

DOI: 10.13973/j.cnki.robot.2017.0160

无人机编队飞行快速试验系统设计

王 勋^{1,2}, 张纪阳¹, 张代兵¹, 沈林成¹

(1. 国防科学技术大学机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 710024)

摘要: 为缩小针对无人机编队控制问题的理论研究与实际应用之间的脱节, 设计了一套无人机编队飞行快速试验系统, 包括基于 X-Plane 的硬件在回路 (HIL) 仿真系统和飞行试验系统. HIL 仿真系统和飞行试验系统中使用相同的自动驾驶仪和地面控制站, 通过 HIL 仿真可以提前发现并修正在仿真中暴露的问题, 从而减少飞行试验所需的时间和成本, 缩短方法从理论到应用的时间. 试验系统中解决了无人机之间及无人机与地面站之间的通信问题, 使得无人机之间可以直接通信, 不用通过地面站转发, 且单个地面站可以监视和管理多架无人机. 采用网络化的软、硬件设计, 使得试验系统能够用于验证各种通信拓扑的编队控制算法. 为验证上述系统的有效性, 设计长机-僚机编队控制方法对试验系统进行验证. 结果表明, 通过 HIL 仿真验证的自动驾驶仪可以直接移植到飞行试验系统中, 只需微调一些控制参数即可快速实现无人机编队飞行.

关键词: 无人机; 编队飞行; 硬件在回路仿真; X-Plane; 飞行试验

中图分类号: V19

文献标识码: A

文章编号: 1002-0446(2017)-02-0160-07

Development of an Experiment System for UAV Formation Flight

WANG Xun^{1,2}, ZHANG Jiyang¹, ZHANG Daibing¹, SHEN Lincheng¹

(1. College of Mechatronic Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China;

2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: To narrow the gap between the theory and practice in UAV (unmanned aerial vehicle) formation control, a formation flight experiment system is developed, which includes an X-Plane based hardware-in-the-loop (HIL) simulation subsystem and a flight experiment subsystem. In the two subsystems, the same autopilot and ground control station are used. By the HIL simulation, defects and bugs emerging in the simulation can be found and modified before field experiment. Therefore, the time and cost required by flight experiments are reduced, and the time from theory to application can be shortened. Besides, communications between the vehicles and between the vehicle and the ground station are well tackled. The vehicles can share information via inter-vehicle communication without intervention of ground stations. Moreover, multiple UAVs can be monitored and managed by one ground control station. By network-based software and hardware designs, the experiment subsystem can be used to validate formation control algorithms based on various communication topologies. A leader-follower formation approach is designed to demonstrate the effectiveness of the entire experiment system. The results show that the autopilot validated by the HIL simulation can be applied to the flight experiment subsystem directly. The only work required by the actual formation flight is to perform a little fine adjustment on some control parameters.

Keywords: unmanned aerial vehicle; formation flight; hardware-in-the-loop simulation; X-Plane; flight experiment

1 引言 (Introduction)

无人机正在逐步代替人类执行一些繁琐、脏乱和危险的任务^[1-2]. 受到自然界的鸟类编队飞行的启发, 人们越来越认识到多无人机的合作能够以更小的代价完成更为复杂的任务. 美国空军科学顾问委员会早在 2005 年就指出: “无人机通常应当以成群的方式工作而不是单独行动”. 和单架无人机相比, 编队飞行可以减少飞机的燃油消耗; 在

灵活性、容错性和协作性上具有明显优势. 因此, 多无人机编队在环境监测^[3]、森林防火^[4]、区域侦察^[5-6]、目标跟踪^[7-8]、协同作战等民用和军事领域受到了广泛关注. 随着嵌入式计算和通信能力的提高, 以及分布式或者非集中式思想的发展, 现实的多无人机编队执行任务成为可能. 多无人机的编队控制也成为近年来的研究热点, 是未来无人机执行任务的主要模式.

关于无人机编队飞行的研究已经提出很多种控

制方法. 这些方法主要分为 4 大类: 长机—僚机方法、虚拟结构法、人工势场法和基于行为的方法. 文 [9] 详细介绍了这 4 类方法的思想 and 优缺点. 相对于无人直升机和多旋翼无人机, 固定翼无人机编队控制更加复杂. 因为固定翼无人机有最小速度的限制. 而旋翼无人机能够悬停, 大大减小了多架无人机协同编队控制的难度. 而且小型旋翼无人机编队实验很容易在室内开展, 因此, 目前无人机编队相关的试验研究多为旋翼无人机^[10]. 也有许多固定翼无人机编队的理论研究^[11-14], 和一些更加逼真的仿真研究^[15-16] 或少数飞行试验研究^[17-21]. 但总体上, 针对无人机编队飞行控制的研究仍存在理论与实践之间脱节的问题.

针对无人机编队控制理论与实践之间脱节的问题, 本文设计一套无人机编队飞行的快速试验系统. 试验系统包括一套基于 X-Plane 的硬件在回路 (HIL) 仿真系统, 还包括以多架固定翼无人机为基础的飞行试验系统. 两套系统的部分硬件相同, 如自动驾驶仪、地面站等. 通过 HIL 仿真可以提前发现并修正在 HIL 仿真中暴露的问题, 从而减少飞行试验所需的时间和成本, 缩短方法从理论到应用的时间. 此外, 飞行试验系统中解决了无人机之间及无人机与地面站之间的通信问题, 使得无人机之间可以直接通信, 不用通过地面站转发. 设计的试验系统中, 单个地面站可以监视和管理多架无人机, 这大大提高多无人机系统的管理效率, 并且降低了飞行试验所需的人力成本. 为验证上述系统的有效性, 本文最后设计长机—僚机编队控制方法对试验系统进行验证. 结果表明, 利用文中设计的快速试验系统可以有效开展无人机编队的 HIL 仿真和外场飞行试验. 通过 HIL 仿真验证的自动驾驶仪可以直接移植到飞行试验系统中, 只需微调一些控制参数即可快速实现无人机编队飞行.

2 试验系统设计 (Design of the experiment system)

为了降低编队飞行试验成本, 加快新方法从理论走向实用的过程, 设计无人机编队飞行快速试验系统, 包括 HIL 仿真子系统和飞行试验子系统. 本节给出 2 个子系统的主要软、硬件选型和方案.

2.1 HIL 仿真系统设计

HIL 仿真系统主要包括 4 部分: X-Plane 飞行模拟软件、自动驾驶仪硬件、地面站软件和一台交换机.

2.1.1 X-Plane 仿真软件

HIL 仿真系统基于商用飞行模拟软件 X-Plane 10.0 设计. X-Plane 可用于高精度预测固定翼或旋

翼飞机的飞行品质, 因此该模拟软件经常被飞行员用于飞行训练, 被工程师用于测试新机型的性能, 被控制工程师用来测试飞行控制算法.

图 1 给出 X-Plane 飞行模拟软件中显示 2 架飞机的界面. 在 HIL 仿真中, X-Plane 提供飞机的运动学和动力学模型, 根据控制器的控制量生成相应的速度、位置、姿态、线加速度和角加速度等信息.



图 1 X-Plane 10.0 飞行模拟软件显示界面
Fig.1 A view of the flight simulator X-Plane 10.0

2.1.2 自驾仪

为了开展无人机相关的飞行试验研究, 开发了自驾仪^[22], 如图 2 所示. 自动驾驶仪中集成了 2 个 ARM Cortex-M4 处理器, 主频为 168 MHz. 其中一个处理器负责处理无人机的飞行控制任务. 另一个预留处理器用于处理更加复杂的任务, 如规划、编队控制、编队避障、编队重构等.



图 2 基于网络的自动驾驶仪
Fig.2 The network based autopilot

除了集成上述的 2 个处理器, 设计的自驾仪还包括如下接口资源: 4 个串口、2 个以太网口、3 个 SPI 接口、2 个 CAN 总线. 丰富的接口设计支持与各种外围设备的通信. 如在实际飞行试验系统用一个串口连接导航设备, 一个以太网口连接数据通信设备, CAN 总线可以用于舵机驱动信号的传输等. 在 HIL 仿真子系统中, 上述接口只用到一个以太网口同时与地面控制站和 X-Plane 飞行模拟软件进行 UDP 通信.

经过数字仿真验证的控制算法可以用 C 语言在自驾仪中编程实现. 设计的硬件在回路仿真系统的各种接口和协议与实际飞行试验系统中完全一致. 因此, 当算法在自驾仪中通过硬件在回路仿真验证之后, 可以很快应用到实际的飞行实验验证系统中进行飞行试验测试.

2.1.3 地面控制站

地面控制站是无人机系统的一个必要组成部分. 图 3 给出 HIL 仿真系统和飞行试验系统中共用的地面控制站. 该控制站不仅可以提供第三视角的飞行状态显示, 包括无人机姿态和速度, 以及由 GPS 给出的无人机飞行轨迹, 而且支持各种飞行设定的在线配置, 预定轨迹的编辑、仿真, 飞行数据的记录和分析等. 最重要的一点是该地面站支持基于 UDP 网络的多无人机管理. 这种网络化的地面控制站与支持网络通信的自驾仪结合能够更加高效地开展多无人机编队相关算法的验证研究.

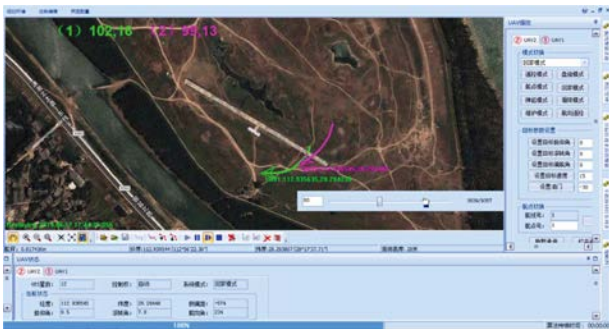


图 3 地面控制站软件显示界面

Fig.3 A view of the ground control station

2.1.4 硬件在回路仿真系统

在 HIL 仿真中, 每个 X-Plane 可以显示多架无人机, 但只能模拟一架无人机. 因此将多个运行 X-Plane 的计算机和多个网络化自驾仪通过一个交换机连接地面控制站电脑, 即可以构成文中设计的 HIL 仿真系统. 系统的各部分连接关系和信息流向如图 4 和图 5 所示.

在 HIL 仿真系统中, 各个组成部分与实际飞行试验系统中的软、硬件对应关系如表 1 所示. HIL 仿真系统与实际飞行试验系统中使用了相同的自驾仪和地面控制站, 用 X-Plane 代替了实际飞行试验系统中的无人机平台、外部环境和传感器, 用交换机代替了实际飞行试验系统中的数据通信部分. 因此, 当算法通过该硬件在回路系统验证后, 可以直接将算法实现的自驾仪移植到实际飞行试验系统中进行飞行测试. 图 6 给出实际搭建的硬件在回路仿真系统, 主要包括 6 个自驾仪、7 台计算机和 1

台交换机, 其中 6 台计算机分别运行 1 个 X-Plane 10.0, 每个 X-Plane 10.0 软件模拟 1 架无人机, 1 台计算机运行地面控制站软件, 搭建的硬件在回路仿真系统最多可以支持 6 架无人机编队试验.

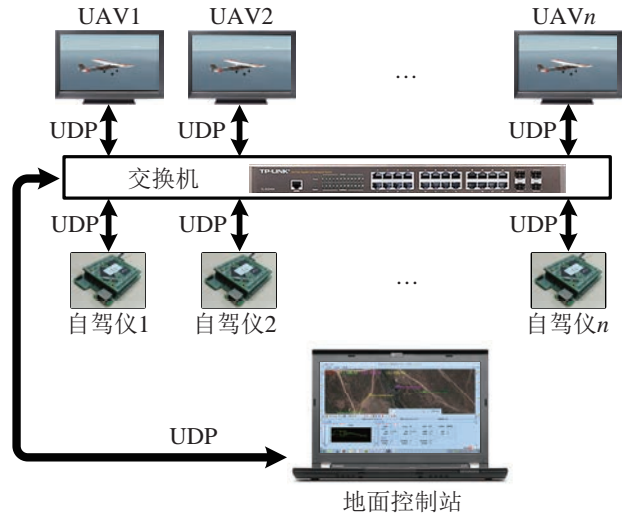


图 4 HIL 仿真系统示意图

Fig.4 Diagram of the HIL simulation system

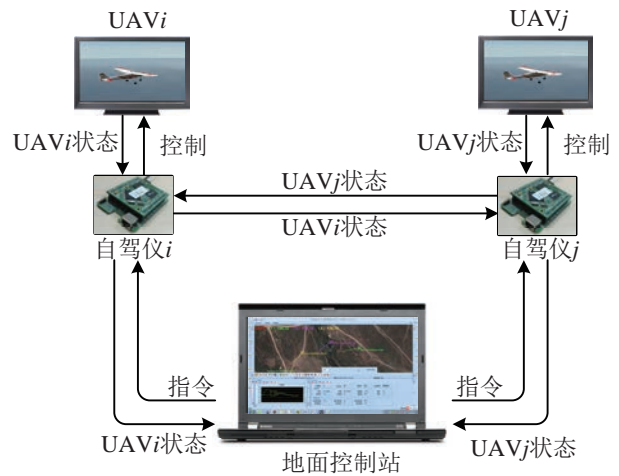


图 5 HIL 仿真系统通信关系

Fig.5 Communication of the HIL simulation system

表 1 HIL 仿真系统与实际系统各组成部分对比

Tab.1 Comparison between the HIL simulation system and the actual system

HIL 仿真试验系统	飞行试验系统
X-Plane 10.0	无人机 外部环境 传感器
交换机	数据电台
自驾仪	自驾仪
地面控制站	地面控制站

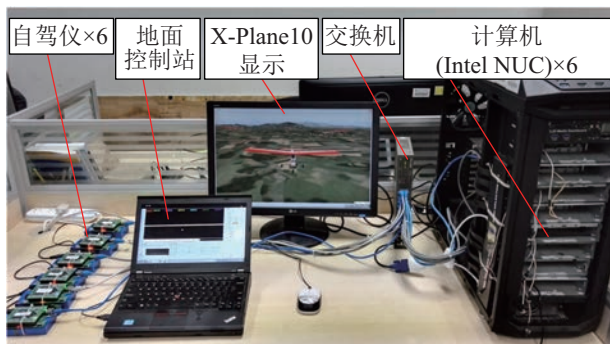


图 6 HIL 仿真系统

Fig.6 The HIL simulation system

2.2 飞行试验系统设计

由于飞行试验系统中使用与 HIL 仿真系统中相同的自动驾驶仪硬件和地面控制站软件. 因此, 用实际的无人机平台、传感器代替 X-Plane 软件, 用数据电台代替交换机, 即可以构建完整的飞行试验系统.

2.2.1 无人机平台

选用“天行者”无人机作为试验平台, 如图 7 所示. 该平台是一种小型电动固定翼无人机, 采用后推式上单翼结构. “天行者”无人机的主要技术参数如表 2 所示.



图 7 “天行者”无人机平台
Fig.7 “Skywalker” UAV platform

表 2 “天行者”无人机参数
Tab.2 “Skywalker” UAV parameters

参数名	值
机长	1180 mm
翼展	1160 mm
翼面积	35.5 dm ²
最大起飞重量	1800 g
飞行速度	15 m/s~20 m/s

2.2.2 集成传感器模块

飞行控制系统中选用 iFLY-G2 导航模块, iFLY-G2 是由 iFLY 无人机团队开发的第 2 代小型 6 自由度组合导航系统, 提供 GPS/INS、AHRS/DR 两种组合导航模式. iFLY-G2 包含三轴陀螺、三轴加速

度计、三轴磁场计、GPS 模块、气压高度计、空速计和温度计, 提供实时的姿态角、四元数、3 维角速率、3 维位置、3 维速度、3 维加速度、轨迹航向、轨迹倾角、真空速、校正空速和 UTC 时间等信息. iFLY-G2 为无人机的稳定和控制提供精确和全面的测量信息. 在 GPS 信息有效时, 自动切换到 GPS/INS 组合导航模式, 提供位置、速度、姿态等信息; 在 GPS 信息无效时, 自动切换到 AHRS/DR 模式 (包含航位推算的姿态航向参考系统).



图 8 集成传感器模块 iFLY-G2

Fig.8 The integrated navigation module iFLY-G2

2.2.3 数据通信电台

选用 Microhard nVIP 2400 作为无人机与地面站之间以及无人机之间的数据通信电台. Microhard nVIP 2400 传输频率为 2.4 GHz, 接口支持串口通信和以太网口通信, 带宽为 54 Mbit/s. 地面站和每架无人机各配备一个 Microhard nVIP 2400 电台组成一个无线通信网络, 使得所有的无人机之间和无人机与地面站之间都能相互通信.



图 9 Microhard nVIP2400 通信电台

Fig.9 The radio station Microhard nVIP2400

2.2.4 飞行控制系统

使用 HIL 仿真系统中的自动驾驶仪和上述的集成传感器模块、通信电台, 以及舵机、电调和遥控接收机等, 即可以构建无人机的飞行控制系统. 飞行控制系统的组成框图如图 10 所示.

利用 2 架“天行者”无人机平台, 每架无人机都安装上述飞行控制系统, 结合地面控制站和遥控器, 即可构建一套完整的编队飞行试验系统, 如图 11 所示.

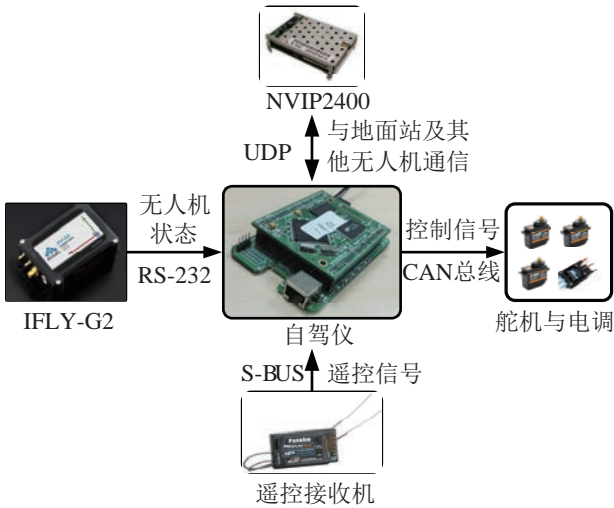


图 10 飞行控制系统框图

Fig.10 Diagram of the flight control system

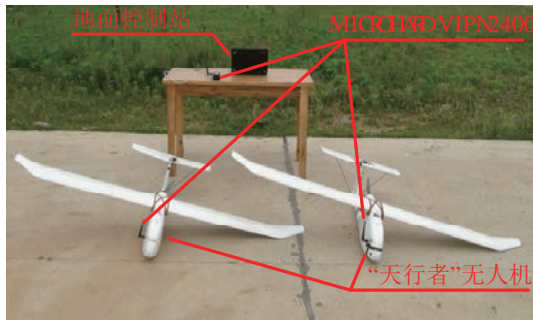


图 11 编队飞行试验系统

Fig.11 Formation flight experiment system

3 试验系统测试 (Test of the experiment system)

为了测试上述硬件在回路仿真系统和飞行试验系统的有效性, 选择相对成熟的长机-僚机编队控制方法对系统进行测试. 无人机的飞行控制采用自抗扰控制 (ADRC) 结合比例-积分-微分 (PID) 控制的方法.

3.1 编队飞行控制

3.1.1 飞行控制方法

基于文 [23] 中设计的自抗扰姿态控制器, 设计无人机单机飞行控制方法框图, 如图 12 所示. 自抗扰控制技术对实际问题中模型的不确定性, 外部干扰以及模型的非线性等问题具有较好的控制效果. 文 [23] 中分析了姿态控制器的鲁棒性. 在此基础上, 采用 PID 控制设计无人机外环控制律, 使无人机可以跟踪期望的航向角 χ_d 、期望飞行轨迹角 γ_d 和期望速度 V_d . 在编队控制中, 每架无人机只需要跟踪由编队控制律给出的期望航向角、期望飞行轨迹角和期望速度.

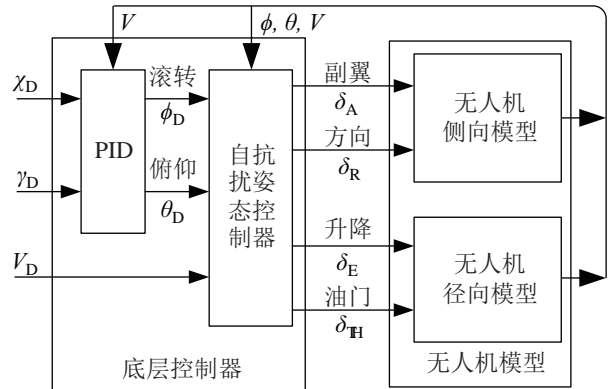


图 12 无人机飞行控制律框图

Fig.12 Control diagram of an individual UAV

3.1.2 编队控制算法

基于长机-僚机的思想, 采用 PID 控制设计编队控制器. 图 13 给出编队控制律框图. 图中 l_c, f_c 和 h_c 分别表示僚机相对长机的侧向距离、前向距离和垂直距离的设定值. 其中 f_c 与长机的水平速度方向平行, l_c 在水平面内与 f_c 垂直, 以长机的右侧为正. h_c 垂直指向下. 采用 PID 控制, 根据侧向距离误差 l_e , 前向距离误差 f_e 和垂直距离误差 h_e , 即可设计僚机的编队控制器. 在这种长机-僚机编队过程中, 长机跟踪期望的任务路径, 僚机按照给定侧向距离、前向距离和垂直距离跟踪长机.

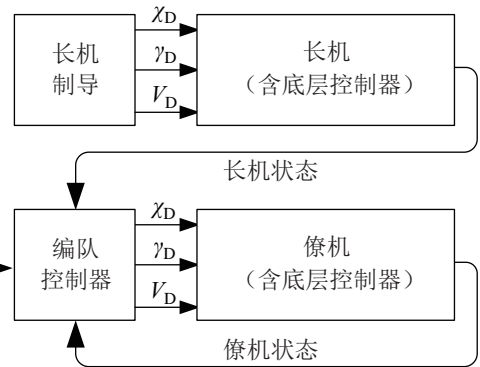


图 13 长机-僚机编队控制方法框图

Fig.13 Diagram of leader-follower formation control

3.2 HIL 仿真结果

利用设计的 HIL 仿真系统进行 HIL 仿真, 选用 PT60 遥控飞机模型. HIL 仿真中令长机跟踪一个预定的四边形航线, 图 14 给出 3 架无人机编队飞行的仿真截屏. 图 15 给出 HIL 仿真中 3 架无人机编队的地面站显示状态. 从给出的结果可以看出, 3 架无人机可以稳定地编队飞行, 并且地面站可以同时监视和管理 3 架无人机.



图 14 HIL 仿真过程中 3 架无人机编队飞行的 X-Plane 界面
Fig.14 A view of 3-UAV formation flight within X-Plane simulator in HIL simulation



图 15 HIL 仿真过程中地面站截图

Fig.15 Screenshot of ground control station in HIL simulation

通过 HIL 仿真, 可以在开展外场飞行试验之前对设计的算法进行充分的测试. 同时也检验算法在自驾仪中的编程实现, 发现问题可以提前修正, 从而减少外场飞行试验的工作量, 快速实现算法的飞行试验验证.

3.3 飞行试验结果

经过 HIL 仿真验证的自驾仪和集成的控制方法可以快速移植到飞行试验系统中, 进一步, 利用设计的飞行试验系统即可开展外场编队飞行试验. 飞行试验中地面站同时监视和管理 2 架“天行者”无人机. 图 16 给出 2 架无人机编队飞行试验的视频截图. 图 17 给出僚机视角看长机的视频截图. 图 18 给出地面站显示界面. 期望编队的参数为 $l_c = 0$, $f_c = 50$ m, $h_c = 10$ m. 可以看出, 飞行试验中僚机的跟踪存在较大的偏差. 主要原因是: 飞行试验中, 由于通信距离的限制和安全考虑, 编队飞行的

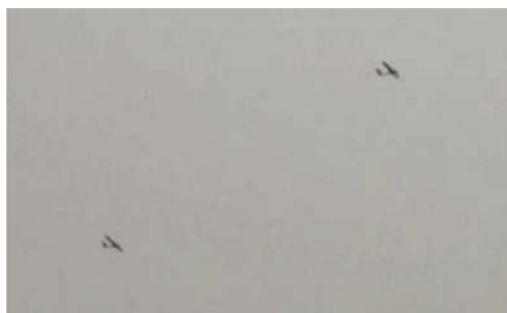


图 16 飞行试验中 2 架无人机编队的地面视角
Fig.16 2-UAV formation flight from the view of ground

航线较短, 编队多处于机动状态, 没有足够的时间收敛. 选择图 18 中相对较长的收敛过程进行分析, 即从圆过渡到直线编队的过程.



图 17 僚机视角看长机的图像

Fig.17 Image of the leader UAV from the view of the follower



图 18 编队飞行试验过程中地面站显示界面

Fig.18 A view of the ground control station in the formation flight experiment

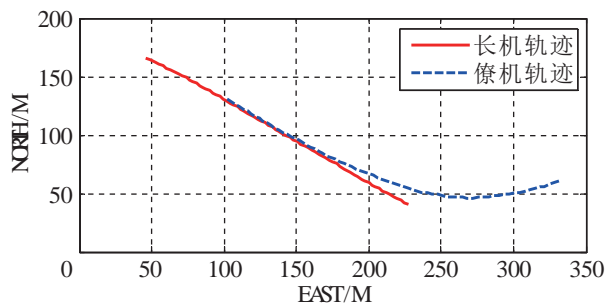


图 19 编队飞行试验过程中无人机的部分轨迹

Fig.19 Part of the UAV trajectories in the formation flight experiment

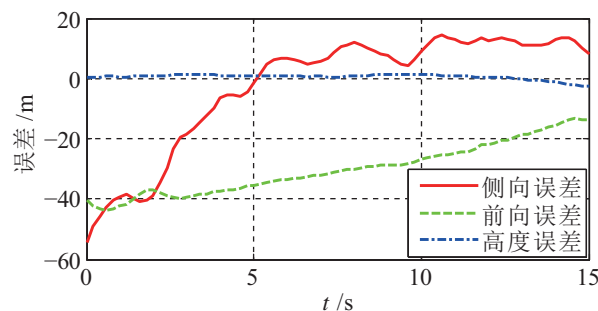


图 20 编队飞行试验过程中相应的僚机跟踪误差

Fig.20 The corresponding tracking error of the follower in the formation flight experiment

图 19 给出这个过程中的长—僚机编队轨迹, 可以看出, 僚机能够跟踪长机, 并逐渐向期望位置收敛. 图 20 给出过程中 3 个方向上的跟踪误差, 可以看出, 高度方向上的跟踪误差维持在较小的水平. 侧向的收敛速度快于前向, 这是因为平台本身前向和侧向的机动能力不同. 可以推断, 如果直线编队的航线足够长, 能够进一步提高僚机在编队中的跟踪精度. 除了航线长度的原因, 导致飞行试验中存在误差的原因还包括: (1) 各种传感器的误差, 如 GPS 定位误差; (2) 编队飞行试验中使用低成本的无人机平台, 材料刚度低, 使得设计的无人机底层控制器和编队控制器存在较大的控制误差. 尽管如此, 试验过程中发现, 经过 HIL 仿真充分测试的自驾仪可以直接应用在编队飞行试验中, 要实现稳定的编队飞行只需要对部分控制参数进行在线调整. 上述试验结果一定程度上验证了 HIL 仿真系统和飞行试验系统的有效性.

4 结论 (Conclusion)

针对无人机编队控制理论方法与实际应用之间存在差距的问题. 本文设计了一套无人机编队飞行快速试验系统. 快速试验系统包括基于 X-Plane 的 HIL 仿真系统和基于“天行者”无人机平台的飞行试验系统. HIL 仿真系统和飞行试验系统中使用了相同的自驾仪, 因此, 通过充分的 HIL 仿真可以提前发现并修正在 HIL 仿真中暴露的问题. 此外, 采用网络化的软硬件结构, 使得试验系统能够用于验证各种通信拓扑的编队控制算法. 本文设计一种长机—僚机编队控制方法对试验系统进行验证. 结果表明通过 HIL 仿真验证的自驾仪可以直接移植到飞行试验系统中, 只需微调一些控制参数即可快速实现无人机编队飞行, 从而减少飞行试验所需的时间和成本, 缩短了方法从理论到应用的时间. 下一步将基于该试验系统研究分布式自组织的无人机编队控制算法.

参考文献 (References)

- [1] Wang X, Zhu H Y, Zhang D B, et al. Vision-based detection and tracking of a mobile ground target using a fixed-wing UAV[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2014, 11: No.156.
- [2] 王勋, 张代兵, 沈林成. 一种基于虚拟力的无人机路径跟踪控制方法[J]. *机器人*, 2016, 38(3): 329-336.
Wang X, Zhang D B, Shen L C. A virtual force based path following approach for unmanned aerial vehicles[J]. *Robot*, 2016, 38(3): 329-336.
- [3] Han J L, Xu Y J, Di L, Chen Y. Low-cost multi-UAV technologies for contour mapping of nuclear radiation field[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2013, 70(1-4): 401-410.
- [4] Cabanas L M. Cooperative perception techniques for multiple unmanned aerial vehicles: Applications to the cooperative detection, localization and monitoring of forest fires[D]. Sevilla, Spain: Universidad de Sevilla, 2007.
- [5] Ryan A, Zennaro M, Howell A, et al. An overview of emerging results in cooperative UAV control[C]//43rd IEEE Conference on Decision and Control. Piscataway, USA: IEEE, 2004: 602-607.
- [6] How J P, Fraser C, Kulling K C, et al. Increasing autonomy of UAVs decentralized CSAT mission management algorithm[J]. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, 2009, 16(2): 43-51.
- [7] Wise R A, Rysdyk R T. UAV coordination for autonomous target tracking[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston, USA: AIAA, 2006: 3210-3231.
- [8] Oliveira T, Encarnacao P. Ground target tracking control system for unmanned aerial vehicles[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2013, 69(1-4): 373-387.
- [9] 王祥科, 李迅, 郑志强. 多智能体系统编队控制相关问题研究综述[J]. *控制与决策*, 2013, 28(11): 1601-1613.
Wang X K, Xun L, Zheng Z Q. Survey of developments on multi-agent formation control related problems[J]. *Control and Decision*, 2013, 28(11): 1601-1613.
- [10] Valenti M, Bethke B, Dale D, et al. The MIT indoor multi-vehicle flight testbed[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2007: 2758-2759.
- [11] Zhen Z Y, Gao C, Zheng F Y, et al. Cooperative path replanning method for multiple unmanned aerial vehicles with obstacle collision avoidance under timing constraints[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, 2015, 229(10): 1813-1823.
- [12] Zhen Z Y, Hao Q S, Gao C, et al. Information fusion distributed navigation for UAVs formation flight[C]//2014 IEEE Chinese Guidance, Navigation and Control Conference. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 1520-1525.
- [13] Xu Y J, Xin M, Wang J N. Unmanned aerial vehicle formation flight via a hierarchical cooperative control approach[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston, USA: AIAA, 2011.
- [14] Duan H B, Li P. Multiple UAV formation control[M]//Bio-inspired Computation in Unmanned Aerial Vehicles. Berlin, Germany: Springer, 2014: 143-181.
- [15] Rasmussen S J, Orr M W, Carlos D, et al. Simulating multiple micro-aerial vehicles and a small unmanned aerial vehicle in urban terrain using multi UAV2[C]//AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit. Reston, USA: AIAA, 2005: 877-889.
- [16] Garcia R, Barnes L. Multi-UAV simulator utilizing X-Plane[J]. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 2010, 57(1-4): 393-406.
- [17] Gu Y, Seanor B, Campa G, et al. Design and flight testing evaluation of formation control laws[J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2006, 14(6): 1105-1112.
- [18] Watanabe Y, Amiez A, Chavent P. Fully-autonomous coordinated flight of multiple UAVs using decentralized virtual leader approach[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 5736-5741.

- [9] Li C, Wu Y Q, Wu J C, et al. Cartesian stiffness evaluation of a novel 2-DoF parallel wrist under redundant and antagonistic actuation[C]//IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Piscataway, USA: IEEE, 2013: 959-964.
- [10] Fan C X, Liu H Z, Zhang Y B. Type synthesis of 2T2R, 1T2R and 2R parallel mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 2013, 61(1): 184-190.
- [11] 黄真, 刘婧芳, 李艳文. 论机构自由度: 寻找了 150 年的自由度通用公式 [M]. 北京: 科学出版社, 2011: 62-67.
Huang Z, Liu J F, Li Y W. On the degree of freedom of mechanism: 150-year unified mobility formula issue[M]. Beijing: Science Press, 2011: 62-67.
- [12] Blanding D L. Exact constraint: Machine design using kinematic principles[M]. New York, USA: ASME, 1999.
- [13] 于靖军, 裴旭, 宗光华. 机械装置的图谱化创新设计 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Yu J J, Pei X, Zong G H. Graphical approach to creative design of mechanical devices[M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [14] 陈子明, 张扬, 黄坤, 等. 一种无伴随运动的对称两转一移并联机构 [J]. 机械工程学报, 2016, 52(3): 9-17.
Chen Z M, Zhang Y, Huang K, et al. Symmetrical 2R1T parallel mechanism without parasitic motion[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(3): 9-17.
- [15] 魏敏和, 韩先国, 张军. 3-UPS/S 并联转台球铰链的优化研究 [J]. 航天制造技术, 2013, 11(3): 19-23,38.
Wei M H, Han X G, Zhang J. Optimization research of spherical joints in 3-UPS/S parallel rotational table[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2013, 11(3): 19-23,38.
- [16] 李艳文. 几类空间并联机器人的奇异研究 [D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2005.
Li Y W. On singularity of several kinds of spacial parallel manipulators[D]. Qinghuangdao: Yanshan University, 2005.
- [17] Rastegar J, Fardanesh B. Manipulator workspace analysis using the Monte Carlo method[J]. Mechanism and Machine Theory, 1990, 25(2): 233-239.
- [18] Yang G, Causton D M, Ingram D M. Calculation of compressible flows about complex moving geometries using a three-dimensional Cartesian cut cell method[J]. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 2000, 33(8): 1121-1151.
- [19] 曹永刚, 张玉茹, 马运忠. 6-RSS 型并联机构的工作空间分析与参数优化 [J]. 机械工程学报, 2008, 44(1): 19-24.
Cao Y G, Zhang Y R, Ma Y Z. Workspace analysis and parameter optimization of 6-RSS parallel mechanism[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(1): 19-24.

作者简介:

张国英 (1980-), 女, 博士生, 讲师. 研究领域: 机器人机构学及其操作.

廖亚军 (1992-), 男, 硕士生. 研究领域: 人机共融技术.

梁峰 (1992-), 男, 硕士生. 研究领域: 基于 ROS 的机器人控制技术.

(上接第 166 页)

- [19] Watanabe Y. Coordinated control of multiple UAVs: Theory and flight experiment[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Reston, USA: AIAA, 2013: 19-22.
- [20] Wang X, Zhang J Y, Zhang D B, et al. UAV formation: From numerical simulation to actual flight[C]//IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 475-480.
- [21] 洪晔, 缪存孝, 雷旭升. 基于长机-僚机模式的无人机编队方法及飞行实验研究 [J]. 机器人, 2010, 32(4): 505-509.
Hong Y, Miao C X, Lei X S. Formation method and flight test of multiple UAVs based on leader-follower pattern[J]. Robot, 2010, 32(4): 505-509.
- [22] 方强, 习业勋, 相晓嘉, 等. 基于双核架构的无人机自主起降飞行控制系统, 中国: CN104503467A[P]. 2015-04-08.
Fang Q, Xi Y X, Xiang X J, et al. Dual-core architecture based flight control system for taking-off and landing of UAVs, China: CN104503467A[P]. 2015-04-08.
- [23] Wang X, Kong W W, Zhang D B, et al. Active disturbance rejection controller for small fixed-wing UAVs with model uncertainty[C]//IEEE International Conference on Information and Automation. Piscataway, USA: IEEE, 2015: 2299-2304.

作者简介:

王勳 (1988-), 男, 博士. 研究领域: 无人机系统技术, 机器人技术.

张纪阳 (1979-), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师. 研究领域: 无人机系统技术, 机器人技术.

张代兵 (1977-), 男, 博士, 副研究员, 硕士生导师. 研究领域: 无人机系统技术, 机器人技术.