point update threshold. Second, a control strategy based on the cumulative angle sum is proposed to assist the robot in exiting a multi-U complex obstacle area. Subsequently, the V-APF and FC algorithms are combined to construct the FC-V-APF algorithm. The corresponding environment is evaluated using real-time data from the radar sensor and designed weight function, and a fuzzy controller is selected to output the auxiliary force to avoid obstacles in advance. Finally, a simulation environment is built on the Robot Operating System (ROS) platform to compare the path planning performance of the FC-V-APF algorithm with that of other algorithms. Considering path length, running time, and speed curves, the designed FC-V-APF algorithm can quickly eliminate traps, reduce redundant paths, improve path smoothness, and reduce planning time.

【Key words】 robot; local path planning; Artificial Potential Field (APF) method; virtual target point; Fuzzy Control (FC)

0 引言

路径规划是机器人自主导航的一项关键技术^[1-2]。根据机器人对环境信息的感知程度, 路径规划技术可划分为全局和局部两大类^[3]。常见的全局路径规划方法有 Dijkstra 算法^[4]、A* 算法^[5]、快速扩展随机树(RRT)算法^[6]等, 机器人可根据已知地图信息规划出最优路径。此类方法规划路径可达到全局最优, 但实时性较差, 适用于静态已知环境。在局部路径规划方法中, 机器人根据传感器实时探测

的局部环境信息避开障碍物, 趋向目标点, 因此局部路径规划具有较高的实时性和灵活性, 但由于传感器探测范围有限, 规划的路径难以达到全局最优, 因此其适用于动态未知环境。局部路径规划通常采用的方法有动态窗口法(DWA)^[7]、人工势场(APF)法^[8-9]和模糊控制(FC)法^[10-11]等。

人工势场法具有结构简单、实时计算量小、路径平滑等优点, 在局部路径规划中得到广泛应用, 但算法存在目标不可达和局部极小值陷阱等问题^[12]。针对这些问题, 国内外学者做了大量研究, 目前的解

收稿日期: 2023-11-01 修回日期: 2024-01-11

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61973184); 山东省自然科学基金面上项目(ZR2023MF015, ZR2021MF072)。

通信作者 E-mail: *lich@sdut.edu.cn

决方法主要有消除法和逃离法两大类^[13]。消除法通过改进原势场函数或重新构造特殊势场函数等方法消除局部极小值,保证机器人沿势场负梯度的方向移动。文献[14]提出一种自适应势场函数方法,将状态误差协方差矩阵与斥力势场函数关联,通过势场函数规划得到路径,并利用改进的线性二次正则跟踪规划的参考路径。改进算法在离散型障碍物较少的环境下运行良好,但提前规划导致实时性降低。文献[15]提出一种多点协调规划算法,将适用场景扩展到多障碍物区域,利用调和函数建立多障碍物的调和场规划参考路径,协调机器人按路径上选取的特殊点运动,但该算法实时性仍然较差,且无法解决复杂的陷阱问题。消除法通常需要提前获取环境信息并进行预处理,缺乏实时性且无法解决特殊环境中的陷阱问题,因此适用范围受到限制^[16]。与消除法的解决策略不同,逃离法使用启发式搜索方法,当机器人进入局部极小值陷阱时,搜索并引导机器人到达新的安全位置,摆脱陷阱区域^[17]。文献[18]通过双输入单输出的模糊控制器推算出垂直合力方向的逃逸力大小,帮助机器人摆脱陷阱,该方法具有较高的实时性,但逃逸力设置方向单一,仅适用于较为简单且障碍物较少的场景。为满足复杂路径规划场景需求,文献[19]提出一种沿墙走的控制策略,使机器人沿障碍物边界运动,直至逃离陷阱范围,但该策略未充分考虑环境信息,无法适用于特殊障碍物组合的场景,且沿墙走的过程会产生大量冗余路径,降低规划效率。文献[20]通过增设虚拟障碍物的方法帮助机器人离开受困区域,避免了大量的路径冗余,但所提算法主要针对陷入型障碍物场景,且增设虚拟障碍物会对路径平滑度产生较大影响。文献[21]设计模糊控制器输出模糊斥力的大小和偏转角度,通过在合力的计算中引入模糊斥力解决了陷阱问题,但规划过程中存在震荡现象,同样未解决路径平滑度不足的问题。文献[22]针对陷阱问题对环境进行采样并补齐凹形区域,防止机器人进入陷阱,提高了路径平滑度,但这种方法对传感器提出了更高的要求,补齐的过程会产生较大的实时计算量,且无法用于多个特殊障碍物组合的场景。

针对以上问题,本文将消除法和逃离法结合,在现有改进人工势场法^[23]的基础上进一步研究,提出基于模糊控制和虚拟目标点的 FC-V-APF 算法。采用激光雷达实时获取环境信息,通过消除法对势场函数进行改进,降低势能增长速度,使机器人到达最低势能的目标点处。在特殊环境中采用逃离法,根据运行状态和环境信息决定是否增设虚拟目标点,协助机

器人摆脱陷阱,同时引入越障机制和更新阈值避免路径震荡,减少实时计算量,并通过多 U 型陷阱的解决策略扩展适用场景,摆脱更为特殊的复杂陷阱。在多障碍物区域采用逃离法,将环境评估数据输入模糊控制器,通过输出辅助力帮助机器人提前避障,减少路径冗余,提升规划效率和路径优化程度。

1 人工势场法的原理及改进

人工势场法的基本思想是在工作空间中构建虚拟力场,使机器人沿势场的负梯度方向移动,避开障碍物,趋向目标点^[24]。针对传统人工势场法存在的引力过大和目标不可达问题,目前研究主要是对引力势场和斥力势场的函数进行改进。

1.1 引力势场

引力势场使机器人趋向目标点。为解决引力过大问题,设置引力作用阈值 d_g 修正势场函数,降低势能增长速度。修正的引力势场函数 $U_{att}(X)$ 表示如下:

$$U_{att}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\epsilon\rho^2(X, X_g), \rho(X, X_g) \leq d_g \\ d_g\epsilon\rho(X, X_g) - \frac{1}{2}\epsilon d_g^2, \rho(X, X_g) > d_g \end{cases} \quad (1)$$

式中: ϵ 为引力增益系数; X 为机器人位置; X_g 为目标点位置; $\rho(X, X_g)$ 为机器人与目标点之间的距离。引力 $F_{att}(X)$ 为引力势场函数的负梯度,表示如下:

$$F_{att}(X) = -\nabla U_{att}(X) = \begin{cases} -\epsilon(X - X_g), \rho(X, X_g) \leq d_g \\ -d_g\epsilon \frac{(X - X_g)}{\rho(X, X_g)}, \rho(X, X_g) > d_g \end{cases} \quad (2)$$

1.2 斥力势场

斥力势场使机器人远离障碍物。为解决目标不可达问题,在斥力势场中加入距离 $\rho(X, X_g)$, 保证目标点处的势能为全局最小。改进的斥力势场函数 $U_{rep}(X)$ 表示如下:

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta \left[\frac{1}{\rho(X, X_{obs})} - \frac{1}{\rho_0} \right]^2 \times \\ \rho^n(X, X_g), \rho(X, X_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(X, X_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: η 为斥力增益系数; X_{obs} 为障碍物位置; $\rho(X, X_{obs})$ 为机器人到障碍物的距离; ρ_0 为障碍物作用范围。斥力 $F_{rep}(X)$ 为斥力势场的负梯度,表示如下:

$$F_{rep}(X) = -\nabla U_{rep}(X) = \begin{cases} F_{rep1}(X) + F_{rep2}(X), \rho(X, X_{obs}) \leq \rho_0 \\ 0, \rho(X, X_{obs}) > \rho_0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mathbf{F}_{\text{rep1}} = \eta \left[\frac{1}{\rho(X, X_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right] \frac{(X - X_{\text{obs}})}{\rho^3(X, X_{\text{obs}})} \rho^n(X, X_g) \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_{\text{rep2}} = -\frac{n}{2} \eta \left[\frac{1}{\rho(X, X_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right]^2 \frac{(X - X_g)}{\rho(X, X_g)} \times \rho^{n-1}(X, X_g) \quad (6)$$

式中: $\mathbf{F}_{\text{rep1}}(X)$ 为斥力分量,由障碍物指向机器人; $\mathbf{F}_{\text{rep2}}(X)$ 为引力分量,由机器人指向目标点。

1.3 总势场

总势场 $U(X)$ 为引力场和 n 个斥力场的叠加,示意图如图 1 所示(彩色效果见《计算机工程》官网 HTML 版,下同)。合力 $\mathbf{F}(X)$ 为总势场的负梯度,表示如下:

$$\mathbf{F}(X) = -\nabla U(X) = \mathbf{F}_{\text{att}}(X) + \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_{\text{rep},i}(X) \quad (7)$$

$$U(X) = U_{\text{att}}(X) + \sum_{i=1}^n U_{\text{rep},i}(X) \quad (8)$$

机器人在单一障碍物运行环境中的势场受力分析如图 2 所示。

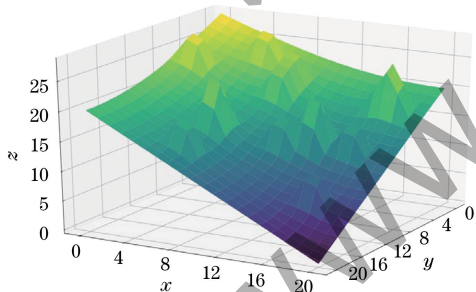


图 1 总势场

Fig.1 Total potential field

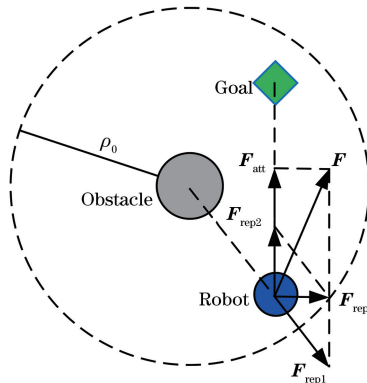


图 2 受力分析图

Fig.2 Force analysis diagram

采用改进的势场函数能够解决引力过大和目标不可达问题,但在特殊障碍物环境中仍存在机器人无法走出局部极小值陷阱的现象。此外,在多障碍

物区域,机器人受斥力的影响较大,易产生路径冗余,因此,采用虚拟目标点引导和设置辅助力的方法进行改进。

2 虚拟目标点法

针对陷阱问题,基于虚拟目标点和改进的势场函数,设计陷阱避障策略 V-APF,帮助机器人摆脱受困区域。特殊障碍物环境中的 U 型障碍物较为复杂,可由一型和 V 型变形或组合而成。这里针对 U 型障碍物的运行环境进行设计,因为在 U 型障碍物环境里运行成功的算法具有较强的普适性。

2.1 虚拟目标点设置

通过虚拟目标点法引导机器人离开陷阱区域。具体设计步骤如下:

1) 根据机器人的运行状态和雷达数据判断其是否进入陷阱区域。若雷达探测到前方存在连续障碍物,则计算一定步数范围内实际位移 $\rho(X_i, X_{i+j})$ 与当前行驶路程的差值,若差值较大,则判断机器人已进入陷阱,需增设虚拟目标点进行引导。

2) 增设虚拟目标点。首先记录使机器人受困的障碍物组,充分考虑受困位置的环境信息,确定逃离方向;其次在障碍物组中选取机器人斜前方的外侧障碍物作为目标障碍物;然后计算虚拟目标点坐标 $(x_{\text{vir}}, y_{\text{vir}})$:

$$\begin{cases} x_{\text{vir}} = x_{t_{\text{obs}}} + \beta_1 \text{sign}(x_{t_{\text{obs}}} - x) \\ y_{\text{vir}} = y_{t_{\text{obs}}} + \beta_2 \text{sign}(y_{t_{\text{obs}}} - y) \end{cases} \quad (9)$$

式中: $(x_{t_{\text{obs}}}, y_{t_{\text{obs}}})$ 和 (x, y) 分别为目标障碍物和机器人的当前位置; β_1 和 β_2 为距离调节参数。增设虚拟目标点后,忽略原目标点的引力,机器人在新的合力作用下逃离陷阱。

3) 更新虚拟目标点。虚拟目标点在机器人进入更新阈值 d_{vir} 范围时进行更新,并且在摆脱陷阱的过程中可能会更新多次。在机器人逃离陷阱后,撤销虚拟目标点,使机器人在原目标点的引力影响下继续行驶。

机器人在陷阱区域的运行情况如图 3 所示。在图 3(a) 中,机器人进入 U 型陷阱后运行前方出现连续障碍物,且有效位移距离较小。根据虚拟目标点设置规则,选取雷达感知范围内的斜前方障碍物作为目标障碍物,根据式(9)计算并增设虚拟目标点引导机器人移动。当出现图 3(b) 所示的情形,即机器人越过目标障碍物时,停止本轮的阈值更新,随即更新目标障碍物和虚拟目标点坐标,防止路径震荡。为解决此过程中虚拟目标点冗余更新问题,引入虚拟目标点变化阈值 d_1 。若虚拟目标点的变化距离小于 d_1 ,则跳过本轮更新,直至变化距离达到该阈值。

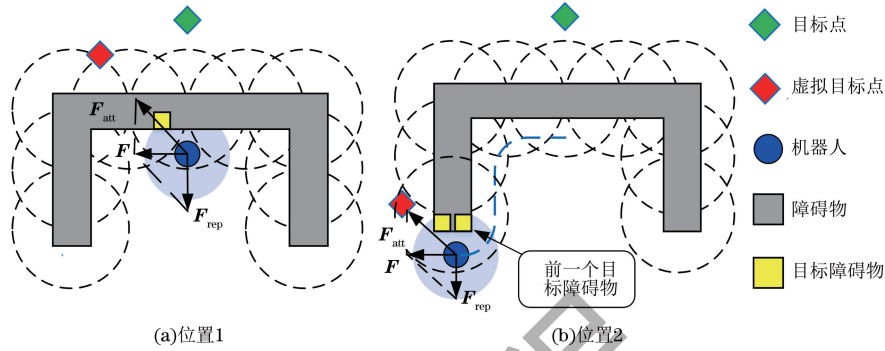


图 3 引入虚拟目标点后机器人的移动轨迹

Fig. 3 The moving trajectory of the robot by introducing the virtual target point

2.2 多 U 型复杂陷阱解决策略

机器人在虚拟目标点的引导下能成功走出单 U 型陷阱区域。当出现更为复杂的多 U 型复杂陷阱时,机器人避障过程的累计转角超过了 180° , 此时机器人会继续朝目标点前进并再次被困。根据多 U 型障碍物特点,机器人在陷阱中向某一方向运行时,需要转变运行方向才能摆脱陷阱,完成避障,因此,设计多 U 型复杂陷阱解决策略。具体设计步骤如下:

1) 记录机器人进入陷阱后的累计转角 θ_{cta} 。设 θ_{cta} 初始值为 0, 机器人左转和右转角度分别为正值和负值,逐步累加机器人每一步的转角于 θ_{cta} 。

2) 判断机器人是否离开多 U 型陷阱。当走出陷阱回归正常运行时,目标点应处于机器人前方,且 $\theta_{cta} \in [-180^\circ, 180^\circ]$ 。若超出此范围,说明机器人仍处于陷阱区域,需继续执行虚拟目标点策略,直至走出陷阱。图 4 设置了 2 种多 U 型障碍物运行场景,示意了机器人摆脱多 U 型陷阱的移动过程。

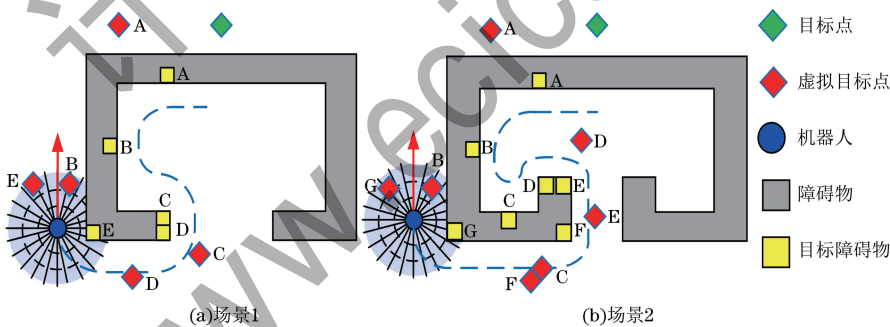


图 4 多 U 型障碍物场景中的规划过程

Fig. 4 The planning process in the multiple U-shaped obstacle scenario

3 模糊控制

当机器人处于多障碍物影响区域时,合力受斥力的影响较大,易产生较多冗余路径且安全性较差,因此,将 V-APF 算法与 FC 算法结合提出 FC-V-APF 算法。通过权重函数评估环境,选择模糊控制器计算输出辅助力,帮助机器人提前避障。

3.1 权重评估函数

算法设计了 FL_1 和 FL_2 两个相似的模糊控制器,均为双输入、单输出的结构。输入变量 r_R 和 r_L 分别为雷达传感器中线左右 90° 扇区内的数据评估得分,输出量 A_{Angle} 为采用重心法解模糊后的辅助力相对机器人运行方向的偏转角度,大小与当前引力相等。当 $r_R > r_L$ 时,启用 FL_1 控制器添加左方向的辅助力,反之,采用 FL_2 控制器添加右方向的辅助力。

机器人通过搭载的激光雷达获取周围 360° 范围内的环境信息,探测距离为 $0.12 \sim 3.0$ m。雷达模型如图 5 所示。其中, d_i 表示该雷达射线方向上最近障碍物的距离信息, $d_{12} = 0^\circ$ 的中线。

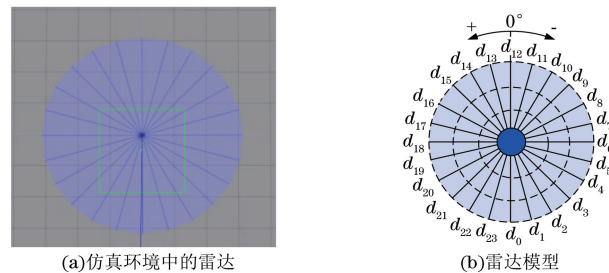


图 5 激光雷达传感器

Fig. 5 Lidar sensor

以右侧扇区为例,单根雷达得分 $r_{R,i}$ 和扇区得分 r_R 计算式如下:

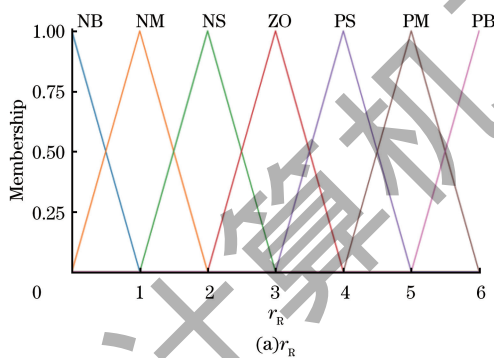
$$r_{R,i} = \lambda_i (3 - d_i) / 3 \quad (10)$$

$$r_R = \sum_{i=6}^{i+6} r_{R,i} \quad (11)$$

式中： $\{\lambda_i\}$ 为单调递增的等差数列。由式(10)可知，障碍物越靠近雷达中线且距离机器人越近，所获得的评估得分也会越高。考虑到正前方的障碍物对路径影响较大，将中线获得的评估得分共同计入左右扇区数据得分，以增大辅助力的设置角度，提高避障性能。

3.2 模糊控制器设计

模糊控制规则是模糊控制器的核心，建立在模糊语言变量的基础上^[25]。分别为 2 个模糊控制器设计模糊语言变量，将输入、输出变量模糊化。输入



量 r_R 的三角形隶属度函数如图 6(a)所示，与 r_L 的隶属度函数一致。 r_R 和 r_L 累计的最大评估得分均为 6，论域为 $[0, 6]$ ，将论域上的精确值依据隶属度函数归并到模糊子集 M 和 N 中，从而用语言变量值代替精确值。经模糊化后，对应的 M 和 N 均表示为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

因为机器人只有向前的运动，所以将控制器总输出量 A_{Angle} 的角度设置为 $[-1.5, 1.5]$ rad。以 FL_1 控制器为例， FL_1 输出向左的辅助力，角度设置为 $[0, 1.5]$ rad，模糊化后对应的模糊子集 Q 为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ ，输出量 A_{Angle} 的三角形隶属度函数如图 6(b)所示。

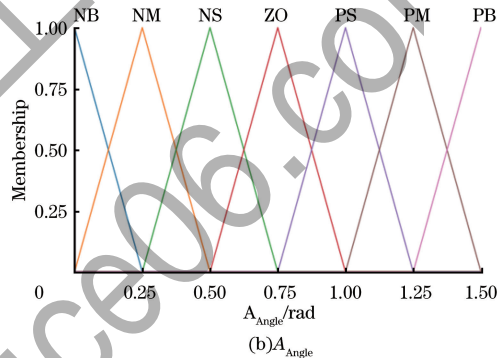


图 6 隶属度函数

Fig.6 Membership function

2 个模糊控制器均设计了 49 条模糊控制规则，并采用 Mamdani 法进行模糊推理。推理规则表示如下：

$$R^i: \text{If } r_R \text{ is } M^i, r_L \text{ is } N^i, \text{ then } A_{Angle} \text{ is } Q^i, \\ i = 1, 2, \dots, 49 \quad (12)$$

设计的模糊控制规则如表 1 所示。

表 1 模糊控制规则
Table 1 Fuzzy control rules

r_L	r_R						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	ZO	ZO	PS	PM
ZO	NM	NS	ZO	ZO	ZO	PS	PM
PS	NM	NS	ZO	ZO	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	PS	PM	PM	PB	PB	PB

FL_2 控制器输出向右的辅助力，角度设置为 $[-1.5, 0]$ rad，其他设计与 FL_1 控制器一致。

4 仿真实验测试

基于机器人操作系统 (ROS)，搭建离散型、特殊型和混合型障碍物场景，将设计的 FC-V-APF 算法与基本 APF 算法、文献[26]中的 F-DWA 算法和

文献[27]中的 A-APF 算法进行对比实验，测试所规划路径的性能。

4.1 仿真环境搭建

选用 TurtleBot 机器人作为仿真测试模型^[28]，如图 7 所示。机器人大小为 $138 \text{ mm} \times 178 \text{ mm} \times 192 \text{ mm}$ ，线速度 v 和角速度 ω 通过左右驱动轮的速度 v_l, v_r 以及轮间距 d_{wb} 计算得出：

$$\begin{cases} v = (v_r + v_l) / 2 \\ \omega = (v_r - v_l) / d_{wb} \end{cases} \quad (13)$$

式中：线速度和角速度的最大值分别为 0.22 m/s 和 2.84 rad/s 。

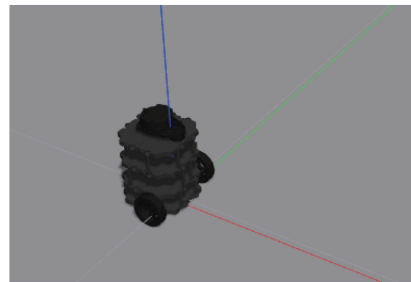


图 7 TurtleBot 机器人

Fig.7 TurtleBot robot

将遵循坐标系右手定则的里程计坐标系作为参考坐标系。机器人在 t 时刻的坐标为 (x_t, y_t) ，位姿角度 θ_t 为机器人正方向与 x 轴正方向组成的夹

角,位姿 S 表示为:

$$S = [x_t, y_t, \theta_t] \quad (14)$$

若以 T 为速度指令周期,机器人在 $t+1$ 时刻的位姿为:

$$\begin{cases} x_{t+1} = x_t + vT \cos \theta_t \\ y_{t+1} = y_t + vT \sin \theta_t \\ \theta_{t+1} = \theta_t + T\omega \end{cases} \quad (15)$$

里程计坐标系下机器人的运动过程如图 8 所示。

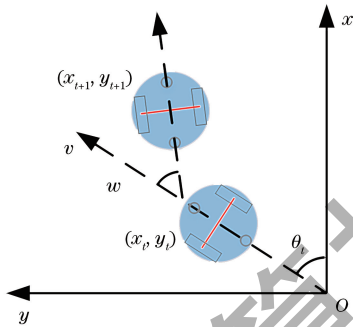
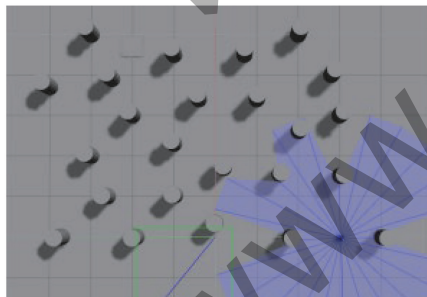


图 8 机器人的运动过程

Fig.8 The motion process of the robot

Gazebo 作为 ROS 中的 3D 动态模拟器,能提供高保真度的物理模拟^[29]。利用Gazebo搭建仿真测



(a)Gazebo中的仿真环境

试环境。计算机配置为:Ubuntu 16.04 系统,ROS,处理器 Intel® Core i5-6300HQ,运行内存 8 GB,主频 2.3 GHz。

Gazebo 不具备数据记录功能,因此通过 Rviz 实现机器人运行轨迹的可视化。实验中机器人初始位置为起点,圆柱体和正方体为障碍物,地图方格边长为 1 m,边长 0.2 m 的方格为虚拟目标点。算法部分参数设置如表 2 所示。

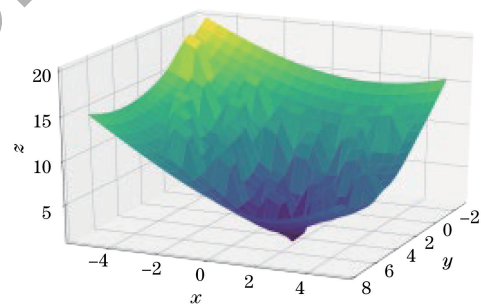
表 2 算法参数设置

Table 2 Algorithm parameters setting

参数	数值
引力增益系数 ϵ	4.0
斥力增益系数 η	1.0
障碍物作用范围 ρ_0	3.0
引力作用阈值 d_g	5.0
距离调节参数 β_1, β_2	0.6, 0.6
虚拟目标点更新阈值 d_{ur} 和变化阈值 d_l	2.5, 0.2

4.2 离散型障碍物环境中的仿真

图 9(a)为搭建的离散型障碍物仿真环境,图 9(b)为图 9(a)环境中产生的势场图。该环境中障碍物分布较密集,机器人初始位置为(0, -3),目标点为(5, 2)。



(b)势场图

图 9 离散型障碍物仿真环境

Fig.9 Discrete obstacle simulation environment

图 10(a)~图 10(d)分别为传统 APF 算法、F-DWA 算法、A-APF 算法和 FC-V-APF 算法规划的路径,路径长度、规划步数和耗时分别如表 3 所示。从图中可以看出:4 种算法均能够成功规划出一条从给定起点到终点的无碰撞路径,但 APF 算法控制

的机器人在 A、B、C 点处只有靠近障碍物时才能进行避障,路径平滑度和安全性较差;F-DWA 算法规划的路径较长,长度为 8.2 m;A-APF 算法规划的路径长度较之缩短,但机器人在 E 点附近存在小幅震荡;相比之下,FC-V-APF 算法在 F、G、H 点处通

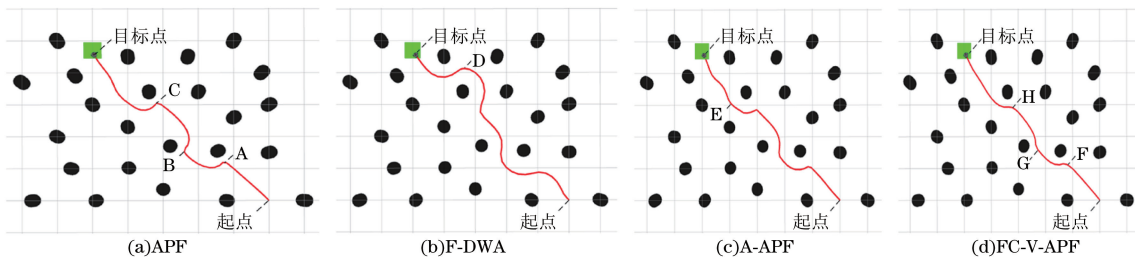


图 10 离散型障碍物场景中的路径规划

Fig.10 Path planning in discrete obstacle scenario

过模糊控制器提供辅助力,能及时避障并减少路径冗余,耗时较少,得到的路径较短且更为平直光滑,规划的路径长度为 7.0 m,耗时 38.6 s。

表 3 离散型障碍物场景中的规划数据

算法	路径长度/m	规划步数/步	耗时/s
APF	7.9	223	44.9
F-DWA	8.2	235	48.3
A-APF	7.5	223	45.0
FC-V-APF	7.0	185	38.6

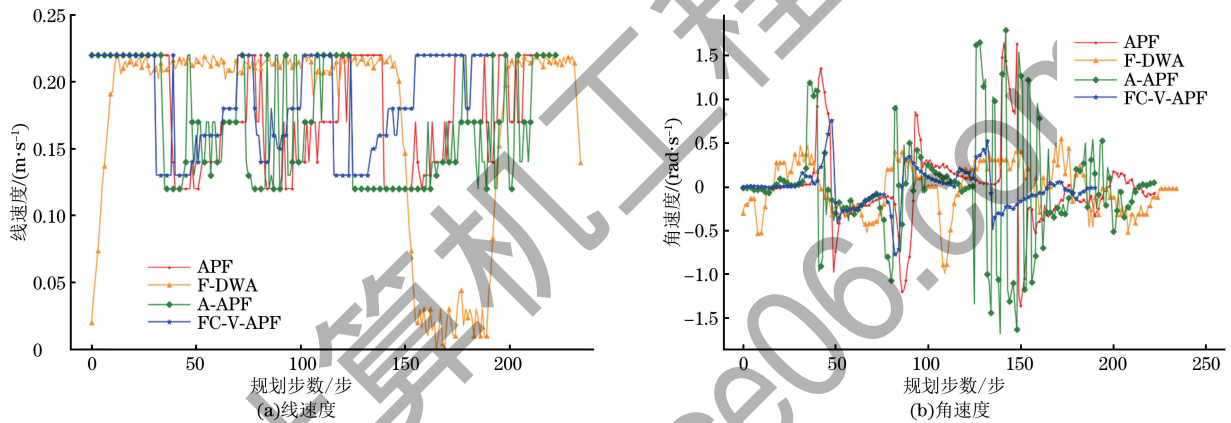


图 11 离散型障碍物场景中的速度曲线

Fig.11 Speed curves in discrete obstacle scenario

4.3 特殊型障碍物环境中的仿真

特殊障碍物类型中的多 U 型和嵌套 U 型障碍物较为复杂。搭建这两种仿真环境,如图 12 所示。图 12(a)中起点为 (-5, 0), 目标点为 (7, 0); 图 12(b)中起点为 (-2, 0), 目标点为 (8, 0)。

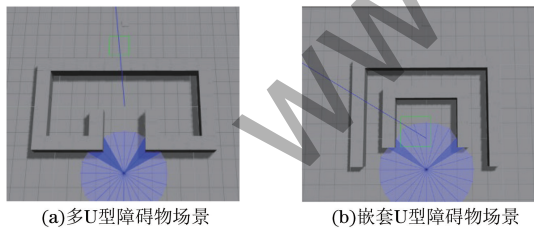


图 12 特殊型障碍物仿真环境

Fig.12 Special obstacle simulation environment

图 11(a)和图 11(b)分别给出了 4 种算法在规划过程中的线速度和角速度曲线。其中:APF 算法和 A-APF 算法在 C、E 点附近规划步数达到 150 步,角速度波动幅度较大,机器人左右摆动,导致路径平滑度降低;F-DWA 算法在 D 点道路狭窄的区域规划步数达到 150 步,线速度降幅较大,规划效率降低;FC-V-APF 算法在整个规划中能保持较高的线速度,且角速度曲线波动幅度较小,机器人运行更平稳,规划的路径更平滑。

图 13 给出了 4 种算法在多 U 型障碍物场景中规划的路径。由于传感器探测范围有限,机器人沿目标点方向进入障碍物陷阱。其中:APF 算法、F-DWA 算法和 A-APF 算法控制的机器人均在局部极小值陷阱处被困,无法到达目标点;FC-V-APF 算法规划至 A 点时开始增设虚拟目标点引导机器人避障,当机器人运动到 B 点时累计转角超过 180°且目标点出现在前方,此时尚未摆脱陷阱,通过多 U 型陷阱的解决策略继续增设虚拟目标点,直至规划到 C 点处完全摆脱陷阱。该过程中虚拟目标点增设了 27 个,规划的路径较为光滑且能避免角落的无效探索,路径长度为 41.7 m,规划步数为 1 131 步,耗时 227.8 s。

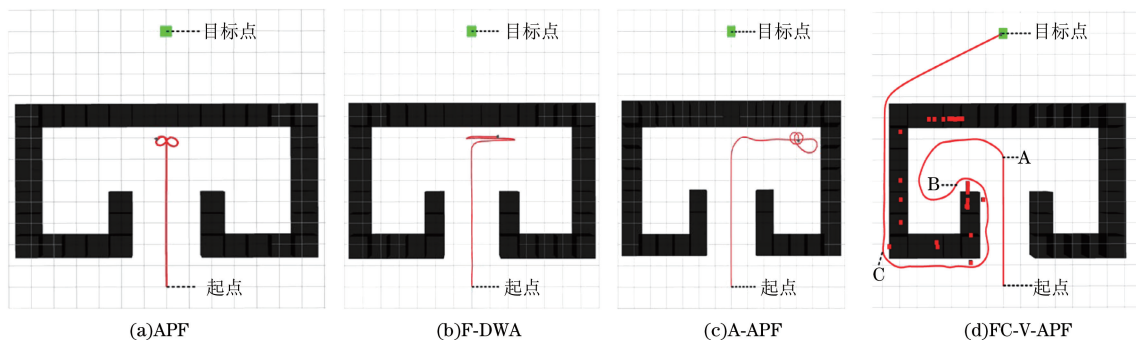


图 13 多 U 型障碍物场景中的路径规划

Fig.13 Path planning in multiple U-shaped obstacle scenario

图 14 为 4 种算法在嵌套 U 型障碍物场景中规划的路径。其中: APF 算法、F-DWA 算法和 A-APF 算法均无法控制机器人逃出内层的 U 型障碍物陷阱;而 FC-V-APF 算法规划至 A 点处时开始增设虚拟目标点,直至到 B 点离开陷阱时停止增设,

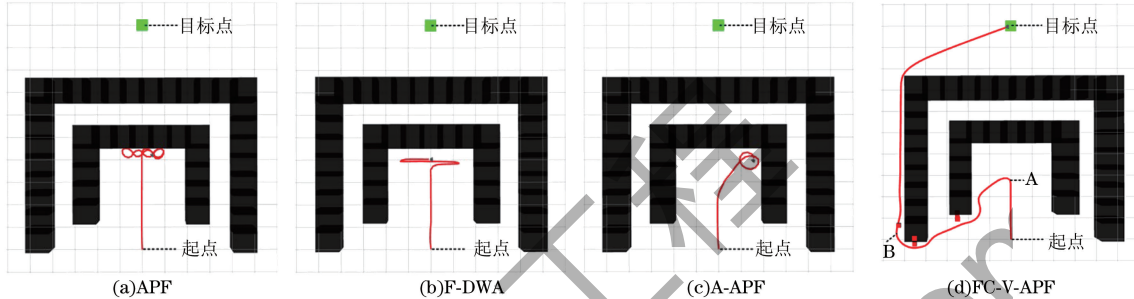


图 14 嵌套 U 型障碍物场景中的路径规划

Fig. 14 Path planning in nested U-shaped obstacle scenario

4.4 混合型障碍物环境中的仿真

混合型障碍物是离散型和特殊型障碍物的组合。为验证所设计算法的综合避障性能,搭建混合型障碍物场景 1 和混合型障碍物场景 2,如图 15 所示。图 15(a)中起点和目标点分别为(-3, 4.5)和(4.5, -2);图 15(b)中起点和目标点分别为(-3.5, 4.5)和(2.5, 5.5)。

图 16 给出了 4 种算法在混合型障碍物场景中规划的路径。可以看出: APF 算法和 F-DWA 算法控制的机器人分别在第 1 处陷阱的 A、B 点处被困; A-APF 算法在后续 U 型陷阱中的 D 点附近无法规划出有效路径; FC-V-APF 算法规划至 E、

期间虚拟目标点累计设置数量为 8 个,避免了机器人进入 2 组障碍物间的区域,规划的路径长度为 41.7 m,规划步数为 610 步,耗时 122.9 s。该算法的普适性较强,适用于较为复杂的嵌套 U 型障碍物陷阱,具有较好的规划性能和稳定性。

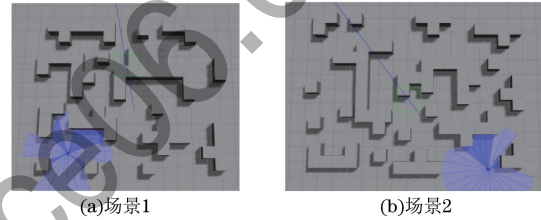


图 15 混合型障碍物仿真环境

Fig. 15 Hybrid obstacle simulation environment

G 点处开始通过虚拟目标点法引导机器人避障,并在 F、H 点处停止增设,期间累计设置虚拟目标点 13 个。该算法能快速规划出一条较为光滑且长度较短的可行路径,规划路径长度为 18.9 m,规划步数为 494 步,耗时 99.7 s。

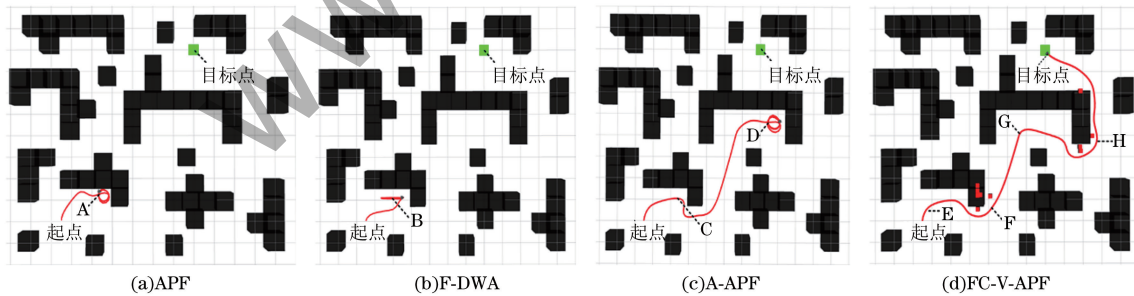


图 16 混合型障碍物场景 1 中的路径规划

Fig. 16 Path planning in hybrid obstacle scenario 1

图 17 为混合型障碍物场景 2 中 4 种算法规划的路径。可以看出: APF 算法、F-DWA 算法和 A-APF 算法均无法规划出可通行路径; FC-V-APF 算法规划至 A 点处开始增设虚拟目标点,至 B 点处结束,完成第 1 轮的陷阱避障过程,机器人运行至 C 点处继续增设,直至到 D 点处完成第 2 轮的避障过程时结束,2 轮避障共设置 7 个虚拟目标点,规划出的路径精度较高且长度较短,路径长度为 21.5 m,规划步数为 575 步,耗时 116.2 s,表明 FC-V-APF

算法具有较好的连续避障能力。

从上述各仿真环境中的规划效果来看, APF 算法、F-DWA 算法和 A-APF 算法无法完成特殊型和混合型障碍物场景中的规划任务,而 FC-V-APF 算法的普适性较强、规划性能较好,在各场景中均能规划出从起点到目标点的无碰撞路径,规划数据如表 4 所示。相较于其他 3 种算法, FC-V-APF 算法能有效解决路径冗余和局部极小值陷阱问题,并且规划效率更高、路径更优、耗时更短。

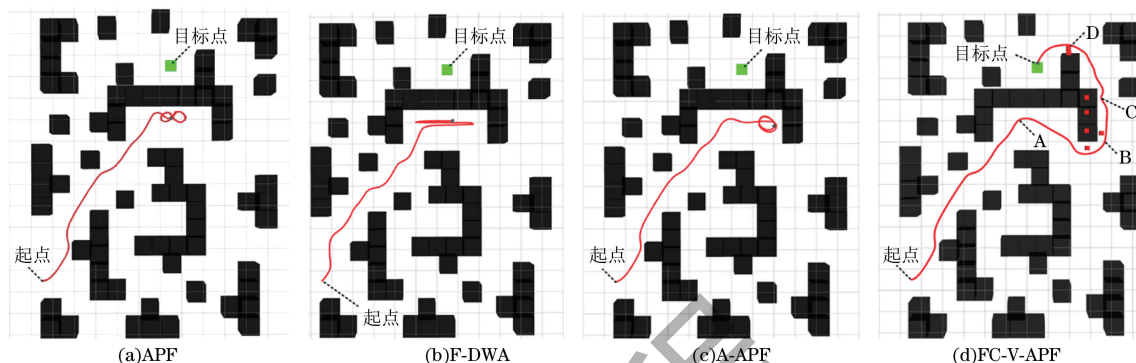


图 17 混合型障碍物场景 2 中的路径规划

Fig. 17 Path planning in hybrid obstacle scenario 2

表 4 特殊型和混合型障碍物场景中的规划数据

Table 4 Planning data in special and mixed obstacle scenarios

场景	路径长度/m	规划步数/步	耗时/s
多 U 型障碍物场景	41.7	1 131	227.8
嵌套 U 型障碍物场景	22.9	610	122.9
混合型障碍物场景 1	18.9	494	99.7
混合型障碍物场景 2	21.5	575	116.2

5 结束语

本文提出了一种基于模糊控制和虚拟目标点的局部路径规划算法 FC-V-APF。算法通过激光雷达获取环境信息,采用改进势场函数进行路径规划,解决了引力过大和目标不可达问题,具有较高的实时性和灵活性;设计虚拟目标点法和多 U 型陷阱解决策略帮助机器人摆脱陷阱,同时加入越障机制和更新阈值,避免了路径震荡并减少了实时计算量;在多障碍区域,将环境评估数据输入模糊控制器提供辅助力,帮助机器人提前避障,减少了路径冗余。最后在 ROS 中搭建离散型、特殊型和混合型障碍物场景进行对比实验,验证了算法的有效性和普适性。考虑到实际工作环境更复杂且存在动态障碍物,因此把机器人和障碍物的相对运行状态作为优化目标,将算法应用于动态障碍物场景,将是后续的研究方向。

参考文献

[1] 李晓旭, 马兴录, 王先鹏. 移动机器人路径规划算法综述[J]. 计算机测量与控制, 2022, 30(7): 9-19.
LI X X, MA X L, WANG X P. A survey of path planning algorithms for mobile robots[J]. Computer Measurement & Control, 2022, 30(7): 9-19. (in Chinese)

[2] SÁNCHEZ-IBÁÑEZ J R, PÉREZ-DEL-PULGAR C J, GARCÍA-CEREZO A. Path planning for autonomous mobile robots: a review[J]. Sensors, 2021, 21(23): 7898.

[3] 刘国名, 李彩虹, 李永迪, 等. 基于改进 PPO 算法的机器人局部路径规划[J]. 计算机工程, 2023, 49(2): 119-126, 135.

LIU G M, LI C H, LI Y D, et al. Local path planning of robot based on improved PPO algorithm [J]. Computer Engineering, 2023, 49(2): 119-126, 135. (in Chinese)

[4] ALSHAMMREI S, BOUBAKER S, KOLSI L. Improved Dijkstra algorithm for mobile robot path planning and obstacle avoidance[J]. Computers, Materials & Continua, 2022, 72(3): 5939-5954.

[5] ZHANG H X, TAO Y D, ZHU W L. Global path planning of unmanned surface vehicle based on improved A-star algorithm[J]. Sensors, 2023, 23(14): 6647.

[6] LIU B X, LIU C. Path planning of mobile robots based on improved RRT algorithm[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2216(1): 012020.

[7] 刘建娟, 薛礼敬, 张会娟, 等. 融合改进 A* 与 DWA 算法的机器人动态路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2021, 57(15): 73-81.

LIU J J, XUE L Q, ZHANG H J, et al. Robot dynamic path planning based on improved A* and DWA algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2021, 57(15): 73-81. (in Chinese)

[8] FAN X J, GUO Y J, LIU H, et al. Improved artificial potential field method applied for AUV path planning[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 6523158.

[9] XU T Y, ZHOU H B, TAN S X, et al. Mechanical arm obstacle avoidance path planning based on improved artificial potential field method [J]. Industrial Robot: The International Journal of Robotics Research and Application, 2022, 49(2): 271-279.

[10] GUO J, LI C Y, GUO S X. A novel step optimal path planning algorithm for the spherical mobile robot based on fuzzy control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 1394-1405.

[11] 郭娜, 李彩虹, 王迪, 等. 结合预测和模糊控制的移动机器人路径规划[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(8): 104-109.
GUO N, LI C H, WANG D, et al. Path planning of mobile robot based on prediction and fuzzy control[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(8): 104-109. (in Chinese)

[12] TELI T A, WANI M A. A fuzzy based local minima avoidance path planning in autonomous robots [J]. International Journal of Information Technology, 2021, 13(1): 33-40.

[13] 孙鹏耀, 黄炎焱, 潘尧. 基于改进势场法的移动机器人路径规划[J]. 兵工学报, 2020, 41(10): 2106-2121.
SUN P Y, HUANG Y Y, PAN Y. Path planning of mobile robots based on improved potential field algorithm[J]. Acta Armamentarii, 2020, 41(10): 2106-2121. (in Chinese)

[14] WANG Y, CHEN X Q, RAN D C, et al. Spacecraft formation reconfiguration with multi-obstacle avoidance under navigation and control uncertainties using adaptive artificial

- potential function method[J]. *Astrodynamics*, 2020, 4(1): 41-56.
- [15] 袁俊杰, 姚家强. 基于调和场的连续型机械臂运动规划[J]. *北方工业大学学报*, 2020, 32(2): 70-77, 98.
YUAN J J, YAO J Q. Motion planning for continuum manipulators based on harmonic fields[J]. *Journal of North China University of Technology*, 2020, 32(2): 70-77, 98. (in Chinese)
- [16] DAI J Y, QIU J, YU H C, et al. Robot static path planning method based on deterministic annealing [J]. *Machines*, 2022, 10(8): 600.
- [17] 尹洋, 桂凡, 焦绍光, 等. 基于虚拟水势场的路径规划局部极小问题研究[J]. *海军工程大学学报*, 2021, 33(3): 98-105.
YIN Y, GUI F, JIAO S G, et al. Research on local minima problem of path planning based on virtual water potential field[J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2021, 33(3): 98-105. (in Chinese)
- [18] 易先军, 耿翰夫, 付龙, 等. 模糊改进人工势场法机器人路径规划[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2021(5): 65-68.
YI X J, GENG H F, FU L, et al. Mobile robot path planning based on fuzzy improved artificial potential field method [J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2021(5): 65-68. (in Chinese)
- [19] 纪迪. 人工势场法在机器人避障路径规划中的应用[J]. *软件导刊*, 2010, 9(7): 83-85.
JI D. Application of collision avoidance path planning of mobile robot based on artificial potential field method[J]. *Software Guide*, 2010, 9(7): 83-85. (in Chinese)
- [20] ZHENG Y, SHAO X M, CHEN Z, et al. Improvements on the virtual obstacle method [J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2020, 17 (2): 172988142091176.
- [21] WU X, GONG S, XIE P. Local path planning based on improved artificial potential field using fuzzy repulsion force for robot[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2014, 2(3): 48-60.
- [22] 许万, 程兆, 朱力, 等. 一种基于改进人工势场法的局部路径规划算法[J]. *电子测量技术*, 2022, 45(19): 83-88.
XU W, CHENG Z, ZHU L, et al. A local path planning algorithm based on improved artificial potential field method [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2022, 45 (19): 83-88. (in Chinese)
- [23] 胡杰, 张华, 傅海涛, 等. 改进人工势场法在移动机器人路径规划中的应用[J]. *机床与液压*, 2021, 49(3): 6-10.
HU J, ZHANG H, FU H T, et al. Application of improved artificial potential field method in path planning of mobile robots[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2021, 49(3): 6-10. (in Chinese)
- [24] ROSTAMI S M H, SANGAIAH A K, WANG J, et al. Obstacle avoidance of mobile robots using modified artificial potential field algorithm[J]. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2019(1): 70.
- [25] 徐博, 张娇, 王超. 一种基于人工势场多 AUV 集群的实时避障方法[J]. *中国舰船研究*, 2018, 13(6): 66-71.
XU B, ZHANG J, WANG C. A real-time obstacle avoidance method for multi-AUV cluster based on artificial potential field[J]. *Chinese Journal of Ship Research*, 2018, 13(6): 66-71. (in Chinese)
- [26] WANG H J, MA X H, ZHU L. Obstacle avoidance path planning of mobile robot based on improved DWA [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2022, 2383 (1): 012098.
- [27] GUO T Z, WANG J, WANG Z M, et al. Research on path planning of mobile robot with a novel improved artificial potential field algorithm [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2022, 2022: 5692350.
- [28] 张博, 周红生. 基于 RL-APF 算法的巡检机器人避障研究[J]. *组合机床与自动化加工技术*, 2023(6): 7-10.
ZHANG B, ZHOU H S. Research on obstacle avoidance of inspection robot based on RL-APF algorithm[J]. *Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique*, 2023(6): 7-10. (in Chinese)
- [29] 叶强强, 郑明魁, 邱鑫. 基于 ROS 的室内自主导航移动机器人系统实现[J]. *传感器与微系统*, 2022, 41(2): 90-93.
YE Q Q, ZHENG M K, QIU X. Realization of indoor autonomous navigation mobile robot system based on ROS [J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2022, 41(2): 90-93. (in Chinese)

编辑 金胡考