

基于 APFIGA 的全方位机器人多障碍区路径规划研究^①

蒋 林^{②*} 赵 杰^{**} 闫继宏^{**} 陈新元^{*}

(* 武汉科技大学冶金装备及其控制教育部重点实验室 武汉 430081)

(** 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘 要 为解决机器人在多障碍区的路径规划问题,提出了一种基于由遗传算法改进的人工势场法(APFIGA)的全方位移动操作机器人路径规划方法。该规划方法通过在可穿越的障碍区添加障碍物穿越系数来鼓励机器人走捷径,进而提高其路径优化能力;利用当前点邻域内势场强度信息,结合遗传算法确定全方位移动操作机器人的运动方向及速度,并引入机器人速度及移动障碍物速度的影响,得出势场强度下降最快的路径,提高方法的动态环境规划能力。该方法能克服机器人在障碍物附近易于抖动的现象,通过在斥力势中添加与目标距离成正比的系数项解决目标不可达问题,并利用填平势场跳出局部极小。仿真与实物实验结果验证了所提出路径规划方法的正确性和有效性。

关键词 全方位移动操作机器人,由遗传算法改进的人工势场法(APFIGA),穿越系数,人工势场(APF),遗传算法

0 引 言

人工势场(artificial potential field, APF)法是一种应用广泛的简单有效的路径规划算法。传统 APF 法在复杂非线性的移动机器人路径规划上缺乏足够的鲁棒性,难以解决局部极小这类问题,由于受引力和斥力的合力作用,当机器人未到达目标点而合力为零时,机器人将停止前进,陷入局部极小点,不能到达目标位置^[1,2]。目前已有多种跳出局部极小的途径,如启发式搜索、随机逃走、Tangent bug 与沿墙走等^[3,4],这些途径都需要对机器人施加附加控制力,因而不能从根本上解决问题。此外传统 APF 法难以解决到达障碍物附近时由于合力方向变化所产生的抖动,以及障碍物在目标点附近使排斥力大于引力导致目标不可达及多障碍区路径非最优等问题。

目前国内外已有多家研究单位将智能方法应用到移动机器人路径规划方面,如清华大学引入记忆信息以增强机器人对周边环境的认知能力来解决 APF 的局部极小问题^[5];哈尔滨工业大学进行了在

APF 中添加附加控制力的研究,该方法解决了 APF 法的局部极小点的问题^[6];清华大学进行了移动机器人在未知环境中用聚类分析与沿墙行走进行实时运动规划的研究^[7];北京理工大学进行了群智能机器人基于 APF 进行编队与避障的研究^[8];北京科技大学将动态环境下的速度及加速度因素引入势能函数进行了路径规划仿真研究^[9];沈阳工业大学进行了动态环境下基于改进的 APF 法的机器人运动规划研究^[10];墨西哥的 Ricardo 将模糊逻辑与遗传算法相结合进行了移动机器人路径规划研究^[11];土耳其的 Tark 将遗传算法应用到并联机器人的运动路径规划中^[12]。上述这些智能方法的应用环境及解决问题的侧重点均有不同,而对移动机器人在多障碍区穿行的路径规划理论却少有研究,针对这个难题,本文提出了基于由遗传算法改进的人工势场法(artificial potential field method improved by the genetic algorithm, APFIGA)的全方位移动操作机器人(omni-directional mobile manipulator, ODMM)多障碍区路径规划方法。该方法是一种应用更广,能适应多障碍环境的智能算法,它将目标对机器人的吸引力以及障碍物对机器人的排斥力都转化为一种势

① 863 计划(2006AA04Z245)和冶金装备及其控制教育部重点实验室开放基金(2009A03)资助项目。

② 男,1976 年生,博士;研究方向:移动机器人定位、导航、运动规划,控制及智能算法;联系人, E-mail: jlxylj@163.com
(收稿日期:2010-09-19)

场强度,各种势场强度用代数和方式叠加,对于可穿越的障碍区(障碍物密集但机器人可以通过的区域)鼓励机器人通过,同时考虑移动障碍物和机器人速度对势场强度的影响,用势场值代数和与局部遗传优化解决障碍物附近易于抖动的问题,用在斥力势中添加与目标距离成正比的系数项来解决目标不可达问题,利用填平势场法解决局部极小问题。在一个采样周期中用遗传算法搜索机器人当前位置周围局部最优点。

1 ODMM 及绝对定位系统

全方位移动操作机器人(ODMM)如图1所示。ODMM 能在平面中以任意角度和姿态运动到指定地点,并配合超声波绝对定位能实时得到 ODMM 在空间相对其原点的位置^[12]。在 ODMM、超声波发射模块,超声信息融合处理模块和 PC 机之间,通过无线通讯模块 ZF01 进行通讯。ODMM 内部用 CAN 总线通讯,在 ODMM 的前方、左方及右方有超声波障碍检测模块,用于 ODMM 行走过程中避障^[14]。

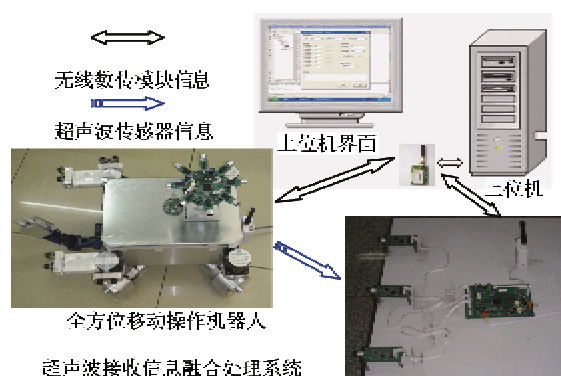


图1 全方位移动操作机器人及绝对定位系统

2 由遗传算法改进的人工势场法 (APFIGA)

2.1 改进的 APF 模型

传统 APF 法为矢量合成法,存在易陷入局部极小点的问题,无法达到目标点,以及障碍物在目标附近会造成目标不可达,机器人在障碍物附近运动容易振荡等问题。

本文通过计算机器人周围的动态静态障碍物对机器人的斥力势场强度和目标对机器人的吸引力的势场强度的代数和的方法来寻优。算法直接计算出机器人周围势场强度的极小点,以此作为这一采样

时间段的子目标点。令机器人的最大速度为 $V_m = 0.15\text{m/s}$,采样时间为 $T = 1\text{s}$,则机器人在每一采样时间中的搜索范围就是以当前位置为中心, $V_m \cdot T$ 为半径的一个圆^[10]。为了加快搜索效率,让子目标点落在 $\rho \in (2 \cdot V_m \cdot T/3, V_m \cdot T)$ 的环形区域,如图2所示,角度搜索范围为 $\theta \in (0, 2 \cdot \pi)$ 。

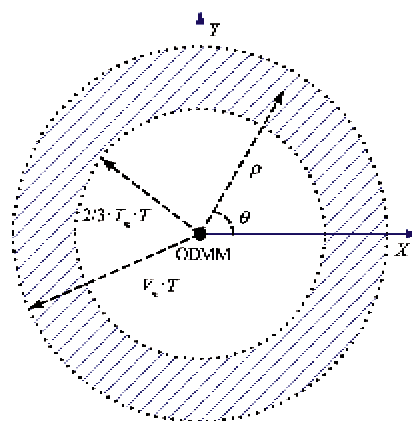


图2 局部目标点的搜索

则目标对 ODMM 的引力势 $U_g(X)$ 为 ODMM 的当前位置与目标点的距离 $\rho(X, X_g)$ 的平方与引力势系数 k 的乘积。

针对障碍物在目标点附近会阻碍机器人到达目标这个问题,本文用在斥力势中添加系数项 $\|X - X_g\|^l$ 来解决这个问题,这个系数项 $\|X - X_g\|^l$ 能让机器人目标附近障碍物的斥力系数趋近于零,两项的乘积也很小,故在目标点附近的障碍物不会阻碍机器人奔向目标。

第 i 个静态障碍物对机器人的排斥势为

$$U_{ei}(X_i) = \begin{cases} 0.5 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{\rho(X, X_i)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \cdot \|X - X_g\|^l, & \rho(X, X_i) \leq \rho_0 \\ 0, & \rho(X, X_i) > \rho_0 \end{cases}$$

$$i \in (1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中:

$\rho(X, X_i)$ ——ODMM 的当前位置与第 i 个静态障碍物的最短距离;

λ ——正比例位置增益系数;

ρ_0 ——障碍物的影响距离;

l ——目标点可达系数。

第 r 个动态障碍物对机器人的排斥势为

$$U_{er}(X_r) =$$

$$\left| \begin{array}{l} 0.5 \cdot \lambda \cdot \left(\frac{1}{\rho(X, X_i)} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \cdot (\|X - X_g\|^l \\ + \zeta \cdot |V - V_r \cdot \sin(\varphi - \theta)|) \\ , \rho(X, X_i) \leq \rho_0 \\ 0 , \rho(X, X_i) > \rho_0 \\ i \in (1, 2, \dots, m) \end{array} \right. \quad (2)$$

式中:

$\rho(X, X_r)$ ——ODMM 的当前位置与第 r 个动态障碍物的最短距离;

ζ ——正比例系数;

V_r ——第 r 个动态障碍物的当前运动速度 ($2 \cdot V_m/3, V_m$)。

当 ODMM 陷入局部极小点时,就添加一个填平势场引导机器人走出局部极小点。ODMM 的填平势为 $U_{aff}(X)$, 其为 ODMM 的 $\rho(X, X_g)$ 的平方与正比例系数 v 的乘积。

在障碍比较稀疏区域或不可穿越的多障碍区,令 ODMM 的势场强度为

$$U = U_a(X) + \sum_{i=1}^n U_{es}(X_i) + \sum_{r=1}^m U_{em}(X_r) + U_{aff}(X) \quad (3)$$

在可穿越的多障碍区,鼓励机器人穿越障碍区,寻找较优路径,令 ODMM 的势场强度为

$$U = U_a(X) + \gamma \cdot \sum_{i=1}^n U_{es}(X_i) + \gamma \cdot \sum_{r=1}^m U_{em}(X_r) + U_{aff}(X) \quad (4)$$

式中 γ 为鼓励机器人穿越障碍区的穿越系数。

2.2 APFIGA

遗传算法因全局优化能力和自适应能力强,智能化程度高,因而已成功地应用在复杂的非线性优化领域,在许多复杂优化问题的求解上都能得到满意的答案。遗传算法有 3 个主要操作算子——选择、交叉和变异。标准遗传算法求解函数优化问题的步骤如下:(1) 编码;(2) 定义串的适应度函数 $f(x_i)$;(3) 产生初始群体;(4) 计算串的适应度;(5) 复制;(6) 交换;(7) 变异;(8) 从(4)起重复进行,直到满足条件。

然而标准遗传算法还存在收敛性证明比较困难、易发生早熟收敛等问题^[15]。针对这些问题,作出如下的改进:

(1) 保留最佳。不按比例进行选择,而是保留当前所得的最佳值,这个最佳值直接进入下一代。

(2) 取舍标准更改。按影响因子

$$Q = \frac{f(x_i)}{\sum_{i=1}^q f(x_i)} \cdot q \quad (5)$$

的大小决定个体的后代个数,影响因子越大则繁殖的后代越多。

实现过程如下:

(1) 编码。本文根据两个参数优化的精度取染色体长度为 7 位,有两个染色体分别对应 ρ 和 θ 。 ρ 为搜索步长, θ 为搜索方向。表达式为

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = \frac{1}{3} \cdot V_m \cdot T \cdot h_1/127 + \frac{2}{3} \cdot V_m \cdot T \\ \theta = 2 \cdot \pi \cdot h_2/127 \end{array} \right. \quad (6)$$

式中 h_1 为某个体中染色体 ρ 对应的 7 位二进制编码值; h_2 为某个体中染色体 θ 对应的 7 位二进制编码值。

初始个体数目一般为 80 ~ 100, 本文取 80 个。

(2) 求适应度。遗传算法在进化搜索中基本不利用外部信息, 仅以适应度函数为依据。本文直接用函数值评价好坏。适应度函数为

$$f(x_i) = \frac{1}{U(x_i)} \quad (7)$$

式中 $U(x_i)$ 为第 x_i 个个体所受目标点与障碍物势场作用的加权和。 $f(x_i)$ 值最大的为最好。

(3) 选择。选择操作是把较优的个体直接遗传到下一代, 或通过配对交叉产生新的个体。先将上一代的最优值直接选入, 然后按影响因子 Q 的大小决定个体的后代个数, 影响因子大的个体占被选用产生下一代个体的比例高, 则与其相关的繁殖后代就多。

(4) 交叉。首先, 定义交叉概率 P_c , 一般建议其取值范围 0.4 ~ 0.99, 本算法取 0.65。然后, 按概率 P_c (即任何相邻两个父代个体都有 P_c 的概率被选中进行交叉) 把相邻两个父代个体的 θ 染色体部分加以交换, 重新组合生成两个新个体。

(5) 变异。对单个个体按概率 $P_m = 0.1$ 选择, 然后变异。

(6) 终止代数。经过上面 3 个主要操作就得到一个新的种群, 上述步骤经过给定的循环次数之后终止, 并将最后的最佳个体作为所求问题的最优解。本文有实时性要求, 取 50 代, 由于对算法进行了调整, 加快了算法收敛的速度, 后来实验结果表明经过 50 代就能收敛到较优或最优值。

2.3 APFIGA 的实现

将步长 ρ 与转角 θ 作为遗传因子 (见式(6)),

对其进行编码,适应度函数为 $U(x_i)$ 的倒数。当前采样时间子目标点为 $(X_t + \rho^*(\cos(\theta^*)), Y_t + \rho^*(\sin(\theta^*)))$, 其中 (X_t, Y_t) 是机器人当前坐标值, ρ^* 与 θ^* 是由遗传算法得到的最优值。实现过程如下:

第一步,通过超声波定位得到机器人当前位置,由数字罗盘测得机器人当前姿态,由避障传感器加绝对定位得到机器人与周围障碍物的距离,判断这个障碍区可否通过,若能通过就按式(5)计算 ODMM 的势场强度,若不能通过就按式(4)计算 ODMM 的势场强度。

第二步,将 ODMM 的当前位置 (X_t, Y_t) 与 ODMM 的 3 个周期前的位置 (X_{t-3}, Y_{t-3}) 比较,若满足 $\sqrt{(X_t - X_{t-3})^2 + (Y_t - Y_{t-3})^2} < 2 \cdot V_m \cdot T/3$, 则判断当前位姿是局部极小点并转到第三步,否则转到第四步。

第三步,对于处于局部极小点范围内的位姿点加上附加势 $U_{\text{aff}}(X)$ 。

第四步,利用遗传算法找出最优值,得到局部优化的 (ρ^*, θ^*) , 进而得到局部优化目标点。

第五步,机器人运动到子目标点。

第六步,判断机器人是否到达目标点,是则终止,否则转到第一步,如此循环直到 ODMM 运动到目标点。

3 APFIGA 的仿真实验

ODMM 基于由遗传优化改进的 APF 法的仿真实验环境初始参数为: $V_m = 0.15\text{m/s}$, $T = 1\text{s}$, $k = 1$, $\lambda = 2$, $\zeta = 0.1$, $n = 4$, $m = 1$, $l = 2$, $v = 8$, 运动障碍物的速度 $V_r = 0.1(0.5 + \text{rand}())\text{m/s}$, $\varphi = \pi/6$, $\rho_0 = 0.5\text{m}$, ODMM 是否到达目标点的评判距离 $\rho_a = 0.30\text{m}$, 机器人起始点 $(-0.6, 0.6)$, 机器人目标点 $(2.95, 2.87)$, 单位为 m, ODMM 的障碍穿越系数 $\gamma = 10^{-7}$ 。此参考坐标系的原点为 3 个超声波接收器中间接收器的位置。

基于遗传优化改进的人工势场法 (APFIGA) 的 ODMM 的运动轨迹与 APF 法改进前在相同条件下得到的仿真运动轨迹对比如图 3 所示。

由图 3 可以看出,基于 APFIGA 的 ODMM 路径规划方法较好地解决了局部极小点以及障碍物在目标附近使机器人难以到达和在障碍物附近机器人容易产生运动振荡的问题,遗传算法的引入使得运动

路径高效平滑,在避开障碍物的同时到达目标,移动路径接近最短。

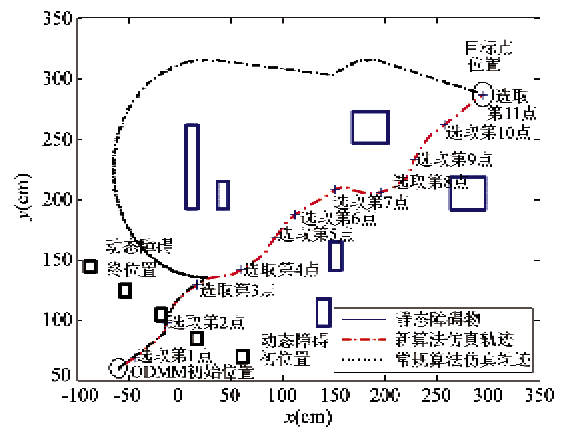


图 3 改进前后人工势场法仿真实验对比

仿真过程中得到机器人在 APFIGA 运动轨迹上各点的 x, y 值,以及该点势场强度值如表 1 所示。由表 1 可见在优化得到的路径上势场强度下降得很快,并且在到达目标点位置时势场强度值趋近于 0。

表 1 运动轨迹上各点势场强度

点	1	2	3	4	5	6
x (m)	-0.44	-0.13	0.17	0.60	0.93	1.12
y (m)	0.69	0.98	1.29	1.42	1.69	1.87
场强	8.13	6.53	5.10	3.82	2.80	2.17
点	7	8	9	10	11	
x (m)	1.52	1.95	2.29	2.58	2.95	
y (m)	2.08	2.06	2.32	2.62	2.87	
场强	1.34	0.83	0.39	0.10	0	

图 4 给出了图 3 的局部放大图,从中可以进一步看清 ODMM 运动轨迹在改进前后的差别。

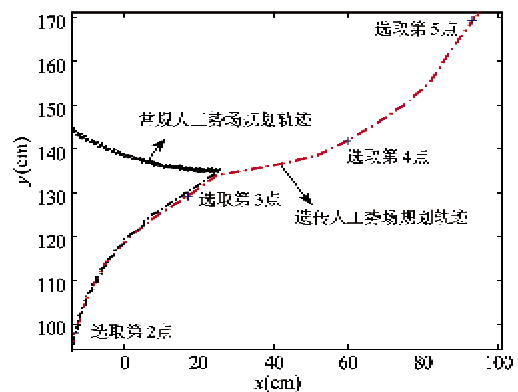


图 4 仿真对比实验图局部放大

综合图 3 和图 4 可见,在障碍物比较稀疏时,两种方法运动轨迹比较一致,但改进前的轨迹平滑性及稳定性较差。在障碍物比较集中区域,两种方法运动轨迹差异较大,改进后轨迹较优。改进前在障碍物附近运动轨迹振荡得很厉害,整体运动路径较长,运动平滑性也较差,改进后这个算法的仿真运动路径更平滑、平稳,路径更短。

且当目标点有障碍时,对 APFIGA 运动轨迹无影响,而改进前的 APF 法无法到达目标,仿真出死机状态。

4 APFIGA 路径规划实验

利用与仿真实验对应的实物实验系统,进行了 ODMM 基于 APFIGA 的动态环境下的路径规划实验。实验中机器人通过超声波空间绝对定位得到在空间的位置^[16],各个静态障碍物在空间的位置已知,通过解算得到与各个静态障碍物的距离。动态障碍物与机器人的相对位置由 ODMM 的避障模块检测确定,并由 APFIGA 进行规划得到机器人下一步的运动方向与移动距离,完成上一步规划动作后到达新地点。然后再通过解算得到与各个障碍物的距离,并由 APFIGA 进行规划得到机器人下一步的运动方向与移动距离。如此循环直至到达终点,实验结果见图 5。图 5 为从起始点 5(a)开始用 APFIGA 进行路径规划导航,最后到达目标位置 5(f)的运动过程。实验中 ODMM 的实际运动轨迹与仿真轨迹虽有一点误差,但大体一致,主要由机器人的定位误差与运动误差引起。图 5 的实物实验进一步验证了本文所提的 APFIGA 路径规划算法的正确性。

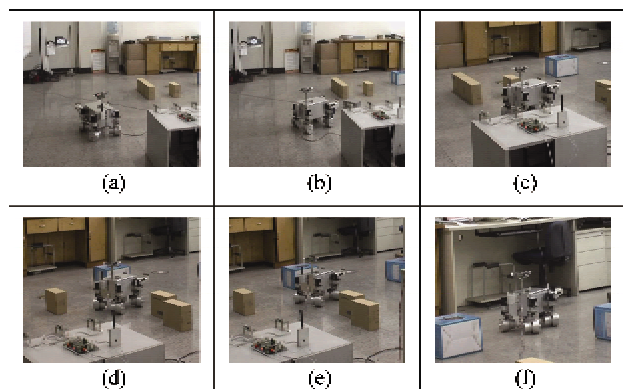


图 5 改进人工势场法路径规划实验

5 结 论

针对较高路径优化要求的避障导航任务,本文

提出了基于由遗传算法改进的人工势场法(APFIGA)的全方位移动操作机器人(ODMM)路径规划算法,该算法能保证全方位移动操作机器人在复杂多障碍物的环境中顺利通过并找到一条较优路径和接近最短的路径到达目的地。仿真实验与实物实验证明,该算法解决了机器人在复杂多障碍物环境中无法穿越障碍区、易于陷入局部极小点、障碍物在目标附近导致目标点不可达以及在障碍物附近机器人运动过程容易产生抖动等问题,其有效性、正确性得到了验证。

参考文献

- [1] Mora, Marta C, Tornero, et al. Path planning and trajectory generation using multi-rate predictive artificial potential fields. In: Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Nice, France, 2008. 2990-2995
- [2] Ahmad A M. Solving the narrow corridor problem in potential field-guided autonomous robots. In: Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Sarcelona, Spain, 2005. 2909-2914
- [3] 韩永,刘国栋. 动态环境下基于人工势场的移动机器人运动规划. 机器人, 2006, 28(1): 45-49
- [4] 张捍东,王丽华,岑豫皖. 基于遗传改进协调场的移动机器人避障策略. 系统仿真学报, 2007, 19(24): 5742-5746
- [5] 朱毅,张涛,宋靖雁. 未知环境下势场法路径规划的局部极小问题研究. 自动化学报, 2010, 36(8): 1122-1130
- [6] 张建英,赵志萍,刘曦. 基于人工势场法的机器人路径规划. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(8): 1306-1309
- [7] Zhang T, Zhu Y, Song J Y. Real-time motion planning for mobile robots by means of artificial potential field method in unknown environment. Industrial Robot, 2010, 37(4): 384-400
- [8] Song P, Li K J, Han X B, et al. Formation and obstacle-avoidance control for mobile swarm robots based on artificial potential field. In: Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, Guilin, China, 2009. 2273-2277
- [9] 殷路,尹怡欣. 基于动态人工势场法的路径规划仿真研究. 系统仿真学报, 2009, 21(11): 3325-3329
- [10] 覃柯,孙茂相,孙昌志. 动态环境下基于改进人工势场法的机器人运动规划. 沈阳工业大学学报, 2004, 26(5): 568-571
- [11] Ricardo M, Oscar C, Luis T A. Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous

- wheeled mobile robot using genetic algorithms. *Information Sciences*, 2009, 41(4):501-517
- [12] Tark C, Rasit K, Demir H I. Parallel robot scheduling to minimize mean tardiness with precedence constraints using a genetic algorithm. *Advances in Engineering Software*, 2008, 39: 47-54
- [13] 赵杰,蒋林,闫继宏等. 超声波绝对定位的全方位移动机械手导航研究. 西安交通大学学报, 2008, 42(3): 337-341
- [14] 蒋林,闫继宏,臧希喆等. 一种新的超声波绝对定位方法研究. 吉林大学学报(工学版), 2009, 39(1): 188-193
- [15] 连可,黄建国,王厚军等. 一种基于遗传算法的 SVM 决策树多分类策略研究. 电子学报, 2008, 36(8): 1502-1506
- [16] 蒋林,闫继宏,朱延河等. 基于冗余超声波信息融合的绝对定位研究. 华中科技大学学报(自然科学), 2008, 36(5): 63-66

Path planning in multiple obstacle areas for omni-directional mobile manipulators based on the APFIGA

Jiang Lin^{*}, Zhao Jie^{**}, Yan Jihong^{**}, Chen Xinyuan^{*}

(^{*} Key Laboratory of Metallurgical Equipment and its Control of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

(^{**} State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080)

Abstract

A method for the path planning for an omni-directional mobile manipulator based on the artificial potential field method improved by the genetic algorithm (APFIGA) is proposed to solve the difficulties in robot path planning in a multiple obstacle area. The method uses the traversing coefficient to encourage a robot to traverse a traversable multiple obstacle area. Thus the path planning ability can be improved. And it can obtain a path in which the potential field strength decreases fast by using the manipulator's neighborhood potential field strength information, and the movement direction and the speed of the manipulator is determined by using the genetic algorithm. Due to the introducing of the effect of robot speed and the mobile obstacle speed, the path planning ability under dynamic environments is improved. The problem that the robot is easy to shake around obstacles is solved. The target point unreachable problem is solved by adding the coefficient item proportional to target distance to the repulsion potential. The local minimum value problem is solved by adding the additional potential field to fill local minimum. The results of simulation and physical experiment verified that the proposed path planning method was correct and effective.

Key words: omni-directional mobile manipulator, artificial potential field method improved by the genetic algorithm (APFIGA), traversing coefficient, artificial potential field (APF), genetic algorithm