

控制与决策

Control and Decision

基于群智能—一致性理论的无人机编队全过程飞行航迹规划方法
苟进展, 吴宇, 邓嘉宁

引用本文:

苟进展, 吴宇, 邓嘉宁. 基于群智能—一致性理论的无人机编队全过程飞行航迹规划方法[J]. *控制与决策*, 2023, 38(5): 1464–1472.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0831>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

面向突发故障的分布式多无人机任务重规划方法

Mission replanning method of distributed multiple unmanned aerial vehicles for pop-up faults
控制与决策. 2023, 38(5): 1373–1385 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.1022>

一种多约束下无人机编队的模型预测控制算法

An algorithm of model predictive control for formation control of a multi-UAV system considering multiple constraints
控制与决策. 2023, 38(3): 706–714 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2022.0382>

基于APSODE-MS算法的无人机航迹规划

UAV trajectory planning based on APSODE-MS algorithm
控制与决策. 2022, 37(7): 1695–1704 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.1818>

基于分布式模型预测控制的无人机编队控制

Formation control of multi-UAV based on distributed model predictive control algorithm
控制与决策. 2022, 37(7): 1763–1771 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2021.0447>

面向多目标侦察任务的无人机航线规划

UAV trajectory planning for multi-target reconnaissance missions
控制与决策. 2021, 36(5): 1191–1198 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1284>

基于群智能-一致性理论的无人机编队全过程 飞行航迹规划方法

苟进展^{1,2}, 吴宇^{2†}, 邓嘉宁²

(1. 中国电子科技集团公司第十研究所, 成都 610036; 2. 重庆大学 航空航天学院, 重庆 400044)

摘要: 针对无人机编队执行任务全过程飞行规划问题, 提出一种基于多步粒子群优化的无人机编队航迹规划算法. 首先, 对无人机和执行任务策略进行建模, 将编队执行任务全过程划分为编队成形、执行任务、返航、解散和无人机降落 5 个阶段, 设计不同阶段的飞行策略; 其次, 针对不同的终端约束条件, 设计多类多层优化指标, 提出多步粒子群算法, 并引入模型预测控制滚动优化航路点, 得到适用于不同阶段的能严格满足约束条件的航路规划方法; 然后, 建立旋转坐标系, 将航路点信息转换为编队控制律中的理想航向和高度信息, 得到能通过航路点的编队控制算法; 最后, 利用编队控制算法去执行航路规划方法给出的航路点, 生成航迹, 得到编队航迹规划算法. 仿真结果表明, 所提规划方法比传统方法更适用于编队飞行, 能为编队规划执行任务全过程的平滑航迹, 具有良好的通用性.

关键词: 无人机; 编队飞行; 航迹规划; 粒子群算法; 终端约束条件; 模型预测控制

中图分类号: V249

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2022.0831

引用格式: 苟进展, 吴宇, 邓嘉宁. 基于群智能-一致性理论的无人机编队全过程飞行航迹规划方法[J]. 控制与决策, 2023, 38(5): 1464-1472.

Swarm intelligence and consensus theory based trajectory planning for a complete flight of UAV formation

GOU Jin-zhan^{1,2}, WU Yu^{2†}, DENG Jia-ning²

(1. The 10th Research Institute, China Electronics Technology Group Corporation, Chengdu 610036, China; 2. College of Aerospace Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: For the whole process trajectory planning of UAV formation performing tasks, a UAV formation trajectory planning algorithm based on the multi-step particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. First, the UAV model and the mission strategy model are established. The whole process of the formation performing tasks is divided into 5 phases: formation forming, task execution, returning, dismissing and UAV landing, and the flight strategies of different phases are designed. Second, multi-class and multi-layer optimization indexes are designed and a multi-step PSO algorithm is used to optimize waypoints according to different terminal constraints. Model predictive control (MPC) is introduced for rolling optimization of waypoints, and a route planning method suitable for different phases that can strictly meet the constraints is obtained. Then, a rotating coordinate system is established to convert the waypoint information into the ideal heading and altitude information in the formation control law, and the formation control algorithm that can pass waypoints is obtained. Finally, the formation control algorithm is used to execute the waypoints given by the route planning method to generate the trajectory, and the formation trajectory planning algorithm is obtained. The simulation results show that the proposed planning method with good generality is more suitable for formation flight than the traditional method, and it can plan a smooth trajectory of the whole process for formation to execute missions.

Keywords: UAV; formation flight; trajectory planning; PSO; terminal constraint; MPC

0 引言

随着无人系统技术的不断发展, 无人机在众多领域发挥着越来越重要的作用. 为克服单架无人机执

行复杂任务时完成率低、效率低等问题, 多无人机协同飞行成为了当前的研究热点^[1]. 无人机编队是多无人机协同的一种特殊方式, 它不仅要求多无人机进行

收稿日期: 2022-05-12; 录用日期: 2022-09-20.

基金项目: 国家自然科学基金项目(52102453); 重庆市自然科学基金项目(cstc2020jcyj-msxmX0602).

责任编辑: 杨涛.

†通讯作者. E-mail: cqwu@cqqu.edu.cn.

相互协作,还要求其在三维空间中形成特定的队形,从而达到延长航程、扩大覆盖面积、提高重要无人机的安全度、保证任务的完成率等效果^[2]。基于此,无人机编队已被大量应用到侦查^[3]、空中加油^[4]、森林灭火^[5]、搜索救援^[6]等任务场景中。如何根据相应的任务场景,规划适合无人机编队飞行的航迹,是编队研究的一个重点。

无人机编队航迹规划是指:在满足约束条件的情况下,为编队中的无人机规划从起点到任务区域的可行航迹,并使优化指标达到最佳。无人机单机航迹规划是无人机编队航迹规划的基础,选择合适的优化算法是轨迹优化问题的关键。对于无人机航迹规划的研究,目前常用的算法可分为两类:一是传统的经典算法,如动态规划算法^[7]、Dijkstra算法^[8]等;二是现代智能算法,如遗传算法^[9]、粒子群算法^[10]、蚁群算法^[11]等。关于经典算法的研究已比较成熟,如今大量的研究都围绕着智能算法展开。关于智能算法的研究,主要有3个方向:1)考虑将新兴智能算法与航迹规划相结合^[12-13];2)改进已有算法^[14];3)融合不同算法的优势形成杂交算法^[15],文献[16]对航迹规划中常用的智能算法进行了总结与比较。但是,将智能优化算法用于航迹规划,目前大部分的研究直接用这些优化算法为无人机生成航路,很少将无人机航迹规划分为粗规划和细规划两部分,考虑先优化引导无人机飞行的航路点,再得到适合无人机飞行的光滑航迹的方法。

在编队飞行规划中,不仅要考虑与单机飞行规划相同的任务与航迹等约束,还要考虑编队中各无人机的时域和空域协同。在无人机编队航迹规划中,编队集结、成形、变换、保持、重构、避障等问题是研究的重点。文献[17]针对多无人机编队集结时的航迹规划问题,对A*算法进行了改进,并根据无人机航程对航迹进行再规划,得到了一种无人机同时集结分步策略。文献[18]针对编队成形问题,提出了一种编队时间最优构型形成算法,使各运动体在成形中的轨迹基本符合最优路径要求。文献[19]针对无人机编队队形变换问题,从航迹规划角度出发,解决了编队集结、保持和重构等问题,并以完成队形变换消耗的能量与时间为指标,提出了编队变换的最优效率模型,给出了队形变换的最优空间位置。文献[20]针对静态障碍物和动态障碍物,设计了以编队形式进行避障和编队中各无人机单独避障两种方法,并对这两种方法进行了比较。然而,目前的文献大多针对编队飞行某一个或几个特点阶段进行研究,对于在具体任

务场景下编队飞行全过程的航迹规划问题还很少涉及。另外,在目前的编队航迹规划研究中,大多采用与单机相同的单步优化法。在这种方法下,起点到目标点间的航路点是被同时生成的,当一次性优化的航路点较多时,众多相邻航段间的约束条件很难被严格满足。然而,相比于单机飞行,编队飞行需满足更苛刻的约束条件,为编队规划一条能够严格满足约束条件的航路极为重要。

针对以上问题,本文将编队飞行分为编队成形、执行任务、返航、解散、无人机降落5个阶段。在各个阶段,将编队航迹规划分为粗规划和细规划两个步骤进行考虑,利用航迹规划中使用较多的群智能算法——粒子群算法优化航路点,再利用一致性算法生成实际航迹。在具体的任务场景中,完成编队飞行全过程航迹规划。本文创新点如下:

1)针对编队在各飞行阶段的飞行目的、优化目标和约束条件,建立相应的飞行策略模型,实现对编队飞行全过程的航迹规划。

2)在航路粗规划中,针对不同飞行阶段的终端约束条件,设计多类多层优化指标,提出多步粒子群算法用于滚动生成航路点,使每个航段都能严格满足约束条件。同时,对终端约束进行处理,使编队能以指定的航向进入任务点。在优化过程中引入了模型预测控制的思想,提高了算法避障和满足终端约束的能力。

3)建立编队飞行旋转坐标系,将航路点信息转化至编队控制算法中,得到能通过指定航路点的编队控制算法,并用此编队控制算法执行粗规划生成的航路点生成光滑航迹,得到航迹细规划算法。

1 编队执行任务飞行模型构建

首先,建立地面坐标系和无人机运动学模型,用于描述无人机运动状态;然后,建立编队执行任务策略模型,将编队飞行全过程分为多个阶段,并制定各阶段飞行策略。

1.1 无人机运动学模型

本文将无人机看作质点,建立地面坐标系描述无人机的运动状态。地面坐标系为固定在地球表面的一种坐标系,其原点 O 可固定在地平面任意位置, Ox_g 轴方向也可在地平面上任意选取, Oz_g 轴方向竖直向上垂直于水平面, Oy_g 轴方向通过右手法则确定。

在无人机编队飞行中,采用将横航向与纵向解耦的带自动驾驶仪的三自由度运动学模型建立无人机的速度、高度和航向保持器^[21],即

$$\begin{cases} \dot{x}_i = v_{xyi} \cos \varphi_i, \\ \dot{y}_i = v_{xyi} \sin \varphi_i, \\ \ddot{z}_i = -\frac{1}{\tau_z} \dot{z}_i + \frac{1}{\tau_z} (z_i^c - z_i), \\ \dot{v}_{xyi} = \frac{1}{\tau_{vxy}} (v_{xyi}^c - v_{xyi}), \\ \dot{\varphi}_i = \omega_i, \\ \dot{\varphi}_i = \frac{1}{\tau_\varphi} (\varphi_i^c - \varphi_i). \end{cases} \quad (1)$$

其中:模型输入指令 $u_i = (v_{xyi}^c, z_i^c, \varphi_i^c)$, 分别为自动驾驶仪水平面速度、高度和航向角的指令; $(v_{xyi}, z_i, \varphi_i)$ 分别为水平面速度、高度和航向角, \dot{v}_{xyi} 为加速度, $\dot{\varphi}_i$ 为航向角速度, \dot{z}_i 和 \ddot{z}_i 分别为爬升率与爬升加速度; τ_{vxy} 、 τ_φ 、 τ_z 和 $\tau_{\dot{z}}$ 分别为水平面速度、航向角、爬升率和高度指令对应的时间常数。

1.2 编队执行任务策略模型

针对具体的任务场景,将无人机编队飞行全过程分为如图1所示的5个阶段。图1中无人机处于编队状态时,将编队视为一个整体来规划航迹,整体内部的防碰撞由编队队形控制算法解决。无人机处于非编队状态时,则为每一架无人机单独规划航迹,规划过程中需避免不同无人机间的航迹冲突。在不同的飞行阶段,编队采取的飞行策略也有所差异,下面将分别介绍各阶段采取的飞行策略。

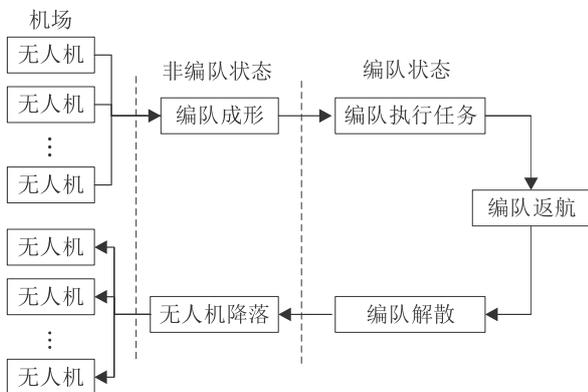


图1 无人机编队飞行全流程示意图

1) 编队成形阶段.

各无人机从同一机场出发,利用编队控制算法形成编队。为避免近距离成形过程中发生机间碰撞,各无人机首先会被引导至不同的高度层,然后分3步形成目标队形。首先,无人机保持各自的高度,仅进行横航向运动,使编队达到目标水平面队形的等比例扩大队形;然后,各架无人机在纵向收敛至目标纵向队形;最后,编队在水平面上进一步收缩达到目标队形。

2) 编队执行任务、返航、解散阶段.

在编队执行任务阶段,需要特别关注的约束为进入任务点的航向,以便避开威胁区打击目标薄弱部

位。当编队完成所有任务后,此时无人机离各自机场还比较远,不能立即解散,采取编队的形式返航,直到接近机场时,编队开始解散。编队解散是编队成形的逆过程,即编队在解散时先由当前的紧密队形散开到疏开队形,然后在高度方向上形成分层,以降低后续规划中无人机发生冲突的可能性。

3) 无人机降落阶段.

编队解散后,各架无人机进行相对独立的降落运动,因此需为每架无人机单独规划航迹。为避免进行大规模优化计算,提高优化的质量和速度,各架无人机的航迹是依次规划的。在规划顺序靠后的无人机航迹时,将已规划完毕的无人机的航迹视作约束,避免与它们发生冲突。具体的航迹规划方法是:先为每架无人机规划三维航路,再优化每架无人机的速度,防止航迹冲突。包含 N_{UAV} 架无人机速度 v_i^* 的优化问题可表述为

$$\begin{aligned} \min J_{ti} &= \mu t_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_{UAV}; \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} \sum_{j=1, j \neq i}^{N_{UAV}} C_{ij} = 0, \\ v_i^{\min} \leq v_i^* \leq v_i^{\max}. \end{cases} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: J_{ti} 为无人机 i 的优化指标,其优化目的是使无人机能尽快降落, t_i 为降落时间, μ 为优化系数, C 为冲突矩阵。当无人机 i 与 j 发生航迹冲突时,定义 $C_{ij} = 1$, 否则 $C_{ij} = 0$ 。各无人机在指定的圆柱体空域调速度和螺旋降高度飞行,达到允许降落的速度、高度和航向后,无人机将对准跑道方向飞行,最后完成降落。

2 编队飞行航路粗规划策略

相比于单架无人机飞行,编队的机动性受到了限制,因此规划能够严格满足编队飞行机动性要求的航路非常重要。基于此,本节根据编队的机动性能与飞行约束要求,提出基于多步粒子群算法的航路点基本生成策略,并分别针对一般目标点和任务点的特点,设计多层优化指标,得到了适用于编队不同飞行阶段的航路点优化策略。

2.1 基于多步粒子群优化的航路点生成策略

为避开环境中的禁飞区障碍物,规划从起点到目标点的最优或次优航路,本节设计了航路点生成策略来引导编队飞行。

采用多步优化法设计航路点规划策略,在该方法下,航路点的规划将分多步完成,每一步只生成下一个航路点,且只考虑单个航路段需要满足的约束。当规划完成时,即可得到满足编队机动约束要求的航路,其具体思路如图2所示。

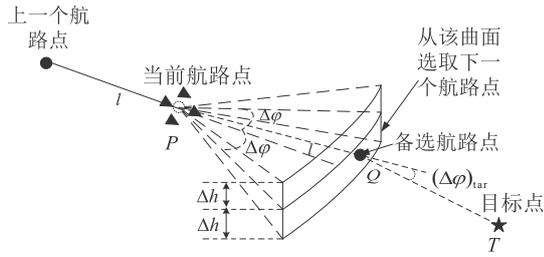


图2 确定无人机编队下一航路点示意图

在图2中, P 为当前航路点, 其坐标为 $(x_{\text{now}}, y_{\text{now}}, h_{\text{now}})$; Q 为备选航路点, 其坐标为 (x_n, y_n, h_n) , T 为目标点, 其坐标为 (x_t, y_t, h_t) . 参照上一个航路点位置, 考虑编队最大转弯与最大爬升性能约束, 下一个航路点将在步长 l 、最大转角改变量 $(\varphi)_{\text{max}}$ 和最大高度改变量 $(h)_{\text{max}}$ 组成的曲面上选择. 在曲面上选择航路点是一个优化问题, 当步长确定后, 优化控制量可表示为

$$U = [\Delta\varphi, \Delta h]. \quad (3)$$

本文使用粒子群优化算法对 U 进行优化, 通过选取最优 $\Delta\varphi$ 与 Δh 的组合, 得到下一个航路点的位置. 控制 $\Delta\varphi$ 和 Δh 分别在区间 $[-(\Delta\varphi)_{\text{max}}, (\Delta\varphi)_{\text{max}}]$ 和 $[-(\Delta h)_{\text{max}}, (\Delta h)_{\text{max}}]$ 范围内取值. 本问题的优化指标可表示为

$$J_0 = \sqrt{(x_n - x_t)^2 + (y_n - y_t)^2 + (h_n - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_n - h_t|. \quad (4)$$

式中: α 为高度项权重, J_0 的第1项的优化目的是使优化的航路点尽可能接近目标点, 第2项则是避免航路点高度发生频繁波动. 由于步长、最大转角和最大爬升率的限制, 上述方法无法使编队避开体积大且离当前航路点近的禁飞区. 为解决这个问题, 引入基于模型预测控制的思想, 滚动优化航路. 采用该思想, 在规划下一个航路点时, 每次会计算多个步长的域, 而只执行单个步长域. 因此, 该方法能预测编队在将来一段时间的运动趋势, 帮助编队更高效地避障. 具体过程如图3所示(该示意图为基于图2的俯视图).

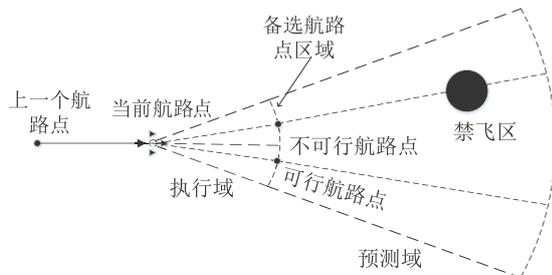


图3 基于模型预测控制的航路点规划示意图

模型预测控制包括预测模型和优化模型两个部分, 前一部分是为了预测下一航路点的方向, 后一部分是为了确定下一航路点具体位置. 在图3中, 从当

前航路点到第1个曲面(即图2中的曲面)上任意一点连线所构成的区域为执行域, 将这些连线延长至第2个曲面上产生预测域. 规划航路时, 执行域中的备选航路段与其位于预测域中的延长段都应避开禁飞区. 将预测域的终端坐标 $(x_{\text{sp}}, y_{\text{sp}}, h_{\text{sp}})$ 代替式(4)中的备选航路点坐标 (x_n, y_n, h_n) , 得到引入模型预测控制的优化指标

$$J_{\text{sp}} = \sqrt{(x_{\text{sp}} - x_t)^2 + (y_{\text{sp}} - y_t)^2 + (h_{\text{sp}} - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_{\text{sp}} - h_t|. \quad (5)$$

2.2 考虑终端约束的航路点生成策略

针对编队各个阶段的飞行特点, 将终端区域的航路点生成策略分为两类: 第1类是针对一般目标点的无进入目标点航向约束的策略; 第2类为针对任务点的有进入目标点航向约束的策略.

1) 无进入目标点航向约束的航路点生成策略.

为精确规划抵达目标点的航路, 并使所有航段都满足最短航段约束要求, 在当前航路点与目标点之间的距离 d 小于 $2l$ 时, 目标点自动成为最后1个航路点, 因此最后1个航段无法自动满足约束要求. 所以, 规划倒数第2个航路点时, 需额外考虑最后1个航段的约束条件

$$\begin{cases} |(\Delta\varphi)_{\text{tar}}| \leq (\Delta\varphi)_{\text{max}}, & 2l \leq d < 3l; \\ |(\Delta h)_{\text{tar}}| \leq (\Delta h)_{\text{max}}, & 2l \leq d < 3l. \end{cases} \quad (6)$$

其中: $(\Delta\varphi)_{\text{tar}}$ 为图2所示的最后1个航段夹角, $(\Delta h)_{\text{tar}}$ 为最后1个航段高度差. 在添加式(6)所示的约束条件前, 在终端区域 $d \leq d_{\text{tar}}$ 增加对最后1个转角的优化, 以保证能得到可行解, 因此式(5)变为

$$J_{1\text{sp}}^t = \sqrt{(x_{\text{sp}} - x_t)^2 + (y_{\text{sp}} - y_t)^2 + (h_{\text{sp}} - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_{\text{sp}} - h_t| + \beta \cdot |(\Delta\varphi)_{\text{tar}}| \cdot 180/\pi. \quad (7)$$

其中: β 为转角优化项占的权重, $(\Delta\varphi)_{\text{tar}}$ 是将预测域的终端点 $(x_{\text{sp}}, y_{\text{sp}}, h_{\text{sp}})$ 视作倒数第2个航路点代替式(5)中的 (x_n, y_n, h_n) 得到的转角值, 从而使末航段转角趋于最小.

然而, 在规划末端航路点时, 由于当前航路点距离目标点很近, 继续使用预测域将带来不良的结果. 因此, 当 $d \leq d_t$ 时取消预测域, 所以优化指标变为

$$J_1^t = \sqrt{(x_n - x_t)^2 + (y_n - y_t)^2 + (h_n - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_n - h_t| + \beta \cdot |(\Delta\varphi)_{\text{tar}}| \cdot 180/\pi. \quad (8)$$

其中: 当 $2l \leq d < 3l$ 时, $(\Delta\varphi)_{\text{tar}}$ 才是真正意义上的最后一个转角, 此时才需要对其进行约束.

基于以上描述, 一次完整的航路点规划包括存在预测域时途中区域、存在预测域时终端区域和不存在预测域时终端区域3个阶段, 其优化指标选取为

$$J_1 = \begin{cases} J_{sp}, d > d_{tar}; \\ J_{1sp}^t, d_t < d \leq d_{tar}; \\ J_1^t, d \leq d_t. \end{cases} \quad (9)$$

2) 有进入目标点航向约束的航路点生成策略。

为使编队以特定航向进入任务点,采用了固定末端航段的方法:当任务点 T_{task} 的坐标 $(x_{task}, y_{task}, h_{task})$ 和规定进入任务点的方向 φ_r 被确定后,任务点的前一个航路点坐标 (x_f, x_f, x_f) 也将被确定.以航路点 (x_f, x_f, x_f) 为新目标点 T_{tar} 并为编队规划航路,便能使编队以特定航向进入任务点。

如图4所示,规划到 T_{tar} 的航路时,规划得到的末端航段与固定航段之间的夹角 $(\Delta\varphi)_{task}$ 仍需被约束,即

$$|(\Delta\varphi)_{task}| \leq (\Delta\varphi)_{max}, 2l \leq d < 3l. \quad (10)$$

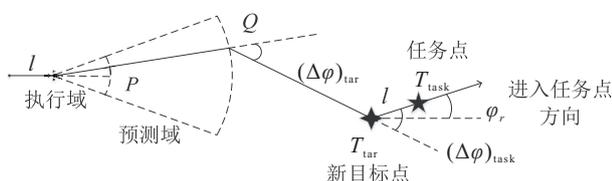


图4 固定末航路段的终端角度约束示意图

类似于 $(\Delta\varphi)_{tar}$ 的处理方法, $(\Delta\varphi)_{task}$ 也被放入到优化指标中.设置合适的权重系数对 $(\Delta\varphi)_{task}$ 进行优化后,最后几个航段之间的夹角都将趋于0.因此,在终端区域,针对有进入航向约束的任务点,本节分别用式(11)和(12)所示的优化指标替换式(7)和(8)中的优化指标,得到

$$J_{2sp}^t = \sqrt{(x_{sp} - x_t)^2 + (y_{sp} - y_t)^2 + (h_{sp} - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_{sp} - h_t| + \gamma \cdot |(\Delta\varphi)_{task}| \cdot 180/\pi, \quad (11)$$

$$J_2^t = \sqrt{(x_n - x_t)^2 + (y_n - y_t)^2 + (h_n - h_t)^2} + \alpha \cdot |h_n - h_t| + \gamma \cdot |(\Delta\varphi)_{task}| \cdot 180/\pi, \quad (12)$$

其中 γ 为优化 $(\Delta\varphi)_{task}$ 的权重系数.式(9)中的相关项也将被取代,得到 J_2 .

3 编队队形控制与航迹细规划

本节对文献[20]提出的一致性控制律进行了改进,通过建立旋转坐标系,得到能通过航路点的编队控制算法.将该编队控制算法与所提出航路点生成策略相结合,采取如图5所示的飞行控制方法,得到编队航迹细规划方法。

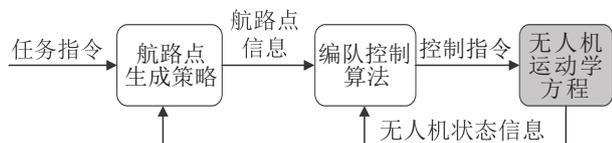


图5 编队飞行过航路点控制回路

3.1 基于改进一致性算法的编队队形控制

文献[20]利用水平面速度与航向角之间的关系

$$\tan \varphi_i = \frac{v_{yi}}{v_{xi}}, v_{xyi} = \sqrt{v_{xi}^2 + v_{yi}^2}, \quad (13)$$

将无人机在水平面的速度分解为 v_{xi} 和 v_{yi} ,得到了包含无人机在 OX 、 OY 和 OZ 轴3个方向控制指令 $(v_{xi}^c, v_{yi}^c, z_i^c)$ 的运动学模型,并分别在这3个方向上设计了基于一致性算法的编队控制律,有

$$\begin{cases} v_{xi}^c = v_{xi} + \tau_{vxy} u_{xi}, \\ u_{xi} = -b_i(v_{xi} - v_x^*) - \sum_{j=1}^{N_U} a_{ij}[(v_{xi} - v_{xj}) - k_i^x(x_i - x_j - x_{ij})]; \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} v_{yi}^c = v_{yi} + \tau_{vxy} u_{yi}, \\ u_{yi} = -c_i(v_{yi} - v_y^*) - \sum_{j=1}^{N_U} a_{ij}[(v_{yi} - v_{yj}) - k_i^y(y_i - y_j - y_{ij})]; \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} z_i^c = z_i + \frac{\tau_z}{\tau_z} \dot{z}_i + \tau_z u_{zi}, \\ u_{zi} = -d_i(z_i - z_i^*) - k \dot{z}_i \sum_{j=1}^{N_U} a_{ij}[(z_i - z_j - z_{ij}) - k_i^z(\dot{z}_i - \dot{z}_j)]. \end{cases} \quad (16)$$

其中: N_U 为编队中无人机的数量, (u_{xi}, u_{yi}, u_{zi}) 为第 i 架无人机的指令反馈信号, (x_i, y_i, z_i) 为无人机的坐标位置, (x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}) 分别为无人机 i 与无人机 j 在 OX 、 OY 和 OZ 方向上的队形; a_{ij} 与无人机间的通信拓扑结构有关; b_i 、 c_i 和 d_i 为跟踪系数,其值都为正数; k_i^x 、 k_i^y 和 k_i^z 分别为系统状态信息导数的正增益, k 为阻尼系数。

该控制律能使无人机实现编队飞行,但该控制律只在地面系下对编队飞行进行了描述,编队的理想队形根据固定的理想航向进行设计.因此,当编队转弯时,这样的理想队形不能直观地反映出无人机间的相对距离.另外,文献[20]所给出的编队控制方法也不具备通过航路点的能力。

为直观地描述无人机间的相对状态信息,给出适用于不同理想航向的理想队形,并使得到的编队控制算法能过航路点.本节在文献[20]的基础上,引入了一种旋转坐标系,该旋转坐标系是一种动坐标系,是由地面坐标系绕其 Oz_g 轴旋转一定角度 φ^* 而形成的,这两种坐标系之间的关系如图6所示。 φ^* 为编队理想航向角,因此旋转坐标系的 Ox_r 轴始终指向编队的理想航向,以 Ox_r 轴为基准设计编队队形,便可以解决编队理想队形随着理想航向角的变化而改变的问题。

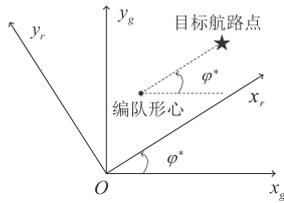


图6 地面坐标系与旋转坐标系的关系

图6中, φ^* 为当前编队形心和目标航路点的连线与地面坐标系 Ox_g 轴之间的夹角。

当编队的理想水平面速度 v^* 、理想航向角 φ^* 都被告知后, 编队的 OX 轴理想速度 v_x^* 和 OY 轴理想速度 v_y^* 便能通过

$$\begin{cases} v_x^* = \pm v^* / \sqrt{1 + (\tan \varphi^*)^2}, \\ v_y^* = \pm v^* \tan \varphi^* / \sqrt{1 + (\tan \varphi^*)^2} \end{cases} \quad (17)$$

得到. 式(17)中 v_x^* 与 v_y^* 的正负由 φ^* 在地面坐标系中的象限判定. 同时, 目标航路点信息可通过几何关系转化为理想航向角信息. 所以, 当目标航路点、编队形心和理想水平面速度 v^* 被确定后, 一致性算法所需的理想飞行状态 v_x^* 、 v_y^* 和 z^* 就能被确定. 在每个采样时刻, 利用目标航路点和编队当前位置更新 φ^* 的值及时修正编队航向, 便能使编队精确通过目标航路点。

3.2 基于过航路点的编队航迹细规划

一致性算法本身不具备避障功能, 无法独立完成编队的航迹规划, 因此将一致性算法与所提出的航路点生成策略按图7所示的方式相结合. 图7中, 执行编队航迹规划时, 每次都先由航路点生成策略完成航路粗规划, 生成的航路点能引导编队避开禁飞区, 前往任务点. 然后用能过航路点的编队控制算法去执行这些航路点, 便能生成避开禁飞区的轨迹, 完成航迹细规划。

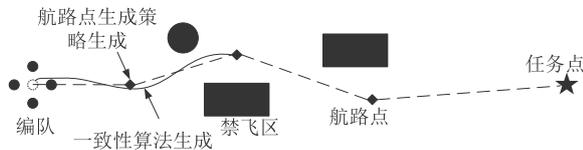
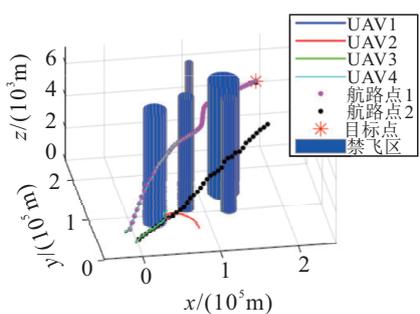
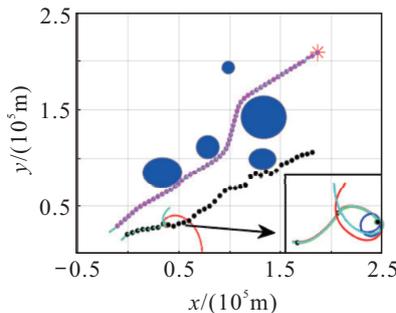


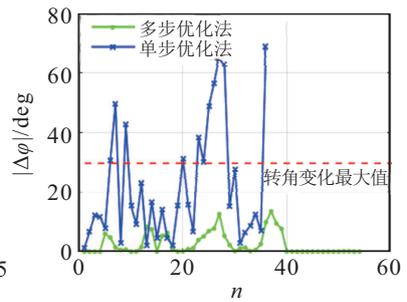
图7 航迹细规划



(a) 编队三维飞行航迹



(b) 编队在 XOY 面内飞行航迹



(c) 相邻航段之间的转角改变量

图8 不同优化算法下编队规避圆柱体禁飞区时的航迹

4 仿真实验与结果分析

为验证所提出算法的有效性和优势, 本节设置了3组仿真算例. 首先通过对比单步/多步优化法, 说明了多步优化法用于编队航路规划的优势; 然后在第2组仿真中验证了所提出航迹规划算法能使编队以特定的航向进入任务点, 并在转弯中保持队形飞行; 最后设计了编队执行任务全过程航迹规划的算例, 验证了所提出算法具有良好的通用性. 在以上算例中, 设置航路点生成策略相关参数如表1所示, 预测域长度为 $11l$, 终端约束阈值 $d_{tar} = 15l$, 预测域阈值 $d_t = 13l$.

表1 航路点生成算法相关参数

参数	数值	参数	数值
l/m	5000	α	10
$(\Delta\varphi)_{max}/rad$	$\pi/6$	β	800
$(\Delta h)_{max}/m$	300	γ	5000

4.1 无人机编队避障对比

为说明所提出航路点生成策略及航迹规划方法的避障优势及有效性, 设计了对比仿真算例, 对多步和单步粒子群优化法进行了比较. 粒子群算法相关参数设置参考文献[22], 设定编队理想飞行速度为 150 m/s .

图8为不同优化法下编队规避圆柱体禁飞区的航迹. 图8中航路点1为多步粒子群算法优化得到的航路, 该航路能有效避开禁飞区, 抵达目标点. 同时, 编队能利用所提出的编队控制算法精确通过这些航路点, 产生光滑航迹。

图8中航路点2为单步粒子群算法优化得到的航路. 多次仿真结果显示, 算法收敛后, 航路点间的距离不能被有效控制. 同时, 利用编队控制算法执行这些航路点时, 会发生如图8(b)中放大部分所示的编队飞行混乱的情况, 导致编队无法有效地通过航路点. 图8(c)显示, 多步法能将相邻航段间的转角改变量严格控制到约束范围内, 而单步法却无法实现。

基于以上描述可知, 这两种优化法的差异主要体现在两个方面: 首先, 多步粒子群算法能精确控制航段距离, 使规划的航路点能够精确地引导编队飞行;

其次,所提出的多步粒子群优化法得到的航路能严格满足约束条件.而对于单步粒子群算法而言,严格满足所有航段的约束条件的要求过于苛刻,通常很难找到可行解,因此,只能对约束进行松弛处理,将需满足约束条件的变量进行优化处理,这就导致不可行航路的出现.图8(b)中所示的混乱部分为第7个航段约束,此时转角值约为 50° ,超过了约束值,导致编队通过航路点出现混乱.

4.2 进入任务点航向约束及转弯队形保持仿真

本节设计了两项仿真,分别对航迹规划方法满足终端航向约束和编队保持队形转弯进行了验证.在第1项仿真中,分别规定进入任务点的航向角为 0° 、 180° 和 -45° ,得到仿真结果如图9所示.在第2项仿真中设定编队从 45° 航向转到 15° 航向,即完成航路中可能发生的最大转弯角度,得到仿真结果如图10所示.

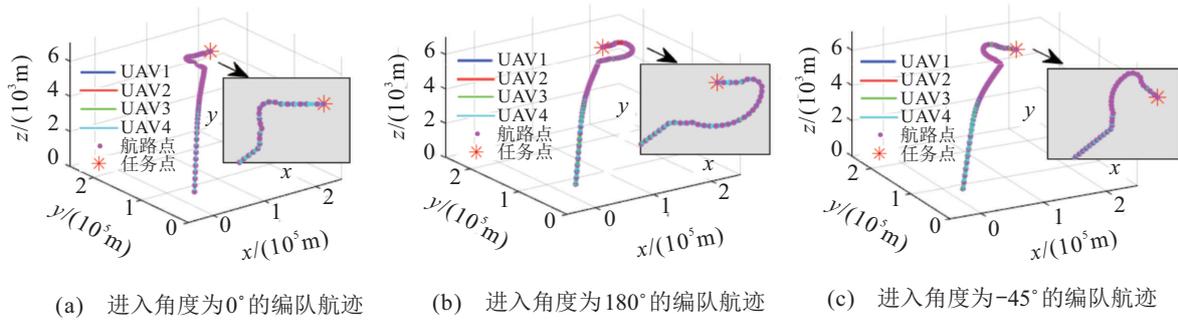


图9 编队规避圆柱体禁飞区时的航迹(第1项仿真)

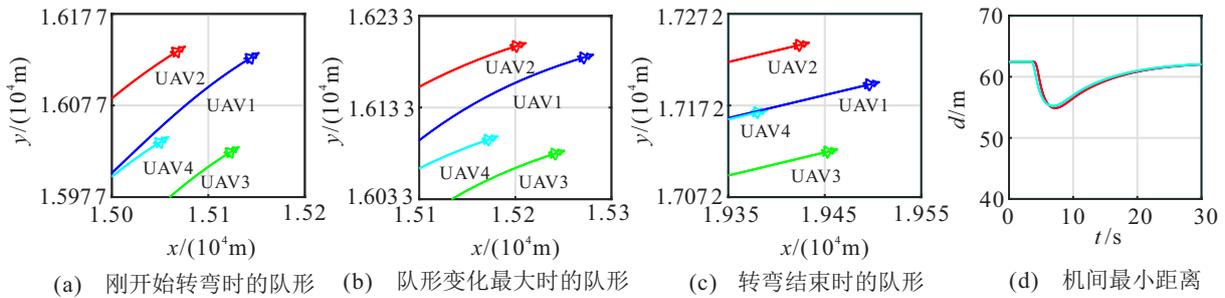


图10 编队规避圆柱体禁飞区时的航迹(第2项仿真)

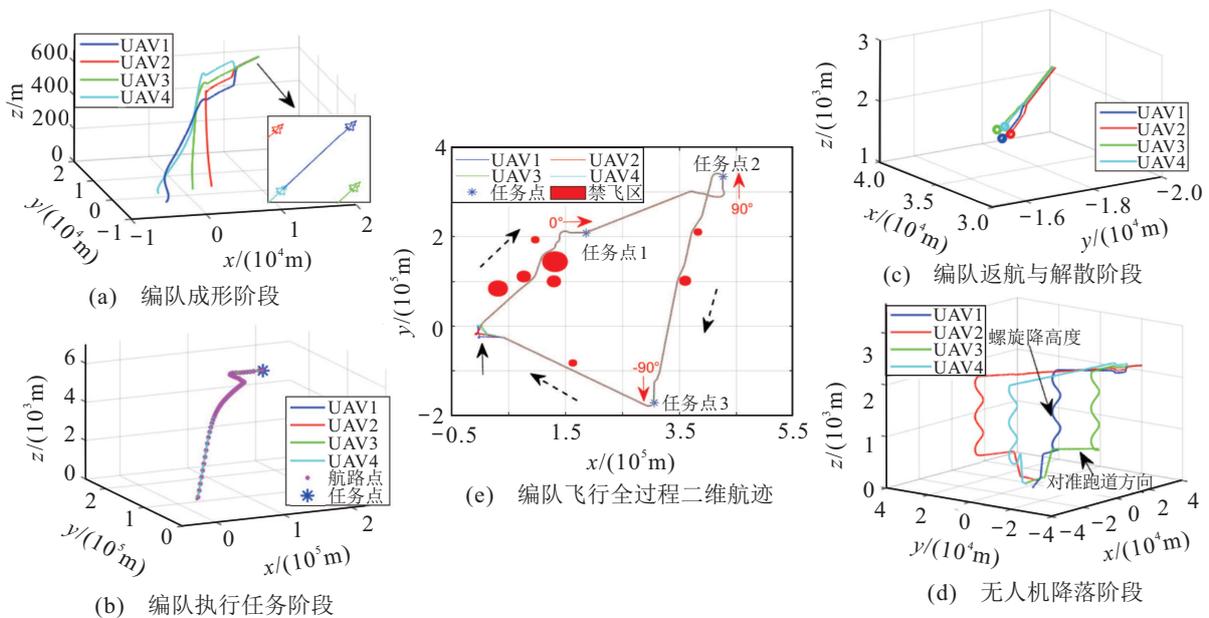


图11 编队规避圆柱体禁飞区时的航迹(飞行各个阶段的仿真结果)

图9显示,在飞行前期,编队沿着起点到任务点的直线方向飞行,使飞行距离尽可能少.在进入终端区域附近时,编队以满足终端角度约束为首要目标,

进行了较大的转弯以调整航向,并最终在规定的航向角进入了任务点.仿真结果验证了所提出方法能使编队以特定航向进入任务点,同时也证实了多层优化

指标的有效性.

图 10(a)~图 10(c) 显示了编队从开始转弯到队形变化最大再到完成转弯的仿真结果. 图 10(d) 为整个转弯过程中不同无人机间的最近距离, 这些距离在队形稳定时维持在 85 m 左右, 在队形波动最大时达到最小值 70.5 m, 但都大于机间安全距离 50 m. 在所提航路规划策略中, 相邻航段间的转角值被严格约束在 30° 以内, 因此编队能以适当的速度保持队形安全地进行转弯.

4.3 编队飞行全过程航迹规划仿真

本节在 $10^6 \times 10^6 \times 10^4$ m 的空间里随机生成 3 个任务点和若干禁飞区, 对编队飞行全过程航迹规划进行了分阶段仿真验证.

图 11(a)~图 11(d) 分别给出了编队飞行各个阶段的仿真结果, 可见这 4 架无人机能够根据各阶段的飞行策略, 完成各阶段的飞行目的. 图 11(e) 的仿真结果显示, 本文所提出算法能使无人机从机场起飞形成编队, 规避禁飞区进行飞行. 在临近任务点时, 编队能调整飞行方向, 并最终规定定的航向进入任务点. 完成所有任务点后, 编队依次进行返航、解散和降落阶段的飞行, 完成了编队飞行全过程的航迹规划. 表 2 给出了从 0 时刻起, 编队依次完成各阶段飞行任务的时刻表.

表 2 编队完成各阶段飞行任务时刻表

阶段	成形	执行任务	返航	解散	降落
时刻/s	212	6618	8830	8921	9170

5 结 论

1) 将无人机编队飞行全过程分为多个阶段, 针对各阶段的飞行目的、约束条件和优化目标, 制定了相应的飞行规划策略模型, 并将各阶段航迹规划分为粗规划和细规划两个过程.

2) 在航路粗规划中, 针对不同阶段的特点, 设计了多类多层优化指标, 提出了基于多步粒子群优化的航路点生成策略, 并在优化的过程中结合了模型预测控制的思想, 使得到的航路能更有效地避开禁飞区并满足终端约束条件.

3) 建立了适用于编队飞行的旋转坐标系, 得到能过航路点的编队控制算法. 利用过航路点的编队控制算法执行航路粗规划给出的航路, 生成航迹, 得到航迹细规划方法.

4) 仿真结果显示, 相比于常用的单步优化法, 提出的基于多步优化法的航路规划策略更适用于编队飞行. 同时, 得到的编队航迹规划算法能够针对编队

飞行全过程不同阶段的特点, 完成航迹规划, 具有良好的通用性.

参考文献(References)

- [1] Zhang H, Xin B, Dou L H, et al. A review of cooperative path planning of an unmanned aerial vehicle group[J]. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 2020, 21(12): 1671-1694.
- [2] 宗群, 王丹丹, 邵士凯, 等. 多无人机协同编队飞行控制研究现状及发展[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2017, 49(3): 1-14.
(Zong Q, Wang D D, Shao S K, et al. Research status and development of multi UAV coordinated formation flight control[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2017, 49(3): 1-14.)
- [3] Opromolla R, Inchingolo G, Fasano G. Airborne visual detection and tracking of cooperative UAVs exploiting deep learning[J]. *Sensors: Basel, Switzerland*, 2019, 19(19): e4332.
- [4] Yu Z Q, Zhang Y M, Qu Y H. Fault-tolerant control for autonomous aerial refueling against actuator fault in receiver UAV[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2018, 51(24): 274-279.
- [5] Harikumar K, Senthilnath J, Sundaram S. Multi-UAV oxyrrhis marina-inspired search and dynamic formation control for forest firefighting[J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2019, 16(2): 863-873.
- [6] San Juan V, Santos M, Andújar J M. Intelligent UAV map generation and discrete path planning for search and rescue operations[J]. *Complexity*, 2018, 2018: 1-17.
- [7] Jin Z R, Zhang L, Zou Z L. 3D trajectory planning of UAV based on DPGA[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 105667-105677.
- [8] 程凝怡, 刘志乾, 李昱奇. 一种基于 Dijkstra 的多约束条件下智能飞行器航迹规划算法[J]. *西北工业大学学报*, 2020, 38(6): 1284-1290.
(Cheng N Y, Liu Z Q, Li Y Q. Path planning algorithm of dijkstra-based intelligent aircraft under multiple constraints[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2020, 38(6): 1284-1290.)
- [9] Roberge V, Tarbouchi M, Labonte G. Comparison of parallel genetic algorithm and particle swarm optimization for real-time UAV path planning[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2013, 9(1): 132-141.
- [10] Liu Y, Zhang X J, Zhang Y, et al. Collision free 4D path planning for multiple UAVs based on spatial refined voting mechanism and PSO approach[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2019, 32(6): 1504-1519.
- [11] Niu X, Yuan X D, Zhou Y W, et al. UAV track planning based on evolution algorithm in embedded system[J]. *Microprocessors and Microsystems*, 2020, 75: 103068.
- [12] Dewangan R K, Shukla A, Godfrey W W. Three dimensional path planning using grey wolf optimizer for

- UAVs[J]. Applied Intelligence, 2019, 49(6): 2201-2217.
- [13] Zhai Z, Jia G, Wang K. A novel teaching-learning-based optimization with error correction and cauchy distribution for path planning of unmanned air vehicle[J]. Computational Intelligence and Neuroscience, 2018, 2018: 5671709.
- [14] Zhang W, Zhang S, Wu F Y, et al. Path planning of UAV based on improved adaptive grey wolf optimization algorithm[J]. IEEE Access, 2021, 9: 89400-89411.
- [15] Wu X D. A hybrid algorithm of particle swarm optimization, metropolis criterion and RTS smoother for path planning of UAVs[J]. Applied Soft Computing, 2018, 73: 735-747.
- [16] Wu Y. A survey on population-based meta-heuristic algorithms for motion planning of aircraft[J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2021, 62: 100844.
- [17] 陈志旺, 夏顺, 李建雄, 等. 基于定向A*算法的多无人机同时集结分步策略[J]. 控制与决策, 2019, 34(6): 1169-1177.
(Chen Z W, Xia S, Li J X, et al. Serial strategy for rendezvous of multiple UAVS based on directional A* algorithm[J]. Control and Decision, 2019, 34(6): 1169-1177.)
- [18] 胡春鹤, 王健豪. 多运动体分布式最优编队构型形成算法[J]. 控制与决策, 2018, 33(11): 2004-2008.
(Hu C H, Wang J H. Distributed optimal formation shaping algorithm for multi-agent[J]. Control and Decision, 2018, 33(11): 2004-2008.)
- [19] 顾伟, 汤俊, 白亮, 等. 面向时间协同的多无人机队形变换最优效率模型[J]. 航空学报, 2019, 40(6): 322599.
(Gu W, Tang J, Bai L, et al. Time synergistic optimal efficiency model for formation transformation of multiple UAVs[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2019, 40(6): 322599.)
- [20] Wu Y, Gou J Z, Hu X T, et al. A new consensus theory-based method for formation control and obstacle avoidance of UAVs[J]. Aerospace Science and Technology, 2020, 107: 106332.
- [21] 王新民, 王晓燕, 肖堃. 无人机编队飞行技术[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2015: 149-232.
(Wang X M, Wang X Y, Xiao K. UAV formation flight technology [M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2015: 149-232.)
- [22] Shi Y H, Eberhart R C. Parameter selection in particle swarm optimization[C]. International Conference on Evolutionary Programming. Berlin: Springer, 1998: 591-600.

作者简介

苟进展 (1997—), 男, 硕士, 从事无人机协同制导与控制的研究, E-mail: jinzhan_g@163.com;

吴宇 (1987—), 男, 副教授, 博士, 从事多智能体任务规划、调度与决策等研究, E-mail: cqwuwyu@cqu.edu.cn;

邓嘉宁 (1996—), 男, 硕士生, 从事无人机机动决策的研究, E-mail: cqudjn@cqu.edu.cn.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

- 时序网络构建的理论和方法综述 李阿明, 等
- 半结构化场景下移动机器人视觉边线检测综述 苏晓杰, 等
- 二型模糊决策理论与方法研究综述 秦晋栋, 等
- 灰色关联模型关联序结果的稳定性检验方法及应用 杨绍闻, 等
- 基于改进差分进化的稀土萃取能效分离系数优化 朱建勇, 等
- COVID-19疫情下定点收治医院动态选址-分配优化 商晓婷, 等
- 基于随机配置网络的轻量级人体行为识别模型 南 静, 等
- 一种Halton序列的HDRRT移动机器人融合规划算法 钟华庚, 等
- 动态异构特征融合的水下图像增强算法 韩晓微, 等
- 基于Tent混沌和透镜成像学习策略的平衡优化器算法 周 鹏, 等
- 基于注意力的共享参数胶囊网络 宋 燕, 等
- 一种基于指数积的移动机械臂联合标定方法 陈新伟, 等
- 基于有限时间预设性能的高超声速飞行器反演控制 韦俊宝, 等