

利用机器人行为动力学与滚动窗口路径规划

傅卫平, 张鹏飞, 杨世强

FU Wei-ping, ZHANG Peng-fei, YANG Shi-qiang

西安理工大学 机械与精密仪器工程学院, 西安 710048

Faculty of Mechanical and Precision Instrumental Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China

E-mail: weipingf@xaut.edu.cn

FU Wei-ping, ZHANG Peng-fei, YANG Shi-qiang. Behavioral dynamics of mobile robot and rolling windows algorithm to path planning. Computer Engineering and Applications, 2009, 45(2): 212-215.

Abstract: Aiming at the path planning in unknown static environment, a new mobile robot path planning approach is presented which combines of rolling windows and behavioral dynamics. Firstly, subgoal choosing is optimized by using heuristic function according to the window's information, it is local environment's information, which is obtained by camera. Then navigation behavior is divided into GO TO TARGET behavior and OBSTACLE AVOIDANCE behavior, their behavioral states and behavioral modes dynamics models are established, and then one autonomous local path planning online is implemented using navigation behavior dynamics model in a single window. Connecting a series of local paths according to continuity, the robot accomplishes one global planning ultimately. The approach has a simple principle and low calculating burden, smooth path and high applied value. The approach's efficiency and adaptability is demonstrated by example simulating.

Key words: mobile robot; rolling windows; behavioral dynamics; path planning; subgoal

摘要: 针对存在静态障碍物的未知环境下移动机器人路径规划问题, 提出运用行为动力学与滚动窗口相结合进行路径规划的方法。首先根据所获得的窗口(局部环境)信息, 采用启发式函数进行局部子目标优化选择; 然后将路径规划问题即导航行为分解为趋于目标行为和避障行为, 并对这两种行为分别建立了行为状态和行为模式动力学模型; 在此基础上, 以窗口为单位, 利用导航行为动力学模型进行在线自主路径规划; 将一系列窗口中的规划轨迹按照连续性条件首尾相接, 最终完成了一条全局规划任务。该方法原理简单, 计算量小, 规划路径光滑, 具有较强的实际应用价值。通过计算机实例仿真验证了该方法的有效性和适应性。

关键词: 移动机器人; 滚动窗口; 动力学模型; 路径规划; 子目标

DOI: 10.3778/j.issn.1002-8331.2009.02.061 **文章编号:** 1002-8331(2009)02-0212-04 **文献标识码:** A **中图分类号:** TP24

由于制造、物流以及其它行业对具有自主路径规划功能的移动机器人的巨大需求, 针对移动机器人自主路径规划的研究早已成为各国研究的热点。未知环境下的机器人自主路径规划是指在未知的工作环境中寻找一条恰当的从起始点(位置和姿态)到终点(位置和姿态)的路径, 使机器人在运动过程中能安全、无碰撞地绕过所有的障碍物到达终点。显然, 由于缺乏全局环境信息, 上述路径规划问题无法用全局规划方法解决。针对这种情况, 已有研究者提出了不少解决方法和策略, 如人工势场法^[1]、混合蚁群算法^[2]、在线构造拓扑图^[3]和滚动窗口法^[4-5]等; 其中很多方法对机器人有较高的硬件要求, 具有模型参数不易确定^[2], 依赖障碍物的形状^[3], 很难保证方法的收敛性, 未知复杂环境下未必能完成任务^[1-5]等局限性。

在存在静止障碍物的未知车间环境中, 移动机器人只能通

过传感器获取到静态的局部环境信息, 充分利用这些信息便可以实现一个局部环境的路径规划, 若干个这样的局部规划前后衔接就可以完成一项全局路径规划任务, 所以利用滚动窗口进行路径规划是研究这类问题的一种自然选择^[6-9]。事实上, 局部路径规划问题可以归结为研究机器人导航角随时间是如何变化的问题, 这正是动力学研究的领域, 这对于解决局部路径规划问题提供了很好的思路。运用行为动力学方法^[10-13]研究此问题不仅可以避免基于规则的方法带来的规则不易提取等不足, 而且可以相对容易地获得行为稳定性, 同时也保证了所规划路径的光滑性。提出的基于行为动力学模型的在线滚动窗口路径规划方法, 原理简单, 计算量小, 较大程度地兼顾了全局优化, 且能有效地保证路径的光滑性和算法的收敛性。通过仿真实例, 验证了本方法的有效性、灵敏性以及算法收敛性。

基金项目: 国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.10872160); 陕西省机械制造装备重点实验室项目(No.05JS29)。

作者简介: 傅卫平(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 智能机器人与车辆控制; 张鹏飞(1978-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 移动机器人路径规划与运动控制; 杨世强(1973-), 男, 讲师, 博士研究生, 研究方向: 智能机器人行为动力学。

收稿日期: 2007-12-24 **修回日期:** 2008-03-05

1 问题的描述与定义

本文的移动机器人路径规划问题是在未知的平面工作环境下,给定机器人起始点 S 和终点 G ,要求机器人能够利用其所获得的环境信息(例如通过机器视觉获得)自主地找出一条安全无碰撞路径,并沿此路径到达终点。为了进一步讨论,首先对机器人路径规划中的有关概念给出相应的定义。

定义 1^[4] 记 WS 为机器人 Rob 在平面上的有限运动区域,设 WS 中的点构成闭集 W ,其中第 i 个静态障碍物中的点构成闭集 SQ_i ;在 WS 中建立全局直角坐标系 Σxoy ,在 Rob 的质心 C 处建立与 Rob 固联的局部坐标系 ΣXCY ; t 时刻 Rob 的位置表示为 $P_R(t)$ (与 C 重合);规划起始时刻定为 $t=0$,此时 Rob 在起始点。

定义 2^[4] 对于 W 中的任意两点 P_i, P_j 记

$$d(P_i, P_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (1)$$

定义 3^[4] t 时刻,将满足 $\forall P \in W$ 且 $\forall P \notin (\sum_{i=1}^n SO_i)$ 条件的点的集合称为 t 时刻的 Rob 的可行域,记为 $FD(t)$;将满足 $\forall P \in W$ 且 $\forall P \in \sum_{i=1}^n SO_i$ 条件的点的集合称为 t 时刻 Rob 的禁入域,记为 $NFD(t)$ 。

定义 4 任一时刻,机器人所在位置(当前点)位于矩形“下”短边的中点,如图 1 所示,将此矩形区域称为 Rob 在点 $P_R(t)$ 处的视野域 $Win(P_R(t))$,亦即该点的滚动窗口,其中 $P_R(t) \in FD(t)$;窗口边界记为 $WinC(t)$ 。

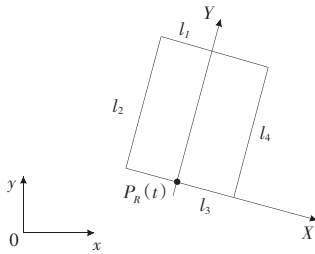


图1 矩形滚动窗口

定义 5 将 Rob 模型化为点状机器人,同时 WS 中的静态障碍物根据 Rob 的实际尺寸及安全性要求,以障碍物中心为圆心进行相应“膨化”处理,使得半径为 $r + \Delta r$ ($\Delta r > 0, r + \Delta r \leq R$) 的圆环域属于 $FD(t)$;如图 2 所示, r 表示不考虑障碍物形状,将其按圆形处理后所占圆形区域的半径, R 表示障碍物“膨化”后所占圆形区域的半径,在下面的讨论中所指障碍物的大小(除特别申明外)均按 R 计;所有按 R 计的障碍物圆周上的点组成的集合记为 $SC(t)$ 。

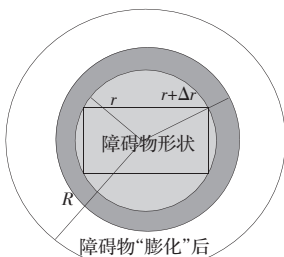


图2 对障碍物“膨化”处理

定义 6 将某时刻 $t, P_R(t)$ 与终点 G 的连线与 $WinC(t)$ 的交

点记做 P_1 ; $SC(t)$ 与 $WinC(t)$ 交点分别记做 P_2, \dots, P_n ; 将 P_1, P_2, \dots, P_n 所组成的集合记为 P 。

定义 7^[4] 记 $FJ(P_i, P_j)$ 为 $Win(P_R(t))$ 中从点 P_i 到点 P_j 的一条可行路径, Δt 为 Rob 从点 P_i 移动到点 P_j 的用时,非恒值。

2 基于行为动力学的滚动路径规划的原理与算法

本文中假设的 Rob 缺乏任何环境的先验信息,且工作环境中不考虑动态的障碍物。某时刻 t , Rob 在当前点 $P_R(t)$ 获得 $Win(P_R(t))$,显然 $Win(P_R(t))$ 中的局部环境信息是固定的。获得这些局部环境信息后,Rob 先运用下文中的子目标确定方法,确定出其在 $Win(P_R(t))$ 中的子目标 $P_R(t+\Delta t)$;然后利用导航行为动力学模型进行 Rob 导航角的计算,在 $Win(P_R(t))$ 中规划出一段路径曲线 $FJ(P_R(t), P_R(t+\Delta t))$, Rob 由点 $P_R(t)$ 移动到点 $P_R(t+\Delta t)$,至此,单个窗口的路径规划和行走任务结束。一段 $FJ(P_R(t), P_R(t+\Delta t))$ 结束后,Rob 获得下一个 $Win(P_R(t))$,用 $P_R(t+\Delta t)$ 信息来刷新 $P_R(t)$ (连续性条件),Rob 根据这个窗口中的信息再次进行规划和行走。从起始点 S 开始,如此滚动进行,直至到达终点 G ,规划结束。这样共有 n 个窗口,同时有 n 段 $FJ(P_R(t), P_R(t+\Delta t))$,它们首尾相连就构成了一条连接起始点 S 和终点 G 的全局路径。

路径规划流程图如图 3 所示。

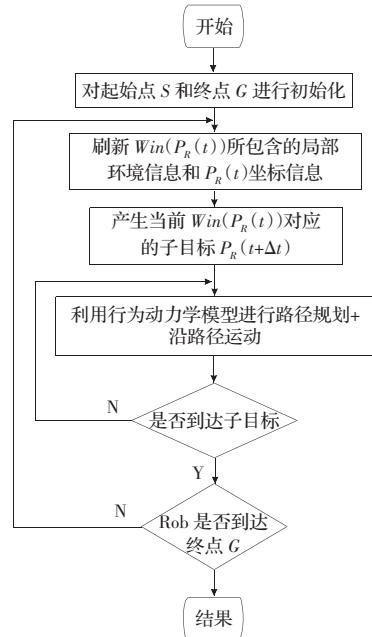


图3 路径规划流程图

2.1 子目标的确定方法

确定子目标是路径规划的前提。本文中的子目标确定方法采用启发式函数进行判定,本文中的启发式函数有别于文献[4],计算效率和有效性较之有所提高。

在 t 时刻,Rob 的滚动窗口为 $Win(P_R(t))$,若此时 $G \in Win(P_R(t))$,则取 $P_R(t+\Delta t)=G$;否则利用启发式函数在 P 中选使 $F(P)$ 取得最小值的点 P_k 作为子目标 G_k 。

启发式函数如下所示:

$$F(P) = G(P) + H(P) + J(P) \quad (2)$$

其中:

$$G(P)=d(P,G) \quad (3)$$

$$H(P)=\begin{cases} +\infty, P \in NFD(t) \\ 0, P \in FD(t) \end{cases} \quad (4)$$

$$J(P)=\begin{cases} +\infty, P=G_{i-1} \\ 0, P \neq G_{i-1} \end{cases} \quad (5)$$

如果仅将启发函数构造成 $F(P)=G(P)+H(P)$ 的形式,则在 t 时刻,可能出现使 $G(P)+H(P)$ 的值取得最小时的点 P_k 就是 $P_R(t)$ 的情况,即 $P_R(t+\Delta t)=P_R(t)$,显然这种情况是不符合要求的,故本文将式(5)也作为启发函数的一部分。

由于窗口边界外的信息无法获取,这种子目标的选择方法反映了全局优化的要求与局部有限信息约束的折衷,是在给定信息环境下企图实现全局优化的自然选择^[9]。

某时刻 t , Rob 所获得的窗口大致可以分为以下 4 类,采用本文中的启发函数即可确定出各自窗口中的子目标。

(1)如图 4 所示,某时刻 t , Rob 获取的窗口中不存在障碍物。在此情况下,Rob 从当前点 G_{i-1} 沿直线 $G_{i-1}G$ 向终点移动无疑是最优的选择,故将直线 $G_{i-1}G$ 与窗口边界的交点 P_1 作为本窗口的子目标 G_i 。

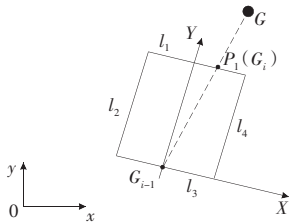


图 4 窗口内不存在障碍物

(2)如图 5 所示,某时刻 t , Rob 获取的窗口中存在障碍物,但 Rob 当前点 G_{i-1} 与终点 G 连线 $G_{i-1}G$ 与窗口边界的交点 P_1 属于 $FD(t)$ 。在此情况下,仍然可以将直线 $G_{i-1}G$ 与窗口边界的交点 P_1 作为本窗口的子目标 G_i 。

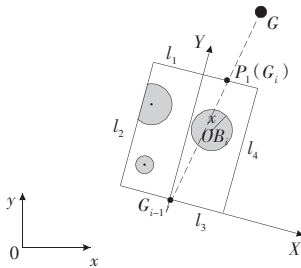


图 5 P_1 点不属于禁入域

(3)如图 6 所示,某时刻 t , Rob 获取的窗口中存在障碍物,且 Rob 当前点 G_{i-1} 与终点 G 连线 $G_{i-1}G$ 与窗口边界的交点 P_1 属于 $NFD(t)$ 。在此情况下,先计算 $NFD(t)$ 边界与窗口边界的交点坐标,记这些交点为 $P_j(j=2, \dots, n)$,计算 $F(P_j)$ 的值,将满足 $F(P_k)=\min\{F(P_1), F(P_2), \dots, F(P_n)\}$ 的点 P_k 作为本窗口的子目标 G_i 。图 6 所示的情况下,经过计算 P_2 将定为本窗口的子目标 G_i 。

(4)如图 7 所示,某时刻 t , Rob 获取的窗口中存在障碍物,且除 P_7 外, P_1, \dots, P_6 全部包含于 $NFD(t)$,显然 $d(G_{i-1}, G) < d(G_7, G)$,故有 $G(G_{i-1})+G(G_{i-1}) < G(P_7)+G(P_7)$, G_{i-1} 也是 $SC(t)$ 与 $WinC(t)$

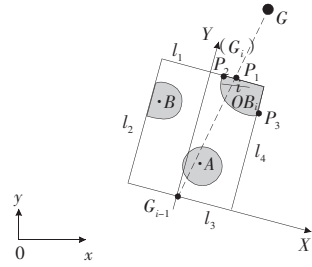


图 6 P_1 点属于禁入域

的交点之一,如果仅按 $\min(G(P)+G(P))$ 的要求将 G_{i-1} 确定成此情况下的窗口子目标显然是不合适的。按照本文的启发函数进行计算后,最终排除了 G_{i-1} ,而将 P_7 定为本窗口的子目标 G_i 。

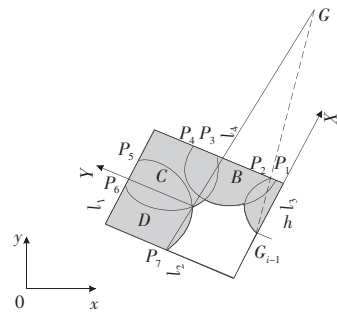


图 7 $d(G_{i-1}, G) < d(P_7, G)$

2.2 行为动力学模型

子目标既已确定,接下来用行为动力学模型进行路径规划。在本文中,Rob 的导航行为(即对于导航方向 ϕ 的控制,也称为路径规划行为)存在趋于目标行为模式和避障行为模式两种模式,所以任一时刻,Rob 的路径规划行为状态由趋于目标模式和避障模式下的行为状态共同决定。

2.2.1 行为状态动力学模型

对于机器人的趋于目标模式下的行为状态,可以用下面的微分方程^[10]来表示:

$$\dot{\phi} = f_{tar}(\phi) = -\lambda_{tar} \sin(\phi - \phi_{tar}) \quad (6)$$

式中: λ_{tar} 表示吸引强度, ϕ 表示导航方向, ϕ_{tar} 表示目标点相对于机器人当前位置的方位角度,在 ΣXCY 坐标系中测量,如图 8 所示。

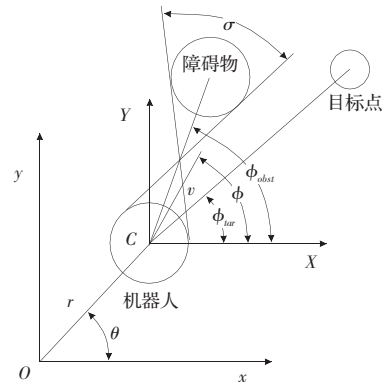


图 8 移动机器人坐标系

对于机器人的避障模式下的行为状态,可以用下面的微分方程^[11-12]来表示:

$$\dot{\phi} = f_{obst}(\phi) = \lambda_{obst} (\phi - \phi_{obst}) e^{-\frac{d}{2\sigma}} e^{-\frac{(\phi - \phi_{obst})^2}{2\sigma^2}} \quad (7)$$

式中: λ_{obst} 表示排斥强度, d 表示机器人中心与障碍物的距离, c 是排斥力随距离增加而衰减的系数, ϕ_{obst} 表示障碍物相对于机器人当前位置的方位角度,在坐标原点固定在机器人上的 ΣXCY 坐标系中测量, σ 表示机器人避障排斥的角度范围,如图8所示。

任一时刻,机器人的导航行为状态由趋于向目标模式和避障模式下的行为状态共同决定。这样,机器人导航行为状态动力学模型可以表示为:

$$\phi = f_{tar} + \sum_i f_{obsti} = |w_{tar}|f_{tar} + |w_{obst}| \sum_i f_{obsti} \quad (8)$$

其中, i 表示多障碍物环境下障碍物的序号。 w_{tar} 、 w_{obst} 为趋于目标行为和避障行为的权值系数,反映在机器人整体行为中趋于目标行为和避障行为各自所起作用的大小,体现两者的竞争关系,由下文中的行为模式动力学模型决定。

2.2.2 行为模式动力学模型^[3]

$$\begin{cases} w_{tar} = \alpha_1 w_{tar} (1 - w_{tar}^2) - \gamma_{12} w_{tar} w_{obst}^2 \\ w_{obst} = \alpha_2 w_{obst} (1 - w_{obst}^2) - \gamma_{21} w_{obst} w_{tar}^2 \end{cases} \quad (9)$$

其中, α_1 、 α_2 、 γ_{12} 、 γ_{21} 为所设计的与环境相关的参数,随Rob在任一时刻的位置和姿态而改变, α_i 表示竞争优势, γ_{ij} 表示竞争交互作用,反应趋于目标行为和避障行为互相制约程度。

机器人行为模式动力学模型(9)与行为状态动力学模型(8)耦合组成机器人导航行为动力学模型。

3 仿真计算实例

为了验证本文提出的规划方法的有效性和算法收敛性,以及规划路径的连续性和光滑性,本文用MATLAB语言就路径规划中有代表性的情况给出了两个仿真实例。

实例1 如图9,仿真移动机器人从下侧 $S(20,10)$ 点出发奔向目标点 $G(20,88)$,途中共有6个静止圆形障碍物,其中心(用“口”表示)坐标分别是(10,70)、(12,30)、(20,20)、(17,60)、(20,50)、(10,40),各障碍物“膨化”后的半径为 $R=5$,障碍物的实际半径为 $r=2$,仿真中机器人与障碍物(“膨化”前)间安全距离为1,矩形窗口的大小为 10×8 ;方程(3)初始状态(w_{tar0}, w_{obst0})为(0.1,0.1);曲线SDCBAG表示机器人的运动轨迹;图中的“*”表示 $WinC(t)$ 与 $SC(t)$ 交点,“o”表示各窗口的子目标。仿真结果显示,从 S 到 G 共有10个窗口,Rob可以有效地避障直至到达终点。

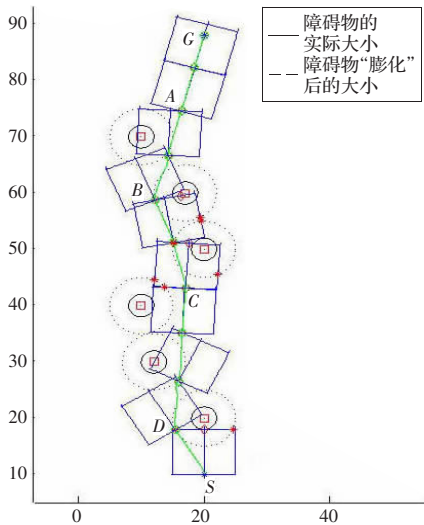


图9 移动机器人路径规划

实例2 如图10,仿真Rob从下侧 $S(50,10)$ 点出发奔向目标点 $G(40,88)$,途中共有1组静止“墙”形障碍物,这组障碍物由若干个圆形障碍物组合而成的。各圆形障碍物“膨化”后的半径均为 $R=5$,障碍物的实际半径为 $r=2$,仿真中机器人与障碍物间安全距离为1,矩形窗口的大小为 10×8 ;方程(3)初始状态(w_{tar0}, w_{obst0})为(0.1,0.1);曲线SABCDEFHGJKLMG表示机器人的运动轨迹。图中的“*”表示 $WinC(t)$ 与 $SC(t)$ 交点,“o”表示各窗口的子目标点,“口”表示障碍物中心点。仿真结果显示,从 S 到 G 共经历了23个窗口,每个窗口Rob均能实现避障和趋向目标的有效结合,对简单的“墙”形障碍物也可以实现有效的躲避,最终Rob安全地到达了终点。从全局的观点来看,整条路径并不是全局最优的,但它也体现了全局优化的要求与局部有限信息约束的折衷。

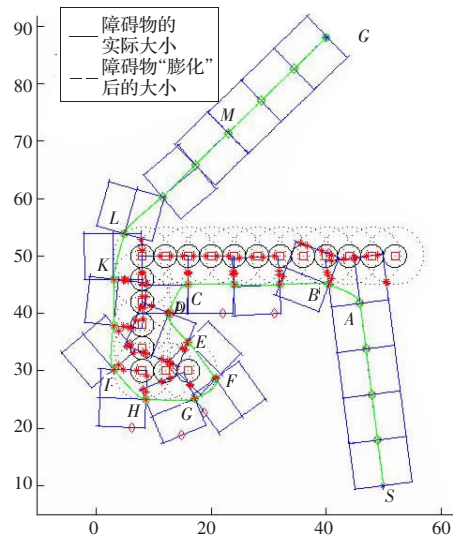


图10 移动机器人路径规划

4 结论

本文以未知环境下移动机器人路径规划为研究对象,提出基于行为动力学的移动机器人滚动路径规划方法;建立了机器人导航行为动力学模型,给出了窗口局部子目标的选择方法,并进行了实例的计算机仿真计算。通过实例仿真,验证了利用机器人行为动力学模型进行滚动路径规划的算法收敛性和有效性,为更好地设计参数,进一步优化模型以及后续就动态未知环境下的路径规划研究提供了依据。

参考文献:

- [1] Borenstein J, Koren Y. Real time obstacle avoidance for fast mobile robots[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1989, 19(5): 1179-1187.
- [2] 梅昊, 田彦涛, 祖丽楠. 动态环境下机器人路径规划的混合蚁群算法[J]. 吉林大学学报, 2002, 24(2): 148-152.
- [3] 陈阳舟, 崔平远, 居鹤华. 基于扫描法在线构造拓扑图的路径规划算法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(4): 147-215.
- [4] 张纯刚. 基于滚动窗口的移动机器人路径规划[J]. 系统工程与电子技术, 2002, 24(6): 63-69.
- [5] 席裕庚, 张纯刚. 一类动态不确定环境下机器人滚动路径规划[J]. 自动化学报, 2002, 28(2): 161-175.
- [6] 王强, 姚进, 王进戈. 基于滚动窗口的足球机器人传球路径搜索[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 35(7): 936-939.