

## 非确定性环境中移动机器人实时避障的概率模型检测

王 铭<sup>1</sup>, 王 瑞<sup>1</sup>, 李晓娟<sup>1</sup>, 关 永<sup>1</sup>, 张 杰<sup>2</sup>, 魏洪兴<sup>3</sup><sup>1</sup> (高可靠嵌入式系统技术北京市工程研究中心 电子系统可靠性技术北京市重点实验室, 首都师范大学信息工程学院, 北京 100048)<sup>2</sup> (北京化工大学 信息科学与技术学院, 北京 100029)<sup>3</sup> (北京航空航天大学 机械工程及自动化学院, 北京 100191)

E-mail: rwwang04@gmail.com

**摘 要:** 移动机器人的避障问题是机器人学的重要问题, 实时避障是移动机器人安全导航的关键. 针对移动机器人存在的制动误差和传感器噪声等不确定因素, 采用概率模型检测的方法对实时避障控制策略进行验证和定量分析. 首先, 将目标机器人的避障运动及动态障碍物的非确定运动建模为马尔科夫决策过程, 其中避障策略包括等待避障、减速避障和加速避障. 然后, 运用概率计算树逻辑语言描述目标机器人运动的关键属性并使用概率模型检测工具进行验证. 最后, 分析得到目标机器人与动态障碍物发生碰撞的最大概率值; 目标机器人采取减速(加速)避障时, 减速(加速)行驶的最佳时间; 目标机器人的控制误差对避障运动的影响等. 实验结果表明某些参数影响目标机器人的避障效果, 并为参数值的选择提供参考依据.

**关键词:** 移动机器人; 控制误差; 实时避障; 概率模型检测; 马尔科夫决策过程

中图分类号: TP391

文献标识码: A

文章编号: 1000-1220(2014)09-2104-06

## Probabilistic Model Checking for Real-time Obstacle Avoidance of Mobile Robot in a Non-deterministic Environment

WANG Ming<sup>1</sup>, WANG Rui<sup>1</sup>, LI Xiao-juan<sup>1</sup>, GUAN Yong<sup>1</sup>, ZHANG Jie<sup>2</sup>, WEI Hong-xing<sup>3</sup><sup>1</sup> (Beijing Key Laboratory of Electronic System Reliability Technology, Capital Normal University, Beijing 100048, China)<sup>2</sup> (College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)<sup>3</sup> (School of Mechanical Engineering and Automation, Beijing University of Aeronautics & Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Mobile robot obstacle avoidance is an important problem in robots and the real-time obstacle avoidance is the key for robots to navigate reliably. For the actuator errors, sensor noise and other uncertainties of the mobile robot, this paper adopts the method of probabilistic model checking to verify and quantify its real-time obstacle avoidance strategies. First, the target robot obstacle avoidance motion and some dynamic obstacles uncertain movements in the experimental environment are modeled as a Markov decision process, where the obstacle avoidance strategies include waiting avoidance, deceleration avoidance and acceleration avoidance. Then, use the language of probabilistic computation tree logic to describe motion properties and use the probabilistic model checking tool to verify them. Finally, analyze and obtain the maximum probability of occurring collision between the target robot and obstacles, the best time to decelerate (accelerate) when the target robot uses the deceleration (acceleration) method to avoid obstacles, some influences on obstacle avoidance by control errors and so on. Experimental results show that some parameters of the target robot affect the obstacle avoidance effects and provide reference value to choose the values of these parameters.

**Key words:** mobile robot; control errors; real-time obstacle avoidance; probabilistic model checking; Markov decision process

## 1 引 言

实时避障是移动机器人运动的核心技术之一. 随着移动机器人应用范围的不断扩展, 其所处的工作环境变得更加复杂. 实际应用中通常有一些静态障碍物甚至动态障碍物存在于移动机器人的工作环境. 空间资源存在的竞争关系导致它们易发生碰撞和冲突; 动态障碍物运动的不确定性导致移动机器人实时避障的难度系数增大; 制动误差、传感器噪声及

控制信号延迟等因素造成移动机器人的操作控制效果与理想值存在一定偏差. 这些问题导致我们难以保证移动机器人的可靠性和安全性, 因此验证移动机器人的实时避障策略具有重要意义.

目前, 国内外大多采用传统的验证方法比如测试、模拟和仿真对移动机器人的避障方法进行验证. 文献[1]针对未知环境中的移动机器人, 运用概率分布预测动态障碍物的位置并采取等待避障方法实现避障, 但文中未考虑速度方向角的

收稿日期: 2014-02-19 收修改稿日期: 2014-06-09 基金项目: 国家自然科学基金项目(61373034, 61303014)资助; 国际科技合作计划项目(2011DFG13000)资助; 北京市自然科学基金项目(4122017)资助; 北京市教委科研基地建设项目(TJSHG201310028014)资助. 作者简介: 王 铭, 女, 1989年生, 硕士研究生, 研究方向为形式化验证; 王 瑞(通信作者), 女, 1981年生, 博士, 讲师, 研究方向为形式化建模和验证、高可靠嵌入式系统; 李晓娟, 女, 1968年生, 博士, 教授, 研究方向为形式化验证、计算机网络; 关 永, 男, 1966年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为形式化验证、高可靠嵌入式系统; 张 杰, 女, 1967年生, 硕士, 副教授, 研究方向为形式化验证; 魏洪兴, 男, 1974年生, 博士, 副教授, 研究方向为形式化验证、高可靠嵌入式系统.

变化. 文献[2]在文献[1]的基础上进一步考虑速度角度的不确定性, 利用机器人与动态障碍物的相对速度避障, 仿真实现机器人能够成功避障并沿着已规划好的曲线运动. 文献[3]针对传感器噪声及网络信号延迟等因素造成的感知控制回路中的不确定性, 将人与机器人的相对位置关系建模为部分可观的马尔可夫状态并协调机器人的反应式运动和速度控制实现提前避障. 但是传统的验证方法很难覆盖移动机器人复杂运动中所有可能的执行选择.

形式化方法是验证复杂系统可靠性的重要手段. 模型检测<sup>[4]</sup>是一种自动验证有穷状态系统的形式化方法, 通过遍历系统模型的状态空间来检验系统模型是否满足给定的属性. 概率模型检测<sup>[5]</sup>结合概率分析和通用模型检测技术, 适用于验证随机非确定性系统. 概率模型检测技术将移动机器人的非确定性运动建模为有限的离散状态的概率模型.

文献[6]提出一种控制策略处理非确定的迁移系统, 控制策略中的一个控制动作能够触发多个状态迁移关系. 文献[7]将存在制动误差和传感器噪声的移动机器人的运动抽象建模为马尔科夫决策过程, 即将移动机器人的控制操作问题转化为马尔科夫决策过程的控制策略问题. 文献[8]将存在动态障碍物的工作环境进行模块划分并将智能车辆在模块间的运动建模为马尔科夫决策过程, 寻找移动机器人最大概率完成任务的控制策略. 但是这些文献并没有对移动机器人的实时避障策略进行验证和定量分析. 传统验证中机器人的运动描述语言只能描述比较简单的任务, 文献[9,10]使用时序逻辑如线性时序逻辑和计算树逻辑(Computation Tree Logic, CTL)<sup>[11]</sup>描述移动机器人运动规划的复杂任务.

针对移动机器人的制动误差、控制信号延迟及环境中存在动态障碍物等非确定因素, 本文采用概率模型检测方法验证非确定性环境中目标机器人的实时避障策略. 由于受到制动误差等因素的影响, 目标机器人可能无法正确执行操作控制, 本文将能否正确执行操作控制进行概率决策; 针对受到动力学和自身运动约束的动态障碍物, 本文采用概率分布描述其运动的不确定性, 并采取三种合理的避障方法保证目标机器人的安全. 然后将目标机器人和动态障碍物的运动建模为马尔科夫决策过程, 运用概率计算树逻辑(Probabilistic Computation Tree Logic, PCTL)<sup>[5]</sup>描述移动机器人避障的关键属性. 最终在概率模型检验工具中进行验证, 分析得到目标机器人与动态障碍物发生碰撞的最大概率值; 减速或加速避障时, 目标机器人减速或加速运动的最佳时间; 目标机器人的控制误差对避障的影响等.

## 2 概率模型

### 2.1 马尔科夫决策过程

概率模型<sup>[12]</sup>用来形式化建模和分析存在随机或者概率行为的系统. 概率模型有很多类型, 包括离散的马尔科夫链(Discrete Time Markov Chains, DTMCs)、马尔科夫决策过程(Markov Decision Processes, MDPs)等. MDPs 是 DTMCs 的扩展, 针对系统中的具有概率且不确定的行为进行建模<sup>[13,14]</sup>.

定义 1. 马尔科夫决策过程是个六元组  $M = (S, S_0, Act, Steps, L, Cost)$ ,

- 1)  $S$  是个有限状态集.
- 2)  $S_0 \in S$  是初始状态.
- 3)  $Act$  是动作集合.
- 4)  $Steps: S \rightarrow 2^{Act \times Dist(S)}$  是迁移概率函数, 其中  $Dist(S)$  是对应于有限状态集  $S$  的离散的概率分布集合.

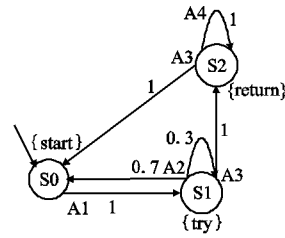


图 1 简单的 MDP

Fig. 1 A simple MDP 例子.

其中, 状态集合  $S = \{S_0, S_1, S_2\}$ ;  $S_0$  是起始状态; 动作集合  $Act(S_0) = \{A_1\}$ ,  $Act(S_1) = \{A_2, A_3\}$ ,  $Act(S_2) = \{A_3, A_4\}$ ; 标记函数  $L(S_0) = \{start\}$ ,  $L(S_1) = \{try\}$ ,  $L(S_2) = \{return\}$ ;

$$Steps = \begin{matrix} S_0; A_1 & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \\ S_1; A_2 & \begin{pmatrix} 0.7 & 0 & 0.3 \end{pmatrix} \\ S_1; A_3 & \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ S_2; A_3 & \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ S_2; A_4 & \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \end{matrix}$$

MDP 中的一个给定状态可以执行多个动作, 每个动作对应于一个迁移概率分布. MDP 中的代价标识  $Cost$  有助于系统的量化分析.

### 2.2 概率计算树逻辑

PCTL 是 CTL 的扩展, 用来描述概率模型的属性.

定义 2. (PCTL 语法) PCTL 被定义为如下:  $\pi$  是原子命题;  $P$  是概率操作符;  $R$  表示代价消耗;  $p \in [0, 1]$ ;  $c \in [0, \infty]$ ;  $\diamond \in \{>, \geq, <, \leq\}$ ;  $k \in \mathbb{N}$ .

状态公式:

$$\phi ::= True \mid \pi \mid \neg \phi \mid \phi \wedge \phi \mid p_{\diamond p}[\psi] \mid R_{\diamond c}[\phi]$$

路径公式:

$$\psi ::= X\phi \mid \phi U \phi \mid \phi U^{\leq k} \phi$$

状态公式  $\phi$  基于 MDP 的状态集合, 路径公式  $\psi$  则以路径为基础, 并且仅作为操作的参数. 符号  $X$  和  $U$  分别表示下一个和直到操作符.

定义 3. (PCTL 语义) 对于任意状态  $s \in S$ , 满足关系  $\models$  的定义如下:

$$\begin{aligned} s \models true & \text{ for all } s \in S \\ s \in \pi & \Leftrightarrow \pi \in L(s) \\ s \models (\phi_1 \wedge \phi_2) & \Leftrightarrow (s \models \phi_1) \wedge (s \models \phi_2) \\ s \models P_{\diamond p}[\psi] & \Leftrightarrow P_{\mu}^s \diamond p \\ s \models R_{\diamond c}[\phi] & \Leftrightarrow R_{\mu}^s \diamond c \end{aligned}$$

其中,  $P_{\mu}^s$  示在策略  $\mu$  下从状态  $s$  出发的所有路径中满足  $\psi$  的概率;  $R_{\mu}^s$  代表在策略  $\mu$  下从状态  $s$  出发到达某个满足  $\phi$  的状态的总的代价期望值.

## 3 运动描述

目标机器人的工作环境中不仅存在静态障碍物, 而且包

含动态障碍物. 目标机器人沿着最短路径从起始点出发到达任务点完成任务并继续运动至目的地; 动态障碍物则沿着各自的路径行驶. 目标机器人不能与动态障碍物交流, 但可以通过传感器感知位置和环境信息.

### 3.1 动态障碍物的运动模型

本文中动态障碍物的速度大小和方向角的范围分别表示为  $[V_{\min}, V_{\max}]$ ,  $[\theta_{\min}, \theta_{\max}]$ . 假定每个时间段  $\Delta T$  上速度的大小和方向是不变的; 不同时间段上速度的改变量是随机独立的. 我们可以预测出动态障碍物的运动位置, 经过  $i$  时刻后障碍物位置的的概率密度函数  $p(x; y; i)$  [2] 定义如下:

$$p(x; y; i) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\left(\frac{x-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{y-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right]\right\} \quad (1)$$

$$\sigma_1^2 = \sigma_2^2 = \sigma_0^2 + i\sigma_{step}^2 \quad (2)$$

$$\sigma_{step}^2 = (V_{\max} - V_{\min})^2 / 12 \quad (3)$$

$$\mu_1 = x_0 + [iv(t_0) + \frac{i(i+1)}{2}\mu_v] \cdot \Delta T \cos\theta(t_0) \quad (4)$$

$$\mu_2 = y_0 + [iv(t_0) + \frac{i(i+1)}{2}\mu_v] \cdot \Delta T \sin\theta(t_0) \quad (5)$$

其中  $(x_0, y_0)$ 、 $t_0$  和  $\sigma_0^2$  分别表示动态障碍物的初始位置、初始时间和方差;  $\mu_v$  表示速度改变量的均值, 利用长期采集的动态障碍物的位置数据得到其运动轨迹, 并结合上述表达式和实际障碍物的参数大小, 预测出某个时刻动态障碍物的运动位置. 这一点对于建立马尔科夫决策过程模型非常重要.

### 3.2 目标机器人的运动模型

本文基于路径规划可视图法 [15] 将机器人视为一点, 并连接起始点、任务点和目的地形成可视图, 同时保证这些线与静态障碍物不相交, 目标机器人沿着可通行路径运动至最终位置. 其中寻找最优路径问题就转换为寻找经过起始点、任务点到达目的地的最短路径问题. 我们可以得到静态环境下目标机器人到达最终位置的最短路径 (即目标机器人的运动轨迹), 但是对于存在动态障碍物的工作环境, 目标机器人可能会与动态障碍物发生碰撞. 通常情况下目标机器人是匀速运动, 遇到动态障碍物时会采取相应的避障措施.

假设目标机器人的路径和一个动态障碍物的路径相交于  $C$  点, 夹角为  $\theta$  (如图 2),  $C_0$  点与障碍物路径的距离是  $D_{safe}$ , 表示目标机器人相对于动态障碍物的安全距离.  $D_{in}$  表示当目标机器人到达

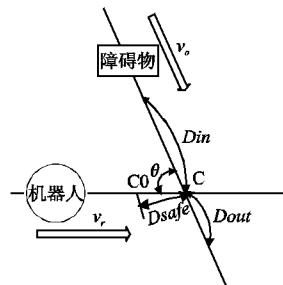


图 2  $D_{in}$ 、 $D_{out}$  和  $D_{safe}$  的定义

Fig. 2 Definitions of  $D_{in}$ ,  $D_{out}$  and  $D_{safe}$

$C_0$ , 障碍物驶向交叉点  $C$  且距离  $C$  的长度大于  $D_{in}$  时目标机器人可以安全向  $C$  点运动.  $D_{out}$  表示当目标机器人到达  $C_0$ , 障碍物远离交叉点  $C$  且距离  $C$  的长度大于  $D_{out}$  时目标机器人可以安全驶向  $C$ . 如果假设接近路径交叉点时, 目标机器人和障碍物的速度  $v_r$  和  $v_o$  是固定的, 则  $D_{in}$  和  $D_{out}$  的定义 [1]

如下:

$$D_{in} = \frac{D_{safe}}{\sin\theta} \left[ \sqrt{\frac{v_r^2 + v_o^2 - v_r v_o \cos\theta}{v_r^2}} + \frac{v_o}{v_r} \right] \quad (6)$$

$$D_{out} = \frac{D_{safe}}{\sin\theta} \left[ \sqrt{\frac{v_r^2 + v_o^2 - v_r v_o \cos\theta}{v_r^2}} - \frac{v_o}{v_r} \right] \quad (7)$$

本文以路径交叉点  $C$  为中心, 在动态障碍物的轨迹上分别向两侧延伸  $D_{out}$  的长度得到的区域作为碰撞区. 如果目标机器人到达路径交叉点  $C$  时, 动态障碍物处于碰撞区, 则表示目标机器人和动态障碍物发生碰撞. 目标机器人的避障策略如下:

1) 如果机器人在  $t_0$  时刻到达  $C_0$  点, 障碍物 (驶向  $C$ ) 与路径交叉点的距离大于  $D_{in}$  或者障碍物 (远离  $C$ ) 与路径交叉点的距离大于  $D_{out}$ , 则目标机器人继续沿着  $D_{safe}$  区域匀速行驶.

2) 如果机器人在  $t_0$  时刻到达  $C_0$  点, 障碍物 (驶向  $C$ ) 与路径交叉点的距离小于  $D_{in}$  或者障碍物 (远离  $C$ ) 与路径交叉点的距离小于  $D_{out}$ , 则目标机器人自由选择 1)、2) 或者 3) 三种避障方法进行避障.

1) 等待避障: 目标机器人等待直到障碍物 (远离  $C$ ) 与交叉点  $C$  的距离大于  $D_{out}$ .

2) 减速避障: 目标机器人在  $D_{safe}$  区域减速行驶, 直到动态障碍物经过路径交叉点且与  $C$  的距离等于  $D_{out}$ .

3) 加速避障: 目标机器人在  $D_{safe}$  区域加速行驶, 先于动态障碍物经过路径交叉点.

### 3.3 实验场景

假定目标机器人的起始点和任务点之间、任务点和目的地之间各有一个动态障碍物存在. 根据实时避障方法划分目标机器人和动态障碍物的运动轨迹, 得到运动拓扑图如图 3 所示.

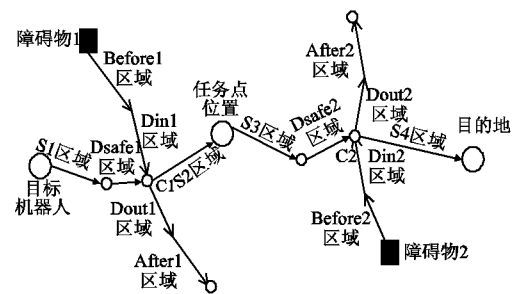


图 3 运动拓扑图

Fig. 3 Motion topology diagram

如图 3 所示, 我们将动态障碍物的运动轨迹划分为: 起始点、Before 区域、 $D_{in}$  区域、路径交叉点、 $D_{out}$  区域、After 区域和最终位置. 其中, Before 区域和 After 区域分别表示为  $D_{in}$  区域之前的运动区域和  $D_{out}$  区域之后的运动区域. 目标机器人的最短路径划分为起始点、 $S_1$  区域、 $D_{safe1}$  区域、交叉点  $C_1$ 、 $S_2$  区域、任务点位置、 $S_3$  区域、 $D_{safe2}$  区域、交叉点  $C_2$ 、 $S_4$  区域和目的地.

### 4 MDP 模型构建

本文将移动机器人和可通行路径分别抽象为点和线, 并



根据第三部分动态障碍物和目标机器人的运动描述构建相应的形式化模型。

#### 4.1 动态障碍物的形式化模型

动态障碍物的模型如图 4 所示。

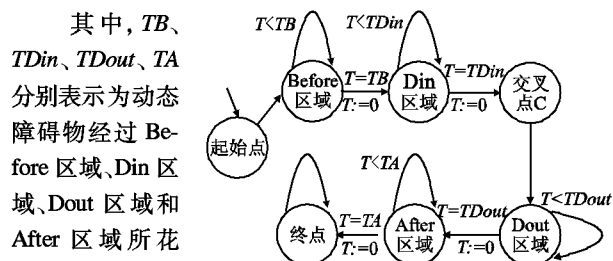


图 4 动态障碍物的形式化模型

其中,  $TB$ 、 $TDin$ 、 $TDout$ 、 $TA$  分别表示为动态障碍物经过 Before 区域、Din 区域、Dout 区域和 After 区域所花费的时间。动态障碍物从起始点出发到达 Before 区域, 经过  $TB$  时刻后, 进入 Din 区域; 在 Din 区域运动  $TDin$  时间后到达路径交叉点 C, 然后依次进入 Dout 区域和 After 区域, 最后到达终点位置。

为了建立精确的模型, 本文以动态障碍物单位时间运动的平均距离为最小单位对图 4 中的运动区域进行划分。根据第三部分的公式和已知参数, 求出某个时刻动态障碍物可能位置区域的概率。文中各个动态障碍物的运动模型是相似的, 不同的是动态障碍物运动的轨迹长度和用时大小。

#### 4.2 目标机器人的形式化模型

目标机器人预测动态障碍物的运动并采取有效地避障策略规划出合理的运动, 进而得到目标机器人起始点与任务点之间的形式化模型如图 5 和 6 所示。

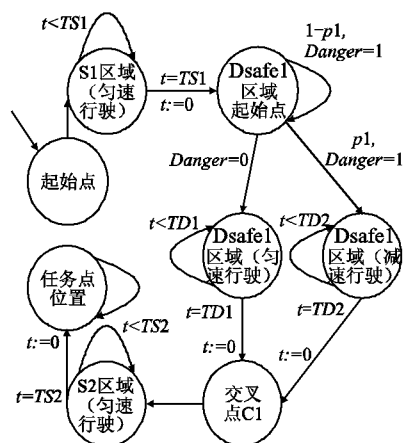


图 5 目标机器人等待避障的形式化模型

Fig. 5 Formal model of target robot for waiting avoidance

图 5 中  $Danger$  取值为 0 或者 1, 取值为 0 表示动态障碍物位于 Before1 和 After1 区域; 取值为 1 表示动态障碍物位于 Din1 或者 Dout1 区域。TS1, TS2 分别代表目标机器人匀速经过区域 S1 和 S2 花费的时间;  $TD1$ ,  $TD2$  分别代表目标机器人匀速运动和减速运动经过 Dsafe1 区域花费的时间。首先, 目标机器人从起始点出发匀速进入 S1 区域, 当机器人到达 Dsafe1 区域起始点时, 判断动态障碍物的位置。目标机器人采取的操作控制有两种。

1) "前进": 如果  $Danger$  取值为 0 即动态障碍物位于

Before1 和 After1 区域, 目标机器人继续匀速前进。

2) "等待": 如果  $Danger$  取值为 1 即动态障碍物位于 Din1 或者 Dout1 区域, 目标机器人等待动态障碍物经过 Dout1 区域后再运动。

针对目标机器人受到制动误差和传感器噪声等因素影响, 操作控制的执行效果具有不确定性这一问题, 本文将操作的执行结果进行概率决策。如果目标机器人位于 Dsafe1 区域的起始点时选择等待避障, "等待" 操作出错而执行减速的概率为  $p1$ , 成功执行的概率为  $1-p1$ 。目标机器人从交叉点 C1 匀速进入 S2 区域, 最终到达任务点位置。

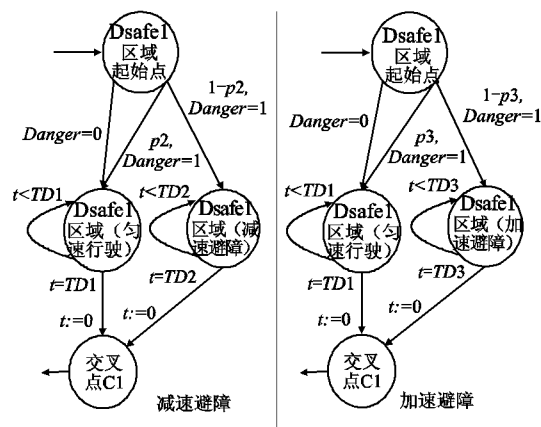


图 6 目标机器人减速和加速避障的形式化模型 (部分)

Fig. 6 Formal model of deceleration and acceleration avoidance (part)

目标机器人采用减速或者加速避障的运动模型同上述模型相似, 如图 6 所示。其中,  $TD3$  表示目标机器人加速经过 Dsafe1 区域花费的时间。目标机器人位于 Dsafe1 区域的起始点时如果选择减速避障, "减速" 操作出错而执行匀速的概率为  $p2$ , 成功执行的概率为  $1-p2$ ; 如果选择加速避障, "加速" 操作出错而执行匀速的概率为  $p3$ , 成功执行的概率为  $1-p3$ 。

目标机器人任务点位置到目标位置的模型同上述模型相似, 此处不再赘述。

#### 5 验证结果与概率分析

首先预测出实验中目标机器人到达 Dsafe1 区域起始点时动态障碍物可能位置区域的概率值并结合第四部分的形式化模型建立 MDP。然后通过概率模型检测工具 PRISM<sup>[16,17]</sup> 验证属性 "目标机器人与动态障碍物发生碰撞的最大概率值是多少"。最后给出目标机器人三种避障策略的概率分析。

属性的 PCTL 描述是  $Pmax = ? [F Error = 1]$ 。

其中  $Error$  取值为 0 或者 1, " $Error = 1$ " 表示目标机器人与动态障碍物发生碰撞。

等待避障: 目标机器人在 Dsafe1 区域起始点等待避障。

如果存在控制误差, "等待" 操作出错而以  $p1$  的概率执行减速运动。控制误差发生的概率大小对等待避障的影响如下页图 7 所示。

结果表明: "等待" 操作正确执行即  $p1 = 0$  时, 目标机器人和动态障碍物不发生碰撞, 说明该等待避障方法是有效的。

目标机器人执行减速的时间等于6时,虽然存在控制误差,但是碰撞发生的概率为0. 所以为保证目标机器人和动态障碍物不发生碰撞,我们可以调整机器人执行减速运动时加速度的大小,使其在 Dsafe1 区域的减速时间等于6.

减速避障:目标机器人在 Dsafe1 区域减速避障.

如果存在控制误差,"减速"操作出错而以  $p_2$  的概率执行匀速运动. 控制误差发生的概率大小对减速避障的影响如图8所示.

结果表明:"减速"操作正确执行即  $p_2 = 0$  时,目标机器

人在 Dsafe1 区域减速行驶的时间等于6时不发生碰撞(不存在控制误差的情况下,减速避障是有效的). 机器人在 Dsafe1 区域减速行驶的时间总数等于3时,发生碰撞的概率值变化不大,比较集中. 减速时间取其他值时,随着出错概率增大,碰撞发生的概率也依次变大,最大值为0.29.

加速避障:目标机器人在 Dsafe1 区域加速避障.

如果存在控制误差,"加速"操作出错而以  $p_3$  的概率执行匀速运动. 当机器人在 Dsafe1 区域加速行驶的时间等于1时,控制误差发生的概率大小对加速避障的影响如图9所示.

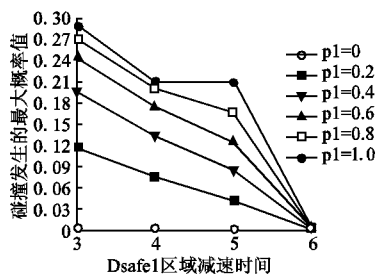


图7 控制误差对等待避障的影响

Fig. 7 Influence on waiting avoidance of control errors

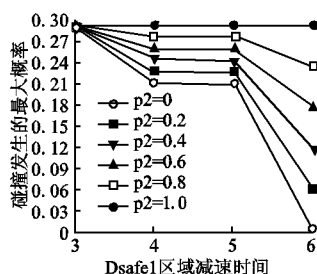


图8 控制误差对减速避障的影响

Fig. 8 Influence on deceleration avoidance of control errors

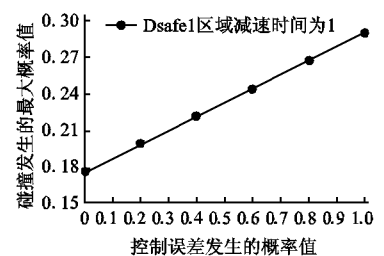


图9 控制误差对加速避障的影响

Fig. 9 Influence on acceleration avoidance of control errors

结果表明:虽然"加速"操作正确执行即  $p_3 = 0$  时,目标机器人与动态障碍物也可能发生碰撞,概率值为0.176(加速避障时,加速行驶的时间等于1是不合理的). 随着误差发生的可能性变大,目标机器人与动态障碍物发生碰撞的概率越大,最大值为0.29.

本文通过概率模型检测方法可以判断出某个给定环境中目标机器人采取哪种避障方法更为合理. 对比图7、图8、图9得出该实验中目标机器人采取等待避障更合理. 只要调整目标机器人在 Dsafe1 区域的减速时间等于6,即使存在控制误差,也可以保证目标机器人与动态障碍物不发生碰撞. 相比较而言,减速避障和加速避障无法达到这样的目的.

目标机器人从任务点位置到目的地的运动模型可以按照上述方法进行验证,此处不再说明.

## 6 总 结

本文采用概率模型检测的方法对非确定性环境中目标机器人的避障策略进行形式化建模和验证. 由于动态障碍物的运动具有非确定性而且制动误差和传感器噪声等因素影响目标机器人的操作执行效果,本文将目标机器人的实时避障运动建模为 MDP 模型. 然后验证移动机器人的重要属性. 最终给出概率分析结果指导目标机器人的运动规划.

未来的工作可以设置目标机器人和动态障碍物的形状或者改变动态障碍物的运动使其更具随机性等,完成更加复杂的移动机器人的运动分析.

## References:

[1] Miura J, Shirai Y. Modeling motion uncertainty of moving obstacles for robot motion planning [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2000: 2258-2263.

[2] Shi Hong-yan, Sun Chang-zhi. Motion planning for mobile robot under unstructured environment [J]. Robot, 2004, 26(1): 27-31.

[3] Qian Kun, Ma Xu-dong, Dai Xian-zhong, et al. POMDP navigation of service robots with human motion prediction [J]. Robot, 2010, 32(1): 18-24.

[4] Wang Zhen-zhen. Survey of model checking [J]. Computer Science, 2013, 40(6A): 1-14.

[5] PRISM-probabilistic symbolic model checker [EB/OL]. <http://www.prismmodelchecker.org/>, 2011.

[6] Kloetzer M, Belta C. Dealing with nondeterminism in symbolic control [M]. Hybrid Systems: Computation and Control, Springer Berlin Heidelberg, 2008: 287-300.

[7] Lahijanian M, Wasniewski J, Andersson S B, et al. Motion planning and control from temporal logic specification with probabilistic satisfaction guarantees [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2010: 3227-3232.

[8] Cizelj I, Ding X C, Lahijanian M, et al. Probabilistically safe vehicle control in a hostile environment [J]. arXiv Preprint arXiv: 1103.4065, 2011.

[9] Gazit H K, Fainekos G, Pappas G J. Where's waldo? sensor-based temporal logic motion planning [C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics & Automation, 2007: 3116-3121.

[10] Kloetzer M, Belta C. A fully automated framework for control of linear systems from temporal logic specifications [J]. Automatic Control, IEEE Transactions on, 2008, 53(1): 287-297.

[11] Su Kai-le, Luo Xiang-yu, Lu Guan-feng. Symbolic model checking for CTL [J]. Chinese Journal of Computers, 2005, 28(11): 1798-1806.

[12] Baier C, Katoen J P, Larsen K M. Principles of model checking [M]. MIT Press, 2008.

- [13] David Anthony Parker. Implementation of symbolic model checking for probabilistic systems [D]. University of Birmingham, 2002.
- [14] Li Yue-xing, Li Xiao-juan, Guan Yong, et al. Formal modeling and probabilistic analysis of spaceWire protocol [J]. Journal of Chinese Computer Systems, 2013, 34(9): 25-29.
- [15] Xu Si-jun, Cao Qi-ying. A visibility graph based path planning algorithm [J]. Computer Applications and Software, 2011, 3(1): 220-236.
- [16] Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. Probabilistic symbolic model checking with PRISM: a hybrid approach [J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer, 2004, 6(2): 128-142.
- [17] Kwiatkowska M, Norman G, Parker D. PRISM 4.0: verification of probabilistic real-time systems [C]. Proceedings of 23rd International Conference on Computer Aided Verification (CAV'11),

2011: 585-591.

#### 附中文参考文献:

- [2] 石鸿雁, 孙昌志. 非结构环境下移动机器人的运动规划[J]. 机器人, 2004, 26(1): 27-31.
- [3] 钱 莹, 马旭东, 戴先中, 等. 预测行人运动的服务机器人 POMDP 导航[J]. 机器人, 2010, 32(1): 18-24.
- [4] 王蒙蒙. 模型检验综述[J]. 计算机科学, 2013, 40(6A): 1-14.
- [11] 苏开乐, 骆翔宇, 吕关锋. 符号化模型检测 CTL [J]. 计算机学报, 2005, 28(11): 1798-1806.
- [14] 李月星, 李晓娟, 关 永, 等. SpaceWire 协议的形式化建模与概率分析[J]. 小型微型计算机系统, 2013, 34(9): 25-29.
- [15] 许斯军, 曹奇英. 基于可视图的移动机器人路径规划[J]. 计算机应用与软件, 2011, 3(1): 220-236.

### 征 稿 简 则

一、**征稿范围:**《小型微型计算机系统》杂志刊登文章的内容涵盖计算技术的各个领域(计算数学除外)。包括计算机科学理论、体系结构、计算机软件、数据库、网络与通讯、人工智能、信息安全、多媒体、计算机图形与图像、算法理论研究等各方面的学术论文。

二、**来稿要求:**本刊主要刊登下述各类原始文稿:

1. 学术论文: 科研成果的有创新、有见解的完整论述。对该领域的研究与发展有促进意义, 论文字数最好在 10000 字左右。
2. 综述: 对新兴的或活跃的学术领域或技术开发的现状及发展趋势的全面、客观的综合评述。
3. 技术报告: 在国内具有影响的重大科研项目的完整的技术总结。

#### 三、注意事项

1. 来稿务求做到论点明确、条理清晰、数据可靠、叙述简练, 词义通达。
2. 来稿必须是作者自己的科研成果, 无署名和版权争议。引用他人成果必须注明出处。
3. 本刊采用在线投稿方式, 可登陆 <http://xwxt.sict.ac.cn/zxtg/zxtgyhlogin.asp?lx=1> 进行在线投稿, 也可直接邮寄打印稿一式两份。
4. 格式要求: 题目(中、英文)、摘要(中、英文)、作者的真实姓名(中、英文)、作者的单位、城市(中、英文)、邮政编码、E-mail(便于联系的)、关键词(中、英文 4~7 个), 中图分类号、作者简介、基金项目。

(1) 英文部分的作者姓名使用汉语拼音, 单位英文名称须给出英文全称, 不要使用缩略语;

(2) 作者简介包含作者姓名、性别、出生年、最高学历、技术职称、研究方向(若作者中有中国计算机学会(CCF)会员, 请注明, 并给出会员号)。凡第一作者为 CCF 会员/高级会员/学生会会员, 将享受八五折的版面费优惠;

(3) 基金项目的类别与项目编号。

5. 中、英摘要: 文章摘要具有独立性和自明性, 含正文等量的主要信息, 一般为 250~300 字, 采用第三人称表述。

6. 参考文献: 未公开发表的文献不得列入。文后所列参考文献统一排序, 且必须在正文中引用。中文参考文献应给出对应的英文译文。其具体书写格式为:

(1) 图书: [编号] 作者姓名(姓在前, 名在后), 书名, 出版社地址, 出版社, 出版年。

(2) 期刊: [编号] 作者姓名、文章题目、刊物名称, 出版年, 卷号(期号): 起止页码。

(3) 会议论文: [编号] 作者姓名. 论文题目. 见: 编者、论文集全名、出版地: 出版者, 出版年, 起止页码。

(4) 网络文献: 请给出文献作者或单位名, 文章题目、网址、发布日期。

7. 插图和表: 插图必须精绘并用计算机激光打印, 一般不超过 7 幅。图应结构紧凑, 不加底纹, 不要做成彩色的, 图宽最好不超过 8 厘米, 图内字号统一使用 6 号宋体, 字迹、曲线清晰, 必要时给出坐标名称和单位。每个图、表均给出中英文图注(如: “图 1: \* \* \* 图”; “Fig. 1: \* \* \*”)和表注(如: “表 1: \* \* \* 表”, “Table 1: \* \* \*”)。

8. 计量单位: 稿件中一律使用《中华人民共和国法定计量单位》。外文和公式中应分清大、小写和正、斜体, 上、下角的字母、数码位置准确。易混淆的字母或符号, 请在第一次出现时标清清楚。

9. 本刊在收到作者稿件经初审后立即给作者电子邮箱发“稿件收到通知”。除作者另有明确要求外, 本刊原则上只与第一作者联系, 作者投稿后若 4 个月无消息, 可自行改投它刊。通过初审的稿件将收到本刊给予的编号, 并需邮寄审稿费。

10. 本刊对不拟录用的稿件只发给“退稿通知”, 恕不退回原稿, 请自留底稿。

11. 稿件一经发表, 将酌致稿酬, 并寄送样刊。

本刊文章现被国内外多家数据库收录, 作者著作权使用费与本刊稿酬一并给付, 作者若不同意将文章收录, 请在投稿时说明。

编辑部地址: 沈阳市东陵区南屏东路 16 号《小型微型计算机系统》编辑部 邮政编码: 110168

电 话: (024)24696120 E-mail: xwjxt@sict.ac.cn 网 址: <http://xwxt.sict.ac.cn>