

群机器人自组织围捕多个入侵者的链阵方法

徐望宝, 孙明炎[†]

(辽宁科技大学 电子与信息工程学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 针对群机器人在二维给定区域自组织围捕多个入侵者问题提出了一种链阵方法. 链阵中的机器人分为链首和链节, 其中链首不但会环绕围捕目标运动而且能也只有它们能发布招募信息, 以招募更多的机器人参与围捕同时又能使参与者不致太多. 链节机器人则只需简单地跟随leader不停运动以形成链阵. 机器人的运动由人工力矩运动控制器驱动, 该控制器能使机器人在完成任务的同时而又不会发生碰撞. 仿真结果表明, 链阵方法可以根据实际需求动态调整链阵中的机器人数量, 能使围捕不同目标的机器人结成统一的链阵. 链阵的不停移动则有利于机器人在数量较少时包围入侵者.

关键词: 群机器人系统; 自组织系统; 人工力矩法; 链阵方法

引用格式: 徐望宝, 孙明炎. 群机器人自组织围捕多个入侵者的链阵方法. 控制理论与应用, 2023, 40(1): 94 – 102
DOI: 10.7641/CTA.2021.10243

A self-organized chain formation method for swarm robots to enclose multiple intruders

XU Wang-bao, SUN Ming-yan[†]

(School of Electronics and Information Engineering, University of Science and Technology Liaoning, Anshan Liaoning 114051, China)

Abstract: A self-organized chain formation method is proposed for swarm robots to enclose multiple intruders in a given 2-D area. A chain formation is built by chain heads and chain links, where chain heads not only move around their hunting targets, but also send recruitment information to recruit more robots to participate in the chain formation while the robot number in the formation will not be too large. The robots that act as chain links will only follow their leaders to move continuously so that a chain formation can be built finally. The motions of the robots are driven by their artificial moment motion controllers, which can make them fulfill tasks while collision can be avoided. Simulation results indicate that the proposed method can adjust the robot number in a chain formation dynamically and can make the robots with different hunting targets move together to form a chain formation. In the case the robot number is comparatively small, the continuous movements of the robots are helpful for them to enclose the intruders.

Key words: swarm-robot systems; self-organizing systems; artificial moment method; chain formation method

Citation: XU Wangbao, SUN Mingyan. A self-organized chain formation method for swarm robots to enclose multiple intruders. *Control Theory & Applications*, 2023, 40(1): 94 – 102

1 引言

机器人协作围捕^[1-2]是机器人学中的一个重要分支, 其核心是研究多个个体能力有限的机器人如何通过协调、协作与协同以完成对灵活性高、相对危险目标的捕获或控制.

近年来, 学者们对多/群机器人协作围捕问题进行了大量研究, 提出了许多围捕策略. 如组建编队或联盟的策略^[3-5]、预测目标轨迹并设置虚拟围捕点策略^[6-10]、合作与博弈策略^[11-12]、基于拍卖的任务分配

策略^[13-14]、循环追踪策略^[15]等. 这些围捕策略虽然很具代表性, 但仅局限于围捕单目标, 而不适用围捕多目标. 针对群机器人围捕多目标, 文献^[16]提出了一种自适应分裂的围捕方法, 使群机器人可分裂成多个子群分别捕获每个目标. 但个体需要获取全局信息, 可拓展性差并且对机器人的硬件要求(如集中决策能力、通信能力)较高.

基于局部信息的自组织围捕策略^[17]由于个体机器人需要处理的信息量相对较少且系统中没有统一

收稿日期: 2021-03-23; 录用日期: 2021-09-30.

[†]通信作者. E-mail: 3076254628@qq.com; Tel.: +86 15531433446.

本文责任编辑: 王龙.

辽宁省自然科学基金项目(20180550470, 2019-ZD-0026), 辽宁科技大学科研专项基金项目(2018TD04)资助.

Supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Province (20180550470, 2019-ZD-0026) and the Special Research Foundation of University of Science and Technology Liaoning (2018TD04).

的领导或指挥, 因此在减小计算量的同时又增强了系统的可拓展性与鲁棒性. 如黄天云等^[18]提出的基于松散偏好规则的围捕方法和张红强等^[19]提出的基于简化虚拟力模型的围捕方法即为自组织围捕单个目标的策略. 在对简化虚拟受力模型进一步改进的基础上, 文献[20]通过为每个机器人分配并动态调整围捕目标的策略, 使得群机器人能自组织地围捕多个动态目标. 但该方法需要事先知道围捕目标的个数和位置. 文献[21]采用分布式算法, 控制一组智能体对集中分布的多动态目标形成统一包围圈并做环航运动. 但该算法仅适用于环境中只有一组集中分布的动态目标且所有目标要同向运动的情况. 根据细菌对药物具有趋化性, 文献[22]研究了在给定区域中群机器人自组织地搜索并围捕多目标的问题. 但个体间的通信范围是基于全局的, 计算量大且所围捕的目标都为静态目标. 另外文献[23–25]等也对群机器人自组织围捕多动态目标的问题进行了研究.

虽然群机器人自组织围捕多动态目标的问题很受关注, 但总的来说, 目前关于该问题的研究还很少, 其中的许多问题还需更深入地研究或完善.

本文主要关注群机器人在军事禁区、涉密区域、储存危险品等区域自组织包围多个入侵者的问题. 即对故意或错误闯入这些区域的入侵者, 群机器人如何自组织形成一个或多个围捕圈以包围这些入侵者, 从而为最后的抓捕、驱逐奠定基础. 对这一问题进行研究具有如下重要意义: 1) 为了防止泄露机密和引发安全事故, 这些区域需要二十四小时不间断巡逻. 由于机器人比人更具耐心、更能时刻保持警惕, 所以采用机器人来担任此巡逻任务不但可降低成本而且能更好地完成任务. 2) 由于入侵者闯入这些区域具有偶然性, 数量和位置也具有随机性, 围捕策略以及参与围捕的机器人数量常需实时调整, 所以需要采用自组织的围捕方法而不是集中式方法.

在冷兵器战争时代^[26], 士兵排列成一定的阵形并且有规律地不停地运动, 能使士兵们的协调和合作更方便, 能达到既保护自己又能以尽量少的士兵包围并战胜尽量多敌人的效果. 受上述战阵思想的启发, 本文提出了一种自组织围捕多个入侵者的链阵方法. 不同于自然界狼群的捕食策略(即通过消耗猎物的能量, 实现最终围捕), 链阵围捕策略是通过结成链阵, 对入侵者的运动方向进行封锁, 阻止其逃逸, 最终达到控制入侵者的目的. 相较动态任务分配的多目标围捕策略, 链阵围捕策略主要优点如下: 1) 围捕过程中可以根据实际需求以发布招募信息的形式即时招募围捕者(机器人)而不需要预先分配, 从而既能避免任务分配所消耗的时间又能降低计算量、节省围捕资源; 2) 围捕者以巡逻的方式, 获取入侵者(动态目标)的位置信息, 而不是预先知道, 从而适用范围更广; 3) 当多

个围捕圈有重叠区域时, 所提方法通过调整个体机器人的leader最终结成一个统一的链阵, 即能对多个入侵者形成一个统一的包围圈; 4) 由于链阵上的机器人会环绕着入侵者主动地运动而不是被动式的追踪或跟随, 因此既能实现以少量机器人围捕尽量多的入侵者的目的又能提高围捕效率.

2 系统模型与问题描述

2.1 围捕者的个体模型

为方便陈述, 本文中 $\beta(A, B)$ 表示以 A 为起点、过点 B 的有向线段的方向角, $|AB|$ 表示线段 AB 的长度. 有向线段方向角的定义及函数 $\text{agl}(x)$ 请参考文献[27].

系统中的机器人称为围捕者, 用 $H_i (i = 1, 2, \dots, p)$ 表示; 被围捕的目标称为入侵者, 用 $P_j (j = 1, 2, \dots, q)$ 表示. 围捕者个体模型与文献[27]完全相同如图1所示, 即是一个半径为 D_H 、圆心为 O_{H_i} 的圆. H_i 有一条起点为 O_{H_i} 、长度为 $2D_H$ 的基本运动方向线(PMDline), 同时沿其PMDline还有一个运动分量. H_i 具有局部通信功能和全方位感应器, 其通信、感知和协调半径分别为 D_{HL} , D_{HV} 和 D_{HC} , 且满足 $D_{HL} > D_{HV} > D_{HC}$. 假设在一个采样时间段内, H_i 可以沿任意方向运动, 但运动步长不能大于其最大运动步幅 S_H .

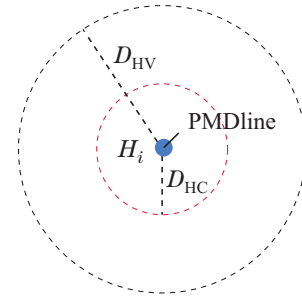


图1 个体机器人模型

Fig. 1 Model of individual robot

围捕者的工作空间为一个二维无障碍的给定区域, $(x_{H_i}(k), y_{H_i}(k))$ 和 $\beta_{H_i}(k)$ 分别为 H_i 在 $t(k)$ 时刻的全局坐标和PMDline的方向角. 一般情况下, H_i 会不停地在给定区域巡逻, 当发现有入侵者闯入, 则会主动与其他围捕者协作以进行围捕. H_i 探测范围内围捕者的集合为 V_{HH_i} 、入侵者的集合为 V_{PH_i} . H_i 协调范围内围捕者和入侵者的集合则分别用 C_{HH_i} 和 C_{PH_i} 表示.

2.2 入侵者的个体模型及其运动方法

入侵者个体模型与围捕者个体模型相比, 差异在于入侵者自身半径为 D_P , 其PMDline长度为 $2D_P$. P_j 的探测半径、协调半径和最大运动步幅则分别为 D_{PV} , D_{PC} , S_P , 且满足 $D_{PV} > D_{PC}$. P_j 探测范围内围捕者的集合为 V_{HP_j} 、入侵者的集合为 V_{PP_j} . P_j 协调范围内围捕者和入侵者的集合则分别表示为 C_{HP_j} 和

C_{PP_j} .

定义 1 设 $H_i, H_m \in V_{HP_j}$, 则当 $\text{agl}(\beta(O_{P_j}, O_{H_m}) - \beta(O_{P_j}, O_{H_i})) > 0$ 时, $\text{agl}(\beta(O_{P_j}, O_{H_m}) - \beta(O_{P_j}, O_{H_i}))$ 为 H_i 到 H_m 的逆向角, 否则 $\text{agl}(\beta(O_{P_j}, O_{H_m}) - \beta(O_{P_j}, O_{H_i})) + 2\pi$ 为 H_i 到 H_m 的逆向角, 其中 H_i 到自身的逆向角为 2π .

定义 2 如果 $H_i, H_m \in V_{HP_j}$ 且在 V_{HP_j} 的所有元素中, H_i 到 H_m 的逆向角最小, 则 H_i 到 H_m 的逆向角为 H_i 对 P_j 的逆向限制角.

如图2所示, V_{HP_j} 中所有元素对 P_j 的逆向限制角有3个.

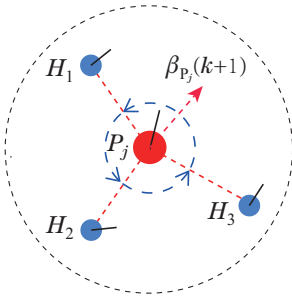


图2 入侵者选择逃逸方向的示意图

Fig. 2 Illustration of the intruders' escape direction

设 V_{HP_j} 中所有元素对 P_j 的逆向限制角组成的集合为 U_{P_j} . 根据人或者其他动物在被追逐时总会选择向视野相对开阔且没有阻拦的方向奔逃的事实, 当 $H_i \in V_{HP_j}$ 且在集合 V_{HP_j} 中的所有围捕者, 其中 H_i 对 P_j 的逆向限制角是最大的, 则 P_j 选择的逃逸方向的计算方法如下:

$$\beta_{P_j}(k+1) = \text{agl}(\beta(O_{P_j}, O_{H_i}) + \frac{\max\{U_{P_j}\}}{2}). \quad (1)$$

P_j 总会令其PMDline指向其逃逸方向, 并沿其PMDline有一个运动分量. 令 S_{P_j} 表示 P_j 的运动步幅, 如果 C_{HP_j} 为空, 则 $S_{P_j} = 0.6S_P$; 否则 $S_{P_j} = S_P$.

同时令 $(x_s(k) \ y_s(k))^T$ 表示 P_j 沿其PMDline方向的运动分量. 那么如果 $\max\{U_{P_j}\} < \alpha$ (α 为给定的临界角), 则 P_j 会认为没有逃逸方向, 所以 P_j 沿其PMDline的运动分量为 $(x_s(k) \ y_s(k))^T = (0 \ 0)^T$. 否则, $(x_s(k) \ y_s(k))^T$ 按式(2)计算, 即

$$\begin{cases} x_s(k) = S_{P_j} \cos \beta_{P_j}(k+1), \\ y_s(k) = S_{P_j} \sin \beta_{P_j}(k+1). \end{cases} \quad (2)$$

令 $C_{P_j} = C_{PP_j} \cup C_{HP_j}$, 则当集合 C_{P_j} 不为空时, C_{P_j} 中的每一个体还会对 P_j 施加一个协调矩以防止发生碰撞. P_j 与 C_{P_j} 中个体间的协调矩与文献[28]基本相同, 详情请参考文献[28]. 它们间的唯一差别在于文献[28]中的 D_{ji} 和 D_S 在本节中需用 λ_P 和 D_{PC} 分别替换. 其中在围捕者对 P_j 的协调矩中, $\lambda_P = 1$; 在 P_m 对 P_j

的协调矩中, λ_P 则按式(3)计算, 其中 $P_m \in C_{P_j}$, $d_P = |O_{P_m}O_{P_j}| - 2D_P$.

令 $(\Sigma \Delta x_c(k) \ \Sigma \Delta y_c(k) \ \Sigma \Delta \beta_c(k))^T$ 表示所有协调矩引起的 P_j 位置及PMDline方向的变化之和. $(\Delta x_{P_j}(k) \ \Delta y_{P_j}(k) \ \Delta \beta_{P_j}(k))^T$ 表示 $t(k)$ 时刻 P_j 的合运动量, 如式(4)所示.

$$\lambda_P = \begin{cases} \frac{D_{PC}}{2\delta}, & d_P \leq 2\delta, \\ \frac{D_{PC}}{d_P}, & 2\delta < d_P \leq 2S_P, \\ 1, & d_P > 2S_P, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \Delta x_{P_j}(k) = x_s(k) + \Sigma \Delta x_c(k), \\ \Delta y_{P_j}(k) = y_s(k) + \Sigma \Delta y_c(k), \\ \Delta \beta_{P_j}(k) = \text{agl}(\Sigma \Delta \beta_c(k)). \end{cases} \quad (4)$$

当 $\sqrt{(\Delta x_{P_j}(k))^2 + (\Delta y_{P_j}(k))^2} > S_P$, 为了保证 P_j 的运动步幅不大于其最大步幅, 需要采用式(5)进行调整.

$$\begin{cases} \Delta x_{P_j}(k) = \frac{\Delta x_{P_j}(k) \cdot S_P}{\sqrt{(\Delta x_{P_j}(k))^2 + (\Delta y_{P_j}(k))^2}}, \\ \Delta y_{P_j}(k) = \frac{\Delta y_{P_j}(k) \cdot S_P}{\sqrt{(\Delta x_{P_j}(k))^2 + (\Delta y_{P_j}(k))^2}}. \end{cases} \quad (5)$$

入侵者 ($P_j \in P$) 运动的数学描述为

$$\begin{cases} x_{P_j}(k+1) = x_{P_j}(k) + \Delta x_{P_j}(k), \\ y_{P_j}(k+1) = y_{P_j}(k) + \Delta y_{P_j}(k), \\ \beta_{P_j}(k+1) = \text{agl}(\beta_{P_j}(k+1) + \Delta \beta_{P_j}(k)). \end{cases} \quad (6)$$

需要明确的是 P_j 的智能水平和机动性能集中体现在其对逃逸方向的选择上, 即入侵者PMDline的方向 $\beta_{P_j}(k+1)$, 而之所以引入协调矩, 是防止系统中其他入侵者或围捕者距离其太近而发生碰撞. 有效围捕半径为 $D_{HC} + D_P + D_H$ (其中 $D_{PC} < D_{HC} + D_P + D_H < D_{PV}$), 因此促使入侵者最终被围捕的关键在于其找不到逃逸方向, 并非其所受协调矩的作用.

3 基于链阵的围捕方法

链阵围捕方法可分如下3个阶段: 巡逻、即时任务招募、协作形成链阵完成围捕.

当 H_i 在巡逻过程中发现有入侵者时, H_i 首先会依据算法1确定自己的围捕目标与运动方向. 令 $f_{H_i}(k)$ 表示 H_i 在 $t(k)$ 时刻相对其围捕目标的运动方向, 则 $f_{H_i}(k) = 1$ 表示顺时针运动, $f_{H_i}(k) = -1$ 表示逆时针运动. 然后 H_i 再根据算法2确定自己的leader以形成链阵. 如果 H_i 找到了一个leader, 则 H_i 为链节, 只负责跟随leader运动. 否则 H_i 为链首, 它不但要环绕其围捕目标运动而且还要发布招募信息以使更多的围捕者

能参与围捕. 当一个链阵中没有链首时, 则表示一个完整的围捕圈已经形成.

算法1 探测到入侵者时 H_i 计算围捕目标 T_{H_i} 、运动方向 $f_{H_i}(k)$ 及 H_i 到 T_{H_i} 的方向角 θ_{H_i} 的方法.

步骤1 令 T_{cw} , T_{acw} , T_{H_i} , u_{al} , u_{op} , v_{al} , v_{op} , θ_{H_i} , θ_{cw} 与 θ_{acw} 都为0.

步骤2 对集合 V_{PH_i} 中的每个元素 P_j , 执行步骤2.1–2.2.

步骤2.1 如果 $\text{agl}(\beta(O_{H_i}, O_{P_j}) - \theta_{cw}) > 0$, 则 $T_{cw} = P_j$, $\theta_{cw} = \beta(O_{H_i}, O_{P_j})$.

步骤2.2 如果 $\text{agl}(\beta(O_{H_i}, O_{P_j}) - \theta_{acw}) < 0$, 则 $T_{acw} = P_j$, $\theta_{acw} = \beta(O_{H_i}, O_{P_j})$.

步骤3 如果 H_i 在 $t(k-1)$ 时的围捕运动方向 $f_{H_i}(k-1) = 1$, 则 $T_{H_i} = T_{cw}$, $\theta_{H_i} = \theta_{cw}$, $f_{H_i}(k) = 1$; 否则如果 $f_{H_i}(k-1) = -1$, 则 $T_{H_i} = T_{acw}$, $f_{H_i}(k) = -1$, $\theta_{H_i} = \theta_{acw}$; 否则执行步骤3.1–3.2.

步骤3.1 对集合 V_{HH_i} 中的每个元素 H_j , 执行步骤3.1.1–3.1.2.

步骤3.1.1 如果 $\theta_{cw} < \beta(O_{H_i}, O_{H_j}) < \text{agl}(\theta_{cw} + \pi)$, 则 $u_{al} = u_{al} + 1$; 否则 $u_{op} = u_{op} + 1$.

步骤3.1.2 如果 $\text{agl}(\theta_{acw} - \pi) < \beta(O_{H_i}, O_{H_j}) < \theta_{acw}$, 则 $v_{al} = v_{al} + 1$; 否则 $v_{op} = v_{op} + 1$.

步骤3.2 在区间 $(0, 1)$ 随机产生一个数 p , 如果 $p > 0.5$, 则执行步骤3.2.1;

步骤3.2.1 如果 $u_{al} < u_{op}$, 则 $T_{H_i} = T_{cw}$, $f_{H_i}(k) = 1$, $\theta_{H_i} = \theta_{cw}$; 否则 $T_{H_i} = T_{acw}$, $f_{H_i}(k) = -1$, $\theta_{H_i} = \theta_{acw}$.

步骤3.2.2 如果 $v_{al} < v_{op}$, 则 $f_{H_i}(k) = -1$, $T_{H_i} = T_{acw}$, $\theta_{H_i} = \theta_{acw}$; 否则, $f_{H_i}(k) = 1$, $T_{H_i} = T_{cw}$, $\theta_{H_i} = \theta_{cw}$.

步骤4 如果 $f_{H_i}(k) \neq 0$, 则执行步骤5–7.

步骤5 得到集合 $Q = \{H_e : H_e \in V_{HH_i} \text{ 且 } H_e \text{ 有围捕目标}\}$. 如果 Q 为空, 则结束算法; 否则, 令 $\tau_{cw} = 0$, $\tau_{acw} = 0$, 并求得 Q 中元素个数为 m .

步骤6 对 Q 中的每个元素 H_e , 执行步骤6.1–6.2.

步骤6.1 如果 $f_{H_i}(k) = 1$ 且 $\text{agl}(\theta_{H_i} - \beta(O_{H_i}, O_{H_e})) < 0$, 则 $\tau_{cw} = \tau_{cw} + 1$;

步骤6.2 如果 $f_{H_i}(k) = -1$ 且 $\text{agl}(\theta_{H_i} - \beta(O_{H_i}, O_{H_e})) > 0$, 则 $\tau_{acw} = \tau_{acw} + 1$.

步骤7 如果 $\tau_{cw} = m$, 则 $T_{H_i} = T_{acw}$, $f_{H_i}(k) = -1$, $\theta_{H_i} = \theta_{acw}$; 否则如果 $\tau_{acw} = m$, 则 $T_{H_i} = T_{cw}$, $f_{H_i}(k) = 1$, $\theta_{H_i} = \theta_{cw}$.

如在图3中, P_4 已经被一个链阵包围, 所以5个围捕者全是链节. 而在围捕 P_1 , P_2 和 P_3 的链阵中, H_2 与 H_5 是链首. H_9 由于接受了 H_5 的招募, 所以其PMDline指向了 H_5 的围捕目标 P_3 . 由于 H_5 为 H_6 的leader, 所以

H_6 的PMDline指向 H_5 .

3.1 相关算法

算法1说明: 在算法1的步骤3.2中, 因为 H_i 是首次参与围捕目标的围捕者, 所以其会选择围捕者较少的一侧为运动方向. 步骤5–7的作用是判断 H_i 是否位于链尾. 如果是, 则将运动方向调整为原来方向的反方向. 这种调整的一个重要作用就是可增加系统中链首的数量从而可加快链阵的形成.

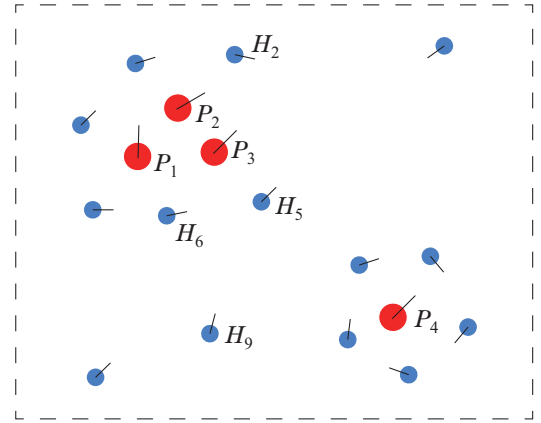


图3 链阵示意图

Fig. 3 Illustration of chain formation

算法2 H_i 选择leader(即 L_{H_i})的方法.

步骤1 如果 V_{PH_i} 不为空, 则 $L_{H_i} = 0$, $\varphi_{\max} = 2\pi/3$, $\varphi_{\min} = -2\pi/3$; 得到集合 $R = \{H_j : H_j \in V_{HH_i} \text{ 且 } H_j \text{ 有围捕目标}\}$. 如果 R 为空, 则结束算法; 否则执行步骤2.

步骤2 对集合 R 中每个元素 H_j , 令 $\gamma = \text{agl}(\text{agl}(\theta_{H_i} + \pi) - \beta(O_{T_{H_i}}, O_{H_j}))$ 和 $\Delta x = |O_{T_{H_i}} O_{H_j}|$; 执行步骤2.1–2.3.

步骤2.1 如果 $f_{H_i}(k)$, $f_{H_j}(k-1)$ 均为1且 $\pi/10 < \gamma < \varphi_{\max}$, $D_{HC} < \Delta x < 2D_{HC}$, 则 $\varphi_{\max} = \gamma$, $L_{H_i} = H_j$.

步骤2.2 如果 $f_{H_i}(k)$, $f_{H_j}(k-1)$ 均为-1且 $\varphi_{\min} < \gamma < -\pi/10$, $D_{HC} < \Delta x < 2D_{HC}$, 则 $\varphi_{\min} = \gamma$, $L_{H_i} = H_j$.

步骤2.3 如果 $f_{H_i}(k) = -1$, $f_{H_j}(k-1) = 1$ 且 $\gamma < 0$, 则 $f_{H_i}(k) = 1$.

算法2说明: 算法2中的步骤2.3表示当运动方向不同的两个链首相遇时, 逆时针运动的链首要调整为顺时针运动以使整个链阵能以统一的方向运动.

算法3说明: 算法3的步骤3表示 H_i 收到了招募信息并接受了链首 H_g 的招募. 所以其PMDline会指向 H_g 的围捕目标 T_{H_g} (算法3中用 G_i 表示)以向其靠近. 步骤4则说明 H_i 没有收到招募信息或者不适合向有关入侵者运动(参与围捕的围捕者过多), 所以 H_i 只是简单地按照区域巡逻的方法来确定自己PMDline方向.

算法3 在没有发现入侵者时 H_i 的PMDline方向的计算方法

步骤1 令 $V_i = 0, G_i = 0$.

步骤2 对每个链首 H_g , 如果 H_i 收到了 H_g 的招募信息, 则令 $n_u = 0$ 并执行步骤2.1–2.4.

步骤2.1 对集合 V_{HH_i} 中每个元素 H_j , 如果 $H_j \neq H_g$ 且 $|\text{agl}(\beta(O_{H_i}, O_{T_{H_g}}) - \beta(O_{H_i}, O_{H_j}))| < \pi/2$, 则 $n_u = n_u + 1$.

步骤2.2 如果 $n_u > 1$, 则 $\text{Rec}(H_g) = 10$, Rec 中存储 H_i 对该链首的惩罚时间; 否则如果 $\text{Rec}(H_g) > 0$, 则 $\text{Rec}(H_g) = \text{Rec}(H_g) - 1$; 否则 $\text{Rec}(H_g) = 0$.

步骤2.3 如果 $\text{Rec}(H_g) = 0$, 则令 $\text{Val}(H_g) = (D_{HL} - |O_{H_i} O_{H_g}|) / D_{HL}$.

步骤2.4 如果 $\text{Rec}(H_g) = 0$ 且 $\text{Val}(H_g) > V_i$, 则 $V_i = \text{Val}(H_g), G_i = T_{H_g}$.

步骤3 如果 $V_i \neq 0$, 则 H_i 的PMDline方向 $\beta_{H_i}(k+1) = \beta(O_{H_i}, O_{G_i})$; 否则, 执行步骤4.

步骤4 如果 H_i 巡逻到给定区域的边界, 则 H_i 的PMDline方向 $\beta_{H_i}(k+1) = \beta(O_{H_i}, O)$ (其中点 O 为给定区域的几何中心点); 否则 $\beta_{H_i}(k+1) = \beta_{H_i}(k)$.

3.2 围捕者的运动控制器及围捕算法的流程图

围捕者 H_i 在 $t(k)$ 时刻的协调矩设计如下:

1) 集合 V_{PH_i} 为空且 H_i 未受到招募. 此时集合 V_{HH_i} 中的每个元素 H_j 都对 H_i 有一个协调矩, 且协调线段的长度为 $D_{HV} + 2S_H$. V_{HH_i} 中所有元素作用在 H_i 上的协调分量记为 $(\Sigma \Delta x_{c1} \ \Sigma \Delta y_{c1} \ \Sigma \Delta \beta_{c1})^T$.

2) 集合 V_{PH_i} 不为空, 或 V_{PH_i} 为空但 H_i 收到了招募信息. 此种情况下, 集合 C_{HH_i} 中的每个元素 H_j 对 H_i 都有协调矩, 且协调线段长为 $D_{HC} + 2S_H$. C_{HH_i} 中所有元素作用在 H_i 上的协调分量记为 $(\Sigma \Delta x_{c2} \ \Sigma \Delta y_{c2} \ \Sigma \Delta \beta_{c2})^T$.

3) 集合 C_{PH_i} 中的每个元素 P_j 对 H_i 都有协调矩, 对应协调线段的长度为 $D_{HC} + 2S_H$. 此种情况下, P_j 对 H_i 的协调矩只会影响 H_i 的位置而不影响其PMDline的方向. C_{PH_i} 中所有元素 P_j 作用在 H_i 上的协调分量记为 $(\Sigma \Delta x_{c3} \ \Sigma \Delta y_{c3})^T$.

4) 如果 H_j 为 H_i 的leader, 则当 H_j 到 H_i 的距离小于 $2(D_{HC} - n_p \cdot D_H)$ (其中 n_p 为 H_i 探测到的入侵者个数)时, H_j 对 H_i 也有一个协调矩, 以动态调整它们间的距离, 其协调线段长度为 $2(D_{HC} - n_p \cdot D_H)$. Leader对 H_i 的协调分量记为 $(\Delta x_{c4} \ \Delta y_{c4})^T$.

计算以上各种情况下的协调分量以及函数 $\text{damt}(x)$ 详请参考文献[28], 其中文献[28]中的 D_{ji} 和 D_S 在本节中分别为 λ_H 和 D_{HC} . 在情况1), 3)和4)中, $\lambda_H = 1$; 在情况2)中, λ_H 的计算方法如式(7)所示, 其中 $d_H = |O_{H_i} O_{H_j}| - 2D_H$.

$$\lambda_H = \begin{cases} \frac{D_{HC}}{2\delta}, & d_H \leq 2\delta, \\ \frac{D_{HC}}{d_H}, & 2\delta < d_H \leq 2S_H, \\ 1, & d_H > 2S_H. \end{cases} \quad (7)$$

当 V_{PH_i} 不为空, 即有入侵者被 H_i 发现时, H_i 会采用算法1选择围捕目标. 设 H_i 的围捕目标为 P_j , 同时设 (x_{ij}, y_{ij}) 是起点为 O_{P_j} 、长度为 $D_{HC} + D_P + D_H$ 和方向角为 $\beta(O_{P_j}, O_{H_i})$ 的线段终点 A_{ij} 的坐标, 则点 A_{ij} 对 H_i 还会产生一个不影响 H_i 的PMDline方向, 只影响 H_i 位置的吸引矩. 吸引矩引起 H_i 的位置变化量 $(\Delta x_a \ \Delta y_a)^T$ 如式(8)所示(μ 为径向调节因子).

$$\begin{cases} \Delta x_a = \frac{\mu \cdot S_H}{\pi} \text{damt}\left(\frac{\pi}{S_H}(x_{H_i} - x_{ij})\right), \\ \Delta y_a = \frac{\mu \cdot S_H}{\pi} \text{damt}\left(\frac{\pi}{S_H}(y_{H_i} - y_{ij})\right). \end{cases} \quad (8)$$

在 $t(k)$ 时刻, 当 V_{PH_i} 不为空, 即有入侵者被 H_i 发现时, H_i 方向角的计算方法是: 如果 H_i 采用算法2找到了一个leader, 不妨设为 H_v , 则 H_i 的PMDline方向 $\beta_{H_i}(k+1) = \beta(O_{H_i}, O_{H_v})$. 如果 H_i 采用算法2未找到leader, 则 H_i 为链首. 此时, 如果 $f_{H_i}(k) = 1$, 则 H_i 的PMDline方向为如式(9)所示; 否则如果 $f_{H_i}(k) = -1$, 则 H_i 的PMDline方向为如式(10)所示.

$$\beta_{H_i}(k+1) = \text{agl}(\beta(O_{H_i}, O_{P_j}) + \pi/2), \quad (9)$$

$$\beta_{H_i}(k+1) = \text{agl}(\beta(O_{H_i}, O_{P_j}) - \pi/2). \quad (10)$$

H_i 沿其PMDline方向的运动分量记为 $(\Delta x_s \ \Delta y_s)^T$, 则

$$\begin{cases} \Delta x_s = S_H \cos \beta_{H_i}(k+1), \\ \Delta y_s = S_H \sin \beta_{H_i}(k+1). \end{cases} \quad (11)$$

在 $t(k)$ 时刻 H_i 的合运动量表示为 $(\Delta x_{H_i}(k) \ \Delta y_{H_i}(k) \ \Delta \beta_{H_i}(k))^T$, 如式(12)所示.

$$\begin{cases} \Delta x_{H_i}(k) = \Sigma \Delta x_{c1} + \Sigma \Delta x_{c2} + \Sigma \Delta x_{c3} + \\ \quad \Delta x_{c4} + \Delta x_a + \Delta x_s, \\ \Delta y_{H_i}(k) = \Sigma \Delta y_{c1} + \Sigma \Delta y_{c2} + \Sigma \Delta y_{c3} + \\ \quad \Delta y_{c4} + \Delta y_a + \Delta y_s, \\ \Delta \beta_{H_i}(k) = \text{agl}(\Sigma \Delta \beta_{c1} + \Sigma \Delta \beta_{c2}). \end{cases} \quad (12)$$

如果 $\sqrt{(\Delta x_{H_i}(k))^2 + (\Delta y_{H_i}(k))^2} > S_H$, 则可采用类似式(5)的方法调整 $(\Delta x_{H_i}(k) \ \Delta y_{H_i}(k))^T$ 以保证 H_i 的运动步幅不大于 S_H .

基于 $(\Delta x_{H_i}(k) \ \Delta y_{H_i}(k) \ \Delta \beta_{H_i}(k))^T$ 可得 H_i 的人工力矩运动控制器为

$$\begin{cases} x_{H_i}(k+1) = x_{H_i}(k) + \Delta x_{H_i}(k), \\ y_{H_i}(k+1) = y_{H_i}(k) + \Delta y_{H_i}(k), \\ \beta_{H_i}(k+1) = \text{agl}(\beta_{H_i}(k) + \Delta \beta_{H_i}(k)). \end{cases} \quad (13)$$

链阵围捕算法的流程如图4所示。

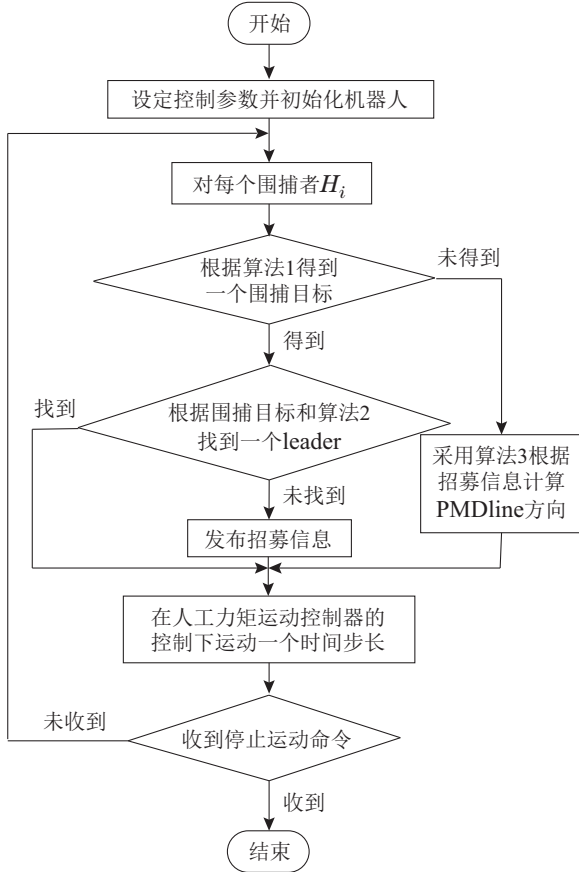


图 4 链阵围捕算法流程图

Fig. 4 Flow chart of chain formation hunting algorithm

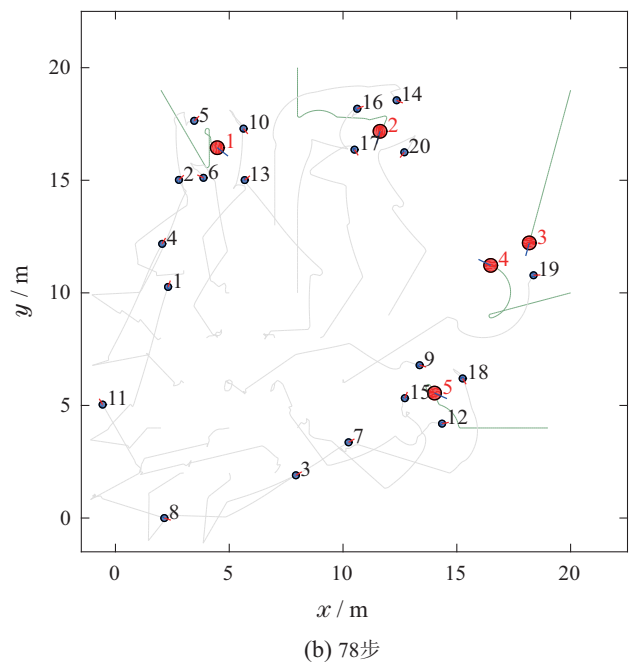
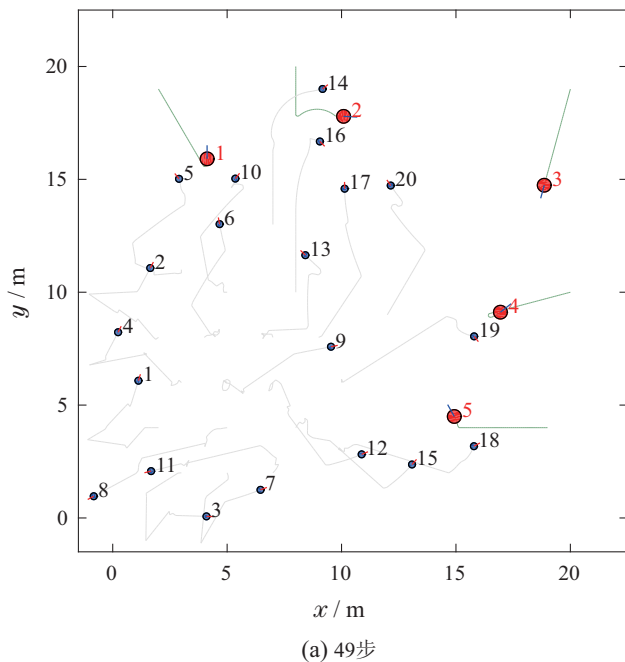
4 仿真结果与分析

为了验证本文所提围捕算法的可行性, 本节给出了两个有代表性的仿真, 如图5-图7所示. 仿真图中围捕者用带有红色PMDline的蓝色实心圆表示, 其右侧为它的序号(黑色); 入侵者用带有蓝色PMDline的红色实心圆表示, 其右侧为它的序号(红色); 围捕者运动轨迹为灰色实线, 入侵者运动轨迹为绿色实线. 在仿真1和仿真2中围捕者的初始位置相同, 围捕系统相关参数见表1.

仿真 1 在初始时刻, 5个入侵者相对分散地从多个方位同时进入由20个围捕者看守的区域. 图5(a)显示当只有 H_5, H_{10} 围捕 P_1 时, H_5 与 H_{10} 采取了顺时针与逆时针运动相结合的双向围捕策略. $H_6, H_2, H_4, H_1, H_{13}$ 则由于接受了 H_5 与 H_{10} 的招募而向 P_1 靠拢. H_{18} 对 P_5 的围捕过程则显示: 当链阵中只有链首时, 链首会选择向围捕者分布较稀疏的一侧做顺时针或逆时针围捕运动.

根据图5(b)与5(c)可以发现, P_2 已经被 $H_{14}, H_{16}, H_{17}, H_{20}$ 包围. 然而由于 H_{20} 发现了 P_4 , 于是 H_{20} 离开当前的链阵而选择了 P_4 作为自己的围捕目标. 随后 H_{11}, H_4 由于受到 H_{20} 的招募, 也加入对 P_4 的围捕. 图5(c)显示围捕 P_1 与 P_5 的链阵已分别形成一个首尾相连的围捕圈, P_1 与 P_5 由于无处可逃而停止了运动. 另一方面由于链首消失而没有招募信息发出, 位于该链阵外围的围捕者会远离该链阵而继续巡逻或者接受其他招募者的招募, 如 H_1, H_8, H_7 和 H_4 所示.

从图5(d)可以看出: 在348步时, P_2 与 P_4 已被同一个链阵包围, 从而证明了链阵方法能自组织地对多个入侵者形成合围之势.



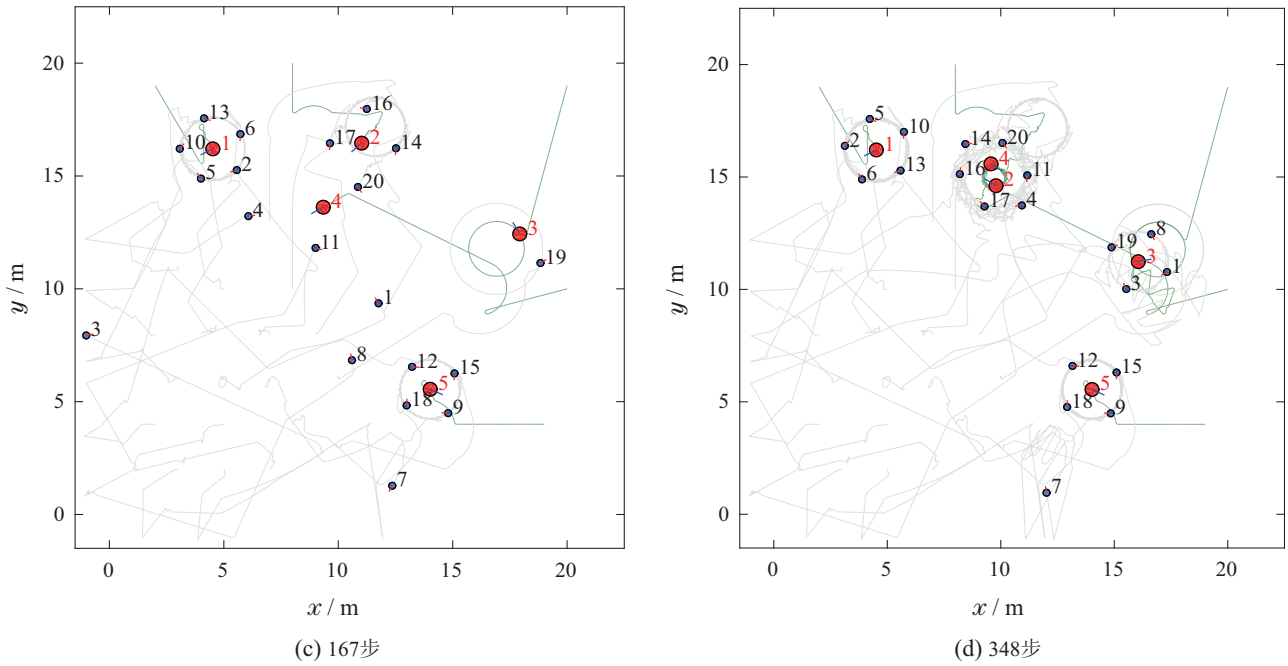


图5 围捕5个从多方位进入给定区域入侵者的仿真

Fig. 5 Five intruders enter a given area from multiple directions in simulation

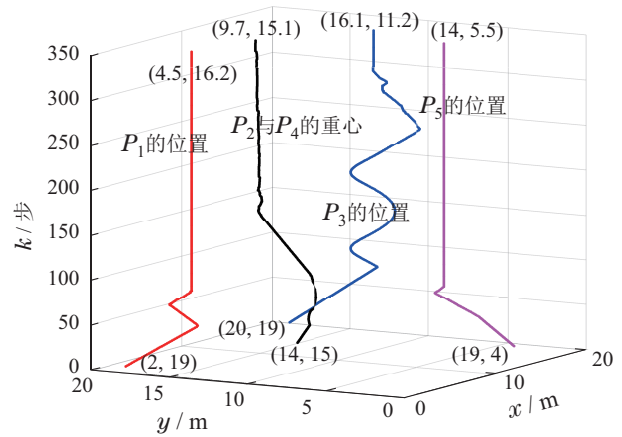
图6(a)显示在仿真1中, P_2 与 P_4 的重心在190步之后已基本保持不变. 图6(b)显示在仿真2中, P_1 与 P_2 的重心在60步及 P_3 与 P_4 的重心在150步以后也都基本保持不变. 这说明了链阵在对多目标形成合围后, 位于链阵内的个体入侵者虽然还会有微小移动, 但它们的重心会近似保持不变, 即链阵也能有效地限制它们的运动.

图6(a)显示在仿真1中, P_2 与 P_4 的重心在190步之后已基本保持不变. 图6(b)显示在仿真2中, P_1 与 P_2 的重心在60步及 P_3 与 P_4 的重心在150步以后也都基本保持不变. 这说明了链阵在对多目标形成合围后, 位于链阵内的个体入侵者虽然还会有微小移动, 但它们的重心会近似保持不变, 即链阵也能有效地限制它们的运动.

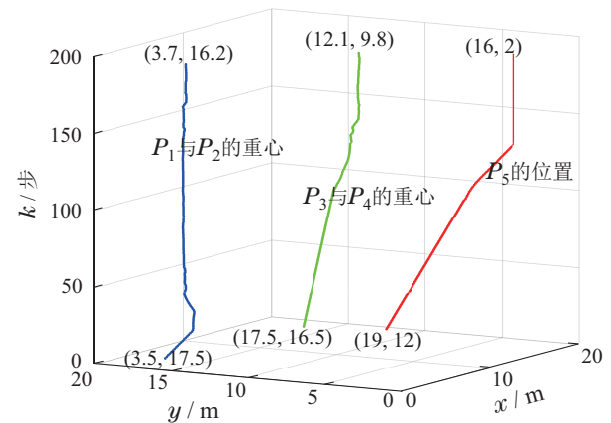
仿真2 与仿真1不同, 在仿真2中, 5个入侵者在初始时刻只从两个方位比较集中地进入给定区域. 图7(a)与(b)显示: H_5 , H_{10} 和 H_{14} 最先发现了入侵者 P_1 与 P_2 , 并发布了招募信息. 图7(b)与(c)显示: 在多个收到了招募信息的围捕者中, 最终只有 H_2 , H_{16} 和 H_{17} 成为了链阵成员, 从而节省了围捕资源.

图7(c)中 H_{13} , H_{19} , H_{20} 对 P_4 的围捕过程显示: 3个围捕者虽然可以结成链阵不断地围着入侵者做顺时针或逆时针运动并能阻止入侵者继续逃逸, 但并不能使入侵者停止运动. 这是因为根据入侵者逃逸方向的选择方法可知: 只有入侵者到任意相邻的两个围捕者之间夹角差的绝对值小于或等于 $7\pi/12$ 时, 入侵者才会找不到逃逸方向而保持静止. 如果链阵中只有3个机器人, 则上述条件不可能满足, 所以入侵者不

可能停止运动.



(a) 仿真1中入侵者重心轨迹



(b) 仿真2中入侵者重心轨迹

图6 入侵者的重心轨迹

Fig. 6 Trajectories of the gravities center of the intruders

表 1 系统参数值

Table 1 Parameters in the systems

参数	D_{PV}/m	D_{PC}/m	D_P/m	S_P/m	D_{HL}/m	D_{HV}/m	D_{HC}/m	D_H/m	S_H/m	δ	α	μ
数值	1.6	1	0.3	0.15	10	2.2	1	0.15	0.15	$\pi/90$	$7\pi/12$	1

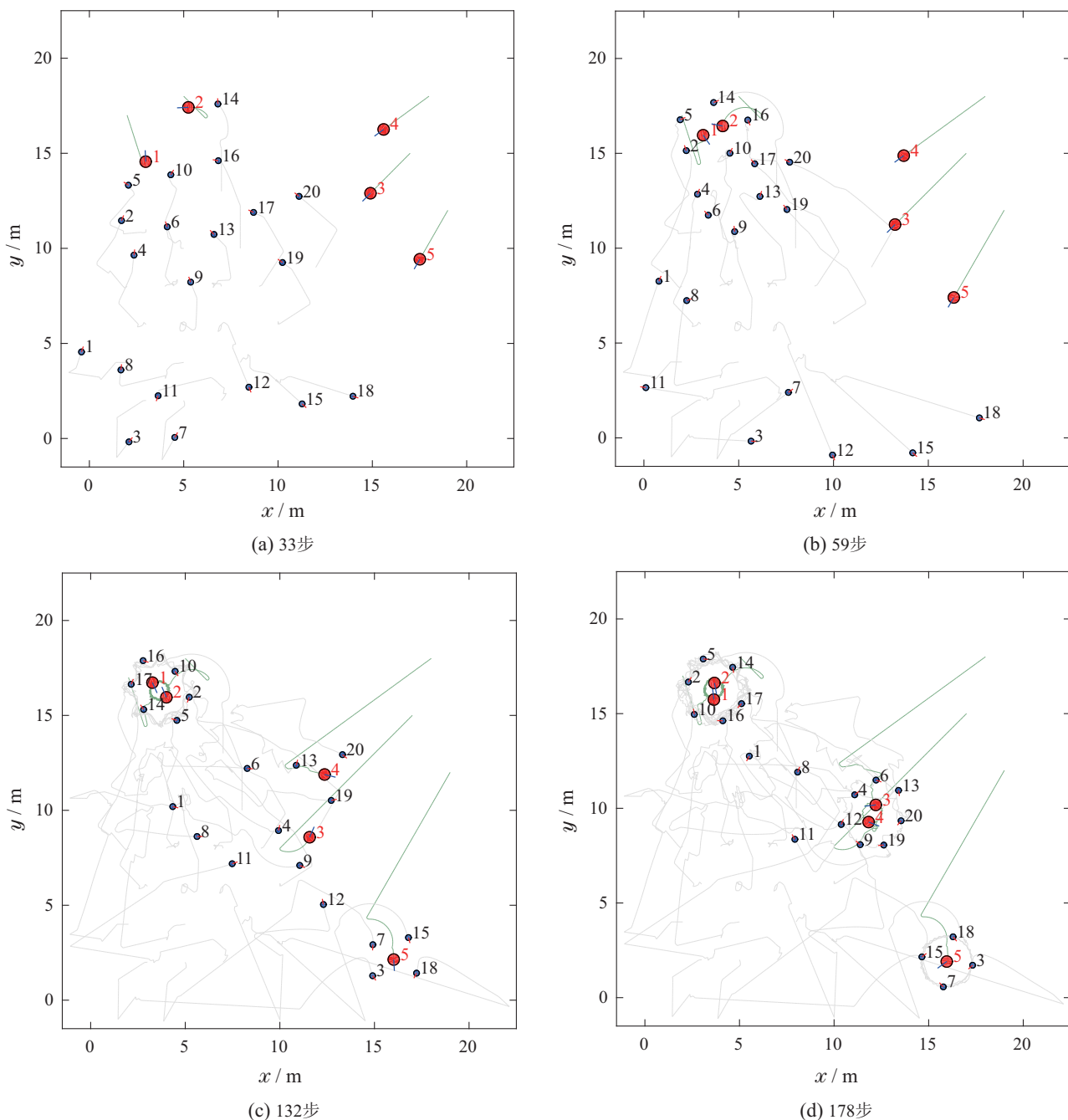


图 7 围捕5个从两个方位集中进入给定区域入侵者的仿真

Fig. 7 Five intruders enter a given area from two directions in simulation

5 对比分析

相较文献[20]所提任务分配和动态调整围捕目标的策略, 链阵方法的优势是: 1) 链阵方法以巡逻方式获得目标的位置信息, 不需要事先给定, 因此适用范围更广; 2) 发现目标后链阵方法采取即时任务招募策略, 可以根据围捕过程中的实际需求, 动态调整参加

围捕的机器人个数, 节省了围捕资源和任务分配时间, 同时减少了计算量; 3) 链阵会环绕入侵者主动地运动而不是被动式的追踪或跟随, 不但能以尽量少的机器人包围尽量多的入侵者而且能提高围捕效率。

相较文献[21]所提用一组智能体对多个集中分布的动态目标形成统一包围圈的方法, 链阵方法的优点

有: 1) 链阵方法不但能包围多个动态目标, 不需要先验知识且原理更简洁; 2) 链阵方法可以对多个不是集中分布的入侵者形成多条链阵, 所以使用更灵活, 适用范围更广。

6 总结

本文针对在二维给定区域中, 群机器人自组织围捕或控制多个入侵者的问题, 受冷兵器时代利用战阵围杀敌人的启发, 提出了一种链阵围捕方法。机器人采用区域巡逻或接收招募信息的方式获得入侵者的位置信息, 随后自组织的与其他机器人协作以结成链阵并完成对多个入侵者的围捕或控制。仿真验证了链阵方法的有效性、灵活性与可行性。下一阶段, 笔者将研究复杂障碍环境下群机器人围捕多个入侵者的链阵方法。另外, 对链阵方法进行理论分析也是下一阶段一个比较有意义的研究课题。

参考文献:

- [1] CAO Zhiqiang, ZHANG Bin, WANG Shuo, et al. Cooperative hunting of multiple mobile robots in an unknown environment. *Acta Automatica Sinica*, 2003, 29(4): 536 – 543.
(曹志强, 张斌, 王硕, 等. 未知环境中多移动机器人协作围捕的研究. 自动化学报, 2003, 29(4): 536 – 543.)
- [2] CAO Z Q, ZHOU C, CHENG L, et al. A distributed hunting approach for multiple autonomous robots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, 10(4): 1 – 8.
- [3] YAMAGUCHI H. A distributed motion coordination strategy for multiple nonholonomic mobile robots in cooperative hunting operations. *Robotics & Autonomous Systems*, 2003, 43(4): 257 – 282.
- [4] MA Y, CAO Z Q, DONG X, et al. A multi-robot coordinated hunting strategy with dynamic alliance. *Control & Decision Conference*. Guilin, China: IEEE, 2009: 2338 – 2342.
- [5] GONZALO L N, ARANDA M, MEZOUAR Y. Adaptive multi-robot formation planning to enclose and track a target with motion and visibility constraints. *IEEE Transactions on Robotics*, 2020, 36(1): 142 – 156.
- [6] HUANG Z R, ZHU D Q, SUN B. A multi-AUV cooperative hunting method in 3-D underwater environment with obstacle. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2016, 50: 192 – 200.
- [7] DUAN Y, HUANG X, YU X. Multi-robot dynamic virtual potential point hunting strategy based on FIS. *Chinese Guidance, Navigation and Control Conference*. Nanjing, China: IEEE, 2016: 332 – 335.
- [8] WU Z Y, CAO Z Q, YU Y Y, et al. A multi-robot cooperative hunting approach based on dynamic prediction of target motion. *International Conference on Robotics and Biomimetics*. Macau, China: IEEE, 2017: 587 – 592.
- [9] CAO X, XU X. Hunting algorithm for multi-AUV based on dynamic prediction of target trajectory in 3D underwater environment. *IEEE Access*, 2020, 8: 138529 – 138538.
- [10] CHEN S, CHEN X, MEI Y, et al. A cooperative hunting algorithm of multi-robot based on dynamic prediction of the target via consensus-based Kalman filtering. *Journal of Information and Computational Science*, 2015, 12(4): 1557 – 1568.
- [11] LI J, LI M, LI Y, et al. Coordinated multi-robot target hunting based on extended cooperative game. *International Conference on Information & Automation*. Lijiang, China: IEEE, 2015: 216 – 221.
- [12] CHEN J, ZHA W, PENG Z, et al. Multi-player pursuit-evasion games with one superior evader. *Automatica*, 2016, 71: 24 – 32.
- [13] SUN W, DOU L, FANG H, et al. Task allocation for multi-robot cooperative hunting behavior based on improved auction algorithm. *Chinese Control Conference (CCC)*. Kunming, China: IEEE, 2008: 435 – 440.
- [14] CAO J, MIN L, WANG Z, et al. Multi-robot target hunting based on dynamic adjustment auction algorithm. *International Conference on Mechatronics and Automation*. Harbin, China: IEEE, 2016: 211 – 216.
- [15] KIM T H, HARA S, HORI Y. Cooperative control of multi-agent dynamical systems in target-enclosing operations using cyclic pursuit strategy. *International Journal of Control*, 2010, 83(10): 2040 – 2052.
- [16] PENG X G, ZHANG S, LEI X K. Multi-target trapping in constrained environments using gene regulatory network-based pattern formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(5): 1 – 12.
- [17] DESHPANDE A M, KUMAR R, RADMANESH M, et al. Self-organized circle formation around an unknown target by a multi-robot swarm using a local communication strategy. *2018 Annual American Control Conference (ACC)*. Milwaukee, WI, USA: IEEE, 2018: 4409 – 4413.
- [18] HUANG T Y, CHEN X B, XU W B, et al. A self-organizing cooperative hunting by swarm robotic systems based on loose-preference rule. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(1): 57 – 68.
- [19] ZHANG H Q, ZHANG J, ZHOU S W, et al. Hunting in unknown environments with dynamic deforming obstacles by swarm robots. *International Journal of Control and Automation*, 2015, 8(11): 385 – 406.
- [20] ZHANG Hongqiang, WU Lianghong, ZHOU You, et al. Self-organizing cooperative multi-target hunting by swarm robots in complex environments. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(5): 1054 – 1062.
(张红强, 吴亮红, 周游, 等. 复杂环境下群机器人自组织协同多目标围捕. 控制理论与应用, 2020, 37(5): 1054 – 1062.)
- [21] CUI L, CHEN S, WANG L. Distributed control for multi-target circumnavigation by a group of agents. *International Journal of Systems Science*, 2017, 48(12): 1 – 10.
- [22] YANG B, DING Y S, JIN Y C, et al. Self-organized swarm robot for target search and trapping inspired by bacterial chemotaxis. *Robotics & Autonomous Systems*, 2015, 72: 83 – 92.
- [23] MAKKAPATI V R, TSOTRAS P, ZACCOUR G. Optimal evading strategies and task allocation in multi-player pursuit-evasion problems. *Dynamic Games and Applications*, 2019, 9(4): 1168 – 1187.
- [24] SHI Y J, LI R, TEO K L. Cooperative enclosing control for multiple moving targets by a group of agents. *International Journal of Control*, 2015, 88(1): 80 – 89.
- [25] PIERSON A, WANG Z, SCHWAGER M. Intercepting rogue robots: an algorithm for capturing multiple evaders with multiple pursuers. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2017, 2(2): 530 – 537.
- [26] Zvenbooks war editorial board. *The Battlefield Winner: The Cold Weapon Era*. Beijing: China Chang'an Press, 2014.
(指文烽火编委会. 战场决胜者: 冷兵器时代. 北京: 中国长安出版社, 2014.)
- [27] XU W B, CHEN X B, ZHAO J, et al. Function segment artificial moment method for sensor-based path planning of single robot in complex dynamical environments. *Information Sciences*, 2014, 280(1): 64 – 81.
- [28] XU Baowang. *Artificial moment method for the local path planning of mobile robots*. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
(徐望宝. 移动机器人局部路径规划的人工力矩方法. 大连: 大连理工大学, 2014.)

作者简介:

徐望宝 教授, 博士, 博士生导师, 目前研究方向为群机器人系统集体行为的涌现、机器人系统的运动控制与优化等, E-mail: xuwangbao@sina.com;

孙明炎 硕士研究生, 目前研究方向为群机器人系统和智能控制, E-mail: 3076254628@qq.com.