

基于交哺网络控制的多无人机协同编队方法研究

段海滨^{①*}, 罗琪楠^①, 余亚翔^{①②}

① 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院飞行器控制一体化技术重点实验室, 北京 100191;

② 苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室, 苏州 215006

* E-mail: hbduan@buaa.edu.cn

收稿日期: 2013-01-14; 接受日期: 2013-03-13

国家自然科学基金(批准号: 61273054, 60975072)、航空科学基金(批准号: 20115151019)、教育部新世纪优秀人才计划(批准号: NCET-10-021)和苏州大学江苏省计算机信息处理技术重点实验室开放课题项目基金(批准号: KJS1020)资助项目

摘要 多无人机协同编队飞行可弥补单架无人机在执行侦查、作战、防卫等任务时所不能克服的困难, 并提高无人机执行任务的效率, 特别是在多无人机集群协同对抗中显得尤为重要. 本文建立了基于交哺网络控制的多无人机协同编队模型, 设计了基于微粒群优化的协同编队控制器, 给出了多无人机协同编队的交哺网络控制方法, 最后通过仿真实验验证了本文所提方法的可行性和有效性.

关键词
无人机
交哺
网络控制
协同编队
微粒群优化

1 引言

多无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)协同编队飞行的目标是要求在飞行过程中, 外界环境或任务需求发生改变时, 编队中的每一架跟随飞机均能自主进行动态调整, 以保持整个队形结构的稳定性, 这样就需要一种性能优良, 且具有良好鲁棒性能的飞行控制律来应对各种不确定因素^[1, 2]. 针对无人机编队协同问题, Bennet 等人^[3]将势场方法应用于大群体的编队控制, 取得了很好的效果. Karimodini 等人^[4]则针对二维的领航者编队提出了一种混合控制器, 解决了跟随者的路径规划问题, 并成功应用于工程实践.

在控制系统中, 检测和控制等各种信号均可通过公用数据网络进行传输, 而估计、控制和诊断等职能也可以在不同的网络节点中分布执行. 通过网络形成闭环的反馈控制系统称为网络控制系统(Networked Control System, NCS)^[5, 6]. NCS 与传统的

点对点结构的系统相比, 具有可以实现资源共享、实现远程操作与控制、具有较高的诊断能力、安装与维护简便、能有效减少系统的重量和体积、增加了系统的灵活性和可靠性等诸多优点. 许多研究者已对网络控制系统进行了大量的研究. Wang 等人^[7]设计了多种控制器应用于具有时延的卫星网络的编队协同. Qiu 等人^[8]对具有随机通信时延的网络系统的 H_2/H_∞ 控制进行了研究.

多无人机稳定安全的编队飞行很大程度上取决于机群之间的信息交换和处理. 通过导航系统和各种形式的传感器设备, 机群中的各个单元体就能够建立起跟随目标的位置信息及其飞行的环境信息, 而这种信息的传递交换主要是借助于机群间的无线网络进行. 但在实际的通信网络控制系统的架构中, 由于网络本身所固有的特性, 往往会影响到编队控制系统的稳定性, 存在丢包和信息延迟的现象^[6, 9].

交哺现象普遍存在于社会昆虫(如蜜蜂、黄蜂、

蚂蚁、白蚁)、鸟类和一些哺乳动物(如吸血蝙蝠)中. 交哺是群体成员之间通过直接的接触而交换食物, 是一种“营养交换”方式. 通过模仿昆虫的交哺行为, 可以达到使无人机间信息更好的交流与共享的目的^[10]. 例如, 当外出采蜜的蜜蜂进入巢穴后, 该蜜蜂除自身消耗掉一部分蜂蜜, 如果遇到其他饥饿的蜜蜂, 就会分享部分蜂蜜给他们, 拥有的蜂蜜的蜜蜂越多, 得到分享的蜂蜜也就越多^[11]. Kubo 和 Melhuish^[12]受这种社会生物交哺行为的启发, 提出在自主机器人行动的能量交换过程中加入交哺策略, 以提高多机器人自主完成任务的效率. Schmickl 和 Crailsheim^[13]将交哺策略应用于机器人集群运动中作为分布式的通信策略来取代中央通信单元, 从而使集群智能体涌现出自组织行为, 并通过实验证明了多机器人可通过分布式交哺通信策略达到任务一致性的实现. 针对无人机编队飞行中存在的传输时延问题, 将交哺机制应用于网络中的信息交换, 可以增强无人机编队飞行的稳定性.

本文在建立基于交哺网络控制多无人机协同编队模型的基础上, 设计了基于微粒群优化的协同编

队控制器, 并提出了一种用于多无人机协同编队的交哺网络控制方法, 最后通过仿真实验验证了所提方法的可行性和有效性.

2 基于交哺网络控制的编队模型

本论文设计的基于交哺网络控制多无人机协同编队系统如图 1 所示.

图 1 所示系统描述了操作者发送任务更新命令, 同时监督多无人机编队状态的变化; 无人机通过交哺网络采集和处理实时状态信息, 根据任务指令和自身状态得到自己的控制指令, 同时将各自的局部信息传送到交哺网络及操作者的虚拟环境中, 更新多无人机编队的状态, 从而实现编队协同控制. 在这一过程中, 系统的信息处理过程非常复杂, 存在很多危险与不确定因素, 信息传输的时滞在网络化环境中是普遍存在的, 尤其在网络中时滞的长度可能非常大, 以至于在分析系统性能时无法忽略其影响, 结合多无人机编队协同控制研究协同网络控制系统存在的时滞补偿问题, 提高多无人机的网络控制系统

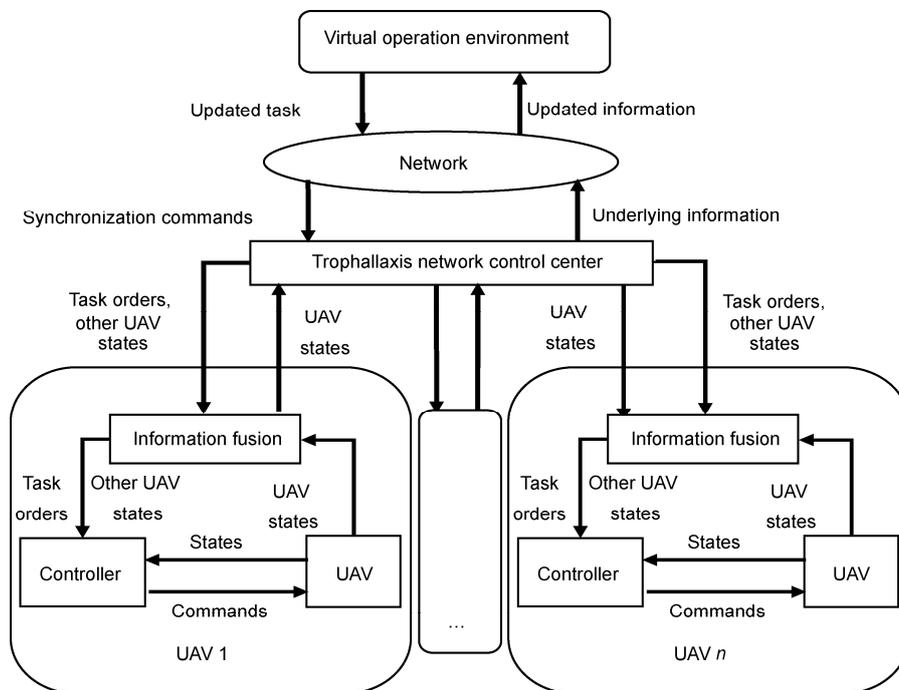


图 1 基于交哺网络控制的多无人机协同编队系统

的可靠性.

本文模型采用了虚拟领航者(Virtual Leader, VL)负责跟踪编队的飞行预定轨迹, 其余无人机分别有各自的 Leader, 因此各架无人机根据自己 Leader 的状态调整自身速度和航向角, 从而完成编队任务(如图 2 所示). 距离 Virtual Leader 越近的无人机其优先级越高, 并作为下一级的 Leader, 当某一无人机实际的 Leader 有一定被毁坏的概率而无法完成领航的任务时, 该无人机则提高其优先级并取代原 Leader 的位置, 因此使得该无人机编队飞行具有一定的稳定性和鲁棒性.

在多无人机编队飞行中, 将无人机考虑为某飞行高度下的质点模型^[14], 因此可将三维编队控制问题转化为二维平面内的编队控制问题. 无人机模型采用一种常用的非线性运动学模型^[15]:

$$\begin{cases} \dot{x} = v \cos \psi, \\ \dot{y} = v \sin \psi, \\ \dot{v} = u, \\ \dot{\psi} = \omega, \end{cases} \quad (1)$$

其中 (x, y) 表示无人机位置的大地坐标; v 和 ψ 分别为无人机速度和航向角, 并假设机头方向与速度方向一致; 线加速度 u 和角速度 ω 为控制输入量.

在领航跟随(Leader-Follower)编队模型中, 指定队形中的某一架无人机作为 Leader, 其他无人机作为 Followers. 其基本思想是: 将队形控制问题转化为 Followers 跟踪 Leader 的位置和方向的问题. Leader 负责跟踪编队的飞行预定轨迹, Followers 仅保持与 Leader 的相对距离, 图 2 描述了多无人机领航跟随编队模型相对坐标系:

$$\begin{cases} x_r = (X_L - X_W) \cos(\Psi_W) + (Y_L - Y_W) \sin(\Psi_W), \\ y_r = (Y_L - Y_W) \cos(\Psi_W) + (X_L - X_W) \sin(\Psi_W). \end{cases} \quad (2)$$

图 2 中, XOY 为大地坐标系, 下标 L 代表 Leader, W 代表 Follower. (X_L, Y_L) 和 (X_W, Y_W) 分别为 Leader 和 Follower 的质心在大地坐标系中的位置, V_L 和 V_W 为速度, Ψ_L 和 Ψ_W 分别为他们的航向角. $X_r O_r Y_r$ 表示固连在 Follower 质心上的无人机编队模型相对坐标系, X_r 轴与 V_W 同向, Y_r 轴参照右手定则垂直于 X_r 轴. x_r 与 y_r 为 Leader 在相对坐标系 $X_r O_r Y_r$ 上的位置, 由坐标平移变换可得相对位置表达式(2).

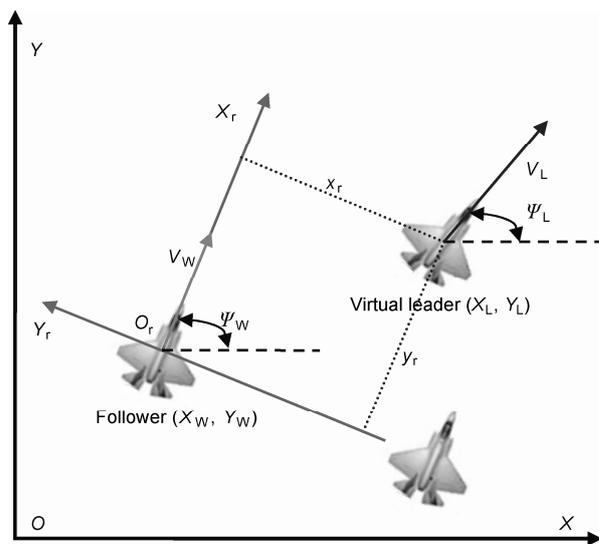


图 2 多无人机领航跟随编队模型相对坐标系

3 基于交哺思想的多无人机编队协同网络控制

3.1 基于微粒群优化的协同编队控制器

比例-积分-微分(Proportion-Integration-Differentiation, PID)控制是最早发展起来的控制策略之一, 其中比例环节用于改善控制系统的快速性, 积分环节用于调节控制输出的稳态误差, 而微分环节则利用超前校正改善系统的平稳性. 由于 PID 算法简单、鲁棒性强、可靠性高, 几十年来始终占据工业控制器的主流, 实际应用率达 80% 以上^[16, 17].

在双机编队控制系统中, 编队模型为(1)式所描述的线性化模型. 编队控制器位于 Follower 上, 控制系统的输入量为编队中 Follower 相对于 Leader 的距离, 并且在编队飞行过程中保持不变. 本文设计的无人机协同编队控制系统是按偏差调节的闭环控制, 执行机构采用经典的 PD 控制器, 以保证系统响应的快速性与稳定性. 双机编队控制器系统框架结构如图 3 所示.

图 3 中, x_c 和 y_c 为输入的期望双机相对距离, x 和 y 为实际的双机相对距离, u 和 w 为由比例-微分(Proportion-Differentiation, PD)控制器输出 Follower 的控制输入.

在设计双机编队飞行控制器时, 编队控制律按照 u 和 w 两个通道分别进行设计.

3.2 交哺网络时延分析

在交哺网络环境下, 多用户共享通讯线路且流量变化不规则, 所以当 NCS 的传感器、控制器和动作器通过网络交换数据时必然会导致网络时延. 交哺网络时延的存在使得系统分析变得非常复杂, 虽然时延系统的分析和建模近年来取得了很大进展, 但 NCS 中可能存在多种不同性质的时延使得现有方法一般不能直接使用^[19]. 随着网络的发展, 不同的交哺网络媒质具有不同的传输特性, 其时延情况也不尽相同; 相对于控制系统采样周期比较而言, 网络传输时延可能长于或短于一个采样周期, 可能是常时滞, 也可能是随机变化的, 正确地描述这些网络行为是 NCS 建模的重要任务.

交哺网络时延包括传感器-控制器时延 τ_{sc} 和控制器-执行器时延 τ_{ca} , 将网络时延根据采样周期 T 划分为短时延和长时延.

- 1) 短时延: 网络时延在区间 $[0, \alpha]$ 内分布, 且 $\alpha \leq T$.
- 2) 长时延: 网络时延在区间 $[0, \alpha]$ 内分布, 且 $\alpha > T$.

一般对于短时延系统, 时滞反馈信息仍能够镇定系统. 但是对于长时延系统, 如果不对反馈信息作任何补偿, 仅采用时滞信息的反馈控制可能难以镇定系统, 而且系统动态性能差^[20].

在 NCS 中, 传感器一般为时钟驱动, 且传感器的时钟即为系统的时钟, 控制器和执行器既可以为时钟驱动, 又可以为事件驱动.

时间驱动方式: 如果控制器(或执行器)采用时间驱动方式, 即仅在采样时刻更新系统的控制量, 那么在 $[t_k, t_{k+1})$ 时段内, 没有新的状态量(或控制量)数据包到达控制器(或执行器)节点, 则在 $[t_{k+1}, t_{k+2})$ 时段内继续采用上一周期的状态量(或控制量). 如果接收到 1, 2, ..., 或 m 个数据包, 仅以最新接收到的数据包有

效, 先前的数据包信息将被覆盖, 如图 4 所示.

事件驱动方式: 如果控制器(或执行器)为事件驱动方式, 即一旦接收到状态量(或控制量)数据包, 立即更新系统的状态量(或控制量), 那么在一个采样周期 T 内, 控制系统可能有多个不同的状态数据(或控制输入). 如果在 $[t_k, t_{k+1})$ 时段内, 控制器(或执行器)节点没有收到传感器采样状态(或控制输入)数据包, 则继续采用上一周期的状态量(或控制量), 直到在 $[t_{k+1}, t_{k+2})$ 时段内收到新的状态量(或控制量)数据包^[21].

在多无人机编队协同的 NCS 中, 交哺网络时延包含各无人机向网络控制中心发送状态信息的时延 τ_{uw} , 交哺网络控制中心向无人机发送任务指令和状态信息的时延 τ_{wu} . 网络控制中心作为 NCS 的控制器节点, 采用时间驱动方式. 无人机作为 NCS 的传感器节点, 由于时间驱动要求各节点之间必须严格同步, 交哺网络中不确定时延的存在, 很难保持精确的时间同步, 而事件驱动提高了反馈信息的利用率, 所以传感器节点采用事件驱动方式.

在 NCS 的控制器节点和执行器节点设置系统缓冲区, 使传感器的采样信息和控制器发出的控制信息都携带上时间戳, 以便在缓冲区内处理数据包时序错乱问题, 按时间戳进行自动更新排序, 可以较好地解决交哺网络传输时延和时序错乱的问题.

3.3 无人机交哺网络设计

在多无人机协同编队模型中, 也需要一种分布式的通信策略使编队保持任务一致性, 而交哺策略的特点可将无人机的通信行为当作生物体的交哺行为, 因此可应用交哺策略来解决这个问题, 并增加协同编队的稳定性和鲁棒性.

在多无人机协同编队系统中, 使包括虚拟 Leader 在内的所有无人机都作为具有交哺能力的智能个体, 由虚拟 Leader 发布任务更新指令. 假设编队中的无

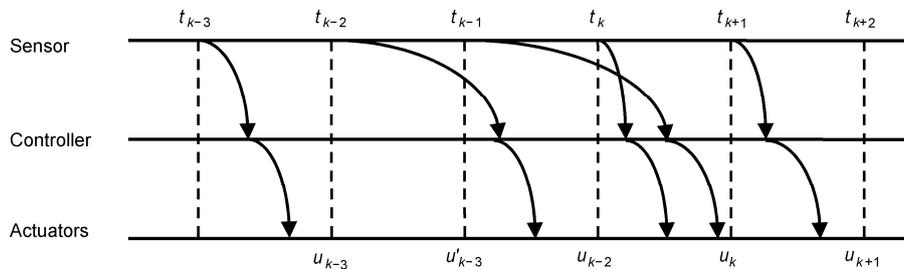


图 4 网络控制系统的时序图

人机正在执行某项任务时, 虚拟 Leader 发出了任务更新指令, 则在通信范围内的无人机将通过交哺行为在其采样周期内完成任务状态的更新, 同时, 由于网络延时的存在, 无人机在更新任务及状态时还应考虑网络延时的影响^[22].

将已接收到当前最新任务指令的无人机称为送哺无人机, 将接收最新任务指令的无人机称为受哺无人机, 并规定只有在通信范围内的无人机才具有交哺能力, 且每架无人机同一时间只能跟另一架无人机进行交哺. 设 $D_i=1, D_i=-1, D_i=0$ 分别表示无人机成为送哺无人机、受哺无人机和不进行交哺.

$$D_i = \begin{cases} 1, & \eta_{ij} > 0 \text{ 和 } rand \leq 0.3, \\ -1, & \eta_{ji} > 0 \text{ 或 } rand > 0.3, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (8)$$

其中 η_{ij} 为无人机 i 对无人机 j 意愿, 其值越大则无人机 i 成为无人机 j 的交哺愿望越强烈, 同时也意味着无人机 j 与无人机 i 的受哺愿望越强烈.

$$\eta_{ij} = \frac{1}{d_{ij}}(\eta_{sij} + \eta_{tij}), \quad (9)$$

其中 η_{sij} 为更新状态意愿, 如果无人机 i 的状态更新时间比无人机 j 的新, 则其值越大; η_{tij} 为更新状态意愿, 如果无人机 i 的任务更新时间比无人机 j 的新, 则其值越大.

$$\begin{cases} \eta_{sij} = \sum_{(k=1)}^N [0.5(T_{si} - T_{sk})\lambda_1 + 0.1(\Delta t)\lambda_2], \\ \eta_{tij} = \sum_{(k=1)}^N [0.8(T_{ti} - T_{tk})\lambda_3 + 0.3(\Delta t)\lambda_4], \end{cases} \quad (10)$$

$$\lambda_1 = \begin{cases} 1, & T_{si} > T_{sk}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (11)$$

$$\lambda_2 = \begin{cases} 1, & T_{si} = T_{sk}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (12)$$

$$\lambda_3 = \begin{cases} 1, & T_{ti} > T_{tk}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (13)$$

$$\lambda_4 = \begin{cases} 1, & T_{ti} = T_{tk}, \\ 0, & \text{其他,} \end{cases} \quad (14)$$

其中 T_{si} 和 T_{ti} 分别为无人机 i 更新状态和任务的时间;

N 为编队中无人机的数量; Δt 表示系统更新周期.

受哺无人机在接收交哺信息时应遵守如下规则:

- 1) 所有交哺的任务信息和状态信息都必须带有发送时间戳和到达时间戳;
- 2) 到达时间为发送时间加上延迟时间;
- 3) 新数据到达而无人机未到采样时间时, 数据按其更新时间先后顺序储存在各自的临时数据池中;
- 4) 当且仅当临时数据池中的数据更新时间比该无人机的数据新时才进行更新.

采用上述基于交哺网络控制的多无人机协同编队实现流程如图 5 所示.

4 仿真实验

考虑 5 架无人机进行编队协同, 其目的是实现 5 架无人机从初始松散状态形成“V”字队形. 采用微粒群优化算法整定 PD 编队控制器参数, 其初始参数设置如表 1 所示.

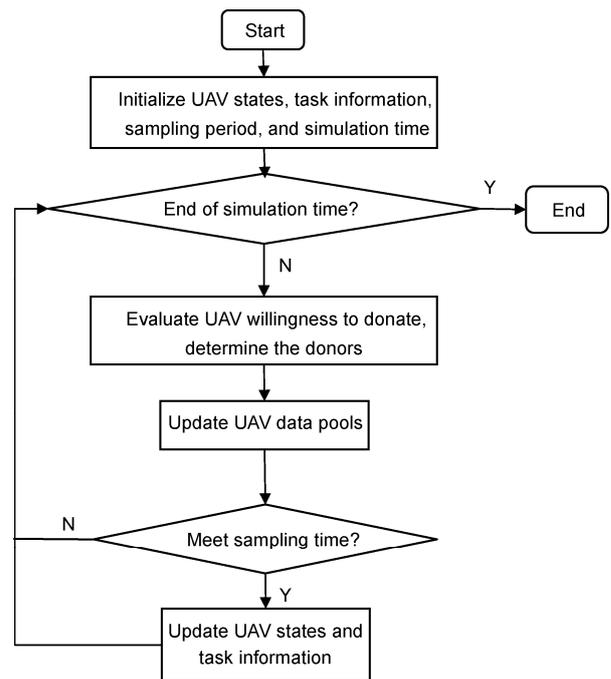


图 5 基于交哺网络控制的多无人机协同编队流程

表 1 初始参数设置

| | Position (km) | Heading angle (°) | Speed (km/s) |
|----------|---------------|-------------------|--------------|
| Leader | (2, 0) | 0 | 0.2 |
| Follower | (0, -10) | 0 | 0.2 |

设置双机期望相对距离为 $x_c=2\text{ km}$, $y_c=2\text{ km}$, 在第2秒时, Leader 的偏航角变为 10° , 其速度保持不变. 通过微粒群优化算法得到的控制器参数如表 2 所示, 图 6 为微粒群优化算法的进化曲线, 图 7 为编队控制响应曲线.

表 2 控制器参数

| K_1 | K_2 | K_3 | K_4 | K_6 | K_7 |
|-------|--------|--------|--------|--------|-------|
| 10 | 2.6693 | 2.1241 | 0.6858 | 0.5470 | 10 |

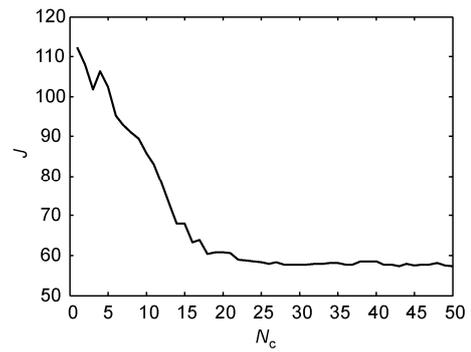


图 6 PSO 算法进化曲线

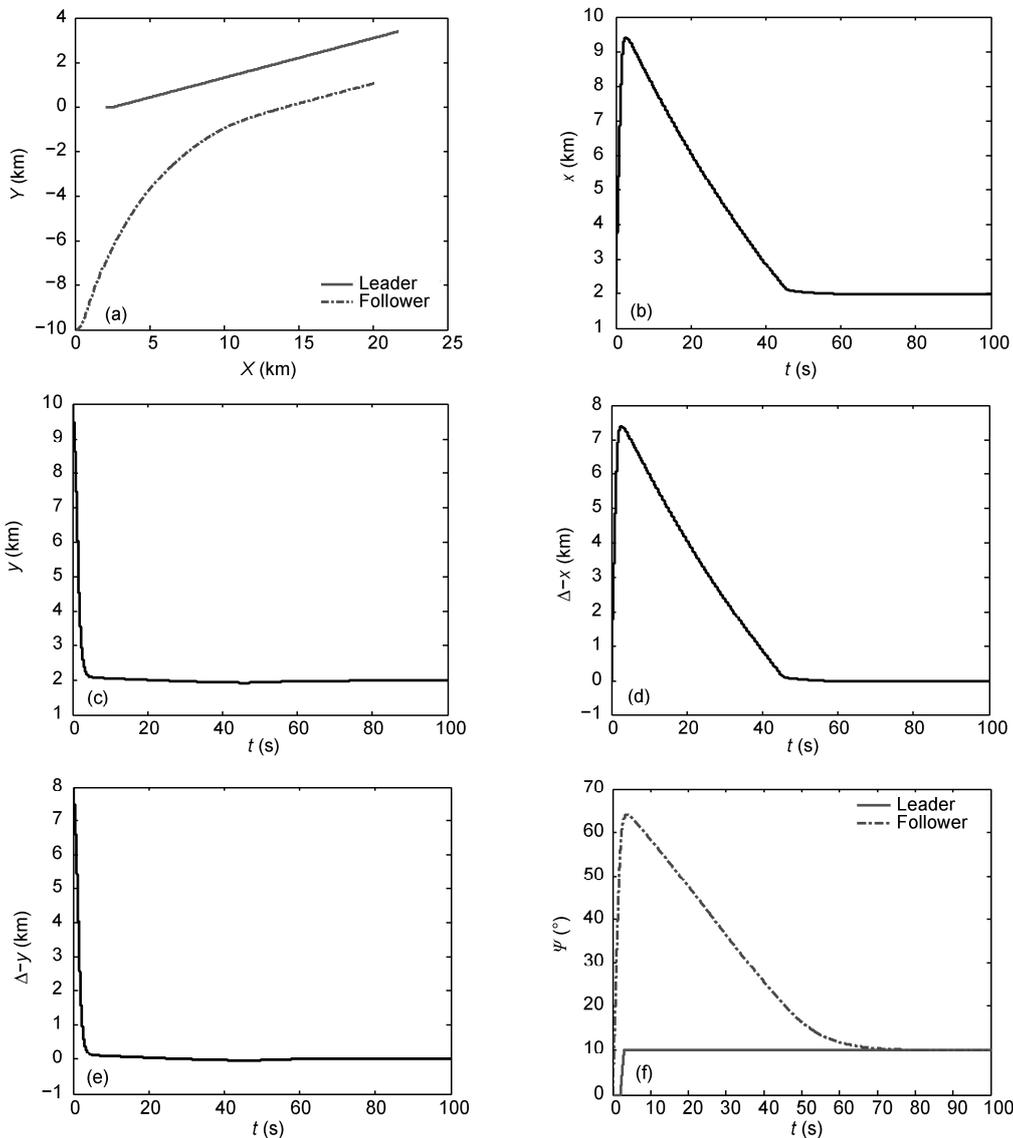


图 7 基于 PD 控制的编队协同响应曲线

(a) 双机编队飞行轨迹; (b) X 轴向相对距离变化 x ; (c) Y 轴向相对距离变化 y ; (d) X 轴向偏差 Δx ; (e) Y 轴向偏差 Δy ; (f) 航向角 ψ 响应

由图 6 可知, 在对编队控制器参数整定的过程中, 当迭代进行到 30 代时, 微粒群优化算法开始收敛. 图 7(a)~(e)分别给出了无人机飞行轨迹、X 方向相对距离、Y 方向相对距离、X 方向相对偏差、Y 方向相对偏差的响应过程. 由响应曲线可看出, 微粒群优化算法整定得到的控制器参数可使 Follower 较好的跟踪 Leader 的运动, 且跟踪速度较快, 效果良好, 较好地完成了控制器的预期控制效果, 而在图 7(b), (d), (f)中, 曲线之所以收敛相对较慢的原因是由于对无人机速度、加速度和角速度的限制引起的.

在 5 架无人机的编队协同仿真实验中设置 1 个虚拟 Leader, 5 架无人机, 系统采样周期 $\Delta t = 0.1s$. 5 架无人机的初始状态设置如表 3 所示.

在实验中, 虚拟 Leader 在第 5 s 时发出任务更新指令, 改变 0.5 rad 的航向角, 并要求其余无人机保持“V”型编队飞行, 编队要求如表 4 所示.

设置虚拟 Leader 速度为 0.2 km/s, 仿真时间为 200 s, 具体仿真实验结果如图 8 所示.

由图 8 可见, 5 架无人机编队在飞行中可有效跟随虚拟 Leader 形成“V”字队形, 且无人机编队从左向右飞行. 其中, 图 8(a)中的编队结果表明 5 架无人机

成功完成了航路跟随与编队队形保持任务, 图 8(b)~(e)分别给出了多无人机 X 方向相对距离、Y 方向相对距离、速度和航向角响应过程, 5 架无人机均可在规定的时间内进入预定的编队保持状态, 有效地完成了编队协同任务.

5 结论

本文在建立基于交哺网络控制多无人机协同编队模型的基础上, 设计了基于微粒群优化的协同编队控制器, 提出了基于交哺网络控制的多无人机协同编队方法, 并分析了多无人机协同编队中网络时延的影响. 最后通过 5 架无人机编队协同仿真实验, 验证了本文所提方法可在规定的时间内将编队控制为期望的“V”字形队形, 且控制过程较为平稳.

我们下一步工作是将交哺网络控制方法应用于实际的多无人机协同编队, 并进行外场试飞验证. 在实际应用中, 由于难以对交哺网络中的时延情况进行精确估计, 必须对交哺机制进行必要的调整. 交哺网络控制在地面移动机器人编队协同、卫星编队协同和无人潜航器编队协同等领域也有着十分广阔的应用前景.

表 3 初始参数设置

| | Position (km) | Speed (km/s) | Heading angle (°) | Sample time (s) | Network transmission time (s) |
|----------------|---------------|--------------|-------------------|-----------------|-------------------------------|
| Virtual leader | (2, 100) | 0.2 | -0.5 | 0.1 | 0 |
| UAV 1 | (0, 95) | 0.2 | 0.5 | 0.1 | 0.05 |
| UAV 2 | (0, 115) | 0.2 | -0.5 | 0.2 | 0.10 |
| UAV 3 | (0, 80) | 0.2 | -0.5 | 0.1 | 0.12 |
| UAV 4 | (0, 125) | 0.2 | -0.1 | 0.2 | 0.05 |
| UAV 5 | (0, 70) | 0.2 | 0.1 | 0.1 | 0.10 |

表 4 编队任务要求

| | Leader | Relative distance in the X direction (km) | Relative distance in the Y direction (km) |
|-------|----------------|---|---|
| UAV 1 | Virtual leader | 2 | 0 |
| UAV 2 | UAV 1 | 2 | -2 |
| UAV 3 | UAV 1 | 2 | 2 |
| UAV 4 | UAV 2 | 2 | -2 |
| UAV 5 | UAV 3 | 2 | 2 |

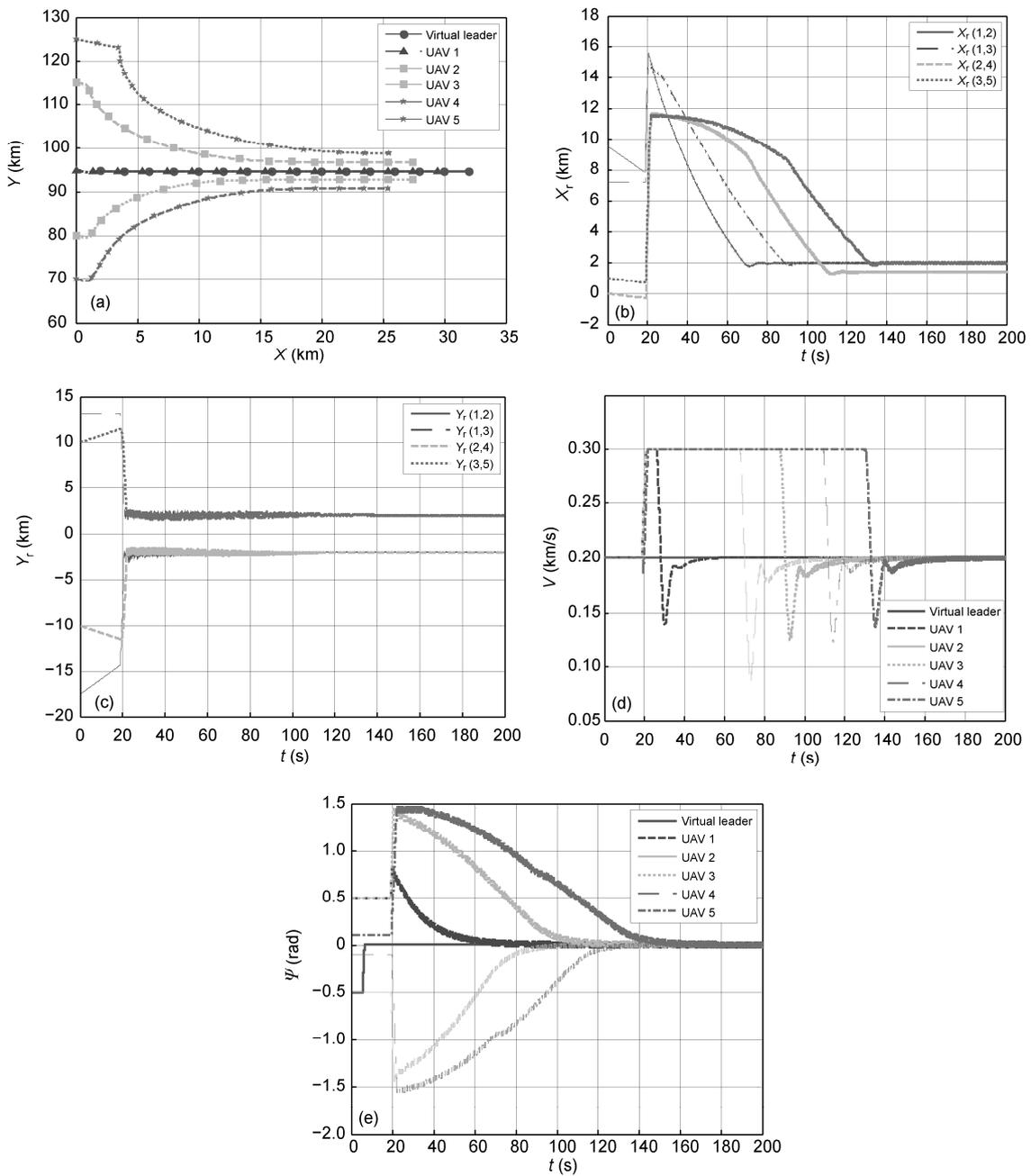


图8 编队协同飞行仿真实验结果

(a) 5架无人机形成“V”编队的运动轨迹; (b) X方向相对距离 X_r ; (c) Y方向相对距离 Y_r ; (d) 5架无人机的速度(V)响应曲线; (e) 5架无人机的航向角(ψ)响应曲线

参考文献

- 1 Duan H B, Li P. Progress in control approaches for hypersonic vehicle. Sci China Tech Sci, 2012, 55: 2965–2970
- 2 Duan H B, Shao S, Su B W, et al. New development thoughts on the bio-inspired intelligence based control for unmanned combat aerial vehicle. Sci China Tech Sci, 2010, 53: 2025–2031

- 3 Bennet D J, McInnes C, Suzuki M, et al. Autonomous three-dimensional formation flight for a swarm of unmanned aerial vehicles. *J Guid Control Dynam*, 2011, 34: 1899–1908
- 4 Karimoddini A, Lin H, Chen B M, et al. Hybrid formation control of the unmanned aerial vehicles. *Mechatronics*, 2011, 21: 886–898
- 5 Alur R, D'Innocenzo A, Johansson K H, et al. Compositional modeling and analysis of multi-hop control networks. *IEEE T Automat Contr*, 2011, 56: 2345–2357
- 6 Lian F L, Moyne J R, Tilbury D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, control net, and device net. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21: 66–83
- 7 Wang N, Zhang T W, Xu J Q. Formation control for networked spacecraft in deep space: With or without communication delays and with switching topology. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 469–481
- 8 Qiu L, Xu B G, Li S B. H_2/H_∞ control of networked control system with random time delays. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 2615–2630
- 9 Duan H B, Liu S Q. Nonlinear dual-mode receding horizon control for multiple UAVs formation flight based on chaotic particle swarm optimization. *IET Contr Theor Appl*, 2010, 4: 2565–2578
- 10 Schioler H, Ngo T D. Trophallaxis in robotic swarms-beyond energy autonomy. In: *Proceedings of 10th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*. Hanoi: IEEE, 2008. 1526–1533
- 11 Hereford J M. Analysis of a new swarm search algorithm based on trophallaxis. In: *Proceedings of the 2010 IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC)*. Barcelona: IEEE, 2010. 1–8
- 12 Kubo M, Melhuish C. Robot trophallaxis: Managing energy autonomy in multiple robots. In: *Proceedings of Towards Autonomous Robotic Systems (TAROS 04)*. Colchester: University of Essex, 2004. 77–84
- 13 Schmickl T, Crailsheim K. Trophallaxis among swarm-robots: A biologically inspired strategy for swarm robotics. In: *Proceedings of the 1st IEEE/RAS-EMBS International Conference on Biomedical Robotics and Biomechanics*. Pisa: IEEE, 2006. 377–382
- 14 Lazarus S B, Tsourdos A, White B A, et al. Terrain based cooperative UAV mapping of complex obstacles using 2-D splinegon. *Int J Intell Comput Cyberns*, 2012, 5: 248–292
- 15 Zhang X Y, Duan H B, Yu Y X. Receding horizon control for multi-UAVs close formation control based on differential evolution. *Sci China Inf Sci*, 2010, 53: 223–235
- 16 Fan Y, Meng X Y, Yang X L, et al. Control allocation for a V/STOL aircraft based on robust fuzzy control. *Sci China Inf Sci*, 2011, 54: 1321–1326
- 17 Duan H B, Ma G J, Luo D L. Optimal formation reconfiguration control of multiple UCAVs using improved particle swarm optimization. *J Bionic Eng*, 2008, 5: 213–225
- 18 Zhao J, Han C Z, Wei B. Binary particle swarm optimization with multiple evolutionary strategies. *Sci China Inf Sci*, 2012, 55: 2485–2494
- 19 Duan H B, Sun C H. Pendulum-like oscillation controller for micro aerial vehicle with ducted fan based on LQR and PSO. *Sci China Tech Sci*, 2013, 56: 423–429
- 20 Bushnell L G. Networks and control. *IEEE Control Syst Mag*, 2001, 21: 22–23
- 21 Raji R S. Smart networks for control. *IEEE Spectrum*, 1994, 31: 49–55
- 22 Lo B F, Akyildiz I F, Al-Dhelaan A M. Efficient recovery control channel design in cognitive radio ad hoc networks. *IEEE T Veh Technol*, 2010, 59: 4513–4526