

# RoboCup 比赛环境下足球机器人路径规划研究

黄彦文, 曹其新

(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200240)

**摘 要:** RoboCup 中型组足球机器人比赛具有高度的对抗性和实时性. 比赛中机器人需要针对不同的比赛态势进行角色切换和任务选择. 在这种环境下, 应用传统人工势场或一般改进型人工势场的路径规划方法都无法得到令人满意的结果. 将障碍物与机器人之间的相对速度矢量以及目标与机器人之间的相对速度矢量分别引入人工势场法中, 对传统的势场函数进行了改进; 并根据机器人的不同角色和任务, 采用模糊逻辑方法对势场函数进行修正, 提出一种处理多角色多任务环境的改进型人工势场法机器人路径规划方法. 仿真试验和实际应用验证了此算法在足球机器人比赛系统中的可行性.

**关键词:** 人工势场; 模糊逻辑; 路径规划; 多角色多任务环境; 足球机器人

**中图分类号:** TP242. 6 **文献标识码:** A **文章编号:** 1673-4785(2007)04-0052-06

## Path planning for robot soccer in the RoboCup environment

HUANG Yan-wen, CAO Qin-xin

(Research Institute of Robotics, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The RoboCup middle size robot soccer game is full of intense competition and has a strong real-time property. During a match, a robot must change its roles and tasks, in real-time, according to the game situation. In this situation we cannot get satisfactory results using a traditional or even an improved artificial potential field. This paper proposes a new improved potential field method based on fuzzy logic to deal with the multi-task/ multi-role situation. It can effectively analyze the effects of relative location and velocity on the robots, the obstacles, and the goals. Computer simulations demonstrate the effectiveness of path planning using the new potential field method.

**Key words:** artificial potential field; fuzzy logic method; path planning; multi-task multi-role situation; robot soccer

RoboCup 中型组机器人足球比赛是一类典型的对抗性动态环境下移动机器人的自主控制任务. 在比赛中, 机器人具有前锋、中场、后卫、守门员等不同的角色, 需要完成寻球、带球、防守、射门、拦截等不同任务<sup>[1]</sup>. 无碰撞路径规划在其中扮演了不可或缺的角色. 当前具有代表性的路径规划方法有 C-空间法<sup>[2]</sup>、人工势场法<sup>[2-4]</sup>、拓扑学法<sup>[2]</sup>、可视图法、人工智能法<sup>[5-6]</sup>以及启发式搜索法<sup>[2]</sup>等. 考虑到足球机器人比赛中的实时性要求, 人工势场法以其数学描述简洁、计算量小、实时性高等优点, 成为解决比赛环境下移动机器人无碰撞路径规划的最常用的方法之一, 并得到了非常广泛的应用<sup>[3-4, 7-11]</sup>.

传统的人工势场法存在局部最小值、在障碍物前易发生振荡、不适应动态环境等缺陷. 为了解决动态环境下的避障问题, N. Y. Ko<sup>[8]</sup>将机器人和障碍物之间的相对速度在它们位置连线上的投影作为加权因素, 对二者的实际距离进行修正, 建立虚距离概念, 以虚距离为变量建立势场; S. S. Ge<sup>[10]</sup>通过引入相对速度信息重新定义势函数, 解决动态环境下机器人的路径规划问题; T. Fraichard<sup>[11]</sup>在相对速度方向上施加力的作用, 解决非完整约束移动机器人的动态避碰问题; 文献[12]也提出一种基于相对威胁系数的改进型人工势场方法, 并在足球机器人比赛系统中进行了验证. 然而, 在 RoboCup 中型组足球机器人比赛中, 具有较高智能的机器人需要根据当前的比赛态势改变自身的角色并选择不同的任务. 而上述传统的机器人路径规划方法往往忽略了

收稿日期: 2006-12-14.

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(2006AA04Z261).

不同的任务对机器人路径的影响,从而降低了机器人的智能.

因此,本文在文献[12]的研究基础上,采用模糊逻辑方法对势场函数进行修正,提出一种处理多角色多任务环境的改进型人工势场法机器人路径规划方法,较好地解决了足球机器人比赛环境下的机器人路径规划问题.

1 实验对象

算法验证所用的实验对象是上海交通大学自行研制的“交龙”足球机器人,如图 1 所示.该机器人采用双轮差速驱动方式,行驶时最高直线速度为 2 m/s,最大角速度为 360°/s.采用上下位机模式的分布式控制系统:上位机为系统机,用于进行图像处理、任务分配和路径规划等;下位机控制子系统,由 DSP 来实现机器人的运动控制.环境感知系统由全维视觉和前向摄像头组成,用来提供比赛场地中的目标物、障碍物以及自身的位置信息.路径规划算法就是在上述系统所提供信息的基础上实现的.

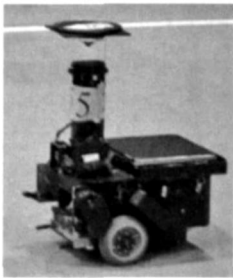


图 1 “交龙”足球机器人  
Fig. 1 “Jiaolong” robot soccer

2 足球机器人人工势场模型

人工势场法最早是由 Khatib 于 1986 年提出的一种简单易行的路径规划方法,其基本思想是构造一个由目标引力场和障碍物斥力场共同作用的人工势场,通过搜索势场函数的下降方向来实现机器人的无碰撞路径规划<sup>[13]</sup>.

Robocup 足球机器人系统是一个典型的动态环境下的多目标多障碍物的路径规划问题.对方和己方机器人都可以认为是障碍物,足球和球门是目标物.比赛过程中,机器人以及足球都处于运动状态.因此需要将目标物和障碍物的速度矢量引入势函数,作为对合力的一个影响因子.

假设在某时刻  $T_0$ ,目标物的速度是  $v_g$ ,机器人的速度是  $v_r$ ,障碍物的速度为  $v_o$ .如图 2 所示,建立坐标系如下: $X-Y$  直角坐标系为机器人的全局坐标,其中  $X$  轴表示机器人比赛球场的横向坐标, $Y$  轴表示球场的纵向坐标. $\rho-\theta$  极坐标系为机器人的

局部坐标系,极轴和机器人的速度  $v_r$  重合. $(\rho_o, \theta_o)$  是机器人局部坐标系下障碍物的坐标; $(\rho_g, \theta_g)$  是机器人局部坐标系下目标的坐标. $\theta_o, \theta_g$   $(-\pi, \pi)$  以逆时针为正.

在多目标和多障碍物的情况下,相同时,可对机器人的行为产生影响的只有值最小的障碍物和目标物,因而采用极坐标方式可减轻计算的复杂性<sup>[14]</sup>.

下面分别对足球机器人比赛环境下的引力函数和斥力函数进行设计.

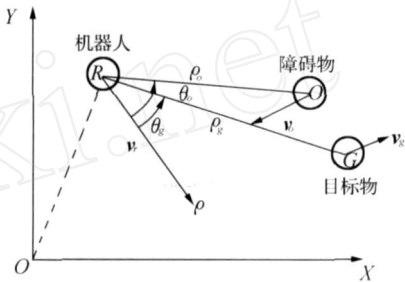


图 2 机器人坐标系  
Fig. 2 The global and relative coordinates of the robot

2.1 引力函数

如上文所述,定义引力函数为机器人与目标物之间的相对距离以及相对速度的函数,如式 1 所示.

$$F_{att}(\rho, v) = F_{att\rho} + F_{attv} = k_1 \rho^{-m} \times n_g + k_2 |v_g - v_r|^n \times n_{vgr}. \quad (1)$$

式中: $\rho_g$  表示机器人和目标之间的相对笛卡尔距离; $|v_g - v_r|$  表示在  $t$  时刻机器人和目标之间的相对速度模值; $n_g$  为沿  $\rho_g$  方向的单位矢量; $n_{vgr}$  为沿  $(v_g - v_r)$  方向的单位矢量; $m, n$  为大于 1 的常数, $k_1, k_2$  为正常数,分别取决于机器人的性能和所采取的策略.当  $m = 2, k_2 = 0$  时,式(1)即简化为传统引力函数.

由式(1)可知,当  $\rho_g = 0$  时,  $F_{att\rho} = 0$ ;当  $|v_g - v_r| = 0$  时,  $F_{attv} = 0$ .因此机器人捕获到目标时同时和目标物保持相同的速度大小和运行方向,即所谓软接触.而这将改善足球机器人比赛中机器人追球和带球的性能.

2.2 斥力函数

由实验可知,当机器人和障碍物之间的距离大于一定值时,该障碍物不对机器人的行为产生影响,用  $\max$  表示;而当二者距离小于一定值时,机器人必须停止运动或者后退,否则即有碰撞的危险发生,用  $\min$  表示.  $\max$  和  $\min$  的取值取决于机器人的性能参数和比赛策略.

定义距离影响斥力函数  $F_{rep}$ ,即传统斥力函数为

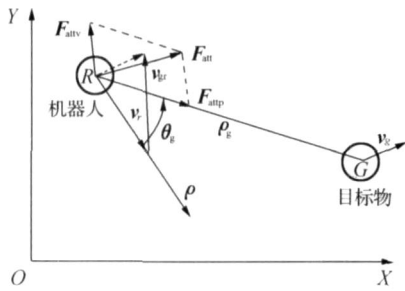


图3 引力函数示意图

Fig. 3 The new attractive force

$$F_{\text{repp}} = \begin{cases} 0, & \rho > \rho_{\text{max}}, \\ \frac{k_3}{(\rho - \rho_{\text{min}})^s}, & \rho_{\text{min}} < \rho < \rho_{\text{max}}, \\ F_{\text{max}}, & \rho < \rho_{\text{min}}. \end{cases} \quad (2)$$

设障碍物相对于机器人的速度  $v_{ro}$ ,  $v_{ro} = v_r - v_o$ .  $v_{ro}$  与  $o$  的夹角用  $\theta_e$  表示, 以逆时针为正, 如图4所示. 当  $\theta_e \in [-\pi/2, \pi/2]$  时, 障碍物相对远离机器人, 此时机器人没有必要进行避障行为.

设  $v_{ro}$  在  $o$  方向上的分量为  $v_{rop}$ ,  $v_{rop} = v_{ro} \cdot \cos \theta_e$ . 则  $v_{ro}$  在  $o$  垂直方向上的分量为

$$v_{ron} = v_{ro} - v_{rop}.$$

设  $T_{\text{cycle}}$  为机器人系统对环境信息的刷新周期. 引入相对速度修正因子  $\alpha$ , 如式(3)、(4):

$$\alpha = T_{\text{cycle}} \times v_{rop}, \quad (3)$$

$$\alpha = T_{\text{cycle}} \times v_{ron}. \quad (4)$$

则改进后的距离影响斥力函数  $F_{\text{repp}}$  为

$$F_{\text{repp}} = \begin{cases} 0, & \rho > \rho_{\text{max}} \\ k_3 \left( \frac{1}{\rho - \rho_{\text{min}}} \right)^s, & \text{or } \theta_e \in [-\pi/2, \pi/2], \\ & \rho_{\text{min}} < \rho < \rho_{\text{max}} \\ F_{\text{max}}, & \text{and } \theta_e \in [-\pi/2, -\pi/2], \\ & \rho < \rho_{\text{min}}. \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $F_{\text{repp}} = \alpha \cdot F_{\text{repp}}$ .

同时引入速度影响斥力函数  $F_{\text{repv}}$  为

$$F_{\text{repv}} = k_4 \times (\alpha)^t. \quad (6)$$

式中:  $F_{\text{repv}} = v_{ron}$ .

因此斥力函数:

$$F_{\text{rep}} = F_{\text{repv}} + F_{\text{repp}} = \begin{cases} 0, & \rho > \rho_{\text{max}} \text{ or } \theta_e \in [-\pi/2, \pi/2], \\ k_3 \left( \frac{1}{\rho - \rho_{\text{min}}} \right)^s \times n_o + k_4 (\alpha)^t \times n_{\text{vor}}, & \rho_{\text{min}} < \rho < \rho_{\text{max}} \text{ and } \theta_e \in [-\pi/2, -\pi/2], \\ F_{\text{max}}, & \rho < \rho_{\text{min}}. \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\rho$  表示机器人和障碍物之间的相对笛卡尔距离;  $s, t$  为大于1的常数,  $k_3, k_4$  为正常数, 分别

取决于机器人的性能和所采取的策略;  $n_o$  为沿  $o$  方向的单位矢量;  $n_{\text{vor}}$  为沿  $v_{ron}$  方向的单位矢量.

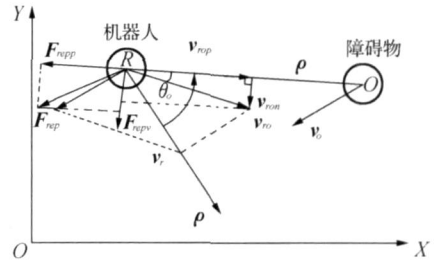


图4 斥力函数示意图

Fig. 4 The new repulsive force

### 2.3 斥力函数的修正

当障碍物出现在势场合力方向上时, 机器人往往会出现障碍物面前振荡或找不到路径的情况, 而这种情况在多障碍物的环境下非常容易发生, 如图5所示.

为了使机器人成功绕开障碍物到达目标点, 修正斥力函数分力  $F_{\text{repv}}$  为

$$F_{\text{repv}} = \begin{cases} k_4 \times (\alpha)^t, & A \setminus o, \\ k_4 \times (\alpha + \beta)^t, & A_r \cap o. \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\beta$  为事先设定的修正值, 取决于机器人的性能和所采取的策略.

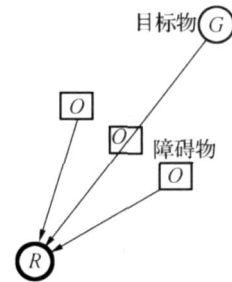


图5 多障碍物斥力示意图

fig. 5 The repulsive force in multi-obstacles environment

## 3 基于模糊规则的势场函数修正

对于例如 RoboCup 足球机器人这样的竞赛机器人, 或者是军事机器人而言, 较为理想的路径规划方法除了要受到机器人与障碍物、机器人与目标之间的相对距离和相对速度的影响外, 还应该受到其行为策略和当前态势的影响. 例如对于守门员而言, 为了阻止对方队员进球, 有时避障并不是最高优先级的; 而为了提高性能, 防守队员需要跟随对手进攻队员而非远远地进行避障. 而模糊逻辑控制具有符合人类思维的习惯, 不需要建立精确的数学模型, 易于将专家知识直接转换为控制信号等优点, 非常适用于复杂动态环境下机器人的控制, 已经得到了广

泛的应用<sup>[15-17]</sup>. 因此,本文提出一种采用模糊逻辑方法,将机器人角色和任务的作为输入参量融入到势场函数中,较好地解决了足球机器人比赛中多角色多任务的路径规划问题.

模糊推理系统主要由模糊输入输出变量、模糊规则库和模糊推理机构 3 部分组成. 本文以机器人当前的角色和任务作为输入,以机器人势函数中最大和最小避障距离  $\rho_{\max}$  和  $\rho_{\min}$  为输出. 由于本系统中机器人的任务和角色都是有限的离散变量,为了简化起见,不再对其进行模糊化处理. 定义角色区间  $\text{role} = \{\text{前锋 (F)}, \text{中场 (M)}, \text{后卫 (B)}, \text{守门员 (G)}\}$ ; 任务区间  $\text{task} = \{\text{寻球 (FB)}, \text{追球 (PB)}, \text{带球 (KB)}, \text{跟随 (FO)}, \text{拦截 (HO)}, \text{射门 (ST)}\}$ . 实验证明,采用简单的三角隶属函数即可满足本系统的要求. 定义输出变量的隶属函数如图 6 所示. 模糊规则如表 1 和表 2 所示.

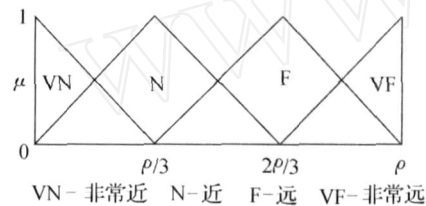


图 6 输出变量隶属函数

Fig. 6 The membership function of the output variables

表 1  $\rho_{\min}$  的模糊规则

Table 1 Fuzzy rules for  $\rho_{\min}$

机器人任务	最小避障距离			
	F	M	B	G
FB	VF	VF	VF	VF
PB	F	VF	F	F
KB	F	VN	F	VN
FO	VN	VF	VN	VN
HO	VN	N	F	N
ST	N	VN	N	VN

表 2  $\rho_{\max}$  的模糊规则

Table 2 Fuzzy rules for  $\rho_{\max}$

机器人任务	最大避障距离			
	F	M	B	G
FB	VF	VF	VF	VF
PB	F	VF	F	N
KB	N	VN	N	VN
FO	VN	VF	VN	VN
HO	VN	N	N	VN
ST	VN	VN	VN	VN

这里模糊规则可描述为

$$R_n: \text{IF}(r = R^n) \text{ and } (t = T^n), \\ \text{THEN}(\rho = P^n).$$

采用重心法解模糊,则对应的最大和最小避障距离输出为

$$\rho = \frac{\sum_{i=0}^{K-1} \mu_i^i}{\sum_{i=0}^{K-1} \mu_i^i} \quad (9)$$

4 基于改进型势场法的机器人运动规划

在某时刻  $t$ , 机器人所携带的传感器获得目标和障碍物相对自身的位置和速度信息,则机器人受到的虚拟力可由式 (10) 计算得到:

$$A_r = F_{\text{att}} + F_{\text{rep}}. \quad (10)$$

由于机器人的运动受其物理条件的限制,设机器人的最大加速度为  $a_{\max}$ ,机器人的最大线速度为  $v_{\max}$ ,机器人的质量为  $m$ . 则根据牛顿法则,机器人的加速度满足式 (11):

$$a(t) = \begin{cases} \frac{A_r}{m}, & | \frac{A_r}{m} | < a_{\max}, \\ a_{\max} \frac{A_r}{|A_r|}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (11)$$

假设机器人的初始速度和初始位置已知,则任意时刻机器人的速度和位置可由式 (12) 和 (13) 计算得

$$v(t) = \begin{cases} v(t_0) + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau, & |v(t)| < v_{\max}, \\ v_{\max} \frac{v(t) + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau}{|v(t) + \int_{t_0}^t a(\tau) d\tau|}, & \text{其他.} \end{cases} \quad (12)$$

$$p(t) = p(t_0) + \int_{t_0}^t v(\tau) d\tau. \quad (13)$$

机器人的路径规划算法控制流程如图 7 所示.

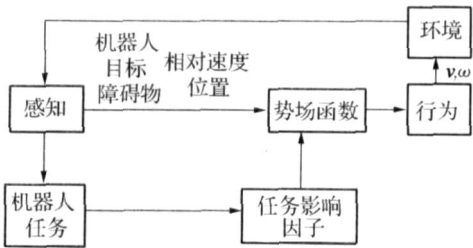


图 7 机器人控制流程示意图

Fig. 7 Proposed control architecture

## 5 仿真与实验

基于以上设计思想,本文使用 Matlab 在 Windows 平台上编写了一套仿真程序来验证上述方法的正确性和实用性.如图 8 所示,设定场地尺寸为  $12\,000\text{ mm} \times 8\,000\text{ mm}$ ,以场地中心为坐标原点,横向为  $x$  轴,纵向为  $y$  轴.设定机器人的初始坐标为  $(0,0)$ ,最大速度为  $1.5\text{ m/s}$ ;动态障碍物初始坐标为  $(2\,000,3\,000)$ ,初始速度为  $1\text{ m/s}$ ,方向为  $-66^\circ$ ;静态障碍物坐标分别为  $(1\,000,1\,000)$ ,  $(3\,600,1\,800)$ ;球的初始坐标为  $(4\,000,4\,000)$ ,初始速度为  $-0.5\text{ m/s}$ ;系统周期为  $100\text{ ms}$ .图中绿色表示机器人的运动轨迹;蓝色表示对方机器人即障碍物的移动轨迹;红色表示足球即目标物的移动轨迹.图 8(a) 显示的是当设置黄门为己方球门,即机器人处于防守角色时的运动轨迹;而图 8(b) 为设置蓝门为己方球门,即机器人处于进攻角色时的运动轨迹.从中可以显示出机器人的角色对其行为路径的影响.

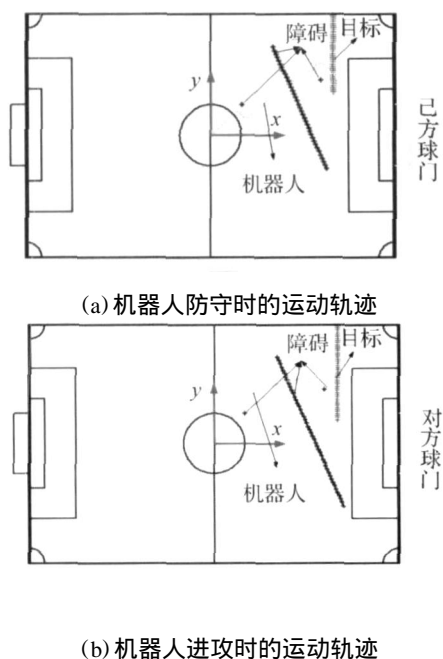


图 8 基于改进人工势场法的机器人路径规划仿真

8 The simulation of robot path planning based on a new evolutionary artificial potential field

该算法同时在“交龙”足球机器人上进行了验证.图 9 为 2006 中国机器人大赛中上海交通大学“交龙”队与国防科技大学“海豹”队比赛中的场景.当球在对方机器人脚下时,本方机器人处于防守状态,此时机器人应该在不与对方机器人发生碰撞的条件下,尽量接近对方机器人,阻挠对方进攻,并伺机断球,如图 9(a) ~ (c) 所示;而当断球成功后,则立即处于进攻状态,快速带球向对方球门移动,避开

对方守门员射门,如图 9(d) ~ (f) 所示.

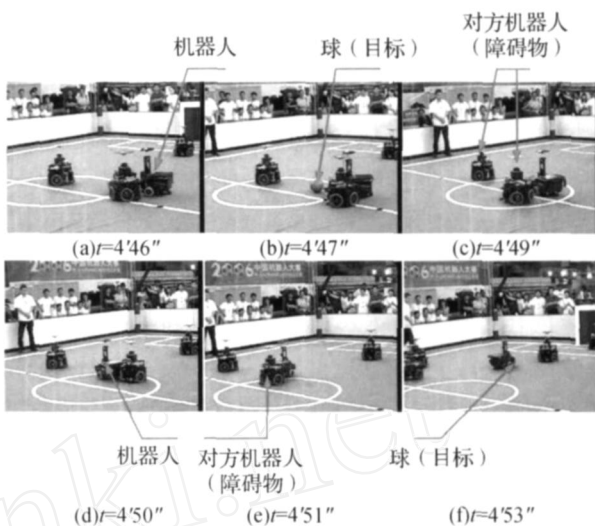


图 9 机器人路径规划算法实验截图

Fig. 9 The results of a real mission

## 6 结束语

考虑到足球机器人比赛这样一个复杂的具有对抗性环境下,机器人需要根据环境变化进行不同角色和任务的切换,因此采用传统的人工势场路径规划方法无法得到令人满意的结果.本文将障碍物与机器人之间的相对速度矢量以及目标与机器人之间的相对速度矢量分别引入人工势场法中,对传统的势场函数进行了改进;并根据机器人的不同角色和任务,采用模糊逻辑方法对势场函数进行修正,提出一种处理多角色多任务环境的改进型人工势场法机器人路径规划方法.仿真实验验证了此算法在足球机器人比赛系统中的可行性.并且,在“交龙”足球机器人上应用该算法,在实际比赛中获得了较好的成绩.

## 参考文献:

- [1] 贾建强,陈卫东,席裕庚. 全自主足球机器人系统关键技术综述[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(增刊): 45 - 49.
- JIA Jianqiang, CHEN Weidong, XI Yugeng. An overview of the key techniques in autonomous robot soccer [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37 (Supl): 45 - 49.
- [2] LATOMBE J C. Robot motion planning [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [3] VADAKKEPAT P, KAY C, WANG Mingliang. Evolutionary artificial potential fields and their application in real time robot path planning [A]. Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation [C]. Piscat-

- away,2000.
- [4]NAM Y S, LEE B H, KO N. An analytic approach to moving obstacle avoiding using an artificial potential field [A]. IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Pittsburgh,USA,1995.
- [5]ZHANG B T, KIM S H. An evolutionary method for active learning of mobile robot path planning[A]. Proceedings of IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA [C]. Monterey,USA,1997.
- [6]DOZIER G, MCCULLOUGH S, HOMAIFAR A, et al. Multiobjective evolutionary path planning via fuzzy tournament selection[A]. Proceedings of the IEEE Conference on Evolutionary Computation, ICEC[C]. Anchorage,USA,1998.
- [7]张 祺,杨宜民. 基于改进人工势场法的足球机器人避碰控制[J]. 机器人,2002,24(1):12-15.  
ZHANG Qi, YANG Yiming. Soccer robot collision avoidance control based on evolutionary artificial potential field[J]. Robot,2002,24(1):12-15.
- [8]KO N Y, LEE B H. Avoidability measure in moving obstacle avoidance problem and its use for robot motion planning [J]. Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Osaka, Japan,1996.
- [9]CHEN Gong, GU Jason, BAI Tao, et al. A new efficient control algorithm using potential field: extension to robot path tracking[A]. Proceedings of Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering[C]. Niagara Falls, Ontario, Canada,2004.
- [10]GE S S, CUI Y J. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method [J]. Autonomous Robots,2002,13(3):207-222.
- [11]FRAICHARD T H, LAUGIER C. On line reactive planning for a nonholonomic mobile in a dynamic work [A]. IEEE International Conference on Robotics and Automation[C]. [S.l.],1991.
- [12]CAO Qixin, HUANG Yanwen, ZHOU Jingliang. An evolutionary artificial potential field algorithm for dynamic path planning of mobile robot[A]. Proceedings of the 2006 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems[C]. Beijing, China,2006.
- [13]KHATIB O. Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots[J]. J Robotics Res,1986,5(1):90-98.
- [14]PIAGGIO M, SGORBISSA A. A\*F-CART: an algorithm to incrementally calculate artificial potential fields in real-time[A]. 1999 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, CIRA '99[C]. [S.l.],1999.
- [15]DRIANKOV D,SAFFIOTTI A. Fuzzy logic techniques for autonomous vehicle navigation [M]. New York: Physica Verlag,2001.
- [16]YANG X, PATEL R V, MOALLEM M. A fuzzy-Braitenberg navigation strategy for differential drive mobile robots[A]. Proc 3rd IFAC Symp. Mechatronic Systems[C]. Sydney, Australia,2004.
- [17]SAFFIOTTI A. The uses of fuzzy logic in autonomous robot navigation[J]. Soft Comput,1997(1):180-197.

#### 作者简介:



黄彦文,女,1979年生,博士研究生,主要研究方向为智能机器人控制、多机器人协作。

E-mail: huangyw @sjtu.edu.cn.



曹其新,男,1960年生,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为全自主移动机器人、机器视觉、多机器人协作、空间探测机器人,发表学术论文50余篇。

E-mail: qxcao @sjtu.edu.cn.