

快速一致性控制算法下的多 UAV 分布式协同控制

贾方超¹, 姚佩阳¹, 马方方¹, 李巧丽²

(1. 空军工程大学信息与导航学院, 西安 710077; 2. 中国人民解放军94326部队, 济南 250023)

摘要: 多无人机系统中, 系统状态的一致性是实现多无人机分布式协同控制的基础, 一致性控制算法是多无人机系统实现状态一致的有效方法。通信约束条件下, 无人机平台基于局部交互信息, 通过一致性控制算法, 控制系统状态演化一致。为解决改变通信拓扑结构和多跳路由通信的不可操作性问题, 引入状态差值和预测状态, 设计新的快速一致性控制算法。给出新算法收敛性和快速性的相关定理, 并进行了严格的数学证明, 在分布式协同控制结构下实现多无人机快速任务协同。理论分析和仿真实验验证了算法的可行性和有效性。

关键词: 多无人机系统; 分布式协同控制; 一致性理论; 状态差值; 预测状态; 收敛速度

中图分类号: V279; TP391.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)05-0011-08

Distributed Cooperative Control for Multi-UAV Based on Fast Consensus Control Algorithm

JIA Fang-chao¹, YAO Pei-yang¹, MA Fang-fang¹, LI Qiao-li²

(1. College of Information and Navigation, Air Force Engineering University, Xi'an 710077, China;
2. No. 94326 Unit of PLA, Ji'nan 250023, China)

Abstract: Consistent system state is the basis of distributed cooperative control in multi-UAV system, and consensus control algorithm is an effective method for the multi-UAV system to achieve consistent state. Under communication constraints, the UAV platform is controlled to evolve to the consistent system state through the consensus control algorithm based on local information interaction. To solve the unfeasibility of changing the communication topology and of multi-hop routing communication, a new fast consensus control algorithm was designed by introducing state difference and predictive state. Theorems about convergence and efficiency of the new algorithm were introduced with a rigorous mathematical proof. Fast task coordination was achieved under distributed cooperative control structure. Theoretical analysis and simulation results verify the feasibility and effectiveness of the algorithm.

Key words: multi-UAV system; distributed cooperative control; consensus theory; state difference; predictive state; convergence speed

0 引言

多无人机自主协同作战是未来无人机作战运用的主要形式, 无人机之间进行分布式协同控制, 最终完成复杂任务^[1]。系统状态的一致性是多无人机系统自主协同作战运用的基础, 是发挥多无人机系统优势的关键, 也是整个系统智能性的体现。未来作战, 指挥控制体系朝着分布式发展, 作战力量朝着地理分散化配置,

战场态势瞬息万变, 通信保障困难重重, 如何在通信受限条件和复杂战场环境下, 实现多无人机系统对系统状态(包括平台状态和任务状态)的快速一致认识, 从而实现多无人机分布式协调控制并进行有效的任务协同和自组织作战, 具有重要的现实意义和理论价值^[2]。

一致性问题(consensus problem)是指随着时间的演化, 一个系统中所有个体的某些状态趋于一致^[3]。一致性控制算法(consensus control algorithm)是系统中个体之间传递信息并相互作用的规则, 它描述了个体之间信息交换和相互作用过程。多无人机系统一致性问题主要研究在没有组织者和协调者情况下, 如何通过个体对战场环境的动态反应以及多个个体之间简单协调而涌

收稿日期: 2013-06-27

修回日期: 2013-08-18

基金项目: 国家自然科学基金(61273048)

作者简介: 贾方超(1989—), 男, 山东枣庄人, 硕士生, 研究方向为无人机编队协同作战等。

现出整体行为的一致,其要完成的任务是基于多无人机可能相冲突的状态信息,采用一致性控制算法使无人机系统演化到一致状态。由于多无人机一致性理论具有无中心控制节点、局部信息交换和简单行为协调的特点,符合未来信息化复杂战场环境下分布式自组织作战的趋势,因而,在融合估计、协同决策、编队控制以及蜂拥和聚集等多个领域得到了广泛应用^[3]。当前,多无人机系统一致性理论的研究热点主要集中在一致性收敛的条件、平衡状态、收敛速度、通信时延和噪声、鲁棒一致性、非线性和随机系统一致性等方面^[4]。

当一组无人机要合作完成一项任务,协调控制策略的有效性表现在,多无人机能够应对各种不可预知的战场态势和突然变化的任务环境,对任务状态达成一致认识并快速调整平台状态,这就要求无人机随着战场态势和任务环境的改变快速达到状态一致。可见,在无人机系统一致性问题中,系统演化到一致状态的速度是无人机系统获得信息优势,从而形成决策优势,进而达到行动优势的重要保障。在多智能体领域,众多国内外学者对多智能体系统收敛速度进行了大量研究。1) 优化通信网络的拓扑结构和加权邻接矩阵的权重^[5-8]:文献[5]研究了小世界网络的快速一致性问题,基于随机重连概念设计通讯网络的拓扑结构来提高系统的收敛速度;文献[6]使用分布式快速线性迭代算法来处理一致性问题,通过找出通信网络的最佳权重来提高系统的收敛速度,并且应用半正定凸规划方法进行了收敛分析。2) 获得更多的状态信息^[9-11]:文献[9]增加通信量获得更多的状态信息作为控制输入,并证明此方法能有效地提高一致性收敛速度;文献[10-11]通过引入线性的预测值或加入过去状态的方法取得较快的收敛速度;文献[2,12]等研究中,基于一致性控制算法的多无人机任务协同中少有考虑一致收敛速度。

影响系统一致性收敛速度的因素主要有两个:1) 系统通信拓扑的代数连通度,连通度越高,状态信息交换越充分,收敛速度越快;2) 一致性控制算法,合理的控制策略获得更有效的控制输入,从而加快系统收敛速度。已有研究成果要么需要改变通信网络的拓扑结构,要么需要额外增加通信量,但在大规模无人机系统作战应用中,力量部署广域分散、平台通信能力有限、任务环境复杂,且需要保持无线电静默,改变通信拓扑结构获得更大的通信拓扑代数连通度,或通过多跳路由获得更多的系统状态信息难以实现。因此,需要研究在不改变网络拓扑结构和增加过多通信量的前提下,利用系统现有的状态信息提高收敛速度。本文从改变控制策略、设计有效控制输入角度出发,分析了加入状态差值^[13]和预测状态^[14]对收敛速度的影响,在此

基础上提出一种新的控制算法,提高了多无人机系统状态一致演化速度,并在分布式多无人机协同控制仿真中验证了方法的可行性和有效性。

1 多无人机系统一致性问题数学描述

1.1 图论及矩阵论基础

在一致性问题分析中,图论是不可或缺的工具。对于一个分布式协同控制无人机系统,其个体间局部信息交换的网络拓扑结构通常用一个加权图来描述。

设 n 个无人机平台的通信网络拓扑图为 $G = (V, E, A)$ 。其中: n 为平台个数;图 G 称为 n 阶拓扑图; $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, 为系统的平台集; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$, 为无人机系统的通信链路集,对于 E 中的任一通信链路 $e_{ij} = (v_i, v_j) \in E$ 表示无人机 j 可以向无人机 i 传递信息,无人机平台 v_i 的邻接平台用集合 $N_i = \{v_j \in V | (v_i, v_j) \in E\}$ 表示,邻接集中的无人机平台都可以向无人机 i 传递信息。

加权邻接矩阵 $A = [a_{ij}]$ 描述无人机平台与通信链路之间的关系, A 定义为:
$$a_{ij} = \begin{cases} w_{ij} > 0, & (v_i, v_j) \in E \\ 0, & \text{其他} \end{cases}$$

其中, w_{ij} 为通信链路 (v_i, v_j) 的权值,通常取 $w_{ij} = 1$ 。当 $a_{ij} = a_{ji}$ 时, G 为无向图,当 $a_{ij} \neq a_{ji}$ 时, G 为有向图。定义对角矩阵 $D = [d_{ii}]$ 为 G 的入度矩阵,其中, $d_{ii} = \sum_{j \neq i} a_{ij}$, 显然对角矩阵 D 中的每个元素都等于相应节点的入度。 n 阶通信拓扑图的 Laplacian 矩阵 $L = [l_{ij}]$ 是另一种描述无人机平台与通信链路之间关系的矩阵,其中, $l_{ij} =$

$$\begin{cases} \sum_{k=1, k \neq i}^n a_{ik}, & i = j \\ -a_{ij}, & i \neq j \end{cases}$$
。Laplacian 矩阵与入度矩阵和邻接矩阵之间的关系可以表示为: $L = D - A$ 。

阵之间的关系可以表示为: $L = D - A$ 。

对于有向图,如果有一个平台的信息能传递到系统中的任意平台,则这个有向图含有一个有向生成树。对于有向通信拓扑图 G ,如果 G 中含有一棵有向生成树,则多无人机系统能渐近达到一致且其 L 矩阵只含有一个 0 特征值^[15]。本文后续讨论均以有向通信拓扑图含有有向生成树为基础,保证多无人机系统可以达到一致收敛,需要指出的是,本文方法对无向图依然适用。

1.2 多无人机系统一致性问题数学描述

将无人机平台抽象为简单的质点,采用一阶微分方程描述无人机平台的状态。令 $x_i(t) \in \mathbf{R}$, 表示无人机平台 i 的状态,可以是无人机 i 的平台状态(如位置、速度、航向等)或任务状态(如任务时间、任务位置等),那么, $G_{x(t)} = (G, X(t))$ 代表状态值为 $X(t) =$

$[x_1(t), x_2(t), \dots, x_n(t)]^T \in \mathbf{R}^n$, 通信拓扑结构为 $G = (V, E, A)$ 的多无人机系统。平台状态方程为

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t) \quad (1)$$

式中, $u_i(t) \in \mathbf{R}$, 表示无人机平台 i 在 t 时刻的控制输入。为了保证所有无人机状态趋于一致, 采用一致性控制基本算法^[14]为

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] \quad (2)$$

在一致性控制基本算法下, 多无人机系统动态方程用矩阵表示为

$$\dot{X}(t) = -LX(t) \quad (3)$$

当且仅当 $\lim_{t \rightarrow \infty} \|x_i(t) - x_j(t)\| = 0, \forall i \neq j$ 时, 称无人机状态达到一致。可见, 一致性控制基本算法以无人机平台当前时刻状态为控制算法设计的基础。

2 快速一致性控制算法

为了提高无人机系统演化到一致状态的速度, 提高无人机系统协同作战的效率和自主作战的敏捷性, 国内外学者提出了一些卓有成效的控制策略。本文将分析引入状态差值和预测状态对一致性收敛速度的影响, 并设计新的一致性控制算法。

2.1 基于状态差值的快速一致性控制算法

基于状态差值的快速一致性控制算法在参考无人机系统当前状态的基础上引入系统状态差值, 从而获得效率更高的控制算法, 即

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} [x_i(t) - x_j(t)] + x_i(t) - x_i(t - \tau) \quad (4)$$

式中: τ 为状态差值时刻; $x_i(t) = x_i(0), t \in [-\tau, 0)$ 。在式(4)的控制算法下, 无人机系统动态方程的矩阵形式为

$$\dot{X}(t) = -LX(t) + X(t) - X(t - \tau)。 \quad (5)$$

定理 1 $n(n > 2)$ 个无人机平台构成的系统, 有向通信拓扑图 G 含有有向生成树, 对于式(4)的控制算法, 如果

$$\frac{\sin(w\tau) + \text{Im}(\lambda_i)}{w} < 1 \quad (6)$$

那么, 多无人机系统的状态一致性能够实现, w 满足

$$1 - \cos(w\tau) - \text{Re}(\lambda_i) = 0, \quad \lambda_i \neq 0 \quad (7)$$

式中, $\lambda_i, i = 1, \dots, n$, 是矩阵 $-L$ 的特征值。

定理 1 证明见文献[13]。可以看出, 式(4)的控制算法通过引入状态演化的历史记录改变无人机平台状态变化的梯度, 增大了控制量, 加快了收敛速度, 但需要确定加快收敛的有效时间区间。

2.2 基于预测状态的快速一致性控制算法

为解决基于局部信息控制算法的次优性和获得全

局信息不可行的矛盾^[14], 可通过一次通讯代价获得邻接无人机平台的预测状态, 并用该预测的状态构造控制算法。在此策略下, 多无人机系统可以更快地演化到平衡状态。

设计状态预测算法 $\dot{X}^p(t) = -LX(t)$ 以预测系统状态的变化趋势, 各个无人机平台获得预测状态 $\dot{X}^p(t) = (\dot{x}_1^p(t), \dot{x}_2^p(t), \dots, \dot{x}_n^p(t))^T$, 通过通讯传递给邻接无人机平台, 作为对多无人机系统状态变化的补偿加入到一致性控制算法的设计中。在此控制策略下, 得到以下形式的控制算法

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) + \gamma \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\dot{x}_i^p(t) - \dot{x}_j^p(t)) - \gamma \left(\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in N_i} a_{ij} a_{ik} (x_i(t) - x_k(t)) - \sum_{j \in N_i} \sum_{p \in N_i} a_{ij} a_{ip} (x_j(t) - x_p(t)) \right) \quad (8)$$

式中, γ 为预测状态的影响因子。

在式(8)的控制算法下, 无人机系统动态方程的矩阵形式为

$$\dot{X}(t) = -LX(t) - \gamma L \dot{X}^p(t) = -(L + \gamma L^2)X(t)。 \quad (9)$$

定理 2 $n(n > 2)$ 个无人机平台构成的系统, 通信拓扑 G 有向且含有有向生成树。对于控制算法(9), 无人机系统可渐近达到一致, 且比一致性控制基本算法更快地达到一致。

定理 2 证明见文献[14], 由文献[14]可知, 收敛速度随 γ 值增大不断提高。可以看出, 控制算法(8)通过引入预测状态改变无人机平台状态变化的梯度, 增大了控制量, 加快了收敛速度。

2.3 一种新的快速一致性控制算法

以上两种快速控制算法分别加入状态差值和预测状态, 通过适度引入更多的状态信息, 将系统状态差值和预测状态作为一致性控制基本算法的补偿输入, 增大了状态变化的梯度, 提高了状态收敛速度。本文基于系统状态差值、当前状态和预测状态信息设计了更有效的控制算法, 新算法较现有方法大幅度提高了系统一致性收敛速度。新控制算法为

$$u_i(t) = - \sum_{j \in N_i} a_{ij} (x_i(t) - x_j(t)) + \gamma \sum_{j \in N_i} a_{ij} (\dot{x}_i^p(t) - \dot{x}_j^p(t)) + x_i(t) - x_i(t - \tau) - \gamma \left[\sum_{j \in N_i} \sum_{k \in N_i} a_{ij} a_{ik} (x_i(t) - x_k(t)) - \sum_{j \in N_i} \sum_{p \in N_i} a_{ij} a_{ip} (x_j(t) - x_p(t)) \right] + x_i(t) - x_i(t - \tau) \quad (10)$$

式中: τ 为状态差值时刻; γ 为预测状态的影响因子。在控制算法(10)下, 系统动态方程的矩阵形式为

$$\dot{X}(t) = -LX(t) - \gamma L\dot{X}(t) + X(t) - X(t-\tau) = -(L + \gamma L^2)X(t) + X(t) - X(t-\tau) \quad (11)$$

下面将分别给出新算法收敛性和快速性的相关定理和证明。

2.3.1 算法收敛性证明

定理3 $n(n > 2)$ 个无人机平台构成的系统,通信拓扑 G 有向且含有有向生成树。对于新控制算法(10),如果

$$\frac{\sin(w\tau) + \text{Im}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2)}{w} < 1 \quad (12)$$

那么,多无人机系统的状态一致性能够实现, w 满足

$$1 - \cos(w\tau) - \text{Re}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2) = 0, \quad \lambda_i \neq 0 \quad (13)$$

式中, $\lambda_i, i = 1, \dots, n$,是矩阵 $-L$ 的特征值。

证明:系统状态方程为

$$\dot{X}(t) = -(L + \gamma L^2)X(t) + X(t) - X(t-\tau) \quad (14)$$

对上式进行拉普拉斯变换,得到

$$sX(s) = -(L + \gamma L^2)X(s) + X(s) - e^{-s\tau}X(s) \quad (15)$$

式中, $X(s)$ 为 $X(t)$ 的拉普拉斯变换。进而得到关于 $X(s)$ 的特征方程为

$$\det((s-1+e^{-s\tau})I_n + (L + \gamma L^2)) = 0 \quad (16)$$

因为通信拓扑图 G 有一个有向生成树,由文献[10]可以假设 L 的特征值是 $\lambda_1 = 0$,并且 $\lambda_i \neq 0, i = 2, \dots, n$ 。上式等价于

$$\prod_{i=1}^n (s-1+e^{-s\tau} + \lambda_i + \gamma\lambda_i^2) = 0 \quad (17)$$

进一步,考虑下面方程的根

$$s-1+e^{-s\tau} + \lambda_i + \gamma\lambda_i^2 = 0, \quad i = 1, \dots, n \quad (18)$$

1) 当 $\lambda_1 = 0$ 时,显然 $s = 0$ 是上面方程的一个根。

2) 当 $\lambda_i \neq 0, i = 2, \dots, n$ 时,根据 Nyquist 稳定性理论可知,式(16)的根都落在开的左半复平面,当且仅当 Nyquist 曲线 $z = \frac{-1 + e^{-jw\tau} + \lambda_i + \gamma\lambda_i^2}{jw}$ 不环绕 $(-1, 0j)$,其中, j 表示复数单位, $w \in \mathbf{R}$ 。由文献[10]可知 λ_i 有正实部,Nyquist 曲线变成

$$z = \frac{(\sin(w\tau) + \text{Im}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2)) + j(1 - \cos(w\tau) - \text{Re}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2))}{w} \quad (19)$$

当 $w \in \mathbf{R}$ 时,若要式(19)的 Nyquist 曲线不环绕点 $(-1, 0j)$,必须有

$$\begin{cases} \frac{(\sin(w\tau) + \text{Im}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2))}{w} < 1 \\ 1 - \cos(w\tau) - \text{Re}(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2) = 0, \quad \lambda_i \neq 0 \end{cases} \quad (20)$$

此时,式(18)除了一个根是 $s = 0$ 之外,其他所有根都位于开的左半复平面上,因此满足定理3条件时 $X(t)$ 收敛到一个稳定的状态,一致性能够取得。

2.3.2 算法快速性证明

新算法是在控制算法(8)上加入状态差值,定理2

已说明式(8)的快速性,下面只需要证明新算法(10)较(8)有更快的收敛速度。对于一个稳定的闭环控制系统,系统的闭环极点离虚轴越远,系统的收敛速度越快^[16]。

定理4 $n(n > 2)$ 个无人机平台构成的系统,通信拓扑 G 有向且含有有向生成树。对于新控制算法式(10),当 $\tau \in (0, \sigma)$ 时,系统取得更快的收敛速度。其中, σ 满足

$$\sigma = \min_{i \in N, \lambda_i \neq 0} \left\{ \sigma \mid \sigma = \frac{\arccos e^{-(\text{Re}(\lambda_i) + \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) - \gamma\text{Im}^2(\lambda_i))\sigma}}{\pm \sqrt{e^{2(\text{Re}(\lambda_i) + \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) - \gamma\text{Im}^2(\lambda_i))\sigma} - 1 - \text{Im}(\lambda_i) - 2\gamma\text{Re}(\lambda_i)\text{Im}(\lambda_i)}} \right\} \quad (21)$$

式中, $\lambda_i, i = 1, \dots, n$,是矩阵 $-L$ 的特征值。

证明:由收敛定理3可知,对于式(18),除一个根 $s = 0$ 外所有的根 s 都是关于 τ 连续的,令 $s = x_i + jy_i, i = 2, 3, \dots, n$,代入式(18)得

$$\begin{cases} x_i - 1 + \text{Re}(\lambda_i) + \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) - \gamma\text{Im}^2(\lambda_i) + e^{-x_i\tau} \cos y_i\tau = 0 \\ \text{Im}(\lambda_i) + 2\gamma\text{Re}(\lambda_i)\text{Im}(\lambda_i) + y_i - e^{-x_i\tau} \sin y_i\tau = 0 \end{cases} \quad (22)$$

当 $\tau = 0$ 时, $s = -(\lambda_i + \gamma\lambda_i^2)$,即 $x_i = -\text{Re}(\lambda_i) - \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) + \gamma\text{Im}^2(\lambda_i), y_i = -\text{Im}(\lambda_i) - 2\gamma\text{Re}(\lambda_i)\text{Im}(\lambda_i)$ 。由式(22)可得, $\frac{dx_i}{d\tau} \Big|_{\tau=0} = x_i = -\text{Re}(\lambda_i) - \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) + \gamma\text{Im}^2(\lambda_i)$,由系统收敛定理3可知, $x_i < 0$,即 $\frac{dx_i}{d\tau} \Big|_{\tau=0} < 0$ 。

由 $\frac{dx_i}{d\tau}$ 的连续依赖性可知:存在一个 $\delta > 0$,满足 $0 < \tau \leq \delta$ 时, $\frac{dx_i}{d\tau} \leq 0$ 。由于 x_i 是关于 τ 连续的,有 $0 < \tau < \sigma$ 时,

$x_i < -\text{Re}(\lambda_i) - \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) + \gamma\text{Im}^2(\lambda_i)$,其中, σ 是满足 $x_i(\tau) \Big|_{\tau=\sigma} = -\text{Re}(\lambda_i) - \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) + \gamma\text{Im}^2(\lambda_i)$ 的最小值。由式(22)得

$$\sigma = \min_{i \in N, \lambda_i \neq 0} \left\{ \sigma \mid \sigma = \frac{\arccos e^{-(\text{Re}(\lambda_i) + \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) - \gamma\text{Im}^2(\lambda_i))\sigma}}{\pm \sqrt{e^{2(\text{Re}(\lambda_i) + \gamma\text{Re}^2(\lambda_i) - \gamma\text{Im}^2(\lambda_i))\sigma} - 1 - \text{Im}(\lambda_i) - 2\gamma\text{Re}(\lambda_i)\text{Im}(\lambda_i)}} \right\}$$

从上面分析可知,新算法闭环极点在基于预测状态的快速一致性控制算法闭环极点的左边(除了1个相同的0极点),因此由文献[16]可知,新算法可以提高系统收敛速度。

3 仿真分析

3.1 任务描述

给定8架无人作战飞机分别从8个不同的机场起飞,集结到某一指定空域执行打击作战任务,为了达成打击行动的突然性,要求所有无人机在同一时刻到达指

定空域,无人机起飞前已根据任务要求和战场态势预先规划航迹。受无人机平台间数据链通信能力和敌方防空力量部署限制,同时为了达成打击行动的隐蔽性要求,8架无人机通信网络拓扑如图1所示。

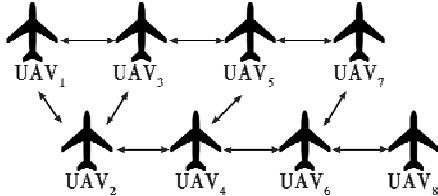


图1 多无人机系统有限通信网络拓扑
Fig.1 Limited communication network topology of multi-UAV system

无人机集结过程中仅通过有限通信网络交换预计到达时间(Estimated Time of Arrival,ETA),记为 $T_{ETA}(t)$,又称任务状态或者协调变量。集结飞行过程中各无人机平台会根据自身飞行状态和航路威胁情况调整飞行速度和飞行航迹,记 t 时刻飞行速度为 v_t ,飞行航程为 s_t ,在此基础上估计出新的预计到达时间 $T_{ETA}(t)$,多无人机系统采用一致性控制算法就预计到达时间演化一致,同时根据实时飞行航程 s_t 和预计到达时间 $T_{ETA}(t)$ 调整飞行速度,以保证多无人机同时到达任务集结空域。协同打击任务的战场态势如图2所示。

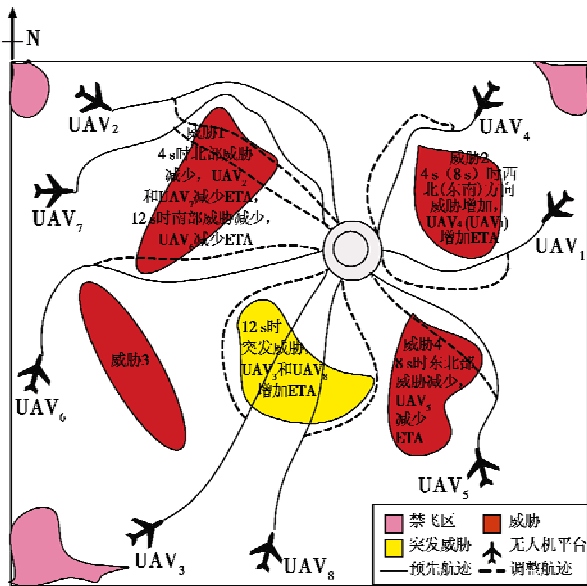


图2 协同打击任务战场示意图

Fig.2 Battlefield of collaborative attack mission

3.2 基于一致性控制算法的多无人机系统分布式协同控制结构

多无人机系统通过一致性控制算法控制任务状态演化一致的同时,需要将任务状态转化为平台状态,如飞行速度控制平台飞行,以匹配任务要求。图3给出了基于一致性控制算法的多无人机系统分布式协同控

制结构,图中有限通信网络如图1所示。

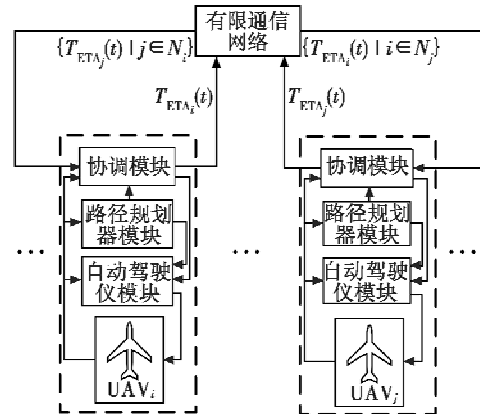


图3 多无人机系统分布式协同控制结构

Fig.3 Distributed cooperative control structure of multi-UAV system

图3中,协调模块从无人机平台和路径规划器模块获得当前速度信息和航程信息,计算出当前预计到达时间,记为 $T_{ETA}(t)$,即第 i 架无人机的协调变量,同时,通过局部通信网络获得邻接无人机平台的预计到达时间 $\{T_{ETA_j}(t) | j \in N_i\}$,并采用一致性控制算法控制任务状态演化一致,同时产生速度指令调整平台状态,并更新自身协调变量 $T_{ETA}(t)$ 。路径规划模块根据当前无人机平台飞行状态和战场环境规划飞行轨迹,并将航程信息传递给协调模块,将飞行航向信息传递给自动驾驶仪模块,自动驾驶仪模块根据协调模块给出的速度调节指令和路径规划器模块给出的航向信息控制无人机平台运动。需要说明的是,以上各模块只是对无人机平台的逻辑抽象,不对应实际的物理结构,且假定路径规划器模块可以实时给出航向信息和航程信息^[2]。

3.3 仿真结果

在联想启天 M7150 台式计算机(CPU 型号 Intel Pentium E5500)平台上,采用 Matlab R2009a 进行算法仿真,算法结构保持一致。

1) 不同一致性控制算法收敛速度仿真。

假定无人机系统预先规划的到达时间为 $T_{ETA}(0) = [20, 26, 17, 15, 22, 16, 19, 21]$,分别采用一致性控制基本算法、基于状态差值的一致性控制算法($\tau=0.37$)、基于预测状态的一致性控制算法($\gamma=2$)和本文控制算法($\tau=0.37, \gamma=2$)进行仿真,结果如图4所示。

由图4可知,4种算法的收敛时间分别为6.2s、4.6s、3s、1.6s,基于状态差值的一致性控制算法、基于预测状态的一致性控制算法和本文算法均能提高系统收敛到一致状态的速度,较一致性控制基本算法分别提高25.81%、51.61%、74.19%,本文算法较基于状态差值的一致性控制算法和基于预测状态的一致性控制算法提高65.22%、46.67%。4种算法分别运行100

次取平均值,算法耗时分别为 0.088 s、0.091 s、0.093 s、0.097 s,新算法的计算复杂度稍有增加,考虑收敛速度大幅度提高,对新算法实时性影响不大。

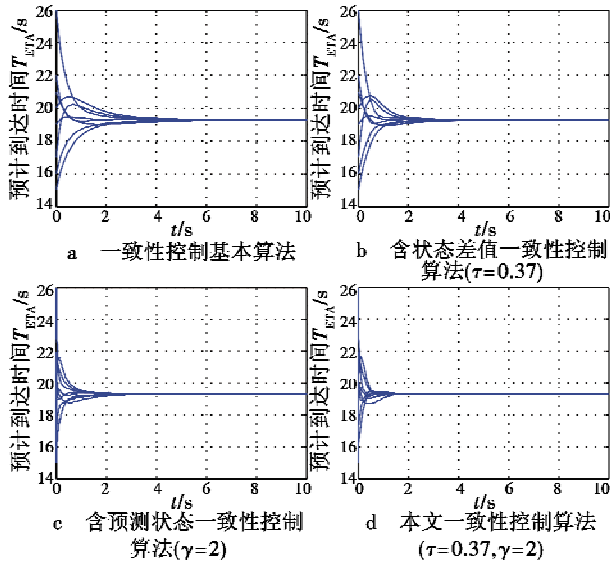


图4 不同控制算法收敛速度对比

Fig. 4 Convergence speed of different control algorithms

2) 新算法下 τ 值与收敛速度关系仿真。

在新算法中引入状态差值信息,增大了系统状态变化梯度,提高了系统收敛速度。取 $\tau = 0.37, \gamma = 2$ 时,其较基于预测状态的一致性控制算法 ($\gamma = 2$) 收敛速度提高了 46.67%。但是 τ 值与系统收敛速度的关系并不明确,下面将通过仿真探索 τ 值与收敛速度之间的关系,其中,给定 $\gamma = 2$,如图 5 所示。

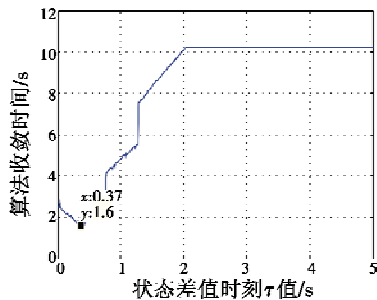


图5 不同 τ 值下算法收敛速度 ($\gamma = 2$)

Fig. 5 Convergence speed of algorithm with different τ when $\gamma = 2$

由图 5 可知,系统收敛速度随着 τ 取值不同而变化,整体呈现先加快后减慢趋势,当 $\tau = 0.37$ 时取得最快收敛速度。由定理 3 可知,当 $\tau = 1.98$ 时,系统状态不能收敛。

3) 新算法下 γ 值与收敛速度关系仿真。

在新算法中引入预测状态信息,增大了系统状态变化梯度,提高了系统收敛速度。取 $\tau = 0.37, \gamma = 2$ 时,其较基于状态差值的一致性控制算法 ($\tau = 0.37$)

收敛速度提高了 65.22%。下面将通过仿真验证 γ 值与收敛速度之间的关系,其中, $\tau = 0.37$,如图 6 所示。

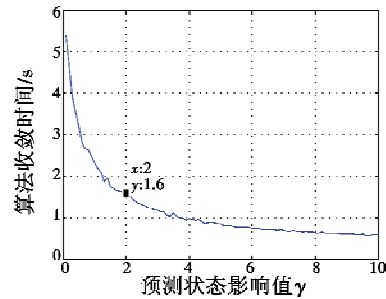


图6 不同 γ 值下算法收敛速度 ($\tau = 0.37$)

Fig. 6 Convergence speed of algorithm with different γ when $\tau = 0.37$

由图 6 可知,随着 γ 值增大,系统收敛速度不断提高,但是 γ 值增大导致控制能量增加 γ^2 倍,为了兼顾收敛速度和控制能量,一般取 $\gamma = 2$ 。

4) 新算法下 γ 值和 τ 值组合与收敛速度关系仿真。

下面的仿真分析将探索不同 γ 值和 τ 值组合与收敛速度之间的关系,如图 7 所示。图中对应轴向与前述分析吻合,取 $\tau = 0.37, \gamma = 2$ 时系统收敛速度为 1.6 s。

5) 任务执行过程仿真。

在无人机系统执行任务过程中,战场态势变化和无人机系统应对策略如图 1 所示,下面基于图 2 所示分布式协同控制结构,以本文控制算法为例分析任务执行过程,其中, $\tau = 0.37, \gamma = 2$ 。

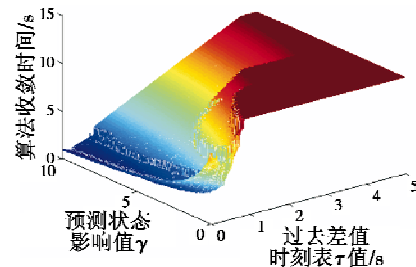


图7 不同 γ 值和 τ 值组合与收敛速度关系示意图

Fig. 7 Convergence speed of algorithm with different combination of γ and τ

初始时刻多无人机系统预计到达时间为 [20, 26, 17, 15, 22, 16, 19, 21], 1.6 s 时系统已经达到一致任务状态并调整到匹配飞行速度,一致值为 19.3 s。在 4 s 时 UAV₂、UAV₄、UAV₇ 因敌方战场部署调整,战场态势发生变化,预计到达时间分别变化 [-2.34, 3.74, -1.32], 3 架无人机的协调模块迅速调整到新的预计到达时间,其他无人机预计到达时间随任务进行有序减少,多无人机系统 4 s 时新的预计到达时间为 [16.90, 14.56, 16.90, 20.64, 16.90, 16.90, 15.58, 16.90]。5.5 s 时已经达到一致任务状态和相应的匹配飞行速度,一致值为 17.28 s。

8 s 时战场态势再次发生变化, UAV₁ 和 UAV₅ 预计到达时间分别变化[2.32, -2.68], 同上可知, 多无人机系统 8 s 时新的预计到达时间为[17.10, 14.78, 14.78, 14.78, 12.10, 14.78, 14.78, 14.78]。9.7 s 时已经达到一致任务状态和相应的匹配飞行速度, 一致值为 14.48 s。12 s 时战场态势再次发生变化, UAV₃、UAV₆ 和 UAV₈ 预计到达时间分别变化[6.59, -1.35, 2.69], 多无人机系统 12 s 时新的预计到达时间为[12.18, 12.18, 18.77, 12.18, 12.18, 10.83, 12.18, 14.87]。系统在 13.2 s 时达到一致任务状态和相应的匹配飞行速度, 新的一致到达时间为 12.97 s, 多无人机系统在 26.17 s 同时到达任务集结地点。任务执行过程如图 8a 所示。

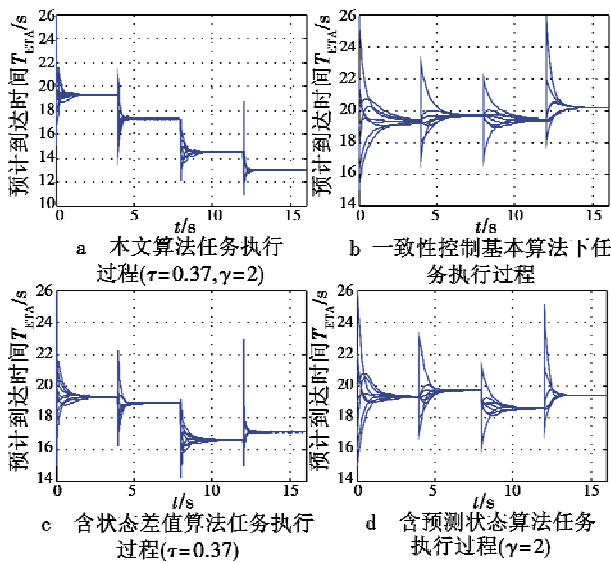


图8 不同一致性控制算法下任务执行过程示意图

Fig. 8 Task execution process for different consensus control algorithms

同理, 使用一致性控制基本算法分析可知, 系统在 15.8 s 最终达到一致任务状态和相应匹配速度, 新的一致到达时间为 20.17 s, 多无人机系统在 35.97 s 同时到达任务集结地点, 完成集结任务。任务执行过程如图 8b 所示。

使用基于状态差值的一致性协议, 取 $\tau = 0.37$, 系统在 14.7 s 最终达到一致任务状态和相应匹配速度, 新的一致到达时间为 19.37 s, 多无人机系统在 34.07 s 同时到达任务集结地点, 完成集结任务。任务完成时间较使用典型一致性控制协议优势不明显, 主要与 τ 取值有关, 当 τ 取值更合理时优势更为明显, 对于基于状态差值的一致性协议, $\tau = 0.43$ 时取得更快的任务完成时间, 多无人机系统在 32.05 s 同时到达任务集结地点, 完成集结任务。任务执行过程如图 8c 所示。

使用基于预测状态的一致性协议, 取 $\gamma = 2$ 时, 系统在 14 s 最终达到一致任务状态和相应匹配速度, 新

的一致到达时间为 17.07 s, 多无人机系统在 31.07 s 同时到达任务集结地点。任务完成时间随 γ 值变大而变小, 但是需要兼顾控制能量。任务执行过程如图 8d 所示。

由以上分析可知, 4 种控制算法下的任务完成时间分别为 35.97 s、34.07 s、31.07 s、26.17 s, 基于状态差值的一致性控制算法、基于预测状态的一致性控制算法和本文算法均能提高系统完成任务的速度, 分别较一致性控制基本算法提高 5.28%、13.62%、27.24%, 本文算法较基于状态差值的一致性控制算法和基于预测状态的一致性控制算法分别提高 23.19%、15.77%。

4 结论

多无人机系统就某些系统状态趋于一致是其分布式协同控制和自组织作战的前提, 一致性控制算法是控制系统达成一致状态的有效方法, 一致性控制算法的收敛速度是提高协同控制和任务执行效率的重要保证。本文通过引入系统状态差值和预测状态, 设计了新的一致性控制算法, 显著提高了系统状态收敛速度, 同时探讨了 τ 值和 γ 值对收敛速度的影响, 最后在多无人机系统分布式协同控制结构中进行了任务仿真分析, 结果表明, 新算法大幅度提高了任务执行效率, 验证了算法的可行性和有效性。需要指出的是, 本文的控制算法达到的一致状态是各无人机平台相互妥协的结果, 且对多无人机分布式协同控制结构下的飞行控制研究不足, 优化控制算法下多无人机系统的飞行控制是下一步研究的重点。

参考文献

- [1] Unmanned Aerial Vehicle(UAV) roadmap 2005-2030[R]. Office of the Secretary of Defense, 2005.
- [2] 袁利平, 陈宗基, 周锐, 等. 多无人机同时到达的分散化控制方法[J]. 航空学报, 2010, 31(4): 797-805.
YUAN L P, CHEN Z J, ZHOU R, et al. Decentralized control for simultaneous arrival of multiple UAVs [J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2010, 31(4): 797-805.
- [3] 谢光强, 章云. 多智能体系统协调控制一致性问题研究综述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(6): 2035-2039.
XIE G Q, ZHANG Y. Survey of consensus problem in cooperative control of multi-agent systems [J]. Application Research of Computers, 2011, 28(6): 2035-2039.
- [4] 余莹莹. 多智能体系统一致性若干问题研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010.
SHE Y Y. Research on several problems of consensus in

- multi-agent systems [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010.
- [5] OLFATI-SABER R. Ultrafast consensus in small-world networks [C]//Proceedings of the American Control Conference, Portland, OR, 2005:2371-2378.
- [6] XIAO L, BOYD S. Fast linear iterations for distributed averaging [J]. Systems & Control Letters, 2004, 53(1): 65-78.
- [7] XIAO L, BOYD S, KIM S J. Distributed average consensus with least-mean-square deviation [J]. Journal of Parallel and Distributed Computing, 2007, 67(1):33-46.
- [8] KOKIOPOULOU E, FROSSARD P. Polynomial filtering for fast convergence in distributed consensus [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(1):342-354.
- [9] JIN Z P, MURRAY R M. Multi-hop relay protocols for fast consensus seeking [C]//The 45th IEEE Conference on Decision and Control, San Diego, 2006:1001-1006.
- [10] AYSAL T C, ORESHKIN B N, COATES M J. Accelerated distributed average consensus via localized node state prediction [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2009, 57(4):1563-1576.
- [11] ORESHKIN B N, COATES M J, RABBAT M G. Optimization and analysis of distributed averaging with short node memory [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2010, 58(5):2850-2865.
- [12] 张庆杰. 基于一致性理论的多 UAV 分布式协同控制与状态估计方法 [D]. 长沙:国防科学技术大学, 2011.
- ZHANG Q J. Distributed cooperative control and state-estimation for networked multiple UAVs based on consensus theory [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011.
- [13] 冯新磊. 符号矩阵和多智能体系统一致性研究 [D]. 成都:电子科技大学, 2011.
- FENG X L. Study of sign pattern matrix and consensus of multi-agent systems [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [14] 席裕庚, 黄维, 李晓丽. 具有状态预测器的多智能体系统一致性研究 [J]. 控制与决策, 2010, 25(5):769-772.
- XI Y G, HUANG W, LI X L. Consensus of multi-agent system with state predictor [J]. Control and Decision, 2010, 25(5):769-772.
- [15] OLFATI-SABER R, MURRAY R M. Consensus problems in networks of agents with switching topology and time-delays [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49(9):1520-1533.
- [16] CAO Y C, REN W, CHEN Y Q. Multi-agent consensus using both current and outdated states [C]//IFAC World Congress, Seoul, Korea, 2008:2874-2879.

声 明

本刊已许可中国学术期刊(光盘版)电子杂志社、北京万方数据股份有限公司、重庆维普资讯有限公司等在其网络平台和系列数据库产品中以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文, 著作权使用费与本刊稿酬一并支付。作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我部上述声明。