

基于近似 Voronoi 图的移动机器人实时路径规划

Real-time path planning of mobile robots based on approximate Voronoi diagram

(1.湘潭大学;2.湖南工程学院) 徐美清¹ 刘国荣² 周桂珍¹ 裴 琴¹
XU Mei-qing LIU Guo-rong ZHOU Gui-zhen PEI Qin

摘要: 运用 Voronoi 图理论及人工势场理论,研究了一种基于近似 Voronoi 图的移动机器人实时路径规划的方法,用来实现未知室内环境中移动机器人的自主导航。该方法朝向预先定义的目标点位置来探测室内环境,生成近似 Voronoi 图,同时利用人工势场法进行避障,生成一条能达到目标点的安全、光滑路径。仿真结果表明,该方法简单且易于实现,同时能够减少规划时间。

关键词: 路径规划; 近似 Voronoi 图; 人工势场

中图分类号: TP242 **文献标识码:** A

Abstract: This paper represents an on-line path planning algorithm which is based on Voronoi diagram and potential field method. It is designed for autonomous navigation of mobile robot in unknown indoor environment. The approximate Voronoi diagram generated from exploration towards pre-defined targets and the potential field method contribute the ability of building a safe and smooth path for attaining a desired position. Results of simulation show that this simple algorithm can be realized easily and can reduce the navigation time.

Key words: path planning; approximate Voronoi diagram; potential field

技术创新

引言

移动机器人在未知室内环境中进行路径规划,仅能够依靠传感系统实时感知的信息。现有的在线路径规划通常采用两种策略:第一种是不生成路图直接利用传感器信息绕过障碍物;第二种是利用传感器信息生成路图再规划路径。第一种策略应用在障碍物不密集的环境中规划效率比较快,但如果环境中的障碍物比较密集,采用第一种策略绕过障碍物较第二种耗时长而且缺少学习能力,显得智能水平不够。

本文研究的规划方法采用第二种策略,首先构造室内环境的近似 Voronoi 图,然后利用人工势场方法进行避障,并利用极坐标下的对称多项式曲线进行路径的圆滑调整,得到一条较优的行走路径。

1 近似 Voronoi 图

基于 Voronoi 的环境路图最大的优点是路图中的路径是 Voronoi 边,而 Voronoi 边是障碍物离散中心的中垂线,这样就能保证机器人在运行过程中最大程度地远离障碍物。在运用 Voronoi 图理论进行环境路图的创建时,通常先根据移动机器人的大小对障碍物进行“膨化”处理,然后把机器人退化成一个质点,再根据障碍物形状大小在障碍物的内部提取若干个点作为建模的生成元,再以这些生成元为圆心作若干个圆包络障碍物区域。

但是 Voronoi 图法存在以下不足:

- (1) 规定了环境的规模或区域的边界从而都所有边缘都被探测到以后终止探测。
- (2) 不支持避障能力,使得移动机器人只能在一定范围内沿着已经建好的 Voronoi 图的边从一个位置移动到另一个位置,

从而得到一条安全路径,所以减慢了探测过程,同时也使得移动机器人只能执行静态环境中的地图创建。

(3) 环境路图建好后,要求一种图搜索算法在预先定义的目标点之间计算一条安全路径来实现移动机器人自主导航,但大部分的图搜索算法在大规模环境中并无计算能力。

针对以上 Voronoi 图法存在的不足,我们提出了近似 Voronoi 图法,其特点如下:

- (1) 高效率的环境探测:不像 Voronoi 图法一样要执行整个环境区域的探测及路图构建,其探测过程仅限于在起始位置和目标位置之间找到一条安全路径。
- (2) 路图构建的同时能够找到一条起始点到目标点的次最优路径:移动机器人在环境探测和路图构建过程中并不要求沿着已经产生的 Voronoi 边行进,而是允许其沿着边缘位置移动的同时能躲避障碍物并且生成一条光滑路径,所以移动机器人在向目标点的环境探测过程中,能够在已经建好的地图上设立子目标点并自主移动。

为了减少 Voronoi 边的计算负担,不管传感器采集的信息有多丰富,我们都采取近似传感数据的方法来产生一种近似的 Voronoi 图结构。其计算步骤如下:

- (1) 近似每一个局部扫描得到的感知数据并将其保存为 $P(x, y, \text{扫描度})$;
- (2) 在数据表里写下新的感知数据并且保存为 Datalist;
- (3) 如果这些数据是来自激光测距仪的首次扫描,则把 Datalist 中的数据分成不同的类,并且保存为 Groupplist;
- (4) 如果不是,则保存为 New Groupplist;
- (5) 比较 Groupplist 和 New Groupplist 里面的类;
- (6) 如果两个类的差距足够小,则把新的感知数据加进 Groupplist 中的类;
- (7) 否则,把 New Groupplist 中的类增加为 Groupplist 中新的一类;

徐美清: 硕士在读 (C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(8)对 Grouplist 中的数据类进行三角化并计算每一个三角形的外接圆心;

(9) 如果外接圆的半径 R 大小合适, 则生成 Grouplist 的近似 Voronoi 路网。

为了使路网构建过程中只建立有用的 Voronoi 边, 三角形的外接圆半径 R 必须限制为: 机器人的直径 $<R<$ 一定的数值, 从而不会因通道狭窄生成不能允许机器人安全通过 Voronoi 边, 同时也不会因环境中的大的凹陷而产生不必要的 Voronoi 边。

仿真试验中我们将机器人直径设为 1m, 上限值设为 2.5m, 机器人当前位置为坐标原点, 目标点为 $G(22,0)$, 图 1 是机器人向目标点运动过程中近似感知数据生成的近似 Voronoi 路网。

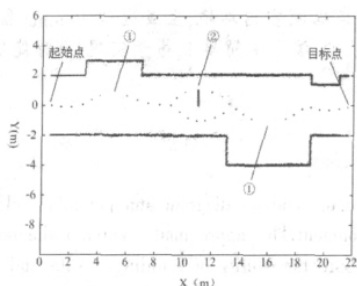


图 1 近似 Voronoi 路网

- ①环境存在大的凹陷,使得 $R>2.5$ m,从而不能生成 Voronoi 边;
- ②通道狭窄,使得 $R<1$ m,从而不能生成 Voronoi 边。

2 避障方法

机器人沿着已建成的 Voronoi 边向着目标点位置运动过程中,由于环境中存在运动障碍物,所以必须采用避障方法以实现移动机器人的安全运动,而人工势场法是路径规划避障算法中较成熟且高效的规划方法,所以本文采用人工势场法避障。

设机器人在工作环境中的位置为 $X_R=[x_r, y_r]^T$, 目标点 G 的位置坐标为 $X_G=[x_g, y_g]^T$, 定义 A 为正常数, 则目标点对机器人的引力场可以定义为:

$$U_{an}(X_R) = \frac{1}{2} A (X_R - X_G)^2 \quad (1)$$

为了使机器人远离障碍物并且消除目标点不可达现象,我们将斥力场描述为:

$$U_{rep}(X_R) = \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 (X_R - X_G)^n & \rho \leq \rho_0 \\ 0 & \rho > \rho_0 \end{cases} \quad (2)$$

其中 ρ 是机器人 X_R 与障碍物之间的最近距离, $(X_R - X_G)$ 为机器人与目标之间的距离, 障碍物的影响范围在距离 ρ_0 之内, η 是一个位置增益系数, 为一个大于 0 的任意实数。从方程(1)和(2)我们可以得到促使机器人向着目标位置移动的势场为:

$$U(X_R) = U_{an}(X_R) + U_{rep}(X_R) \quad (3)$$

从而得到移动机器人所受的力 F 为:

$$F = -\text{grad}[U] = -\left[\frac{\partial U}{\partial x_r}, \frac{\partial U}{\partial y_r} \right] \quad (4)$$

为了对动态环境中存在的运动障碍物进行实时、快速地躲避, 我们不采用传统势场中把存在于环境中的整个的障碍物的势场都考虑进去的方法, 而是取感知到的障碍物表面离机器人最近的一个点, 并在这个点的位置定义一个粒子斥场, 这样即使工作环境中只存在静态障碍物, 产生的斥力场也会随着时间的变化而变化。而当我们把这些在不同离散时刻障碍微粒产生的瞬时斥力场叠加起来就能够得到跟原先的障碍物基本相同的

势场。

3 路径平滑

由于在未动态环境下, 机器人仅依靠传感器来感知环境, 因此产生的路径经常会有突变点, 即路径不平滑, 这给机器人跟踪规划的路径带来困难。为了使机器人更易于控制, 要求移动机器人具有较高的路径跟踪精度即相应的平滑路径生成能力。平滑路径的任务就是寻求一种连接移动机器人任意两个姿态的曲线, 该曲线对于时间和长度都是最优的。本文引用文献中的极坐标下的对称多项式曲线进行路径圆滑处理。

极坐标下对称多项式曲线方程为:

$$r(\phi) = R \left[1 + \frac{\phi^2}{2} - \frac{\phi^3}{\Phi} + \frac{\phi^4}{2\Phi^2} \right] \quad (5)$$

式中, (r, ϕ) 为曲线上各点的极坐标, R, Φ 为方程系数, R 为半径, Φ 为曲线的中心角。如图 2 所示:

直线 MN : $\phi = \Phi/2$ 为对称轴, 即 $r(\phi) = r(\Phi - \phi)$, 曲线的曲率为:

$$k = \frac{r^2 + 2r'^2 - rr''}{(r^2 + r'^2)^{3/2}} \quad (6)$$

式中: k 为曲线曲率 $r' = \frac{dr}{d\phi}$; $r'' = \frac{d^2r}{d\phi^2}$;

设 D_1-P-D_2 为折线路径, 路径转折点 P 处的坐标为 $P(x_p, y_p)$, θ_1, θ_2 分别为直线 $1, 2$ 与 x 轴正向的夹角, 此时 $\Phi = \theta_2 - \theta_1$, 在直线 1 上选择合适的 C_1 点, 令 $d = |C_1P|$, 有

$$R = \frac{d}{\tan(\Phi/2)} \quad (7)$$

又因为对称多项式曲线在对称轴处曲率最大, 即

$$k_{\max} = \frac{1}{R} \frac{\phi^2/32 + 3/2}{(1 + \phi^2/32)^2} \quad (8)$$

式中: k_{\max} 为对称多项式的最大曲率。由于机器人有其动力学特性, 转弯时的转弯半径必须大于其最小的转弯半径 R_{\min} , 即

$$k_{\max} < 1/R_{\min} \quad (9)$$

选取合适的 d 值, 使 k_{\max} 满足上式。同样对称选取 C_2 点, 然后以 C_1, C_2 为两端点, R 为半径, 由式(5)得对称多项式曲线 $\hat{C}_1\hat{C}_2$, 从而得到光滑路径 $D_1-\hat{C}_1\hat{C}_2-D_2$ 。

4 基于近似 Voronoi 图的路径规划

我们运用近似 Voronoi 图进行实时路径规划的基本过程框图如图 3 所示:

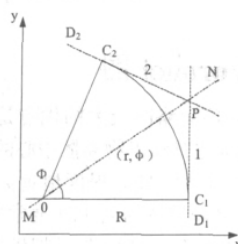


图 2 对称多项式曲线

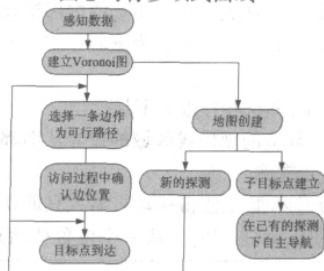


图 3 过程框图

给定目标位置,移动机器人在路图构建过程中并不需要探测室内环境中所有的自由区域,而只需要在起点和已经定义的目标点之间探测一条安全通道。并且为了减少计算负担,移动机器人在一个探测过程完成以后就停止计算 Voronoi 图的边,然后沿着已经创建的 Voronoi 边同时运用人工势场和路径平滑方法进行自主导航。在沿着 Voronoi 边不断地朝向目标点运动的过程中,选择一个跟目标点最接近并且未曾访问过的边缘点作为行进路径。

为了避免移动机器人选择一条不确定的 Voronoi 边时陷入死锁,我们定义一种节点,它是由三个以上的邻近区域交界会聚形成的交点,称为 Voronoi 节点。如果探测到这种节点存在,则将其设为子目标点并允许机器人接近,而一旦机器人到达一个节点位置,就选择一条跟这个节点相关,跟目标位置最接近并且以前没有被访问过的 Voronoi 边作为行进路径。当沿着这条路径向目标位置接近时,如果陷入死锁,则回到 Voronoi 节点并且重新寻找另外一条未曾访问过的 Voronoi 边作为行进路径。同时在行进过程利用人工势场法对遇到的障碍物进行避障并不断的探测感知,形成能达到目标位置的新的路径。

5 仿真试验结果

设仿真室内环境的结构地图如图 4 所示,移动机器人当前位置为 $S(2,0)$,目标点位置 $G(20,-32)$,利用本文方法进行地图图创建和路径规划,其仿真结果如图 5、图 6 所示:

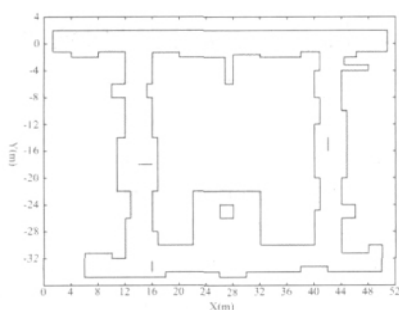


图 4 仿真环境

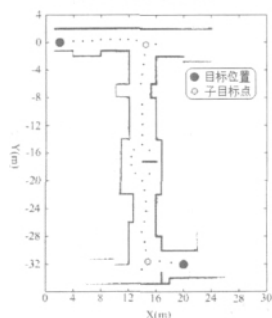


图 5 近似 Voronoi 图

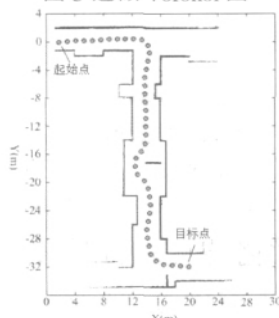


图 6 运动轨迹

图 5 是移动机器人向着目标点的方向运动时进行未知环境的探测建立起来的近似 Voronoi 路图,从仿真结果可以看出机器人只需要寻找一条能到达目标点的安全路径,所以不受环境规模的限制,从而能够节省规划时间。

图 6 的运动轨迹表明沿着已经建立的 Voronoi 边行进并采用人工势场法避障和极坐标多项式曲线平滑,移动机器人能自主生成一条到达目标点的安全、平滑路径。

6 结束语

本文提出的基于近似 Voronoi 图的实时路径规划方法,使得已经建立起来的地图信息能够被迅速利用,来寻找一条存在于预先定义的起始点与目标点之间的安全路径,实现移动机器人的自主快速导航。必须说明的是,新的 Voronoi 图结构可以扩展到已有的图拓扑结构中,这样,如果机器人开始对其它未知区域进行探测,能够实现地图信息的更新。因此,后续工作将在拓扑地图更新方面作深入的研究。

本文作者创新点:提出了一种近似 Voronoi 路图构建方法,使得移动机器人只须向着目标点的方向执行探测开发,从而减少了导航规划时间。

参考文献

- [1] Zhang C G, Xi Y G. Robot rolling path planning based on locally detected information[J]. ACTA Automation Sinica, 2003, 29(1): 37-44.
- [2] 李星毅, 郑亮. 基于 NN 改进 PSO 算法的机器人路径规划[J]. 微计算机信息, 2009, 4-3: 258-260.
- [3] 段硕, 董慧颖. 基于 Delaunay 图的移动机器人路径规划方法[J]. 沈阳理工大学学报, 2008, 27(3): 33-36.
- [4] Choset H, Nogatani K. Topological simultaneous localization and mapping—toward exact localization without explicit localization[C]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 2001: 125-137.
- [5] Ahmad A M. Solving the narrow corridor problem in potential field-guided autonomous robots [C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2005: 2909-2914.

作者简介: 徐美清(1983-), 女(汉族), 湖南益阳, 湘潭大学信息工程学院, 硕士在读, 研究方向: 移动机器人导航; 刘国荣(1957-), 男(汉族), 湖南岳阳, 湖南工程学院, 教授, 博士生导师, 研究方向: 智能控制和系统控制; 周桂珍(1983-), 女(汉族), 湖南岳阳, 湘潭大学, 硕士在读, 研究方向: 神经网络故障诊断; 裴琴(1985-), 女(汉族), 湖南常德, 湘潭大学, 硕士在读, 研究方向: 视频图像处理与传输。

Biography: XU Mei-qing (1983-), Female (Han), Hunan, Institute of Information Engineering, Xiangtan University, Master, Navigation of the Mobile Robot.

(411105 湖南湘潭 湘潭大学) 徐美清 周桂珍 裴 琴

(411101 湖南湘潭 湖南工程学院) 刘国荣

(Xiangtan University, Xiangtan 411105, China) XU Mei-qing ZHOU Gui-zhen PEI Qin

(Hunan Institute of Engineering, Xiangtan 411101, China) LIU Guo-rong

通讯地址: (411101 湖南省湘潭市书院路 17 号湖南工程学院南院办公楼 216 室) 徐美清

(收稿日期: 2009.06.16)(修稿日期: 2009.09.16)

欢迎订阅 欢迎刊登广告

(C)1994-2021 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net