

文章编号: 1000-5862(2014)01-0083-06

复杂环境中移动机器人路径规划

徐雪松

(华东交通大学电气与电子工程学院 江西 南昌 330013)

摘要: 分析了传统人工势场法存在的缺陷,提出一种沿斥力场等势线环绕障碍物避障的移动机器人路径规划算法.仿真实验结果表明:该算法在复杂环境中路径规划方面能够获得较好的效果.

关键词: 路径规划;复杂环境;斥力场等势线

中图分类号: TP 242 **文献标志码:** A

0 引言

路径规划是移动机器人研究的重要内容,其任务是在特定环境条件下,寻找一条满足一定性能约束的由起点到终点的无碰撞路径.针对路径规划问题人们提出了很多方法^[1].不过,如何提高算法在复杂非结构化环境中的适应能力,从而实现快速有效的机器人导航仍然是一个难点.

从规划范围来看,移动机器人路径规划方法大致分为 2 类:(i) 全局规划,如基于地图构建的方法^[2-4]、基于人工智能的方法^[5-7]等.这类方法需要了解整体环境信息,在此基础上,一次性规划出从起点到终点的路径.全局规划算法的优点是可以获得全局最优路线,不容易陷入局部极小点;其缺点是如果环境条件复杂,求得全局最优解比较困难,计算量大,规划时间长,实时性差.(ii) 局部规划,如人工势场法^[8]等.局部规划方法一般只需要少量局部信息,通过分步探索式前进完成整体路径的规划.其优点是需要的信息少、规划速度快,实时性强;缺点是由于只了解局部信息,难以达到全局最优,容易陷入陷阱,导致规划失败.

人工势场法(APF)是局部规划算法中最具代表性的算法,其算法结构简单、规划速度快,是目前移动机器人路径规划的常用方法.不过,传统 APF 存在较多缺陷,如在多个障碍物间不能发现路径,在障碍物前容易出现振荡,容易陷入势能陷阱,当目标点紧邻障碍物时,难以达到目标等^[9].因此,不少研究

人员致力于 APF 方法的改进工作,如通过增加虚拟引力源,使物体摆脱势能陷阱;通过改造势能函数,使得目的地成为全局势能阱点,改善紧邻障碍物的目标的可达性^[10-11]等.但不少改进方法在障碍物众多的复杂非结构化环境中的应用效果仍然不佳^[1].

分析 APF 产生问题的原因,一方面固然与信息量过少,难以从全局来考虑有关;另一方面,也与它所采用的避障方式有关.APF 的基本思路是通过让障碍物对机器人产生排斥作用,将机器人推离障碍物.这种方法固然有利于躲开障碍物,但是这种“推”的方式也容易使规划路径产生反复振荡.除了“推”的方式以外,“绕”的方式同样能够避开障碍物.沿墙走^[12]、极限环^[3]等方法就是基于“绕”的思路避障的.问题是如果在复杂障碍物环境下,沿怎样一条路径绕开障碍物仍然是一个尚未很好解决的问题.本文将人工势场与“绕”的思路相结合,提出一种沿斥力场等势线绕开障碍物的机器人路径规划算法.仿真实验结果表明:该算法能够较好地克服传统人工势场法的缺陷,尤其在复杂环境中的路径规划方面表现出较好的性能.

1 人工势场法简介

人工势场法^[8]的主要思想:假设机器人在特定环境下受到 2 种虚拟力场的作用:(i) 由于目标点的吸引而形成的引力场对机器人的引力作用;(ii) 由于障碍物的排斥而存在的斥力场对机器人的斥力作用.机器人的实际运动方向取决于所受 2 种力的合

收稿日期: 2013-11-02

基金项目: 国家自然科学基金(61165005, 51167005)和江西省教育厅科技研究课题(GJJ11436)资助项目.

作者简介: 徐雪松(1970-),江西鄱阳人,副教授,工学博士,主要从事计算智能与智能控制的研究.

力方向.

引力场势能函数为

$$U_{att} = \frac{1}{2}k(X - X_g)^2, \quad (1)$$

斥力场势能函数为

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2}\eta(1/\rho - 1/\rho_0)^2 & \rho \leq \rho_0, \\ 0, & \rho > \rho_0, \end{cases} \quad (2)$$

总势能函数为

$$U = U_{att} + \sum_{i=1}^N U_{rep}^i, \quad (3)$$

其中 U_{att} 为目标位置的引力势能 k 为引力势能常量 $X = (x \ y)$ 为机器人位置向量 $X_g = (x_g \ y_g)$ 为机器人目标位置向量. U_{rep} 为障碍物的斥力势能 η 为斥力场常量 ρ 为机器人与障碍物的最短距离 ρ_0 为障碍物的最大作用距离 N 为障碍物个数.

根据(1)式 机器人受到的引力为

$$F_{att} = -grad(U_{att}) = k(X_g - X), \quad (4)$$

根据(2)式 机器人受到单个障碍物的斥力为

$$F_{rep} = -grad(U_{rep}) = \begin{cases} \eta(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}) \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial X} & \rho \leq \rho_0, \\ 0, & \rho > \rho_0, \end{cases} \quad (5)$$

根据(4) ~ (5)式 机器人受到的合力为

$$F = F_{att} + \sum_{i=1}^N F_{rep}^i. \quad (6)$$

2 基于斥力场等势线的路径规划

2.1 基本思路

传统 APF 采用“推开”的方式避开障碍物. 这种避障方式对于防止机器人与障碍物碰撞是有利的, 但是对于机器人正确判断前进方向却有负面影响. 如图 1 所示环境, 曲线 1 和曲线 2 均为障碍物的斥力场等势线, F_1 为引力, F_2 为斥力, F_3 是 A 点斥力等势线切线方向. 当机器人处于 A 点时, 如果采用“推开”的策略, 则机器人将沿 F_2 方向返回, 以降低障碍物对机器人的影响. 然而, 由于障碍物依然阻挡机器人前进方向, 此时贸然减小障碍物对机器人的影响, 就容易使机器人误以为已经避开障碍物, 并恢复 F_1 的前进方向, 从而形成振荡. 如果机器人处于一个凹形区域, 就容易陷入势能陷阱.

实际上, “绕”的方式也是一种有效的避障方法. 如果将图 1 看成一张地形图, 旅行者从起点出发

去目标点 C, 障碍物是一座高山, 曲线 1 和曲线 2 均为山的等高线. 当他走到 A 点时, 高山阻路, 他既不会选择 F_1 方向翻越高山, 也不会按照 F_2 方向返回, 一个有效的方法是按 F_3 方向, 沿曲线 1 绕过高山. 与“推”不同, “绕”的方式在障碍物威胁没有消除

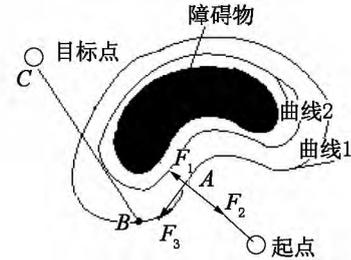


图 1 基于斥力场等势线的路径规划示意图

之前, 机器人始终与障碍物有着密切接触, 这使得机器人可以一直感知障碍物的存在, 因此不容易产生误判, 也就能有效避免传统 APF 存在的振荡、容易陷入陷阱等问题. 基于上述想法, 本文采取了如下的路径规划思路: 将障碍物的斥力场看成是一个斥力势能高山, 当机器人在 A 点遭遇障碍物时, 则沿着斥力场的等势线由 A 点运动到 B 点, 当障碍物已经不再阻挡前进的道路时, 便忽略障碍物的影响, 在 C 点引力作用下, 沿直线 BC 奔向目标点. 一般来说, 只要斥力场是孤立的, 其外围等势线将是一组包围产生该斥力场的所有障碍物的封闭曲线, 沿着这些等势线运动应该可以绕到这些障碍物的另一面, 实现避障目的.

2.2 环境建模

进行路径规划之前, 首先需要建立环境模型. 为了减小计算量, 环境模型可以采用栅格法建立. 设整个环境划分成 n 个栅格, 则环境 E 定义为

$$E = \{ \bar{G}, G \} \\ \bar{G} = \{ \bar{g}_i \mid i = [1 \ 2 \ \dots \ n_1] \} = \{ o_j \mid j = [1 \ 2 \ \dots \ n_2] \}, \quad (7) \\ G = \{ g_k \mid k = [1 \ 2 \ \dots \ n_3] \}, \\ n = n_1 + n_3, \ n_2 \leq n_1,$$

其中 \bar{g} 为障碍物栅格, g 为非障碍物栅格. $o_j = \{ \bar{g} \}$ 为第 j 个独立的障碍物. 独立障碍物是指可以通过障碍物栅格连通的所有障碍物栅格集合.

考虑到对于相近的独立障碍物, 其斥力场可能存在重叠, 并融合在一起, 其斥力场外围等势线将包围所有相关独立障碍物. 因此, 为了建立孤立的斥力场, 将斥力场能够融合的独立障碍物合并成一个独立障碍物群. 实际赖以绕行的斥力场由这个障碍物

群共同产生. 第 i 个独立障碍物群 O_i 可以表示为 $O_i = \{o_j\}$, 且存在 $\min(\rho(\bar{g}_{k1}, \bar{g}_{k2})) < 2\rho_0$. 当 $\bar{g}_{k1} \in o_{j1} \in O_i$,

$$\bar{g}_{k2} \in o_{j2} \in O_i, \quad (8)$$

其中 $\rho(\bar{g}_{k1}, \bar{g}_{k2})$ 指栅格 $\bar{g}_{k1}, \bar{g}_{k2}$ 间的距离; ρ_0 为斥力作用距离.

从 (8) 式的定义可知, 所谓独立障碍物群是指最小间距小于两倍斥力作用距离, 斥力场会交叉的所有独立障碍物的集合. 整个障碍物环境可以看成是一定数目的独立障碍物群的集合.

2.3 算法步骤

规划方法的基本思路是: 如果机器人没有探测到障碍物, 则机器人沿目标点引力指示方向运动; 如果探测到障碍物, 且障碍物阻挡前进道路, 则机器人沿独立障碍物群的斥力场外围等势线运动, 直至绕开障碍物群才摆脱它. 每个规划周期的具体计算步骤如下:

(i) 计算机器人受到的斥力的合力.

(ii) 判断斥力是否为 0, 如果为 0, 则认为不存在障碍物, 计算引力方向, 置引力方向为机器人前进方向, 转 (v); 否则认为遭遇障碍物, 转 (iii).

(iii) 判断所遭遇的独立障碍物群是否遮挡机器人, 如果没有, 则忽略斥力影响, 计算引力方向, 置引力方向为机器人前进方向, 转 (v); 否则, 则忽略引力作用, 单独考虑斥力作用, 转 (iv).

(iv) 计算所处位置等势线切线方向; 判断顺时针还是逆时针绕行; 根据斥力大小计算补偿角度; 结合等势线切线方向, 绕行方式和补偿角度, 计算前进方向.

(v) 输出结果, 控制机器人运行, 转 (i) 继续下一个控制周期.

2.4 算法说明

2.4.1 引力方向计算 机器人受目标点的引力方向角为 $\theta_{att} = \text{angle}(X_g - X)$, 其中 angle 表示求向量的幅角.

2.4.2 斥力大小及方向计算 机器人受独立障碍物群 O_i 的斥力为 $F_{rep} = \sum_{k=1}^m F_{rep}^k$, 其中当 $\rho_k \leq \rho_0$ 时

$$F_{rep}^k = \eta \left(\frac{1}{\rho_k} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{1}{\rho_k} \frac{\partial \rho_k}{\partial X}; \text{ 当 } \rho_k > \rho_0 \text{ 时 } F_{rep}^k = 0. F_{rep}^k$$

为栅格 $\bar{g}_k \in O_i$ 对机器人的斥力, ρ_k 为 \bar{g}_k 与机器人的距离, ρ_0 为斥力作用距离. m 为 O_i 中障碍物栅格的个数. 斥力的方向角为 $\theta_{rep} = \text{angle}(F_{rep})$.

2.4.3 等势线的切线方向计算 等势线的切线方向为斥力的垂直方向, 因此机器人所处位置的等势线的切线方向角为 $\theta_1 = \theta_{rep} + L\pi/2$, L 表示绕行方式.

2.4.4 绕行方式的计算 沿等势线绕行 2 种方式: (i) 顺时针绕行, (ii) 逆时针绕行. 由于等势线是一个封闭曲线, 2 种方式都能避开障碍物. 但是, 一般情况下, 不同绕行方式下所走的路程不同. 可以通过计算 2 种绕行等势线的长短来确定绕行方向, 不过计算复杂. 本文给出一种简单的绕行方式判断方法. 基本思路是这样的: 如果机器人被障碍物阻挡, 则机器人与目标点的连线可以将障碍物分成左右两块, 机器人绕小的一块运动. 两块大小的比较可以通过计算障碍物重心处于连线左侧还是右侧来判断. 具体计算方法如下: 设机器人所处位置为 $X = (x, y)$, 机器人目标位置为 $X_g = (x_g, y_g)$, 当前面临的独立障碍物群为: $O_i = \{\bar{g}_j | j \in \{1, 2, \dots, n\}\}$, 其中 \bar{g}_j 的坐标为 $X_{gj} = (x_{gj}, y_{gj})$, 则 O_i 的重心位置为 $X_{O_i} = \sum_{j=1}^n X_{gj} / n$, 由机器人指向目标点的向量为 $A_1 = X_g - X$, 由机器人指向障碍物重心的向量为 $A_2 = X_{O_i} - X$, A_1 相对 A_2 的旋转角度为 $\theta_2 = \text{angle}(A_1/A_2)$, θ_2 的取值范围为 $(-\pi, \pi]$, 则 $L = \text{sgn}(\theta_2)$, 其中 sgn 为符号函数; L 为绕行方式, 取值为 1 或 -1. $L = 1$ 时, 为顺时针绕行, $L = -1$ 时为逆时针绕行. 绕行方式在机器人初次遇到障碍物群时计算, 其后, 为了保证绕行方式的一致, 始终沿用初次计算结果.

2.4.5 补偿角度计算 障碍物的等势线有无穷多条, 沿势能较高的等势线运动则与障碍物碰撞的危险大, 沿最外层等势线运动, 则容易脱离等势线. 因此, 机器人运动方向不能是严格的等势线切线方向, 而是在切线方向附加一个偏转角度, 即补偿角度. 当机器人沿势能较高的等势线运动时, 附加偏角向外, 使得机器人逐步向势能低的等势线迁移. 反之, 如果机器人沿势能很低的等势线运动, 则附加偏角向内, 使得机器人向势能高一些的等势线迁移, 以保证在障碍物的背面能够环绕障碍物不脱离. 补偿角度 θ_3 的计算方法为 $\theta_3 = \gamma \text{atan}(F_{rep} - \delta)$, 其中 γ 和 δ 为正常数, $0 < \gamma < 1$, atan 为反正切函数.

2.4.6 绕行时机器人前进角度计算 处于绕行状态下, 机器人前进角度 θ 根据等势线切线方向、绕行方式, 以及补偿角度计算为 $\theta = \theta_{rep} + \text{sgn}(\theta_2)(\pi/2 - \theta_3)$.

3 仿真实验

为了验证算法的规划效果,在 Matlab 环境下进行了仿真实验. 机器人移动场地大小为 200×200 个单位,其间分布着随机散布的障碍物. 障碍物大小不等,形状各异,有凸型结构,也有凹形结构,相互排列成较为复杂的图形. 移动机器人抽象成质点. 栅格大小为 1×1 个单位. 具体场地环境见图 2.

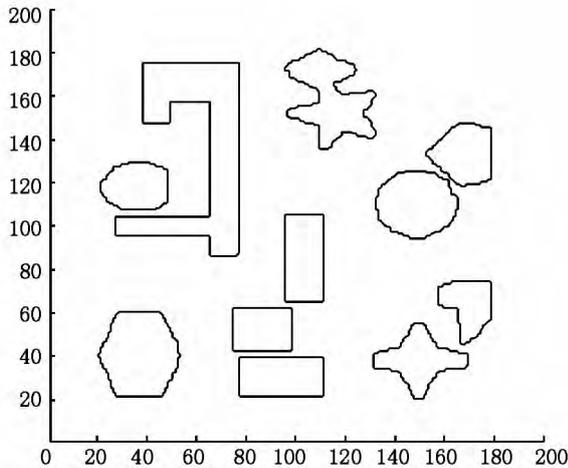


图 2 环境障碍物分布图

比较本文算法与经典 APF 算法规划效果. 2 种算法的参数: $k = 0.1$, $\eta = 10^5$, $\rho_0 = 7$ 个单位, $\gamma = 16$ 个单位, $\delta = 2$. 机器人运动速度为 3 个单位. 为了有针对性地比较算法特性,选择 3 种情况进行比较:

(i) 起点坐标(190,40) 终点坐标(40,180). 起点与

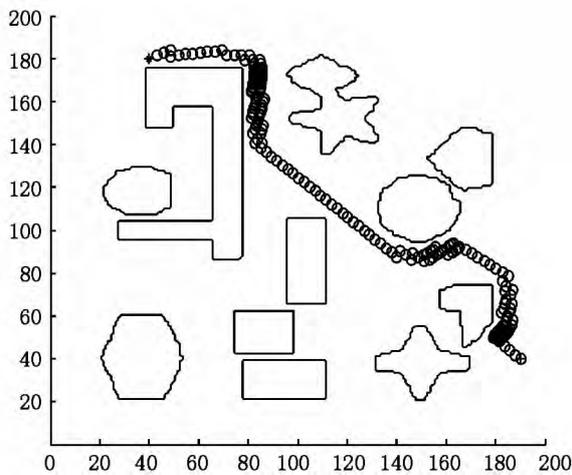
终点间没有势能陷阱,但是需绕过障碍物; (ii) 起点坐标(10,190) 终点坐标(120,165). 终点离障碍物较近; (iii) 起点坐标(20,150) 终点坐标(180,40). 起点到终点路程中存在复杂的势能陷阱. 两种算法的规划结果见图 3~图 5. 其中“+”表示机器人起点,“*”表示机器人终点,蓝色圆圈为机器人路径.

从情况 1 的 2 张图来看,2 种算法均能够顺利地引导机器人到达终点. 不同的是 APF 算法规划的路径在靠近障碍物的时候会出现反复的振荡,而本文算法则克服了这个缺点,其规划的路径更为光滑.

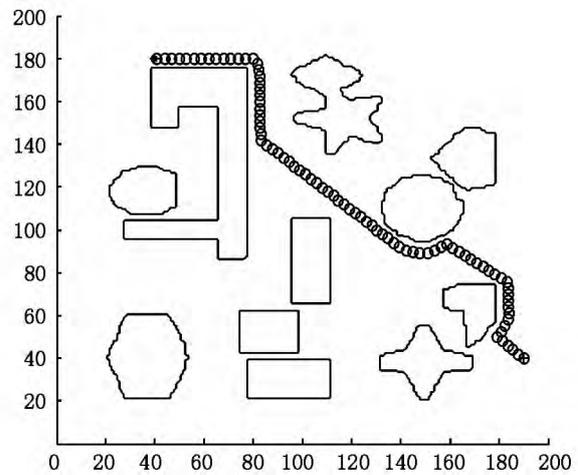
从情况 2 的 2 张图来看,2 种算法均能够将机器人引导到终点附近. 不同的是:由于终点靠障碍物过近,且处于一个凹形区域,APF 算法由于邻近障碍物,斥力过大,只能在终点附近振荡,到不了终点. 而本文算法则顺利地将机器人引导到了终点位置.

从情况 3 的 2 张图来看,由于起点到终点过程中存在不少复杂的地形,使得 APF 算法极易陷入势能陷阱. 从图上看,APF 算法在一开始便陷入一个凹形区域无法脱出. 而本文算法则能够顺利从陷阱中逃离出来,并穿过多个障碍物所夹的复杂区域,顺利地将机器人引导到了终点.

总之,从仿真结果看,本文算法不需要设置虚拟引力源,也不需要障碍物或势能函数进行复杂的处理,便能够有效地克服常规 APF 算法的缺点,在复杂障碍物环境中快速找出一条有效的路径,体现出较强的路径规划能力.

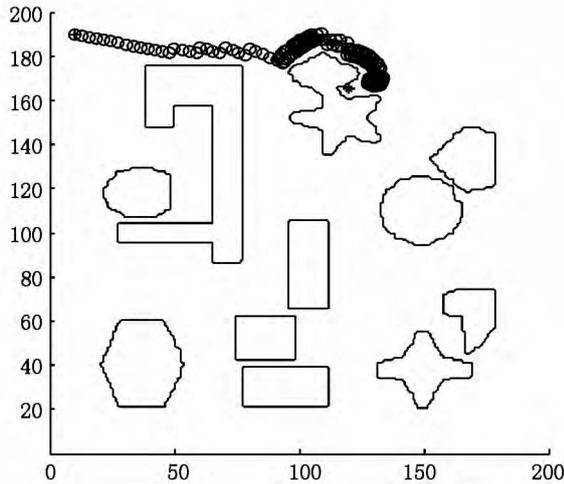


(a) APF 对情况 1 的规划路径

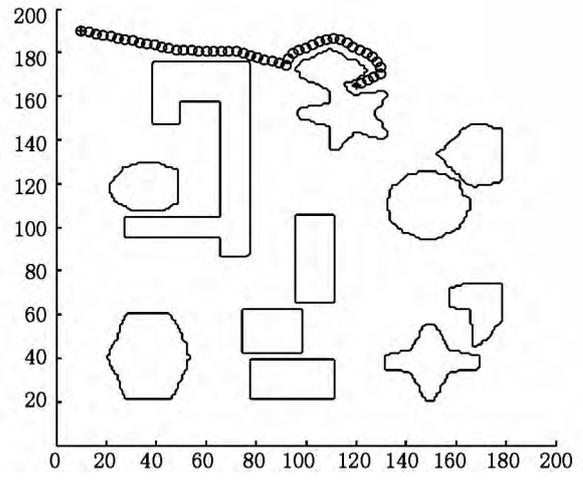


(b) 本文算法对情况 1 的规划路径

图 3 在情况 1 下 APF 与本文算法效果对比图

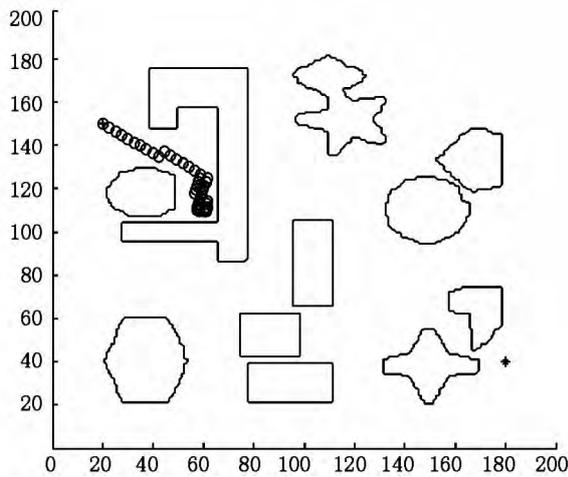


(a) APF 对情况 2 的规划路径

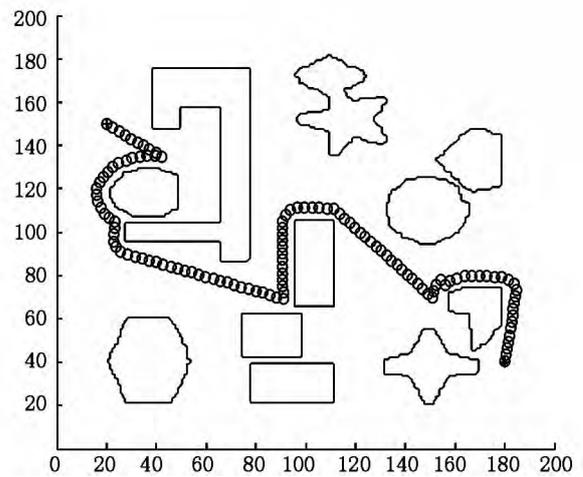


(b) 本文算法对情况 2 的规划路径

图 4 情况 2 下 APF 与本文算法效果对比图



(a) APF 对情况 3 的规划路径



(b) 本文算法对情况 3 的规划路径

图 5 情况 3 下 APF 与本文算法效果对比图

4 结论

为了克服传统人工势场法在复杂环境下应用时容易出现振荡、甚至陷入陷阱导致规划失败的问题, 本文提出了一种基于斥力场等势线环绕障碍物避障的路径规划算法. 其基本思路是将距离相近的障碍物看成一个整体, 由这些障碍物共同产生一个虚拟斥力场, 使得斥力场的外围等势线环绕这些障碍物. 当机器人没有探测到障碍物时, 机器人在目标点引力作用下向目标点方向运动, 当机器人遭遇障碍物阻拦时, 则沿其斥力场外围等势线绕过障碍物, 再奔向目标点. 该方法不需要构建复杂的全局地图, 只需要对机器人所遭遇的相对独立的障碍物群有所了解就能完成路径规划, 算法简单, 具有较强的实时性.

仿真结果表明, 通过该方法规划出的运行路线更平滑, 能够有效地克服传统人工势场法容易出现振荡、陷入陷阱区域的缺陷, 尤其在复杂的障碍物环境中, 拥有更好的路径规划性能.

5 参考文献

[1] 朱大奇, 颜明重. 移动机器人路径规划技术综述 [J]. 控制与决策, 2010, 25(9): 961-966.

[2] Avneesh S, Erik A, Sean C et al. Real-time path planning in dynamic virtual environment using multiagent navigation graphs [J]. IEEE Trans on Visualization and Computer Graphics, 2008, 14(3): 526-538.

[3] Takahashi O, Schilling R J. Motion planning in a plane using generalized Voronoi diagrams [J]. IEEE Trans on

- Robotics and Automation ,1989 5(2) : 143-150.
- [4] 许斯军,曹奇英. 基于可视图的移动机器人路径规划 [J]. 计算机应用与软件 2011 28(3) : 220-222.
- [5] Porta Garcia M A ,Oscar M ,Oscar C ,et al. Path planning for autonomous mobile robot navigation with ant colony optimization and fuzzy cost function evaluation [J]. Applied Soft Computing ,Elsevier 2009(9) : 1102-1110.
- [6] Gong D W ,Zhang J H ,Zhang Y. Multi-objective particle Swarm Optimization for Robot Path Planning in environment with danger sources [J]. Journal of Computers , 2011 6(8) : 1554-1561.
- [7] 刘传领,杨静宇. 一种基于量子染色体变异的移动机器人路径规划融合算法 [J]. 信息与控制 2011 40(5) : 594-599.
- [8] Khatib O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. International Journal of Robotics and Research 1986 5(1) : 90-98.
- [9] 张殿富,刘福. 基于人工势场法的路径规划方法研究及展望 [J]. 计算机工程与科学 2013 35(6) : 88-95.
- [10] 罗乾又,张华,等. 改进人工势场法在机器人路径规划中的应用 [J]. 计算机工程与设计 2011 32(4) : 1411-1413.
- [11] 于振中,闫继宏,等. 改进人工势场法的移动机器人路径规划 [J]. 哈尔滨工业大学学报 2011 43(1) : 50-55.
- [12] Andrew G L ,Owen Y L ,Brett L K ,et al. Dynamical wall-following for a wheeled robot using a passive tactile sensor [C]. IEEE International Conference on Robot & Automation 2005: 3838-3843.
- [13] Min S J ,Joong H B ,Yeh S H ,et al. Real Time Obstacle Avoidance for Mobile Robot Using Limit-Cycle and Vector Field Method ,Lecture Notes in Computer Science Springer 2006 4251: 866-873.
- [14] 姚兴田,吴亮亮,马永林,等. 自动 3 维重构中确定下 1 最优视点的方法研究 [J]. 江西师范大学学报: 自然科学版 2013 37(6) : 574-578.

The Path Planning Algorithm for Moving Robot in Complex Environment

XU Xue-song

(The Electric and Electronic Engineering School ,East China Jiaotong University ,Nanchang Jiangxi 330013 ,China)

Abstract: Analyzing the defects of APF ,a new path planning algorithm which avoids obstacle by rounding obstacle along equipotential line of repulsion field is presented. Simulation shows it has better performance for path planning in complex environment.

Key words: path planning; complex environment; equipotential line of repulsion field

(责任编辑:冉小晓)