

文章编号:1000-6893(2008)05-1326-08

基于 MAS 的无人机编队飞行智能优化控制

宗令蓓, 谢凡, 秦世引

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100083)

Intelligent Optimizing Control of Formation Flight for UAVs Based on MAS

Zong Lingbei, Xie Fan, Qin Shiyin

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of
Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

摘 要: 针对无人机编队飞行的实际背景和限制条件,提出了一种基于多智能体系统(MAS)技术的编队飞行的智能优化控制策略和实现算法。利用多 Agent 之间的交互作用,以灵活便捷的方式进行各单机之间的协同优化,从而可实现多架无人机的自主编队飞行。考虑到 leader-follower 原理的支配机制,对面向编队飞行的僚机控制律与实现算法进行了重点研究,设计了僚机编队控制器,通过仿真实验验证了其鲁棒性和稳定性。最后针对编队队形的变换与躲避威胁等特殊情况对无人机编队单元之间的协调优化进行了仿真验证和分析。

关键词: 无人机; MAS; 编队飞行; 协调优化控制; 队形保持; 避障

中图分类号: V279; TP273.1 **文献标识码:** A

Abstract: The multi-agent system(MAS) based strategy and corresponding implementing algorithms for UAVs formation flight are proposed according to aviation characteristics and practical constraints of UAVs. The coordinative optimizations among every individual UAV are carried out with flexible and smart ways by interactive communications and information feedback in MAS so as to implement the autonomous formation flight of UAVs. Furthermore the control law and corresponding algorithms of the wingman controller in the formation process are studied in depth based on the principle of leader-follower, and simulation results verify the robustness and stability of the formation controllers. Finally, the formation alternation and threatening obstacle avoidance of UAVs are taken into account within the coordinative optimization procedure by simulated verification and comparative analysis.

Key words: UAV; MAS; formation flight; coordinative optimizing control; formation holding; obstacle avoidance

无人机编队飞行,即多架无人机的为适应任务要求而进行的某种队形排列和任务分配的组织模式,它既包括编队飞行的队形产生、保持和变化,也包括飞行任务的规划和组织。编队飞行的无人机能通过信息共享在飞行中改变原有队形,自主地对突发事件做出反应,并根据面临的具体情况来分担各自的任务^[1]。

无人机编队协同执行任务不仅可以弥补单架无人机执行任务时的缺陷,还可有效提高其作战效率,拓宽其使用范围。各个国家都已经开始无人机编队飞行方面的相关研究。其中美国在这方面一直处于领先地位,最具代表性的是正在研制

的微型无人机系统——单元可重组作战飞行阵列(SWARM)。它通过多架以较高性能微型导航制导控制器(MGNC)为核心部件的微型飞行器构成集群单元,能够同时完成监视、侦察、情报汇集和攻击任务。通过它可以组建无人机作战信息平台,同时搜集战场上各种各样的信息,然后汇集到指挥中心进行处理,做出判断,也可以直接根据自己的判断进行对敌攻击。2003年斯坦福大学GPS实验室研究利用无人机编队飞行作为演示验证平台来验证导航系统的性能。用2架飞机编队组成导航平台,设计与试验了协同飞行路径规划、交通车辆报警、故障恢复以及逃逸机动等技术^[2]。2004年8月,波音公司首次进行了2架无人战斗机的松散编队飞行。本文针对无人机编队飞行的实际背景和限制条件,提出了一种基于多智能体系统(MAS)技术的编队飞行的智能优化

收稿日期:2007-08-06; 修订日期:2007-12-11

基金项目:国防基础科研项目(D2120060013);国家自然科学基金重点项目(60736025)

通讯作者:宗令蓓 E-mail: zonglingbei@asee.buaa.edu.cn

控制策略和实现算法。

1 问题的提法

传统的领航-跟随(leader-follower)的编队模式,以领航长机作为特定点^[3],该模式只限于2架飞机的编队飞行,而无人机编队任务往往是大规模机群的编队,因此简单地采用传统的领航-跟随编队模式难以适应无人机编队的要求。本文采用的编队方式是在传统的领航-跟随编队模式基础上,以基本的两机编队为单元,按照层级的概念把大规模的飞机编队分割成若干个两机编队。通过分布式控制实现对大规模机群的编队控制。

上述编队模式虽然解决了大规模机群编队的问题,但是却对无人机之间或编队单元之间的信息交互以及协调控制提出了很高的要求。因此本文采用了基于 MAS 的协调优化策略,利用 Agent 的自主性和协作性,将无人机编队协调控制这一复杂问题通过多个 Agent 之间的协作进行处理,大大提高了系统的效率和可靠性^[4-5]。本文提出的面向无人机编队协调控制的 MAS 框架结构中,一方面每个 Agent 是有一定自主性的实体,能自主地解决一定问题,完成一定的功能;另一方面,通过在一一定的机制下与其他 Agent 的协作与通讯,实现比较复杂的功能。在这样的协作机制下, MAS 不仅改善了每个 Agent 实体的基本能力,而且进一步优化了整个系统的全局性能,提高了 MAS 协调共同完成任务的能力。

针对领航-跟随的编队模式^[6],要控制队形在整个飞行过程中保持不变或者在一定的误差范围内变化,控制策略要求维持和控制僚机与长机的相对距离和方位^[7]。在本文中描述的编队过程中,长机跟踪预先给定的航迹飞行,僚机的编队控制器主要完成队形的控制,因此僚机编队控制器的设计成为整个无人机编队过程的核心问题。本文根据僚机的编队控制系统,构造出线性化的僚机控制模型,设计 PI 控制器,实现僚机对长机的跟踪。在此基础上,利用分布式控制结构进行多架无人机的协同编队。并且针对具体编队任务,在编队过程中根据外界环境以及应用场合的具体态势,编队队形和长机航迹可以做动态的改变以实现协同编队的优化。

2 智能优化控制系统的组织结构

利用 Agent 本身的学习进化和协作能力对

系统的整体性能进行优化,针对大规模无人机编队飞行控制系统的实际需要,将 MAS 依照所实现的功能的不同划分为几类不同的 Agent,每种类型的 Agent 主要处理一类问题,通过自身的学习能力不断进化,逐步实现各个功能的优化,并且通过这些 Agent 之间的协作,同时达到系统总体性能的最优。基于 MAS 的无人机编队协调优化的组织结构,如图 1 所示。

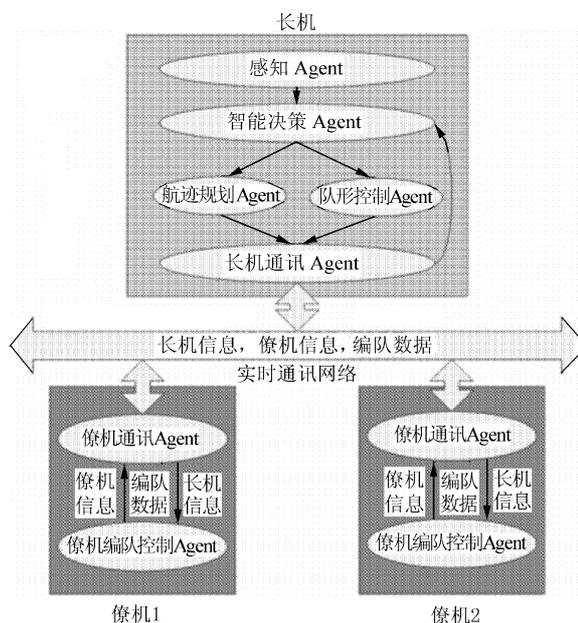


图 1 无人机编队协调优化的组织结构

Fig. 1 Organization structure of coordinative optimization of UAV formation

其中在编队机群中有 1 架长机,根据各个飞机的任务需要,为长机配有 5 类 Agent:感知 Agent、智能决策 Agent、航迹规划 Agent、队形控制 Agent 和长机通讯 Agent。而其他无人机只有 2 类 Agent:僚机通讯 Agent 和僚机编队控制 Agent。这几类 Agent 的功能描述如下:

感知 Agent:通过本机的传感器等探测设备获得长机和僚机的位姿和速度等信息并感知外界环境的态势。

智能决策 Agent:空中担任指挥任务的长机上建立此 Agent,它综合本机感知 Agent 发来的态势信息,进行推理、分析和优化,分别得出航迹规划和队形控制的指令,将该指令传给航迹规划 Agent 和队形控制 Agent。

航迹规划 Agent:它根据智能决策 Agent 传来的航迹规划信息,改变预先规划的长机航迹,控制长机跟踪该航迹。为了使问题简化,本文并不

讨论长机对航迹的跟踪控制,假定长机能准确跟踪预定航迹。

队形控制 Agent:它接收智能 Agent 传来的队形指令,根据特定的队形计算长机与僚机间的相对位姿信息等编队数据,通过长机的通讯 Agent 把这些数据和长机的信息通过实时的通讯网络传给各个僚机通讯 Agent。

长机通讯 Agent:负责把编队数据、长机的信息传给僚机的通讯 Agent;同时还负责接收僚机通讯 Agent 发来的僚机信息,作为智能决策 Agent 进行推理的一个依据。

僚机通讯 Agent:负责接收编队数据和长机的信息,作为僚机编队控制 Agent 的输入,同时还可以将僚机信息传递给长机。

僚机编队控制 Agent:根据长机队形控制 Agent 得出的队形信息,利用该 Agent 内部的编队控制器,控制僚机的飞行,使它尽可能与长机保持期望的距离。

各类 Agent 在解决各自问题的基础上采取联合行动,协调各自的知识、目标和策略规划,最终完成特定的任务。

3 控制策略与协调机制

要实现多架无人机的协同编队需要在传统的两机编队的基础上,采取分布式控制策略:按照层级的概念把大规模的无人机编队分割成若干个两机编队,每个单元编队之间又是紧密联系的,最终实现多机的编队。其编队结构如图 2 所示。

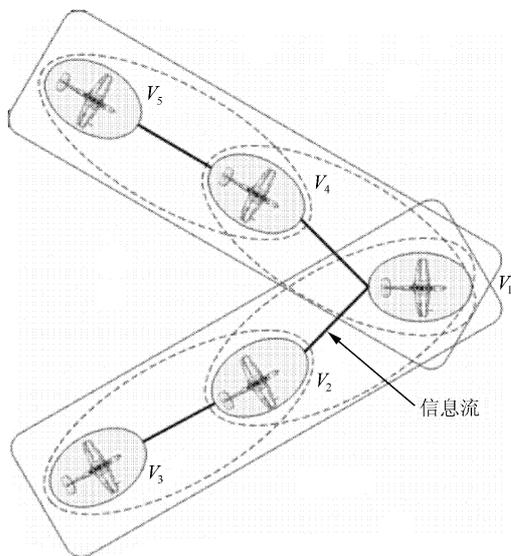


图 2 分布式控制示意图

Fig. 2 Distributed control structure

图 2 中, V_1 是长机, V_2 和 V_4 跟随 V_1 并保持与 V_1 的相对位置以保持其在队列中的位置。 V_3 只要知道 V_2 的信息并与其保持相对位置就可以保持其在整个队列中的位置。整个队列是由若干个基本的两机跟随飞行编队组成,具有良好的扩充性^[8]。

根据图 2 的组织结构图,以 3 架无人机组成的编队执行一次攻击任务为例,阐述无人机编队飞行的智能优化控制策略与协调机制。从机场出发后,长机根据预先设定的某个航迹飞行,而 2 架僚机跟踪长机并形成一定的队形,整个飞行过程需要考虑以下两个重点问题:

(1) 队形的确定与保持

无人机编队在执行任务的过程中,由长机的感知 Agent 实时监控战场环境与态势,并将感知信息传给智能决策 Agent,由智能决策 Agent 根据感知信息进行分析、整理与推理,确定是否需要队形的变更,若需要改变队形,则将处理后的感知信息传给队形控制 Agent,由队形控制 Agent 根据当前环境和态势产生新的编队队形信息,通过长机通讯 Agent 传给 2 架僚机通讯 Agent,再由僚机编队控制 Agent 根据新的编队信息形成新的队形。

(2) 长机航迹的动态变更

另一方面,由于战场环境和态势的动态变化,长机可以根据当前形势变更自身的预定航迹。首先由长机的感知 Agent 检测到当前环境中的动态事件或突发威胁,将感知信息传递给智能决策 Agent,通过智能决策 Agent 的分析与推理,确定是否需要变更航迹。若需要变更航迹,则将处理后的感知信息传给航迹规划 Agent,由航迹规划 Agent 给出新的航迹并控制长机跟踪当前航迹,由于僚机始终保持与长机的编队跟踪,因此僚机自然地跟随长机沿着变更后的航迹飞行。

4 面向编队的僚机控制律与实现算法

重点研究僚机的编队控制 Agent 的设计,这里僚机编队控制 Agent 的作用是跟随长机的位姿和速度,使长机和僚机之间的相对距离、航向角、高度和速度的变化都限制在很小的误差范围内。

4.1 编队过程的运动学模型

在图 3 的参考坐标系中标出了长机和僚机的

瞬时位置和速度向量。

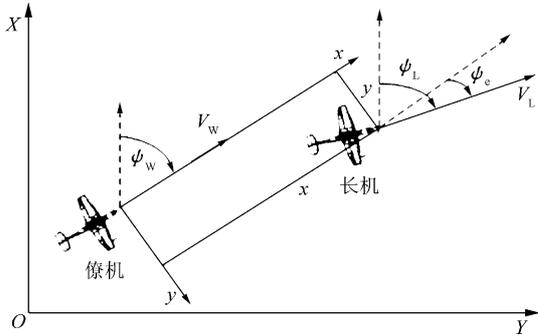


图3 僚机的参考坐标系

Fig.3 Reference coordinate system of wingman

在参考坐标系中,设长机的位置为 (x, y, z) , 运动学方程如下^[9]:

$$\frac{dx}{dt} = V_L \cos \phi_c + \dot{\psi}_w y - V_w \quad (1)$$

$$\frac{dy}{dt} = V_L \sin \phi_c - \dot{\psi}_w x \quad (2)$$

其中航向角误差为 $\phi_c = \phi_L - \psi_w$ 。

因为飞机模型中唯一的角速度是 $\dot{\psi}$, 速度在垂直方向(z 方向)上又没有分量, 所以不需要关于 \dot{z} 的微分方程。

4.2 无人机编队飞行控制模型

由文献[10]得到僚机的编队控制系统为

$$\dot{V}_w = -\frac{1}{T_{V_w}} V_w + \frac{1}{T_{V_w}} V_{w_c} \quad (3)$$

$$\dot{\psi}_w = -\frac{1}{T_{\psi_w}} \psi_w + \frac{1}{T_{\psi_w}} \psi_{w_c} \quad (4)$$

$$\dot{h}_w = -\left(\frac{1}{T_{h_a}} + \frac{1}{T_{h_b}}\right) h_w - \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} h_w + \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} h_{w_c} \quad (5)$$

综合式(1)~式(5), 得出一个新的六维编队飞行控制系统的状态方程。其6个状态分别为 x, y, ψ_w, V_w, z 和 ζ ; 3个输入的控制量为 ψ_{w_c}, V_{w_c} 和 h_{w_c} , 分别对应着僚机的偏航角控制、速度控制以及高度控制。长机输入的控制量则被看做是对僚机的扰动信号, 它们分别是 ψ_L, V_L 和 h_{L_c} 。这样就形成了一个非线性的僚机飞行模型。再经过线性化处理, 就得到六维的编队飞行控制系统的完整线性模型:

$$\dot{x} = \frac{-y_r}{T_{\psi_w}} \psi_w - V_w + V_L + \frac{y_r}{T_{\psi_w}} \psi_{w_c} \quad (6)$$

$$\dot{y} = \left(\frac{x_r}{T_{\psi_w}} - V_n\right) \psi_w + V_n \psi_L - \frac{x_r}{T_{\psi_w}} \psi_{w_c} \quad (7)$$

$$\dot{\psi}_w = -\frac{1}{T_{\psi_w}} \psi_w + \frac{1}{T_{\psi_w}} \psi_{w_c} \quad (8)$$

$$\dot{V}_w = -\frac{1}{T_{V_w}} V_w + \frac{1}{T_{V_w}} V_{w_c} \quad (9)$$

$$\dot{z} = \zeta \quad (10)$$

$$\dot{\zeta} = -\left(\frac{1}{T_{h_a}} + \frac{1}{T_{h_b}}\right) \zeta - \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} z + \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} h_{w_c} - \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} h_{L_c} \quad (11)$$

此时垂直方向的距离 $z = h_w - h_L$, 并假设长机和僚机的垂直方向动态方程是相同的。

按照以上对状态量、控制量和干扰量的定义, 即状态量 $\mathbf{X} = [x \ V_w \ y \ \psi_w \ z \ \zeta]^T$, 控制量 $\mathbf{U} = [V_{w_c} \ \psi_{w_c} \ h_{w_c}]^T$, 干扰量 $\mathbf{U}_L = [V_L \ \psi_L \ h_{L_c}]^T$ 。得到线性状态空间方程的表达式为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ V_w \\ y \\ \psi_w \\ z \\ \zeta \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} x \\ V_w \\ y \\ \psi_w \\ z \\ \zeta \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} V_{w_c} \\ \psi_{w_c} \\ h_{w_c} \end{bmatrix} + \mathbf{\Gamma} \begin{bmatrix} V_L \\ \psi_L \\ h_{L_c} \end{bmatrix} \quad (12)$$

即:

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{\Gamma}\mathbf{U}_L \quad (13)$$

此时, 系统矩阵:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & -\frac{y_r}{T_{\psi_w}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{V_w}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{\psi_w}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & T_2 & T_3 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{式中: } T_1 = \frac{x_r}{T_{\psi_w}} - V_n; T_2 = -\frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}}; T_3 = -\left(\frac{1}{T_{h_a}} + \frac{1}{T_{h_b}}\right)。$$

输入矩阵:

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{y_r}{T_{\psi_w}} & 0 \\ \frac{1}{T_{V_w}} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{x_r}{T_{\psi_w}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{T_{\psi_w}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} \end{bmatrix} \quad (15)$$

扰动矩阵:

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & V_n & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_{h_a} T_{h_b}} \end{bmatrix} \quad (16)$$

4.3 控制器设计

在领航-跟随模式的编队飞行过程中,僚机跟随长机的飞行航迹,保持两机的相对距离不变。在设计僚机对长机的跟踪控制时,主要是利用 x, y, z 通道控制完成对编队中僚机的速度控制 (V_{w_c})、航向控制 (ψ_{w_c})、高度保持 (h_{w_c}) 三方面的控制。3 个通道上的控制律分别如下:

$$V_{w_c} = K_{x_p} e_x + K_{x_i} \int_0^t e_x dt \quad (17)$$

$$\psi_{w_c} = K_{y_p} e_y + K_{y_i} \int_0^t e_y dt \quad (18)$$

$$h_{w_c} = K_{z_p} z + K_{z_i} \int_0^t z dt \quad (19)$$

其中, x 通道的综合误差:

$$e_x = k_x x + k_v e_v \quad (20)$$

y 通道的综合误差:

$$e_y = k_y y + k_\psi e_\psi \quad (21)$$

z 通道的误差:

$$e_z = k_z z \quad (22)$$

本文中提出的编队飞行不是紧密编队,建立的数学模型没有考虑紧密编队飞行过程中长机对僚机的动力学影响,故不需要考虑飞机的动力学方程,这样降低了数学建模的复杂性。

4.4 仿真结果与分析

在 MATLAB/Simulink 仿真过程中,经过反复试凑和比较仿真结果,分别得出 PI 控制器各个增益的值,以及 x, y, z 通道上综合误差线性混合器的增益值,使僚机能跟踪长机的机动并保持固定的队形。

设长机和僚机相对距离期望值在 x 轴上的分量为 $x_c = 433$ m, 在 y 轴上的分量为 $y_c = 250$ m, 在 z 轴上的分量为 $z_c = 0$ m; 长机的速度为 $V_L = 325$ m/s, 航向角 $\phi_L = -20^\circ$ 。图 4 是当长机和僚机的相对距离和长机的速度和航向角都不发生变化时,对编队飞行控制系统的仿真结果。其中虚线表示期望值,实线表示僚机实际的跟踪值。

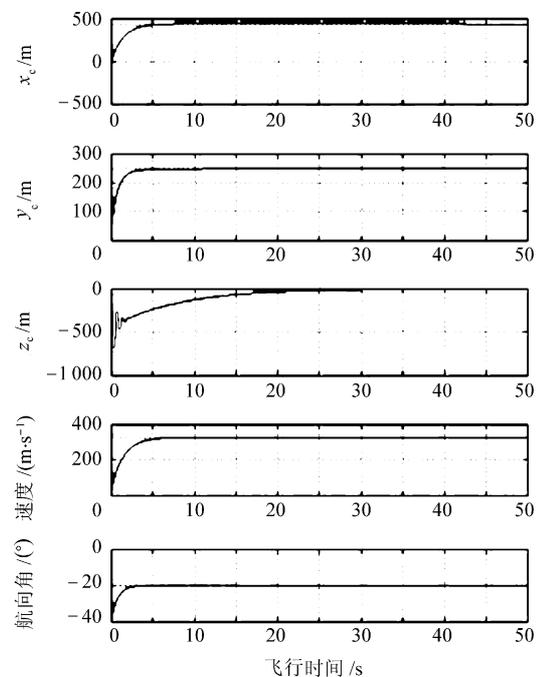


图 4 参考输入不变时的仿真结果

Fig. 4 Simulation results with fixed reference inputs

当长机与僚机的相对距离分别增加到 $x_c = 600$ m, $y_c = 800$ m, 长机的速度 $V_L = 325$ m/s 变化到 $V_L = 475$ m/s, 航向角从 $\phi_L = -20^\circ$ 变化到 $\phi_L = -40^\circ$ 时,其仿真结果如图 5 所示。

从上述仿真结果中可以看出,僚机与长机的相对距离能快速保持在期望值上,同时僚机的速度和航向角也迅速与长机保持一致,这说明僚机与长机能很快稳定在固定的队形上,证明该编队控制器的有效性。另外当长机和僚机的相对距离增加,长机速度和航向角发生变化时,僚机仍能快速跟随长机的飞行,证明该编队控制器具有鲁棒性。

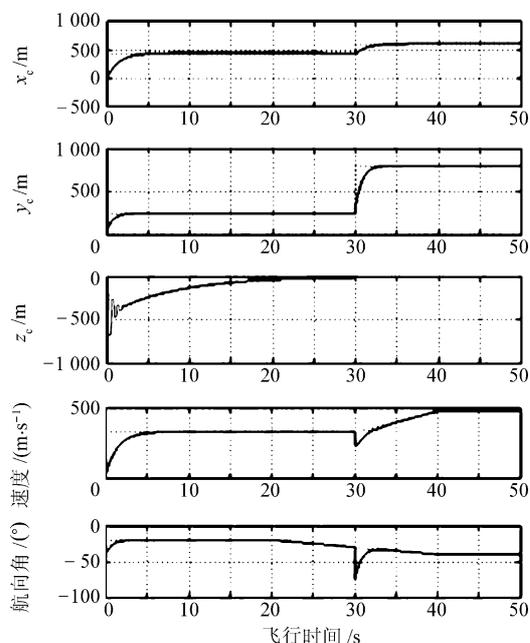


图5 参考输入变化时的仿真结果

Fig. 5 Simulation results with changing reference inputs

5 面向任务的多机行为协调

针对领航-跟随的编队模式和分布式控制策略,利用长机和僚机构成的 MAS 实现特定任务或特殊场合下的编队过程协调优化。以前面提到的 3 架无人机组成的编队执行一次攻击任务为例,阐述多无人机编队飞行系统的工作过程,描述各个 Agent 之间是如何进行协调优化控制的。

在整个飞行过程中,假设有两种队形,V 型编队和一字型编队。V 型编队是指僚机在长机后 30° 到后 60° 的区域内飞行,航向角与长机一致,并与长机保持 $1\sim 2$ km 的距离,这种队形整体操纵性良好,却牺牲了一定的攻击性和防御性,一般在巡航阶段采用这种队形;一字型编队是指僚机在长机前 15° 到后 20° 的区域内飞行,航向角与长机一致,并与长机保持 $1\sim 2$ km 的距离,这种队形具有好的攻击性和防御性,但牺牲了一定的操纵性,一般在攻击阶段采用这种队形。图 6 是多架无人机执行攻击任务的示意图。图中:虚线表示预先规划的航迹;实线是实际的飞行路线;三角形表示存在的一个威胁。

初始状态下的无人机是随机的分散分布,各个无人机从 A 点起飞沿事先预定的路线飞行。在巡航阶段,无人机采取 V 型队形。在飞行中感

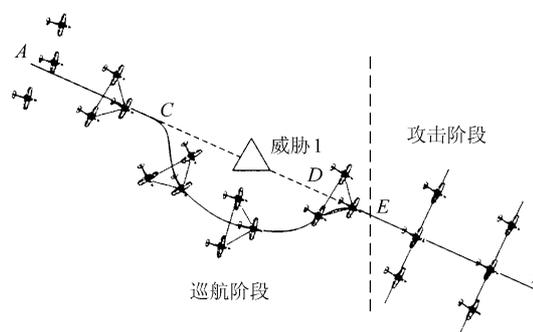


图6 面向攻击任务的3机编队飞行

Fig. 6 Formation flight of three UAVs for an attacking mission

知 Agent 不断探测外界环境,当飞行到 C 点时,感知 Agent 发现前方有威胁存在时,向智能决策 Agent 发布信息,并告知威胁的方位和距离。智能决策 Agent 依据该信息做出调整航迹的决策,发布给航迹规划 Agent,航迹规划 Agent 迅速制定一条新的航迹,然后长机根据新的航迹调整航向角,避开威胁。当威胁消失,长机回到 D 点,继续沿预定的航迹飞行,各个僚机始终与长机保持 V 型队形。当长机飞行到 E 点时,由巡航阶段进入攻击阶段,智能决策 Agent 由感知 Agent 发来的信息判断是否进入攻击阶段,从而做出改变队形为一字型的决策,发布给队形控制 Agent。队形控制 Agent 根据新的队形分别计算出长机与其他僚机的相对距离,由长机和僚机的通讯 Agent 传给僚机编队控制 Agent,从而调整僚机的位置,形成一字型的攻击队形。最终各无人机能保持该队形顺利地到达终点 B。

6 仿真分析与性能评价

在 MATLAB/Simulink 中的整个仿真图如图 7 所示,每个模块对应于图 1 的组织结构图。环境信息事先在环境模块中定义,环境模块结合了长机和僚机的信息。感知 Agent 从环境模块中获得一些信息,这些信息加工处理之后给智能决策 Agent 提供支持,从而驱动航迹规划 Agent 模块和队形控制 Agent 模块。然后长机的控制命令发给僚机编队控制 Agent。

想定 1 该场景中对队形变换进行仿真。中间点代表长机,另外两个点代表 2 架僚机。初始情况下,无人机群采用 V 型队形,当智能决策 Agent 驱动队形控制 Agent 给僚机发送编队命令时,队形变为一字型。长机速度由 325 m/s 增加到 475 m/s,意味着无人机群进入攻击阶段。在

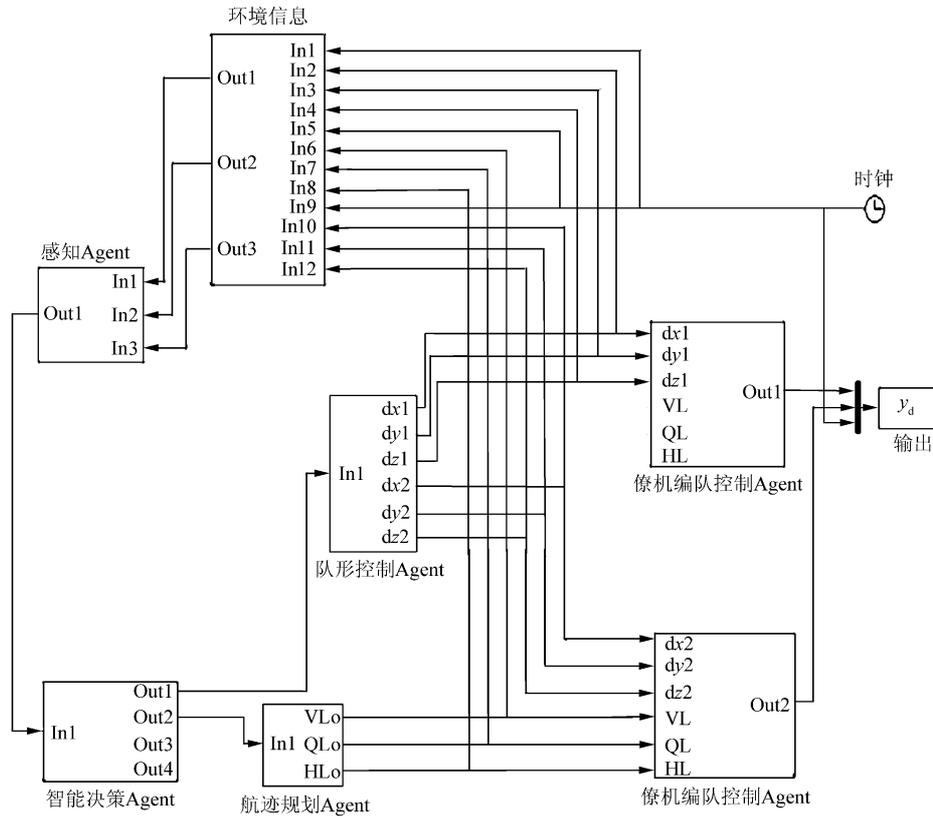


图 7 整个系统的 Simulink 仿真图

Fig. 7 System simulation diagram in Simulink

整个飞行过程中,长机的航向角由 -20° 变化到 -50° 。该队形变化过程的仿真结果如图 8 所示。

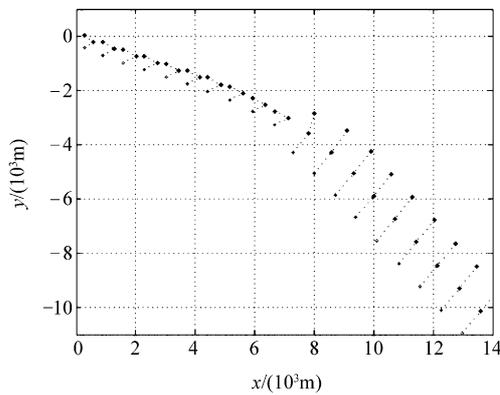


图 8 飞行过程中的队形变化

Fig. 8 Change of formation type in flight process

将图 8 放大后可得队形变化的局部细节如图 9 所示。

想定 2 该场景下对无人机的避障过程进行仿真。当威胁不存在时,无人机按照预定航迹飞

行,各无人机的航向角和速度保持不变,其仿真结果如图 10 所示。当威胁存在时,长机速度不发生变化,只改变航向角来改变预定航迹以避免威胁。僚机保持与长机的相对距离和速度不变,跟随长机的航向角变化,该过程的仿真结果如图 11 所示。图中圆圈代表威胁的区域,无人机在编队飞行过程中能避开威胁。

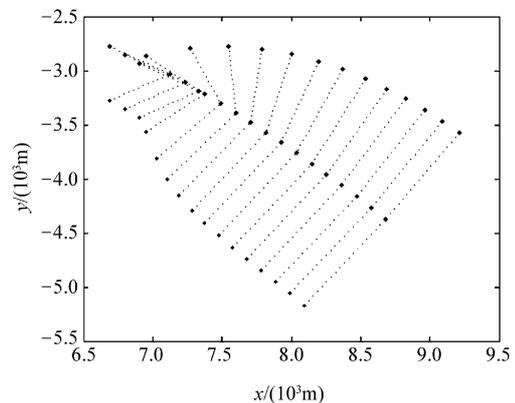


图 9 队形变化的局部细节

Fig. 9 Local details of formation change

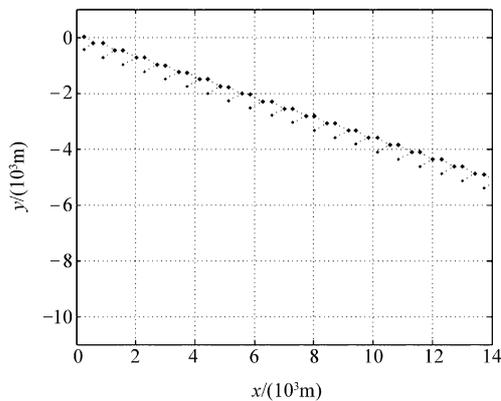


图10 无威胁或障碍时的编队飞行

Fig. 10 Formation flight without threat or obstacle

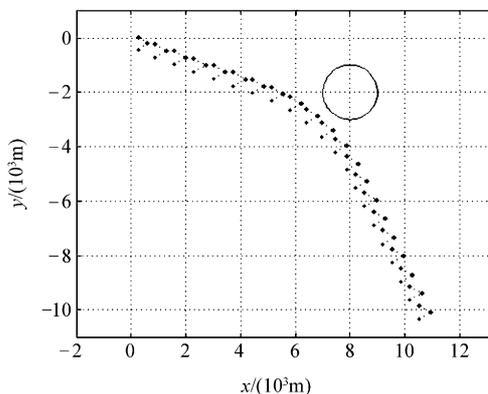


图11 有威胁或障碍时的编队飞行

Fig. 11 Formation flight against threat or obstacle

7 结论

针对无人机编队飞行的实际背景和约束条件,运用领航-跟随原理,提出了一种新的基于MAS技术的协同优化控制策略和相应的实现算法。仿真结果验证了分布式控制结构在无人机编队飞行中的灵活性和有效性。考虑到无人机编队飞行过程中行为协调和性能优化等方面的高指标要求,结合MAS技术在实现协调优化策略时的优势和特点,重点讨论了僚机编队飞行控制器的设计,通过一系列仿真实验验证了此类控制器的鲁棒性和稳定性。从本文的研究结果出发,进一步的研究重点将放在组织结构的优化、航迹规划与队形保持以及应急策略和整体性能的优化等方面。

参 考 文 献

[1] Giulietti F, Pollini L, Innocenti M. Autonomous formation flight[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2000, 20(4): 34-44.

- [2] Hallberg E, Kammer I, Pascoal A. Development of a flight test system for unmanned air vehicles[J]. IEEE Control System Magazine, 1999, 19(1):55-65.
- [3] 朱战霞,袁建平. 无人机编队飞行问题初探[J]. 飞行力学, 2003, 21(2):5-7.
Zhu Zhanxia, Yuan Jianping. Discuss on formation flight of UAV[J]. Flight Dynamics, 2003, 21(2):5-7. (in Chinese)
- [4] 杨镜宇,徐邦年,金雪燕. 多机空战仿真分布式智能决策支持系统设计[J]. 系统工程与电子技术, 2001, 23(9): 70-73.
Yang Jingyu, Xu Bangnian, Jin Xueyan. Designing of distributed intelligence decision-making support system in multiple air combat simulation[J]. Systems Engineering and Electronics, 2001, 23(9):70-73. (in Chinese)
- [5] 曹继红,高晓光. 多架无人机协同作战智能指挥控制系统[J]. 火力与指挥控制, 2003, 28(5):22-24.
Cao Jihong, Gao Xiaoguang. Agent-based design for multi-UCAV intelligent command and control cooperative system[J]. Fire Control & Command Control, 2003, 28(5):22-24. (in Chinese)
- [6] Edwards D B, Bean T A, Odell D L, et al. A leader-follower algorithm for multiple AUV formations[C]//IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicles. 2004: 40-46.
- [7] Wolfe J D, Chichka D F, Speyer J L. Decentralized controllers for unmanned aerial vehicle formation flight[R]. AIAA-96-3833, 1996.
- [8] 李文皓,张珩. 无人机编队飞行技术的研究现状与展望[J]. 飞行力学, 2007, 25(1):9-11.
Li Wenhao, Zhang Heng. Reviews on unmanned aerial vehicle formation-flight[J]. Flight Dynamic, 2007, 25(1): 9-11. (in Chinese)
- [9] Pachter M, D'Azzo J J, Dargan J L. Automatic formation flight control[J]. AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics, 1994, 17(6):838-857.
- [10] Proud A W, Pachter M, D'Azzo J J. Close formation flight control[C]//Proceedings of the 1999 AIAA Guidance Navigation and Control Conference. 1999: 1231-1246.

作者简介:

宗令蓓(1982—)女,硕士研究生。主要研究方向:无人机编队飞行,协同优化控制。

Tel:010-82339358

E-mail: zonglingbei@asee. buaa. edu. cn

谢凡(1982—)男,博士研究生。主要研究方向:群体系统的协同优化控制。

Tel: 010-82339358

E-mail: xfan820325@163. com

秦世引(1955—)男,博士,教授,博士生导师。主要研究方向:模式识别与智能系统,智能控制理论及其应用,复杂系统与复杂性科学。

Tel: 010-82314331

E-mail: qsy@buaa. edu. cn

(责任编辑:鲍亚平,张利平)