

基于混合势场法的移动机器人路径规划*

王梅, 王叶婷, 屠大维, 江济良, 张国栋

(上海大学机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要: 针对目前移动机器人在路径规划中出现的问题, 提出一种自主移动机器人路径规划的新方法——混合势场法。分析了人工势场法的不足, 找出局部极小值点的形成原因; 针对人工势场法中障碍物附近目标不可达问题, 采用了在斥力场函数中加入斥力因子, 使得机器人顺利到达目标点; 针对陷入局部极小值和振荡的问题, 提出了混合势场法, 通过将势场法和可视图法结合起来, 使得机器人走出局部极小值和振荡区域。最后, 将混合势场法应用于室内移动机器人的路径规划中, 仿真实验证明了该方法的有效性。

关键词: 移动机器人; 路径规划; 混合势场法

中图分类号: TP242

文献标志码: A

文章编号: 1001-3695(2012)07-2447-03

doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.07.012

Path planning of mobile robot based on compound potential field method

WANG Mei, WANG Ye-ting, TU Da-wei, JIANG Ji-liang, ZHANG Guo-dong

(College of Mechatronics Engineering & Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Aiming at the problem existing in the path planning of mobile robot, this paper proposed a path planning based on compound potential field method (CPFM) for autonomous mobile robot. Firstly, this paper analyzed the shortages of artificial potential field in detail, which would lead to the local minimum point. Then it applied repulsive potential field function with additional repulsion factor to deal with the problem of the minimum, which caused by the obstacles in the vicinity of the target and made the target point unreachable. In addition, this paper developed a new compound potential field method, by combining the artificial potential field and visibility graph method, to help the robot escape from the local minimum point or the vibration area. Finally, verified the effectiveness and good performance of the CPFM by the experiments of path planning for indoor mobile robot.

Key words: mobile robot; path planning; compound potential field method (CPFM)

路径规划是自主移动机器人^[1]需要解决的核心问题之一, 近年来越来越多的研究者关注或参与该课题的研究。路径规划是指在具有障碍物的环境下, 按照一定的性能指标, 机器人如何从所处的环境中搜索到一条从初始位置开始到终点的、安全的、无碰撞的最优或次优路径^[2]。

移动机器人的路径规划根据环境信息知道的程度不同可以分为两大类: 环境信息完全已知的全局路径规划和环境信息完全未知或部分未知的局部路径规划^[3]。移动机器人的路径规划方法较多, 基于环境建模的全局路径规划方法主要有自由空间法、构型空间法和栅格法等。依靠传感系统实时感知信息的局部路径规划方法主要有势场法^[4]、神经网络法^[5]和模糊逻辑法^[6]等。在人工势场法路径规划中, 为了解决局部极小点和振荡问题, 学者提出了各种各样的势场及其改进方法。石为人等人^[7]采用了填平势场, 将产生局部最小点的区域内的障碍物进行连接, 从而避免机器人在重新进行路径规划时再度陷入局部最小状态。罗胜华等人^[8]采用了增加引导点的方法, 机器人利用传感器的信息对障碍物形状作出判断, 在检测到陷阱区域而未进入局部极小时选取引导点, 机器人在吸引势

场作用下先向引导点运动, 使机器人走出陷阱区域。王肖青等人^[9]加入选择策略的路径规划算法, 使机器人在每步的动作之前对下一步动作作出预判, 以增加下一步动作的效率。

人工势场法首先由 Khatib^[10]提出, 是自主移动机器人路径规划的重要方法之一, 但有目标不可达、局部极小值和振荡问题的缺陷^[11]。本文针对人工势场法中存在的问题提出了混合势场法 (CPFM), 使机器人能够顺利完成实时路径规划。

1 势场法及存在的问题

势场法实质上是在机器人的运行空间中人为地定义一个抽象势场, 该势场为目标位姿的引力场和环境障碍物的斥力场的叠加, 机器人将沿着梯度下降的方向运动。因而, 将势场的负梯度作为作用在机器人上的虚拟力, 力的大小和方向取决于障碍物对机器人的斥力和目标点对机器人的引力之和, 合力将推动机器人向着目标做无碰运动。如图1所示, 其中 F 为合力, F_{att} 为目标位姿对机器人的引力, F_{rep} 为障碍物对机器人的斥力。

传统势场法是一种局部规划的方法, 存在障碍物附近目标

收稿日期: 2011-12-13; 修回日期: 2012-01-28 基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075252); 上海大学创新基金资助项目 (A10-0109-09-015)

作者简介: 王梅 (1969-), 女, 辽宁人, 硕士, 博士, 主要研究方向为机器人学、机器视觉及伺服控制、智能系统等 (mwang@shu.edu.cn); 王叶婷 (1983-), 山东人, 硕士研究生, 主要研究方向为机器人路径规划; 屠大维 (1965-), 男, 浙江人, 教授, 博导, 主要研究方向为机器视觉及伺服控制、光机电一体化智能机械及仪器、人机智能系统等; 江济良 (1985-), 男, 湖北人, 博士, 主要研究方向为机器视觉、图像处理、人机智能系统; 张国栋 (1986-), 男, 浙江人, 硕士研究生, 主要研究方向为人机交互、人机智能。

不可达、局部极小值和振荡的问题,具体表现如下:

a) 在障碍物附近目标不可达问题。传统的人工势场法中机器人离障碍物越近所产生的斥力越大,而机器人离目标点越近时所产生的引力越小。所以当目标点在障碍物附近时,如果目标点在障碍物之前,如图 2(a) 所示,由于斥力过大引力过小,最终二者达到平衡,形成局部极值点,使机器人停滞,无法到达目标点^[12]。

b) 存在局部极小值和震荡区域。当机器人运动到某一障碍物的影响范围内,如果机器人与目标点的连线垂直于障碍物的一条边,此时机器人所受的斥力和引力在同一条直线上,这时机器人将无法绕开障碍物,最终停止在障碍物前面不能到达目标点,如图 2(b) 所示。另外由于障碍物的位置因素,常常在机器人的运动路径中形成一些凹形区域,机器人在凹形区域内的某一点受力平衡,如图 2(c) 所示,从而停滞,陷入势场的局部极小点。或者由于运动步长选取等原因,使得机器人在局部极小点附近徘徊振荡,如图 2(d) 所示,无法找到正确的路径。这类凹形区域即为常见的陷阱区域,源于势场中的局部极小值点,是令势场法无法实现规划目标的又一问题。

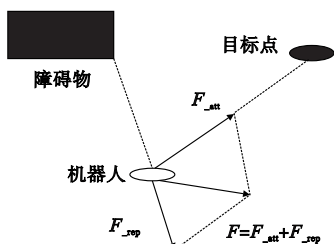


图1 机器人在人工势场中的受力

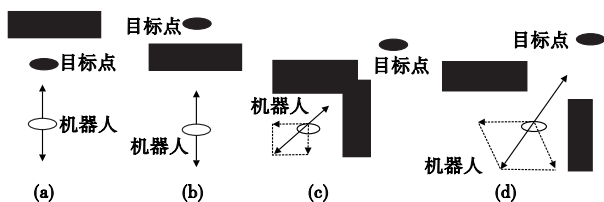


图2 人工势场法中的问题分析

2 混合势场法

2.1 人工势场函数

在人工势场法中,机器人的运动受到引力势场和斥力势场的共同作用,相关势场函数设计如下:

a) 目标点的引力场 假设 $X(X = [x \ y]^T)$ 为机器人在 C 空间中的任意位置,则目标位置与机器人之间的引力场为

$$U_{att} = \frac{1}{2} k_{att} \times L_{goal}^2 \quad (1)$$

引力 F_{att} 为引力场的负梯度:

$$F_{att} = -\text{grad}(U_{att}) = -k_{att} \frac{\partial L_{goal}}{\partial X} \quad (2)$$

其中: k_{att} 为引力系数; $X_g(X_g = [X_g \ Y_g]^T)$ 为目标点在 C 空间中的位置。

b) 障碍物的斥力场 传统的人工势场法中,障碍物附近目标不可达问题产生的根本原因是:当机器人靠近目标时,引力场急剧衰减而斥力场不断增强,当二者达到平衡时,使得机器人停滞而不能到达目标点。针对这一问题,本文采用在斥力场函数中加入斥力因子 L_{goal} ,调整目标点附近障碍物的斥力大小,使障碍物离目标越近斥力越小,原有的目标点引力场函数保持不变。修正后的斥力场函数为

$$U_{rep} = \begin{cases} \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{L_{obs}} - \frac{1}{L_0} \right)^2 L_{goal} & L_{obs} < L_0 \\ 0 & L_{obs} \geq L_0 \end{cases} \quad (3)$$

斥力场的负梯度 F_{rep} 为

$$F_{rep} = -\text{grad}(U_{rep}) = \begin{cases} k_{rep} \left(\frac{1}{L_{obs}} - \frac{1}{L_0} \right) \frac{L_{goal}}{L_{obs}^2} \frac{\partial L_{obs}}{\partial X} - \frac{1}{2} k_{rep} \left(\frac{1}{L_{obs}} - \frac{1}{L_0} \right)^2 \frac{\partial L_{goal}}{\partial X} & L_{obs} < L_0 \\ 0 & L_{obs} \geq L_0 \end{cases} \quad (4)$$

其中: k_{rep} 为斥力系数; L_{obs} 为机器人到障碍物最短的欧氏距离; $L_{goal} = \|X_g - X\|$ 为机器人到目标点的欧氏距离; L_0 为障碍物区域内对机器人的运动产生影响的距离。

改进的人工势场法中使机器人靠近目标时,斥力相应减小,在目标点处斥力达到零。由此,使目标点成为整个势场的全局最小点,解决了机器人在障碍物附近目标不可达的问题,完成路径规划。

2.2 混合势场法的基本原理

针对存在的问题,本文提出混合势场法,将势场法和可视图法结合起来,消除局部极小和振荡现象。首先,利用 C 空间表示法,将机器人抽象为一个质点。在没有进入局部极小与振荡区域时,机器人在势场法的作用下向目标点运动;当进入局部极小与振荡区域时,由于势场的作用,将使机器人滞留于该区域,如图 2(b) ~ 2(d) 所示。为了跳出局部极小和振荡区域,在分析陷阱区域形成特点的基础上,借鉴可视图法^[13]的基本原理,将邻近区域内、可视区间中的障碍物顶点作为运动目标,从而使得机器人跳出陷阱区域,完成路径规划。该陷阱区域是由于障碍物的位置因素造成的,因此,合理地选取障碍物顶点作为运动目标点,成为有效地逃出陷阱区域的关键问题。

在多个障碍物顶点中,根据角度规则选择运动目标点。目标点选取原则如下(不失一般性地假设机器人的邻近区域内、可视区间中存在两个 C 空间障碍物):

a) 若两个 C 空间障碍物不交叠

(a) 分别计算各障碍物顶点与机器人之间的最近距离,根据对机器人运动的影响程度(取决于障碍物的斥力大小),运动目标点从最近障碍物上选取。

(b) 求取最近障碍物上的可视点。根据可视点的定义,连接障碍物顶点 M 与机器人 O 的直线与任一障碍物有且只有一个交点,则顶点 M 为可视点,如图 3(a) 所示,顶点 A 、 C 为可视点。

(c) 以机器人中心,分别计算各可视点与目标点之间的张角 $\angle AOR$ 和 $\angle ROC$ 。

(d) 选择张角较小的可视点作为运动目标点。

b) 若两个 C 空间障碍物产生交叠

(a) 求取所有的可视点如图 3(b) 所示,顶点 A 和顶点 C 为可视点。

(b) 以机器人中心,分别计算各可视点与目标点之间的张角 $\angle AOR$ 和 $\angle ROC$ 。

(c) 选择张角较小的可视点作为运动目标点,以缩减运动路径。

混合势场法在传统势场法的基础上,利用可视点指导机器人逃离局部极小区域,避免机器人陷入局部极小点或者发生振荡,从而完成实时路径规划。

2.3 基于混合势场法的路径规划流程图

在混合势场法中,选取可视点为运动目标解决了局部极小

和振荡问题,斥力因子避免了障碍物附近目标不可达问题,从而使机器人到达目标点,顺利完成路径规划。基于混合势场法的路径规划执行过程如下:

a)通过传感器检测机器人周围的环境信息,计算出机器人在势场中所受合力大小。

b)判断是否进入局部极小与振荡区域。

c)若机器人没有进入局部极小与振荡区域,由所受合力直接求取机器人的相对位移,进一步计算出机器人下一位置点的坐标。

d)若机器人进入局部极小与振荡区域,根据障碍物是否交叠,分别利用图3所示的方法寻找可视点,确定运动目标点及其位置坐标。

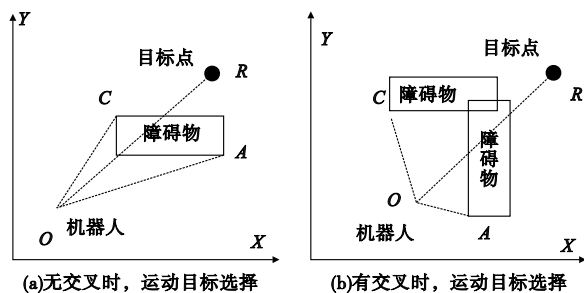


图3 运动目标的选取

为了确定机器人是否进入局部极小与振荡区域,以合力大小和滞留某一区域的时间长短为判断依据。若合力小于设定的域值 ε ,则认为机器人进入了局部极小区域。若机器人连续多次进入半径为 ξ 的较小的圆域内,则机器人进入振荡区域。

综上所述,基于CPFM的路规划流程如图4所示。

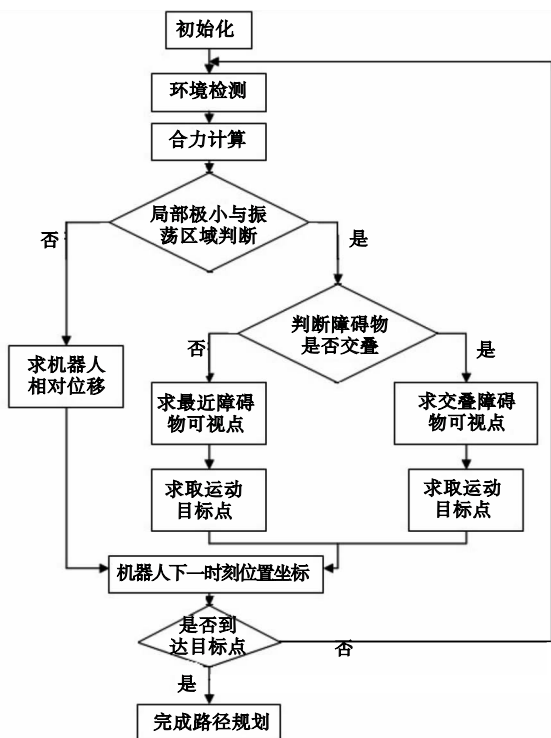


图4 混合势场法路径规划流程

3 实验平台介绍和仿真结果

为了验证算法的有效性,以室内移动机器人在走廊中的自主运动为研究对象,在MATLAB平台下,采用混合势场法进行了路径规划的仿真实验。在实验中,两侧走廊保持固定不变,障碍物的位置和大小、机器人运动的起始点和目标点都随机生

成。相关的实验参数如表1所示。

表1 混合势场法的相关参数

ε/N	ξ/cm	σ/cm
0.1	0.05	5

进行了200组仿真实验,机器人均能够完全避开障碍物,顺利到达目标点。从进行的实验中,选取两组比较有代表性的实验进行分析说明。

实验1 局部极小值点逃逸实验

采用人工势场法进行路径规划时,由于目标点在障碍物之后,运动过程中,机器人受到的引力和斥力达到平衡,陷入局部极小值点A,如图5(a)所示。采用混合势场法时如图5(b)所示,根据局部极小值点的判断条件,机器人在点A检测到局部极小,按照交叠障碍物可视点的求取方法,选取左侧可视点B为机器人的运动目标点,使机器人跳出极小值点,最终顺利抵达运动目标。

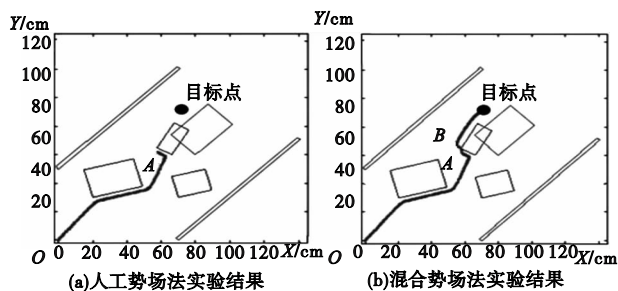


图5 局部极小值点逃逸的对比实验

实验2 振荡区域逃逸实验

由于障碍物交叠,易于在机器人的运动路径中形成一些凹形的陷阱区域。采用人工势场法进行路径规划时,使机器人陷入该区域A中,徘徊振荡而无法找到正确的路径,如图6(a)所示。采用混合势场法时(图6(b)),根据振荡区域判断条件,检测到机器人在点A附近发生振荡,对交叠障碍物进行分析,选取右侧可视点B为机器人的运动目标点,从而摆脱振荡区域,完成路径规划。

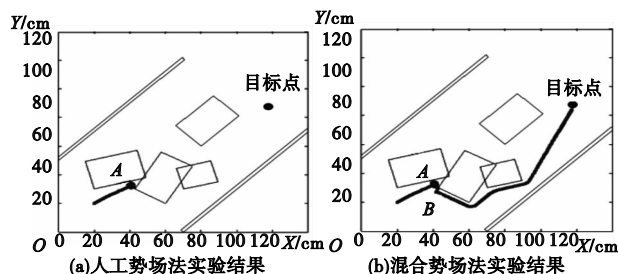


图6 振荡区域逃逸的对比实验

从对比实验看出,人工势场法虽然能够高效地找到一条通往目标的路径,但势场中存在局部极值点和振荡区域,使机器人陷入其中而无法到达目标点。混合势场法保留了人工势场法的优点,同时通过寻找可视点的方法解决了陷入极小值点和振荡区域的问题。

从图5(b)和图6(b)的实验中可以看出,混合势场法是有目标的,通过寻找可视点作为机器人的运动目标,从而避免了运动的盲目性,能够快速走出极小值点和振荡区域,顺利完成路径规划。

4 结束语

为了解决人工势场法中障碍物附近目标点不可达、极小值点和振荡区域问题,本文提出了混合势场法,(下转第2460页)

(上接第2449页)利用斥力因子避免障碍物附近目标点不可达问题;通过寻找可视点引导机器人跳出极小值点和振荡区域,顺利到达目标点。

本文通过大量的仿真实验,验证了混合势场法的有效性和可行性。仿真结果表明,混合势场法有效地解决了人工势场法中的局部极小值点和发生振荡等问题。

参考文献:

- [1] VELAGIC J, LACEVIC B, OSMIC N. Efficient path planning algorithm for mobile robot navigation with a local minima problem solving [C]//Proc of IEEE International Conference on Industrial Technology. Washington DC:IEEE Computer Society,2006:2325-2330.
- [2] YE Bin-qiang, ZHAO Ming-fu, WANG Yi. Research of path planning method for mobile robot based on artificial potential field [C]//Proc of International Conference on Multimedia Technology. 2011:3192-3195.
- [3] LI Qing, WANG Li-jun, CHEN Bo, *et al.* An improved artificial potential field method for solving local minimum problem [C]//Proc of the 2nd International Conference on Intelligent Control and Information Processing. 2011:420-424.
- [4] 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[J].自动化学报,2010,36(8):1122-1129.
- [5] YANG S X, MENG M. Real-time collision-free path planning of robot manipulators using neural network approaches [J]. *Autonomous Robots*, 2000, 9(1):27-39.
- [6] 张毅,罗元,郑太雄.移动机器人的路径规划[M].北京:电子工业出版社,2007:208-217.
- [7] 石为人,黄兴华,周伟.基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J].计算机应用,2010,30(8):2021-2023.
- [8] 罗胜华,刘国荣,蒋燕.一种基于改进人工势场法的移动机器人路径规划[J].微计算机信息,2009(10-2):188-190.
- [9] 王肖青,王奇志.传统人工势场的改进[J].计算机技术与发展,2006,16(4):96-98.
- [10] KHATIB O. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots [C]//Proc of IEEE International Conference on Robotics and Automation. 1990:500-505.
- [11] TANG Lei, DIAN Song-yi, GU Gang-xu, *et al.* A novel potential field method for obstacle avoidance and path planning of mobile robot [C]//Proc of the 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology. 2010:633-637.
- [12] 文勇,张怀相,曾虹.新型势场法的移动机器人避障研究[J].杭州电子科技大学学报,2009,29(1):50-53.
- [13] 杨满清,肖兴贵,姚栋.一种基于可视图法的机器人全局路径规划算法[J].沈阳工业大学学报,2009,31(2):225-229.