

文章编号: 1001- 2486(2010) 03- 0115- 06

# 无人机系统自主控制技术研究现状与发展趋势\*

朱华勇, 牛轶峰, 沈林成, 张国忠

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 无人机系统是未来进行信息对抗、夺取信息优势、实施火力打击的重要手段。“自主性”是无人机系统区别于有人机最重要的技术特征,实现无人机系统的自主控制,提高其智能程度,是无人机系统的重要发展趋势。对无人机系统自主控制问题进行了阐述,首先分析了无人机系统自主控制技术的发展需求,然后介绍了自主控制的概念和自主等级的划分;分析了无人机系统自主控制技术的研究现状,提出了无人机系统自主控制的关键技术问题,主要包括体系结构、感知与认知、规划与控制、协同与交互等;最后对无人机系统自主控制技术的发展趋势进行了展望。

**关键词:** 无人机; 自主控制; 环境感知; 任务规划; 协同控制

**中图分类号:** TP18; TP24; TP391      **文献标识码:** A

## State of the Art and Trends of Autonomous Control of UAV Systems

ZHU Hua-yong, NIU Yi-feng, SHEN Lin-cheng, ZHANG Guo-zhong

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Unmanned aerial vehicle systems (UAVS) will be an important means of executing information counter, attaining information advantage, and carrying out precision strike in the future. Autonomy is the first technical feature of UAVS, which is different from manned aerial vehicles in nature. To realize autonomous control of UAVS and improve its intelligence degree is an important development trend of UAVS. Autonomous control of UAVS was reviewed in this paper. First development requirement for autonomous control of UAVS was analyzed, and the concept of autonomous control and the autonomy level was introduced. Then the researches in this field were investigated, and the relevant key techniques of autonomous control of UAVS, including the system structure, perception and cognition, planning and control, cooperation and interaction et al, were discussed respectively. Finally, the research areas were proposed to address the development directions.

**Key words:** unmanned aerial vehicle; autonomous control; environment perception; mission planning; cooperative control

自主控制技术是无人机系统区别于有人机,实现无人操控和执行各种任务的关键。当前无人机系统的智能程度和自主水平还比较低,无人机的控制方式主要以操作员简单遥控和预编程控制为主。这种控制方式无法应对高度不确定的战场环境的变化,不能有效处理各种突发威胁,提高生存概率;无法根据需要进行实时目标重定位,精确打击时敏目标。随着无人机系统智能化、信息化水平的提高,人机智能融合的交互控制逐渐处于主导地位。人机智能融合的交互控制对通信系统的能力要求较高,在面临复杂的战场环境时,由于存在通信中断、链路带宽和距离受限以及人员操控能力等因素的限制,人机智能融合的交互控制仍存在很大的缺陷。即使在通信保持畅通的情况下,实现无人机自主控制,也可减轻操作员的工作负荷,实现“一对多”控制,从而提高作战效能。美国国防部最新版《2009- 2034 财年无人系统综合路线图》<sup>[1]</sup>指出,无人机系统自主能力和鲁棒性的提高,能够改进对战场的感知,提高目标定位的速度和精度,增强生命力,扩大任务的灵活性,计划到 2015 年无人机系统将实现感知- 规避能力,到 2034 年实现在线态势感知,具有完全自主能力。美国空军<sup>[2]</sup>也认为,未来无人作战飞机首要技术需求是增加自主性,提高协同能力。到 2047 年,技术的进步将使完成“观察、判断、决策、行动”(Observe,

\* 收稿日期: 2009- 09- 29

基金项目: 国家部委资助项目(6138101001)

作者简介: 朱华勇(1971-),男,副教授,博士。

Orient, Decide, Act, OODA) 回路的时间缩短为微秒或纳秒级<sup>[3]</sup>。因此,全自主控制是无人机系统未来发展的必然方向。

实现完全自主控制的技术目前主要有两类,一类是多层控制结构,目前已研制出用于无人车辆的四层软件控制结构<sup>[4]</sup>。另一类是人工智能专家系统。自主控制技术的发展也取决于高性能的传感器、嵌入式计算机、实时操作系统以及模式识别与人工智能技术的突破。预计到2030年,微处理器将接近人脑的存储容量,采用10ns颗粒可将每平方英寸的存储密度增加到1000GB,处理速度将从 $10^6$ MIPS(百万条指令每秒)提高到 $10^{12}$ MIPS<sup>[5]</sup>,达到人脑的处理水平,自主控制技术水平将得到极大的提高。

## 1 无人机系统自主控制技术发展需求

未来无人机系统自主控制的技术需求主要体现在如下几个方面:

(1) 全面的环境感知与智能战场态势认知能力。与现有的有人机系统相比,未来的无人机系统将具备更加全面的环境感知能力,包括在高度对抗的环境和恶劣气象(如雷暴、风切变、紊流)条件下,对更广阔范围的自然环境目标与敌我目标的感知与识别等;同时,无人机系统在自主性能方面的提升将要求无人机系统具有智能战场态势的认知能力,为复杂环境中的自主控制提供技术基础。

(2) 复杂条件下的自主导航、规划与控制能力。无人机系统将采用新一代自主导航与智能控制技术,既能够在局部范围内的精确导航定位,对无人机进行复杂的动作控制,也能够实现具有大范围长航时高精度定位能力的远程精确打击。无人机系统在具备环境感知与战场态势认知能力的基础上,将能够进行复杂条件下的自主规划与决策,具有灵活的自主性和抗干扰能力。

(3) 人机智能融合与学习适应能力。无人机系统的典型特征是“平台无人,系统有人”。随着无人机系统智能化水平的提高,具有自主控制能力的各类无人机系统等将与有人系统共同完成作战任务,并且通过无人机系统具备的人机智能融合与学习适应能力,将逐渐实现无人机与有人系统的高效协同。

(4) 多平台分布式协同能力。各类无人机系统在提高单个平台自主能力的同时,多平台之间利用C<sup>4</sup>KISR系统及数据链实现分布式协同也是一个重要的发展趋势,如协同侦察、协同监视、协同作战等。多无人机、有人/无人作战飞机的协同将获得更大的作战效能,成为今后信息化战场的重要特点。

## 2 无人机系统自主控制技术发展现状

### 2.1 自主控制概念与自主控制等级

Pachter等<sup>[6]</sup>认为自主控制是在非结构化环境下采取的“高度”自动控制,但这种定义强调无人干预,没有考虑环境感知等关键问题。Boskovic等<sup>[7]</sup>认为自主控制包括在线感知、信息处理和控制重构等功能。由于没有人的直接控制,自主控制强调自我决策、自我控制<sup>[8]</sup>,所以,自主控制可看作自动控制的高级发展阶段。常规控制和自主控制的区别在于,前者是基于数据驱动的,几乎不具有智能;而后者是基于信息(如图像),甚至是知识驱动的,可以具有很高程度的智能,并能够应对意外的情形、新的控制任务和容忍一定程度的失败。

无人机系统自主控制是指在不需要人的干预条件下,系统通过在线环境感知和信息处理,自主生成优化的控制策略,完成各种战略和战术任务,并且具有快速而有效的任务自适应能力。无人机系统自主控制面临的挑战包括复杂、非结构化、意外的动态环境,不确定的、意外的事件和态势,远距离长航时条件下复杂网络通信链路故障、突发系统故障、实时外部威胁等环境不确定性;高度复杂决策空间和强实时决策能力等超越了人的认知能力范围的任务复杂性;高速、高机动性、高隐身性平台以及复杂柔性的系统结构等系统复杂性。将智能控制<sup>[9]</sup>和常规控制方法相结合是解决自主控制的一种有效方法,能够处理环境的高度不确定性,称为智能自主控制。自主控制和智能控制的联系在于实现自主是控制的目标,而智能控制是实现自主的有效途径<sup>[8]</sup>,其智能是指系统拥有自主能力的程度。

为了衡量无人机系统的自主水平,需要对自主能力进行合理的等级划分。但目前的自主控制等级划分还停留在较高层的定性描述阶段,缺乏合理有效的理论支撑,也没有具体的定量度量指标。

Ziegler<sup>[10]</sup>将自主分为3级,分别是:1)实现所描述目标的能力;2)适应主要环境变化的能力;3)发展自我

目标的能力。ASB<sup>[11]</sup>描述了一套从遥控到自主集结的自主水平集合。NASA<sup>[12]</sup>定义系统的自主等级随着态势感知能力的增加而增加。2002年,美国空军研究实验室(AFRL)<sup>[13]</sup>按照OODA模型确立了无人机系统自主控制水平(Autonomous Control Level, ACL),共有11级,这个划分在空军中得到了较为广泛的应用。随着无人机系统自主能力的提升,无人机系统从遥控驾驶(0级)到完全自主(10级),相应的对无人机的感知/认知、分析/协调、规划与决策、任务能力等方面提出了不同的需求。美国国防部在《无人机系统路线图2005-2030》提出了自主等级划分方法,较多地考虑单平台自主到多平台协同的自主水平的时序发展方向<sup>[14]</sup>。美国国家标准与技术研究所ALFUS特别工作组(Autonomy Levels for Unmanned Systems)<sup>[15]</sup>试图对所有无人系统的自主能力进行等级划分,定义自主为实现目标的能力,自主水平共分为10级,主要考虑任务复杂性、环境难度和人机交互程度等因素。

## 2.2 自主控制技术研究现状

目前,国外针对无人机系统自主控制技术研究已开展了许多卓有成效的工作,如Johnson等<sup>[16]</sup>提出了可靠自主控制技术,Ward等<sup>[17]</sup>提出了无人作战飞机的智能自主控制,Cheng<sup>[18]</sup>认为模型预测控制(MPC)可以提高UAV自主水平,Reichard等<sup>[19]</sup>研究了自主控制的智能态势感知。在无人机系统方面,目前美军“捕食者”(RQ-1/MQ-1)、“全球鹰”(RQ-4)都实现2~3级ACL。联合无人空战系统(J-UCAS)以及后续的X47-B将实现5~6级ACL,最终使得单个地面站控制4架J-UCAS飞机协同执行目标打击任务。无人战斗武装旋翼机(UCAR)将实现7~9级ACL,实现远程复杂低空环境下的自主任务能力,但目前还有很多困难有待克服。2008年8月,洛·马公司智能控制与自主重规划无人系统(ICARUS)动态地重规划了系统任务,使无人机群在动态变化的环境中能够完成复杂的任务。

国内对无人机系统相关技术的研究起步较晚,主要解决了飞行控制问题,平台的自主能力不强,无法执行诸如高密度防空体系下的突击和大纵深精确打击等复杂任务。其中,周锐等<sup>[20]</sup>提出了无人战术飞机分层式智能控制结构,张新国<sup>[21]</sup>等探讨了不确定环境下的自主飞行控制面临的挑战,唐强等<sup>[22]</sup>探讨了多无人机自主飞行控制中的飞行规划与重规划、自主飞行控制结构和自主着陆等问题,杨晖等<sup>[23]</sup>提出了无人作战飞机可变权限自主的结构和方法,高劲松等<sup>[24]</sup>研究了无人机的自主性,牛轶峰等<sup>[25]</sup>提出了基于图像融合的无人机自主控制策略,王宏伦等<sup>[26]</sup>阐述了无人机自主飞行控制系统组成等。

总的来说,国内外已有自主控制水平普遍不高,缺乏对于不确定事件的感知、判断与处理能力,只能实现无人机系统在相对确定环境下的自主或半自主控制,要实现在快速变化的不确定环境下,真正意义上的无人机系统自主控制,目前技术尚不成熟。随着技术的发展,无人机系统指挥控制开始逐渐过渡到“人在回路”(man-on-the-loop)的监督控制(Supervisory Control)<sup>[3]</sup>,实现完全自主控制。

## 3 无人机系统自主控制关键技术

AGARD<sup>[27]</sup>报告认为通信、协调、目标识别与分配、冲突消解是自主控制研究的难题;SAB<sup>[28]</sup>报告认为人机接口和直接控制的缺失是战术无人机首要解决的问题。Churchman<sup>[29]</sup>和Chandle<sup>[30]</sup>等认为相对于人机接口、通信和目标识别,决策是实现自主最为困难的问题,不确定环境中快速在线的重规划是自主控制的关键问题。Clough等<sup>[31]</sup>认为自主控制的关键问题在于态势感知、决策分析和通信协同。美国国家研究委员会<sup>[32]</sup>认为规划与决策、传感与感知、监控与诊断、网络与协同等是无人系统的关键技术。Valavanis等<sup>[33]</sup>认为时空建模技术、智能分层控制、嵌入式计算、网络化通信、传感器和感知技术等是实现无人机系统自主控制的关键问题。综合无人机系统发展需求和目前国内外现状,本文认为无人机系统自主控制的关键技术包括体系结构、感知与认知、规划与控制、协同与交互等。

### 3.1 自主控制体系结构

无人机系统自主控制系统主要任务是把各个子系统连接成一个整体;统一管理调度各个子系统,使各子系统步调一致地完成总体任务,其设计的优劣直接关系到无人机系统整体性能的发挥和智能水平的高低。自主控制体系结构可分为三类:

(1) 分层递阶式结构。分层递阶式结构由Saridis<sup>[9]</sup>提出,包括组织级、协调级和执行级。分层递阶式结构遵循“感知-思维-行动”的基本规律,层次向上,智能增加,精度降低;层次向下,智能降低,精度

增加,较好地解决了智能和控制精度的问题,其缺点是缺乏高度智能性的实时反应能力。

(2) 包容式体系结构。包容式体系结构由 Brooks<sup>[34]</sup> 提出,模拟了动物反应式行为的特点,采用“感知—动作”结构。该结构强调了单元的独立、并行工作,缺少全局的指导和协调,对于长远的全局性的目标跟踪缺少主动性,目的性较差,容易陷入局部极小。

(3) 分布式体系结构。分布式体系结构<sup>[35]</sup> 主要采用多智能体系统(Multi-Agent System, MAS) 的形式。这种结构具有自适应、自组织和良好的协调性能,通过协调方式完成繁杂的整体操作,可产生一般分层递阶式或包容式结构难以达到的灵活性和智能性,但是 MAS 结构需要智能体之间紧密联系,由于没有中央处理机制,难以有效处理系统冲突。

### 3.2 感知与认知

无人机系统任务由在安全区域执行侦察监视任务向在高危区域执行主流作战任务的方向发展,必须解决复杂环境感知与认知技术,实现战场态势理解与生成<sup>[36-37]</sup>, 研究内容包括:

(1) 非结构化环境感知。非结构化环境感知将实现自然环境目标与敌我目标的感知与识别,提高无人机系统战场态势的理解。恶劣气象条件决定了环境感知与识别任务的艰巨性,而复杂高对抗的环境状况进一步加大了无人机系统实现高可靠、强实时环境感知的难度。需重点解决以下问题:面向复杂环境的拼阵摄像、大范围图像拼接处理、面向无人机系统的高速视觉计算、开放环境下的目标检测与识别、多传感器信息融合的威胁估计与态势评估等。

(2) 复杂环境认知与学习。环境认知技术使无人机系统具备信息收集和环境认知能力,能够感知、识别、理解其所处的战场环境,是无人机系统实现高层次自主的基础。借鉴人类认知过程突破认知信息处理技术,对无人机系统发展极为重要。需重点解决以下问题:人类生物视觉的环境认知机理、仿生物视觉的目标识别、复杂环境认知算法、基于认知的学习和推理方法、高效的环境建模手段等。

### 3.3 规划与控制

规划与控制技术主要解决无人机面对复杂环境的不确定性,如何实现自主行为,提高无人机系统的作战效能。研究内容包括:

(1) 实时规划/重规划与监督控制。实时规划/重规划<sup>[38-39]</sup> 与监督控制主要解决无人机系统执行任务过程中任务计划的实施,并且根据突发状况进行动态任务重规划等问题,提高无人机系统作战响应的实时性。需重点解决以下问题:对抗环境下自动任务规划技术(包括航线、传感器、武器载荷以及通信规划)、快速动态任务重规划技术、智能任务管理和监督控制技术、任务状态监视与告警管理等。

(2) 多机协调规划与控制。多无人机协调规划与控制<sup>[40-42]</sup> 必须对多无人机在实际环境中运行时所面临的感知、执行、通信以及环境动态变化等非理想情况,甚至可能遇到的失效等极端情况进行充分考虑与处理。需重点解决以下问题:多无人机任务分配与协调、多任务冲突检测与消解、多无人机协同航路规划、编队运动协调规划与控制、集群自组织等。

(3) 机载智能自主控制。实现机载智能自主控制将为无人机系统的实战使用奠定基础。智能自主控制是指无人机不依赖外界指令和设备支持,在不确定的环境中仅依靠自身的控制设备完成所规定的任务的关键能力。需重点解决以下问题:自主飞行控制、感知与回避、自主行为决策、故障预测与自修复控制、任务自适应控制等。

### 3.4 协同与交互

协同与交互技术主要解决多无人机,以及人机之间的协作行为,实现有人/无人平台协同作战、多无人平台协同作战,研究内容包括:

(1) 协同作战系统技术。协同作战系统<sup>[43]</sup> 主要实现无人机与有人机、任务控制站、指控系统的互联互通互操作,支持有人/无人系统协同执行各种任务。需重点解决以下问题:开放式实时协同体系结构、跨平台信息分发、多平台多源数据时空一致性、资源管理调度、多种协同支持机制等。

(2) 人机系统综合技术。人机系统综合技术促使人和计算机二者的智能进行有效融合,实现高效的人机协同,提高无人作战系统的可用性和整体作战效能。在高度自主的无人机系统中,人仍然需要提供高层目标。需重点解决以下问题:无人机平台间交互、无人机系统间交互、人机功能动态分配、战术态势

/平台状态/任务协同综合显示、脑机接口等。

#### 4 无人机系统自主控制技术发展趋势

无人机系统自主控制技术研究,在国内目前还处于起步阶段。要实现无人机在动态不确定复杂环境和时间敏感态势下的自主控制,实现对信息的快速有效的获取、传输、处理以及平台的控制能力,目前还缺乏有效的手段。针对无人机系统自主控制技术需要进一步研究的内容有:

(1)开展无人机离机自主控制代理技术研究。面临不确定战场环境和复杂的通信条件,若在任务控制站配置离机自主控制代理,将能够与机载自主控制器并行工作,二者互为备份、无缝连接,同时可以兼容平台的不同自主控制能力。离机自主控制代理将完成基本的避碰、威胁规避、自主飞行等控制任务,实现无人机基本任务剖面的自动控制。控制权将在任务控制站和机载自主控制器间无缝迁移,实现可变权限自主控制,从而减少操作员工作负担。

(2)开展不确定环境下多无人机协调控制技术研究。在未来日益复杂的作战环境下,单平台所能发挥的作战效能将极为有限,无人机系统的作战模式由单平台逐步发展为更灵活的单任务站控制多无人机协同作战方式。基于离机自主控制代理技术,多无人机任务间的协调控制可在任务站由多个代理之间的协调以及人的决策来完成,需要开展多个代理之间的分布式决策与协调控制技术研究,建立有效的多机协调控制模型,优化系统结构和工作流程。

(3)开展有人/无人机协同控制技术研究。美国在《无人机系统路线图 2005-2030》<sup>[14]</sup>已明确了今后无人机的发展步骤:有人机与无人机协同作战(有人机主导)→无人机与有人机协同作战(对等条件)→无人机自主作战。需要开展提高多无人机、有人机/无人机协同作战能力的方法研究,解决有人机和无人机无缝集成问题,使有人机和无人机能够有机协调运行,实现有人机和无人机机场共同起降,共享作战空域和通信频段,从而提高有人/无人机协同作战效能。

(4)开展多无人机集群自组织技术研究。无人机自组织技术主要探索具有低成本优势的无人机集群在高度对抗的战场环境中面对动态变化的任务,如何自主组网完成多目标搜索、跟踪和打击等任务。借鉴自然界的自组织机制,将使得具备自主能力的多架无人机能够在没有集中控制的情况下通过相互信息交互产生整体效应,实现较高等级的自主协作,从而能在尽量少的人的干预下完成预期作战任务。

(5)开展面向环境感知的图像信息融合技术研究。机载传感器已经向成像化发展,大多数图像信息融合方法是针对像素级的,同时图像理解技术不很成熟,无法直接实现环境感知。单平台机载传感器的图像融合,以及多平台多源传感器的图像融合正在进行理论研究、技术验证和系统开发,还没有完全实现包括来自无人机或其它渠道在内的全源情报信息融合,不能将其合成为一个直观的全息图像画面。多无人/有人机图像融合、无人机图像与非图像信息融合的研究也鲜见报道。

(6)开展基于故障预测的任务规划技术研究。综合健康管理技术是提高无人机安全性、可靠性及可维护性并有效地降低成本的重要技术途径。目前,其中监测与诊断技术相对比较成熟,而预测特别是寿命预测还具有很大的挑战性。除了对突发情况进行实现任务规划外,迫切需要基于故障预测进行实时任务规划与重规划,提高任务计划的提前性和实用性,优化系统作战效能。

(7)开展人系统综合显控技术研究。人系统综合显控技术的核心在于支持操作员和控制系统之间的协作问题。智能控制系统提供的状态和建议必须吸引操作员的注意力并使之容易理解,而操作员则应当以自然的方式给智能控制系统以恰当的指导。如何有效利用人机各自特点实现人机智能融合,提高人系统综合效能需要深入研究。

(8)开展无人机系统智能发育机制研究。针对如何实现无人机的复杂环境深度认知问题,力争在人类智能发育机理和模型算法研究方面取得新的突破性进展,为无人机系统建立智能发育机制,使得无人机系统具有与人类相似的渐进稳定学习和智能发展机制,大大提高无人机系统的学习能力、推理能力和环境适应能力。

#### 5 结束语

无人机系统自主控制技术是一个富有挑战性的课题,提高无人机系统的自主性是永恒的追求目标。

本文分析了当前无人机系统自主控制技术的研究现状,对无人机系统自主控制的关键技术,包括自主控制体系结构、感知与认知、规划与控制、协同与交互等,进行了深入探讨,提出了重点需要解决的问题,并指出无人机系统自主控制技术进一步研究方向。

## 参考文献:

- [1] Office of the Secretary of Defense, FY2009–2034 Unmanned Systems Integrated Roadmap[R]. DoD, Washington DC 2009.
- [2] UCAV Research and Technology Development – A USAF Perspective[C]//Defense IQ's 7<sup>th</sup> Annual UCAV Conference, London, 2007.
- [3] Headquarters, United States Air Force Unmanned Aircraft Systems Flight Plan 2009–2047[R]. USAF, Washington DC, 2009.
- [4] 蔡自兴. 智能控制(第二版)[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [5] Office of the Secretary of Defense, Unmanned Systems Roadmap 2007–2032[R]. DoD, Washington DC 2007.
- [6] Pachter M, Chandler P R. Challenges of Autonomous Control[J]. IEEE Control Systems, 1998, 18(4): 92–97.
- [7] Boskovic J D, Passanith R, Mehra R K. Multi-layer Architecture for Intelligent Control of Unmanned Aerial Vehicles[C]//AIAA 2002–3473: 1–11.
- [8] Arisaklis P J, Passino K M. An Introduction to Intelligent and Autonomous Control[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [9] Saridis G N. Machine Intelligent Robots: A Hierarchical Control Approach[C]//Machine Intelligence and Knowledge Engineering for Robotic Applications. Springer-Verlag, Berlin, 1987.
- [10] Ziegler B P. High Autonomy Systems: Concepts and Models[C]//Proc AI, Simulation, and Planning in High Autonomy Systems, 1990.
- [11] Army Science Board, Ad Hoc Study on Human Robot Interface Issues[R]. Arlington, Virginia, 2002.
- [12] Proud R W, Hart J J, et al. Methods for Determining the Level of Autonomy to Design into a Human Spaceflight Vehicle A Function Specific Approach[C]//Proc. of the 2003 Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop, Gaithersburg, MD, 2003.
- [13] Clough B T. Metrics, Schmetrics! How the Heck Do You Determine A UAV's Autonomy Anyway[C]//Proc the Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. Gaithersburg, Maryland, 2002.
- [14] Office of the Secretary of Defense, Unmanned Aircraft Systems Roadmap 2005–2030[R]. DoD, Washington DC 2005.
- [15] Huang H M. Autonomy Levels for Unmanned Systems( ALFUS) Framework Volume I: Terminology Version 2. Q[R]. National Institute of Standards and Technology, 2008.
- [16] Johnson T L, Sutherland H A, Bush S F, et al. The TRAC Mission Manager Autonomous Control Executive[C]//Proc IEEE Aerospace Conf. 2001, 2: 639–646.
- [17] Ward D G, Shama M, Richards N D, et al. Intelligent Control of Unmanned Air Vehicles-Program Summary and Representative Results[C]//AIAA, 2003–6641: 1–10.
- [18] Cheng Z Q. Dynamic Inversion and Model Predictive Control for Unmanned Aerial Vehicles[D]. Doctoral dissertation, University of Ottawa, Canada, 2004.
- [19] Reichard K M, Banks J, Eddie C C, et al. Intelligent Self-Situational Awareness for Increased Autonomy, Reduced Operational Risk, and Improved Capability[C]//AIAA, 2005–2692: 1–8.
- [20] 周锐, 李惠峰, 陈宗基. 无人战术飞行器的自主控制[J]. 控制与决策, 2001, 16(3): 344–346.
- [21] 张新国. 从自动飞行到自主飞行—飞行控制与导航技术发展的转折和面临的挑战[J]. 飞机设计, 2003, (3): 55–59.
- [22] 唐强, 朱志强, 王建元. 国外无人机自主飞行控制研究[J]. 系统工程与电子技术, 2004, 26(3): 418–422.
- [23] 杨晖. 无人作战飞机自主控制技术研究[J]. 飞行力学, 2006, 24(2): 1–4.
- [24] 高劲松, 邹庆元, 陈哨东. 无人机自主性概念研究[J]. 电光与控制, 2007, 14(5): 58–61.
- [25] 牛轶峰, 沈林成, 龙涛. 攻击型无人飞行器自主控制技术研究综述[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(3): 391–395.
- [26] 王宏伦, 王英勋. 无人机飞行控制与管理[J]. 航空学报, 2008, 29(S1): 1–7.
- [27] Mission Planning Systems for Tactical Aircraft (Pre-flight and In-flight)[R]. AGARD–AR–313, DEC 1992.
- [28] USAF Scientific Advisory Board. UAV Technologies and Combat Operations[R]. Vol. 1: Summary, SAB–TR–96–01, Nov 1996.
- [29] Churchman D A. Control Automation Task Allocation Program[C]//Proc National Aerospace and Electronics Conf. Dayton, OH, 1994: 587–597.
- [30] Chandler P R, Pachter M. Research Issues in Autonomous Control of Tactical UAVs[C]//Proc American Control Conf, 1998: 394–398.
- [31] Clough B T. Unmanned Aerial Vehicles-Autonomous Control Challenges, A Researcher's Perspective[C]//AIAA, 2003–6504: 1–15.
- [32] Committee on Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations, National Research Council. Autonomous Vehicles in Support of Naval Operations[R]. The National Academies Press, 2005.
- [33] Valavanis K P. Advances in Unmanned Aerial Vehicles, State of the Art and the Road to Autonomy[M]. Springer, 2007.
- [34] Brooks R A. A Robust Layered Control System for a Mobile Robot[J]. IEEE J Robotics and Automation, 1986, 2(1): 14–23.
- [35] 朱森良, 杨建刚, 吴明春. 自主式智能系统[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2000.
- [36] Ollero A, Maza I. Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles[M]. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007.
- [37] 徐宗本, 张讲社. 基于认知的非结构化信息处理: 现状与趋势[J]. 中国基础科学, 2007, (6): 4–8.
- [38] Dan L G, Paul G G. Agent-based Simulation Environment for UCAV Mission Planning and Execution[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. Denver, Co, AIAA–2000–4481. 2002.
- [39] Pritchard D E R. Dynamic Route Replanning and Retasking of Unmanned Aerial Reconnaissance Vehicles[D]. Air Force Institute of Technology, 2000.
- [40] Rasmussen S, Shima T, Rasmussen S J. UAV Cooperative Decision and Control: Challenges and Practical Approaches[M], Society for Industrial Mathematics, 2008.
- [41] 霍霄华, 陈岩, 朱华勇, 等. 多UCAV协同控制中的任务分配模型及算法研究[J]. 国防科技大学学报, 2006, 28(3): 83–88.
- [42] Chandler P R, Pachter M, Swaroop D. Complexity in UAV Cooperative Control[C]//Proceedings of the American Control Conference. Anchorage, Alaska, 2002.
- [43] Pitarys M J. JUCAS Common Systems & Technologies Industry Day for Common Operating System (COS)[R]. Development, 2005.