通信拓扑变化条件下多无人机同时到达控制策略

谭雁英¹, 薛亮², 张艳宁³, 祝小平⁴

1.西北工业大学 航天学院精确制导与控制研究所, 陕西 西安 710072;
2.中国人民解放军 31670 部队, 宁夏 银川 750027;
3.西北工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710129; 4.西北工业大学 无人机所, 陕西 西安 710065

摘 要:针对战场环境中无人机多机成员通信链路局部时断时续情形,并基于一致性算法有向生成树最弱通信连通条件,设计了无人机多机通信拓扑包含有向生成树/子树的判别策略、以及重新包含有向生成树的通信链路最小变更方案的获取策略;研究选取预计到达时间(ETA)为协调变量,基于一致性算法控制无人机成员或其成员子集实现同时到达;提出设置虚拟子目标点的一致性控制策略,实现多无人机空中聚集飞行和同时到达,以提高作战生存力,并且避免多无人机飞行间距超出相互通信作用范围;通过仿真与分析,验证了上述策略的有效性。

关 键 词:多无人机;同时到达;一致性算法;网络通信拓扑;策略
中图分类号:TP399 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-2758(2018)03-0565-06

多无人机协同作战,如执行协同探测、协同攻击任务,通过相互能力互补和行动协调,实现单架无人机的任务能力扩展以及多无人机系统整体作战效能的提升,是无人机在未来复杂战场环境下的重要作战模式^[1]。为了提高攻击的有效性,最大化杀伤效果,通常要求多架无人机能够同时到达目标指定位置,完成集结,以执行同时性协同攻击任务^[2]。

无人机同时到达集结是典型的一致性问题,通过一致性算法,随着时间的演化,网络通信中的多无人机各成员按照一定的控制协议,通过局部通信协调,相互作用、相互影响,不断更新各成员的状态,使其趋近一致,实现同时到达^[3-9]。在实际作战中,由于环境的影响,网络拓扑结构会发生变化。针对此情形的研究主要集中在每个切换时间间隔^[10-12]以及切换网络的并集^[13-14]等在实现一致性的满足条件方面,且均为在某几种指定形式间相互切换,对无人机成员间通信网络拓扑不断变化情形下的一致性同时到达研究还较少。

本文在上述研究的基础上,针对战场环境下局部通信链路时断时续、通信节点退出与加入等不确

定因素导致的无人机成员间网络拓扑结构变化情形,设计了实时判别无人机成员集合及其子集的通信拓扑是否存在满足一致性条件的有向生成树以及设置子目标点的策略,选取预期到达时间(estimated time of arrival,ETA)为协调变量,通过一致性算法实现多机空中聚集及同时到达。

1 同时到达一致性算法

1.1 一致性算法理论基础

多无人机系统属于多智能体的一种。无人机多机系统各成员间的通信关系一般用有向图表示^[15]。假设有 N 架无人机,加权有向图 $G = (V, E, A)$, 其中 V 是成员节点集, E 为边集; A 为 G 的加权邻接矩阵, A 中元素 α_{ij} 为各成员间的连接权值,且有 $\alpha_{ij} \geq 0$ 。

常见的一致性算法一阶模型为:

$$\dot{x}_i(t) = u_i(t), i \in \{1, \cdots, n\} \tag{1}$$

式中, n 为智能体个数, $x_i(t)$ 是第 i 个智能体的状态, $u_i(t)$ 是其控制输入。典型的一致性协议为^[3]:

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

1.2 无人机简化模型

假定无人机平飞,将无人机抽象为在二维平面内运动的质点。简化后的无人机运动模型^[9]如下:

$$\begin{cases} \dot{x}_i(t) = v_i(t) \cos \phi_i(t) \\ \dot{y}_i(t) = v_i(t) \sin \phi_i(t) \end{cases} \quad (3)$$

式中, $[x_i(t), y_i(t)]^T$ 表示无人机 i 的二维位置向量, $v_i(t)$ 为飞行速度, $\phi_i(t)$ 为航向角。

1.3 一致性算法协调变量选取

本文选取无人机预计到达时间(ETA)为一致性算法协调变量。由文献[16]得出速度参考指令为:

$$v_i^c(t) = v_i(t) \left[1 - \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}(t_j(t) - t_i(t))}{\alpha_v t_i(t)} \right] \quad (4)$$

式中, $v_i(t)$ 为第 i 架无人机的实时飞行速度, $t_i(t)$ 为 ETA 时间, α_{ij} 表示在 t 时刻无人机 j 到无人机 i 的通信连接权值。当 $\alpha_{ij} > 0$ (本文取 $\alpha_{ij} = 1$) 时,表示无人机 j 到无人机 i 存在通信连接,当 $\alpha_{ij} = 0$ 时,则表示无人机 j 到无人机 i 没有通信连接。

2 通信拓扑变化条件下同时到达控制策略设计

2.1 一致性算法通信拓扑条件的实时判别与同时到达控制策略设计

无人机系统 N 个成员满足一致性算法的最弱通信连通条件为:其通信拓扑图至少包含一个有向生成树^[3]。通信拓扑发生变化时,满足一致性算法通信拓扑条件的实时判别与同时到达控制策略流程设计如下:首先判别无人机系统 N 个成员的通信拓扑图是否至少包含一个有向生成树,若包含,则应用一致性算法控制 N 个成员使其 ETA 达到一致;若未包含,则查找包含成员数目最多($n_{\max}$) 的有向生成子树所对应的成员子集,使用一致性算法使其 ETA 达到一致,同时查找给出对于 N 个成员变化后的通信拓扑能够重新包含有向生成树的最小链路变更需求方案。其策略流程如图 1 所示。

2.1.1 有向生成树判别算法设计

无人机系统 N 个成员通信拓扑图 G 是否包含有向生成树的判别算法设计如下:基于当前的通信拓扑图 G ,以节点 1 至节点 N 分别作为根节点寻找有向生成子树,对查找出的有向生成子树包含的节点

图 1 满足一致性算法通信拓扑条件的实时判别与同时到达控制策略流程

数目大小进行比较,将包含节点数最多的生成子树记为 $T_{\max}$, $T_{\max}$ 包含的节点数记为 $n_{\max}$ 。若 $T_{\max}$ 包含所有的 N 个成员节点,即 $n_{\max} = N$,则判定当前通信拓扑结构图 G 中包含有向生成树;若 $T_{\max}$ 包含的成员节点 $n_{\max} < N$,则判定当前图 G 中不包含有向生成树,包含节点树最多即 $n_{\max}$ 个节点的有向生成子树。其算法流程如图 2 所示。

图 2 有向生成树判别算法流程

2.1.2 重新包含有向生成树的通信链路最小变更策略

由 § 2.1.1 算法得出,无人机系统 N 个成员通信拓扑图 G 包含成员数目最多的有向生成子树 $T_{\max}$ 中,如果 $T_{\max}$ 包含的节点数 $n_{\max} < N$,设置 $M = N - n_{\max}$,图 G 中除去 $T_{\max}$ 包含 M 个剩余节点的拓扑子图记为 R ,图 G 重新包含 N 个节点的有向生成树的通信链路最小变更方案的获取策略流程如图 3 所示,其具体步骤如下:

- 1) 初始化 $i = 1$,置通信链路最小变更拓扑图 C 为空;
- 2) 在 R 中查找包含节点数目最多的有向生成子树,记为 $T_{\max_Ri}$, $T_{\max_Ri}$ 包含的节点数记为 $n_{\max_Ri}$;
- 3) 从 $T_{\max}$ 选取任一节点与 $T_{\max_Ri}$ 的根节点申请有向通信链路,形成新的 $T_{\max}$,将 $n_{\max}$ 更新为 $n_{\max} + n_{\max_Ri}$,并将该申请链路及相应的节点置入图 C 中;
- 4) 若 $n_{\max} < N$,转至步骤 5);若 $n_{\max} = N$,转至步骤 7);
- 5) $i = i + 1, M = N - n_{\max}$;
- 6) 将 R 更新为图 G 中除去 $T_{\max}$ 的包含 M 个剩余节点的拓扑子图,转至步骤 2);
- 7) 输出重新包含 N 个节点的有向生成树的通信链路最小变更方案拓扑图 C 。

图3 重新包含有向生成树的策略流程

2.2 多无人机空中聚集的策略设计

针对由同一发射地点先后起飞的一组无人机远距离飞行同时到达同一目标区域的典型任务想定,提出设置子目标点的一致性控制策略,即沿巡航路径设置一系列虚拟子目标点,分别以到达各虚拟子目标点的 ETA 为协调变量,控制各成员分别依次一致性同时到达各虚拟子目标点,以实现空中聚集飞行并同时到达,提高无人机多机系统作战生存力,同时避免各无人机的飞行间距超出相互通信作用范

围。方案如图 4 所示。

图4 设置子目标点实现多机空中聚集的一致性控制策略流程图

3 仿真与分析

3.1 仿真环境与参数设置

仿真环境为 Windows7 操作系统中的 Matlab R2014a 环境,针对通信拓扑变化条件下的多无人机团队同时到达控制策略进行了仿真验证与分析。仿真任务想定为由同一发射地点先后起飞的 6 架无人机远距离飞行并同时到达同一目标区域,考虑某小型无人机的运动特性,仿真设置其初始速度为 50 m/s,速度范围为 40~70 m/s,以第 6 架无人机进入平飞阶段的时刻为仿真起始点,平飞段路径长度设置为 400 km。

3.2 通信拓扑变化条件下同时到达仿真

设 6 架无人机每间隔 1 分钟依次出发,仿真起始时刻各成员的剩余路径长度分别为 [385, 388, 391, 394, 397, 400], 单位: km。设置 6 机系统通信拓扑变化想定如图 5 所示。仿真开始时,6 机包含有向生成树,设置 $t = 40s$ 时, UAV6 脱离团队,由 § 2.1.1 算法判定最大生成子树包含 5 个成员节点,并根据 § 2.1.2 中的策略给出节点 ⑤→⑥ 申请链接的重新包含 6 机的有向生成树的最小变更方案,设定 $t = 70s$ 时, ⑤→⑥ 链路申请方案成功。

在图 5 中 6 机通信拓扑变化条件下,6 机一致性同时到达仿真结果分别如图 6~8 所示。

图 5 通信拓扑变化过程

图 6 各无人机预计到达时间 ETA

图 7 图 6 ETA 局部放大图

图 8 各无人机剩余路径长度

由图 7 中的 UAV6 与其他 5 架无人机的 ETA 曲线相比较可以看出,在 $t = 40 \sim 70$ s 之间,系统有向生成子树不包含 UAV6 节点,该段时间内一致性算法无法作用于 UAV6 节点。在 $t > 70$ s,系统通信链路动态变化,其有向生成树重新包含 UAV6 节点,一致性算法作用于团队各成员,UAV6 的 ETA 逐渐与其他成员达成一致,由图 8 所示,此 6 架无人机组成的团队最终实现了同时到达目标区域。

若申请链路未成功使得 UAV6 在 $t = 40$ s 之后一直未回归团队,则各机 ETA 与上述结果对比如图 9 所示。

图 9 各无人机预计到达时间 ETA

从图 9 可以看出,40 s 之后,一致性算法无法作用于 UAV6 节点,UAV6 按照其在 40 s 时的状态继续飞行,而其他成员的 ETA 能够达到一致。

3.3 多机空中聚集与同时到达仿真

设 6 架无人机每间隔 2 分钟依次出发。6 机系统网络通信拓扑如图 10 所示。

图 10 通信拓扑图

仿真起始时刻各成员的剩余路径长度分别为 $[370, 376, 382, 388, 394, 400]$,单位:km。

未设置虚拟子目标点 6 机以 ETA 为协调变量的一致性同时到达仿真结果如图 11 所示。

图 11 未设置虚拟子目标点的情形下 6 机同时到达剩余路径长度变化

分别在距离目标点位置 250 km 以及 100 km 处设置两个虚拟子目标点,6 机以 ETA 为协调变量的一致性同时到达仿真结果如图 12 所示。

图 12 设置虚拟子目标点的情形下
6 机同时到达剩余路径长度变化

由图 11 可以看出,所有成员在接近最终 ($t = 7\,694\text{ s}$) 同时到达目标点时剩余路径趋于一致。由

图 12 与图 11 对比可以看出,由于采用设置子目标点的一致性控制策略,设置了 2 个虚拟子目标点,其各成员的剩余路径较早时间达成一致,实现了空中聚集,并最终同时到达目标区域。

4 结 论

本文基于一致性算法有向生成树最弱通信连通条件,为适应无人机多机成员通信链路局部时断时续情形,设计了包含有向生成树/子树的判别策略以及通信链路最小变更方案的获取策略,使得多机系统通信拓扑能够满足一致性算法的要求;选取预计到达时间(ETA)为协调变量,实现了多机同时到达目标区域;通过采用设置虚拟子目标点的一致性控制策略,实现了多无人机空中聚集飞行和同时到达;通过仿真验证了上述策略的有效性。

参考文献:

[1] Office of the Secretary of Defense USA. Unmanned Systems Roadmap[R]2007-2032-2007

[2] 吴永红,刘敬贤. 多智能体网络一致性协同控制理论及应用[M]. 北京:科学出版社,2013;3
Wu Yonghong, Liu Jingxian. Theory and Application of Multi-Agent Network Consistency[M]. Beijing, Science Press, 2013;3 (in Chinese)

[3] Olfati S R, Murray R M. Consensus Problems in Networks of Agents with Switching Topology and Time Delays[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2004,49(9): 1520-1533

[4] Jadbabaie A, Lin J, Morse A S. Coordination of Groups of Mobile Autonomous Agents Using Nearest Neighbor Rules[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2003, 48(6): 988-1001

[5] Nelson D R, McLain T W, Christiansen R S, et al. Initial Experiments in Cooperative Control of Unmanned Air Vehicles[C]//Collection of Technical Papers AIAA 3rd “Unmanned-Unlimited” Technical Conference, Workshop, and Exhibit. Chicago, USA, 2004: 666-674

[6] 徐伟,段凤阳,张庆杰,等. 带参改进一致性算法在多无人机集结任务的应用[J]. 计算机测量与控制,2015,23(9): 3133-3137
Xu Wei, Duan Fengyang, Zhang Qingjie, et al. Application of an Improved Consensus Algorithm Using a Parameter in Rendezvousing Mission of Multi-UAV[J]. Computer Measurement & Control,2015,23(9): 3133-3137 (in Chinese)

[7] 符小卫,崔洪杰,高晓光. 多无人机集结问题分布式求解方法[J]. 系统工程与电子技术,2015,37(8):1797-1802
Fu Xiaowei, Cui Hongjie, Gao Xiaoguang. Distributed Solving Method of Multi-UAV Rendezvous Problem[J]. Systems Engineering and Electronics, 2015, 37(8): 1797-1802 (in Chinese)

[8] 林茜,吴晓峰. 时滞多智能体系统关于参考状态的信息一致性[J]. 系统工程学报,2010,25(6): 841-846
Lin Qian, Wu Xiaofeng. Consensus in Multi-Agents System with Delay Communication and Reference State[J]. Journal of Systems Engineering, 2010,25(6): 841-846 (in Chinese)

[9] Zhu Yakun, Chen Cailian, Guan Xinping, Luo Xiaoyuan. Finite-Time Consensus of Leader-Follower Multi-Agent Systems with Fixed and Switching Topologies[C]//Proceeding of the 11th World Congress on Intelligent Control and Automation. Shenyang, China, 2014

[10] Ren W, Beard R W. Consensus of Information under Dynamically Changing Interaction Topologies[C]//Proceeding of the American Control Conference. Boston, USA, 2004: 4939-4943

- [11] Su H, Chen G, Wang X, et al. Adaptive Second-Order Consensus of Networked Mobile Agents with Nonlinear Dynamics[J]. *Automatica*, 2011, 47(2): 368-375
- [12] Wen Guanghui, Valery Ugrinovskii. Distributed Consensus of Linear Multi-Agent Systems with Switching Directed Topologies[C] //2014 Australian Control Conference Canberra, 2014: 17-18
- [13] Xiao Feng, Wang Long, Chen Tongwen. Finite-Time Consensus of Multi-Agent Systems with Directed and Intermittent Links[C] //Proceedings of the 30th Chinese Control Conference, 2011: 22-24
- [14] Ren W, Beard R W. Consensus Seeking in Multi-Agent Systems under Dynamically Changing Interaction Topologies[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2005, 50(5): 655-661
- [15] 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 Liping, Chen Zongji, Zhou Rui, et al. Decentralized Control for Simultaneous Arrival of Multiple UAVs[J]. *Acta Aeronauticae Astronautica Sinica*, 2010, 31(4): 797-805 (in Chinese)
- [16] 尤建龙. 多无人机集结协同控制技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2015
You Jianlong. Cooperative Control Technique for Multi-UAV Aggregation[D]. Xi'an, Northwestern Polytechnical University, 2015 (in Chinese)

Control Strategies for Multi-UAV Simultaneous Arrival under Communication Topology Changing

Tan Yanying¹, Xue Liang², Zhang Yanning³, Zhu Xiaoping⁴

(1. Institute of Precision Guidance and Control, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China;
2. The Chinese People's Liberation Army 31670 Forces, Yinchuan 750027, China;
3. School of Computer, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710129, China;
4. UAV Research Institute, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710065, China)

Abstract: Aimed at changing in communication topology due to partial link/node failure in the battlefield, and for satisfying the weakest connectivity criteria of consensus algorithm, the strategy of judging in real time whether the communication topology among UAVs has a directed spanning tree or sub-tree and the strategy of acquiring the expected minimum partial link change suggestion for the topology containing a directed spanning tree again are designed. Based on the above strategies and selecting ETA (Estimated Time of Arrival) as coordinated variable, the consensus algorithm ensures that after some time all the members or part members of the UAVs arrive simultaneously. The strategy is put forward which the UAVS are controlled arriving simultaneously on the planed virtual sub-goal waypoints one by one along the flight path. Through the strategy, the UAVs fly together soon and arrive simultaneously at last. It is helpful to improve the survival rate of UAVs and preserve the communication connectivity of UAVs which is usually distance-dependent. The simulation results show that the above strategies are effective.

Keywords: multi-UAVs; simultaneous arrival; consensus algorithm; communication topology; Strategy