

复杂三维多面体环境中空地协作追逃问题

梁 宵^{1†}, 王宏伦², 骆海涛³

(1. 沈阳航空航天大学 自动化学院, 辽宁 沈阳 110136; 2. 北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191;

3. 中国科学院 沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016)

摘要: 结合无人机(UAV)的空中移动和无人车(UGV)的地面移动特点, 本文提出了一种UAV/UGV空地协作系统, 并且针对其在复杂地形中的追逃问题, 提出了一种复杂三维多面体环境中UAV/UGV空地协作追逃策略. 首先介绍了UAV/UGV空地协作系统的结构与协作追逃问题描述. 接着将边界值问题(BVP)改进并离散化作为博弈走法生成器. 然后, 针对逃方已知追方位置, 而追方只具备直线视野(LOS)的不利条件, 分析了最坏情况. 逃方策略在保证最大生存条件下尽可能获得博弈胜利. 追方策略根据逃方状态分成3种情况进行讨论: 逃方处于追方的视野范围内、逃方刚刚消失于追方视野以及追方完全丢失逃方的情况. 最后, 对比仿真结果说明了本文算法的有效性, 并分析了追逃结果的影响因素. 由于地形是非凸的并且充满障碍, 因此该策略虽不能保证追方一定能够胜利, 但在最坏情况下是最优的.

关键词: 追逃博弈; 空地协作系统; 复杂三维多面体环境; 走法生成器; 最坏情况

引用格式: 梁宵, 王宏伦, 骆海涛. 复杂三维多面体环境中空地协作追逃问题. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 623 – 633

DOI: 10.7641/CTA.2020.90896

Collaborative pursuit-evasion of air-ground system in a complex 3D polyhedral map

LIANG Xiao^{1†}, WANG Hong-lun², LUO Hai-tao³

(1. School of Automation, Shenyang Aerospace University, Shenyang Liaoning 110136, China;

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

3. Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning 110016, China)

Abstract: Combining the characteristic of unmanned aerial vehicle (UAV) and unmanned ground vehicle (UGV), a UAV/UGV air-ground system and its collaborative pursuit-evasion strategy in a complex 3D polyhedral map is proposed. The structure of the UAV/UGV air-ground system and the pursuit-evasion game is introduced first. Then, the discrete boundary value problem (BVP) is improved and used as move generator. According to the case of that evader knows the position of pursuers at any time but pursuers just have a line-of-sight (LOS) view, the worst case is analyzed for both of players. In the game, evader will try to win the game under the premise of ensuring survival, and the strategy of pursuers is discussed in three situations: one is evader is in the sight of pursuers, one is the position of evader is known by pursuers before a while and the last one is the position of evader is completely unknown to pursuers. The contrastive simulation results show that the method is effective and optimal in the worst case and the influencing factors of the pursuit-evasion result is also analyzed.

Key words: pursuit-evasion game; air-ground system; complex 3D polyhedral map; move generator; worst case

Citation: LIANG Xiao, WANG Honglun, LUO Haitao. Collaborative pursuit-evasion of air-ground system in a complex 3D polyhedral map. *Control Theory & Applications*, 2021, 38(5): 623 – 633

1 引言

人工智能技术是目前各国学者争相探索的前沿领域, 广泛应用于各类智能体. 将智能体放置于对抗环

境, 考量其智能性是一种有效方法(如AlphaGo), 因此许多研究围绕着智能体的决策问题展开^[1].

空地协作系统是一种新型的多智能体异构系统,

收稿日期: 2019–10–29; 录用日期: 2020–11–24.

[†]通信作者. E-mail: connyzone@126.com; Tel.: +86 24-89723961.

本文责任编辑: 蔡开元.

国家自然科学基金项目(61973222, 61503255), 辽宁省自然科学基金项目(2019–ZD–0247), 辽宁省“兴辽英才计划”项目(XLYC1907179)资助.

Supported by the National Natural Science Foundation of China (61973222, 61503255), the National Natural Science Foundation of Liaoning Province (2019–ZD–0247) and the Program of Liaoning Talents (XLYC1907179).

利用无人机(unmanned aerial vehicle, UAV)和无人车(unmanned ground vehicle, UGV)各自的感知优势能够完成复杂的协作任务,各国学者均在这方面取得了一系列阶段性的成果. Chaimowicz等人提出了一种抽象模型^[2],通过观察全局信息来提供模型状态的估计,实现了空中平台对多辆UGV的控制. Grocholsky等人提出了一种“空中牧羊犬结构”^[3],其在城市中部署上百辆UGV,采用UAV控制UGV的分散与聚合以及搜索不同区域. Hager等人针对协同无人救援系统提出了两架UAV导引一辆UGV的协作自主系统(cooperative autonomous system, CAS)^[4],各模块通过传感器信息融合进行数据交换,能够较好的避免单一传感器带来的感知误差. Khaleghi等人提出了一种动态数据驱动自适应多尺度仿真(dynamic data driven adaptive multi-scale simulation, DDDAMS)结构,用以处理多智能体的信息交换,从而完成集群运动^[5]. 任务的不同导致这些异构系统的结构各有特点,因此针对追逃问题所描述的对抗环境,需要首先设计合理的系统结构和协作方式,进而考虑如何在复杂对抗环境中体现出协作系统的智能性.

追逃问题属于典型的对抗博弈问题^[6]. 微分对策是经典的解决方案之一,其使用Hamilton-Jacobi-Isaacs(HJI)微分方程对参与者的运动进行统一描述^[7]. Goode等人利用微分对策使两个智能体获得了较高的避撞成功率^[8]. Awaheda等人提出一种模糊强化学习算法用以解决多追单的问题^[9],该算法对“Apollonius circle”定义的抓捕区域进行学习,能够抓捕到速度较快的逃跑者并避免碰撞. 基于微分对策的方法将物理约束表达为数学约束,但处理环境约束(特别是复杂环境)却容易捉襟见肘.

警察抓小偷问题是基于图的追逃问题中研究最多的,并且Goldstein等人指出它是一个EXPTIME-com-

plete问题^[10],因此不太可能找到一种明显高效的求解算法. Isler等人指出对于分割图中单警察基于行动次序的模型,追逃时间由图的顶点数目决定^[11]. 基于几何环境描述的狮-人博弈也是目前研究的重要分支. Casini等人提出在每次移动时更新计算中心的情况,并给出了博弈时间上界^[12]. Sato等人通过近似分析,推导出简单链接的几何图形中抓捕时间的上界^[13]. 接着, Bhadauria等人指出3个狮子能够在任何可能有孔的二维多边形环境中抓住人类^[14]. 然而如何使追逃策略适应更加复杂的环境,仍是需要深入研究的问题.

UAV/UGV空地协作系统不同于传统智能体, UAV在空中高速飞行可以侦查广阔的区域,进行空中火力压制; UGV在地面工作,可以和周围环境进行复杂的交互活动,但行进速度较慢. 由UAV和UGV组成的空地协作系统,并不是简单地由“单兵”变成“多兵”,这种异构特点将带来独特的协作优势,放置于复杂环境的追逃博弈中,如何使 $1+1>2$?

本文在复杂三维多面体环境中,研究了由UAV和UGV组成的异构智能体的协作追逃问题. 在提出的任务背景与协作系统结构下,将三维实时航路规划作为追逃博弈的走法生成器,实现了地形模型的统一. 针对非凸三维多面体环境约束和空地协作系统特点,分别分析了追逃双方的最坏情况,并在最坏情况下给出了追逃双方的博弈策略.

2 协作追逃问题的预备知识

2.1 UAV/UGV空地协作系统与前期工作

UAV/UGV空地协作系统的工作过程如下: UAV在空中飞行,速度较高且视野宽阔; UGV在地面展行驶,速度和视野较小,但能够与环境产生复杂互动. UAV和UGV共享彼此位置、速度和感知等信息,并且能够共享策略. 空地协作系统的结构如图1所示.

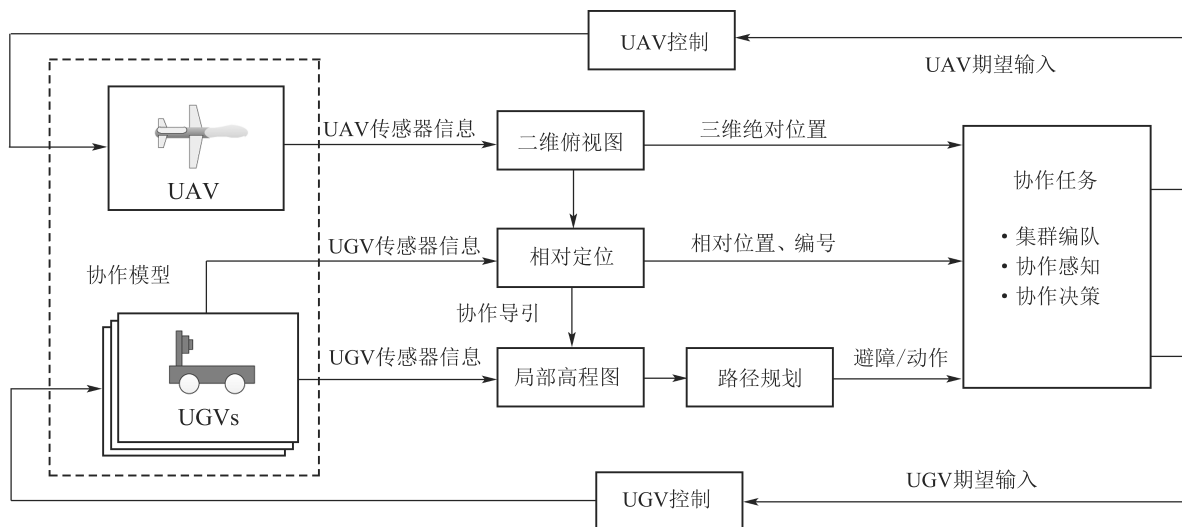


图1 UAV/UGV空地协作系统

Fig. 1 UAV/UGV air-ground collaborative system

在前期的工作中,已经实现了该系统的原型机^[15],搭建了较为完善的地面站^[16],并利用该系统完成了许多复杂的任务,比如:基于Apriltag的实时目标跟踪^[17]、复杂背景下的协作跟踪^[18]、协作导引降落^[19]等. UAV和UGV上均搭载图像、气压、高度和红外等传感器,能够对环境信息和对方运动信息进行感知,采用惯导辅以GPS和视觉等方式完成相对定位,并且地图被认为是已知的,事先存储于机载计算机中. UAV和UGV通过以数传和图传为基础的空地数据链与地面站进行通信.

2.2 不完全信息下的协作追逃问题描述

在第2.1节描述的协作系统框架下,一架UAV(记为 P_1)和一辆UGV(记为 P_2)在三维复杂地形环境中对一辆UGV(记为 E)展开追逃博弈,且 P_1 、 P_2 和 E 存在速度关系 $V_{P_1} > V_{P_2} = V_E$. 在三维复杂对抗环境中,协作系统既需要与敌对运动目标展开追逃抓捕,又需要考虑实际的三维复杂地形约束与自身的物理约束. 另一方面,协作系统内部能够通过信息共享展开合作,在追逃策略中体现出“协作追捕”与“单兵追捕”的区别与优势. E 不同于传统的无目的被动抓捕对象(区别于运动目标跟踪),其还能够利用敌对双方的位置以及地形进行逃脱,具备较高智能性.

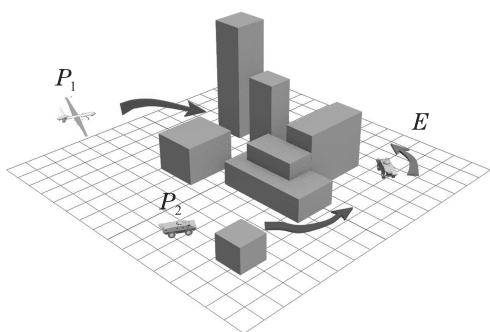


图2 UAV/UGV协作追逃示意图

Fig. 2 Pursuit-evasion of UAV/UGV air-ground system

P_1 和 P_2 在追逃过程中共享 E 的位置和速度等信息,并且完全已知彼此信息,但不知 E 的逃跑策略. E 的目标是在对抗环境中尽可能提高生存几率并摆脱追击,其已知 P_1 和 P_2 的位置和速度等信息,但不知他们的追击策略. 追方和逃方互相不知道彼此的策略,即双方决策信息对称. 假设 E 随时已知 P_1 和 P_2 的位置与速度信息,而 P_1 和 P_2 对躲避在障碍物后 E 的位置和速度完全未知,因此双方物理信息不对称. 此时追方只能在不完全信息下进行决策,而 E 占据明显优势. 由于 P_1 和 P_2 是协作关系,因此 E 的信息如果被 P_1 获知, P_2 也会被通知,反之亦然. 地形是足够大但有界的,并且对于追逃双方是已知的,

追逃双方轮流采取行动. 当 E 到达地图边界认为逃方胜利,当 P_1 或 P_2 在一个计算周期内到达 E 的位置则认为追方胜利.

这种假设是非常实际且有意义的. 在军事方面,对抗的战场一般是公共区域,存在信号的干扰、欺骗或屏蔽. 而由于军事力量不同,经常会有一方处于弱势,本文的研究能够有效帮助弱势方完成决策. 在民用方面,当警用直升机和警车共同追逐城市环境中的罪犯时,往往可能丢失躲在建筑物后的罪犯,而随着高智商犯罪越来越多,罪犯很可能有周密的计划或更好的装备从而随时了解警察的位置.

根据协作追逃问题的描述,协作策略由信息的完备程度以及逃跑概率决定. 进一步说,信息的完备程度代表了视觉域的可见性,其根据 E 相对于 P_1 和 P_2 的状态不同而不同. 而逃跑概率则与逃跑路径有关,即与地形中的障碍有关. 可见性和逃跑路径相互依存,共同决定了协作策略. 那么,本文的追逃问题就可以抽象描述为不完全信息情况下在复杂非凸环境中的协作追逃问题. 设 E 在 t 时刻的位置为 $E(t)$,地图和障碍信息用 M 表示,则逃跑路径的集合为 $F(E(t), M)$,其中第 i 条逃跑路径为 r_i . 定义 E 在此时沿 r_i 逃跑的成功率为 $p_E(E(t), t|r_i)$,那么协作追逃问题的决策模型 S 可由下式描述:

$$S \propto p_E(E(t), t|r_i), \quad (1)$$

其中符号 \propto 表示决策模型 S 由右侧的结果决定,并且 $r_i \in F(E(t), M)$.

3 基于三维实时航路规划的追逃博弈走法生成器

航路规划是决策的出口与实现手段,将追逃理论与航路规划统筹考虑是决策落地的重要保障. 追逃决策需要计算双方所有可能的逃跑路径,因此本节以航路规划算法为基础设计追逃博弈的走法生成器. 只有决策算法和航路规划的地形数据能够统一,才能实现这两类研究的无缝衔接(非分层规划^[20]).

由于复杂约束的微分对策难以获得解析解,因此本文的追逃策略是建立在多面体环境基础上的. 为了实现策略和航路规划的数据统一,应该采用多面体环境下的航路规划方法作为走法生成器(比如基于图形的方法或基于网格的方法). 这里,提出一种基于离散网格的改进边界值问题(boundary value problem, BVP)方法作为追逃博弈走法生成器. BVP势场能够避免调和场法的局部极小问题,同时保持了调和场法实时性较好的特点^[21]. BVP势场属于调和场,其需要建立一个如图3(a)描述的网格地形模型. 因此BVP方法的精度受网格密度影响,但并不

影响它的有效性.

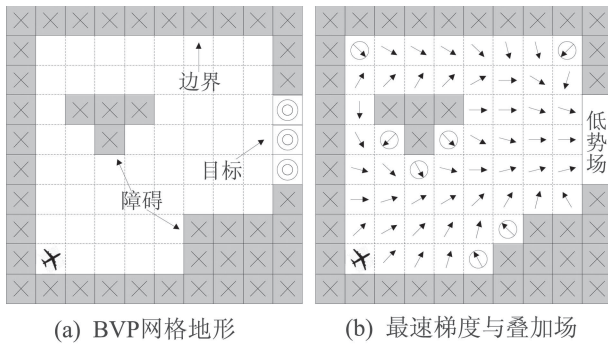


图3 离散BVP方法的网格势场

Fig. 3 Potential field of grid in discrete BVP method

BVP方法根据势场的梯度下降方向确定最短路径,如图3(b)所示.目标区域被定义为最低势场,边界被定义为最高势场,因此每个网格均有一个梯度大小和方向.注意,图3(b)中的矢量既有方向也有大小,这里只画出了矢量方向.在狄氏边界条件下,每个网格的势场由下式计算:

$$\nabla^2 p(\mathbf{r}) + \varepsilon \mathbf{v} \times \nabla p(\mathbf{r}) = 0, \quad (2)$$

式中: \mathbf{v} 表示偏转单位矢量, ε 是已知参数.调整这两个参数将人为改变势场从而改进搜索.利用高斯赛德尔(Gauss-Seidel)方法,对BVP方法进行离散化改进,以三维为例,用式(3)完成网格势场动态更新:

$$p_c^{t+1} = p_c^t e^{-at} + \frac{1}{26} \sum_{k=1}^{26} p_k + \frac{\varepsilon}{26 \times 2} \times \sum_{i=1}^{13} \sum_{j=13}^{26} (p_i - p_j) v_{ij}. \quad (3)$$

中心网格与26个网格相邻(类似魔方中心的部分),因此离散势场的更新与相邻的26个网格有关.式(3)中 a 为叠加场系数, p_c^t 和 p_c^{t+1} 分别是当前时刻和下一时刻的中心网格势场,第2项是相邻网格的平均势场,第3项是相邻网格的传播场.由于地图有界但较大,因此BVP方法需要改进从而提高收敛速度.单纯增大目标引力场和边界排斥场是不合适的,其会导致势场提前收敛于局部极小.因此借鉴水波纹现象,即波纹的涟漪抵达边界时反向传播的特点,设计了叠加场系数,将障碍物顶点的势场影响纳入考量,如图3(b)中的圆圈箭头.

4 协作追逃博弈策略

追逃问题是博弈论的重要分支,属于人工智能学科极具挑战的研究领域.复杂环境下的追逃问题属于EXPTIME-complete问题,被证明不存在有效的多项式时间求解方法,因此很难找到解析解,只能寻求近似解.传统的追逃问题在无障碍环境中取得了较大突破,而在有障碍地形(非凸环境)中却难

以推广.另一方面,随着异构智能体的加入以及规划空间从二维上升到三维,求解非完全信息下的追逃问题变的更为困难.

4.1 逃方策略

逃方策略的总体思想包含以下3点:

- 1) 向最近的边界移动;
- 2) 减小被 P_1 或 P_2 发现的概率;
- 3) 尽可能增大与 P_1 和 P_2 的距离.

第1点是 E 胜利的条件,第2点和第3点是 E 生存的条件. E 在保证生存的前提下,尽可能争取胜利.在 E 的策略中,提出一种最坏情况: P_1 或 P_2 一旦发现 E ,以后始终可见,即OSU(once-seen-until)条件.

由于 $V_{P_1} > V_{P_2} = V_E$,因此根据第3节的分析,追逃地图需要进行统一栅格化,栅格的尺寸根据速度最快的 V_{P_1} 确定,即计算周期(单位网格)以 P_1 的移动为准.那么可能存在 P_1 移动了一个或几个网格, P_2 和 E 仍然在一个网格内的情况.

下面根据OSU条件在一个计算周期内描述 E 的策略.首先,寻找 E 到每个地图边界点的最短避障路径集合 $\text{Path}_E \in \{\text{Path}_E(1), \text{Path}_E(2), \dots\}$.假设第 i 条路径由有限个航路点组成

$$\text{Path}_E(i) \in \{E(i)_M(1), E(i)_M(2), \dots\}.$$

接着计算 E 沿不同路径逃跑的概率,设 E 在 t 时刻位置为 $E(t)$,其下一时刻的可行路径点为 $E_1(t+1), \dots, E_k(t+1)$,其中脚标 $1, \dots, k$ 表示 $t+1$ 时刻的可行路径分支, $l_j(t+1)$ 表示第 j 个分支的子树数量.则逃方选择分支 $E_j(t+1)$ 的概率为

$$p_E(E(t), t | E_j(t+1)) = \frac{l_j(t+1)}{\sum_{j=1}^k l_j(t+1)}, \quad (4)$$

其中 $j \in \{1, \dots, k\}$.之后利用直线视野(line-of-sight, LOS)^[22]或视觉域(field of view, FOV)^[23]计算各航路点被 P_1 或 P_2 发现的概率.

由于 P_1 和 P_2 共享追逃策略,因此认为被 P_1 或 P_2 二者之一发现, E 即暴露.特别地,并不是每个航路点代表 E 行动一步,其与网格密度有关,由于网格尺寸依据一个周期内 P_1 的移动距离建立,则参与者的行动步数关系如表1所示.

接着,根据每个航路点被 P_1 或 P_2 发现的概率,计算每个航路点被 P_1 或 P_2 发现的风险值.对于第 i 条航路的第 j 个航路点,如果不被 P_1 和 P_2 发现,该航路点风险值为 $R_E(i)_M(j) = 0$.如果被 P_1 或 P_2 发现,但 E 在胜利前不被抓捕(需要利用第3节算法推演航路点 j 之后 P_1 和 P_2 的抓捕情况),风险值为

$$R_{E(i)_M(j)} = 1.$$

如果被 P_1 或 P_2 发现, 且 E 在胜利前被抓捕, 风险值为 $R_{E(i)_M(j)} = 2$, 并且根据 OSU 条件, 航路点 j 之后的所有航路点风险值均设为 2. 则 E 所选择的逃跑路径为

$$\min_i \left(\sum_j R_{E(i)_M(j)} \right). \quad (5)$$

表 1 E 的行动步数与第 i 条航路的路径点关系

Table 1 Relationship between the steps of E and the waypoint of the i th path

速度关系	$E(i)_M(1)$	$E(i)_M(2)$	$E(i)_M(3)$...
$V_{P_1} = V_E$	1步	2步	3步	...
$V_{P_1} = 2V_E$	2步	4步	6步	...
$V_{P_1} = 3V_E$	3步	6步	9步	...

这种累加风险值的方法, 与文献[24]的分支概率思想类似, 但计算更为简便, 且不限于速度相等的追逃问题. 然而, 全概率的计算会导致复杂度增加, 为了实现全局最优策略, 这种代价无法避免.

4.2 协作追击策略

传统的追逃问题一般采用将逃方驱赶至有界边界的策略, 比如狮-人问题^[25]. 但本文的地图是有界且足够大的, 传统方法难以确保追方胜利. 因此, 本节将充分利用协作系统特点 ($V_{P_1} > V_{P_2}$) 设计追方策略. 根据 E 相对于追方的状态有如下 3 种情况.

4.2.1 情况 1: E 处于 P_1 或 P_2 的视野范围内

此时以路径最短进行追击, 但特别地, P_1 和 P_2 需尽量保持 E 始终在视野中. 因此, 追方策略为: 尽可能保证 E 最大概率位于协作视野中, P_1 和 P_2 采用下面的算法 1 进行抓捕. 其是在非完全信息情况下, 兼顾障碍分布与最短路径的最优策略.

算法 1 P_1 和 P_2 下一时刻的期望位置计算.

```

1) for  $P_1$  的所有相邻网格 next_P1 do
   for  $P_2$  的所有相邻网格 next_P2 do
     假设  $P_1$  当前的相邻网格为 next_P1( $i$ ),  $P_2$ 
     当前的相邻网格为 next_P2( $j$ ), 根据 LOS
     与 BVP 算法, 计算  $E$  与不被  $P_1$  或  $P_2$  观测到
     的边界间的最短路径集合
     Path_PE( $i, j$ )  $\in$  {Path_PE( $i, j$ )(1),
                        Path_PE( $i, j$ )(2), ...}.
   end for
end for
2) for Path_PE do

```

针对集合 Path_PE 中的每条路径, 计算 E 脱离视野所需的步数或周期数 (参考第 4.1 节), 并加和作为风险集合

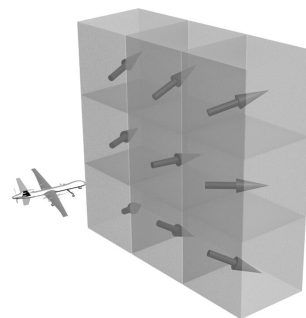
$$RPath_PE \in \{RPath_PE(1, 1), \dots, RPath_PE(i, j), \dots\}.$$

end for

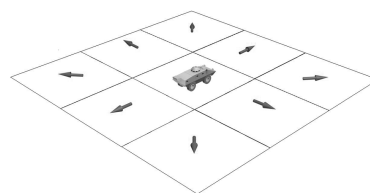
3) $RPath_PE(m_i, m_j) = \min_{i,j} \{RPath_PE\}$, 即为 E 最有可能的逃跑路径.

4) next_P1(m_i) 和 next_P1(m_j) 即为下一时刻 P_1 和 P_2 的期望位置.

由于 P_1 在三维空间中向前飞行, P_2 在二维空间中移动 (如图 4 所示), 因此 P_1 的相邻网格集合 next_P1 包含 9 个元素, P_2 的相邻网格集合 next_P2 包含 8 个元素. 算法 1 并非只以路径最短为目标 (不同于传统的航路规划算法), 其体现了协作视野的重要性, 那么 P_1 在垂向上移动的可能性将增大, 这样 P_1 的视野将具备更佳的全局性.



(a) 三维空间中 P_1 的相邻网格



(b) 二维平面中 P_2 的相邻网格

图 4 P_1 和 P_2 的相邻网格

Fig. 4 Adjacent grid of P_1 and P_2

4.2.2 情况 2: E 刚刚消失于 P_1 和 P_2 的视野

由于智能体存在速度关系 $V_{P_1} > V_{P_2} = V_E$, 因此提出“协作堵截”策略: P_1 和 P_2 协作压缩 E 的逃跑空间, 将问题转化为有界追逃 (类似狮-人问题). 为了阐述“协作堵截”策略, 首先简述狮-人问题.

图 5 中, 设狮子的初始位置为 $L_0 = (L_x0, L_y0)$, 人的初始位置为 $M_0 = (M_x0, M_y0)$. 在追逃开始阶段, 狮子在直线 M_0L_0 上找到一点 C (L_0 在线段 M_0C 上). 以 C 为圆心, CL_0 为半径做圆 (可以有无数个圆), 在所有圆中按照图 5 的情况找到距离坐标原

点最近的圆心即为的C位置. 追逃过程中, 坐标轴即为边界, 并且C的位置不变. 狮-人问题衍生出了很多重要的研究结论, 具体可以参阅文献[26-27].

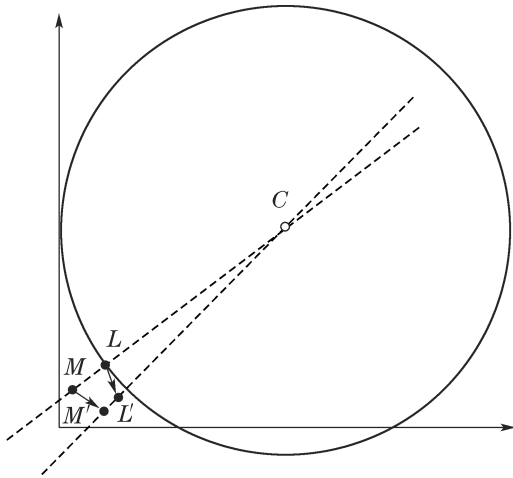


图5 狮-人问题

Fig. 5 Lion and men problem

本文的地图是有界足够大的, 并且地图中存在较多供逃方躲藏的障碍, 而追方只具备LOS视野并非全局视野, 因此本文的逃方将拥有更加有利的条件, 而追方的追击环境更加严苛. 因此“协作堵截”策略充分发挥了空地协作系统特点, 帮助追方应对这种挑战.

类似第4.1节逃方策略的讨论, 对追方同样提出一种最坏情况: 一旦 P_1 和 P_2 丢失 E 的位置, E 以后始终不可见, 即OLU(once-lose-until)条件. 则“协作堵截”策略为: 在OLU条件下, 利用 $V_{P_1} > V_{P_2}$ 的空地协作特点, P_2 将 E 消失的位置作为子目标点进行直线追击(图6), 而 P_1 根据 E 逃跑的趋势, 将 E 未来可能出现的位置作为子目标点进行堵截(图7).

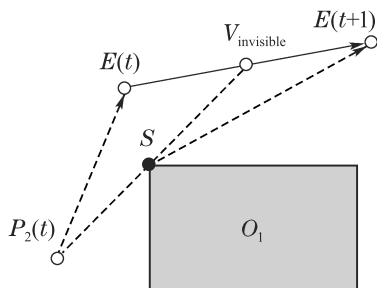


图6 丢失目标时 P_2 的二维追击情况(矩形为例)

Fig. 6 2D pursuit of P_2 when the evader is lost

图6中, 设 $E(t)$ 为 E 的当前时刻位置, $E(t+1)$ 为 E 的下一时刻位置, $P_2(t)$ 为 P_2 的当前时刻位置, O_1 为矩形障碍, $V_{invisible}$ 为不可见点. 当 E 由 $E(t)$ 行进至 $E(t+1)$ 时, 其相对于 P_2 的状态由可见变为不

可见. 造成遮挡的 O_1 的顶点 S 即为子目标点, 根据文献[24], 其具有如下性质:

性质1 如果 P_2 与 E 因多边形遮挡而不可见, 则 P_2 与 E 之间的最短路径是一条多边形路径, 多边形的顶点是该路径中的一点.

由性质1, 子目标点必在 P_2 和 E 之间的最短路径上, 其作用是对 E 进行驱赶和逼迫, 使追逃态势向追方有利的方向发展. 对于 P_1 的三维堵截情况, 根据之前的工作^[28-29]计算子目标点. 图7以长方体为例, 介绍了三维子目标点的计算方法.

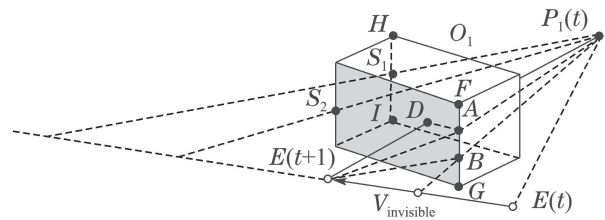


图7 丢失目标时 P_1 的三维堵截情况(长方体为例)

Fig. 7 3D pursuit of P_1 when the evader is lost

图7中, 设 $E(t)$ 为 E 当前时刻位置, $E(t+1)$ 为 E 下一时刻位置, $P_1(t)$ 为 P_1 当前时刻位置, O_1 为长方体障碍, $V_{invisible}$ 为不可见点. 记直线 $P_1(t)E(t+1)$ 与 O_1 的交点靠近 $E(t+1)$ 一侧的为 D , D 到其所在平面各边中最近的一条垂足为 A , 其所在边为 FG . 平面 $E(t)P_1(t)E(t+1)$ 与 FG 交点为 B . 当 E 由 $E(t)$ 行进至 $E(t+1)$ 时, 其相对于 P_1 的状态由可见变为不可见. 则存在如下定理.

定理1 对于任意的 B 位置, 图7中有

$$\|P_1(t)B\| + \|BE(t+1)\| \geq \|P_1(t)A\| + \|AE(t+1)\|. \tag{6}$$

证 以 FG 为轴旋转平面 $AE(t+1)B$, 直至与 $AP_1(t)B$ 成为同一平面 $E(t+1)BP_1(t)$. 此时点 $P_1(t)$, A 和 $E(t+1)$ 在一条直线 $P_1(t)E(t+1)$ 上. 在三角形 $E(t+1)BP_1(t)$ 中, 有

$$\|P_1(t)B\| + \|BE(t+1)\| \geq \|P_1(t)E(t+1)\| = \|P_1(t)A\| + \|AE(t+1)\|.$$

由于 B 点是任意的, 因此式(6)始终成立. 证毕.

由于本文假设如果 E 对于 P_1 不可见, 则 P_1 丢失 E 的位置, 因此实际上 $E(t+1)$ 对于 P_1 是不可知的, 即 A 点无法得到. 在“协作堵截”策略中, 当丢失 E 位置时, P_1 将 E 未来可能出现的位置作为子目标点进行堵截, 即图7中的 S_1 和 S_2 . 因为平面 $E(t)P_1(t)E(t+1)$ 先与边 HI 相交, 因此 P_1 先以 S_1 为子目标点, 如果仍未发现 E 再以 S_2 为子目标点. S_1 , S_2 和 B

均是障碍 O_1 某一竖边上的点, 并均在平面 $E(t)P_1(t)E(t+1)$ 内. 以 S_1 为例给出计算通式.

在三维空间中, 设 HI 所在的直线方程为

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1}, \quad (7)$$

其中: (x_1, y_1, z_1) 是点 H 的坐标, (x_2, y_2, z_2) 是点 I 的坐标. 用中间变量 l 重写方程(7)为

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1} = \frac{y-y_1}{y_2-y_1} = \frac{z-z_1}{z_2-z_1} = l. \quad (8)$$

那么, 方程(7)可以变形为

$$\begin{cases} x = (x_2 - x_1)l + x_1, \\ y = (y_2 - y_1)l + y_1, \\ z = (z_2 - z_1)l + z_1. \end{cases} \quad (9)$$

设 $P_1(t)$, $E(t)$ 和 $V_{invisible}$ 所确定的平面方程为

$$AAx + BB y + CCz + DD = 0, \quad (10)$$

其中 AA , BB , CC 和 DD 是已知系数, 联立方程(9)和方程(10)解得中间变量

$$l = \frac{-DD - AAx_1 - BB y_1 - CCz_1}{AA(x_2 - x_1) + BB(y_2 - y_1) + CC(z_2 - z_1)}. \quad (11)$$

将式(8)中的 l 代入式(6)就能计算出交点 S_1 的坐标(子目标点). 之前的工作包含多种二维和三维复杂几何体, 其中三维几何体包括: 长方体、球体、圆锥、圆柱等, 仿照上述的过程能够计算出子目标点. 可以证明, 上述子目标点的计算方法均是具备最短路径特点的, 具体可以参考文献[28].

4.2.3 情况3: E 的信息对于 P_1 和 P_2 完全未知

P_1 和 P_2 进行协作搜索. 计算各自在下一时刻的视野覆盖面积, 使 P_1 和 P_2 在下一时刻所观察的协作视野最大. 其追逃策略为: 执行情况3的协作搜索算法直至发现 E (转化为情况1)或追逃过程结束.

根据文献[30]的结论, 在非完整信息情况下很难找到最优解, 因此协作搜索的目标是减少感知重叠, 扩大视野面积. 并且文献[31]指出, 对于藏匿在障碍后的逃跑者的搜索策略存在条件是: 搜索算法必须是完备算法. 因此协作搜索可以采用最大-最小算法.

4.2.4 补充说明

1) 地图有界足够大的假设是为了有足够的步数推演追逃过程. 由于追方在不完全信息下进行决策, 如果地图很小, 逃方非常容易获得博弈胜利.

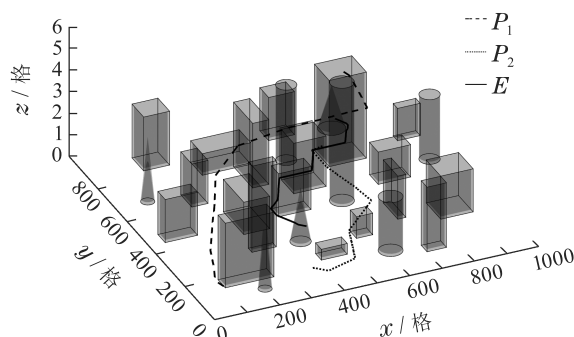
2) 对于 P_1 和 P_2 , 全局最坏情况是: P_1 和 P_2 不知道 E 的位置. 因此, 追方的总体策略是尽可能将情况3转换为情况2, 然后在情况2的OLU条件下尽可

能将情况2转换为情况1完成追逃.

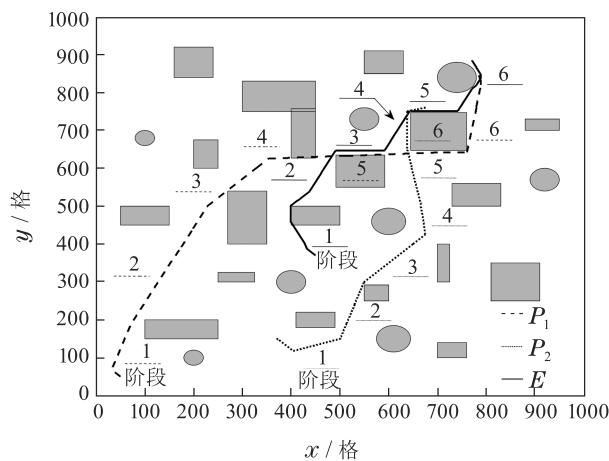
5 仿真验证与分析讨论

5.1 三维多面体环境中的协作追逃仿真

在 $1000 \times 1000 \times 6$ 的三维地形中对本文的方法进行验证, 地形中一共有27个障碍, 其中长方体障碍19个, 圆柱障碍4个, 圆锥障碍4个, P_1 起始点为(50, 50, 1), P_2 起始点为(370, 150, 0), E 起始点为(450, 370, 0), 速度关系为 $\frac{1}{2}V_{P_1} = V_{P_2} = V_E$, P_2 和 E 每个计算周期移动一个栅格. 图8(a)为复杂三维多面体环境中的UAV/UGV协作追逃仿真结果, 图8(b)为其俯视图. 追逃过程被划分为6个阶段进行分解说明.



(a) UAV/UGV协作追逃三维图



(b) UAV/UGV协作追逃俯视图

图8 复杂三维多面体环境中的UAV/UGV协作追逃
Fig. 8 Collaborative pursuit-evasion of UAV/UGV system in a complex 3D polyhedral map

阶段1 图8(b)中, E 对于 P_1 和 P_2 均不可见, 则 P_1 和 P_2 向协作视野最大的方向分头搜捕. E 已知 P_1 和 P_2 的位置, 为减小在 P_1 和 P_2 中视野暴露的概率, 其选择向地图的东北方向移动, 并且寻找位于(400, 450)的长方体障碍作为掩体进行躲藏.

阶段2 图8(b)中, E 仍对于 P_1 和 P_2 均不可见, 因此保持原协作搜索策略, 向协作视野最大的方向

移动. E 已经完成了寻找掩体的躲避,并结合 P_1 和 P_2 的移动方向,继续向边界(胜利条件)移动.

阶段3 与阶段2相似, E 仍然对于 P_1 和 P_2 均不可见.但由于 P_1 的速度高于 P_2 和 E ,因此在图8(b)中 P_1 已经几乎完成了 $\frac{1}{4}$ 地图的搜索. E 被发现的危险逐渐增加,因此图8(b)中 E 在保持继续向边界移动的同时,选择位于(500, 550)的长方体障碍作为第2个掩体进行躲藏.

阶段4 图8(b)中, E 在向第3个掩体(650, 650)移动过程中(同时第3个掩体也更靠近边界,即 E 的胜利条件),被 P_2 发现并与 P_1 共享.接着, P_1 和 P_2 改变了追捕策略(由第4.2节的情况3转为情况1),此时图8(b)中 P_1 和 P_2 同时向着 E 进行追击.

阶段5 图8(b)中, E 绕过第3个掩体(650, 650),脱离了 P_1 和 P_2 的视野,并继续向边界移动.此时由于 P_1 和 P_2 丢了 E 的位置,则追捕策略转为情况2的“协作堵截”.图8(b)中 P_2 向着 E 消失的方向移动, P_1 向着 E 可能出现的位置移动.

阶段6 E 在到达边界之前被 P_1 抓捕.图8(b)中, P_2 由于速度较慢此时刚刚绕过位于(650, 650)的障碍. P_1 在绕过(650, 650)的障碍之后发现了 E ,而 E 正准备将位于(750, 850)的障碍作为第4个掩体,但由于 E 与 P_1 距离较近,其没有足够的时间完成摆脱,因此最终追方获得胜利.

5.2 对比仿真验证

目前的追逃研究大多在开放的凸环境^[32],非凸环境较少.为了验证本文算法性能,选择文献[24]的算法进行了对比仿真,其研究了一种基于可视性的追逃问题,提出了多边形环境中的随机追逃策略,能够利用子目标点完成多步追逃.为了阐述简便,在后续分析中将本文的算法简称“方法1”,将文献[24]的算法简称“方法2”,针对图8所示地形进行对比仿真(只显示俯视图),如图9所示.

图8-9中,相同线型所代表的意义一致,是用方法1计算得到的路径,整个追逃的过程同样被划分为几个阶段进行分解说明.在图9中,阶段1-3使用的是方法1,阶段4-6使用的是方法2.这是因为方法2在丢失目标后采用的是随机搜索策略,其虽然保证了算法的完备性,但却由于缺少启发信息,使得 E 在复杂地形中极容易逃脱.本文的方法1在丢失目标后将转入第4.2.3节的情况3,采用协作视野最大化的搜索策略,提高了搜索效率.因此,为保证追逃过程的连续性,只在阶段4-6使用方法2.方法2没有给出逃方策略,因此 E 的策略仍使用本文第4.1节的算法.阶段1-3的结果与第5.1节一致,不再赘述,

下面从阶段4开始进行对比分析.

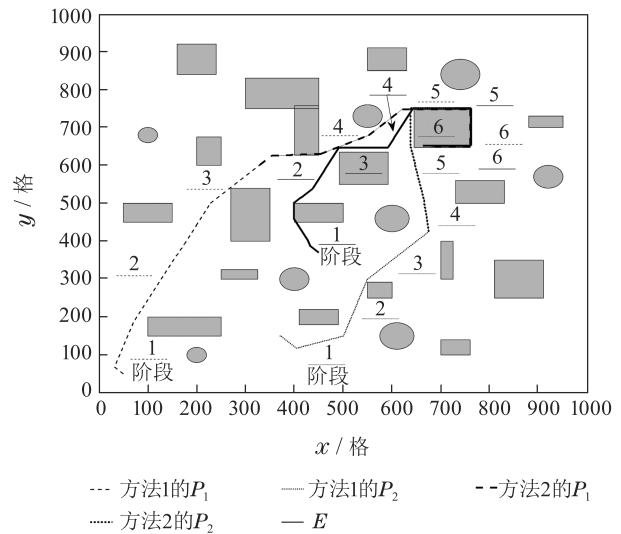


图9 对比仿真结果

Fig. 9 Comparison of simulation results

阶段4 E 向位于(650, 650)的第3个掩体躲藏过程中被 P_2 发现并通知了 P_1 .方法1和方法2在 E 位置已知的情况下均采用直线追击,因此图8(b)和图9中 P_1 和 P_2 同时向 E 的方向进行追击.

阶段5 E 绕过位于(650, 650)的第3个掩体并脱离了 P_1 和 P_2 视野.此时由于 P_1 和 P_2 丢失了 E 的位置,方法1和方法2采用了不同策略:图8(b)中方法1的追捕策略由第4.2节的情况3转为情况2, P_2 向 E 消失的方向追击, P_1 向 E 可能出现的位置堵截,展开合围;图9中方法2的 P_1 和 P_2 同时将 E 消失的位置作为子目标进行追击.

阶段6 E 再次被追方发现.针对方法1和方法2不同的追方策略,本文 E 的路线也有所改变.对于图8(b)中的方法1,由于 P_1 和 P_2 采用了“协作堵截”策略,追方的包夹使得 E 只能继续向地图的东北方向移动,其逃跑空间进一步被压缩,最后追方获胜.图9的方法2中,由于 P_1 和 P_2 均处于 E 的同侧,因此其利用了位于(650, 650)的障碍进行掩护,通过绕圈的方式尝试对追方进行摆脱,但由于 P_1 速度较快使得 E 摆脱失败,最终追方获得胜利.然而,随着 E 的速度逐渐提高,实验结果表明:在图9的地图中使用方法2时,当逃方速度到达临界速度 $1.2V_E = V_{P_1}$ 后,逃方是可以获胜的.因此方法1的鲁棒性更好,能够在 P_1 和 E 的速度较为接近时,仍然保证追方具有较高的胜率.

表2从视野覆盖程度和路径长度方面对比了方法1-2.由于阶段1-3均使用了本文的方法1,因此表2只列出了阶段4-6的对比内容.表2中的视野覆

盖程度是当前阶段下的平均视野覆盖面积, 追方与 E 的距离采用区间表示, 区间的上下限分别是追方在当前阶段下与 E 的最大和最小距离.

对于表2中方法1的 P_1 , 在阶段4-5, 其在获知 E 的位置后, 追逃策略由情况3转为情况2, 因此迅速缩小了与 E 的距离. 但在阶段6, 由于需要对位于 (650, 650) 的障碍进行避障, 因此存在短时间内与 E 距离增大的情况. 在视野覆盖程度方面, 方法1的 P_1 在阶段6进入空白地带的直线追击, 因此阶

段6的视野范围大于阶段4-5.

对于表2中方法1的 P_2 , 由于在阶段4其发现了 E 的位置, 因此追逃策略由搜索转变为直线追击. 在阶段4-5, P_2 与 E 的距离逐渐缩小. 位于 (650, 650) 的障碍对 P_2 的追击路线造成了影响, 并且 E 开始向位于 (750, 850) 的障碍移动, 因此阶段6中 P_2 与 E 的距离存在增大的现象. 在视野覆盖程度方面, 方法1的 P_2 在阶段5进入到两个障碍的间隙, 因此阶段5的视野范围比阶段4和阶段6小.

表 2 方法1与方法2的对比
Table 2 Comparison of Method 1 and Method 2

方法	追方	比较项	阶段4	阶段5	阶段6	路径长	胜方
1	P_1	视野覆盖	68.6	63.4	86.1	628.1	追方
		与 E 距离	[223.6, 262.4]	[100, 223.6]	[0, 120.8]		
	P_2	视野覆盖	446.2	316.4	338.5	314.2	
		与 E 距离	[192.1, 274.6]	[164.2, 192.1]	[170.6, 180.3]		
2	P_1	视野覆盖	83.3	71.4	47.2	654.8	追方
		与 E 距离	[223.6, 262.4]	[100, 223.6]	[0, 120.8]		
	P_2	视野覆盖	446.2	316.4	363.7	327.4	
		与 E 距离	[192.1, 274.6]	[126.8, 192.1]	[100, 126.8]		

对于表2中方法2的 P_1 , 在阶段4-5, 其在获知 E 的位置后, 直接向 E 的位置移动, 迅速缩小了与 E 的距离, 并且在阶段6中围绕位于 (650, 650) 的障碍对 E 进行追击, 距离进一步缩短. 在视野覆盖程度方面, 方法2的 P_1 在阶段4-5经过的区域相对空旷, 因此其视野范围在阶段4-5相较于方法1大, 而方法2的 P_1 在阶段6始终围绕位于 (650, 650) 的障碍进行追击, 因此其视野在阶段6比方法1小.

对于表2中方法2的 P_2 , 其在阶段6的视野范围比方法1大. 在与 E 的距离方面, 方法2的 P_2 在阶段5-6比方法1小, 这是由于两种方法中 E 的逃跑方向不同所导致.

5.3 追逃结果的影响因素分析

追逃结果除了与第5.2节分析的速度有关, 还与追逃双方的初始位置有关, 这一点在经过蒙特卡洛仿真后得到验证: 针对图8-9所示地形, 假设使用两种方法时追方胜利的次數与 E 的初始距离关系均服从正态分布且相互独立, 均值为 $\mu_1 = \mu_2 = 0$ 而标准差 σ_1 和 σ_2 未知, 随机选取1000组 P_1, P_2 和 E 的初始位置, 进行蒙特卡洛仿真后得到方法1与方法2的标准差关系为 $\sigma_1 = 1.38\sigma_2$, 即在不同初始位置时, 使用方法1的追方胜率更高.

从第5.1节和第5.2节的仿真结果可以看出, 追逃

双方处于零和博弈状态, 那么该问题的鞍点解必存在. 根据博弈的显示原理和贝叶斯均衡, 非完全信息下需要通过博弈机制的设计使代理人如实暴露自己的类型, 从而计算策略表达式并得到一阶鞍点解. 根据第2.2节的分析, 实际情况下追逃双方处于战斗对立阵营, 彼此不会知悉作战策略, 即对手的支付函数(或代价)无法假设. 因此, 即使鞍点解存在, 本文所述的追逃博弈仍然较难找到这种均衡.

可以预见的是, 复杂非凸环境中的追逃结果与多种影响因素有关, 包括追逃双方的速度、初始位置以及障碍的形状与分布等, 这是值得进一步深入研究和讨论的问题.

6 结论与未来工作

区别于传统追逃问题, 本文的追逃地形是有界足够大的, 并且包含多种障碍. 针对逃方能够利用障碍进行躲避的特点, 在最坏情况下设计了逃方策略. 为了充分发挥追方空地协作的优势, 利用LOS和BVP算法, 根据逃方状态分析了3种情况下的追击策略:

- 1) 当逃方处于追方视野范围内, 追方采用最优协作视野下的追逃算法;
- 2) 当逃方刚刚消失于追方视野范围时, 结合狮-人问题, 提出了追方的“协作堵截”策略, 并计算了子目标点;

3) 当逃方完全消失于追方视野时, 追方采用协作搜索策略。

由于追逃地形是非凸且足够大的, 因此本文策略不保证追方一定能够胜利, 但在文中假设的最坏

情况下是最优的, 追逃双方的胜利条件与多种影响因素有关, 还需进一步分析. 目前, 利用前期搭建的 UAV/UGV空地协作系统, 已经完成了大量的室内室外实验, 其中包括室内地面追逃实验(图10).



AGV自动跟随平台综合显示与控制系统

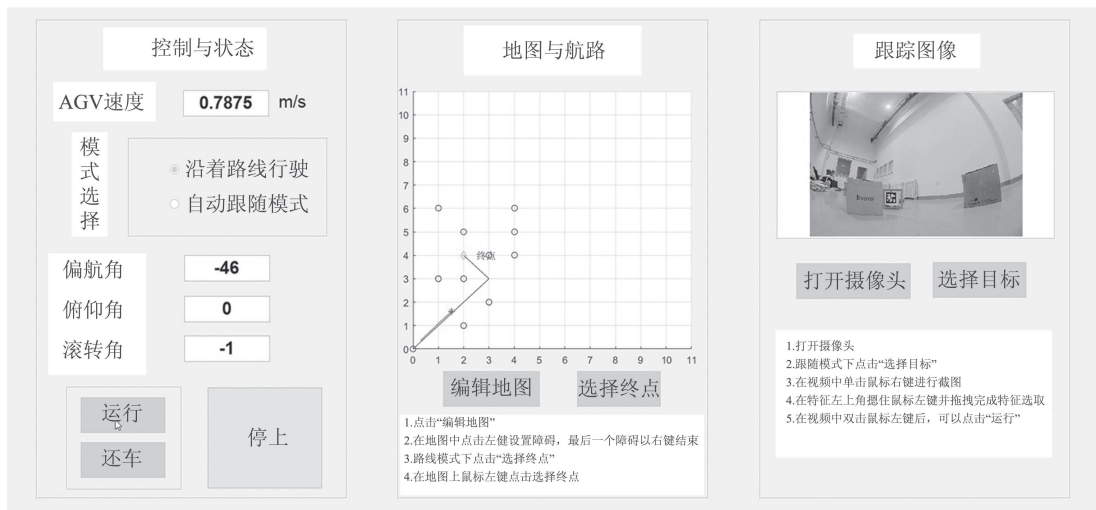


图 10 室内环境中两台UGV之间的追逃实验

Fig. 10 Indoor pursuit-evasion experiment of two UGVs

参考文献:

- [1] ZHAO Yuliang, SONG Yexin, ZHANG Jianjun, et al. Fuzzy game decision-making of unmanned aerial vehicles air-to-ground attack based on the particle swarm optimization integrating multiply strategies. *Control Theory & Applications*, 2019, 36(10): 1644 – 1652. (赵玉亮, 宋业新, 张建军, 等. 基于多策略融合粒子群的无人机对地攻击模糊博弈决策. *控制理论与应用*, 2019, 36(10): 1644 – 1652.)
- [2] CHAIMOWICZ L, KUMAR V, CAMPOS M F M. A paradigm for dynamic coordination of multiple robots. *Autonomous Robots*, 2004, 17(1): 7 – 21.
- [3] GROCHOLSKY B, KELLER J, KUMAR V, et al. Cooperative air and ground surveillance: A scalable approach to the detection and localization of targets by a network of UAVs and UGVs. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2006, 13(3): 16 – 25.
- [4] HAGER C E, KWON H, ZARZHITSKY D, et al. A cooperative autonomous system for heterogeneous unmanned aerial and ground vehicles. *AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit 2011*. St. Louis, MO, United states: AIAA, 2011: 1 – 6.
- [5] KHALEGHI M A, DONG X, WANG Z, et al. Cooperative air and ground surveillance: A scalable approach to the detection and localization of targets by a network of UAVs and UGVs. *Expert Systems with Applications*, 2013, 40(18): 7168 – 7183.
- [6] CASBEER D W, GARCIA E, PACTHER M. The target differential game with two defenders. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2018, 89(1/2): 87 – 106.
- [7] CHUNG T H, HOLLINGER G A, ISLER V. Search and pursuit-evasion in mobile robotics. *Autonomous Robots*, 2011, 31(4): 299 – 316.

- [8] GOODE B J, ROAN M J. A differential game theoretic approach for two-agent collision avoidance with travel limitations. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2012, 67(3/4): 201 – 218.
- [9] AWHEDA M D, SCHWARTZ H M. A decentralized fuzzy learning algorithm for pursuit-evasion differential games with superior evaders. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2016, 84(2): 35 – 53.
- [10] GOLDSTEIN A S, REINGOLD E M. The complexity of pursuit on a graph. *Theoretical Computer Science*, 1995, 143(1): 93 – 112.
- [11] ISLER V, KARNAD N. The role of information in the cop-robber game. *Theoretical Computer Science*, 2008, 3(399): 179 – 190.
- [12] CASINI M, GARULLI A. An improved lion strategy for the lion and man problem. *IEEE Control Systems & Letters*, 2017, 1(1): 38 – 43.
- [13] SATO H, ROYSET J O. Path optimization for the resource constrained searcher. *Naval Research Logistics*, 2010, 57(5): 422 – 440.
- [14] BHADARIA D, ISLER V. Capturing an evader in a polygonal environment with obstacles. *Naval Research Logistics*, 2011, 29(7): 831 – 839.
- [15] LIANG X, CHEN G, ZHAO S, et al. Moving target tracking method for UAV/UGV heterogeneous system based on Apriltags. *Measurement and Control*, 2020, 53(3/4): 427 – 440.
- [16] LIANG X, ZHAO S, CHEN G, et al. Design and development of ground control system for tethered UAV. *2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems*. Beijing, China: IEEE, 2019: 291 – 296.
- [17] LIANG X, CHEN G, ZHAO S, et al. Moving target tracking of UAV/UGV heterogeneous system based on quick response code. *UPB Scientific Bulletin (Series C)*, 2019, 81(3): 77 – 92.
- [18] LIANG X, SHEN M, DU G, et al. Real-time moving target tracking algorithm of UAV/UGV heterogeneous collaborative system in complex background. *UPB Scientific Bulletin (Series C)*, 2019, 81(1): 119 – 136.
- [19] LIANG X, CHEN G, ZHAO S, et al. Remote guidance method of unmanned aerial vehicle based on multi-sensors. *2019 IEEE International Conference on Unmanned Systems*. Beijing, China: IEEE, 2019: 297 – 302.
- [20] LAZAROWSKA A. A new deterministic approach in a decision support system for ship's trajectory planning. *Expert Systems with Applications*, 2017, 71(4): 469 – 478.
- [21] LIANG X, MENG G, LUO H, et al. Dynamic path planning based on improved boundary value problem for unmanned aerial vehicle. *Cluster Computing*, 2016, 19(4): 1 – 10.
- [22] SCHOUWENAARS T, FERON E, HOW J. Multi-vehicle path planning for non-line of sight communication. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*. Minneapolis, Minnesota, USA: IEEE, 2006: 5757 – 5762.
- [23] ZHANG M, SONG J, HUANG L, et al. Distributed cooperative search with collision avoidance for a team of unmanned aerial vehicles using gradient optimization. *Journal of Aerospace Engineering*, 2016, 30(1): 04016064.
- [24] ISLER V, KANNAN S, KHANNA S. Randomized pursuit-evasion in a polygonal environment. *IEEE Transactions on Robotics*, 2005, 21(5): 875 – 884.
- [25] ABRAHAMSEN M, HOLM J, ROTENBERG E, et al. Best laid plans of lions and men. *The 33rd International Symposium on Computational Geometry*. Dagstuhl, Germany: IEEE, 2017: 1 – 16.
- [26] OLGA Y. Lion and man game in compact spaces. *Dynamic Games and Applications*, 2019, 9(1): 281 – 292.
- [27] BARMAK J A. Lion and man in non-metric spaces. *Mathematische Zeitschrift*, 2018, 290(3/4): 1165 – 1172.
- [28] LIANG X, MENG G, XU Y, et al. A geometrical path planning method for unmanned aerial vehicle in 2D/3D complex environment. *Intelligent Service Robotics*, 2018, 11(3): 1 – 12.
- [29] YAO P, WANG H, SU Z. UAV feasible path planning based on disturbed fluid and trajectory propagation. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2015, 28(4): 1163 – 1177.
- [30] ANTONIADES A, KIM H J, SASTRY S. Pursuit-evasion strategies for teams of multiple agents with incomplete information. *The 33rd IEEE International Conference on Decision and Control*. Maui, HI, USA: IEEE, 2003: 756 – 761.
- [31] LI A Q, FIORATTO R, AMIGONI F, et al. A search-based approach to solve pursuit-evasion games with limited visibility in polygonal environments. *The 17th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*. Stockholm, Sweden: IEEE, 2018: 1693 – 1701.
- [32] ZOU R, BHATTACHARYA S. On optimal pursuit trajectories for visibility-based target-tracking game. *IEEE Transactions on Robotics*, 2019, 35(2): 449 – 465.

作者简介:

梁宵 教授, 博士生导师, 目前研究方向为空地协作系统、导航、制导与控制、智能决策与规划, E-mail: connyzone@126.com;

王宏伦 教授, 博士生导师, 目前研究方向为无人系统、先进飞行控制、感知与规避, E-mail: hl.wang_2002@126.com;

骆海涛 研究员, 硕士生导师, 目前研究方向为机器人、结构分析与设计、人工智能, E-mail: luohaitao@sia.cn.