

文章编号:1006-2467(2006)11-1827-05

对抗环境下足球机器人路径规划

周金良, 黄彦文, 曹其新
(上海交通大学 机器人研究所, 上海 200030)

摘要: 在 RoboCup 中型组足球机器人比赛环境下, 实现机器人实时、有效的路径规划是赢得比赛的重要前提. 充分考虑到足球机器人比赛中实时性和对抗性的特点, 采用具有实时性优势的人工势场法, 并综合考虑障碍物、目标点以及机器人之间相对位置和相对速度的关系, 提出一种相对威胁系数的概念. 该系数能够反映比赛中双方机器人实际对抗的强弱程度. 将相对威胁系数应用到传统的人工势场中, 形成一种新的改进型人工势场法, 较好地解决了对抗环境下机器人路径规划中一些实时性、有效性的问题. 仿真实验验证了所提出算法在足球机器人比赛系统中具有可行性. 将该算法应用于交龙足球机器人上, 在实际比赛中取得了较好的成绩.

关键词: 人工势场; 路径规划; 相对威胁系数; 对抗环境; 足球机器人
中图分类号: TP 24 **文献标识码:** A

The Path Planning for Robot Soccer Under Antagonistic Environment

ZHOU Jin-liang, HUANG Yan-wen, CAO Qi-xin

(Research Inst. of Robotics, Shanghai Jiaotong Univ., Shanghai 200030, China)

Abstract: The RoboCup middle size robot soccer game is full of intense competition where accurate collision-free path planning is one of the most important challenges. However, the path planning method using traditional or common evolutionary artificial potential field does not suit for such environment. This paper proposed a new evolutionary potential field method based on relative threat coefficient, which synthesizes the effect of the relative location and velocity among the robot, the obstacle and the goal. Computer simulation and physical application were used to demonstrate the effectiveness of the path planning scheme based on the new potential field method.

Key words: artificial potential field; path planning; relative threat coefficient; competition environment; robot soccer

机器人足球比赛是一类在对抗性环境下自主机器人的实时控制任务^[1]. 为顺利完成比赛任务, 机器人必须具备追球、带球、避障、射门等基本功能, 其中路径规划扮演了不可或缺的角色. 大体上讲, 路径规划的方法可以分为两类^[2]: 人工势场法 (APE)^[3,4]

和人工智能法 (AI)^[5].

应用于路径规划的人工智能方法主要有基因算法 (GA)^[5]、模糊控制、人工神经网络等, 这些算法从本质上讲都是优化算法, 目的是计算出全局路径中的最优值. 然而, 这种优化算法相对来说比较复杂,

收稿日期: 2005-11-09

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60443007)

作者简介: 周金良 (1980-), 男, 江苏宜兴市人, 硕士生, 主要研究方向为智能机器人的控制. 曹其新 (联系人) 男, 教授, 博士生导师, 电话 (Tel.): 021-34206790; E-mail: qxcao@sjtu.edu.cn.

计算量大,不适合足球机器人比赛这种对实时性要求比较高的应用场合^[2].

人工势场法是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.由于该方法便于数学描述、计算简洁,所以迄今为止仍是解决移动机器人无碰撞路径规划的最常用的方法之一,得到了非常广泛的应用^[2,4,6-8].

但是,传统的人工势场法存在局部极值、不适应动态环境等缺陷.文献[6,7]通过引入障碍物速度信息的改进型人工势场法,较好地解决了动态环境下机器人的路径规划问题.然而,在 RoboCup 中型组足球机器人比赛中,障碍物(对方机器人)与己方机器人在一定程度上都会形成一种对抗状态,而在这种对抗环境下,上述改进型势场法也不能很好地解决机器人的路径规划问题.本文通过引入相对威胁系数的概念,较好地解决了足球机器人比赛中对抗环境下的机器人路径规划问题.

1 传统人工势场法模型

在 RoboCup 足球机器人中型组比赛中,一般场上双方都有 4 台机器人.考虑到大部分情况下直接影响本队机器人的可能只有其中的 1 台,为了简化问题,本文只讨论 1 台机器人来阻截时的情况.

机器人在人工势场中受到目标物的引力 F_{rg} 和障碍物的斥力 F_{or} ,其合力为 F_r ,如图 1 所示.其中: o 为障碍物; g 为目标物; r 为机器人.机器人的势场函数为

$$F_r = F_{rg} + F_{or} = \frac{1}{(aD_{rg})^m}L_{rg} + \frac{1}{(bD_{or})^n}L_{or} \quad (1)$$

式中: D 为距离; a, b, m 和 n 为参数,根据实际应用情况做进一步的优化; L 为位置.

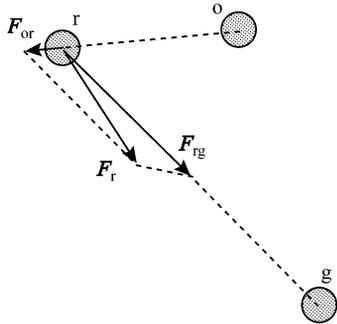


图 1 机器人在人工势场中的虚拟受力图

Fig. 1 The virtual attractive force of robot in artificial potential field

2 对抗环境下基于相对威胁系数的改进型人工势场法

传统的势场法只适用于静态环境下的机器人路径规划,即障碍物和目标物都处于静止状态.在 RoboCup 足球机器人比赛中,对方机器人可以认为是障碍物,而足球或者球门可以认为是目标物,比赛过程中,机器人以及足球都处于运动状态.

在动态环境下,通常使用的简化模型是在机器人的一个循环周期(一般为 100 ms)内,把机器人以及足球都近似地认为处于静止状态.但是,这种方式忽略了机器人和足球的运动趋势.当障碍物向机器人后方运动时,采用上述方法的机器人会进行不必要的避障行为,为机器人的运动策略带来了不必要的干扰,如图 2 所示.

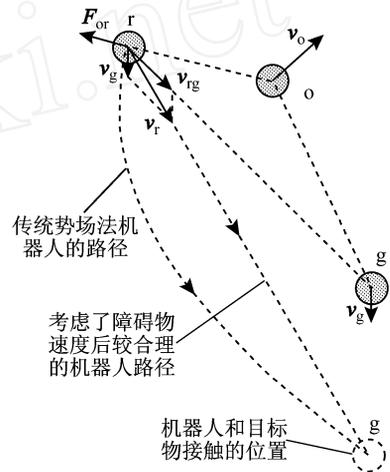


图 2 动态环境下传统人工势场法的缺陷

Fig. 2 The problem of traditional artificial potential field method in dynamic environment

为了解决上述问题,将障碍物的速度矢量引入人工势场法,作为对合力的一个影响因子^[6,7].如图 3 所示,假设在某时刻 t_0 ,目标物(足球)的速度是 v_g ;机器人的速度是 v_r ,它可分解为目标物速度 v_g 及相对于目标物的速度 v_{rg} ,方向由机器人指向目标物.具体关系如下:

$$v_r = v_{rg} + v_g \quad (2)$$

$$= v_{rg} - v_g \quad (3)$$

$$= \begin{cases} \arcsin\left(\frac{|v_r| \sin}{|v_g|}\right) / |v_g| & 0 \\ 0 & |v_g| = 0 \end{cases} \quad (4)$$

障碍物的绝对速度为 v_o ,同样可以分解为 v_{og} 和 v_g ;同时 v_o 也可以分解为 v_r 和障碍物相对于机器人的速度 v_{or} .具体关系如下:

$$v_{og} = v_o - v_g \quad (5)$$

$$v_{or} = v_o - v_r \quad (6)$$

而 v_{or} 与障碍物和机器人连线的夹角为 α , 并以逆时针为正. 当 $\alpha \in [0, \pi/2]$ 时, 障碍物实际上是相对远离机器人, 此时机器人没有必要进行避障行为.

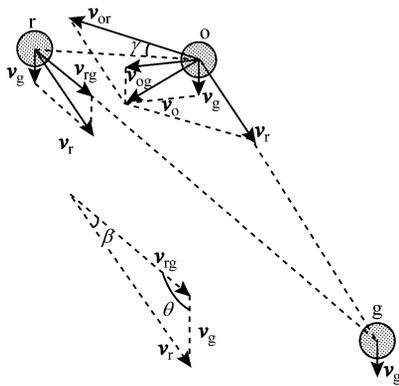


图 3 机器人和障碍物速度向量的分解

Fig. 3 The decomposition of velocity vectors of the robot and obstacle

在 RoboCup 中型组足球机器人比赛中, 双方机器人常处于一种竞争和对抗的状态, 机器人和障碍物都是运动的, 障碍物的绝对速度不能准确地表示其对机器人的影响.

为了解决上述的问题, 本文提出一种障碍物相对机器人的威胁系数 (e_{or}) 的概念, 由障碍物相对机器人的方位、距离和速度确定. 当障碍物位于机器人运动方向的后方, 或者当障碍物相对机器人的距离太远, 或是相对运动方向偏离机器人时, 可以认为障碍物对机器人没有威胁, $e_{or} = 0$; 当机器人与障碍物相撞时, $e_{or} = 1$; 而介于这两者之间时可以由一单调函数决定.

如图 4 所示, 建立机器人的全局坐标系 xOy , 及机器人的局部坐标系 $x'O'y'$, 假设 x' 轴与 v_r 重合. α 、 β 和 γ 都是以逆时针方向为正, 以顺时针方向为负, 且有

$$\alpha = \pi/2 - \beta - \gamma \quad (7)$$

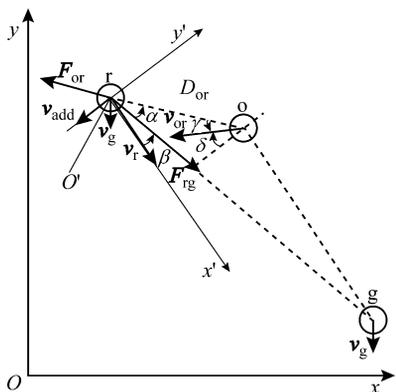


图 4 建立全局及相对坐标系

Fig. 4 The global and relative coordinates

由图 4 可见, 障碍物相对于机器人的方位由 $(\alpha + \beta)$ 决定, 可以划分成 3 个不同的区域.

(1) 当 $\alpha + \beta \in (\pi/2, 3\pi/2)$ 时, 障碍物在机器人运动方向的后方, 此时 $e_{or} = 0$;

(2) 当 $\alpha + \beta \in [0, \pi/2) \cup (0, \pi/2]$ 时, 障碍物在机器人前方, 此时 e_{or} 由其他参数确定;

(3) 当 $\alpha + \beta = 0$ 时, 障碍物在机器人正前方, 此时 e_{or} 由其他参数确定.

首先讨论障碍物在区域 (2) 的情况. 此时, 障碍物相对于机器人的位置 L_{ro} 直接影响障碍物对机器人的相对威胁系数, 当障碍物接近机器人正前方时, 相对威胁系数变大, 而直接影响 L_{ro} 变化的是 v_{or} . 所以 e_{or} 是一个关于 L_{ro} 和 v_{or} 的函数.

假设在一定的范围外, 障碍物对机器人没有威胁, 此时 $e_{or} = 0$; 而在一定的范围以内, 机器人来不及做出对障碍物的避障动作, 必定与障碍物发生碰撞, 此时 $e_{or} = 1$. 最大的临界威胁范围

$$(D_{threat})_{max} = t_{action} / |v_{or}| \cos \alpha \quad (8)$$

$$[0, \pi/2], \quad |v_{or}| > 0$$

式中, t_{action} 为障碍物从进入机器人受威胁区域至撞到机器人所需的时间. 该参数与机器人的物理性能、比赛时所采取的策略以及现场情况有关. 需要说明的是, 当 $\alpha \in [\pi/2, 2\pi)$ 时, 障碍物是向偏离机器人的方向运动; 而当 $|v_{or}| = 0$ 时, 障碍物相对静止, 这时可以认为障碍物对机器人没有威胁, 即 $e_{or} = 0$. 最小的临界范围

$$(D_{threat})_{min} = T_{cycle} / |v_{or}|_{max} \quad (9)$$

式中, T_{cycle} 为机器人软件系统的有效循环周期, 即在该循环周期内, 机器人无法对外界的传感信息进行刷新. 需要说明的是, 该公式未包括 v_{or} 的角度信息, 因为, 当 D_{or} 非常小时, v_{or} 的角度因素可以忽略不计. D_{or} 应满足:

$$D_{or} > (D_{threat})_{max} \quad e_{or} = 0 \quad (10)$$

$$D_{or} < (D_{threat})_{min} \quad e_{or} = 1 \quad (11)$$

可见 e_{or} 是 $f(D_{or}, |v_{or}|, \alpha, \beta, \gamma)$ 的函数, 而且当 D_{or} 变小时, e_{or} 变大; 当 $\alpha + \beta$ 变小时, e_{or} 变大. 而 L_{ro} 的变化由 v_{or} 决定. 设 t_1 为障碍物移动到 $(D_{threat})_{min}$ 时所需要的时间, 而 t_2 为障碍物移动到 v_r 方向上时所需要的时间,

$$t_1 = \frac{D_{or} - (D_{threat})_{min}}{|v_{or}| \cos \alpha} \quad D_{or} > (D_{threat})_{min} \quad (12)$$

$$t_2 = \frac{(\alpha + \beta) D_{or}}{|v_{or}| \sin \alpha} + 0 \quad (13)$$

则 $|v_{or}| > 0$, e_{or} 可以简化成 $f(t_1, t_2)$ 的函数, 而且 e_{or} 是 t_1 和 t_2 的减函数. 根据比赛的实际经验, 得出一

个 e_{or} 的简化模型:

$$e_{or} = k_1 \frac{T_{cycle}}{t_1} + \frac{k_2}{t_2} + k_3 \quad (14)$$

将式(12)和(13)代入式(14)可得

$$e_{or} = k_1 \frac{T_{cycle} |v_{or}| \cos}{D_{or}} + \frac{k_2 |v_{or}| \sin}{(+) D_{or}} + k_3 \quad (15)$$

$$+ [- / 2, 0) \quad (0, / 2]$$

式中, k_1 、 k_2 和 k_3 为参数, 根据系统参数和实际情况进行优化, 并保证 $e_{or} \in (0, 1)$.

当障碍物在区域(3)时, 情况如图5所示.

当 $[- / 2, 3 / 2]$, 或者 $|v_{or}| = 0$ 时, 障碍物远离机器人或者相对静止, 此时可以认为 $e_{or} = 0$. 而当 $(- / 2, / 2)$ 时, 通过类似的分析, 可以得出

$$e_{or} = k_1 \frac{T_{cycle} |v_{or}| \cos}{D_{or}} + \frac{k_2}{|v_{or}| |\sin|} + k_3 \quad (16)$$

$$D_{or} > (D_{threat})_{min}, \quad + = 0$$

$$e_{or} = \begin{cases} k_1 \frac{T_{cycle} |v_{or}| \cos}{D_{or}} + \frac{k_2 |v_{or}| \sin}{(+) D_{or}} + k_3 & D_{or} > (D_{threat})_{min}, \quad + [- / 2, 0) \quad (0, / 2], \quad [0, / 2) \\ k_1 \frac{T_{cycle} |v_{or}| \cos}{D_{or}} + \frac{k_2}{|v_{or}| |\sin|} + k_3 & D_{or} > (D_{threat})_{min}, \quad + = 0, \quad (- / 2, / 2) \\ 1 & D_{or} \leq (D_{threat})_{min} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

当 $e_{or} = 0$ 时, 可以认为机器人不受任何威胁, 所以不需要进行任何避障, 当目标物静止 ($|v_g| = 0$) 时, 机器人运动速度 $|v_r| = |v_r|_{max}$, $v_r = v_{rg}$; 当目标物处于非静止状态 ($|v_g| \neq 0$) 时, 机器人运动速度 $|v_r| = |v_r|_{max}$, $v_r = v_{rg} - v_g$, 按式(4)计算.

当 $e_{or} \in (0, 1)$ 时, 障碍物进入机器人的受威胁区, 引入 v_{or} 在 y 轴上的分量 v_{add} . 而当障碍物在 x 正向轴上时, 引入 v_{or} 在 y 轴上的反向分量 v_{add} , 当向量和为零时, 加入一个扰动常量 c , 以防止陷入势场极小值,

$$v_{add} = \begin{cases} -v_{add} + c & \text{向量和等于零} \\ -v_{add} & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

通过引入目标物的速度 v_g , 并加入各种补偿后最终可以得到基于相对威胁系数的改进型人工势场函数,

$$F_r^* = n_1 F_{rg} + n_2 e_{or} F_{or} + n_3 v_g + n_4 e_{or} v_{add} \quad (19)$$

式中, n_1 、 n_2 、 n_3 和 n_4 为参数, 需要根据实际情况优化.

3 仿真实验

使用 VC6.0 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, 程序计算流程如图6所示.

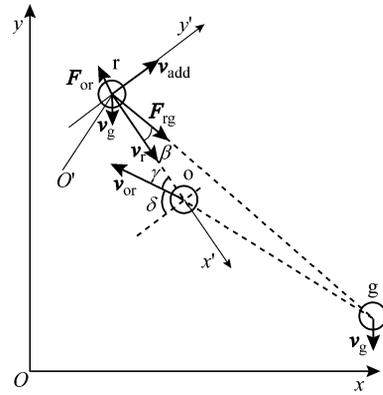


图5 障碍物在机器人正前方时势场法的改进

Fig. 5 The improvement of potential field method when the obstacle in front of the robot

式中, k_1 、 k_2 和 k_3 为参数, 根据实际情况优化并保证 $e_{or} \in (0, 1)$.

综上所述, 相对威胁系数可表示如下:

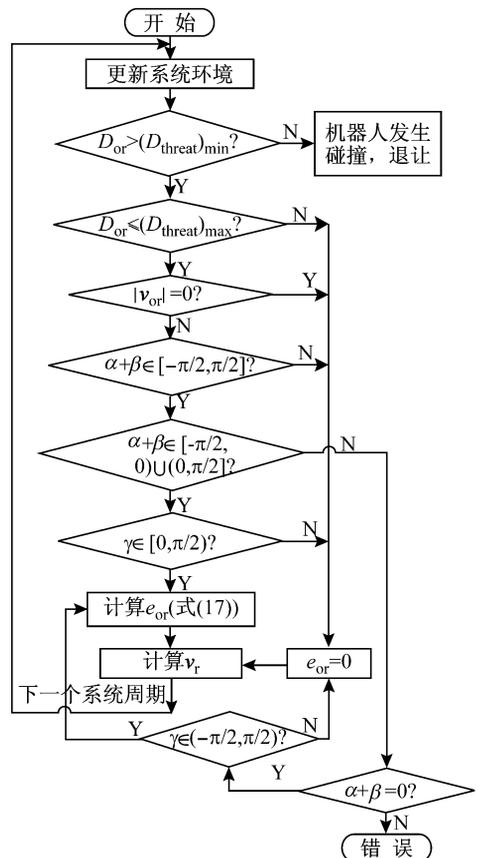


图6 程序的计算流程图

Fig. 6 Computer scheme for the program

机器人、障碍物和足球的初始状态都可由程序设定. 设定在 xOy 坐标系下, 单位为 mm. 机器人的初始坐标为 (2 750, 1 500), 最大速率为 1.5 m/s; 障碍物初始坐标为 (5 000, 2 250), 最大速率 1.5 m/s, 初始速率为 1 m/s, 方向为 -130° ; 球的初始坐标为 (8 000, -750), 初始速率为 0; 系统周期为 100 ms,

$m = n = 2$, $a = 0.01$, $b = 0.04$, $t_{\text{action}} = 1$ s. 仿真结果如图 7(a) 所示. 而把障碍物的初始坐标改为 (6 000, 1 500), 初始速率为 2.5 m/s, 角度为 -150° ; 球的初始坐标为 (8 500, 0) 时, 仿真结果如图 7(b) 和 (c) 所示.

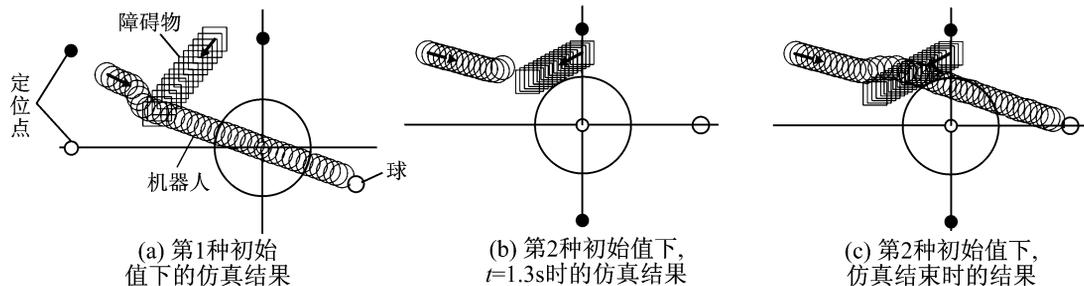


图 7 基于改进人工势场法的机器人路径规划仿真

Fig. 7 The simulation of robot path planning based on a new evolutionary artificial potential filed

4 结 语

在足球机器人比赛这样一个具有对抗性环境和实时路径规划要求的条件下, 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引入人工势场法中, 提出一种基于相对威胁系数的改进型人工势场法机器人路径规划方法, 仿真实验验证了该算法在足球机器人比赛系统中的可行性. 将该算法应用于交龙足球机器人上, 在实际比赛中得到较好的成绩.

为了简化问题的复杂度, 本文所讨论的对抗环境下机器人路径规划问题还只局限于单个机器人上, 对于多个机器人合作的情况有待于作进一步研究.

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(Sup): 45 - 49.
JIA Jian-qiang, CHEN Wei-dong, XI Yu-geng. An overview of the key techniques in autonomous robot soccer [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 2003, 37(Sup): 45 - 49.
- [2] Vadakkepat P K, Tan C, Wang M L. Evolutionary artificial potential field and their application in real time robot path planning [C]// *Proceedings of the 2000 Congress on Evolutionary Computation*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 256 - 263.
- [3] Khatib O. Real-time obstacle avoidance for manipula-

tors and mobile robots [J]. *International Journal of Robotics Research*, 1986, 5(1): 90 - 98.

- [4] Nam Y S, Lee B H, Ko N Y. An analytic approach to moving obstacle avoidance using an artificial potential field [C]// *Proceedings of the International Conference on Intelligent Robots and Systems*. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 1995: 2482 - 2487.
- [5] Gerke M. Genetic path planning for mobile robots [C]// *Proceedings of the American Control Conference*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 1999: 2424 - 2429.
- [6] 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 Yi-ming. Soccer robot collision avoidance control based on evolutionary artificial potential field [J]. *Robot*, 2002, 24(1): 12 - 15.
- [7] 覃 柯, 孙茂相, 孙昌志. 动态环境下基于改进人工势场法的机器人运动规划[J]. 沈阳工业大学学报, 2004, 26(5): 568 - 571.
QIN Ke, SUN Mao-xiang, SUN Chang-zhi. Mobile robot motion planning based on evolutionary artificial potential field in dynamic environment [J]. *Journal of Shenyang University of Technology*, 2004, 26(5): 568 - 571.
- [8] Cheng G, Gu J, Bai T, et al. A new efficient control algorithm using potential field: Extension to robot path tracking [C]// *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*. Piscataway, NJ, USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2004: 2035 - 2040.