

## 基于多行为的移动机器人路径规划

魏立新<sup>1</sup>, 吴绍坤<sup>1†</sup>, 孙浩<sup>1</sup>, 郑剑<sup>2</sup>

(1. 燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北秦皇岛 066004; 2. 天津电气科学研究院, 天津 300000)

**摘要:** 机器人由当前点向目标点运动的过程中, 所处环境经常为动态变化且未知的, 这使得传统的路径规划算法对于移动机器人避障过程很难建立精确的数学模型. 为此, 针对环境信息完全未知的情况, 为移动机器人设计一种基于模糊控制思想的多行为局部路径规划方法. 该方法通过对各种行为之间进行适时合理的切换, 以保证机器人安全迅速地躲避静态和动态障碍物, 并利用改进的人工势场法实现对变速目标点的追踪. 对于模糊避障中常见的 U 型陷阱问题, 提出一种边界追踪的陷阱逃脱策略, 使得机器人成功解除死锁状态. 另外, 设计一个速度模糊控制器, 实现了机器人的智能行驶. 最后, 基于 Matlab 平台的仿真结果验证了所提出算法的有效性和实时性, 与 A\* 势场法的对比结果更突出了该算法的可行性.

**关键词:** 路径规划; 移动机器人; 模糊控制; 人工势场; 多行为; 动态未知环境

**中图分类号:** TP242

**文献标志码:** A

## Mobile robot path planning based on multi-behaviours

WEI Li-xin<sup>1</sup>, WU Shao-kun<sup>1†</sup>, SUN Hao<sup>1</sup>, ZHENG Jian<sup>2</sup>

(1. Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 2. Tianjin Research Institute of Electric Science, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** When the robot moves from the current point to the target point, the environment is often dynamic and unknown, which makes it difficult for the traditional path planning algorithm to establish an accurate mathematical model for the mobile robot obstacle avoidance process. Aiming at the situation that the environment information is completely unknown, a multi-behaviour local path planning method based on fuzzy control is designed for the mobile robot. The method ensures that the robot avoids static and dynamic obstacles safely and promptly by switching various behaviours timely and reasonably. The improved artificial potential field method is used to track the variable speed target point. To deal with the common obstacle avoidance U-trap problem, a trap escaping strategy of the boundary tracking is proposed, which makes the robot successfully lift the deadlock state. In addition, a speed fuzzy controller is designed to realize the robot's intelligent driving. Finally, the simulation results based on the Matlab platform verify the effectiveness and real-time performance of the proposed algorithm. Compared with the A\* potential field method, the proposed algorithm is more feasible.

**Keywords:** path planning; mobile robot; fuzzy control; artificial potential field; multi-behaviour; dynamic unknown environment

## 0 引言

移动机器人因其应用广泛的特点越来越受到国际和国内的重视. 路径规划是移动机器人领域中一个研究热点, 其目的是找到一条从起始位置到目标位置最优或接近最优的安全无碰撞路径<sup>[1]</sup>. 同时, 我国正在实施的中国制造 2025 战略, 也大力提倡发展机器人技术, 积极研发新产品, 促进机器人标准化、模块化发展.

根据机器人所处的环境, 可以将移动机器人路径规划方法分为以下两种类型<sup>[2]</sup>: 1) 环境信息完全已知的全局路径规划; 2) 环境信息部分已知或者环境信息完全未知的局部路径规划. 目前, 对于静态障碍物的全局路径规划有了很好的解决方法<sup>[3-4]</sup>, 但对于具有移动障碍物和运动目标点的局部路径规划仍然是机器人路径规划研究的重点<sup>[5]</sup>. 常用的局部路径规划方法主要有人工势场法、快速扩展树算法<sup>[6]</sup>等. 其中

收稿日期: 2018-03-10; 修回日期: 2018-06-11.

基金项目: 河北省自然科学基金项目 (F2016203249); 河北省青年基金项目 (E2018203162).

责任编委: 夏元清.

<sup>†</sup>通讯作者. E-mail: 1096224481@qq.com.

人工势场法容易陷入局部极小点,且在动态环境中引力场和斥力场在设计时存在人为不确定因素<sup>[7-8]</sup>,但是人工势场法便于底层实时控制、易于实现,可应用于追踪动态目标点<sup>[9-10]</sup>.文献[11]采用RRT算法进行路径规划,虽然允许障碍物非凸,可满足各种非完整性约束,但最大不足是不能得到路径最优解且所需计算时间较长.

近些年的研究发现,要建立起移动机器人避障过程精确的数学模型非常困难,因此更多的目光投向了模糊逻辑控制算法<sup>[12]</sup>.但是,模糊逻辑控制算法也有不足的地方,例如面对典型的U型陷阱容易陷入死锁状态,对于动态障碍物缺乏智能的避障策略.文献[13]虽然建立了一个死锁预防机制,但是死锁预防机制的判断准则还有待全面深入的分析,并且机器人每次都移动固定步长在转弯时不符合实际应用.文献[14]使用模糊滑模控制的方法得到了比较理想的控制结果,但是该方法需要预先确定运动路径,不能满足实时性的要求.文献[15]只验证了在静态障碍物和固定目标点环境中方法的有效性,缺乏对躲避动态障碍物和追踪动态目标点的分析.

针对上述所涉及的问题,本文提出一种基于多行为的移动机器人局部路径规划方法.该方法以具有高实时性的人工势场法与具有强鲁棒性的模糊控制算法为基础,针对机器人不同时刻所面临的不同状态,设计相对应的行为方式,指导机器人的下一步运动.

1) 首先,针对移动机器人在具有动态目标点的环境,提出一种改进的人工势场法.利用改进的人工势场法目标趋向性的特点搜寻和追踪动态目标点,并使得机器人以一个较为理想的姿态靠近障碍物,先进行预防性避障,为接下来的模糊避障行为奠定基础.

2) 其次,针对常见的U型陷阱死锁问题,提出一种边界追踪法的陷阱逃脱策略,使得机器人迅速走出死循环.

3) 再次,针对在动态障碍物环境中传统模糊控制算法容易出现的局部极小值问题,引入动态避障策略,使得机器人能够跳出局部极小值,安全、高效地躲避动态障碍物.

4) 最后,针对机器人在运动过程中速度单一的问题,设计一个速度模糊控制器,使机器人在转弯时降低行驶速度,且速度大小随转弯角度的变化而调整,实现了机器人的智能行驶.

通过上述各行为间的合理切换与协调配合,实现了机器人由感知到动作的过程,并仿真验证了该方法的有效性和可行性.

### 1 问题描述

移动机器人所处的环境会因动态障碍物或者目标点等因素的变换而变化,路径规划的目的就是在该环境中找到一条从起始点到目标点的安全无碰撞运动轨迹.

机器人具有左右两个独立的驱动轮和一个支撑轮.借助左侧、右侧、前方3组超声波传感器探测障碍物的方向和距离(传感器的探测角度为0~180 deg、探测距离为1 m).另外,机器人还装有一个方位传感器,用来感应目标点与当前机器人运行方向的夹角.移动机器人所处的环境由任意形状的静态和动态障碍物构成.障碍物的位置和速度大小及方向对于机器人是未知的,因此机器人必须通过探测器和距离传感器获取以上必要信息,通过规划器计算下一个路径节点.

### 2 多行为路径规划方法

为了将不同算法的优点结合到一起,并保证控制器的实时性,本文在未知动态环境中采用了基于多行为的体系结构.该结构定义包括模糊避障行为和势场追踪行为在内的多种行为,这样的体系结构直接面

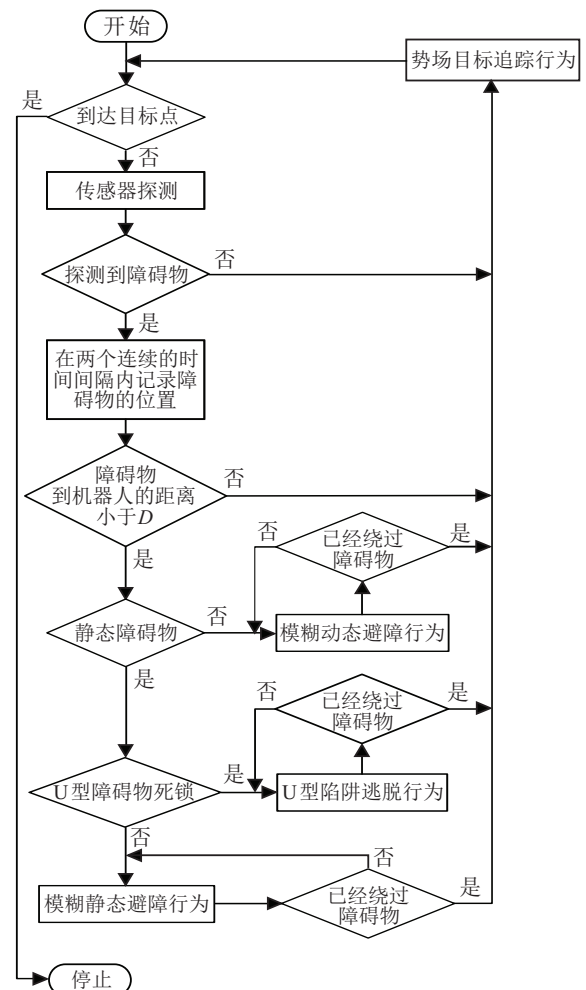


图1 算法流程

向底层控制,通过增加或减少行为可以方便地对体系结构进行调整和改进<sup>[6]</sup>. 本文综合考虑机器人所处环境的各种情况,实时地对其所处状态进行判断,同一时刻只有一种行为被激活,图1为本文算法流程.

### 2.1 基于势场法的目标追踪行为

行为功能:当机器人与所探测到障碍物的距离大于安全距离  $D$  时,机器人利用改进的人工势场法向目标点运动.

为了达到对动态目标点追踪的目的,对传统的人工势场法中的引力势场函数进行改进<sup>[17]</sup>,将速度、加速度信息引入传统引力势场函数,即

$$U_{att}(q, v, a) = \xi_q \|q - q_g\|^2 + \xi_v \|v - v_g\|^2 + \xi_a \|a - a_g\|^2. \quad (1)$$

其中:  $\xi_q, \xi_v, \xi_a$  是常量系数,  $\|q - q_g\|, \|v - v_g\|, \|a - a_g\|$  分别为目标相对于机器人的相对位移、相对速度和相对加速度的大小. 由式(1)可以得到目标对机器人的引力函数

$$F_{att}(q, v, a) = -\Delta U_{att}(q, v, a) = -\Delta_q U_{att}(q, v, a) - \Delta_v U_{att}(q, v, a) - \Delta_a U_{att}(q, v, a). \quad (2)$$

将上述各分量代入,整理可得

$$F_{att}(q, v, a) = 2\xi_q \|q - q_g\| e_{qrg} + 2\xi_v \|v - v_g\| e_{vrg} + 2\xi_a \|a - a_g\| e_{arg}. \quad (3)$$

其中:  $e_{qrg}$  是由机器人指向目标位置的单位向量,  $e_{vrg}$  和  $e_{arg}$  分别是目标点与机器人的相对速度方向和加速度方向. 根据式(3),即可实现目标追踪行为.

### 2.2 基于模糊控制的静态避障行为

行为功能:当机器人与所探测到障碍物的距离小于等于距离  $D$  且为静态障碍物时,机器人切换为模糊静态避障行为,并接近目标.

本文所运用的通用模糊控制依据传统方式进行设计,控制器的输入量为机器人的左侧、前方、右侧传感器组探测到的与障碍物之间的距离  $d_l, d_c, d_r$ , 机器人当前运动方向与目标方向的夹角  $tr$ . 控制器的输出量为机器人运动方向角度变化  $control\_angle(Con\_a)$ . 将距离输入量模糊语言变量定为  $\{N, F\}$ , 论域为  $0 \sim 1$  m; 将输入量当前运动方向与目标方向的夹角定为  $\{LB, LS, Z, RS, RB\}$ , 论域为  $-180 \sim 180$  deg; 将输出量运动方向角度变化定为模糊语言变量  $\{TLB, TLS, TZ, TRS, TRB\}$ , 论域为  $-60 \sim 60$  deg, 以上各变量隶属度函数均为三角形. 本文模拟驾驶员开车的思想,设计模糊控制规则库,该规则库共计 40 条控制规则,限于篇幅,列举其中 5 条规则

如表 1 所示,采用较为成熟的 Mamdani 模糊推理方法,运用重心法进行解模糊.

表 1 模糊控制规则库(部分)

序号	输入变量				输出变量
	$d_l/m$	$d_c/m$	$d_r/m$	$tr/deg$	$Con\_a/deg$
1	F	F	N	LB	TLB
2	F	F	N	LS	TLS
3	F	F	N	Z	TZ
4	F	F	N	RS	TZ
5	F	F	N	RB	TZ

由于传统的模糊控制算法易在路径规划中存在陷阱死锁和动态障碍物环境中陷入局部极值的缺点,本文算法在上述通用模糊控制器的基础上,引入了边界追踪的陷阱逃脱策略以及动态避障策略,加强了算法的完备性. 同时,受人的驾驶思想的启发,以模糊控制算法为基础,设计了一个速度模糊控制器,使机器人在转弯时能够实现减速行驶,避免发生侧移.

### 2.3 U型陷阱逃脱行为

对于模糊控制器而言, U 型陷阱是必须解决的关键问题. 如图 2 所示,图中 A、B 两点为目标点与机器人陷入死锁状态时路径的切点. 基于通用模糊控制器,假设当机器人在可能碰到陷阱时首先考虑向左转向,即由 a 点驶向 b 点,试图从障碍物的左侧绕过,但是机器人的目标趋向性的原因致使其陷入死锁状态,即沿 a-b-c-d-e-b 的顺序循环,无法逃离障碍物.

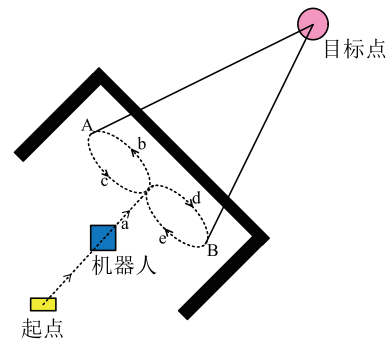


图 2 U型陷阱问题

判定陷入死锁状态的方法:图2中 A、B 两点为关键点,还是以机器人偏向左侧绕过障碍物为例,当机器人由 b 点向 c 点运动过程中经过 A 点,则目标方位角会发生从  $\pi$  到  $-\pi$  的变化,而机器人由 d 点到 e 点运动过程中,目标方位角会由  $-\pi$  变为  $\pi$ . 若机器人的目标方位角发生以上两次变化后,机器人继续靠近目标点的过程中,再次有远离目标点的趋势,则判定机器人已经陷入死锁状态.

行为功能:当机器人在躲避静态障碍物并判断已陷入死锁状态时,控制器切换为陷阱逃脱模式,解除死循环,逃脱障碍物.

陷阱逃脱策略如下:当机器人切换为陷阱逃脱

模式后: 1)使用探测器检测机器人前方 $d$ 范围内是否存在障碍物,若存在,则机器人向左偏转某一角度,并继续检测,直到前方 $d$ 范围内检测不到障碍物. 2)判断机器人右侧在探测器范围内是否存在障碍物,若存在,则机器人直行;若不存在,则机器人向右转动一定角度. 重复以上步骤,当机器人的目标方位角再次发生 $-\pi$ 到 $\pi$ 的变化时,则中断陷阱逃脱行为.

### 2.4 基于模糊控制的动态避障行为

行为功能:当机器人与所探测到障碍物的距离小于等于距离 $D$ 且为动态障碍物时,机器人切换为模糊动态避障模式,绕过障碍物,接近目标点.

当机器人遇到动态障碍物,且障碍物和机器人有相同的速度和方向时,通用控制器将使机器人沿该方向一直前进,无法避开此障碍物到达目标点,如图3所示.

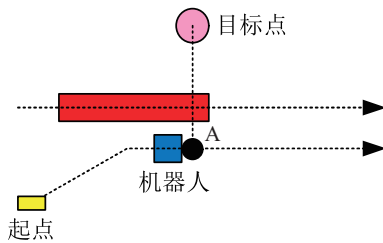


图3 动态障碍物问题

在通用控制器中加入动态避障策略(图3中A点为局部极值点):机器人通过两个连续的时间间隔内记录的障碍物位置,计算障碍物的速度和方向,判断机器人运动方向和障碍物的运动方向之间的夹角,当机器人到达局部极值点且夹角为锐角时仍未成功躲避动态障碍物,则机器人从远离障碍物的一侧转为反方向运动,躲避动态障碍物.

### 2.5 速度模糊控制器

机器人的速度可以用步长来表示,即机器人单个处理周期内移动的长度.机器人的步长在机器人路径规划中扮演着重要角色,步长过小,机器人信息处理系统没有足够时间来处理相邻两次采样信息,步长过大,就会出现机器人“刹车”不及而碰到障碍物的

表2 速度控制器模糊规则表

序号	输入变量		输出变量
	速度方向偏差/deg	当前运动速度/(m/s)	下一步运动速度/(m/s)
1	Z	Slow	Fast
2	Z	Medium	Fast
3	Z	Fast	Fast
4	S	Slow	Fast
5	S	Medium	Fast
6	S	Fast	Medium
7	B	Slow	Medium
8	B	Medium	Slow
9	B	Fast	Slow

情况.同时,在转弯处应该让机器人步长减小以避免惯性过大而使机器人发生侧移.为解决上述问题,本文设计了一个专用的速度模糊控制器.该控制器以速度方向偏差和当前运动速度为输入变量,以下一步将要运行的速度为输出变量,表2为模糊控制规则表.

## 3 仿真实验及结果分析

为验证本文方法的有效性和可行性,在Matlab 2014a平台上进行了仿真实验.机器人简化为一点,仿真参数如下:机器人每步最大移动距离length为0.12m,机器人与障碍物的安全距离 $D$ 为0.6m,机器人的决策周期为0.1s.

### 3.1 突现障碍物仿真研究

机器人在运动过程中前方可能遇到突然出现障碍物的情况,设定机器人的起始点为 $S = (0.5, 0)$ ,目标点为 $G = (9.8, 8.5)$ ,机器人在成功躲避障碍物群后,向目标点运动的过程中,在距离机器人很近的范围内突然出现一个条形障碍物.将本文算法与文献[18]的A\*势场法进行比较,共进行了20次仿真实验,结果如图4和表3所示.

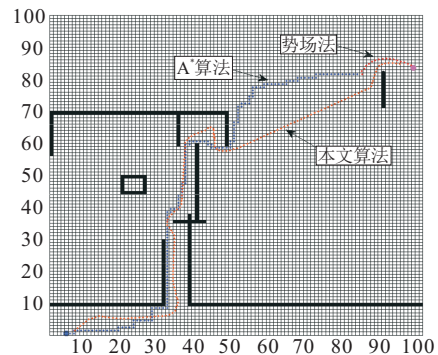


图4 算法对比结果

表3 对比算法仿真结果

20次仿真实验	平均规划时间/s	平均路径长度/m
A*势场法	59.27	19.10
本文算法	28.83	16.87

图4中是本文算法与文献[18]遇到突现障碍物后采取的势场法避障策略进行对比的结果.由表3可以看出,本文算法相比于A\*势场法的路径规划时间有显著的提高,且路径长度更优.另外,本文所提出的算法可以直接得到光滑的运动轨迹,无需再进行插值处理.同时,由图4可以看出,本文算法可以对突现障碍物情况迅速作出响应,改变机器人行驶方向,绕过障碍物.

### 3.2 U型陷阱仿真研究

此U型陷阱环境中机器人的起始点为 $S = (8.5, 8.3)$ ,目标点为 $G = (9.8, 9.7)$ ,图5为加入逃脱策略后的结果.可以看出,加入逃脱策略后机器人可以成功

逃脱死循环,安全到达目标点. 为进一步体现该策略的优越性,使U型障碍物两侧加长且开口处设置为半封闭型,如图5中右图所示,机器人仍能快速地找到障碍物出口,驶离陷阱朝向目标点运动.

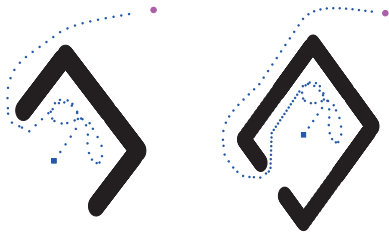


图 5 加入逃脱策略仿真结果

### 3.3 动态障碍物仿真研究

该情形下机器人的起始点  $S = (4, 4)$ , 目标点  $G = (6, 6)$ , 不加动态避障策略的仿真结果如图6(a)所示,当机器人与动态障碍物的运动方向和速度相同时,机器人将沿此方向一直运动,无法到达目标点. 加入动态避障策略后的仿真结果如图6(b)所示,实验结果显示,动态避障策略可使机器人安全地避开动态障碍物,成功到达目标点.

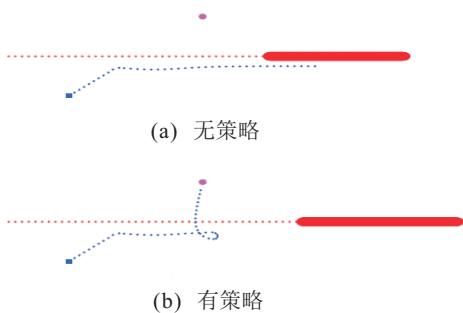


图 6 有无动态避障策略仿真结果

### 3.4 速度模糊控制器仿真研究

图7是在机器人行驶过程中速度模糊控制器工作情况(取前100步仿真结果),图7(a)为角度偏差曲线,图7(b)为速度曲线. 通过对两个曲线的对比可以明显看出机器人每一步的角度发生变化时,它的速度也在合理地跟随其变化.

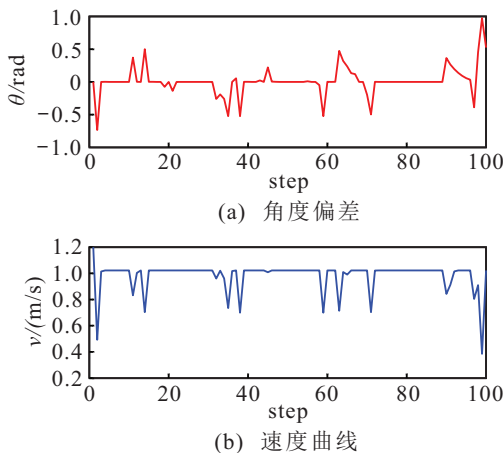


图 7 速度控制器变化曲线

### 3.5 综合仿真研究

通过图8记录机器人的综合运动过程,动态障碍物A、B和目标点随着迭代次数的增加依次运动. 障碍物A在迭代次数小于120代时,由左向右运动,迭代次数大于120时速度为0. 图8(a)中,当机器人检测周围没有障碍物时,奔向目标点运动. 如果传感器检测到障碍物,如图8(b)所示,机器人判断是否为静态障碍物,根据行为的优先级进行选择;同时,由图8(b)可以看出,机器人沿着墙壁运动,并成功通过狭窄通道.

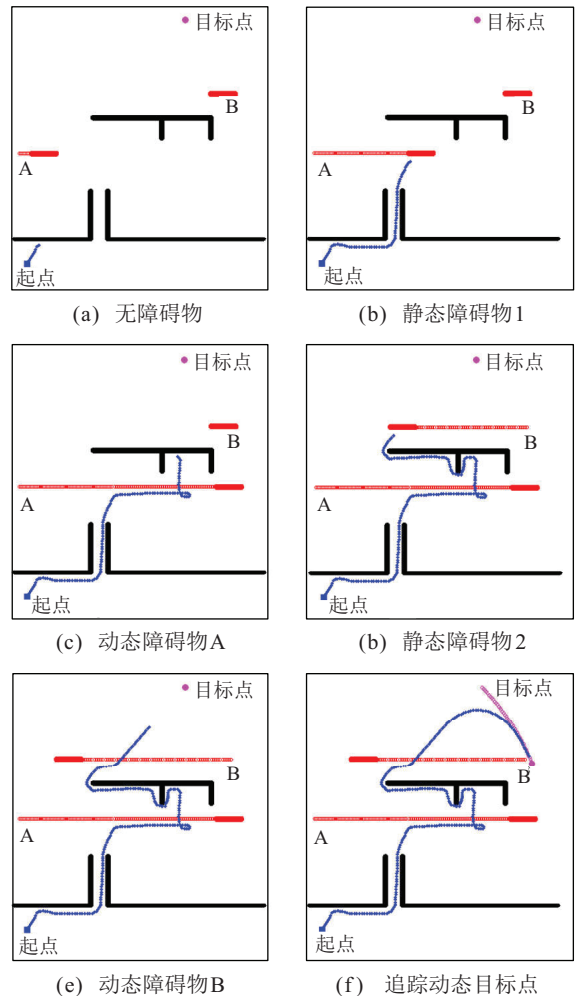


图 8 未知动态环境仿真结果

通过障碍物后,机器人返回初始状态,继续奔向目标点运动. 当机器人传感器检测到动态障碍物A时,以相邻两个时间间隔记录的运动障碍物的位置确定其运行速度和方向. 在图8(c)阶段,动态障碍物A向右运动,从而使机器人也向右运动,机器人运动方向与障碍物运动方向的夹角为锐角,当到达局部极值点且仍未绕过动态障碍物时,机器人由远离障碍物的一侧改变运行方向,从而绕过障碍物.

成功躲避动态障碍物A后,机器人继续导航目的地,直到遇到第2组静态障碍物,为躲避此障碍物,机器人只能选择向远离目标点的方向运动,如图8(d)所示.

动态障碍物B在迭代次数为130~200代之间时,由右向左运动,机器人绕过第2组静态障碍物后,刚好遇到动态障碍物B,由于该障碍物的运动方向与机器人运动方向之间的夹角为钝角,机器人会选择与动态障碍物相向运动,以达到绕过障碍物的目的,如图8(e)所示。

迭代次数到达210代后,目标点开始运动,因此,机器人开启追踪模式,如图8(f)所示,机器人很快并入到目标点的运动轨迹中,并追随目标点运动。

## 4 结论

本文提出了一种基于行为的机器人局部路径规划方法,通过各个行为之间的协调配合,能够使机器人安全、高效地由起始点到达目标点。引入改进人工势场法,使机器人能有效地追踪动态目标;同时,针对模糊避障行为中常见的U型陷阱和动态障碍物问题,提出了有效的解决策略,并且设计了一个速度模糊控制器,当机器人在转弯时,使速度跟随转弯角度的变化而变化,实现智能行驶。最后,通过详细的仿真实验并与A\*势场法进行比较,验证了本文方法的有效性和可行性。因模糊控制中隶属度函数的设定存在主观性的缺点,为解决这一问题,智能算法在路径规划领域越来越受到人们的关注,接下来的工作是运用智能算法与本文算法相结合,得到更优路径。

### 参考文献(References)

- [1] Luo D L, Wu S X. Ant colony optimization with potential field heuristic for robot path planning[J]. *J of System Engineering and Electronics*, 2010, 32(6): 1277-1280.
- [2] Zhu D Q, Yan M Z. Survey on technology of mobile robot path planning[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(7): 961-967.
- [3] Dezfoulian S H, Wu D, Imran Shafiq Ahmad, et al. A generalized neural network approach to mobile robot navigation and obstacle avoidance[J]. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 2013, 193: 25-42.
- [4] Tanaka Y, Ji Y, Yamashita A, et al. Fuzzy based traversability analysis for a mobile robot on rough terrain[C]. *Int Conf on Robotics and Automation*. Seattle: IEEE, 2015: 3965-3970.
- [5] Mac T T, Copot C, Tran D T, et al. Heuristic approaches in robot path planning: A survey[J]. *Robotics & Autonomous Systems*, 2016, 86: 13-28.
- [6] Lee J, Kwon O, Zhang L, et al. A selective retraction-based RRT planner for various environments[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2014, 30(4): 1002-1011.
- [7] Malone N, Chiang H T, Lesser K, et al. Hybrid dynamic moving obstacle avoidance using a stochastic reachable set-based potential field[J]. *IEEE Trans on Robotics*, 2017, 38(8): 1124-1138.
- [8] Li G, Tong S, Cong F, et al. Improved artificial potential field-based simultaneous forward search method for robot path planning in complex environment[C]. *Int Symposium on System Integration*. Nagoya: IEEE, 2015: 760-765.
- [9] Huang L. Velocity planning for a mobile robot to track a moving target—A potential field approach[M]. Holland: North-Holland Publishing Co., 2009: 55-63.
- [10] Huang L. A potential field approach for controlling a mobile robot to track a moving target[C]. *IEEE 22nd Int Symposium on Intelligent Control*. Singapore: IEEE, 2007: 65-70.
- [11] Yi D, Goodrich M A, Seppi K D. Homotopy-aware RRT\*: Toward human-robot topological path-planning[C]. *The 11th ACM/IEEE Int Conf on Human-Robot Interaction*. Christchurch: IEEE, 2016: 279-286.
- [12] Abdalla T Y, Abed A A, Ahmed A A. Mobile robot navigation using PSO-optimized fuzzy artificial potential field with fuzzy control[J]. *J of Intelligent & Fuzzy Systems*, 2017, 32(6): 3893-3908.
- [13] He T, Li P, Han N. Path planning for mobile robot based on fuzzy control[C]. *Int Conf on Applied Informatics and Communication*. Berlin: IEEE, 2011: 522-531.
- [14] Liu Q, Liu D, Meng W, et al. Fuzzy sliding mode control of a multi-DOF parallel robot in rehabilitation environment[J]. *Int J of Humanoid Robotics*, 2014, 11(1): 1223-1251.
- [15] Le C, Zhenghua L. Design of two-stage fuzzy controller for mobile robot using vision navigation[C]. *Chinese Guidance, Navigation and Control Conf*. Nanjing: IEEE, 2016: 872-877.
- [16] Zhu Y, Zhang T, Song J Y. Study on the local minima problem of path planning using potential field method in unknown environments[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2010, 36(8): 1122-1130.
- [17] Yin L, Yin Y X. Simulation research on path planning based on dynamic artificial potential field[J]. *J of System Simulation*, 2009, 21(11): 3325-3328.
- [18] Raja R, Dutta A. Path planning in dynamic environment for a rover using A\* and potential field method[C]. *The 18th Int Conf on Advanced Robotics*. Hong Kong: IEEE, 2017: 578-582.

### 作者简介

魏立新(1977—),男,教授,博士生导师,从事冶金综合自动化、机器人控制等研究, E-mail: wlx2000@ysu.edu.cn;  
 吴绍坤(1993—),男,硕士生,从事机器人路径规划的研究, E-mail: 1096224481@qq.com;  
 孙浩(1985—),男,讲师,博士,从事智能优化算法、冶金综合自动化等研究, E-mail: sunhao@ysu.edu.cn;  
 郑剑(1987—),男,工程师,硕士,从事冶金综合自动化的研究, E-mail: aidyzheng@163.com.

(责任编辑:孙艺红)