

复杂环境下解决势场法局部极小问题的路径规划方法

刘传领^{1,2}, 梁咏梅², 杨静宇¹

(1. 南京理工大学 计算机科学与技术学院, 江苏 南京 210094; 2. 商丘职业技术学院 计算机系, 河南 商丘 476100)

摘 要: 多年来势场法路径规划的局部极小问题就一直被广泛关注, 针对人工势场法所固有的缺陷提出了一种改进的移动机器人路径规划方法. 方法利用膨胀与腐蚀算法对机器人的工作空间进行预处理, 来优化工作环境, 并使用改进的势场法进行机器人导航, 以改善其运动轨迹; 另外通过设置子目标点使陷入局部极小的机器人快速“逃离”极小状态. 仿真结果表明本文算法在复杂环境下解决机器人路径规划的局部极小问题是有效的.

关键词: 势场法; 路径规划; 局部极小; 膨胀与腐蚀算法; 子目标点

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2683(2012)04-0078-05

A Method for Solving Local Minimum Problem of Path Planning Based on Potential Field in Complex Environments

LIU Chuang-ling^{1,2}, LIANG Yong-mei², YANG Jing-yu¹

(1. College of Computer Science and Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;

2. Department of Computer, Shangqiu Vocational and Technical College, Shangqiu 476100, China)

Abstract: The local minimum problem of path planning based on potential field has attracted attention for many years. For the innate limitations of potential field, an improved method for mobile robot path planning is proposed in this paper. In this method, expansion and erosion algorithms are used to pretreat and optimize the workspace of robot and improved potential field is used to navigate robot. Furthermore, sub-goal point is set for robot to get rid of local minimization rapidly. The simulation results indicate that this method is effective to solve local minimum problem for robot path planning in complex environments.

Key words: potential field method; path planning; local minima; expansion and erosion algorithm; sub-goal point

0 引 言

路径规划是移动机器人领域的重要研究内容之一, 它是指在有障碍物的环境中, 按照给定的方法寻找一条从起始点到终点的、安全的、无碰撞的机器人运动路径. 将人工势场法应用于机器人避障首先是由 O. Khatib 在 1986 年提出来的^[1], 其实质是把机

器人的运动空间定义为一个抽象势场, 该势场为目标位置的引力场和运动空间中障碍物的斥力场的叠加^[2-4], 机器人在合势场的作用下运动. 引力场函数随机器人与目标点的距离增加而单调递增, 且方向指向目标点; 斥力场函数在机器人处在障碍物位置时有一极大值, 并随机器人与障碍物距离的增大而单调减小, 方向指向远离障碍物方向. 因人工势场法计算简单、易于实现, 因而得到了广泛的应用^[5-7].

收稿日期: 2011-07-26

基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划重点项目(90820306); 国家自然科学基金面上项目(60705020).

作者简介: 刘传领(1971—), 男, 博士研究生, 副教授, E-mail: lch2709598@sina.com.

机器人在合势场的作用下,从高势场位置沿势场的负梯度方向逐步向低势场位置运动,由于目标点被设计为合势场的全局极小点,因此,从理论上来说机器人能够最终到达并止步于目标点.然而,在复杂环境下目标点以外的区域也存在极小点,因此导致机器人可能无法到达目标点.势场法通常存在一下几个缺陷^[4]:①在相近障碍物间不能发现路径;②在狭窄通道中摆动;③在障碍物前振荡;④存在陷阱区域;⑤当目标附近有障碍物时无法达到目标点(GNRON).如图1描述了局部极小的一种情况,机器人沿着势场的负梯度方向运动,进入U形障碍物内部,从而困于局部极小点而无法到达目标,导致路径规划任务失败.尽管势场法存在一些缺陷,但相对于许多复杂的路径规划算法,势场法具有简单实用的优点和良好的实时性,因此近年来很多研究者对势场法进行了广泛地研究,也取得了相当的进展,但一般都是针对较简单或单一的路径环境进行研究^[7-9].本文提出了一种改进的机器人路径规划方法,该方法使用改进的势场法进行机器人导航,利用膨胀算法与腐蚀算法对机器人的复杂工作空间进行预处理,通过设置子目标点使陷入局部极小的机器人“逃离”极小状态.

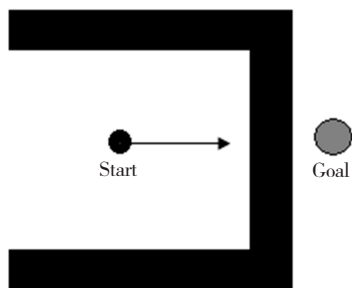


图1 局部极小的一种情况

1 路径规划算法设计

1.1 复杂障碍物栅格的处理

本文采用二值图像的数学形态学方法,利用膨胀和腐蚀两种基本变换,将离散的障碍物个体融合为完整的障碍物^[10-11].膨胀运算和腐蚀运算是一对相反的操作方法,障碍物栅格的膨胀实质是对自由栅格的腐蚀,障碍物栅格的腐蚀实质是自由栅格的膨胀,根据对障碍物集合的操作定义膨胀和腐蚀运算.

定义1 膨胀运算: 设 $AG(x)$ 为机器人运动空间 x 处的相邻栅格集合,对属于障碍物子集 O_i ($i =$

$1, 2, \dots, n$) 并且与自由栅格集合 $\bar{O}$ 相邻的栅格 x ,用障碍物集合 O_i 内的元素填充 $AG(x)$ 集合.

定义2 腐蚀运算: 设 $AG(x)$ 为机器人运动空间 x 处的相邻栅格集合,对属于障碍物子集 O_i ($i = 1, 2, \dots, n$) 并且与自由栅格集合 $\bar{O}$ 相邻的栅格 x ,用自由栅格集合 O_i 内的元素填充 $AG(x)$ 集合.

根据以上定义,膨胀的结果是障碍物集合 O_i 向自由栅格区域扩展了 $AG(x)$ 占据的空间,而腐蚀的结果是障碍物集合 O_i 被自由栅格区域侵入了 $AG(x)$ 占据的空间.图2、图3、图4给出了膨胀运算与腐蚀运算的结果.

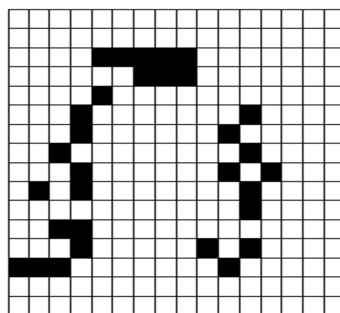


图2 原始栅格

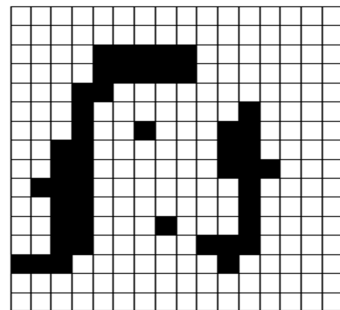


图3 膨胀运算

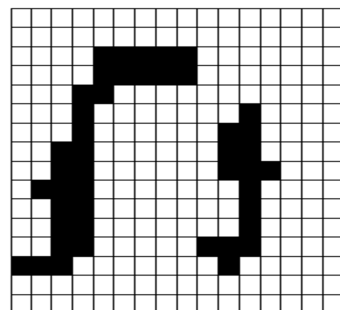


图4 障碍物栅格的膨胀与腐蚀运算

图2中表示膨胀运算前离散的障碍物栅格情况,经过若干次膨胀运算后得出如图3的结果;图3又表示腐蚀运算前离散的障碍物栅格情况,经过若干次腐蚀运算后,把小面积的障碍物信息作为噪音去除得出如图4的结果.膨胀运算和腐蚀运算的次

数根据障碍物栅格和机器人通过半径的情况来决定. 通过膨胀运算和腐蚀运算, 离散的障碍物信息被融合为整体信息, 为移动机器人路径规划提供了方便.

1.2 设置子目标点

为了使机器人能够顺利地到达目标点或者使陷入局部极小的机器人能够“逃脱”局部极小到达目标点, 本文采用设置子目标方法^[12]. 设置子目标点就是通过算法在路径的中间设置子目标点, 目的是产生新的牵引点.

1) 正常情况下的子目标点. 机器人在没有陷入局部极小时设置的子目标点, 目的是使机器人能顺利运行到目标点. 如图5所示, 图中 Goal 处表示目标点, g 处表示中间子目标, Robot 表示机器人的当前位置, 箭头表示机器人的运动方向.

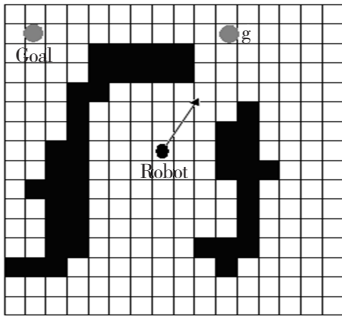


图5 正常情况下的子目标点

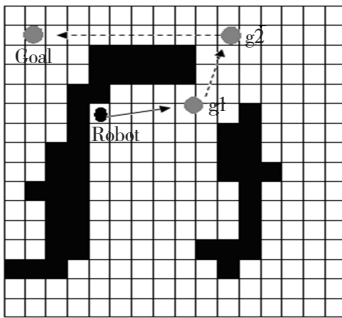


图6 局部极小情况下的子目标点

2) 局部极小情况下的子目标点. 当检测到机器人陷入局部极小点后, 算法就会从人工势场法转向陷入局部极小点的算法来设置一个中间子目标点, 新子目标点产生的牵引力将机器人拉出局部极小点区域, 然后再按人工势场法进行路径规划, 如果机器人再次陷入局部极小点状态, 算法会设置第二个子目标点牵引机器人走出稳定区, 依次下去直到机器人到达目标点. 局部极小情况下的子目标设置如图6所示, 图中 Goal 处表示目标点, g1、g2 处表示路径中间子目标点, Robot 处表示机器人的当前位置.

机器人在当前位置陷入局部极小, 通过 g1 子目标点产生的牵引力“逃离”局部极小; 实箭头表示机器人当前的运动方向, 虚箭头表示机器人将来的运动方向.

1.3 改进的人工势场函数

传统的人工势场产生局部极小的根本原因是机器人接近目标点的过程中, 引力场逐步衰减, 而当机器人接近障碍物时, 斥力场又逐步增强, 引力场和斥力场的平衡点不一定在目标点, 因此, 机器人不一定能到达目标点^[13-14]. 本文采用的引力势场函数为^[7]: (文中的同名参数意义相同)

$$U_{att}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{att}(X - X_g)^2 & |X - X_g| \leq d_0 \\ k_{att}(2d_0|X - X_g| - d_0^2) & |X - X_g| > d_0 \end{cases} \quad (1)$$

其中 d_0 为正常数. 该引力场所生成的对机器人的引力为:

$$F_{att}(X) = -\nabla U_{att}(X) = \begin{cases} -k_{att}(X - X_g) & |X - X_g| \leq d_0 \\ -2k_{att}d_0 & |X - X_g| > d_0 \end{cases} \quad (2)$$

这里, 当 $|X - X_g| > d_0$ 时, $F_{att}(X)$ 是一个常数. 采用的斥力场函数为:

$$U_{rep}(X) = \begin{cases} \frac{1}{2}k_{rep}\left(\frac{1}{X - X_{obs}} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2(X - X_g)^n & |X - X_{obs}| \leq \rho_0 \\ 0 & |X - X_{obs}| > \rho_0 \end{cases} \quad (3)$$

其中 ρ_0 是障碍物的影响范围. 该斥力场所生成的对机器人的斥力为:

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

这里,

$$F_{rep1} = k_{rep}\left(\frac{1}{X - X_{obs}} - \frac{1}{\rho_0}\right)\frac{(X - X_g)^n}{(X - X_{obs})^2} \quad (5)$$

$$F_{rep2} = \frac{n}{2}k_{rep}\left(\frac{1}{X - X_{obs}} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2(X - X_g)^{n-1} \quad (6)$$

2 仿真实验

为了验证文中算法的有效性, 在不同的环境中用仿真软件对文中算法进行了仿真测试, 测试环境首先用 2.1 节提出的膨胀算法和腐蚀算法进行初始化. 本节给出了文中算法用于机器人路径规划的实验结果. 机器人是底座为正八边形并带有全方位移动机构, 其每个边有一个超声波传感器, 半径 0.3 m, 感知半径 3 m, 采样周期 5 ms. 实验的主要参

数设置如下: $k_{att} = 1$ 、 $k_{rep} = 1$ 、 $n = 2$ 、 $d_0 = 3$ 、 $\rho_0 = 2$, 这些参数在仿真过程中可根据情况调整, 其它参数另定.

2.1 测试文中势场函数的性能

本实验讨论 n 的取值对路径规划的影响, 当目标点不在障碍物的影响范围内时, n 取任何值机器人都能到达目标点, 如图 7 所示; 当目标点在障碍物的影响范围内、 $n = 0.5$ 左右时, 势场函数出现局部极小, 如图 8 所示, M 点为局部极小点; 当目标点在障碍物的影响范围内、 $n = 2$ 或 $n = 3$ 时, 势场函数能规划出合理路径, 如图 9 所示.

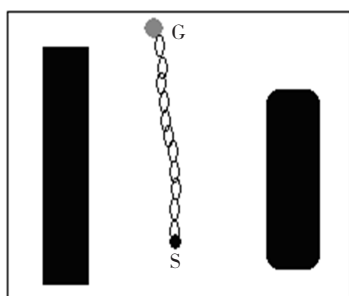


图7 不受障碍物影响的情况

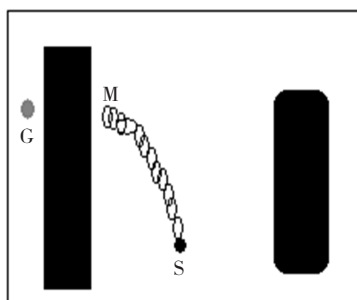


图8 局部最小情况

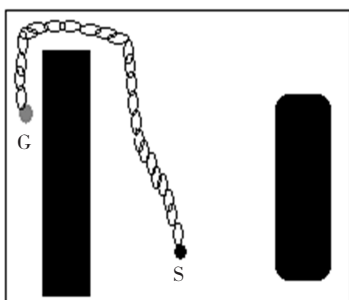


图9 参数调整后的路径规划

2.2 算法在复杂环境下的路径规划

本实验讨论所提算法在不同复杂环境下的机器人路径规划. 图 10 给出了使用以及不使用子目标点方法两种情况的路径规划, path1 表示使用子目标点路径, 路径中设置了两个子目标点 $g1$ 和 $g2$; path2 表

示不使用子目标点路径, path2 有陷入局部极小的情况. 图 11 给出了本算法在“5 字”型障碍物环境中使用子目标点方法的路径规划, 路径中设置了 3 个子目标点 $g1$ 、 $g2$ 和 $g3$.

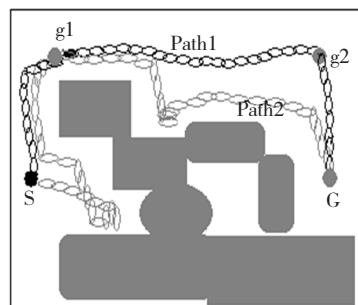


图10 两种情况的路径规划

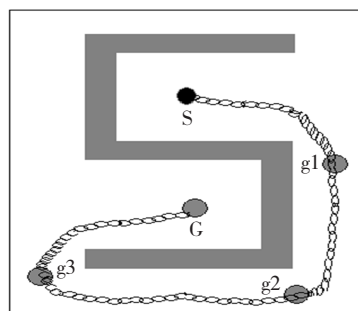


图11 “5 字”型障碍物环境的路径规划

2.3 算法性能比较

如前所述, 由于缺乏全局信息, 很多算法在复杂环境下解决势场法局部极小问题时都存在自身的局限性. 例如, 沿墙行走方法是一种常见的解决局部极小问题的方法, 其在机器人陷入局部极小点后利用沿墙运动逃离陷阱, 算法的核心在于设计从沿墙运动模式重新切换到势场法运动模式的条件, 该方法在障碍物形状较复杂的情况下就可能失效^[17]. 随机搜索算法被认为是搜索算法中比较有效的一种^[18], 其试图在机器人陷入局部极小点后利用无规则的布朗运动找到势场值比当前局部极小点更低的逃离点, 然后继续沿着势场负梯度方向运动直到到达目标点或下一个局部极小点. 然而, 布朗运动的盲目性必然会严重影响实时规划的效率, 对于较深的局部极小陷阱, 随机搜索算法的效率就很低^[19]. 图 12 给出了三种算法应用于路径规划的性能比较, Path1 表示随机搜索算法规划的路径, Path2 表示沿墙走方法规划的路径, Path3 表示本文算法规划的路径.

以上仿真和实验结果验证了本文提出的方法在不同复杂环境下进行路径规划的有效性和可靠性, 并通过和其他两种方法性能的对比, 说明本文提出

的方法在一些复杂环境中相对于一些已有方法更加可靠.

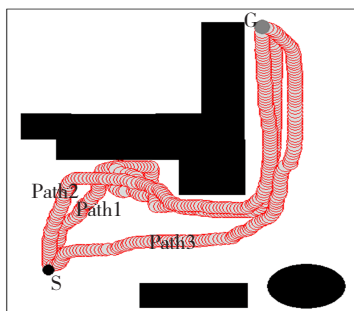


图 12 算法性能的对比

3 结 语

为了解决传统人工势场法路径规划的局部极小问题,提出了一种改进的机器人路径规划方法.该方法使用改进的势场法进行机器人导航,利用膨胀算法与腐蚀算法对机器人的复杂工作空间进行预处理,通过设置子目标点使陷入局部极小的机器人“逃离”极小状态.通过大量的仿真和实验,对算法的有效性、可行性进行了验证,并讨论了参数设置对于机器人运动轨迹的影响.结果表明本文算法在不同复杂环境下解决机器人路径规划的局部极小问题是有效的.

参 考 文 献:

- [1] KHATIB O. Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots [J]. Int. J. Robot. Res., 1986, 5(1): 90-98.
- [2] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential Field Methods and Their Inherent Limitations for Mobile Robot Navigation [C] //In Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation: Sacramento, CA, 1991: 1398-1404.
- [3] 董立志,孙茂相. 基于实时障碍物预测的机器人路径规划 [J]. 机器人, 2000, 22(1): 12-16.
- [4] 高云峰,黄海. 复杂环境下基于势场原理的路径规划方法 [J]. 机器人, 2004, 26(2): 144-148.
- [5] GE S. S., CUI Y. J. Newpotential Functions for Mobile Robot Path Planning [J]. IEEE Trans. Robot. Autom., 2000, 16(5): 615-620.
- [6] 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): 1122-1130.
- [7] HADDAD H., KHATIB M., LACROIX S. and CHATILA, R. Reactive Navigation in Outdoor Environments Using Potential Fields [C] //IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1998, 2: 1232-1237.
- [8] GULDNER J., UTKIN V. I. Sliding Mode Control for Gradient Tracking and Robot Navigation Using Artificial Potential Fields [J]. IEEE Trans. Robot. Automat., 1995, 11(4): 247-254.
- [9] WARREN C. W. Global Path Planning Using Artificial Potential fields [C] //In Proc. IEEE Conf. Robotics and Automation, 1989: 316-321.
- [10] 龚伟,石青云,程民德. 数字空间中的数学形态学——理论及应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1997: 135-146.
- [11] 蔡自兴,贺汉根,陈虹. 未知环境中移动机器人导航控制理论与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2009: 302-308.
- [12] FAVERJON B., TOURNASSOUD P. A Local Approach for Path Planning of Manipulators with a High Number of Degrees of Freedom [C] //Proc. IEEE Int. Conf. Robot. Automation: Raleigh, NC, 1987: 1152-1159.
- [13] RIMON E, KODITSCHKE D. Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions [J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1992, 8(5): 501-518.
- [14] LIU C Q, JR M H A, KRISHNAN H, YONG L. Virtual Obstacle concept for Local-minimum-recovery in Potential field Based Navigation [C] //In Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation: San Francisco, USA: IEEE, 2000: 983-988.
- [15] YUN X, TAN K C. A Wall-following Method for Escaping Local Minima in Potential Field Based Motion Planning [C] //In Proceedings of the International Conference on Advanced Robotics: Monterey, USA: IEEE, 1997: 421-426.
- [16] MABROUK M H, MCINNES C R. Solving the Potential Field Local Minimum Problem Using Internal Agent States [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2008, 56(12): 1050-1060.
- [17] BORENSTEIN J, KOREN Y. Real-time Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [18] JANABI-SHARIFI F, VINKE D. Integration of the Artificial Potential Field Approach with Simulated Annealing for Robot Path Planning [C] //In Proceedings of the 1993 IEEE International Symposium on Intelligent Control: Chicago, USA: IEEE, 1993: 536-541.
- [19] CASELLI S, REGGIANI M, ROCCHI R. Heuristic Methods for Randomized path Planning in Potential Fields [J]. In Proceedings of the IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, Canada, 2001: 426-431.

(编辑: 王 萍)