

基于改进势场法的足球机器人避障路径规划

钟碧良^{1,2}, 张 祺¹, 杨宜民¹

(1. 广东工业大学 自动化学院, 广东 广州 510090; 2. 茂名学院 自动化系, 广东 茂名 525000)

摘要: 分析了势场法用于移动机器人路径规划中产生目标不可达问题的原因, 提出了改进的斥力势场函数, 将机器人与目标的相对距离考虑在内, 以确保总的势场力在目标位置全局最小. 改进的势场法应用于足球机器人避碰控制. 仿真与应用结果表明, 它能有效地解决在目标附近有障碍物时目标不可达问题.

关键词: 势场法; 目标不可达; 路径规划; 足球机器人

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Anti-collision path planning for soccer robot using modified potential field method

ZHONG Bi-liang^{1,2}, ZHANG Qi¹, YANG Yi-min¹

(1. Faculty of Automation, Guangdong University of Technology, Guangdong Guangzhou 510090, China;

2. Department of Automation, Maoming College, Guangdong Maoming 525000, China)

Abstract: This paper analysed the causes of goal nonreachability when the potential field method was utilized in robot path planning and gave the modified repulsive potential function. In order to ensure global minimum of the total potential in the goal position, the relative distance between the robot and the goal was considered. The modified potential function was applied to anti-collision control of soccer robot. The results of simulation and application have verified that the modified potential field method can solve the problem effectively when obstacles exist near the goal.

Key words: potential field method; goal nonreachable; path planning; soccer robot

1 引言(Introduction)

机器人足球比赛是近年来开展的高科技对抗运动, 以此为平台研究多智能体系统及其协调问题^[1]. 国际机器人足球联盟(FIFA)每年都举行机器人足球世界杯比赛, MiroSot 就是其中的项目之一. 比赛过程中, 为了取得比赛的胜利, 如何对机器人运动进行规划, 防止双方机器人碰撞在一起“顶牛”和无意义碰撞, 因此机器人路径规划是机器人足球比赛的重要环节. 在过去的十几年里, 势场法广泛应用于移动机器人的路径规划. 势场法基本原理是产生一个机器人工作空间, 在这个空间里, 产生吸引力, 吸引机器人到目标位置; 产生斥力, 使机器人远离障碍物^[2]. 由于这种方法数学简单, 使用方便, 因而具有特别的吸引力. 但通过数学分析, 发现它有不足之处. 在以前的研究中, 假定目标离障碍物较远. 这种情况下, 机器人在它目标附近时, 障碍物的斥力忽略

不计, 因而吸引力吸引机器人到达目标位置. 然而在很多实际应用场合, 如足球机器人比赛中, 对方机器人(障碍物)也十分接近目标位置. 在如此情况下, 当本方机器人接近目标时, 它也同时接近障碍物. 如果吸引力势场和排斥势场一样定义^[2], 斥力将大于吸引力, 目标位置不可能达到全局势场最小, 因而机器人在障碍物附近不可能到达目标. 因此本文结合足球机器人比赛, 对斥力的势场函数加以修改, 以使机器人在目标位置, 全局势场最小, 机器人最终能到达目标.

2 势场法存在的问题分析 (Analyzing problems existing in potential field method)

很多文献都介绍各种不同的势场法的势场函数^[2~4], 最为常用吸引力势场函数为

$$U_{\text{att}}(q) = 0.5\xi\rho^m(q, q_{\text{goal}}). \quad (1)$$

这里的 ξ 是一正的比例因子, q 和 q_{goal} 分别代表机器人和目标点在运动空间的位置, $\rho(q, q_{\text{goal}}) = \|q - q_{\text{goal}}\|$

$-q\parallel$ 代表机器人 q 与目标 q_{goal} 的距离; $m=1$ 或 2. 对于 $m=1$, 吸引力势场呈圆锥状, 除在目标点外, 其它点吸引力恒定放大, $U_{\text{att}}(q)$ 是单调的. 对 $m=2$, 吸引力势场是呈抛物线状, 相应的吸引力 $F_{\text{att}}(q)$ 是吸引力势场 $U_{\text{att}}(q)$ 的负梯度.

$$F_{\text{att}}(q) = -\nabla U_{\text{att}}(q) = \xi(q_{\text{goal}} - q), \quad (2)$$
 当机器人接近目标时, 吸引力势场接近于零. 而常用斥力势场函数为^[2]

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} 0.5\eta\left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{goal}})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0, \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0. \end{cases} \quad (3)$$

这里的 η 是一正的比例因子, $\rho(q, q_{\text{obs}})$ 表示机器人与障碍物最短距离, ρ_0 表示障碍物距离影响正常数. ρ_0 的选择应根据障碍物和目标点的具体情况确定, 一般 $\rho_0 \leq \min(d_1, d_2)$, 其中 d_1 是各障碍物间相互距离中最小距离的一半, d_2 是目标点到各障碍物距离的最小者. 相应的斥力为:

$$F_{\text{rep}}(q) = -\nabla U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} \eta\left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0}\right) \frac{1}{\rho^2(q, q_{\text{obs}})} \nabla \rho(q, q_{\text{obs}}), & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0, \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0, \end{cases} \quad (4)$$

则作用于机器人的合力为吸引力和反斥力之和:

$$F_{\text{total}} = F_{\text{att}} + F_{\text{rep}}. \quad (5)$$

F_{total} 决定了机器人运动方向. 当机器人的目标与障碍物很接近时, 结果吸引力减少, 斥力增加. 这样, 机器人被推开而不能到达目标. 在以前文献中, 很少考虑这种情形. 所以有必要进行研究, 修正吸引力和斥力函数表示形式.

由于障碍物在目标附近, 使势场函数值在目标点不是最小, 机器人不能到达目标. 例如: 在图 1 的 X - Y 平面上, 机器人 $q = [x, 0]^T$ 沿 x 轴向目标运动 $q_{\text{goal}} = [0, 0]^T$, 而障碍物 $q_{\text{obs}} = [x_{\text{obs}}, 0]^T$ 是在目标位置的左边, 机器人和目标是在障碍物影响距离之内. 当 $m=2$ 时, 吸引力和斥力势场为

$$U_{\text{att}}(q) = 0.5\xi \cdot x^2, \quad (6)$$

$$U_{\text{rep}}(q) = 0.5\eta\left(\frac{1}{x_{\text{obs}} - x} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2. \quad (7)$$

假设 $x_{\text{obs}} = 0.5, \rho_0 = 2, \xi = \eta = 1$, 关于 x 变化的总的势场变化图如图 2 所示. 从图 2 看出 $x = x_{\text{goal}} = 0$ 并不是总的势场最小. 在 $x = -0.5$, 总的势场为零, 机器人只能停在 $x = -0.5$. 虽然在机器人这一

边没有障碍物, 但机器人不可能到达目标.

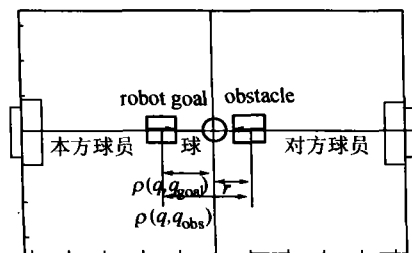


图 1 机器人、目标和障碍物位置示意图
Fig. 1 Location sketch map of robot, goal and obstacle

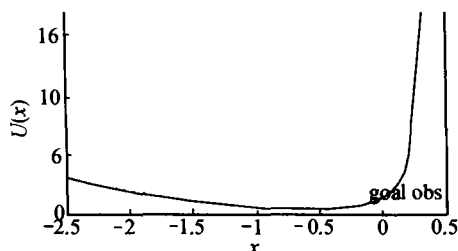


图 2 在一维空间里势场函数的变化
Fig. 2 Variety potential function variety in a 1-D case

为了克服这个问题, 势场斥力函数应将机器人与目标相对距离考虑在内, 对斥力函数进行修正, 以使势场力在目标点总和为最小.

3 改进的斥力势场函数 (Modified repulsive function)

上面分析可知, 当目标点是在障碍物影响范围之内时, 随着机器人接近目标, 斥力也增加, 因而总的势场力在目标点不是全局最小, 机器人不能到达目标, 产生了目标不可达的问题. 为了使机器人在目标位置总的势场力最小, 必须构造出一新的斥力势场函数, 它能随着机器人到达目标, 斥力为最小. 构造的斥力函数在公式(3)基础上修改为:

$$U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} 0.5\eta\left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0}\right)^2 \rho^n(q, q_{\text{goal}}), & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0, \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0. \end{cases} \quad (8)$$

其中: $\rho(q, q_{\text{obs}})$ 是机器人与障碍物的最短距离, $\rho(q, q_{\text{goal}})$ 机器人与目标的距离, ρ_0 是障碍物影响的距离, 且是正的常数. n 为待定的优化参数.

与式(3)相比较, 引入 $\rho(q, q_{\text{goal}})$. 这样, 当机器人向着目标点运动时, 且到达目标点时, $\rho(q, q_{\text{goal}})$ 为零, 则式(2)吸引力和式(8)对应的斥力为零, 从而保证机器人到达目标时, 总的势场力 $F_{\text{total}} = F_{\text{att}} + F_{\text{rep}}$ 为零. 图 3 显示了当 $m = n = 2, \xi = \eta = 1$,

二维空间情况.目标是在系统坐标原点上,障碍物是在圆心为(1,0),半径为0.5的圆内,图3看出总势场力在目标处为最小值.

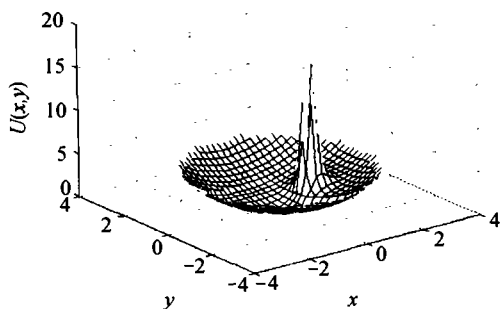


图3 在二维空间里新的势场函数的变化
Fig. 3 New potential function variety in a 2-D case

势场函数应有这样特性,总的势场力推动机器人远离障碍物,拉着机器人向着目标.根据式(8),当机器人不在目标位置,即 $q \neq q_{\text{goal}}$, 斥力为:

$$F_{\text{rep}}(q) = -\nabla U_{\text{rep}}(q) = \begin{cases} F_{\text{rep1}} n_{\text{OR}} + F_{\text{rep2}} n_{\text{RG}}, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) \leq \rho_0, \\ 0, & \text{if } \rho(q, q_{\text{obs}}) > \rho_0, \end{cases} \quad (9)$$

其中

$$F_{\text{rep1}} = \eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho^n(q, q_{\text{goal}})}{\rho^2(q, q_{\text{obs}})}, \quad (10)$$

$$F_{\text{rep2}} = 0.5n\eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2 \rho^{n-1}(q, q_{\text{goal}}). \quad (11)$$

$n_{\text{OR}} = \nabla \rho(q, q_{\text{obs}})$ 和 $n_{\text{RG}} = -\nabla \rho(q, q_{\text{goal}})$ 是两个单位矢量,分别指向障碍物与机器人、机器人与目标.两个斥力关系和总的势场力如图4所示.从图中看出 $F_{\text{rep1}} n_{\text{OR}}$ 推力推动机器人远离障碍物, $F_{\text{rep2}} n_{\text{RG}}$ 吸引机器人向目标移动.

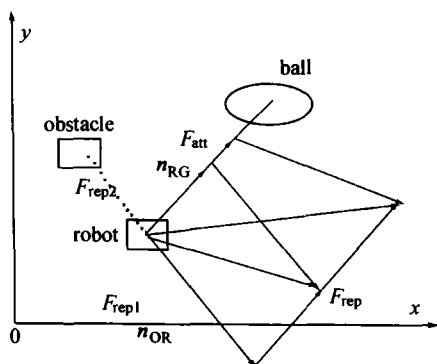


图4 新的势场合力示意图
Fig. 4 New potential total force sketch map

从式(8),当 $n = 0$,新的势场函数变为常规的

势场函数.构造新的势场函数需考虑目标信息,这里取 $n > 0$.

现在讨论选择取不同的 n 时数学特性, n 的取值范围为: $0 < n < 1$, $n = 1$, $n > 1$. 根据式(10)和式(11),当 $\rho(q, q_{\text{obs}} < \rho_0)$ 和 $\rho(q, q_{\text{goal}}) \neq 0$, 即机器人在障碍物影响范围之内和不在目标位置,有下式(10),(11)成立.从式(10)和(11)知,随着机器人接近目标, $\rho(q, q_{\text{goal}})$ 趋于零.因而第一项 $F_{\text{rep1}} n_{\text{OR}}$ 趋于零,第二项 $F_{\text{rep2}} n_{\text{RG}}$ 驱动机器人接近目标.

对于 $n = 1$, $\rho(q, q_{\text{obs}}) < \rho_0$ 和 $\rho(q, q_{\text{goal}}) \neq 0$, 式(10)和(11)变为

$$F_{\text{rep1}} = \eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right) \frac{\rho(q, q_{\text{goal}})}{\rho(q, q_{\text{obs}})}, \quad (12)$$

$$F_{\text{rep2}} = 0.5n\eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2, \quad (13)$$

随着机器人接近目标,第一项 $F_{\text{rep1}} n_{\text{OR}}$ 接近于零,第二项 $F_{\text{rep2}} n_{\text{RG}}$ 推动机器人向着目标的力放大接近于一常数:

$$0.5n\eta \left(\frac{1}{\rho(q, q_{\text{obs}})} - \frac{1}{\rho_0} \right)^2.$$

对于 $n > 1$,从式(8)得出,当机器人接近目标时,总的势场力最终为零.

图5显示了在图1的总的势场函数的各种情况.这时 $\xi = \eta = 1$, $m = 2$, $n = 0.5, 1, 2, 3$, $q_{\text{goal}} = [0 \ 0]^T$, $q_{\text{obs}} = [0.5 \ 0]^T$.当 $n > 1$ 时,只有全局最小值.而 $n < 1$ 时,曲线发生形变, n 越小,形变将严重,且有局部最小值.所以实际应用中,最好取 $n > 1$ 的值.对于 $n < 1$, 应进行修正,避免产生局部最小值.

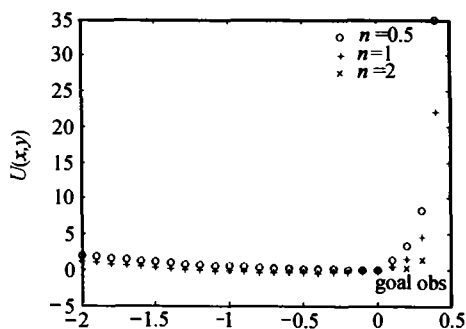


图5 在一维空间里新的势场函数的变化
Fig. 5 New potential function variety in a 1-D case

4 仿真结果(Simulation results)

1) 障碍物与目标距离不同时机器人的路径.

选择 $m = n = 2$, $\zeta = 1$ 和 $\eta = 0.1$, $\rho_0 = 0.84$. 从图6看出,当障碍物在不同的位置时,机器人能避

开障碍物,实现防碰撞控制;而当机器人接近目标且在障碍物影响范围之内,从(b)中看出,机器人成功地避开障碍物到达目标位置。

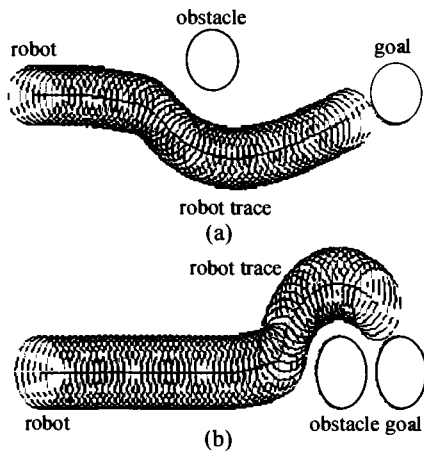


图6 障碍物与目标距离不同时机器人的路径
Fig. 6 Robotic path when the distance is different between obstacle and goal

2) 在足球机器人比赛中的应用.

上述仿真看出,新的势场法能有效地解决障碍物靠近目标时的机器人不可达问题.这为足球机器人防碰撞提供了准确控制.由于机器人比赛是协作方式的竞争性球类运动.在路径规划中要考虑足球机器人比赛的障碍物特点^[5]:无关性障碍物、协作障碍物和竞争性障碍物——当本方的某一机器人在执行拦截、射门等动作时,球对于本方另外的机器人就是无关性障碍物;当本方的某个机器人在运动时,本方其它机器人是它的协作性障碍物;对方机器人是本方机器人的竞争性障碍物.这三种障碍物都不会静止或恒速或方向不变.特别是竞争性障碍物的存在:对方机器人为了实现防守或进攻策略,采用贴身防守、拦截或阻挡动作,主动相碰.将上述改进势场法应用于足球机器人的路径规则,仿真结果表明,效果较好.它基本上解决了在比赛过程中,拦截相碰、迎头相碰和同向相撞的问题.

5 结论(Conclusion)

本文主要讨论了当障碍物靠近目标,机器人不可达的路径规划问题.为了解决这个问题,提出了新的势场法的斥力势场函数,将机器人与目标、障碍物距离加以考虑,它确保了机器人在目标位置势场力最小.通过细心选择势场函数的相关参数,能消除所有路径的局部最小,同时保证机器人到达目标,而又不与别的机器人相撞.仿真结果表明,新的势场法能有效地解决障碍物靠近目标时的机器人不可达问题.但在足球机器人比赛防碰撞控制中,还要考虑本方机器人和对方机器人运动速度和方向、动态或静态,并对总的势场函数进行修改,可能对防碰撞控制更为有效,这些工作还要进一步研究.

参考文献(References):

- [1] KIM J H. Cooperation multi-agent robot system: From the robot soccer perspective [A]. *Proc MiroSot '97* [C]. Taejon: KAIST, 1997: 5 - 16.
- [2] RIMON E. Exact robot navigation using artificial potential function [J]. *IEEE Trans on Robotics Automation*, 1992, 8(2): 501 - 518.
- [3] KOREN Y, BORENSTEIN J. Potential filed methods and inherent limitations for mobile robot [A]. *Proc IEEE Conf Robotics and Automation* [C]. Sacramento, CA: [s. n.], 1991: 1398 - 1404.
- [4] ALSULTAN K S, AIYU M D S. A new potential field-based algorithm for path planning [J]. *J Intelligent Robotics System*, 1996, 17 (3): 265 - 282.
- [5] ZHANG Qi, YANG Yimin, LI ying. Soccer robot anti-collision control based on modified artificial potential method [J]. *Robot*, 2002, 24(1): 13 - 15.

作者简介:

钟碧良 (1963 —), 男, 博士研究生, 副教授, 主要研究方向为多智能体系统, 足球机器人, 智能控制等. E-mail: zhangbiliang@163.net;

张 祺 (1975 —), 男, 博士研究生, 主要研究方向为足球机器人多智能体系统;

杨宜民 (1946 —), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为足球机器人, 多智能体系统, 微机器人, 电机智能控制等.