

文章编号: 1002-0446(2002)01-0071-05

动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划

张纯刚 席裕庚

(上海交通大学自动化研究所 上海 200030)

摘要: 本文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.文中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,实现了优化和反馈的合理结合,对动态环境具有良好的适应性.

关键词: 机器人路径规划;滚动规划;场景预测

中图分类号: TP24 **文献标识码:** B

ROLLING PATH PLANNING OF MOBILE ROBOT IN DYNAMIC UNKNOWN ENVIRONMENT

ZHANG Chun-gang XI Yu-geng

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

Abstract: Using the rolling optimization concept adopted in predictive control, robot path planning in global unknown environment with moving obstacles is studied. A new strategy of path planning based on rolling windows 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 style. Optimization and feedback are combined in a reasonable way. It is well suitable to dynamic environment.

Keywords: robot path planning, rolling plan, scenario prediction

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,已有不少文献对这一具有重要实际应用背景的问题展开了研究.

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^[1],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.

文[2]借鉴预测控制的滚动优化原理^[3],提出了在静态未知环境下移动机器人基于滚动窗口的规划算法.本文将这一原理推广到解决存在动态障碍物的未知环境下机器人的路径规划问题,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.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 问题描述与定义(Problem formulation and definitions)

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_{im} 安全避碰地到达终点 P_{goal} .

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凸型静态障碍物 $SObs1, SObs2, \dots, SObsn$, 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, 且各障碍物及障碍物与 WS 边界不相交; t 时刻 $DObs_i (i=1, \dots, m)$ 的运动速率 $v_i(t) \in [0, v_{OH}]$, 其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 能连续行进, 运动速率为 v_R .

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 ; $SObs_i$ 中的点构成闭凸集 SO_i , 其边界为 ∂SO_i ; t 时刻, $DObs_i$ 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 \sum_0 , 则 $\forall P \in W$ 在 \sum_0 都有确定的坐标 (x, y) ; t 时刻 Rob 的位置表示为 $P_R(t)$; 规划起始时刻定为 $t=0$.

定义 2.1 $d(P_i, P_j)$ 为点 $P_i(x_i, y_i)$ 到点 $P_j(x_j, y_j)$ 的距离, 由公式

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

确定.

以下叙述中, 用上标“ o ”、“ c ”分别表示相应集合的内部和补集.

定义 2.2 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,

$$FD(T) = W \cap \left(\bigcap_{i \in S} (SO_i^o)^c \right) \cap \left(\bigcap_{j \in D} (DO_j(t)^o)^c \right) \quad (2)$$

定义 2.3 $EFD = W \cap \left(\bigcap_{i \in S} (SO_i^o)^c \right) \cap \left(\bigcap_{j \in D} \left(\bigcup_{t=0}^{\infty} DO_j(t)^o \right)^c \right)$ 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. 若 $P \in EFD$, 称 P 成为永久可行点.

定义 2.4 $T = [t_0, t_f], \forall P_0 \in FD(t_0), \forall P_f \in$

$FD(t_f)$, 若连续映射 $FS(\cdot): T \rightarrow W$ 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 $FS(\cdot)$ 是 W 中从 P_0 到 P_f 的一个可行路径.

定义 2.5 $\text{win}(P_R(t)) = \{P | P \in W, d(P, P_R(t)) \leq r\}$ 称为 Rob 在点 $P_R(t)$ 处的视野域, 亦即该点的滚动窗口, 其中 $P_R(t) \in FD(t)$.

若工作环境中不考虑动态障碍物的存在, 只要 P_0, P_f 属于可行域, 则必然存在从 P_0 到 P_f 的可行路径, 可用适当方法规划出从 P_0 到 P_f 的优化路径. 以下称在滚动窗口内不考虑动态障碍物时规划出的优化路径为原始路径.

3 动态未知环境下基于滚动窗口的路径规划算法 (Path planning algorithm based on rolling windows in dynamic unknown 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[4]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:

(1) **场景预测 (Scenario prediction)**: 描述机器人运动环境的预测模型包含了机器人运动学, 环境地图中已知的静、动态障碍物, 出发点和目标点. 给定任一从起点到目标的运动路径, 就能根据这一模型展示出机器人在环境中的运动过程, 并判断出其是否与障碍物相碰.

(2) **滚动窗口优化 (Rolling window optimization)**: 以周期方式驱动, 在滚动的每一步, 定义以机器人当前位置为中心的一区域为优化窗口. 该区域内的预测模型一方面是全局环境信息向该区域的映射, 另一方面还补充了传感系统检测到的原来未知的静、动态障碍物. 以当前点为起点, 根据全局先验信息采用某种启发式方法确定该窗口区域的局部目标, 根据窗口内信息所提供的场景预测进行规划, 找出适当的局部路径, 机器人依此路径移动, 直到下一周期.

(3) **反馈初始化 (Reinitialization)**: 在滚动规划的每一步, 机器人首先通过其传感系统获取周围的

实时信息,对窗口区域内的障碍环境进行初始化.这一过程既是对区域内先验障碍信息的修正,也是对不确定动态障碍信息的认定.甚至还包含了对动态障碍运动趋势的预测,从而为局部规划提供了最新、最实际的信息基础.

以下,我们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

令 $SW(t) = \{i | SO_i \cap Win(P_R(t)) \neq \Phi\}$, $DW(t) = \{i | DO_i(t) \cap Win(P_R(t)) \neq \Phi\}$, 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

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(Δt)内所能达到的区域,称为 $Dobsi$ 的 Δt —膨化模型,记作 $Dobsi'$. $Dobsi'$ 中的点构成闭凸集 $DO_i(t + \Delta t)$,其边界记为 $\partial DO_i(t + \Delta t)$.显然,有

$$DO_i(t + \Delta t) = \bigcup_{\tau=t}^{t+\Delta t} \tilde{DO}_i(\tau) \quad (3)$$

其中 $\tilde{DO}_i(\tau)$ 为预测值.

这是在动态障碍物运动方向、速率都不确定情况下对其未来的可能位置所作的预测.机器人对障碍物运动规律了解越多,以上预测就越准确,就能规划出更优的路径.

为简单起见,可考虑无规律运动的圆形障碍物 $Dobsi$, t 时刻其中心为 $(x'_i(t), y'_i(t))$, 半径为 R_i . 将 $\partial DO_i(t)$ 上各点沿半径方向,向外侧延伸 $v_{OH}\Delta t$ 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 $(x'_i(t), y'_i(t))$ 为圆心、 $(R_i + v_{OH}\Delta t)$ 为半径的圆. $\partial DO_i(t + \Delta t)$ 在 WS 中形成的曲线可由下述方程描述:

$$(x - x'_i(t))^2 + (y - y'_i(t))^2 = (R_i + v_{OH}\Delta t)^2 \quad (4)$$

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

$$WFD(t + \Delta t) = Win(P_R(t)) \cap \left(\bigcap_{i \in SW(t)} (SO_i)^c \right) \cap$$

$$\left(\bigcap_{j \in DW(t)} (DO_j(t + \Delta t))^c \right) \quad (5)$$

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

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 $DW(T) = \Phi$, 即视野范围内无动态障碍物,则 Rob 可规划出一条由 $P_R(t)$ 至 $P_{sub}(t)$ 的优化路径 FS (原始路径),并可由参数方程

$$\begin{cases} x = x(\tau) \\ y = y(\tau) \end{cases} \quad (6)$$

来确定.

若 $DW(t) \neq \Phi$, 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 $T = \frac{\epsilon}{v_R}$ (其中 $0 < \epsilon < r$, ϵ 为机器人的步长),对 $Dobsi$ 进行 Δt —膨化.若 $\Delta t \in [0, T]$ 时间范围内 Rob 可能与 $Dobsi$ 碰撞,则至少有一时刻 Δt 满足下列方程组:

$$\begin{cases} (x - x'_i(t))^2 + (y - y'_i(t))^2 = (R_i + v_{OH}\Delta t)^2 \\ x = x(\Delta t) \\ y = y(\Delta t) \end{cases} \quad (7)$$

若 $\Delta t \in [0, T]$, 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 $\Delta t \in [0, T]$, 上述方程组有实解,则表明 Rob 依原始路径行进可能会与 $Dobsi$ 碰撞,称为原始路径不可逃逸.

3.2 滚动窗口内的局部规划

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

局部子目标是在滚动窗口边界上寻找一个全局目标 P_{goal} 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[2]. t 时刻,子目标 $P_{sub}(t)$ 的选择可归结为如下优化问题

$$\min J = \min_d(P, P_{goal}) \quad (8)$$

s. t. $P \in \partial Win(P_R(t)) \cap FD(t)$.

3.2.2 局部规划算法

在当前滚动窗口内无动态障碍物,即 $DW(t)=\Phi$ 的情况下,Rob 可直接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 $SW(t) \neq \Phi, DW(t) \neq \Phi$ 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 必能依局部规划的原始路径安全行进一步。但这种处理是短视的,因为行进一步后有可能使 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,也不能贸然依该路径行进,除非 Rob 行进一步后能进入永久可行域(如静态障碍物边缘);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 $\Delta t=T$ 对动态障碍物进行膨化处理,将此膨化模型视为临时性的静态障碍物,在 $WFD(t+T)$ 内规划一条由 $P_R(t)$ 向 $P_{mb}(t)$ 的优化路径(若 $P_{mb}(t)$ 为动态障碍物的膨化模型所覆盖,则需在 $Win(P_R(t))$ 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,另取 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 中最近点的优化路径,并依该路径行进。令 $G(t) \in \{P | d(P_R(t), P) = \min d(P_R(t), Q), P, Q \in EFD\}$,它是滚动窗口内距 Rob 最近的永久可行点。 T' 的取值涉及动态障碍、机器人的速度,以及 $G(t)$ 的位置,对 T' 适当取值以确保规划的安全性。

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 $P_{mb}(t)$ 行进的局部路径规划算法,其中 $P_R(t) \in FD(t), P_{mb}(t) \in SO_i, i \in S$ 。

算法1 滚动窗口中的路径规划算法

Step1: 规划从 $P_R(t)$ 到 $P_{mb}(t)$ 的原始路径;

Step2: (1)若 $DW(t) = \Phi$, 转 Step5;

(2)若 $DW(t) \neq \Phi$:

(a)原始路径不可逃逸,转 Step3;

(b)原始路径可逃逸,且 $P_R(t+T) \in EFD$, 转 Step5; 否则,转 Step3;

Step3: 在 $WFD(t+T)$ 内规划由 $P_R(t)$ 到 $P_{mb}(t)$ 的优化路径,若依该路径行进能使 $P_R(t+T) \in EFD$, 转 Step5; 否则,转 Step4;

Step4: 在 $WFD(t+T')$ 内规划从 $P_R(t)$ 到 $G(t)$ 的优化路径;

Step5: 依规划路径行进;

3.3 基于滚动窗口的路径规划算法

结合反馈初始化及局部规划的滚动实施机制,我们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 $P_{in} \in FD(0), P_{goal} \in SO_i, i \in S$ 。

算法2 基于滚动窗口的路径规划算法

Step0: 对起点 (P_{in})、终点 (P_{goal})、工作环境 (WS)、Rob 的视野半径 (r)、步长 (ϵ) 进行初始化;

Step1: 如果终点到达,规划中止;

Step2: 对当前滚动窗口 $Win(P_R(t))$ 内的环境信息进行刷新;

Step3: 产生局部优化子目标 $P_{mb}(t)$;

Step4: 采用算法1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 $\epsilon (0 < \epsilon < r)$;

Step5: 返回 Step1;

算法2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 仿真结果 (Simulation result)

图1给出了应用算法2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1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;四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)。

终点(G)。

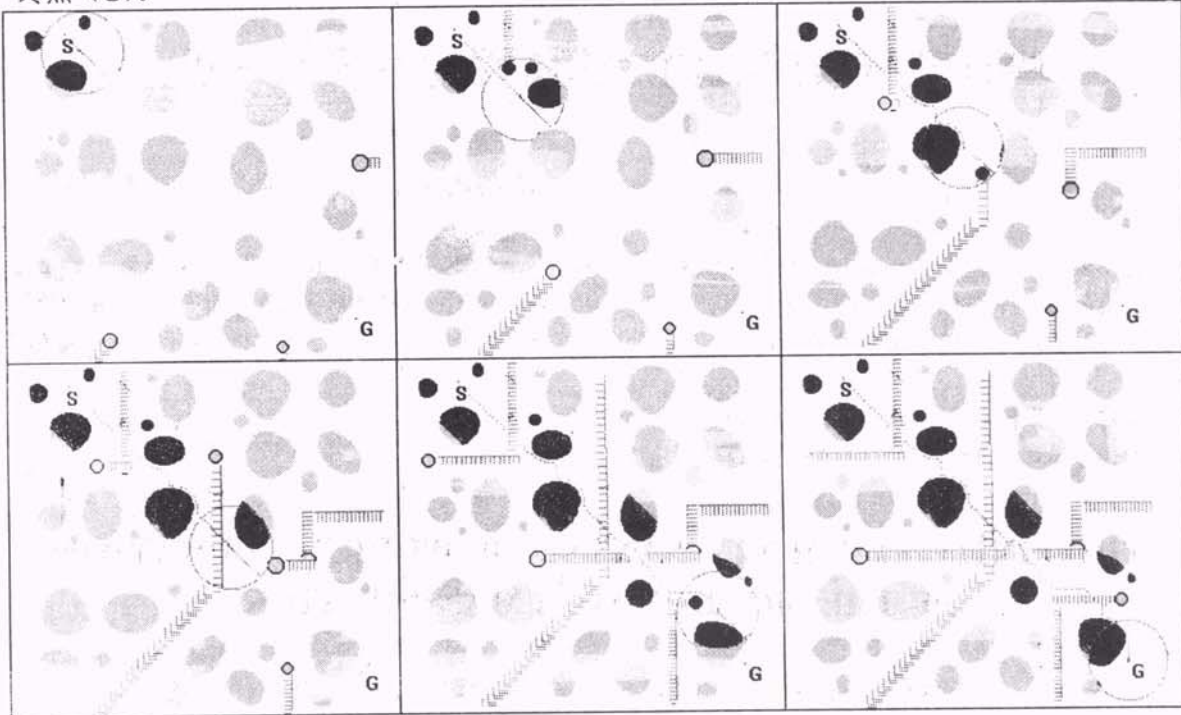


图 1 基于滚动窗口的机器人路径规划

Fig. 1 Robot path planning based on rolling windows

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,对动态不确定环境具有良好的适应性。

5 结论(Conclusion)

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,使局部规划的计算量保持在较低水平,对动态不确定环境具有较强的适应性。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 Iyengar S S, Jorgensen C C, Rao S V N, *et al.* Learned navigation paths for a robot in unexplored terrain. In: Proc of the 2nd Conf on Artificial intelligence applications and engineering of knowledge based systems, Miami Beach, Florida, 1985, 11-13
- 2 张纯刚, 席裕庚. 全局环境未知时基于滚动窗口的机器人路径规划. 中国科学, 2001, 31(1): 51-58
- 3 席裕庚. 预测控制. 北京: 国防工业出版社, 1993
- 4 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 665-670

作者简介:

张纯刚 (1975-), 男, 博士生. 研究领域: 智能机器人, 多机器人协调规划。

席裕庚 (1946-), 男, 教授、博士生导师. 研究领域: 复杂工业过程与智能机器人的控制理论和方法等。