

基于动态围捕点的多机器人协同策略

李瑞珍^{1,2}, 杨惠珍^{1,2}, 萧丛杉^{1,2}

(1.西北工业大学 航海学院, 西安 710072; 2.水下信息与控制重点实验室, 西安 710072)



摘要: 为使机器人有效地围捕移动目标, 提出了一种基于动态围捕点的多机器人协同围捕策略。根据目标的位置, 动态设置围捕点, 采用协商法为围捕机器人分配最佳围捕点, 建立了一个综合描述围捕路径损耗和有效包围效果的目标函数, 通过优化该目标函数获得围捕机器人的最优航向角, 从而实现了围捕机器人的在线路径规划。仿真结果表明了该算法的有效性。

关键词: 协同围捕; 动态围捕点; 协商法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Cooperative Hunting Strategy for Multi-mobile Robot Systems Based on Dynamic Hunting Points

LI Rui-zhen^{1,2}, YANG Hui-zhen^{1,2}, XIAO Cong-shan^{1,2}

(1. College of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China; 2. Underwater Information and Control Laboratory, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to surround the moving target by hunting agents beneficially, a multi-agent cooperative hunting strategy based on dynamic hunting points is proposed. Desired hunting points are configured dynamically according to the position of the target and the negotiation mechanism is applied to allocate the desired hunting point for each mobile agent. A cost function is established to integrate the path consumption and the surrounding effectiveness. The desired orientation angle for each agent is obtained by optimizing the cost function. Finally, the online path planning of the robot is realized. Simulation results show the effectiveness of the proposed hunting strategy.

Key words: Cooperative hunting; dynamic hunting point; negotiation method

1 引言

机器人系统具有良好的应用前景,但是对于一个多机器人系统而言,将多个机器人简单地组织到一起并不一定能产生预期的效果,反而可能会造成机器人之间的冲突与对抗,导致系统性能下降。因此,必须有机地组织多个机器人构成的群体,通过各个机器人之间的交互,力求提高系统的整体性能。

在理论研究和实际应用等多重需求的推动下,多机器人协作已经成为多机器人学的研究热点之一^[1]。多机器人系统的追捕-逃跑问题在民用和军事领域都具有重要的应用价值^[2],追捕问题涉及目标检测、信息融合、协同任务分配、协同编队控制、

协同目标追踪等多个关键技术,因此多机器人系统追捕问题是研究多机器人系统协作方法的重要途径和平台^[3]。

目前,学者主要基于以下几个方面开展对追捕问题的研究:

① 环境建模: 常见的建模环境有栅格形^[4]、有向图、凸多面体^[5]、三维环境^[6]等。

② 信息互动性: 参与者是否实时知道彼此的运动状况^[5]。

③ 运动方式: 机器人运动的加速度是否有限、敌我速度比是否大于1。

④ 围捕成功的条件: 主要有两种,一是当围

收稿日期: 2016-09-19; 修回日期: 2017-02-13

作者简介: 李瑞珍(1994-),女,河南商丘人,研究生,主要研究方向为多机器人协同制导等(本文通讯作者); 杨惠珍(1974-),女,江西景德镇人,博士,副教授,主要从事水下航行器控制与仿真等方面的教学与科研工作; 萧丛杉(1992-),女,陕西西安人,研究生,主要研究方向为机器人导航与控制等。

捕者与目标的距离小于一个定值,二是围捕者将目标包围导致目标无法移动。

在机器人学中,针对追逃问题的解决方法主要有两种:差分法和组合法^[7]。前者将机器人的物理约束转化为微分约束并进行建模。虽求解过程繁琐,且只能得到局部最优解,但该方法应用范围广,不仅适用于追逃问题,在“同时到达”问题^[8,9]的研究中也有较多应用。后者针对于追逃问题中建模环境较复杂的情况,利用几何学或拓扑学将环境栅格化,然后将追逃问题转化成图论或动态规划等问题来解决。这两种方法的适用性不同,前者的建模环境为连续的时间和空间,后者为离散的。目前基于组合法的研究较多,例如:利用优化方法^[6,10]或模型预测控制^[11,12]等求解追逃策略。本文提出的多机器人围捕策略的新颖之处在于建立了一个描述机器人围捕总路径和对目标围捕效果的目标函数。通过优化该目标函数得到机器人的最佳航向角,从而实现了在线的最优围捕路径规划。

2 问题描述

假设,在一个无限大且无阻碍的二维空间中,有 n 个围捕机器人对一个移动目标进行围捕,如图1所示。

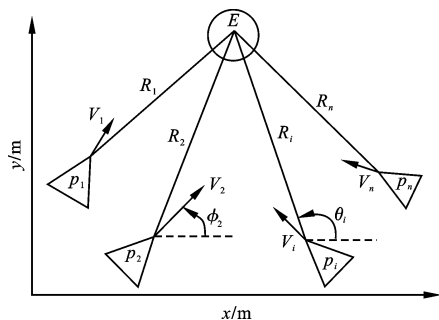


图1 多个机器人协同围捕单个目标

Fig.1 Cooperative hunting of one target by multi agents

用 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 表示 n 个围捕机器人的集合, E 表示移动目标。假设围捕机器人的探测范围大于目标机器人,且探测角度为 2π ,每一个围捕机器人可以探测到目标视线角 θ_i 和相对距离 R_i 。

围捕过程描述如下,围捕机器人探测目标机器人的方位和距离,获得目标的位置信息,其他围捕机器人共享目标位置信息。目标机器人的探测距离远小于围捕机器人,若围捕机器人在目标探测范围外形成包围圈,则围捕成功。

3 围捕问题的数学建模

3.1 围捕机器人运动方程

假设第 i 个围捕机器人 p_i 的位置为 (x_i, y_i) ,速

度为 V ,航向角为 ϕ_i ,则机器人的运动方程如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i = V \cos(\phi_i) \\ \dot{y}_i = V \sin(\phi_i) \\ \dot{\phi}_i = u_i \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_i 为机器人 p_i 的控制输入。

3.2 目标安全域

假设第 i 个机器人探测到目标相对于机器人的视线角为 θ_i ,距离为 R_i ,则得到目标坐标 (x_m, y_m) 为:

$$\begin{cases} x_m = x_i + R_i \cos \theta_i \\ y_m = y_i + R_i \sin \theta_i \end{cases} \quad (2)$$

围捕任务中,当目标探测到围捕机器人时一般会采取逃逸方式,为避免目标逃逸增加围捕难度,文献[4]提出目标安全域的概念,在当围捕机器人沿着规划路径前进且均未到达期望围捕点前,安全域被视为各机器人的禁入域,以避免目标发现机器人而主动逃逸。由于文献[4]的建模环境是栅格形式的,所以把安全域定义为一个正方形,本文的环境是连续的,未进行栅格化,因此将安全域定义为一个以目标机器人的位置为圆心,以其探测长度为半径的圆形区域,即:

$$DM_{safe}(E) = \{(x, y) | (x, y) \in G, G: \sqrt{(x_m - x)^2 + (y_m - y)^2} < f\} \quad (3)$$

式中, (x, y) 为安全域内任意一点的坐标;

$DM_{safe}(E)$ 为目标的安全域; (x_m, y_m) 为目标的位置坐标; f 为目标机器人的探测距离。

3.3 围捕点

建立目标安全域之后,以目标安全域的边界作为围捕圈,在围捕圈上均匀的布设围捕点,为了避免冲突,本文给每一个机器人都分配一个围捕点,所以在安全域周围需要均匀布设 n 个围捕点,布设方法,如图2所示。

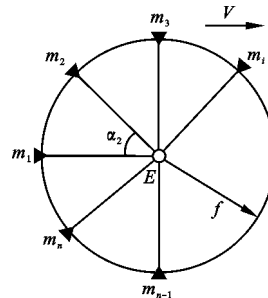


图2 围捕点的分配

Fig.2 The distribution of hunting points

图2中, V 为目标的运动方向,由于围捕点是根据目标的位置 (x_m, y_m) 、运动方向 ψ 以及探测距

离 f 决定的,以目标速度的反方向与围捕圈的交点作为第一个围捕点 m_1 , 则围捕点 m_i 的坐标表示如下:

$$\begin{cases} x_{mi} = x_m + f \times \cos(\psi + \pi - \alpha_i) \\ y_{mi} = y_m + f \times \sin(\psi + \pi - \alpha_i) \end{cases} \quad (4)$$

$$\alpha_i = \frac{2\pi(i-1)}{n} \quad i=1,2,\dots,n \quad (5)$$

4 基于动态围捕点的协同围捕方法

4.1 协商法分配最佳围捕点

围捕点确定后,还要解决如何将围捕点分配给机器人的问题。目前最常用的算法是贪婪算法^[13,14],该算法主要通过最小化围捕机器人与目标的距离来实现分配,应用简单,但会出现分配“死锁”的情况。本文采用基于距离均衡原则的最佳围捕点协商分配方法。该方法首先利用基于距离最近原则的贪婪算法,通过计算机器人与围捕点的距离,对围捕点进行预分配,然后针对重合分配的围捕点根据协商法进行再分配^[4]。

令 M_j 代表分配给第 j 个围捕点的围捕机器人的数目,初始化 $M_j = 0$, $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 代表围捕机器人的集合,其中,第 i 个机器人的位置坐标为 (x_i, y_i) , $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$ 代表围捕点的集合,其中,第 j 个围捕点的位置坐标为 (x_{mj}, y_{mj}) 。

算法步骤如下:

- ① 初始化围捕机器人和各国捕点的位置;
- ② 计算机器人 p_i 与围捕点 m_j 的距离 D_{ij} ; 其

中 $D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_{mj})^2 + (y_i - y_{mj})^2}$, $(i, j = 1, 2, \dots, n)$

③ 针对机器人 $p_i, i=1, 2, \dots, n$ 计算 $D_{ij}, j=1, 2, \dots, n$ 的最小值 D_{is} , 将围捕点 m_s 分配给机器人 p_i , 令 $M_s = M_s + 1$;

④ M_j 的值共有三种情况:

case1: $M_j = 0$, 则围捕点 m_j 未分配;

case2: $M_j = 1$, 则该点匹配成功,记录下匹配成功的围捕机器人 p_i 和期望围捕点 m_j , 并将其从集合 P 和 M 中移除, 令 $n = n - 1$;

case3: $M_j > 1$, 将围捕点 m_j 分配给距离其最远的机器人 p_i , 将 p_i 与 m_j 分别从集合 P 和 M 中移除, 并令 $n = n - 1$;

⑤ 若 $n = 0$, 表明所有围捕点都分配成功, 否则, 转向①继续分配。

4.2 建立目标函数

文献[15]以对策论为基础, 建立多枚导弹协同

攻击目标的对策模型, 利用距离影响因素和有效包围系数来衡量局势优劣, 受此启发, 本文提出了一个优化设计机器人路径的目标函数。

假设目标在 k 时刻的位置为 (x_m^k, y_m^k) , 与围捕机器人 p_i 匹配的最佳围捕点为 m_j , 定义下面目标函数:

$$J(\phi) = w_1 \times \sum_{i=1}^n \sqrt{(x_i^{k+1} - x_{mj}^k)^2 + (y_i^{k+1} - y_{mj}^k)^2} + w_2 \times \sum_{j=1}^n \left| \alpha_j - \frac{2\pi}{n} \right| \quad (6)$$

式中, (x_i^{k+1}, y_i^{k+1}) 为 $k+1$ 时刻围捕机器人 p_i 的位置, 假设围捕机器人的航向角为 ϕ_i^{k+1} , 则 $\begin{cases} x_i^{k+1} = x_i^k + V \cos \phi_i^{k+1} \\ y_i^{k+1} = y_i^k + V \sin \phi_i^{k+1} \end{cases}$, $\phi = [\phi_1^k \dots \phi_n^k]$ 。

公式(6)的第一项表示每个围捕机器人与其对应最佳围捕点的距离的总和, 代表围捕路径的总长度; 第二项表示角度 α_j 与期望值 $2\pi/n$ 的偏差和, 其中, α_j 代表相邻两个围捕机器人与目标之间的夹角, $2\pi/n$ 代表当所有机器人均匀分布在目标周围时, 相邻机器人与目标的夹角, 因此该项描述了机器人的围捕效果。 w_1, w_2 分别为相对距离以及包围效果所占的权重, 两者的约束关系为 $w_1 + w_2 = 1$ 。该目标函数综合了围捕路径损耗和有效包围效果, 通过优化获得最佳的围捕路径。

考虑到机器人的机动性约束, 在固定时间内航向角的变化范围是有限的, 故令 $\phi_i^k - \phi_0 \leq \phi_i^{k+1} \leq \phi_i^k + \phi_0$, 表示 $k+1$ 时刻的航向角在 k 时刻的航向角顺时针或逆时针旋转 ϕ_0 的范围内。这样的限制条件既符合实际机器人系统的机动性要求, 也有利于提高求解效率。

因此, 求解下面最优化问题, 获得机器人的最优航向角, 从而得到围捕机器人的最优路径:

$$\begin{aligned} \min J(\phi) \\ \text{s.t. } \phi_i^k - \phi_0 \leq \phi_i^{k+1} \leq \phi_i^k + \phi_0 \end{aligned} \quad (7)$$

本文利用 SQP (Sequential Quadratic Program) 序列二次规划法求解(7)式, 得到当前时刻各个围捕机器人的最优航向角。求得机器人的最优航向角 ϕ_i^δ 后, 利用比例控制法得到机器人的控制输入:

$$u_i = k(\phi_i - \phi_i^\delta) \quad (8)$$

4.3 基于动态围捕点的多机器人围捕策略

围捕策略算法具体描述如下:

Step1 根据探测到的目标位置, 利用式(3)建立目标安全域。

Step2 利用式(4)和(5)设置围捕点, 根据协商法为围捕机器人分配最佳围捕点。

Step3 求解(7)式, 得到围捕机器人的期望航向角。

Step4 利用(8)式控制机器人向分配的围捕点运动。

Step5 判断围捕机器人是否全在相应的围捕点, 若是, 则围捕结束, 否则转向 step1 继续进行围捕。

5 仿真实验

本文对三个机器人围捕一个目标的情况进行仿真。首先分析目标函数中距离影响系数与有效包围系数的权重对围捕效果的影响。假设目标沿着直线 $y = x$ 作匀速直线运动, 初始位置为 $(100, 100)$, 速度为 5 m/s , 目标的探测距离为 $f = 5 \text{ m}$ 。三个围捕机器人的初始位置为 $(0, 10)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(10, 0)$, 初始航向角均为 0° , 围捕机器人的速度为 8 m/s , 航向角的旋转范围为 $\phi_0 = 10^\circ$ 。

$w_1 = 0.9, w_2 = 0.1$ 和 $w_1 = 0.1, w_2 = 0.9$ 两种情况下机器人的围捕轨迹, 如图3和图4所示。

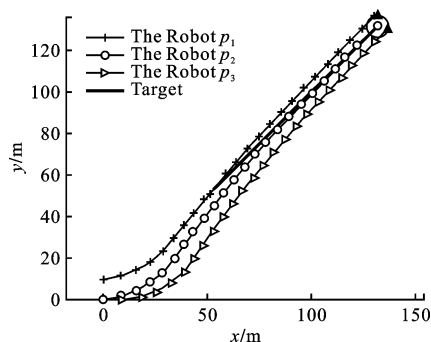


图3 $w_1 = 0.9, w_2 = 0.1$ 时三个机器人和目标的轨迹

Fig.3 Trajectories of three robots and the target in the simulation with $w_1 = 0.9, w_2 = 0.1$

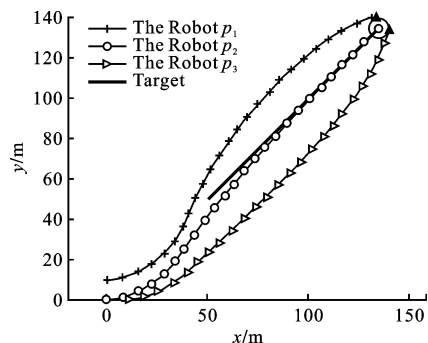


图4 $w_1 = 0.1, w_2 = 0.9$ 时三个机器人和目标的轨迹

Fig.4 Trajectories of three robots and the target in the simulation with $w_1 = 0.1, w_2 = 0.9$

由仿真结果可以看出, 三个围捕机器人均达到了期望围捕点, 实现了对目标的围捕。在仿真过程

的前 8 s ($x < 50 \text{ m}$), 两种权重下的围捕机器人运动轨迹没有明显差别。这是因为在仿真的初始阶段, 机器人与目标的距离较远, 所以目标函数第一项的值较大, 约为 400 , 而第二项的最大值小于 2π , 所以在仿真的初始阶段两项权重的不同对运动轨迹的影响不大。但在 8 s 后 ($x > 50 \text{ m}$), 图4中三个围捕机器人有明显的相互分开的趋势, 与图3比较, 围捕路径总长度较长, 表明有效包围系数的权重越大, 围捕趋势越明显, 同时路程损耗越大。

接下来, 验证在不同初始态势情况下目标存在机动时的围捕效果。

第一种初始态势: 三个机器人的初始位置分别是 $(0, 0)$ 、 $(0, 10)$ 、 $(10, 0)$, 目标沿着直线 $y = 50$ 做蛇形运动, 目标初始位置为 $(50, 50)$ 。围捕机器人和目标的运动轨迹, 如图5所示。

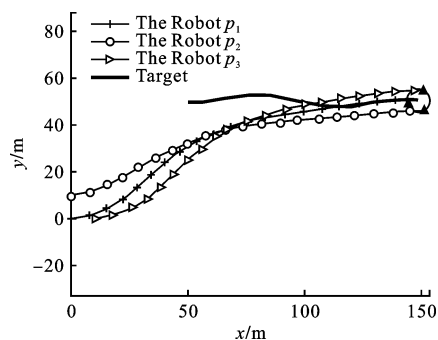


图5 三个机器人和目标的轨迹 (case1)

Fig.5 Trajectories of three robots and the target of case 1

第二种初始态势: 下面验证在围捕机器人与目标的初始距离不同的情况下机器人的围捕效果。设置三个机器人的初始位置分别是 $(0, 50)$ 、 $(0, 0)$ 、 $(10, 0)$, 目标沿着直线 $y = x$ 做蛇形运动, 其余条件不变。机器人和目标的运动轨迹, 如图6所示。

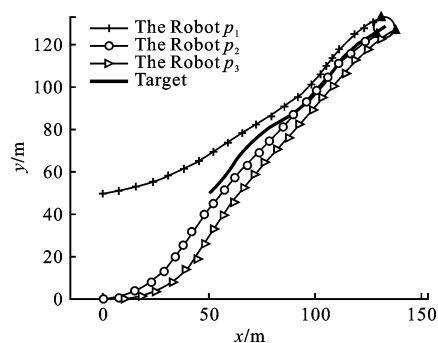


图6 三个机器人和目标的轨迹 (case2)

Fig.6 Trajectories of three robots and the target of case 2

上述仿真结果表明, 围捕机器人在不同的初始态势情况下, 均实现了对目标的围捕。

6 结论

本文基于机器人和目标的连续运动特性来研

究多机器人围捕问题,所构建的围捕目标函数整合了围捕路径损耗和有效包围效果,通过在限定的航向角范围内对目标函数进行优化,既符合了机器人运动的机动性要求,也降低了优化求解的计算量,并获得了较好的围捕效果。另外,比例控制方法易于工程实现,该方法对水下机器人等机动性有限,运动控制复杂的机器人围捕策略具有重要参考价值。

后续将利用地面机器人开展实验研究,并进一步针对水下机器人开展协同围捕策略的研究。

参考文献(References)

- [1] 陈阳舟,王文星,代桂平. 基于角度优先的多机器人围捕策略[J]. 北京工业大学学报,2012,(5):716-720.
Chen Y Z, Wang W X, Dai G P. Hunting Strategy for Multi-mobile Robots System Based on Angle First[J]. 2012,(5):716-720.
- [2] 李丹勇,宋永端. 面向任务的多机器人协调运动控制[J]. 控制工程, 2010,17(s1):117-120.
Li D Y, Song Y D. Task-Oriented Multi-Robot Coordinated Motion Control[J]. Control Engineering, 2010,17(s1):117-120.
- [3] 丁磊. 多机器人协作追捕策略的研究[D]. 合肥工业大学,2012.
Ding L, The Research of Multi-Robots Cooperative Hunting Strategy [D]. Hefei University of Technology, 2012.
- [4] 胡俊, 朱庆保. 基于动态预测目标轨迹和围捕点的多机器人围捕算法[J]. 电子学报, 2011, 39(11):2480-2485.
Hu J, Zhu Q B. A Multi-Robot Hunting Algorithm Based on Dynamic Prediction for Trajectory of the Moving Target and Hunting Points[J]. ACTA ELECTRONICA SINICA. 2011, 39(11):2480-2485.
- [5] Yasuyuki S, Hirofumi O, Tadashi M, et al. Cooperative capture by multi-agent using reinforcement learning application for security patrol systems[C]// Control Conference. 2015.
- [6] Alexopoulos A, Schmidt T, Badreddin E. A pursuit-evasion game between unmanned aerial vehicles[C]// International Conference on Informatics in Control. 2015.
- [7] Chung T H, Hollinger G A, Isler V. Search and pursuit-evasion in mobile robotics[J]. Autonomous Robots, 2011, 31(4):299.
- [8] Jeon I S, Lee J I, Tahk M J. Impact-time-control guidance law for anti-ship missiles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2006, 14(2): 260-266.
- [9] Lee J I, Jeon I S, Tahk M J. Guidance law to control impact time and angle[J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2007, 43(1): 301-310.
- [10] Amigoni F, Basilico N. A game theoretical approach to finding optimal strategies for pursuit evasion in grid environments[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 2012.
- [11] Eklund J M, Sprinkle J, Sastry S S. Switched and symmetric pursuit/evasion games using online model predictive control with application to autonomous aircraft[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2012, 20(3): 604-620.
- [12] Teatro T A V, Eklund J M. Nonlinear model predictive control for omnidirectional robot motion planning and tracking[C]// Electrical & Computer Engineering. IEEE, 2013.
- [13] 刘莹, 祝毅鸣. 水下机器人最优逃生线路规划研究与仿真[J]. 计算机仿真, 2015, 32(3):352-355.
Liu Y, Zhu Y M. Research and Simulation of Optimal Escape Route Planning for Underwater Vehicle[J]. Computer Simulation, 2015,32(3):352-355.
- [14] Shapero S A, Hughes H, Tuuk P. Adaptive semi-greedy search for multidimensional track assignment[C]// International Conference on Information Fusion. IEEE, 2016.
- [15] 肖增博, 雷虎民. 多导弹协同攻击对策制导规律研究[J]. 弹箭与制导学报, 2010, 30(5):32-34.
Xiao Z B, Lei H M. The Research on Game Guidance Law Based on Multiple Missiles Cooperative Engagement[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance. 2010, 30(5):32-34.