

基于新人工势场函数的机器人动态避障规划

樊晓平, 李双艳, 陈特放

(中南大学 信息科学与工程学院 自动化工程研究中心, 湖南 长沙 410075)

摘要: 人工势场法是进行机器人路径规划时常用的方法, 但若用圆锥曲线函数作为引力场数学模型时, 在目标点会产生抖动问题. 本文在分析抖动产生原因的基础上, 增加一个指数项到引力场函数中, 从而消除了奇异值点, 避免了抖动现象. 然后将一敏感度参数引入斥力场函数, 以便灵活控制运动过程中机器人与障碍物距离的大小. 通过对敏感度的调节, 还可以克服传统势场法中目标点在斥力作用范围内时, 机器人无法到达目标点的缺陷. 最后给出新势场法的仿真.

关键词: 人工势场法; 动态避障; 机器人

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Dynamic obstacle-avoiding path plan for robots based on a new artificial potential field function

FAN Xiao-ping, LI Shuang-yan, CHEN Te-fang

(Research Center for Automation Engineering, College of Information Science and Engineering, Central South University, Changsha Hunan 410075, China)

Abstract: The artificial potential field is in the common use to plan the robot path. But if conic curve function is the model of attractive field, there is chattering phenomenon at target point. Based on the analysis of chattering cause, a new potential field function is presented by adding an exponential factor to the conic curve attractive function. It can eliminate singularity chattering in planning. Meanwhile, in order to achieve flexible control of distance between robot and obstacles, a parameter called sensitivity is introduced in the repulsive function. By adjusting the magnitude of the sensitivity, the deficiency that robot cannot reach its target inside the range of repulsion action in traditional potential field function can be avoided. Simulation results are given.

Key words: artificial potential field method; dynamic obstacle avoidance; robot path planning

1 引言 (Introduction)

随着机器人在工业领域与探索外星球上广泛地应用, 人们对机器人的“智能”期望越来越高, 要求机器人在运动过程中要有与周围环境交互的能力, 而其最基本也最重要的需求就是要求机器人能规划出避碰路径, 顺利到达目标. 现已有多种动态避障的路径规划方法, 如滚动路径规划法^[1]、Stentz A 的 D* 算法^[2]、遗传算法^[3]等, 而人工势场法是以其快捷的环境描述形式在实时避障、运动规划中得到了广泛应用. 人工势场法由 Khatib 提出, 他在文献[4]中构造了人工感应力函数. 此后, 人工势场法得到不断的改进与完善. Khosla P 提出超二次函数 (Superquadric

Function), 将不同形状障碍物斥力场统一逼近为球形障碍物的斥力场, 又提出从电场、温度场、流体场的角度, 运用调和函数 (Harmonic Function)^[5]来回避局部最小问题. 在人工势场法中, 局部最小问题已有大量的研究^[6], 但对于抖动问题, 没有深入地探讨. 抖动现象产生的原因是规划过程中奇异值点的出现. 本文针对该问题, 研究如何消除抖动现象.

本文在圆锥曲线引力场函数^[7]的基础上加以改进, 增加一个指数项到引力场函数中, 从而消除了奇异值点, 避免了抖动现象. 并在斥力场函数中引入敏感度参数, 使机器人在运动过程中, 障碍物与机器人的距离在控制之下, 控制变得更为灵活. 并给出了仿真结果.

2 新人工势场函数的确定及分析 (Determination and analysis of the new artificial potential field function)

人工势场法的基本思想是在运动空间中,将机器人视为一质点,使该质点受到人工势场力的作用,人工势场由算法构造,它要能反映运动空间的结构,能让机器人知道障碍物与目标的分布状况.势场中包含引力极与斥力极.障碍物属于斥力极,所以斥力场函数应与障碍物有关,而且,机器人靠障碍物越近,斥力应该越大.相反,目标属于引力极,引力场函数与目标点位置有关,且机器人离目标点越远,吸引力应该越大.这样,引力极与斥力极产生相应的势,障碍物有较高的势,自由空间有较低的势,使得机器人远离障碍物,向目标点运动.

设 $q(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 维工作空间 w 中的一点,用它来表示机器人所在位置.斥力场函数 $U_{\text{rep}}(q) = \frac{\lambda}{\rho(q)_1^2} = \frac{\lambda}{\rho(q)_{\text{obs}}^2}$, $\rho_1 = (\sum_n (x_R - x_o)^2)^{0.5}$ (ρ_1 表示机器人与障碍物之间的距离, λ 为比例因子),则斥力场函数与机器人到障碍物的距离有关,并且斥力随距离变减小而迅速变大.

圆锥曲线函数 $U_{\text{att}}(q) = \xi \rho_2(q) = \xi \rho_{\text{goal}}(q)$ 作为引力场, $\rho_2 = \|q - q_{\text{goal}}\| = (\sum_n (x_R - x_t)^2)^{0.5}$ (ρ_2 表示机器人与目标之间的距离, ξ 为比例因子),该引力场可以使相应的吸引力为有界,但存在目标点抖动问题.我们来分析抖动产生的原因.

对于 $U_{\text{att}} = \xi \rho_2$ 引力场,其产生的吸引力为

$$\vec{F}_{\text{att}}(q) = -\nabla U_{\text{att}}(q) = -\xi \frac{(q - q_{\text{goal}})}{\|q - q_{\text{goal}}\|}.$$

可见,在空间中除开目标点 q_{goal} 的其它点, $\vec{F}_{\text{att}}(q)$ 的幅值为一常数.而当 $q = q_{\text{goal}}$, 即机器人在目标点时, $\vec{F}_{\text{att}}(q) = \frac{0}{0}$, 吸引力表达式中的分子、分母均为零,这正如非线性控制系统中的奇点一样, $\vec{F}_{\text{att}}(q)$ 成为不定值.机器人在目标点会出现抖动.

为了消除抖振,我们对引力场加一扰动,使目标点不再是奇异点.根据数学求导法则可知,只要使分子趋近于零的速度大于分母趋近于零的速度,就可使 $\vec{F}_{\text{att}}(q)$ 在目标点 q_{goal} 为零,目标点也成为稳定点.

从吸引力分析,使吸引力成为表达式

$$\vec{F}_{\text{att}}(q) = \frac{(q - q_{\text{goal}})(f(q) - \xi)}{\|q - q_{\text{goal}}\|},$$

$$\text{s.t. } f(q_{\text{goal}}) - \xi = 0.$$

即可使吸引力在目标点为零,且目标点稳定.

我们取 $f(q_{\text{goal}}) = \alpha \beta e^{\rho_2}$, 显然只要当 $\alpha \beta = \xi$, 即可满足条件.则吸引力与引力场分别为

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{att}}(q) &= -\xi \nabla \rho_2 + \nabla \rho_2 \alpha \beta e^{-\alpha \rho_2} = \\ &= -\nabla \rho_2 (\xi - \alpha \beta e^{-\alpha \rho_2}) = \frac{(q - q_{\text{goal}})(\xi - \alpha \beta e^{-\alpha \rho_2})}{\|q - q_{\text{goal}}\|}, \end{aligned}$$

$$U_{\text{att}} = \xi \rho_2 + \beta e^{-\alpha \rho_2}.$$

另外,为了在动态环境中更灵活地控制机器人与障碍物的距离,我们通过对斥力场加敏感因子 os , 方便地改变其大小.

设计的斥力场与斥力分别为

$$U_{\text{rep}} = \lambda (os \times od)^n \times \frac{1}{\rho_1^2},$$

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{rep}}(x) &= -\nabla U_{\text{rep}} = -\lambda (os \times od)^n \nabla \rho_1^{-2} = \\ &= -2\lambda (os \times od)^n \nabla \rho_1^{-3}. \end{aligned}$$

排斥力 $\vec{F}_{\text{rep}}$ 与障碍物到机器人距离 ρ_1 的4次方成反比,这样保证了斥力随距离增大迅速减小的要求. os 为机器人对障碍物的敏感度,而 od 为障碍物的半径.当障碍物半径固定时,斥力随着敏感度的 n 次幂增大而增大.当要求机器人必需远离障碍物,就增大敏感度,达到给定的距离要求.而敏感度为零时,排斥力已不存在.但敏感度参数取值还没有固定的方法,要根据不同的要求与实验结果试探出它的值.

现用具体参数来说明问题.令 $w = IR^2$, 机器人在二维空间中, $q = (x, y)$.

对新人工势场的具体分析如下.首先,障碍物产生的斥力场为

$$U_{\text{rep}} = -\frac{1}{2} (os \times od)^n \times \frac{1}{\rho_1^2}. \quad (1)$$

其中 $\rho_1 = (|x_R - x_o|^2 + |y_R - y_o|^2)^{0.5}$.

要使敏感度参数的影响适度,这里取 $n = 3.5$, $\lambda = -0.5$.

斥力场产生的斥力为

$$\vec{F}_{\text{rep}} = -\text{grad}[U_{\text{rep}}] = -\nabla U_{\text{rep}} = \vec{F}_{\text{rep}}(x) + \vec{F}_{\text{rep}}(y), \quad (2)$$

$$\vec{F}_{\text{rep}}(x) = - (os \times od)^{3.5} \frac{|x_R - x_o|}{\rho_1^4}, \quad (3)$$

$$\vec{F}_{\text{rep}}(y) = - (os \times od)^{3.5} \frac{|y_R - y_o|}{\rho_1^4}. \quad (4)$$

再分析引力场与吸引力

$$\xi = 700, \beta = 350, \alpha = \frac{4}{700},$$

则目标产生的引力场为

$$U_{\text{att}} = 700\rho_2 + 350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}. \quad (5)$$

其中 $\rho_2 = (|x_R - x_t|^2 + |y_R - y_t|^2)^{0.5}$.

$$\begin{aligned} \vec{F}_{\text{att}} &= -\text{grad}[U_{\text{att}}] = \\ &= -\nabla U_{\text{att}} = \vec{F}_{\text{att}}(x) + \vec{F}_{\text{att}}(y). \end{aligned} \quad (6)$$

引力 $\vec{F}_{\text{att}}$ 在 x 与 y 方向的势场力分别为

$$\vec{F}_{\text{att}}(x) = \frac{700 \times |x_R - x_t| \times (1 - e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2})}{\rho_2}, \quad (7)$$

$$\vec{F}_{\text{att}}(y) = \frac{700 \times |y_R - y_t| \times (1 - e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2})}{\rho_2}. \quad (8)$$

可以看到该吸引力场比一般常用的圆锥曲线引力场函数多了 $350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 这一因子,该因子的引入是为了消除在目标点的抖动.抖动现象是因为目标点为奇异点而不稳定^[8],使得机器人在目标点附近的多个平衡点之间来回摆动.消除摆动就是要使目标点不在奇异点,分析斥力场与引力场,两者之和为合力场.

$$U_{\text{toa}} = U_{\text{att}} + U_{\text{rep}} =$$

$$700\rho_2 + 350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2} - \frac{1}{2}(os \times od)^{3.5} \times \frac{1}{\rho_1^2}. \quad (9)$$

显然,随着机器人靠近目标点, U_{att} 中 ρ_2 起的作用越来越小,而附加因子 $350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 的影响越来越大.当机器人到达目标点后, $x_R = x_t$, 即 $\rho_2 = 0$, $U_{\text{att}} = 350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2} = 350$, 而 $U_{\text{rep}} = -\frac{1}{2}(os \times od)^{3.5} \times \frac{1}{\rho_1^2}$, 此时,若机器人所受的合力为零,则机器人处于平稳状态,不会抖动,得出:

$$(os \times od)^{3.5} \times \frac{1}{\rho_1^2} = 700. \quad (10)$$

通过调整 os 的大小,式(10)可以成立的,同时还可以避免传统势场函数中目标点在障碍物斥力作用范围内,机器人无法到达目标点的情况.再从受力情况分析,仅从 x 方向分析:

$$\vec{F}_{\text{toa}} = \vec{F}_{\text{att}}(x) + \vec{F}_{\text{rep}}(x) =$$

$$\begin{aligned} &\frac{700 \times |x_R - x_t| \times (1 - e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2})}{\rho_2} - \\ &(os \times od)^{3.5} \frac{|x_R - x_o|}{\rho_1^4}. \end{aligned}$$

y 方向受力情况类似,合力为 x 与 y 方向势场力的矢量和.当机器人靠近目标时,吸引力 $\vec{F}_{\text{att}}(x)$ 减小,减小的速度与 ρ_2 的减小成正比.而机器人靠近障碍物时,斥力 $\vec{F}_{\text{rep}}(x)$ 迅速增大,增大的速度与 ρ_1^4 的减小成正比.当机器人远离障碍物时,斥力下降的速度很快,可以近似认为障碍物与机器人距离远到一定值时,斥力为零.机器人远离目标点时,引力增大,可以忽略因子 $e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 的作用.当机器人到达目标后, $\rho_2 = 0$, $|x_R - x_t| = 0$, 根据极限运算法则,同样得到 $(os \times od)^{3.5} = 700\rho_1^2$ 的条件.

可见在新的势场函数中,引力场增加 $350e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 这一部分,可以消除目标点的抖动.通过调节敏感度 os 的大小,使机器人运动控制更灵活.

3 仿真结果 (Simulation results)

算法步骤为:

Step 1 根据上述势场函数计算在当前位置的势场合力;

Step 2 机器人根据计算的合力方向往前运动一步;

Step 3 判断是否到达目标,是则停止,否则返回 Step 1.

该算法用 JAVA 语言实现,其仿真结果如图 1~4 所示.

1) 图 1 是静态障碍物环境中,引力场用圆锥曲线 $U_{\text{att}} = 700\rho_2$, 不增加因子 $e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 的仿真结果.从结果可以看到机器人在 b, c 两点间来回抖动.

2) 图 2 和图 3 是增加因子 $e^{-\frac{4}{700}\times\rho_2}$ 以后的仿真结果(因为靠近目标点时,机器人速度减慢,所以机器人在目标点的图有重叠,这不同于图 1 中机器人在两点之间来回抖动),抖动现象已消失.它们的斥力场函数的敏感度 os 分别为 2 和 3.2,结果同时表现了敏感度 os 对机器人运动控制的影响.

3) 图 4 是机器人在 2 个运动障碍物与 4 个静止障碍物环境中的避障控制仿真.

为了清楚地显示运动的整个过程,在图 1 至图 4 中用 step + 步数 n 代表运动的各个环节.在各图中半径最小的圆或圈代表机器人, A 点的圆代表目标,其它实心圆代表静止的障碍物,而半径较大的圈代表运动的障碍物.运动障碍物的各个运动轨迹也用 step + 步数 n 标明.

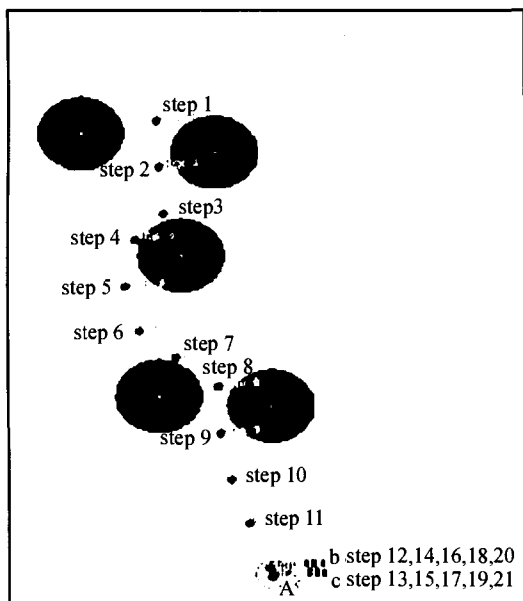


图1 引力场仅用圆锥曲线的势场函数
Fig. 1 Result of original conic curve potential field function

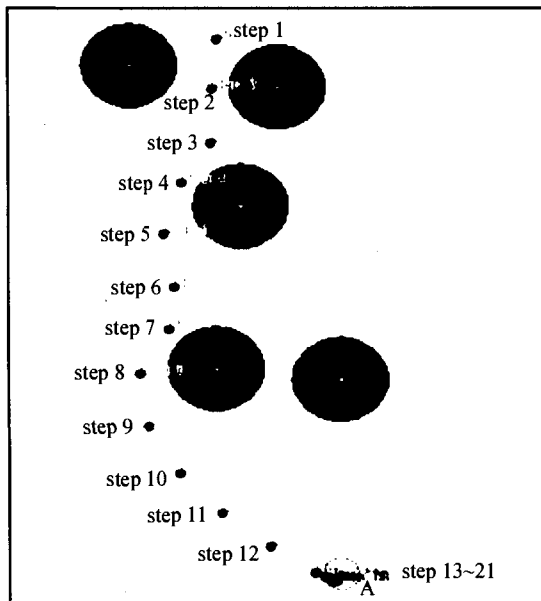


图2 新势场法敏感度 $os=2$
Fig. 2 Result of new function with $os=2$

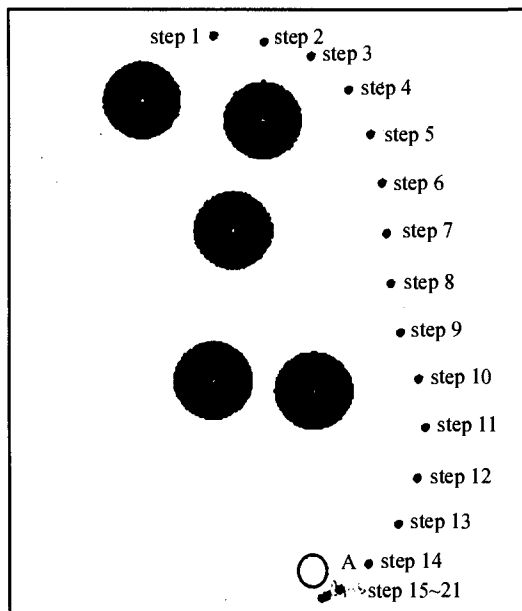


图3 新势场法敏感度 $os=3.2$
Fig. 3 Result of new function with $os=3.2$

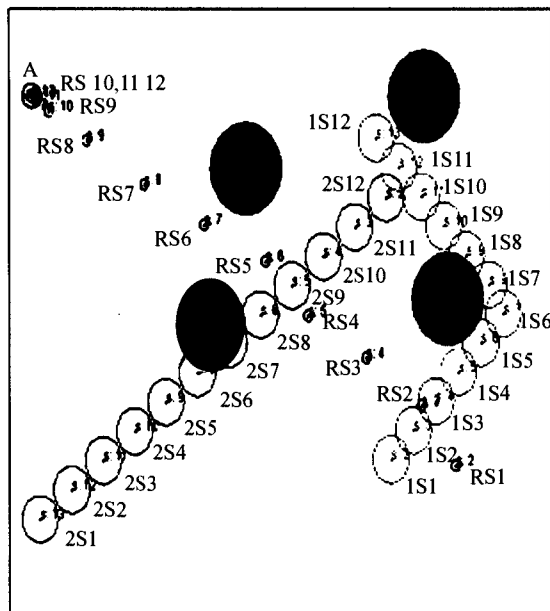


图4 新势场函数在存在两个运动障碍物下避障
Fig. 4 Obstacle avoidance with two moving obstacles

4 结论(Conclusion)

对简单的圆锥曲线引力场改进后,可以消除传统势场函数引起的抖动问题,而在斥力场中引入敏感度这一参数后,使机器人在运动过程中与障碍物的距离在人为控制之下,机器人的运动控制更为灵活.将这两种改进引入新势场函数中,用于机器人的动态避障控制,取得较好的效果.新的人工势场函数仍有以往人工势场法的优点:简洁、快速.可以将其运用到实时避障控制中去.算法的广泛性以及如何准确地选取敏感度大小值得进一步探讨.

参考文献(References)

- [1] 席裕庚,张纯刚.一类动态不确定环境下机器人的滚动路径规划[J].自动化学报,2002,28(2):161-175.
(XI Yugeng, ZHANG Chungang. Rolling path planning of mobile robot in a kind of dynamic uncertain environment [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2002, 28(2): 161-175.)
- [2] STENTZ A. C D; A real-time resolution optimal re-planning for globally constraint problem [C]// *The 18th National Conf on Artificial Intelligence*. Cambridge, MA: MIT Press; Alberta, Canada: Edmonton, 2002; 1088-1096.

- [3] 刘国栋, 谢宏斌, 李春光. 动态环境中基于遗传算法的移动机器人路径规划的方法[J]. 机器人, 2003, 25(4): 327-323.
(LIU Guodong, XIE Hongbin, LI Chunguang. Method of mobile robot path planning in dynamic environment based on genetic algorithm[J]. Robot, 2003, 25(4): 327-323.)
- [4] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [J]. *Int J of Robotic Research*, 1986, 5(1): 90-98.
- [5] KIM J O, KHOSAL P. Real time obstacle avoidance using harmonic potential functions [J]. *IEEE Trans on Robotic and Automation*, 1992, 8(3): 338-349.
- [6] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robots [C] // *Proc of the IEEE Conf on Robotics and Automation*. Sacramento, California: [s. n.], 1991: 1398-1404.
- [7] 钟碧良, 张祺, 杨宜民. 基于改进势场法的足球机器人避障路径规划[J]. 控制理论与应用, 2003, 20(4): 623-626.
(ZHONG Biliang, ZHANG Qi, YANG Yimin. Anti-collision path planning for soccer robot using modified potential field method [J]. *Control Theory & Applications*, 2003, 20(4): 623-626.)
- [8] GE S S, CUI Y J. New potential functions for mobile robot path planning [J]. *IEEE Trans on Robotic and Automation*, 2000, 16(5): 615-620.

作者简介

樊晓平 (1961—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为机器人控制、虚拟现实技术、智能交通系统等, 已发表有关论文 100 余篇, E-mail: xpfan@mail.csu.edu.cn;

李双艳 (1982—), 女, 硕士, 主要研究方向为机器人路径规划、智能控制等, E-mail: dzzhang@mail.csu.edu.cn;

陈特放 (1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力机车牵引、智能交通系统等, E-mail: ctfct@163.com.

下 期 要 目

- 集中式与分布式鲁棒状态融合估计 金学波, 孙优贤
- 基于小波变换的二阶线性分布参数系统预测控制 丁斗章, 顾幸生
- 基于滚动优化的对偶控制策略 钱富才, 宋 俐, 刘 丁, 陈小可
- 一种新的模糊-卡尔曼滤波器的控制算法及应用 张高煜, 赵 恒, 杨万海
- 按对角阵加权信息融合 Kalman 滤波器 邓自立, 高 媛
- 柔性制造系统无死锁控制器的设计和验证 徐 刚, 吴智铭
- 非线性时间序列建模的混合自回归滑动平均模型 王红军, 田 铮
- 基于博弈论的 H_2/H_∞ 混合控制及其在汽车主动悬架中的应用 史明光, 陈无畏
- 用过程神经网络和遗传算法实现系统逆向求解 李盼池
- 新型电梯群控系统交通模式识别方法 许玉格, 罗 飞
- 参数不确定广义大系统的保性能分散控制 史国栋, 沃松林, 邹 云
- 离散随机模型降阶的最小条件信息损失方法 章 辉, 孙优贤
- 电液伺服系统的多滑模鲁棒自适应控制 管 成, 朱善安
- 一类不确定线性时滞跳跃系统的鲁棒和非脆弱 H_∞ 控制问题 康 宇, 奚宏生, 季海波, 王 俊
- 切换系统进展 程代展, 郭宇骞
- 基于模糊神经网络大容量输油泵多变量控制 刘 军, 刘 丁, 钱富才, 王玲芝
- 三连杆移动机械臂模型与运动规划 郭丙华, 胡跃明
- 切换循环组合系统的基本性能分析 李建华, 苏 瑞, 李彦平, 赵 军
- 电流型变流器的改进模型预测控制 李玉玲, 鲍建宇, 张仲超