



国防科技著作精品译丛
无人机系列



Springer

Multiple Heterogeneous
Unmanned Aerial Vehicles

异构多无人机

【西班牙】Aníbal Ollero Iván Maza (Eds.) 著
朱永贤 彭鹏菲 毛盾 张建强 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

异构多无人机

**Multiple Heterogeneous Unmanned
Aerial Vehicles**

[西班牙] Aníbal Ollero Iván Maza (Eds.) 著
朱永贤 彭鹏飞 毛盾 张建强 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2010 -029 号

图书在版编目(CIP)数据

异构多无人机 / (西) 奥列罗, (西) 马萨著; 朱永贤等译.

— 北京: 国防工业出版社, 2012.11

(无人机译丛)

书名原文: Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles

ISBN 978-7-118-07357-7

I. ①异… II. ①奥… ②马… ③朱… III. ①无人驾驶飞机

—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第110225号

Translation from the English language edition:

Multiple Heterogeneous Unmanned Aerial Vehicles by Aníbal Ollero and Iván Maza (Eds.);

ISBN 978-3-540-73957-9

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Springer is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

本书简体中文版由 Springer-Verlag GmbH 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

异构多无人机

[西班牙] Aníbal Ollero Iván Maza (Eds.) 著

朱永贤 彭鹏菲 毛盾 张建强 译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限公司

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 15 ³/₄

字 数 239 千字

版 印 次 2012 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 68.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

译者序

无人机是未来无人智能型武器系统发展的一种主要形式,随着武器装备现代化、信息化和一体化的不断发展,无人机系统作为综合作战系统中的重要组成部分,已成为各国军事力量优先发展的一种作战分系统。无人机系统是集电气、动力、控制、电子、计算机技术于一体的高科技武器装备,在战场中可承担警戒、探测、中继、导引、掩护、攻击等多种作战任务,将成为未来战争中的重要作战力量,引领未来作战样式的巨大变革。

《异构多无人机》是西班牙无人机系统专家 Aníbal Ollero 和 Iván Maza 的专著。该书具体描述了无人机系统的当前技术状态、存在的问题以及多无人机系统的发展潜力,着重说明了异构多无人机系统编队方法与技术。多无人机系统的相关理论与关键技术是目前无人机系统发展与应用的薄弱环节。本书作为一本专业著作,可以为多无人机系统的使用与学习人员提供全面的基础知识和结论性规律;同时也可长期从事无人机系统专业的设计与研究人员提供宝贵的实践性参考。希望这部译著的出版能够对中国特色的无人机系统装备的快速发展起到积极的推进作用。

当然,由于涉及的内容非常广泛,所以书中给出的往往是简化的内容和简明的结论,有兴趣的读者可以沿着书中的主线查看专门的书籍。此外,在翻译过程中大部分词汇习惯上是通用或同义的,而有些则不尽然。这里在忠实原文的前提下,尽可能对用词进行了统一,并对含糊叙述和错误之处进行了校正,希望能够减少阅读时的混淆。尽管译者尽了很大努

力,但限于水平和时间仓促,难免出现错误和不明确之处,希望读者能给予指正。

译者十分感谢刘忠教授和任雄伟教授在翻译修订过程中给予的帮助与指导,感谢黄亮博士和张国栋博士所做的大量修订与校对工作,同时也感谢国防工业出版社的大力支持。

前言

航空机器人在许多领域正得到越来越多的应用,从不可接近地区的仪器设备配置和效用的局部检查,到全球环境监测,以及包括搜索救援、安全、灾害监管、交通管制、土木工程等诸多领域的机器人应用。在这些所有的应用领域中,航空机器人可以克服地面机器人移动的局限性,能够在一些险峻的地形上航行或者跨越不可避免的障碍物。

航空机器人可以认为是由无人机发展而来的。无人机是一种自推动的飞行器,可以由操作员遥控或者自动驾驶。在过去的十年,为了提高无人机的飞行持久力、飞行距离和有效载荷,研究人员付出了许多努力。即将服役的无人机飞行距离可以达到几千千米,飞行持久力可以超过 24 h,有效载荷可以超过 1000 kg。

而且,无人机技术的发展提高了机载的计算和通信能力。随着新型航空传感器、传动装置,嵌入式控制和通信系统的发展以及机载零件的小型化,性能越来越好的小型、迷你、微型无人机将是未来的发展方向。航空机器人可以看作是各种技术的汇合,这些技术包括航空、嵌入式控制系统、通信和智能系统。

目前现有的无人机在飞行和有效载荷方面的局限性限制了无人机的许多应用。多无人机方法可以提高无人机系统的空间覆盖和可靠性,并且允许在不同地点同时进行干预,使特型无人机编队成为可能。因此,多无人机可应用在许多方面,是一个行之有效的方法。

本书描述了当前的技术状态,存在的问题以及多无人机系统的发展潜力,着重说明了异构无人机编队。这里,异构指的是无人机的不同特性、不同有效载荷以及从纯遥控飞行器到全自动驾驶航空机器人所具有的不同

的机载信息处理能力。

本书受益于 COMETS 项目的研究成果,该项目致力于异构多无人机的协同和控制研究。这是一个受欧洲委员会信息社会技术 (IST) 研究和发展规划资助的项目。COMETS 被认为是第一个用实验方法验证了在欧洲民用领域异构多无人机协作的项目。该项目产生了一种新的控制结构体系,该结构体系结合了分布式感知、实时图像处理以及自主容错导航技术。COMETS 项目表明,飞行器间的协作对于达到功能最大化、保持分布性和自主性、并使操作费用在最低水平是必需的。

然而,本书已超越了 COMETS,并且在无人机的框架内考虑多无人机系统的研究和发展动态。

本书从决策体系、协同感知的概念和理论、无人机的样机以及相关应用(森林火灾检测与监控)等几个方面着手研究多无人机系统。其中,相关的应用(涉及了)对人和环境的保护。

本书包括 5 个部分。第一部分是概论,包括无人机应用的回顾和评述。第二部分(第 2~4 章)主要讲述多无人机系统的相关方法和技术。包括决策体系结构(第 2 章)、通信(第 3 章)和协同感知(第 4 章)技术。第三部分(第 5~7 章)主要涉及特定的无人机样机及其技术,包括自主直升机(第 5 章)、自主飞船(第 6 章)和无人机引导的遥控工具和多无人机系统的综合体(第 7 章)。第四部分主要涉及无人机在森林火灾预警和监测领域的应用(第 8 章)。第五部分为本书的总结并且指出了多无人机系统未来的研究、发展和应用方向。

如果没有其他同仁的帮助,本书将不可能得以出版。我们对所有参与 COMETS 项目的研究人员表示感谢。在他们中间有些并不是本书有关章节的作者,包括: Lusi Gonzalo Gutierrez、Francisca Colmenerot、Iker Veiga (GMV)、Miguel Angel Gonzalez、Francisca Gomez Pantoja (Helivision) 以及其他合作团队的成员,这些团队主要有:塞维利亚 AICIA 大学、LAAS-CNRS、柏林技术大学、可因布拉 ADAI 大学和 Linkoping 大学。

我们同时还要感谢欧洲委员会的官员们,特别感谢 Rolf Riemenschneider 在领导 COMETS 项目所做的出色工作。另外,在这里我们还要感谢 COMETS 项目评审员 Fernando Lobo Pereira、Ornulf Jan Rodseth、Mario Innocenti 所做的贡献,他们为项目提出了非常有建设性的意见和研究方向。

除了 COMETS 项目之外,本书的工作还得到其他国家项目的资助,例如:西班牙 AEROSSENS 和 SADCON 以及德国 DFG 项目。

目录

第 1 章 概论	1
1.1 航空机器人	1
1.2 多无人机系统	2
1.3 应用	3
1.3.1 航空摄影与摄像技术	3
1.3.2 航空测绘	4
1.3.3 气象学	5
1.3.4 环境监测	5
1.3.5 农业和林业	5
1.3.6 检查	5
1.3.7 执法和安保应用	7
1.3.8 自然灾害与危机管理	8
1.3.9 救火	8
1.3.10 交通监视	10
1.3.11 通信	11
1.3.12 土木工程	11
1.4 结论与本书概要	11
参考文献	13

第 2 章 多无人机系统中的决策制定: 体系结构与算法	14
2.1 引言	14
2.1.1 问题描述	15
2.1.2 方法和概要	15
2.2 无人机结构	16
2.2.1 自主决策能力分类	16
2.2.2 决策结构	18
2.3 执行控制	19
2.3.1 一般的任务模型和假设	19
2.3.2 执行指令的机制	20
2.3.3 说明	22
2.4 多无人机分布式使命规划	23
2.4.1 与规划框架相关的一般考虑	23
2.4.2 在规划过程中利用专门的精炼机	24
2.4.3 专门的精炼机工具箱概述	26
2.4.4 举例	31
2.5 分布式任务分配	34
2.5.1 加入平衡的合同网	35
2.5.2 分布式环境中有时间约束的任务	38
2.6 小结	42
参考文献	44
第 3 章 通信	48
3.1 引言	48
3.2 需求	48
3.3 设计理念	49
3.3.1 数据组织	49
3.3.2 网络	49
3.3.3 黑板	50
3.3.4 路由	50
3.3.5 网络层	51
3.3.6 网络组织	51

3.4	设计细节	52
3.4.1	用户观点	53
3.4.2	插槽内容的状况	54
3.4.3	数据传输	55
3.4.4	物理链接	57
3.5	实施细节	57
3.5.1	核心架构	58
3.5.2	跨平台支持	58
3.5.3	嵌入式系统支持	58
3.5.4	物理抽象层实现	59
3.5.5	内存效率	59
3.5.6	代码示例	59
3.6	真实情景	60
3.6.1	COMETS 项目中的网络拓扑	60
3.6.2	传输和物理层	62
3.6.3	信息流	62
3.7	结论	64
	参考文献	64

第 4 章 多无人机协同探测技术 65

4.1	引言	65
4.1.1	主要概念	66
4.1.2	方法概述	67
4.1.3	相关工作	67
4.2	协同探测中的概率算法	69
4.2.1	多无人机探测	70
4.2.2	半分布式可信状态估计	71
4.2.3	分布式协同探测	73
4.2.4	协同探测路径规划	75
4.3	多无人机图像探测、定位与跟踪	77
4.3.1	初始条件设置	77
4.3.2	事件状态定义	77
4.3.3	图像融合中的似然函数	78

4.4	无人机图像处理技术	81
4.4.1	图像偏移估计	81
4.4.2	团块特征提取	85
4.4.3	图像修正	86
4.5	基于信息融合的多无人机图像探测与定位	89
4.5.1	基于信息融合的多无人机探测	91
4.5.2	基于分布式信息滤波的目标探测与定位	94
4.5.3	仿真结果	96
4.6	基于网格技术的多无人机异类信息的探测与定位	99
4.6.1	局部融合	100
4.6.2	多无人机分布式融合	101
4.6.3	基于栅格技术的事件探测与定位	102
4.7	结论	106
	参考文献	107

第 5 章 无人直升机 112

5.1	无人直升机简介	112
5.1.1	无人直升机及其控制结构的常见问题	112
5.1.2	MARVIN 无人直升机系统	116
5.2	直升机模型	124
5.2.1	并行系统	124
5.2.2	直升机状态量	124
5.2.3	运动物理量	125
5.2.4	力和力矩	127
5.2.5	旋翼的空气动力学原理	128
5.2.6	仿真结果	131
5.3	控制技术	132
5.3.1	MARVIN 控制器	132
5.3.2	MARVIN 直升机的其他控制技术	139
5.4	结论	144
	参考文献	145

第 6 章 飞艇控制	149
6.1 引言	149
6.2 飞艇建模	150
6.2.1 坐标轴系和运动学模型	151
6.2.2 动力学模型	152
6.2.3 简化模型	155
6.3 模型辨识	156
6.3.1 空气动力参数的估计	157
6.3.2 简化模型有效性分析	159
6.4 控制	166
6.4.1 PID 控制	168
6.4.2 广义预测控制	171
6.4.3 采用扩展线性化方法进行非线性控制	174
6.4.4 实验结果	177
6.5 航路规划和跟踪	183
6.5.1 路径规划	183
6.5.2 路径跟踪	186
6.6 结论	191
参考文献	191
第 7 章 遥控工具	196
7.1 引言	196
7.2 无人机遥控技术的发展趋势	197
7.2.1 多模接口的需求	197
7.2.2 扩增现实与合成图像	198
7.3 COMETS 中的遥控直升机	199
7.3.1 硬件部分	200
7.3.2 软件部分	203
7.4 实验结论和任务执行	208
7.4.1 任务执行	209
7.5 结论	211
参考文献	211

第 8 章 多无人机实验：在森林火灾中的应用	213
8.1 引言和目的	213
8.2 森林火灾应用中的多无人机系统	214
8.2.1 无人机描述	214
8.2.2 编队的传感器	216
8.2.3 火焰分割	218
8.3 任务的一般描述	222
8.4 多无人机监视与火警探测	223
8.5 协同报警确认	226
8.6 用无人机进行火灾观察和监视	230
8.7 协作火灾监视	232
8.8 结论	233
参考文献	234
第 9 章 总结和未来发展方向	236

第 1 章

概论

摘要: 本章论述了无人机的实际效用, 介绍了多无人机系统近年来相关项目的实施情况, 回顾了无人机在民用方面的主要应用情况。最后, 对全书内容做了简要概述。

1.1 航空机器人

室外机器人在自然地形环境中应用时, 其对机动性的要求一般超出现有的地面机器人。实际上, 尽管无人地面机器人已经过近 20 年的发展进步, 但在开放的自然环境中, 其导航仍然面临巨大挑战。因此在许多应用中, 现有地面机器人仍存在固有局限性, 限制其到达指定位置展开行动的能力。地形的特征、障碍物的出现以及所需的快速响应能力都可能制约许多地面移动系统的使用。因此, 在许多情况下使用航空器是接近目标获取信息或部署仪器的唯一方式。

无人机 (UAV) 为机器人系统避免上述所提及的地面机器人局限性提供了很多机会。最近 10 年来, 无人机进一步改善了它们在能量和信息处理方面的自主性, 自主定位和跟踪方面也已取得了重大成绩。这些改进基于现代卫星定位技术、捷联惯导系统、通信与控制技术和图像处理技术。此外, 新的无人机机载信息传感与处理能力也已实现。因此, 今天我们可以认为, 无人机系统是拥有感知、学习、实时控制、态势估计、推理、决策和航路规划等能力于一体的、可在复杂环境中不断进化与工作的智能机器人系统。

1.2 多无人机系统

小型、低耗无人机随着嵌入式系统和一体化、小型化技术的进步而不断加速发展。

然而, 能量消耗、重量以及尺寸等约束条件是无人机的重要影响因素, 特别是对于尺寸较小、重量较轻和低能耗的无人机。因此, 多无人机协作是解决许多应用问题最合适的方法。

性能强大的单无人机即使装备了一系列不同类型、不同形式的传感器, 但在指定的瞬间仍局限于单一视点。然而无人机编队可以从不同位置同时收集信息, 并充分利用这些相互独立的多样视点信息来建立用于决策的模型。此外, 异构多无人机编队还具有各种无人机 (如直升机、固定翼飞机、飞船) 间的互补优势。

编队无人机间的相互协作使很多应用成为可能。当执行一些任务时, 编队成员间可以相互交换传感器信息、协同跟踪识别目标, 完成侦察、监视等行动。例如, 一个无人机编队可以应用于对森林火灾等自然灾害演变情况的侦察、精确定位、监视和测量。此外, 无人机编队协作这一方法使得解决方案具备更好的容错性和灵活性。

通过多无人机编队 (小型无人机组群) 去完成具体任务, 还需要进一步合作努力。现有的几种与同构军用飞机编队控制相关的方法还存在很多难题, 例如编队密集飞行 (见参考文献 [5, 6, 9]) 和自主特技飞行操纵问题 (普林斯顿大学的 Phoenix 工程)。未来发展趋势将是不再需要巨大的计算量或通信带宽的系统。然而, 目前大多数研究仅限于仿真, 而用真正无人机开展的验证仍然非常少。

麻省理工学院正在开发一个分布式协调与控制多载体实验平台^[1]。作为国防部基金支持下的若干研究计划之一, 该计划将在麻省理工学院研究建立一个多载体实验床, 用于论证和评估无人机编队的协调与控制方法。目前两架自主无人机编队的演示飞行已经完成。

澳大利亚野外机器人技术研究中心的 ANSER 计划旨在验证多无人机协作下的分布式数据融合技术 (DDF) 和同时定位与地图创建技术 (SLAM)。DDF 和 SLAM 技术验证需要无人机同时搭载导航和地形传感器, 包括一套 INS/GPS 导航系统, 一部毫米波 (MMW) 雷达, 一个单视节点和一个增加了激光系统的视觉节点。

由 Cornell 大学和 Insitu 团体联合开展的 STTR 计划的目标是评估

和验证多无人机协同跟踪运动目标算法。这个计划为“搜索鹰”和“海上扫描”无人机开发了航路规划、控制和协同跟踪评估算法。

目前,大多数研究工作致力于同构无人机编队。由于具有不同移动特征、不同传感器(具有不同的、相关的感知功能)的无人机间可互补利用,因此异构无人机间的协作可提供重大效益,但也因所涉及问题的复杂性构成了重大挑战。

本书致力于研究当前多无人机系统的技术现状、存在的问题和发展潜力,特别是异构多无人机系统。这里异构性具有双重含义。一方面可认为是无人机平台的异构性,即开发具备不同特点的不同无人机(例如直升机和飞艇)。另一方面可认为是机载信息处理能力的异构性,涵盖从单纯的远距离遥控无人机到完全自主的无人机。

1.3 应用

当前,无人机主要应用于国防相关方面,主要投资来源于未来的军事想定。当今无人机的民用市场与军事应用相比仍较小,尽管出现了一些有意义的民用市场,但是合适而有用的应用非常有限。然而以后10年~15年,无人机的民用和商业市场有望大幅上升。下面回顾一下无人机的一些应用情况。

1.3.1 航空摄影与摄像技术

许多无人机应用与获取航空图像有关。随着当前航空摄影与摄像技术应用市场的不断增长,不仅可利用传统的遥控飞行器,小型固定翼无人机和飞艇也可用于航空摄影。

摄像需要使用直升机,因为其具有较好的机动性。然而,当使用传统的遥控飞行器(RPV)时,要求飞行器离遥控者的距离很近,需要能够直接看到飞行器。而自主飞行器不受这些限制,先进遥控系统的应用改善了遥控性能,这样机载照相机就可以为遥控者提供视距之外的远距离飞行控制视野,图像可以通过眼镜式、头盔式或一般的便携显示器显示。此外,如果地图可用,则地面遥控站可以在地图上显示无人机,最终以3D的形式展现环境地图和无人机,以方便遥控飞行任务。这种“超视距”遥控控制比较适合于固定翼飞机,但不能满足直升机,原因在于直升机需要高频率稳定的闭环遥控控制。为此出现了直升机自主稳定机载控制系统。以上提及

的遥控策略能够满足许多应用,也可理解为是向自主性发展的第一步。

当前,对于航空摄影来说最合适的策略是机载控制器的初级自主性与人工引导相结合,而后者采用传统操纵杆式的人工控制器即可实现。

1.3.2 航空测绘

航空测绘是又一项具有潜在短期经济影响的应用领域。与传统的飞行器相比,自主飞行器系统可以在节省大量费用的情况下创建更加精确的地形图。与传统的有人驾驶飞行器不同的是,直升机和飞艇能携带相机或距离传感器贴近地面飞行并建立高分辨率三维(3D)地图。此外,直升机还可以在狭小的、约束条件较多的区域飞行并建立高清地图。

地形测绘也是 COMETS 工程的任务之一,目的是为无人机绘图提供一个可更新的、初始的、可用的地图数据库。经无人机处理后,可提供最新的、比初始数据更可用的、分辨率更高的信息。

地形测绘对于本节所考虑的其他很多应用也是很有用的,例如环境检测、农业和林业调查、检查、监视和危机管理(评估灾害影响范围)。

土建工程也需要这些地图,就连无人机行动也需要这些地图的支持,因为与实况视频流相反,地形图提供了一个记录无人机飞行区域场景的空间连贯视景。

图 1.1 举例说明了利用自主软式飞艇生成高分辨率地图的情况。

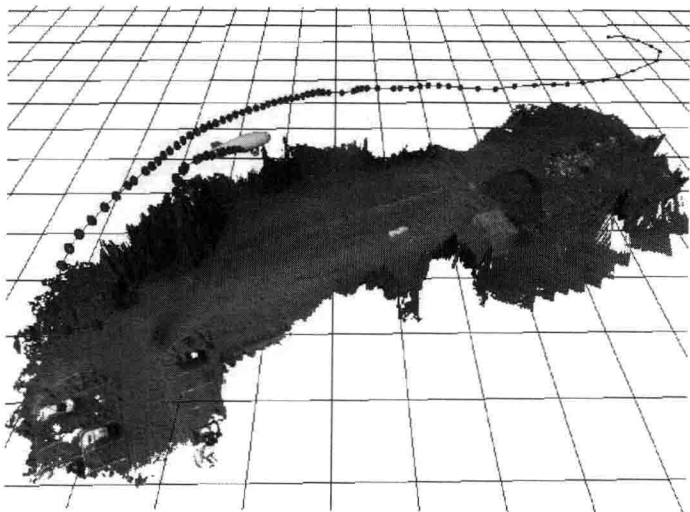


图 1.1 利用自主软式飞艇建立数字地形图 (courtesy of LAAS-CNRS)