

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2010.06.022

## 基于滚动预测原理的移动机器人路径规划

梁瑾, 宋科璞

(西安飞行自动控制研究所 飞行器控制一体化国防重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:** 为解决全局静态未知环境以及动态未知环境下的移动机器人路径规划问题, 借鉴预测控制优化原理, 提出基于滚动窗口的移动机器人路径规划方法。利用机器人实时探测到的局部环境信息, 通过有效的场景预测, 以滚动方式进行在线规划。在局部路径规划中, 借鉴墙壁跟踪的控制方法提高移动机器人的自主性。仿真结果表明, 文中提出的方法计算量小、反应迅速, 能很好的适应于未知环境中移动机器人的路径规划。

**关键词:** 移动机器人; 路径规划; 预测控制; 滚动窗口; 墙壁跟踪

**中图分类号:** TP242 **文献标识码:** A

## Mobile Robot Path Planning Based on Rolling and Prediction Concept

LIANG Jin, SONG Ke-pu

(Key Laboratory of National Defense for Flight Control Integration, Research Institute of Xi'an Flight Automatic Control, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of mobile robot path planning in globally static unknown environment and dynamic obstacles unknown environment, using the rolling optimization concept adopted in predictive control, put forward mobile robot path planning method based on rolling windows. Use the mobile real-time obtained locally environmental information, through effective scenario prediction progress on-line planning in rolling style. The wall-following method can prove mobile robot is autonomous at local path planning. Simulation result shows that the algorithm proposed in this paper is well suitable to the unknown environment with its low calculation burden and quick response to the changes of the environment.

**Keywords:** Mobile robot; Path planning; Predictive control; Rolling windows; Wall-following

### 0 引言

根据移动机器人对环境信息已知程度的不同, 可以将路径规划分为环境信息完全已知的全局路径规划和环境信息未知或者部分已知的局部路径规划 2 种<sup>[1]</sup>。其中, 未知环境下的移动机器人路径规划是机器人研究领域的重要内容。由于缺乏先验的全局环境信息, 无法进行有效的离线规划, 并且在实际使用中机器人也会受到传感器范围有限的制约, 因此, 规划只能依靠实时探测的局部环境信息。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的结合起来, 成为不确定环境下移动机器人路径规划问题的关键。由于在过程控制中得到广泛应用的预测控制<sup>[2]</sup>正是这种机制合理结合的成功例子, 故借鉴预测控制滚动优化原理, 提出一种基于滚动窗口的机器人路径规划方法, 以解决全局环境未知时的机器人路径规划问题。

### 1 滚动预测原理及其拓展

预测控制是一种基于模型和基于优化的控制。采用拓广的预测控制原理进行滚动规划, 实现思路

可描述为<sup>[3]</sup>:

1) 场景预测: 描述机器人运动环境的模型包含了机器人运动学、环境地图中已知的静态障碍物、出发点与目标点。给出任意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, 并判断出其是否与静态或者运动障碍相碰, 以及计算出相应的性能指标。

2) 滚动窗口优化: 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, 这一区域应包含在机器人传感器系统的搜索范围内, 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探测到的原来未知的静态障碍或者运动障碍, 以当前点为起点, 根据先验信息采用某种启发方式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, 可找出局部最优路径, 机器人将沿此路径移动, 直到下一周期。

3) 反馈初始化: 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

收稿日期: 2010-01-04; 修回日期: 2010-02-15

作者简介: 梁瑾 (1985-), 女, 山东人, 硕士在读, 从事导航、制导与控制研究。

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物运动趋势的预测，从而为局部路径规划提供了最新的信息。

## 2 全局静态未知环境中的机器人路径规划

### 2.1 问题描述与定义

考虑在二维平面上的移动机器人，工作区域为  $WS$ ，其中分布着有限个静态障碍物  $O_{b1}, O_{b2}, \dots, O_{bn}$  ( $i=1,2,\dots,n$ )，规划目的是使移动机器人从起始点  $S$  沿规划的路径安全无碰撞的运动到全局目标点  $G$ 。将机器人模型化为点状机器人，同时，将  $WS$  中的障碍物根据机器人的实际尺寸及安全要求进行了相应的“膨化”处理，使得“膨化”后的障碍物边界为安全区域。

首先给出以下一些相关的定义<sup>[4-5]</sup>：

1) 机器人的传感器布置如图 1、图 2。任意时刻机器人只能探测到以自己当前位置为中心， $r$  为半径区域  $W$  内的环境信息，其探测边界为  $\partial W$ ，机器人当前方向为图中箭头方向，并以  $\varphi(P_R(t))$  表示。

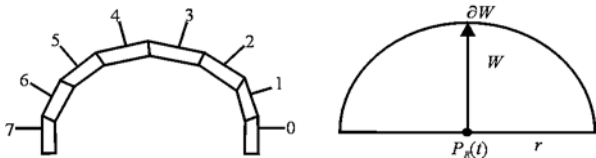


图 1 传感器排布示意图 图 2 机器人探测范围示意图

2) 机器人对环境没有先验知识，但是通过定位系统，机器人知道自己当前位置在工作区域  $WS$  内的坐标  $P_R(x_R, y_R)$ ，规划出的局部子目标点坐标  $P_{Gt}(x_{gt}, y_{gt})$  和全局目标点坐标  $G(x_g, y_g)$ 。

3) 机器人在路径规划中采用周期驱动。

定义 1  $t$  时刻， $\forall p \in W(t), p \notin O_i, (i=1, \dots, m, m \leq n)$ ，则称  $p$  为  $t$  时刻可行点，所有  $t$  时刻可行点的集合称为  $t$  时刻可行域，记为  $FD(t)$ ；

$\forall p \in W(t), p \in O_i, (i=1, \dots, m, m \leq n)$ ，则称  $p$  为  $t$  时刻障碍点， $t$  时刻所有障碍点的集合称为  $t$  时刻障碍域，记为  $NFD(t)$ 。

定义 2  $\forall p_i, p_j \in W_s$ ，定义  $d(p_i, p_j)$  为点  $p_i(x_i, y_i)$  到点  $p_j(x_j, y_j)$  的距离，由下式确定

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

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  $FS(\bullet): T \rightarrow W$ ，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  $FS(\bullet)$  是  $W$  中从  $P_0$  到  $P_f$  的一个可行路径。 $FS(\bullet)$  的像集在  $WS$  中形成曲线的弧长称为路程，记为  $FJ(P_0 P_f)$ 。

定义 4  $Win(P_R(t)) = \{P | P \in W, d(P, P_R(t)) \leq r, \varphi(P) \in (\varphi(P_R(t)) - 0.5\pi, \varphi(P_R(t)) + 0.5\pi)\}$  称为机器人在点  $P_R(t)$  处的探测域，亦即该点的滚动窗口，其中， $P_R(t) \in FD(t)$ 。

### 2.2 基于滚动优化原理算法的一般步骤

基于滚动优化原理的路径规划算法一般步骤可描述为：

- 1) 对起点  $S$ 、终点  $G$ 、工作环境  $WS$ 、机器人的探测半径  $r$  等参数进行初始化；
- 2) 若到达终点，规划终止；否则，转至步骤 3；
- 3) 更新当前滚动窗口  $W(t)$  内的环境信息；
- 4) 确定局部优化子目标  $P_{Gt}$ ；
- 5) 在视野窗口内，规划局部路径；
- 6) 按规划的局部路径运动一步，返回步骤 2。

### 2.3 局部子目标的确定方法

产生局部子目标的方法如下： $t$  时刻移动机器人的滚动窗口为  $W(t)$ ，若  $G \in W(t)$ ，则取  $P_{Gt} = G$ ；否则，利用启发函数  $f(p) = g(p) + h(p)$  来选取使  $f(p)$  最小的窗口边界点  $p$  作为子目标  $P_{Gt}$ ，即：

$$\min_p f(p) = g(p) + h(p) \quad s.t. \quad p \in p_c \quad (2)$$

其中， $p_c$  为子目标的可选集； $g(p)$  为移动机器人从当前位置行进到  $p$  的代价，其值可根据  $p$  的位置及当前窗口内的环境信息来估计； $h(p)$  为从  $p$  行进到终点的代价。由于边界外的信息无法获取，一般  $h(p)$  只能采用  $p$  到终点的距离来估计。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选择。这里降低对优化的要求，着重关注寻找可行的算法，仅以  $p$  是否属于局部目标点可选域来规定  $g(p)$  的值，即：

$$g(p) = \begin{cases} 0, & p \in p_c \\ \infty, & p \notin p_c \end{cases} \quad (3)$$

故子目标的选择问题可归结为如下优化问题： $\min J = \min d(p, G) \quad s.t. \quad p \in p_c \quad (4)$

这里需要说明的是本文研究在未知环境中移动机器人路径规划问题，由于机器人事先对环境信息一无所知，那么在边运动边规划的过程中，如果环

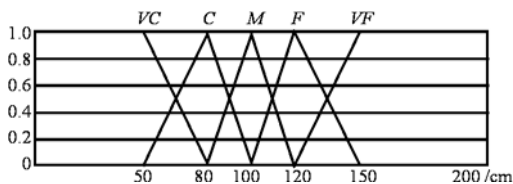
境中障碍物比较密集或者障碍物呈特殊形状时(例如,凹形等),机器人在当前时刻可能会无法找到局部目标点,但是在此只考虑一般环境中的路径规划问题,即能够保证机器人在运动的每一步都能找到满足条件的局部优化子目标点。对于特殊情况,这里暂不予考虑。

### 2.4 局部路径规划方法

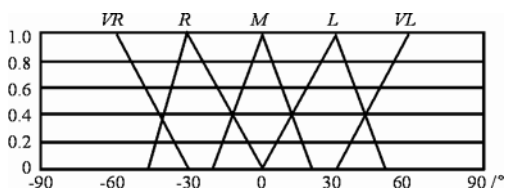
#### 2.4.1 基于模糊控制的机器人墙壁跟踪算法

采用双输入、单输出的模糊控制器。

2 个输入分别是机器人与墙壁的距离和机器人与墙壁的相对角度。设机器人与墙壁的距离的模糊变量语言集合为{很近,近,中,远,很远},其相应的语言变量分别记作:  $VC, C, M, F, VF$ 。设机器人与墙壁的相对角度的模糊变量语言集合为{很右,右,中,左,很左},其相应的语言变量分别记为:  $VR, R, M, L, VL$ 。距离参数和角度参数的隶属函数分别如图 3(a)和(b)。



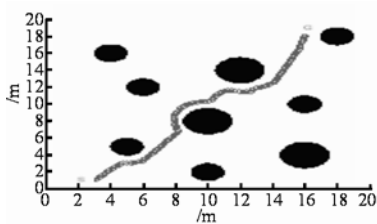
(a) 距离隶属函数



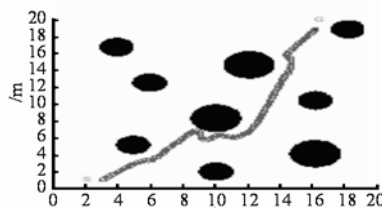
(b) 角度隶属函数

图 3 输入隶属函数

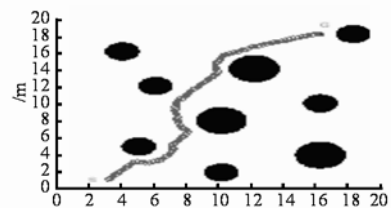
模糊控制器的输出是机器人的动作,即机器人旋转或者前进,输出的模糊语言集合为{右转,稍微右转,前进,稍微左转,左转},其相应的语言变量分别记作:  $TR, TRL, GA, TLL, TL$ ,输出参数的隶属函数如图 4。



(a)



(b)



(c)

图 5 全局静态未知环境中的路径规划仿真

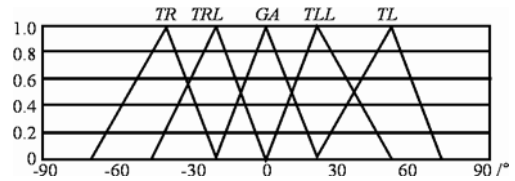


图 4 输出隶属函数

机器人跟踪其左侧墙壁时的控制规则如表 1。同理可推出机器人跟踪右侧墙壁的控制规则。 $S_r$ 为机器人与墙壁的距离, $W_r$ 为机器人与墙壁的相对角度, $U$ 为输出。

表 1 模糊控制规则表(墙壁在左侧)

	VC	C	M	F	VF
VR	GA	TLL	TL	TL	TL
R	GA	GA	TLL	TL	TL
M	TRL	TRL	GA	TLL	TL
L	TRL	TRL	TRL	GA	GA
VL	TR	TR	TR	TRL	GA

由控制规则表得到的输出经非模糊化转换成精确量便可用于控制被控对象。采用最大隶属度法。

#### 2.4.2 局部路径规划算法

1) 朝子目标点笔直行走,直至以下任一情况发生:

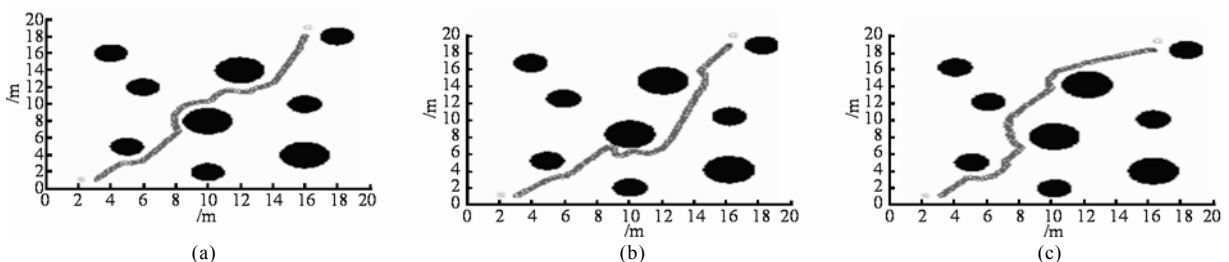
- (1) 子目标点达到,当前规划结束;
- (2) 遇到障碍物,距离障碍物边界 1 m 时,转至步骤 2;

2) 利用 2.4.1 中的墙壁跟踪算法使机器人沿到达子目标点距离较小的障碍物一侧边界行走,直至以下任一情况发生:

- (1) 达到当前规划边界,当前规划结束;
- (2) 绕过障碍物,并朝着子目标点笔直行走而不会碰到该障碍物,转步骤 1)。

### 2.5 仿真结果及分析

图 5 是一个 20 m×20 m 的仿真环境,根据 2.2~2.4 中给出的算法,选取不同的探测半径(分别是 2 m、4 m 和 6 m)进行路径规划仿真,得到如图 5 中(a)、(b)、(c)仿真结果。在仿真中,机器人的运动速度均为 0.25 m/s。



装备故障诊断系统设计[J]. 电子测量技术, 2008, 31(11): 103-107.

[3] Somnath Deb, Krishna R, Pattipati et.al. Multi-signal flow graphs: A novel approach for system testability analysis and fault diagnosis[c]. IEEE Auto Test conference 1994: 361-373.

[4] 彭培, 周沫. 基于多信号模型的舰船电子装备测试性分析和评估[J]. 舰船电子工程, 2008, 172(10): 187-120.

[5] 温熙森, 徐永成, 易晓山, 等. 智能机内测试理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.

[6] 曹志伟, 周晓东, 王成刚, 等. 基于多信号模型的电路板 TPS 开发方法研究[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(11): 1533-1535.

[7] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(12): 1616-1619.

\*\*\*\*\*  
(上接第 69 页)

通过仿真可以看出, 不论机器人探测半径的大小, 基于滚动预测原理的路径规划方法均能很好地完成路径规划任务。但是不同的探测半径会对规划的路径性能有一定的影响, 具体数据如表 2。

表 2 探测半径对路径的影响

探测半径	路径长度	规划步数
r=2.0	23.824 7	13
r=4.0	24.133 4	7
r=6.0	24.981 1	5

从表 2 中可以看出, 探测半径越小, 规划的路径越短且越优, 但是规划的步数就越多, 系统的计算负荷就越大。随着环境的愈加复杂, 探测半径的大小对规划步数的影响将会越明显。因此, 在滚动路径规划中需要选择合适的探测半径。

### 3 动态未知环境中的机器人路径规划

#### 3.1 问题描述

在 3.1 中所给出的描述与定义的基础上, 假定所给出的工作环境 WS 中, 还存在有限个随机运动的障碍物  $DO_{b1}, DO_{b2} \dots DO_{bN}$ , ( $i=1,2 \dots N$ ), 在路径规划过程中, 机器人不但要躲避静态障碍物, 同时还要防止与运动障碍物相碰撞。

#### 3.2 解决方案阐述

在局部路径规划过程中, 机器人每规划一步之前, 都要先对动态障碍物的下一步运动进行预测, 并及时采取措施避碰。

采用“扩展障碍”法实现机器人避碰, 具体措施如下<sup>[6]</sup>:

机器人每运动一步之前, 首先判断运动障碍物是否进入当前探测区域; 若进入, 则对其下一步的运动范围进行预测, 假设运动障碍物当前位置为  $(x_{do}(t), y_{do}(t))$ , 其半径为  $r_{do}$ , 运动速度为  $v_{do}$ , 那么该运动障碍物在  $\Delta\tau$  时间段内可能达到的区域范围可由下述方程描述:

$$(x - x_{do}(t))^2 + (y - y_{do}(t))^2 = (r_{do} + v_{do} \cdot \Delta\tau)^2 \quad (5)$$

若当前时刻机器人与该区域边界的距离  $\leq 1m$ , 则把该区域看作当前时刻的静态障碍物, 应用第 3 节中的方法进行避障。

#### 3.3 仿真结果

图 6 是一个  $20m \times 20m$  的仿真环境, 根据 3.2 中的算法进行路径规划, 得到如图 6(a)和(b)的仿真结果。

可以看出, 应用滚动窗口法可以很好地完成在动态不确定环境中的路径规划。

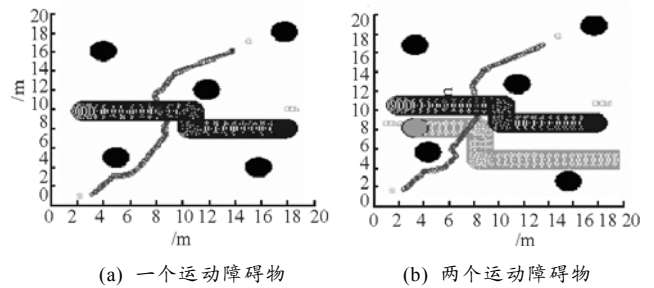


图 6 动态环境中的路径规划仿真

### 4 结论

借鉴预测控制原理, 采用基于滚动窗口的规划方法, 解决了全局环境静态未知以及动态未知环境下的路径规划问题, 通过仿真验证了该方法的有效性。

#### 参考文献:

[1] Leon J L. Automatic path planning for a mobile robot among obstacles of arbitrary shape[J]. IEEE Trans SMC, 1993, 28(3): 467-471.

[2] 席裕庚. 预测控制[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[3] 席裕庚. 动态不确定环境下广义控制问题的预测控制[J]. 控制理论与应用, 2000, 17(5): 665-670.

[4] 从岩峰. 基于滚动优化原理的路径规划方法研究[D]. 吉林: 吉林大学硕士学位论文, 2007.

[5] 李立, 刘林. 一种多移动机器人局部避碰算法[J]. 兵工自动化, 2002, 28(6): 62-65.

[6] 张纯刚, 席裕庚. 动态未知环境中移动机器人的滚动路径规划[J]. 机器人, 2002, 24(1): 71-75.