

动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划及安全性分析

张纯刚, 席裕庚

(上海交通大学 自动化研究所, 上海 200030)

摘要: 借鉴预测控制滚动优化原理, 研究了全局环境未知且存在动态障碍物情况下的机器人路径规划问题. 提出的基于滚动窗口的移动机器人路径规划方法充分利用机器人实时测得的局部环境信息, 以滚动方式进行在线规划, 合理结合了优化与反馈, 对动态环境具有良好的适应性. 还对规划算法的安全性进行了分析.

关键词: 机器人路径规划; 滚动规划; 子目标; 安全性; 可达性

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A

Rolling path planning and safety analysis of mobile robot in dynamic uncertain environment

ZHANG Chun-gang, XI Yu-geng

(Institute of Automation, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

Abstract: Based on the rolling optimization principle adopted in predictive control, the robot path planning in a globally unknown environment with moving obstacles is studied. A new method of the path planning for a mobile robot is proposed. The method makes full use of the real-time local environmental information detected by the robot and the path planning is performed on-line in a rolling manner. Optimization and feedback are combined in the planning, which is suitable to dynamic uncertain environment. The safety of the planning algorithm is also analyzed.

Key words: robot path planning; rolling plan; subgoal; safety; accessibility

1 引言 (Introduction)

移动机器人在有动态障碍物环境下的路径规划问题, 是机器人路径规划中难度较大的问题, 不少文献对这一具有重要实际应用背景的问题已展开了研究. Reif 和 Sharir 在文献[1]中指出, 动态环境中的运动规划比静态环境中复杂得多, 有速度约束的机器人在三维动态障碍环境中的运动规划是 PSPACE-hard 问题. Canny 和 Reif^[2]证明了即使移动障碍物是凸多边形, 且无旋转地以恒定线速度运行, 二维平面上有速度约束的点状机器人的运动规划也是 NP-hard 问题. Kant 和 Zucker^[3]使用了两级规划方法, 首先根据环境中已知的静态信息预规划一条机器人行走的路径, 然后引导机器人沿该路径运行, 并通过调整机器人运动速度来避开动态障碍物. 这种方法虽然大大减少了问题的搜索空间, 但由于过多依赖于预规划的路径, 缺乏足够灵活性, 不能适应复杂变化的动态环境. Erdmann 和 Lozano-Perez^[4]研究了多个运动物体在静态环境中的规划问题, 每当运动物体

改变它的速度时, 就重构一次位姿空间, 该法计算量很大. Fujimura^[5]将静态环境中的可视图推广到二维动态环境中, 考虑了在动态障碍物以恒定速度朝固定方向运动的二维时变环境中的机器人路径规划问题. 此外, 遗传算法、神经网络和模糊控制等方法也在机器人路径规划中得到了应用^[6~9], 这些方法大都只适用于结构化环境, 在未知动态时变环境中的应用还处于起步阶段.

从实际应用的角度来看, 移动机器人对于环境信息、特别是动态障碍的信息很难具有先验的知识, 移动机器人在未知环境中行进时, 只能根据其传感器探测到周围有限范围内的环境信息; 即使机器人通过漫游对环境信息进行预探测^[10,11], 至多也只能获取静态的障碍信息. 要在具有未知动态障碍物的环境下进行路径规划, 无疑具有很大的难度, 而且从因果性的角度来看, 在未知环境下要进行有效的全局规划是不可能的. 因此, 在这种情况下, 移动机器人只能通过运动中获取的反馈信息来决定自己的行

走路径.传统的基于反馈的“导航”算法正是基于这一思想,但这种算法往往只依赖于机器人点领域的信息,着眼于避障,算法的实施并不能保证顺利到达终点,更谈不上规划较优的路径.所以,如何充分利用移动机器人所能获取的有效信息,把优化与反馈机制合理地结合起来,便成为动态不确定环境下移动机器人路径规划问题的关键.

借鉴预测控制滚动优化原理^[12],可以解决简单静态未知环境下移动机器人路径规划问题^[13].本文将这一原理应用到存在动态障碍物的复杂未知环境下的机器人路径规划中,利用机器人实时测得的局部环境信息,以滚动方式进行在线规划,并在一定的环境约束下,分析了规划算法的安全性可达性.本文的研究表明,基于滚动窗口的路径规划算法在动态不确定环境下将有着更实际且更重要的意义.

2 问题描述与预备知识(Problem formulation and preliminary knowledge)

本文讨论全局环境未知,且存在动态障碍物的情况下移动机器人的路径规划问题,规划的目的是使机器人由起点 P_s 安全避碰地到达终点 P_g .

记 WS 为机器人 Rob 在二维平面上的有限运动区域,其内部分布着有限个静态障碍物 $SObs1, SObs2, \dots, SObsn$, 以及有限个动态障碍物 $DObs1, DObs2, \dots, DObsm$; 将 Rob 模型化为点状机器人,同时 WS 中的静、动态障碍物已根据 Rob 的实际尺寸及安全性要求进行了相应“膨化”处理,并且使得“膨化”后的障碍物边界为安全区域;各障碍物及障碍物与 WS 边界不相交,动、静态障碍物之间的最近距离为 d ; 假定所有静态障碍物为凸型,边界为光滑曲线,且边界上各点曲率半径 $\leq \delta < r$ (其中 δ 是正常量),曲率中心在障碍物内部; t 时刻 $DObsi$ ($i = 1, \dots, m$) 的运动速率记为 $v_o^i(t)$, $v_o^i(t) \in [0, v_{OH}]$, 它的变化及运动方向不可预测.

Rob 无全局环境信息,任一时刻,它只能实时探测到以其当前位置为中心, r 为半径区域内的环境信息(包括障碍物位置、速度);Rob 能向任意方向连续行走,运动时速率 v_R 恒定;环境探测及路径规划所需的时间忽略不计.

下面首先对机器人路径规划中的有关概念给出相应的定义.

令 S, D 分别为静、动态障碍物的下标集.

设 WS 中的点构成闭凸集 W , 其边界为 ∂W ; $SObsi$ 中的点构成闭凸集 SO_i , 其边界为 ∂SO_i ; t 时刻, $DObsi$ 中的点构成闭凸集 $DO_i(t)$, 其边界为

$\partial DO_i(t)$.

在 WS 中建立系统直角坐标系 Σ_0 , 则 $\forall P \in W$ 在 Σ_0 都有确定的坐标 (x, y) ; t 时刻 Rob 的位置表示为 P_R , 其坐标为 $(x_R(t), y_R(t))$; 规划起始时刻定为 $t = 0$.

令 $d(P_i, P_j)$ 为点 $P_i(x_i, y_i)$ 到点 $P_j(x_j, y_j)$ 的直线距离, $\bar{\varphi}(p_i, p_j)$ 表示点 p_i 到点 p_j 的直线.

以下叙述中,用上标“ o ”,“ c ”分别表示取相应集合的内部和补集.

定义 1 t 时刻, $\forall P \in W, P \notin (SO_i^o \cup DO_j(t)^o), i \in S, j \in D$, 则称 P 为 t 时刻的可行点, t 时刻所有可行点的集合称为可行域,记为 $FD(t)$.

显然

$$FD(t) = W \cap \left(\bigcap_{i \in S} (SO_i^o)^c \right) \cap \left(\bigcap_{j \in D} (DO_j(t)^o)^c \right). \quad (1)$$

定义 2 $EFD = W \cap \left(\bigcap_{i \in S} (SO_i^o)^c \right) \cap \left(\bigcap_{j \in D} \left(\bigcup_{t=0}^{\infty} DO_j(t)^o \right)^c \right)$ 称为永久可行域,它表示 WS 中动态障碍物所不能到达的可行区域. $\forall P \in EFD$, 称 P 为永久可行点.

定义 3 $T = [t_0, t_f], \forall P_0 \in FD(t_0), \forall P_f \in FD(t_f)$, 若连续映射 $FS: T \rightarrow W$ 使得 $FS(t_0) = P_0, FS(t_f) = P_f, FS(t) \in FD(t), t \in (t_0, t_f)$, 则称映射 FS 是 W 中从 P_0 到 P_f 的一个可行路径. $FS(t_0), FS(t_f)$ 分别称为可行路径 FS 的起点和终点,像集 $FS(T)$ 称为从 P_0 到 P_f 的一条可行通道,记为 $FP(P_0 P_f)$.

显然, $FP(P_0 P_f)$ 构成了 WS 中连接点 $P_0(x_0, y_0), P_f(x_f, y_f)$ 的连续曲线,而可行路径则是指产生通道的连续映射,并且对于同一可行通道,可以有不同的可行路径. $FP(P_0 P_f)$ 在 WS 中形成曲线的弧长称为路程,记作 $FJ(P_0 P_f)$.

定义 4 $\text{win}(P_R(t)) = \{P \mid P \in W, d(P, P_R(t)) \leq r\}$ 称为 Rob 在点 $P_R(t)$ 处的视野域,亦即该点的滚动窗口,其中 $P_R(t) \in FD(t)$.

定义 5 若存在 $t_g \geq 0$, 使 $P_R(t_g) \in \{P \mid P \in W, d(P, P_g) < \epsilon\}$ 则称 Rob 于 t_g 到达终点 P_g .

由文献[13]可知,若工作环境中不存在动态障碍物,只要 P_0, P_f 属于可行域,则必然存在从 P_0 到 P_f 的严格趋近可行路径^[13], 以下引入文中给出的一个静态环境中的严格趋近可行路径算法.

算法 1 严格趋近可行路径算法.

Step 1 朝终点笔直行走,直至以下任一情况

发生:

- 1) 终点已达到,规划结束;
- 2) 走到某障碍物边界,转 Step 2.

Step 2 沿能使到终点距离减小的该障碍物一侧边界行走,直至以下任一情况发生:

- 1) 终点已达到,规划结束;
- 2) 朝终点 P_f 笔直行走而不会碰到该障碍物,

转 Step 1.

为叙述方便,以下称不考虑动态障碍物时规划的严格趋近可行路径为原始路径.

3 动态不确定环境下基于滚动窗口的路径规划算法(Rolling path planning in dynamic uncertain environment)

信息不完全、环境不确定情况下的路径规划问题,是传统全局规划方法无法解决的.注意到机器人在运动过程中能探知其传感范围内一有限区域的环境信息,这部分信息必须充分利用,因此解决这一问题的指导思想是:采用反复进行的局部优化规划代替一次性的全局优化的结果,并在每次局部优化规划中充分利用该时刻最新的局部环境信息.文献[14]针对动态不确定环境下规划、调度、决策等广义控制问题,推广了预测控制原理,并结合机器人的路径规划问题,具体化为场景预测、滚动窗口优化和反馈初始化.

以下,将着重针对环境中具有未知动态障碍物的情况,讨论滚动规划中场景预测与局部规划的具体实施.

3.1 动态环境的场景预测(Scenario prediction in dynamic environment)

令 $SW(t) = \{i \mid SO_i^o \cap \text{win}(P_R(t)) \neq \emptyset\}$, $DW(t) = \{i \mid DO_i^o(t) \cap \text{win}(P_R(t)) \neq \emptyset\}$,分别表示 t 时刻滚动窗口内可探测到的静、动态障碍物的下标集.

3.1.1 动态障碍物的 Δt -膨化模型(Δt -expanded model of dynamic obstacles)

Rob 通过实时探测视野域内的局部环境信息,可以确定当前时刻滚动窗口内的静、动态障碍物的位置.由于 $DObsi$ 的运动方向未知,速率不定,Rob 无法准确预测其在将来某时刻的位置,但却可以预测其在将来某时间段内所能达到的区域.为简单起见,以下考虑圆形障碍物 $DObsi$,在 t 时刻其中心为 $(x_o^i(t), y_o^i(t))$,半径为 R_i ,将 $\partial DO_i^o(t)$ 上各点沿半径方向,向外侧延伸 $v_{OH} \cdot \Delta t$ 距离,所形成的封闭曲

线包围区域即为 Δt 时间段内 $DObsi$ 可能达到的区域范围.该区域是一个以 t 时刻 $DObsi$ 的中心 $(x_o^i(t), y_o^i(t))$ 为圆心、 $(R_i + v_{OH} \cdot \Delta t)$ 为半径的圆.它是在动态障碍物运动方向、速率都不定的情况下对其未来可能位置所作的预测,称为 $DObsi$ 的 Δt -膨化模型,记作 $DObsi'$;并称 $[t, t + \Delta t]$ 为该模型的有效时段. $DObsi'$ 中的点构成闭凸集 $DO_i'(t + \Delta t)$,其边界记为 $\partial DO_i'(t + \Delta t)$,它在 WS 中形成曲线可由下述方程描述

$$(x - x_o^i(t))^2 + (y - y_o^i(t))^2 = (R_i + v_{OH} \cdot \Delta t)^2. \quad (2)$$

t 时刻,Rob 可以根据探知的静态障碍物信息,并结合动态障碍物的 Δt -膨化模型,进行场景预测,建立局部环境模型,即 Rob 把 $DO_i'(t + \Delta t)$ 作为 $(t + \Delta t)$ 时刻的动态障碍区.这样, $(t + \Delta t)$ 时刻滚动窗口内的可行区域可表示为

$$WFD(t + \Delta t) = \text{win}(P_R(t)) \cap \left(\bigcap_{i \in SW(t)} (SO_i^o)^c \cap \left(\bigcap_{j \in DW(t)} (DO_j^o(t + \Delta t))^c \right) \right). \quad (3)$$

在以下凡涉及 $WFD(t + \Delta t)$ 的路径规划时,都以 $DObsi$ 的 Δt -膨化模型作为障碍物区域对待.

3.1.2 场景预测(Scenario prediction)

Rob 可以根据建立的动态局部环境模型,判断在将来一段时间内按某一策略行进是否会与障碍物碰撞,从而决定是继续执行原计划,还是首先采取避碰措施.

t 时刻 Rob 位于 $P_R(t)$,目标点为 $P_{sub}(t)$,若 $DW(t) = \emptyset$,即视野范围内无动态障碍物,则 Rob 利用算法 1 可规划出一条由 $P_R(t)$ 至 $P_{sub}(t)$ 的严格趋近可行路径 LFS (原始路径).因机器人速率恒定,故 LFS 可由参数方程

$$\begin{cases} x = x(\tau), \\ y = y(\tau) \end{cases} \quad (4)$$

来确定.

若 $DW(t) \neq \emptyset$,这时 Rob 若仍然依上述原始路径行进,就可能与 $DObsi(i \in DW(t))$ 碰撞.令 $T_0 = \frac{\epsilon}{v_R}$ (其中 $0 < \epsilon < r$, ϵ 为机器人的步长).对 $DObsi$ 进行 Δt -膨化,若 $\Delta t \in [0, T_0]$ 时间范围内 Rob 可能与 $DObsi$ 碰撞,则至少存在某一 Δt 满足下列方程组

$$\begin{cases} (x - x_o^i(t))^2 + (y - y_o^i(t))^2 = (R_i + v_{OH} \cdot \Delta t)^2, \\ x = x(\Delta t), y = y(\Delta t). \end{cases} \quad (5)$$

若 $\Delta t \in [0, T_0]$,上述方程组无实解,则表明 Rob 可

依原始路径行驶而不会与 $DObsi$ 碰撞,称为原始路径可逃逸;反之,若 $\Delta t \in [0, T_0]$, 上述方程组有实解,则表明 Rob 依原始路径行驶可能会与 $DObsi$ 碰撞,称为原始路径不可逃逸。

3.2 窗口内的局部规划 (Local path planning in rolling windows)

由于全局目标未必出现在滚动窗口中,在每一时刻的局部规划算法首先要确定该时刻的子目标,然后在场景预测的基础上,规划滚动窗口内的局部路径。

3.2.1 局部子目标的确定 (Determination of local subgoals)

局部子目标是在滚动窗口边界上寻找一个全局目标 P_g 的映射,它必须在可行域内,且满足某种优化指标。为简化计算,我们采用降低局部规划优化要求的子目标选择方法,详见文献[13]。 t 时刻,子目标 $P_{sub}(t)$ 的选择可归结为如下优化问题

$$\min J = \min_P d(P, P_g) \quad (6)$$

$$\text{s.t. } P \in \partial \text{win}(P_R(t)) \cap FD(t).$$

3.2.2 局部规划算法 (Local path planning algorithm)

在当前滚动窗口内无动态障碍物,即 $DW(t) = \emptyset$ 的情况下,Rob 可直接按算法 1 进行原始路径规划并依规划的路径行进一步。

若在滚动窗口内探知有动态障碍物,即 $DW(t) \neq \emptyset$ 时,可根据场景预测的结果作如下分析:

1) 对于原始路径可逃逸的情况,当前 Rob 必能依局部原始路径安全行进一步。但这种处理是短视的,因为一步行进后有可能使 Rob 与动态障碍物靠得更近,以致于 Rob 在滚动规划的下一步无法躲避该动态障碍物。所以,即使当前 Rob 处于原始路径可逃逸状态,也不能贸然依原始路径行进,除非 Rob 行进一步后能进入永久可行域;否则,可依以下原始路径不可逃逸情况的处理方法进行规划。

2) 对于原始路径不可逃逸的情况,显然 Rob 若继续依滚动窗口内的原始路径行进,则在一步内很可能与动态障碍物碰撞。这时 Rob 应放弃原始路径,而采取其他规划策略。取 $\Delta t = T_0$ 对动态障碍物进行膨化处理,将此膨化模型视为 Δt 时间段内的动态障碍区,在 $WFD(t + T_0)$ 内规划一条由 $P_R(t)$ 向 $P_{sub}(t)$ 严格趋近的可行路径(若 $P_{sub}(t)$ 为动态障碍物的膨化模型所覆盖,则需在 $\partial \text{win}(P_R(t))$ 上产生新的子目标,以下算法中不再赘述),若存在该路径,则表明当前 Rob 必能依此局部路径安全行进一步。

同样,出于滚动规划安全性的考虑,只有当 Rob 行进一步后能进入永久可行域才是可实施的。若 Rob 行进一步后不能进入永久可行域,则可考虑先规划一条临时避碰路径。为此,取 $\Delta t = T$,对动态障碍物进行膨化处理,在 $WFD(t + T)$ 内规划一条由 $P_R(t)$ 至 EFD 的优化路径,并依该路径行进。为简单起见,不妨取 $T = \frac{d}{v_{OH}}$ 。关于规划的安全性,将在下节进一步讨论。

令 $G(t) \in \{P \mid d(P_R(t), P) = \min d(P_R(t), Q), P, Q \in WFD(t + T) \cap EFD\}$,它是预测窗口 $WFD(t + T)$ 内距 Rob 最近的永久可行点。

在以上分析的基础上,下面给出一个 Rob 在滚动窗口内由 $P_R(t)$ 向 $P_{sub}(t)$ 行进的局部路径规划算法,其中 $P_R(t) \in FD(t)$, $P_{sub}(t) \notin SO_i^o, i \in S$ 。

算法 2 基于 Δt -膨化模型的局部路径规划算法。

Step 1 规划从 $P_R(t)$ 到 P_{sub} 的原始路径;

Step 2 1) 若 $DW(t) = \emptyset$, 转 Step 5;

2) 若 $DW(t) \neq \emptyset$:

a) 原始路径不可逃逸,转 Step 3;

b) 原始路径可逃逸,且 $P_R(t + T_0) \in EFD$, 转 Step 5; 否则,转 Step 3;

Step 3 在 $WFD(t + T_0)$ 内规划由 $P_R(t)$ 到 $P_{sub}(t)$ 的严格趋近可行路径,若依该路径行进能使 $P_R(t + T_0) \in EFD$, 转 Step 5; 否则,转 Step 4;

Step 4 在 $WFD(t + T)$ 内依从 $P_R(t)$ 到 $G(t)$ 的最短路径行进,到达 $G(t)$ 后等待 τ_1 时间,立即沿直线返回 $P_R(t)$, 重新以原始路径作为规划路径;

Step 5 依规划路径行进;

算法 2 基于这样的思想:当没有探测到动态障碍物时,可按原始路径行进;否则,一定要保证本步规划的实施绝不会影响下一步滚动规划的安全性(滚动规划的可重复性)。

3.3 基于滚动窗口的路径规划算法 (Path planning algorithm based on rolling windows)

在上述基础上,结合反馈初始化及局部规划的滚动实施机制,可以给出移动机器人在未知动态环境下基于滚动窗口的路径规划算法。

以下算法中 $P_s \in FD(0)$, $P_g \notin SO_i^o, i \in S$ 。

算法 3 基于滚动窗口的路径规划算法。

Step 0 对起点 (P_s)、终点 (P_g)、工作环境 (WS)、Rob 的视野半径 (r)、步长 (ϵ) 进行初始化;

Step 1 如果终点到达,规划中止;

Step 2 对当前滚动窗口 $\text{win}(P_R(t))$ 内的环境信息进行刷新;

Step 3 产生局部优化子目标 $P_{\text{sub}}(t)$;

Step 4 采用算法 2 进行窗口内的局部路径规划,并依局部规划策略行进,步长为 $\epsilon (0 < \epsilon < r)$;

Step 5 返回 Step 1.

本算法中 Step 4 的行进步长不包括因执行局部规划算法 2 中避碰措施(Step 4)而引起 Rob 走过的路程.

算法 3 是依靠机器人实时探测到的局部环境信息,以滚动的方式进行在线规划,在滚动的每一步,Rob 根据探测到的局部信息,用启发式方法生成优化子目标,在当前滚动窗口内进行局部路径规划,然后实施当前策略(依局部规划路径移动一步),随滚动窗口的推进,不断取得新的环境信息,从而在滚动中实现优化与反馈的结合.

4 安全性分析(Safety analysis)

基于滚动窗口的路径规划使机器人对动态未知环境具有良好的适应性,但由于缺乏全局环境信息,上述滚动规划算法并不能保证机器人在任意复杂的环境下都能安全地到达终点.以下本文就在满足一定约束的动态未知环境下,对滚动规划算法进行安全性和可达性分析.

对 WS 附加以下约定: WS 内以任一点为圆心, r 为半径的圆形区域至少能覆盖或部分覆盖到一个静态障碍物;任一动态障碍物在上述圆形区域内持续逗留的最长时间为 τ_1 ,且不同动态障碍物进入同一圆形区域的最短时间间隔为 τ_2 ,其中 τ_1, τ_2 为常量.

以下证明,在上述约定动态环境中利用算法 3,只要 v_R 及 τ_1, τ_2 满足一定条件,就能保证 Rob 在有限时间内从起点 P_s 安全到达终点 P_g .

根据对环境的约定,应有

$$\text{win}(P_R(t)) \cap SO_i \neq \emptyset, \forall t \geq 0. \quad (7)$$

其中 $i \in S$. 所以 $\text{win}(P_R(t)) \cap EFD \neq \emptyset$.

当 $r \leq d$ 时,有 $P_R(t) \in EFD, \forall t \geq 0$. 为使规划有意义,以下均考虑 $r > d$ 的情况.

引理 1 $\forall t \geq 0$, 若 $DW(t) \neq \emptyset$, 则 $WFD(t+T) \cap EFD \neq \emptyset, i \in DW(t)$.

由此,滚动窗口内必定存在点 $G(t), \forall t \geq 0$. $G(t)$ 如上节所定义,是滚动窗口内考虑动态障碍物膨化后距 Rob 最近的永久可行点.

引理 2 各种情况下, $WFD(t+T)$ 内从 $P_R(t)$ 到 $G(t)$ 的最短路径所对应路程的最大值为 $\Psi =$

$$\frac{r}{2}(\pi - \alpha), \text{ 其中 } \alpha = 2\arctg \frac{d}{\sqrt{r^2 - d^2}}.$$

因为当前滚动窗口内只有一个动态障碍物,再根据对障碍物的约定,易证引理成立.

称 WFD 中所有从 P_0 到 P_f 的可行路径的集合为定端可行路径集合,记为 $\Gamma_{WFD}(P_0 P_f)$.

引理 3 $\forall t \geq 0$, 若 $DW(t) \neq \emptyset$, 取 $\Delta t = T_0$, 在滚动窗口内建立 $DObs_i$ 的 Δt -膨化模型后, WFD 中的定端可行路径集 $\Gamma_{WFD}(P_R(t) P_{\text{sub}}(t)) \neq \emptyset$; 取 $\Delta t = T$, 在滚动窗口内建立 $DObs_i$ 的 Δt -膨化模型后, 则有 $\Gamma_{WFD}(P_R(t) G(t)) \neq \emptyset$.

因为 $\Delta t = T_0$ 或 T 时, $WFD(t + \Delta t)$ 为连通域,再由引理 1 可证.

引理 3 保证了算法 2 中 Step 3, Step 4 必能规划出所需的可行路径.

用 $(t + \Delta\tau)$ 表示 Rob 以固定步长行进一步后新的时刻($\Delta\tau$ 为变量), 并令

$$Q_i(t) \in \{P \mid d(P_R(t), P) = \min d(P_R(t), Q), P, Q \in DO_i(t)\}.$$

它是 t 时刻动态障碍物 $DObs_i$ 上距 Rob 最近的点.

定理 1 在滚动规划中, 当 $t(t \geq 0)$ 时刻进行第 $k(k \geq 1)$ 次局部规划时 $DO_i(t)^0 \cap \text{win}(P_R(t)) = \emptyset$, Rob 依局部规划顺利行进一步, 而第 $(k+1)$ 次局部规划时 $i \in DW(t + \Delta\tau)$, 若有

$$v_R \geq \max \left\{ \frac{\Psi + \epsilon}{r - \epsilon} v_{OH}, \frac{\Psi}{T} \right\}, \quad (8)$$

则第 $(k+1)$ 次的局部规划必能使 Rob 与 $DObs_i$ 避碰.

证 由环境约定知, $\text{win}(P_R(t + \Delta\tau))$ 内只可能有一个动态障碍物, 即 $DObs_i$. t 时刻在 Rob 即将进行新一轮规划时, 某一动态障碍物 $DObs_i$ 未能被 Rob 探测到, 即 $d(P_R(t), Q_i(t)) \geq r$; 若 $DObs_i$ 沿 $\bar{\varphi}(Q_i(t) P_R(t))$ 以最大速率 v_{OH} 向 $P_R(t)$ 运行, 而局部规划的实施又恰使 Rob 沿 $\bar{\varphi}(P_R(t) Q_i(t))$ 以速率 v_R 向 $Q_i(t)$ 运行, 步长为 ϵ . 这样, 任何 t 时刻未知, 但 $(t + \Delta\tau)$ 时刻探知的动态障碍物离 Rob 的最近距离

$$d(P_R(t + \Delta\tau), Q_i(t + \Delta\tau)) \geq (r - \epsilon - v_{OH} \times \frac{\epsilon}{v_R}).$$

若要有有效避碰, 不仅 t 时刻的局部规划实施完前不能碰撞, 而且在下一次局部规划时要有足够的时间实施算法 2 的 Step 4, 其所需时间不大于 $\frac{\Psi}{v_R}$. 又在当前时刻的规划中只需考虑 $DObs_i$ 的影响, 若 Rob 速率 v_R 、步长 ϵ 及视野半径 r 需满足

$$v_R \geq \frac{\Psi + \epsilon}{r - \epsilon} v_{OH},$$

则有
$$\frac{\Psi}{v_R} \leq \frac{r - \varepsilon - v_{OH} \times \frac{\varepsilon}{v_R}}{v_{OH}},$$
 即 Rob 安全运行至 $G(t + \Delta\tau)$ 的最大时间不超过 $DObsi$ 移至 $P_R(t + \Delta\tau)$ 的最小时间; 另外, 由 $\frac{\Psi}{v_R} \leq T$, 知 Rob 能在 $DObsi$ 膨化模型的有效时段 ($\Delta t = T$) 内安全运行至 $G(t + \Delta\tau)$. 因此在当前规划中 Rob 必能顺利避障.

定理 1 表明, 对于 t 时刻第 k 次局部规划时未探测到, 而 $(t + \Delta t)$ 时刻第 $(k + 1)$ 次局部规划时才探测到的动态障碍物, 若 Rob 满足式 (8), 则在第 $(k + 1)$ 次局部规划中必能与之避碰.

在以下的讨论中, 我们均假定 (8) 式成立.

引理 4 在约定环境中, 当算法 2 中 Step 4 被执行, 若有

$$\tau_2 \geq 2\tau_1 + \frac{\Psi + \sqrt{r^2 - d^2}}{v_R}, \quad (9)$$

则当 Rob 返回 $P_R(t)$ 时, 当前滚动窗口内无动态障碍物.

证 若 t 时刻 Step 4 被执行, 则显然 $DW(t) \neq \emptyset$, 不妨令 $i \in DW(t)$, 则 $DObsi$ 在 $\text{win}(P_R(t))$ 内已停留时间 $\leq \tau_1$. 设 Rob 从 $P_R(t)$ 行进至 EFD , 停留 τ_1 (由环境约定, 此时 $DObsi$ 已不在 $\text{win}(P_R(t))$ 内), 再返回到 $P_R(t)$, 总共耗时 t_T , 应有 $P_R(t) = P_R(t + t_T)$, $\text{win}(P_R(t)) = \text{win}(P_R(t + t_T))$. 因为由引理 2, $t_T \leq \frac{\Psi}{v_R} + \tau_1 + \frac{\sqrt{r^2 - d^2}}{v_R}$, 而 $\tau_2 \geq 2\tau_1 + \frac{\Psi}{v_R} + \frac{\sqrt{r^2 - d^2}}{v_R}$, 故在 $(t + t_T)$ 时刻尚未有新的动态障碍物进入 $\text{win}(P_R(t))$, 即 $DW(t + t_T) = \emptyset$.

引理 4 保证了算法 2 的 Step 4 中重新以原始路径作为规划路径的可实现性, 即当 Step 4 被执行后, Rob 必能依局部规划的原始路径安全地走完一步. 以下我们在 τ_1, τ_2 满足式 (9) 的情况下进行讨论.

定理 2 在滚动规划中, 若 $t(t \geq 0)$ 时刻第 $k(k \geq 1)$ 次局部规划的实施能使 Rob 与 $DObsi$ ($i \in DW(t)$) 避碰, 则第 $(k + 1)$ 次的局部规划必能使 Rob 与 $DObsi$ 避碰.

证 由算法 2 知, 若执行 Step 2 或 Step 3 后能直接转到 Step 5, 则有 $P_R(t + \Delta\tau) \in EFD$, 显然下次规划必能使 Rob 与 $DObsi$ 避碰; 若 Step 4 被执行, 根据引理 4, 当 Rob 返回 $P_R(t)$ 时, $DObsi$ 已离开 $\text{win}(P_R(t))$, 且 $DW(t + t_T) = \emptyset$, Rob 依原始路径行进一步, 由定理 1 证明可知第 $(k + 1)$ 次的局部规划

必能使 Rob 与 $DObsi$ 避碰.

定理 2 表明, 对于滚动窗口内的某一已探知动态障碍物, 若 Rob 在第 k 次局部规划中能与之避碰, 则第 $(k + 1)$ 次的局部规划同样能保证与之避碰.

定理 3 若 Rob 初始位置 $P_R(0)$ 满足

$$d(P_R(0), R) \geq r - \varepsilon - v_{OH} \frac{\varepsilon}{v_R}, \quad \forall R \in DO_i, i \in D, \quad (10)$$

则在满足环境约定的任何情况下实施滚动规划, 始终能保证 Rob 安全行进至终点 P_g .

证 1) 当进行第一次滚动规划时.

若 $DW(0) = \emptyset$, 显然 Rob 能依局部规划的原始路径安全走完一步;

若 $DW(0) \neq \emptyset$, 由式 (9) 知, Rob 必能与滚动窗口内的动态障碍物避碰, 安全行进一步;

2) 如 t 时刻开始的第 $k(k \geq 1)$ 次滚动规划顺利结束 (Rob 安全走完第 k 步), 在 $(t + \Delta\tau)$ 时刻:

若 $DW(t + \Delta\tau) = \emptyset$, 则第 $(k + 1)$ 次滚动规划必能顺利实施;

若 $DW(t + \Delta\tau) \neq \emptyset$, 由定理 1、定理 2 知 Rob 必能与动态障碍物避碰, 此后本次规划必能顺利实施, 即 Rob 安全行进一步.

由以上分析归纳可知, 滚动规划过程中只要 Rob 满足式 (8), 必能保证算法 3 的安全性.

由定理 3 可以看出:

1) 当 $\varepsilon \geq r$ 时, 不能保证避碰;

2) 对 Rob 而言, v_R 越大, r 越大, ε 越小, 就越有利于避碰;

由于上述滚动规划算法对于动态障碍物所采取的措施并未改变其局部路径的严格趋近性, 所以算法的可达性分析与在未知静态环境下滚动规划的情况相同. 文献 [13] 已证明了算法 3 的目标可达性, 故在此我们略去可达性的分析.

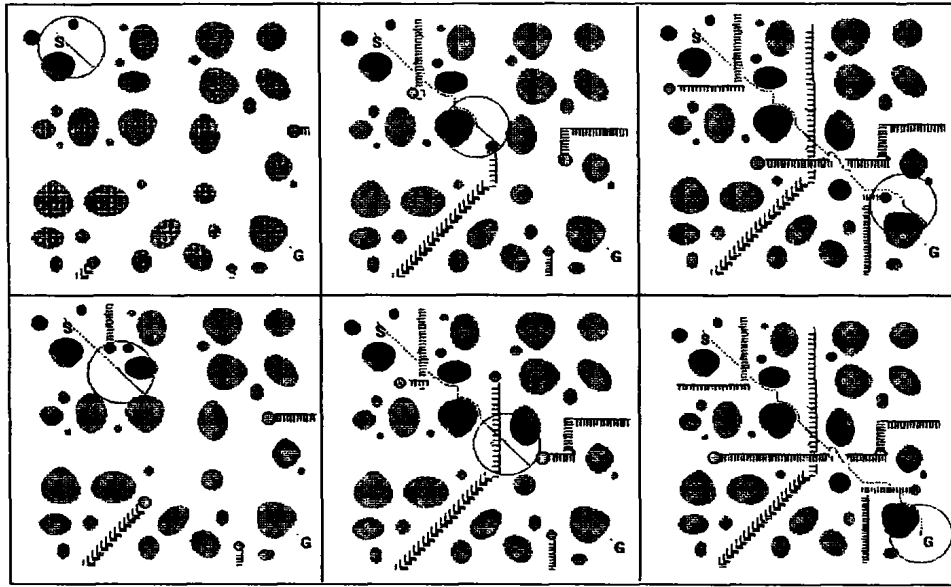
5 仿真结果 (Simulation results)

图 1 给出了应用算法 3 对全局环境未知情况下移动机器人路径规划的一个仿真结果. 在规划初始时刻, 机器人不具备任何静、动态障碍物的位置信息. Rob 在未知的动态环境中, 利用实时探测到的局部窗口信息, 进行滚动规划; 在滚动窗口内, Rob 利用算法 2 规划局部路径. 图中灰色部分表示未知障碍物, 黑色部分表示 Rob 在滚动过程中逐步探测到的局部环境信息; 4 个动态障碍物的实际运行轨迹用短线标出; 圆形滚动窗口中心黑点即为 Rob. 可以看出, 采用本文提出的滚动规划算法, Rob 能依较优

的规划路径从起点(S)安全到达终点(G)。

移动机器人滚动路径规划放弃了全局的最优目标,以反复在线进行的局部优化取代全局优化,通过在每个滚动区间使系统性能达到最优,在滚动过程中得到满意的控制结果。因此,滚动路径规划能很好

地适应环境的动态不确定性;同时,规划基于局部滚动窗口,使问题的论域规模缩小,在线计算量大为降低,便于实时求解。我们所进行的大量仿真例子都表明,基于滚动窗口的路径规划方法具有反应灵敏、实时性好的特点。



$$v_R: v_1^1: v_2^2: v_3^3: v_4^4 = 1:0.5:2:1:0.3, \epsilon:r = 1:10$$

图1 基于滚动窗口的机器人路径规则

Fig. 1 Mobile robot path planning based on rolling windows

6 结论(Conclusions)

动态未知环境下移动机器人的路径规划是机器人领域的重要研究内容。由于缺乏先验的全局环境信息,无法进行有效的离线全局规划。实际应用中的机器人也往往受到传感范围有限的制约,没有全局视野,规划只能依靠实时测得的局部信息。本文借鉴预测控制的基本原理,在全局环境信息未知情况下,用基于滚动窗口的规划方法进行机器人路径规划。机器人虽然没有先验的全局环境知识,但充分利用探知的局部信息,在滚动中有效结合了优化和反馈机制,不仅使局部规划的计算量保持在较低水平,而且保证了全局的安全性与可达性。通过本文的研究不难发现,滚动规划是解决未知环境下规划问题的强有力工具。

参考文献(References):

- [1] REIF J, SHARIR M. Motion planning in the presence of moving obstacles [A]. *Proc of the 26th IEEE Conf on Foundations of Computer Science* [C]. Washington, DC:IEEE Computer Society Press, 1985, 144 - 154.
- [2] CANNY J, REIF J. New lower bound techniques for robot motion planning problems [A]. *Proc of the 28th IEEE Conf on Foundations of Computer Science* [C]. Washington, DC:IEEE Computer Society Press, 1987, 49 - 60.
- [3] KANT K, ZUCKER S W. Toward efficient trajectory planning: the path-velocity decomposition [J]. *Int J of Robotics Research*, 1986, 5 (3): 72 - 89.
- [4] ERDMANN M, LOZANO-PEREZ T. On multiple moving objects [J]. *Algorithmica*, 1987, 2(4): 477 - 521.
- [5] FUJIMURA K, SAMET H. Time-minimal paths among moving obstacles [A]. *Proc of IEEE Conf on Robotics and Automation* [C]. Washington, DC:IEEE Computer Society Press, 1989, 1110 - 1115.
- [6] CHANG T Y, KUO S W, HSU J Y J. A two-phase navigation system for mobile robots in dynamic environments [A]. *Proc of IEEE/RSJ Int Conf on Intelligent Robots and Systems (IROS'94)* [C]. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, 1994, 306 - 313.
- [7] LEE P S, WANG L L. Collision avoidance by fuzzy logic control for automated guided vehicle navigation [J]. *J of Robotic Systems*, 1994, 11 (8): 743 - 760.
- [8] JING X, ZBIGNIEW M, LIXIN Z, et al. Adaptive evolutionary planner/ navigator for mobile robots [J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 1997, 1 (1): 18 - 28.
- [9] LUO R C, CHEN T M. Multiagent system with event driven control for autonomous mobile robot navigation [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Robotics and Automation* [C]. Piscataway, NJ:IEEE Service Center, 1998, 964 - 969.

- [10] LUMELSKY V J, MUKHOPADHYAY S, SUN K. Dynamic path planning in sensor-based terrain acquisition [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1990, 6(4):462-472.
- [11] TAYLOR C J, KRIEGMAN D J. Vision-based motion planning and exploration algorithms for mobile robots [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 1998, 14(3):417-426.
- [12] XI Yugeng. *Predictive Control* [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1993 (in Chinese).
- [13] ZHANG Chungang, XI Yugeng. Robot path planning in globally unknown environments based on rolling windows [J]. *Science in China (Ser E)*, 2001, 44(2):131-139.

- [14] XI Yugeng. Predictive control of generalized problem in dynamic uncertain environment [J]. *Control Theory & Applications*, 2000, 17(5): 665-670(in Chinese).

作者简介:

张纯刚 (1975—),男,上海交通大学自动化系博士生.研究兴趣为机器人路径规划,多机器人协调规划. Email: cyzhang@scn.com.cn;或 cgzhang@online.sh.cn

席裕庚 (1946—),男,1984年在德国慕尼黑工业大学获得博士学位,现为上海交通大学自动化系教授,博士生导师.主要从事预测控制,复杂系统控制理论和智能机器人的研究.

(上接第36页)

- [3] SUN Mingxuan, HUANG Baojian, ZHANG Xuezhi. PD-type iterative learning control for a class of uncertain time-delay systems with biased initial state [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(6): 853-858 (in Chinese).
- [4] WEI Yanding. Research on convergent speed of iterative learning control [J]. *Control Theory & Applications*, 2001, 18(2):314-316 (in Chinese).
- [5] SUN Mingxuan. Robust convergence analysis of iterative learning co-

ntrol systems [J]. *Control Theory & Applications*, 1998, 15(3):320-326.

作者简介:

杨志刚 (1957—),男,副教授,博士生.主要研究领域:汽车智能控制技术. Email: zgyang5888@sina.com;

曹长修 (1937—),男,教授,博士生导师.主要研究领域:神经网络控制,汽车智能控制技术;

苏玉刚 (1962—),男,副教授.主要研究领域:电力电子技术,计算机测控及智能控制技术与应用.