

无人机自主控制关键技术新进展

张友民^{1,2}, 余翔², 屈耀红³, 刘丁¹

1. 西安理工大学信息与控制工程系; 陕西省复杂系统控制和智能信息处理重点实验室, 西安 710048
2. 康考迪亚大学机械与工业工程系, 加拿大蒙特利尔 H3G 1M8
3. 西北工业大学自动化学院, 西安 710072

摘要 无人机在军用、民用领域具备巨大的应用潜力, 当前世界各国正在大力推进无人机的研发工作, 而无人机自主控制是无人机研发中极富挑战性的关键问题。本文介绍了无人机的分类和系统框架; 根据无人机实际应用的要求, 提炼出无人机自主控制进程中的几个关键性技术问题, 包括感知与规避、故障诊断与容错控制、协同控制及这 3 项关键技术有机综合的新问题与新方法——容错协同控制等, 并重点阐述了这些关键技术的机理和较有代表性的成果及新进展; 以目前无人机重要应用领域——空中加油过程及森林资源与火情监测为例, 简述了以上技术在实际应用中的具体体现及其新进展; 最后对无人机自主控制技术进行了展望, 并给出各项关键技术存在的挑战及可能的解决思路。

关键词 无人机; 自主控制; 感知与规避; 故障诊断与容错控制; 协同控制; 容错协同控制

无人机 (unmanned aerial vehicle, UAV) 是指无需驾驶员直接操纵, 可通过自主或远程控制完成飞行行为的空中机器人系统^[1]。1917 年英国成功研制了世界上第一架无人机, 并应用于第一次世界大战。从此无人机经过了无人靶机、预编程控制无人侦察机、指令遥控无人侦察机和复合控制多用途无人机的的发展历程, 并在海湾战争等局部战争中发挥了重要的作用。早期无人机主要用于军事用途, 近年来逐渐推广至农林业植保、电力巡检、货物递送、地质勘探、环境监测、及森林防火救火等越来越多的民用领域。

无人机与有人驾驶飞机相比, 主要优势在于以下两点: 由于机上没有驾驶员, 因此可以省去驾驶舱及相关设备, 降低无人机的重量和制造成本; 无人机不受驾驶员的心理和生理极限等约束, 可最大限度地飞到适合其性能特点及任务需求的速度、高度、航程等, 也可通过超加速升降、急转弯飞行等方式提高生存能力, 因此无人机可在超出人类所

能承受的危險和恶劣环境中使用。

在过去的几十年中, 无人机技术取得了极大进展, 各种类型的无人机纷纷研制成功, 性能逐步提高并已经成功地应用于部分军用、民用领域。无人机自主化是无人机的发展趋势, 势必推动无人机更广泛、更深层次的应用^[2-4]。本文针对无人机分类、无人机系统结构、无人机自主化进程中的关键技术、典型应用、挑战性的难题及可能的解决思路进行探讨。

1 无人机概述

1.1 无人机分类

根据无人机机翼工作原理的不同, 如图 1 所示, 无人机可划分为固定翼、旋翼以及倾转旋翼无人机。固定翼无人机是指由动力装置产生前进的推力或拉力, 由机身的固定机翼产生升力, 在大气层内飞行的无人机。旋翼无人机是一种由一个或多个水平旋转的旋翼提供向上升力和推进力而进行飞行的无人机, 具备垂直升降、悬停、小速度

向后飞行等特点。倾转旋翼无人机是一种将固定翼无人机和旋翼无人机特点融为一体的新型无人机, 兼有旋翼无人机的垂直起降能力和固定翼无人机的快速机动能力。倾转旋翼无人机在引擎旋转到垂直位置时相当于横列式直升机, 可完成垂直起降、悬停等飞行动作; 而在引擎旋转至水平位置时相当于螺旋桨飞机, 可实现比旋翼无人机更快的航速。另一方面, 如图 2 所示, 根据无人机质量、飞行时间、飞行距离及飞行高度, 又可将无人机划分为微型、轻型、中型、重型及超重型 5 类^[5-6]。

1.2 无人机系统结构

如图 3 所示, 无人机系统一般由无人飞行器、地面控制站和数据链路组成^[7]。无人飞行器主要包括无人机机体、推进装置、操纵装置、通信单元、机载飞行控制计算机、探测设备、任务与载荷管理系统以及机载传感设备等。地面控制站主要完成任务规划、系统控制、无人机系统状态显示及监控、图像及遥测、信号处理、数据收发等功能。

收稿日期: 2016-12-12; 修回日期: 2017-03-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61573282, 61603130, 61473229); 陕西省自然科学基金研究重点项目 (2015JZ020)

作者简介: 张友民, 教授, 研究方向为故障诊断与容错控制、无人机导航、制导与控制、动态系统建模、估计与辨识等, 电子信箱: youmin.zhang@xaut.edu.cn, youmin.zhang@concordia.ca

引用格式: 张友民, 余翔, 屈耀红, 等. 无人机自主控制关键技术新进展[J]. 科技导报, 2017, 35(7): 39-48; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2017.07.004



图1 按照机翼工作原理分类的无人机

Fig. 1 UAV classification based on wing shapes and flying principles

固定翼无人机	FQM-150 Pointer	Silver Fox	RQ-7 Shadow	MQ-1 Predator	RQ-4 Global Hawk
重量: 4 kg; 最大航时: 1 h; 最大航程: 5 km; 最大飞行高度: 300 m	重量: 12 kg; 最大航时: 10 h; 最大航程: 37 km; 最大飞行高度: 3650 m	重量: 170 kg; 最大航时: 6.9 h; 最大航程: 109 km; 最大飞行高度: 4572 m	重量: 1020 kg; 最大航时: 24 h; 最大航程: 1100 km; 最大飞行高度: 7620 m	重量: 14628 kg; 最大航时: 28 h; 最大航程: 14001 km; 最大飞行高度: 18288 m	
微型	轻型	中型	重型	超重型	
旋翼无人机	Acyron Scoul	Scorpio 6	Skeldar V-200	MQ-8C Fire Scoul	A160 Hummingbird
重量: 1.4 kg; 最大航时: 25 min; 最大航程: 3 km; 最大飞行高度: 450 m	重量: 13 kg; 最大航时: 1 h; 最大航程: 35 km; 最大飞行高度: >2000 m	重量: 195 kg; 最大航时: 6 h; 最大航程: 100~400 km; 最大飞行高度: >3500 m	重量: 1451 kg; 最大航时: 12 h; 最大航程: 200 km; 最大飞行高度: 4877 m	重量: 2948 kg; 最大航时: 16~24 h; 最大航程: 4023 km; 最大飞行高度: 9150 m	
微型	轻型	中型	重型	超重型	

图2 无人机基于重量及其飞行性能的分类

Fig. 2 Classification of UAVs based on weights and flight performance

无人机数据链路是一个多模式的通信系统,能够感知其工作区域的电磁环境特征,实时动态地调整通信系统参数,

起到无人机与地面控制站联系的纽带作用。

2 无人机自主控制关键技术

当前无人机的控制方式仍然主要

以操纵员遥控和预编程控制为主,然而该类控制方式难以满足复杂多变环境下的飞行要求^[8]。无人机自主化能够改进对复杂战场环境的感知,提高目标定位的速度和精度,有效地提高生存力和任务灵活性^[9]。无人机自主控制是指在不需要人的干预条件

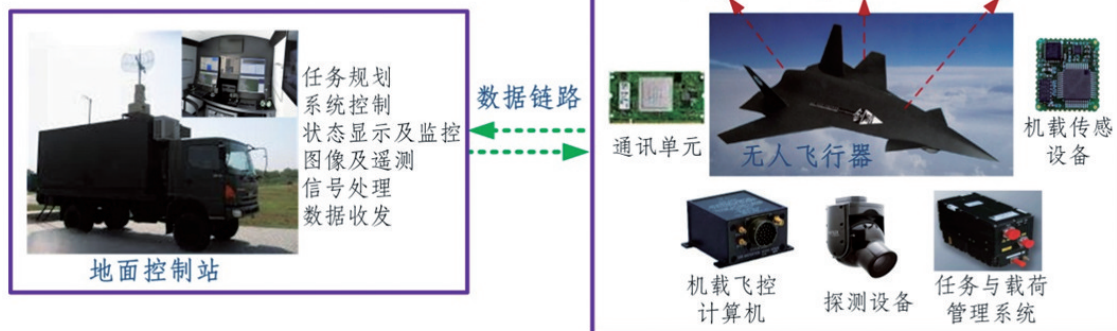


图3 无人机系统结构

Fig. 3 General system architecture of UAV

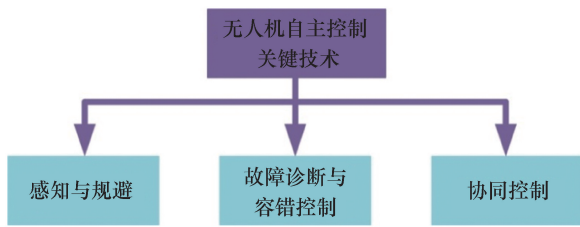


图4 无人机自主控制关键技术

Fig. 4 Key technologies towards UAV autonomy

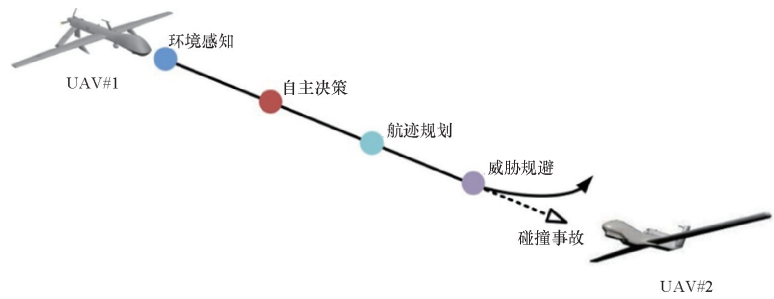


图5 无人机感知与规避原理与功能

Fig. 5 Concept and functions of sensing and avoidance of UAVs

下,系统通过在线环境感知和信息处理,自主决策并生成优化的控制策略,完成各种战略和战术任务,且具备快速而有效的任务自适应能力^[2]。面向实际应用层面,研究无人机自主控制所面临的主要难题包括:1) 面向高度不确定性并具有实时外部威胁和干扰的复杂动态环境;2) 远距离长航时条件下复杂网络通信链路故障、系统故障等突发事件;3) 多种相同类型或不同类型的无人机协同飞行等。如图4所示,无人机自主控制研究中的关键技术包括无人机感知与规避技术、故障诊断与容错控制技术和协同控制技术,以上3种关键技术属于无人机导航、制导与控制领域的面向无人机各种可靠、实际应用的国际前沿研究课题^[16,10]。

2.1 无人机感知与规避技术

感知与规避技术是无人机获得航空监管部门授权,飞入通用空域的关键,也是无人机自主化进程中的关键环节^[6,11-12]。因此,世界各国正在大力推进相关技术的研究,包括美国空军和美国国防研究协会主导以协调无人机系统航空空域飞行行为为重点的重大项目,英国以航空工业界为主导的“自主系统技术相关空中评估”项目,以及由欧洲防务局组织实施的欧洲研究计划等。这些重大研究计划项目的核心便是无人机的感知与规避技术。无人机感知与规避的原理与功能如图5所示,包括:1) 利用机载探测设备实时感知无人机飞行环境和潜在威胁;2) 自主决策模块依据传感器数据,确定飞机何时何地采取机动来防止发生冲突和碰撞;3) 飞行管理系统实时规划最优航迹使得无人机有效地规避威胁^[6]。

各国研究人员付出大量努力开展

无人机感知与规避算法方面的研究工作,并取得了一定进展^[13]。美国麻省理工学院How课题组考虑到无人机动态特性和环境不确定性等条件,基于随机树搜索算法开发了针对自主无人机的避障技术^[14]。新加坡国立大学Chen课题组将感知与规避算法嵌入至自主旋翼无人机控制系统,保证了该旋翼无人机可自主地规避障碍物^[15]。加拿大康考迪亚大学Zhang研究团队采用地理信息优化方法自主规划无人机机场降落过程的安全航路,并利用微分平坦技术平滑初始规划的安全航路,使得所规划的路径满足无人机物理约束条件并可规避多个其他无人机或飞机^[16]。

2.2 无人机故障诊断与容错控制技术

在任务执行过程中发生通信链路故障、无人机系统故障是影响无人机自身安全和任务执行效率的重要因素^[10,17]。容错控制技术最初的发展动力源自航空领域,美国空军提出了“自修复飞行控制系统”等概念,保证飞行器在故障情况下能安全着陆^[18-19]。美国20世纪70年代以来,持续投入巨资研发具备高度容错能力的战斗机。容错

控制被自动控制峰会列为控制科学面临的极具挑战性的研究课题之一,具有重大的理论和应用价值。国内众多学者在工业过程与飞行控制应用方面的故障诊断与容错控制的研究也起步较早并取得丰硕成果^[20-22]。一般来说,容错控制系统设计可分为被动容错和主动容错控制设计两大类方法。在设计被动容错控制系统时,同时考虑系统正常状态和可能的故障状态。因此被动容错控制在故障发生时不需要进行控制器重构,但是其保守性较强。对于主动容错控制系统,其基本思想是根据故障检测与诊断模块提供的结果而设计重构控制器,并在故障发生后取代正常状态时的控制器,以保证故障系统的可维护性和安全性^[18-19,23]。

无人机故障诊断与容错控制是实现无人机自主化控制的一个极其重要的环节,其原理及功能结构如图6所示。故障诊断模块估计系统故障的幅值,容错控制模块合理利用系统冗余配置保证无人机在故障情况下仍然具备可接受的性能指标。

在该项研究内容中,需要对无人机

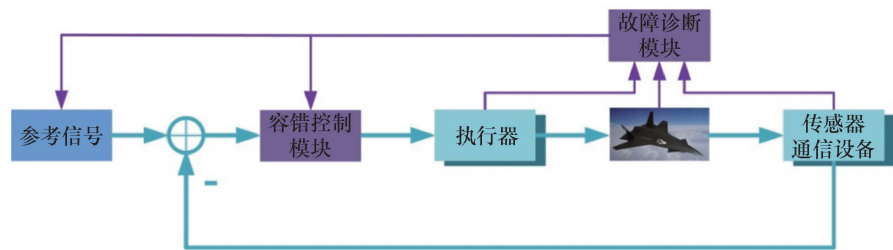


图6 无人机故障诊断与容错控制原理及功能结构

Fig. 6 Concept and structure of FDD and FTC for UAVs

的状态、机载传感器、执行机构和通讯部件等进行实时监测,判断无人机关键部件是否失效,并诊断故障类别、特性和严重等级。当获取故障诊断信息后,应根据无人机系统冗余配置并考虑通信丢帧、延迟等因素,重构无人机控制律,确保无人机的安全性和一定的任务执行能力。文献[10]、[17]综述了无人机故障诊断与容错控制方面的新发展。

2.3 无人机协同控制技术

在日益复杂的任务环境下,有效载荷、航行时间等限制条件影响单架次无人机执行繁重复杂任务的效率和成功率。多无人机协同能大幅度地拓展应用范围和任务使命,使得高效地完成复杂多变任务(如资源勘探与监测、森林火情监测与灭火、防灾救灾、边境巡逻等复杂搜寻任务;物资运输、空中加油、联合攻击与态势评估、区域多维定位及目标导引等战区任务)成为可能^[24-25]。目前,多无人机组队控制方法可分为最优控制、分布式控制、混合控制和势能场等。多无人机编队保持研究主要可分为反馈控制、刚性图及虚拟结构方法等。针对无人机与其他无人运动体编队控制方法与协同策略的研究可参见文献[26]。

无人机具备高度的自主性是多无人机高效地完成协同任务的必要条件之一^[27]。如图7所示,在多架无人机协同过程中,应充分利用各架无人机信息

交互、融合,根据各架无人机具备的气动特性和不同任务属性,制定出有效的协同策略。

诸多学者投入了大量精力进行无人机协同控制技术攻关,并取得了一定进展。Ren和Beard教授研究了通信拓扑时不变情况和时变情况多机一致性问题^[28]。加州大学Chen基于一致性问题,研究了多架无人机编队控制算法,并用于资源监测^[29]。美国麻省理工学院How课题组利用分布式学习策略,探索了多无人机协同控制的决策机理,在环境不确定性的情况下能获得较好的性能^[30];进一步结合增强学习机制,提出了多无人机智能协同控制系统框架^[31]。美国宾夕法尼亚大学Kumar研究团队提出了集群无人机协同控制解决方案,利用混合整数规划技术实现20架微型四旋翼无人机自主编队飞行^[32];进一步考虑到无人机动态特性、环境约束(如禁飞区)、编队成员通信条件等,采用进化优化方法研究微型无人机协同控制问题^[33]。新加坡国立大学Chen课题组亦针对多无人机分布式协同控制技术开展了研究工作。具体来说,Chen等研究者设计了非连续的控制策略用于多无人机编队保持,并利用Lipschitz Lyapunov函数和非平滑分析工具保证闭环控制系统的稳定性^[34]。清华大学钟宜生课题组研究了多无人机编队控制分析与设计问题,并成功使

五架旋翼直升机完成时变编队任务^[35]。北京航空航天大学段海滨等^[36]将多架无人机编队问题转化为多目标优化问题,并采用粒子群优化和遗传算法相结合的方法解决多无人机编队重构问题。

2.4 无人机构容错协同控制技术

随着无人机研发及应用的不断发展,无人机特别是无人机编队的安全性、可靠性及任务执行率越来越受到关注和重视^[37]。及时、安全、可靠地完成所设定的任务也自然对无人机单机与编队系统的安全性和可靠性提出了极高要求。一旦无人机在空中发生偶然性故障(如电机卡死、旋翼翼面破损、通信信号丢失等),不仅影响既定任务的执行,还将威胁各机安全性(如发生碰撞事故等)。因此,针对不同类型故障的潜在影响,如何自主地使得故障无人机安全返航,如何自主地重新协调与定位剩余健康无人机以顺利完成既定任务是亟待研究解决的关键科学问题。

为了解决上述问题并进一步提高多无人机协同执行复杂任务的可靠性和安全性,很大程度上取决于如图8所示的3个方面。1) 复杂任务分配/重分配决策技术;2) 感知与规避技术;3) 容错协同控制(FTCC)技术。因此无人机构容错协同控制技术是前述3个关键问题的综合应用。在无人机故障条件下,决策模块应综合各无人机的健康状态、协同飞行和环境态势等因素,重构各架无人机的任务目标,引导各机协同配合完成复杂任务。在无人机出现故障条件下,感知与规避模块应该:1) 通过处于正常工况的机载设备感知环境;2) 为可继续执行任务的无人机规划抵达指定目标的新航迹和为返航无人机规划安全回归的航迹,在此过程中不仅要避免编队中各架无人机发生碰撞,还要避免无人机与空中威胁发生碰撞。多无人机协同飞行过程中发生故障是影响各机自身安全和完成既定任务的重要因素,因此需要对多无人机状态、传感器、执行机构和通讯部件等进行实时检测,判断各架无人机关键部件是否失效,并诊断故障类别、特性和严重等

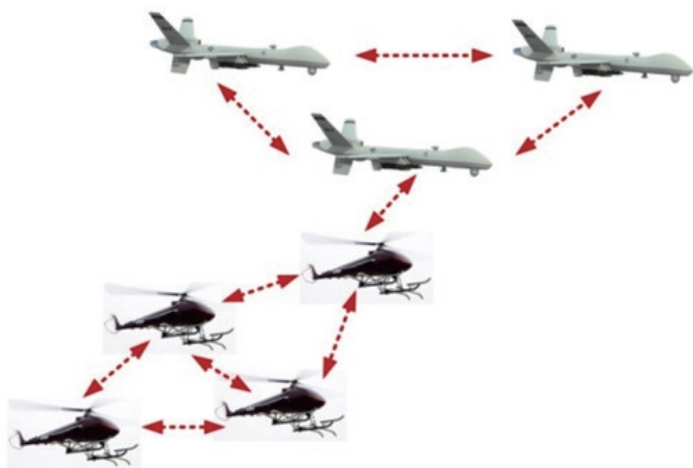


图7 多无人机协同示意

Fig. 7 Illustration of multiple UAVs cooperation

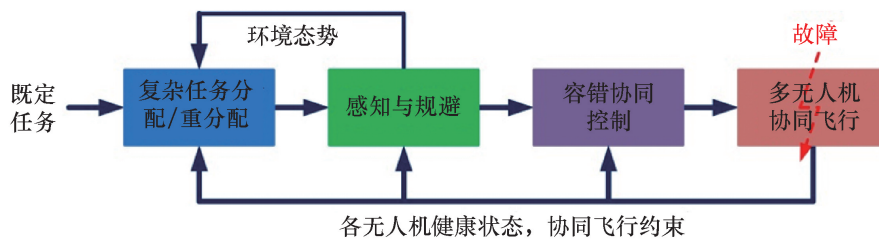


图8 多无人机容错协同控制示意

Fig. 8 Illustration of multiple UAVs with fault-tolerant cooperative control

级。当获取诊断信息后,利用系统冗余配置并考虑协同飞行约束条件,快速准确地对各无人机控制律进行重构,确保各架无人机能按照重新规划的航迹飞行,进而确保任务的执行效率。

目前,在国际上针对该问题的研究刚刚起步,清华大学周东华、南京航空航天大学姜斌、康考迪亚大学Zhang团队针对编队无人机的容错协同控制设计问题取得了前沿性地研究成果,重点针对编队无人机的通信部件、执行器故障等设计了容错协同控制算法^[37-41]。多伦多大学Liu团队研究了有限时间收敛的多无人机协同定位问题,并针对执行机构或通信部件故障探讨了容错协同控制问题^[42]。

中国科研工作者在研究中可采取理论研究与实验验证相结合、基础研究与关键技术应用研究相结合的方式,开展多无人机容错协同控制的关键基础理论、核心技术及其应用研究,形成原创性研究成果,为国内先进无人机研发提供理论基础和核心技术与工程应用支撑。

3 自主控制技术在无人机中应用示例

3.1 在无人机空中加油中的应用

3.1.1 无人机空中加油技术的进展

空中加油问题的提出最早出现在20世纪初,经过人类100多年的不断探索和尝试,目前有人飞机的空中加油已取得了长足的发展并积累了丰富的经验。随着无人机风靡全球,与之相关的空中加油技术用以解决无人机续航能力的问题也成为近年来全世界无人机科研领域新兴的一个研究方向^[43-45]。

无人机空中加油的优势主要体现在:能够增大受油无人机的飞行航程,延长滞空时间;能够增加无人机的有效载荷量,缓解燃油、航程及任务载荷之间的矛盾。

与有人机加油过程相比,无人机空中加油过程要求控制系统高度自主化。目前只有美国在实际试验中初步实现了无人机的自主空中加油,并将其作为下一代无人机研发的关键技术之一。因此,目前的研究成果距无人机自主空中加油技术的全面应用还存在一定距离。

3.1.2 无人机空中加油的分类及过程

无人机空中加油可分为被称为软管式的“插头-锥管式”加油和被称为硬管式的“伸缩套管式”两种加油方式(图9)。1)“插头-锥管式”空中加油系统,是英国航空公司在继承前人工作的基础上最早研发出来的,采用这种方式进行空中加油,只需在机头或者机翼前缘装一根固定的或可伸缩的受油管即可。而加油设备是由一条22~30 m长的软管和一个漏斗式浮锚所组成。浮锚上面装有机械自锁装置,呈漏斗状,重量比较轻。2)“伸缩套管式”空中加油



(a) 软式空中加油

(b) 硬式空中加油

图9 无人机空中加油示意

Fig. 9 Illustration of UAVs aerial refueling

设备最早由美国波音公司研制成功,它是一根刚性的伸缩管,平时置于机体内部,当需要执行空中加油任务的时候伸出来。伸缩管的中间有一个130°舵面以保证它在一定范围内活动。在执行空中加油任务时,当受油机与加油机靠近到一定距离后,加油机的操作人员通过人工操作(目前水平)使双方加油管接通并将加油杆锁定。加油结束后,可由受油方减速,加油杆开锁两机分离。

无人机的空中加油过程可分为4个阶段。1) 会合阶段:借助导引设备,通过航迹规划使受油机到达预定的加油准备空域。空中会合方式主要有伴航会合、定点会合、相迎会合和预定空域待机会合4种方式。2) 对接阶段:受油机慢慢调整飞行姿态,靠近加油机至加油管道对接相对合适的空域实现对接。对接阶段包括两个过程:无人机从会合编队到建立紧密编队的过程;无人机从紧密编队到建立加油编队的过程。3) 加油阶段:加油机和受油机通过管道连接实施加油,加油过程保持飞行姿态、相对速度和距离不变。4) 分离阶段:加油机和受油机脱离管道接触,各自按预先的脱离航迹规划退出加油过程。

3.1.3 无人机空中加油过程中的关键技术

1) 近距离观察定位的能力。在自动加油状态下,无人机必须具备高精度的测量装置实时测量加油机与受油机之间的姿态信息与相对位置。目前,在加油过程中主要采用单目及双目图像识别技术感知目标位置。在软式加油

时,要求受油无人机感知测量加油机浮锚位置;而对硬式加油而言,则要求加油机感知受油孔位置。对无人机加油来说,一般在群机协同情况下完成,受油机与加油机之间、受油机与受油机之间在不同情况下,需要规划不同的最优进入与退出路径,而且相互之间在近距离对接过程中必须规避其它无人机的干扰。因此,无人机多机空中加油是一个典型的需要解决好感知与规避、多机协同控制及容错协同控制等科学问题的具有挑战性的实际应用问题。

2) 协同控制导引律的设计。协同控制过程中导引律设计是空中加油技术的关键。如何令无人机与加油机会合、追踪加油机并成功与之对接,怎样平稳进入加油阶段甚至退出加油过程,都需要一整套导引算法作保证,该套导引算法应包含远距离下的会合导引律、近距离下的追踪导引律、协同编队控制律设计等^[44,46]。

3) 具有容错能力的自动卸荷技术。因为存在大气湍流和加油机尾涡流的影响以及飞行过程中受油机相对于加油管速度变化等因素的影响,如果采用的是硬式空中加油方式对无人机进行加油,那么就会在加油杆上产生有害载荷,因此如何将载荷力/力矩自动卸除,保证加油平稳,保障加油机、加油管、受油机的安全也是亟待解决的关键问题之一。

与会合及对接阶段不同,对接后加油过程的自动卸荷控制律尤为重要,特别是加油管控制面出现卡死或者部分失效的情况下载荷会急速增大,极易导致安全问题,因此在复杂飞行环境下具有容错能力的自动卸荷技术显得尤为重要。

3.2 在森林资源与火情监测中的应用

3.2.1 森林资源与火情监测的需求分析与现状

据第七次全国森林资源清查结果(2004—2008年),中国森林面积达19545.22万 hm^2 、森林覆盖率达20.36%。中国森林面积列世界第5位、森林蓄积列世界第6位、人工林面积居世界首位^[47]。1950—2011年,中国平均每年发

生森林灾害(包括火灾等)13067次,年均受害森林面积近653019 hm^2 ,对中国森林资源造成了巨大的损失。自2014年,国家林业局亦拟开展国家森林资源连续清查工作,以准确了解林地资源占用、征用状况,从而及时发现林地资源非法征占的不法行为,防止林业资源的人为及天然过度破坏造成生态、环境的破坏。

目前,面向森林资源与火情监测的方法包括:有人机、地面监测站及卫星遥感技术等^[1,47-49]。有人机体积较大,起降需要专门的机场,使用、维护成本较高。危险、复杂的环境和疲劳驾驶也是危害飞行员生命安全的潜在因素。地面监测站受限于森林地形,观测范围有限且机动性不强。现阶段森林资源及火灾所主要依赖的卫星遥感远程监测技术,其前期研发、构建以及后期通过运载火箭发射至预定轨道的资金投入巨大,硬件更新换代复杂、成本高;另外云雾等因素也会影响其图像质量,使得误判率大幅增加。对比以上几种监测技术,挂载远程监测传感器的无人机是一种能够提供快速、机动、强实时性、低投入成本和高回报率的满足森林资源与火情远程监测应用的理想技术。挂载远程监测传感器的多无人机除了具备现有监测技术的部分优点以外,还具有以下优势:1) 监测范围广泛,尤其是不受限于多云雾的天气;2) 挂载彩色与红外、紫外监测传感器的无人机可昼夜连续的飞行;3) 前期投入资金相对较少,无人机对作业环境的要求低,运行维护成本低,便于发射、飞行、安装、搬迁和加油;4) 相对于有人机,无人机用更少的材料制作,用更少的燃料飞行,更容易在任务结束后对它回收,有益于环境保护;5) 可以携带不同种类的挂载,可与新型的遥感设备相集成,执行任务灵活性高;6) 载人飞机在进行低空执行飞行任务时往往有一定的风险,而无人机只需要从基站发出正确的命令来控制,能够在高危地区长时间作业而不会危及人员生命安全;7) 由于近距离飞行,影像分辨率高,非常适合森林资源监测和管理,火情监测并提

供实时火场信息以便快速、准确灭火,无人机甚至也可直接用于灭火过程。这些任务的执行与完成最重要的是可以实现无人或者少量人员的投入,大幅降低误判率及对人员生命安全的威胁。使用方便、可靠性高和机动性强的多无人机系统和技术必将成为森林资源与火情的远程监测数据获得的重要工具,其技术研发、实际应用势在必行,并将获得较高的经济和社会效益。

针对森林火灾监测这一类复杂任务,文献[50]、[51]以森林火情监测等应用为背景初步研究了多无人机协同搜索与覆盖问题。最新文献[40]、[52]~[56]反映出了利用空中无人机、地面无人车协同并与遥感技术相结合进行森林火情监测及灭火等应用的国际前沿技术及发展趋势。

3.2.2 无人机用于森林资源与火情监测的关键技术

本文作者及团队在最近所发表的一篇文章中对国际范围内已有的研发工作进行系统回顾、总结与分析的基础上^[49],提出如图10所示系统结构与功能模块示意图。通过对火情监测、灭火过程的机理与功能分析,并与故障诊断和容错控制、容错协同控制等核心技术相结合,图10给出了解决这一问题的总体系统框架和功能。火灾的发生如同无人机系统作动器、传感器及元部件故障的发生一样,对火情的监测应用也类似可分类为3个基本功能:火情监测、火情诊断与火情预测。

通过对不同类型(固定翼型与旋翼机型)无人机的协同、容错协同及利用每个无人机上安装的机载传感器等设备所采集到的彩色、红外及紫外等图像与数字信号及其相应的机载或地面控制站图像与数字信号处理算法,即可实现对火情的及时、快速、准确检测、诊断与预测。若可与遥感卫星可提供的遥感信息进行有机融合、并与智能手机等智能通信设备互联,将使得这一需要具有大范围/面积搜索、长时间等待(火灾的发生如同故障的发生是小概率事件且具有随机性)、有限时间完成(火灾一

图 10 无人机资源与火情监测示意^[49]

Fig. 10 Illustration of forest resources and fire monitoring using UAVs

旦发生则蔓延很快,必须尽早发现、尽快扑灭)、要求必须快速准确反应等特征、并要求采用多个、多种类型无人机协同工作完成任务的具有挑战性的多学科融合应用的问题得到自动化、自主化、智能化的解决。其中所需解决的关键技术问题包括:森林资源与火情监测环境下考虑诸多不确定性和复杂性的多无人机协同建模研究;多无人机故障的实时在线监测与诊断技术研究;多无人机容错导航、制导与控制技术研究;容错协同决策机理研究;基于计算机视觉与图像处理技术的遥感技术及复杂环境下数据处理、传输及报警技术研究;多无人机及机载设备系统开发、设计、集成、飞行验证与实际应用等。

4 研究展望

无人机感知与规避研究的主要难点在于:1) 目前机载探测设备包括 TACS、ADS-B、红外雷达、激光雷达等特征各异的设备^[6]。多传感器信息融合的威胁估计与态势评估是该部分的研究重点及难点。2) 当前决策机理研究主要集中在提前设定好一系列的规则,并根据相应条件选取最优的规则。

因此如何在复杂未知环境下(超出预设规则),通过学习机制,快速并有效地做出决策的机理研究也是无人机感知与规避领域的另一挑战性技术难题;3) 在该项研究中,充分考虑无人机气动特性、实时性约束和物理约束等条件,从而得出安全可行的规避路径仍然值得深入探讨。

在多无人机协同控制研究中,应重点深入分析多无人机协同控制系统的可控性条件,尤其是可控性与多无人机协同系统中通信拓扑之间的关系;且迫切需要建立有效的多机协同控制模型,优化系统结构和工作流程。

在无人机故障诊断与容错控制技术中,主要挑战在于:1) 与有人机相比,无人机受体积、重量及载荷的限制,所配置的系统硬件冗余极其有限。如何优化系统配置,在硬件冗余有限条件下进行故障诊断与容错控制。2) 在系统发生故障时,如何在有限/固定的时间内准确诊断故障并实现容错控制。

在多架无人机协同飞行约束条件下,容错协同控制技术的研究趋势在于:1) 深入探索多种类型故障对于无人机编队的影响机制;2) 考虑模型不

确定性、环境不确定性等因素,充分利用解析冗余结合人工智能方法进行故障诊断;3) 容错协同控制分两层次进行,其一是系统级别的重构,即在故障发生情况下考虑编队成员的健康状态重构编队队形,其二是控制器级别的重构,即在故障发生情况下重构无人机飞行控制器,保证单架无人机的安全性。

得益于无人机控制技术的研究和发展,越来越多的行业将无人机作为空中运动平台来代替人执行复杂、耗时、单调及危险的任务,如森林火情监测与灭火、环境与资源保护、电网巡检、农林植保、公安消防、搜寻救助、货物递送等。但由于受限于无人机自主控制技术的发展现状,目前这些任务的完成仍然需要地面操控人员很大程度上的介入,而无人机自主控制关键技术(感知与规避技术、故障诊断与容错控制技术、协同控制技术以及容错协同控制技术)的研究会将无人机操作员在一定程度上从无人机操纵环中解放出来,让操作员只需专注于顶层任务决策,而这将会进一步促进无人机行业应用的发展。除此之外,上述关键技术的研究也将为多无人机集群飞行提供安全保障,解决有限空间内多无人机的冲突(此时多无人机即是协作关系,又是彼此的障碍物),并能以低成本、高度分散的形式完成任务,从而显著提升任务的执行效率,此时只需给多架无人机一个整体的任务,无人机集群自行完成任务分解、协同作业任务。

目前多无人机的通信模式主要以各个单机与地面站之间的通信方式为主,为集中式的通信、控制模式。在多无人机自主控制关键技术研究中,采用去中心化的动态自组网技术以及自主协同技术可以提升容错以及无人机之间的信息高速共享能力,当多无人机中的部分无人机失去任务完成所必须具备的能力时,整个无人机动态网络仍然具有一定的完整性,并可继续完成任务。基于高度自主化的无人机协同控制技术,多无人机可完成分布式广域监测、目标协同定位、区域协同探测等任务。美国空军在2016年5月17日发布

的《2016—2036年小型无人机系统飞行规划》^[57]中指出要在2036年实现多无人机系统具备集群作战能力,而这将同时会进一步促进民用无人机方向的行业应用以及多无人机自主控制中的感知与规避、故障诊断与容错控制、协同控制技术以及容错协同控制等关键性技术的研究与发展。

5 结论

随着材料、电子、通信、计算、信息、传感、驱动及控制技术的不断、快速进步,无人机系统近年来得到迅猛发展。在无人机研发过程中,无人机自主化是研究者重点关注的问题之一。本文阐述了无人机的分类和系统构架,并分析介绍了在无人机自主化进程中值得关

注的3项关键技术及其综合应用方法以及相关新进展。重点针对感知与规避、故障诊断与容错控制、多无人机协同控制技术以及容错协同控制技术进行探讨,列举了无人机空中加油过程和森林资源与火情监测中自主控制技术的具体表现及相关新进展,并对未来重点需要解决的关键问题进行展望。

参考文献 (References)

- [1] Valavanis K P, Vachtsevanos G J. Handbook of unmanned aerial vehicles[M]. Netherlands: Springer, 2015.
- [2] How J P, Fraser C, Kulling K C, et al. Increasing autonomy of UAVs[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2009, 16(2): 43-51.
- [3] Nonami K, Kendoul F, Suzuki S, et al. Autonomous flying robots: Unmanned aerial vehicles and micro aerial vehicles[M]. Tokyo: Springer, 2010.
- [4] Tomic T, Schmid K, Lutz P, et al. Toward a fully autonomous UAV: Research platform for indoor and outdoor urban search and rescue[J]. IEEE Robotics & Automation Magazine, 2012, 19(3): 46-56.
- [5] Gundlach J. Designing unmanned aircraft systems: A comprehensive approach[M]. Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2012.
- [6] Yu X, Zhang Y M. Sense and avoid technologies with applications to unmanned aircraft systems: Review and prospects[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74: 152-166.
- [7] Fahlstrom P G, Gleason T. Introduction to UAV systems[M]. Chichester, West Sussex: John Wiley & Sons, 2012.
- [8] 朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 等. 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(3): 115-120.
Zhu Huayong, Niu Yifeng, Shen Lincheng, et al. State of the art and trends of autonomous control of UAV systems[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(3): 115-120.
- [9] Department of Defense. Unmanned systems integrated roadmap FY2013-2038[R]. Reference Number: 14-S-0553, Washington DC: Department of Defense, 2013.
- [10] Zhang Y M, Chamseddine A, Rabbath C A, et al. Development of advanced FDD and FTC techniques with application to an unmanned quadrotor helicopter testbed[J]. Journal of Franklin Institute, 2013, 350(9): 2396-2422.
- [11] Dalamagkidis K, Valavanis K, Peigl L A. On unmanned aircraft systems issues, challenges and operational restrictions preventing integration into the national airspace system[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(7-8): 503-519.
- [12] Prats X, Delgado L, Ramirez J, et al. Requirements, issues, and challenges for sense and avoid in unmanned aircraft systems[J]. AIAA Journal of Aircraft, 2012, 49(3): 677-687.
- [13] Betts J T. Survey of numerical methods for trajectory optimization[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 1998, 21(2): 193-207.
- [14] Aoude G S, Luders B D, Joseph J M, et al. Probabilistically safe motion planning to avoid dynamic obstacles with uncertain motion patterns[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(1): 51-76.
- [15] Karimoddini A, Lin H, Chen B M, et al. Hybrid 3-D formation control for unmanned helicopters[J]. Automatica, 2013, 49(2): 424-433.
- [16] Fu, Y, Zhang, Y M, Yu, X. An advanced sense and collision avoidance strategy for unmanned aerial vehicles in landing phase[J]. IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine, 2016, 31(9): 40-52.
- [17] Qi X, Qi J T, Theilliol D, et al. A review on fault diagnosis and fault tolerant control methods for single-rotor aerial vehicles[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 73(1-4): 535-555.
- [18] Mahmoud M, Jiang J, Zhang Y M. Active fault tolerant control systems: Stochastic analysis and synthesis[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2003.
- [19] Zhang Y M, Jiang J. Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems[J]. Annual Reviews in Control, 2008, 32(2): 229-252.
- [20] 周东华, 孙优贤. 控制系统的故障检测与诊断技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994.
Zhou Donghua, Sun Youxian. Fault detection and diagnosis of control systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [21] 周东华, 叶银忠. 现代故障诊断与容错控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2009.
Zhou Donghua, Ye Yinzong. Modern fault diagnosis and fault-tolerant control[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2009.
- [22] 姜斌, 冒泽慧, 杨浩, 等. 控制系统的故障诊断与故障调节[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
Jiang Bin, Mao Zehui, Yang Hao, et al. Fault diagnosis and fault accommodation for control systems[M]. Beijing: National Defense Publisher, 2009.
- [23] Jiang J, Yu X. Fault-tolerant control systems: A comparative study between active and passive approaches[J]. Annual Reviews in Control, 2012, 36(1): 60-72.
- [24] 符小卫, 高晓光. 多架无人作战飞机协同作战的几个关键问题[J]. 电光控制, 2003, 10(3): 19-22.
Fu Xiaowei, Gao Xiaoguang. Study on the key problems of multipleUCAV cooperative combat[J]. Electronics Optics and Control, 2003, 10(3): 19-22.
- [25] 沈林成, 牛轶峰, 朱华勇. 多无人机自主协同控制理论与方法[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
Shen Lincheng, Niu Yifeng, Zhu Huayong. Theories and methods of autonomous cooperative control for multiple UAVs[M]. Beijing: National Defense

- Publisher, 2013.
- [26] Zhang Y M, Mehrjerdi H. A survey on multiple unmanned vehicles formation control and coordination: normal and fault situations[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Atlanta, USA: IEEE, 2013: 1087-1096.
- [27] Rasmussen S, Shima T. UAV cooperative decision and control: Challenges and practical approaches[M]. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics, 2009.
- [28] Ren W, Beard R W, Atkins E M. Information consensus in multivehicle cooperative control[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2007, 27(1): 71-82.
- [29] Han J L, Chen Y Q. Multiple UAV formations for cooperative source seeking and contour mapping of a radiative signal field[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 74(1): 323-332.
- [30] Ure N K, Chowdhary G, Cheng Y F, et al. Distributed learning for planning under uncertainty problems with heterogeneous teams[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 74(1): 529-544.
- [31] Geramifard A, Redding J, How J P. Intelligent cooperative control architecture: A framework for performance improvement using safe learning[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2013, 72(1): 83-103.
- [32] Kushleyev A, Mellinger D, Kumar V. Towards a swarm of agile micro quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4): 287-300.
- [33] Saska M, Vonasek V, Chudoba J, et al. Swarm distribution and deployment for cooperative surveillance by micro-aerial vehicles[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2016: 1-24.
- [34] Zhao S Y, Lin F, Peng K M, et al. Finite-time stabilization of cyclic formations using bearing-only measurements[J]. International Journal of Control, 2014, 87(4): 715-727.
- [35] Dong X W, Yu B C, Shi Z Y, et al. Time-varying formation control for unmanned aerial vehicles: Theories and applications[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(1): 340-348.
- [36] Duan H B, Luo Q N, Shi Y H, et al. Hybrid particle swarm optimization and genetic algorithm for multi-UAV formation reconfiguration[J]. IEEE Computational Intelligence Magazine, 2013, 8(3): 16-27.
- [37] Yu X, Liu Z X, Zhang Y M. Fault-tolerant formation control of multiple UAVs in the presence of actuator faults[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(12): 2668-2685.
- [38] Xu Q, Yang H, Jiang B, et al. Fault tolerant formation control of UAVs subject to permanent and intermittent faults[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2014, 73(1-4): 589-602.
- [39] Yang H, Jiang B, Zhang Y M. Fault-tolerant shortest connection topology design for formation control[J]. International Journal of Control, Automation and Systems, 2014, 12(1): 29-36.
- [40] Kamel M A, Ghamry K A, Zhang Y M. Real-time fault-tolerant cooperative control of multiple UAVs-UGVs in the presence of actuator faults[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Arlington, USA: IEEE, 2016: 1267-1272.
- [41] Liu Z X, Yuan C, Yu X, et al. Leader-follower formation control of unmanned aerial vehicles in the presence of obstacles and actuator faults[J]. Unmanned Systems, 2016, 4(3): 197-211.
- [42] Zhang P, Liu H T, Li X, et al. Fault tolerance of cooperative interception using multiple flight vehicles[J]. Journal of Franklin Institute, 2013, 350(9): 2373-2395.
- [43] Martínez C, Richardson T, Thomas P, et al. A vision-based strategy for autonomous aerial refueling tasks[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(8): 876-895.
- [44] Thomas P R, Bhandari U, Bullock S, et al. Advances in air to air refuelling[J]. Progress in Aerospace Sciences, 2014, 71(2): 14-35.
- [45] Thomas P R, Bullock S, Richardson S, et al. Collaborative control in a flying-boom aerial refueling simulation[J]. AIAA Journal of Guidance, Control, and Dynamics, 2015, 38(7): 1274-1289.
- [46] 屈耀红, 余自权, 张友民. 无人机空中加油过程中分数阶滑模会合导引控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(11): 1464-1469.
Qu Yaohong, Yu Ziquan, Zhang Youmin. Fractional-order sliding mode guidance control for rendezvous of unmanned aerial vehicles during air refueling[J]. Control Theory and Applications, 2015, 32(11): 1464-1469.
- [47] 舒清泰, 唐守正. 国际森林资源监测的现状与发展趋势[J]. 世界林业研究, 2005, 18(3): 33-37.
Shu Qingtai, Tang Shouzheng. Current situation and development trend of forest resources monitoring in worldwide[J]. Global Forest Research, 2005, 18(3): 33-37.
- [48] 李滨, 杨笑天, 王宏宇, 等. 森林防火中无人机的应用现状及发展趋势[J]. 科技创新导报, 2015, 12(5): 252-253.
Li Bin, Yang Xiaotian, Wang Hongyu, et al. Application status and development trend of UAV in forest fire prevention[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2015, 12(5): 252-253.
- [49] Yuan C, Zhang Y M, Liu Z X. A survey on computer vision based technologies for automatic forest fire detection using UAVs and remote sensing techniques[J]. Canadian Journal of Forest Research, 2015, 45(7): 783-792.
- [50] Sharifi F, Chamseddine A, Mahboubi H, et al. A distributed deployment strategy for a network of cooperative autonomous vehicles[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2015, 23(2): 737-745.
- [51] Sharifi F, Mirzaei M, Zhang Y M, et al. Cooperative multi-vehicle search and coverage problem in an uncertain environment[J]. Unmanned Systems, 2015, 3(1): 35-47.
- [52] Ghamry K A, Kamel M A, Zhang Y M. Cooperative forest monitoring and fire detection using a team of UAVs-UGVs[C]//Proceedings of International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Arlington, USA: IEEE, 2016: 1206-1211.
- [53] Yuan C, Liu Z X, Zhang Y M. Aerial images-based forest fire detection for firefighting using optical remote sensing techniques and unmanned aerial vehicles[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0464-7.

- [54] Ghamry K A, Zhang Y M. Fault-tolerant cooperative control of multiple UAVs for forest fire detection and tracking mission[C]//Proceedings of International Conference on Control and Fault-Tolerant Systems. Barcelona, Spain: IEEE, 2016: 133-138.
- [55] Kamel M A, Ghamry K A, Zhang Y M. Real-time fault-tolerant cooperative control of multiple UAVs-UGVs in the presence of actuator faults[J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2017, doi: 10.1007/s10846-016-0463-8.
- [56] Vachtsevanos G, Tang L, Drozeski G, et al. From mission planning to flight control of unmanned aerial vehicles: Strategies and implementation tools[J]. Annual Reviews in Control, 2005, 29(1): 101-115.
- [57] Deputy Chief of Staff for Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance(ISR). Small unmanned aircraft systems (SUAS) flight plan: 2016-2036[R]. Washington DC: US Air Force, 2016.

New developments on key techniques in UAV autonomous control

ZHANG Youmin^{1,2}, YU Xiang², QU Yaohong³, LIU Ding¹

1. Shaanxi Key Laboratory of Complex System Control and Intelligent Information Processing; Department of Information and Control Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
2. Department of Mechanical and Industrial Engineering, Concordia University, Montreal H3G 1M8, Canada
3. School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China

Abstract Unmanned aerial vehicles (UAVs) have drawn significant interests worldwide due to the huge potential of being applied to both civilian and military areas. Autonomy is considered as one of the most challenging issues in the research and design process of UAVs. Firstly, classifications and system architectures of UAVs are presented in this paper. Secondly, since sense and avoid (S&A), fault detection and diagnosis (FDD) and fault-tolerant control (FTC), and cooperative control are regarded as the key techniques for autonomous control of UAVs, the principles of the three key techniques are described; and the latest development on the integration of the three key techniques, known as fault-tolerant cooperative control (FTCC), is also presented. Then, the key UAV technique applications to aerial refueling and forest resources and fire monitoring and detection are introduced. Finally, technical challenges and future directions are discussed.

Keywords UAVs; autonomous control; sense and avoid; fault detection and diagnosis and fault-tolerant control; cooperative control; fault-tolerant cooperative control

(责任编辑 刘志远)