



国防科技著作精品译丛
无人机系列

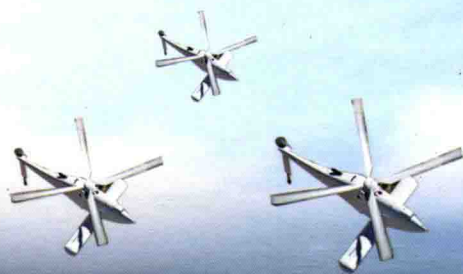
 Springer

Motion Coordination for VTOL Unmanned Aerial Vehicles
Attitude Synchronisation and Formation Control

垂直起降无人机的运动协调 ——姿态同步与编队控制

【加拿大】Abdelkader Abdessameud Abdelhamid Tayebi 著

都基焱 王金根 张振 崔文华 译 李五洲 高安同 审校



 国防工业出版社

垂直起降无人机的 运动协调

——姿态同步与编队控制

**Motion Coordination for VTOL Unmanned Aerial
Vehicles: Attitude Synchronisation and Formation
Control**

[加拿大] Abdelkader Abdessameud

Abdelhamid Tayebi 著

都基焱 王金根 张 振 崔文华 译

李五洲 高安同 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 - 2015 - 106 号

图书在版编目 (CIP) 数据

垂直起降无人机的运动协调: 姿态同步与编队控制 / (加) 阿夫德斯塞米德 (Abdessameud, A.), (加) 塔伊布 (Tayebi, A.) 著; 都基焱等译. — 北京: 国防工业出版社, 2015. 1

(国防科技著作精品译丛. 无人机系列)

书名原文: Motion coordination for VTOL unmanned aerial vehicles: attitude synchronisation and formation control

ISBN 978-7-118-10197-3

I. ①垂… II. ①阿… ②塔… ③都… III. ①无人驾驶飞机—设计—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 101214 号

Translation form English language edition:

Motion Coordination for VTOL Unmanned Aerial Vehicles

by Abdelkader Abdessameud and Abdelhamid Tayebi

Copyright © 2013 Springer London

Springer London is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved.

版权所有, 侵权必究。

垂直起降无人机的运动协调——姿态同步与编队控制

[加拿大] Abdelkader Abdessameud Abdelhamid Tayebi 著

都基焱 王金根 张振 崔文华 译

李五洲 高安同 审校

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责任公司

开 本 700 × 1000 1/16

插 页 12

印 张 12

字 数 195 千字

版 印 次 2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 86.00 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

作为现代战争不可或缺的武器装备之一,无人机已广泛应用于各军事领域。在传统模式下,通常可以由一架无人机完成规定的任务飞行,执行相对独立的作战任务。进入 21 世纪,日益复杂的作战环境、不断变化的作战样式,以及丰富多样的作战手段,对无人机执行任务能力提出了更高的要求。

随着现代控制理论、计算机技术、传感器技术、测控技术,以及无人机飞行平台技术的快速发展,在无人机自动路径规划理论与技术不断进步,“一站多机”、“多站多机”等无人机运用方式逐渐成熟的基础上,开展多无人机编队控制研究,已成为国内外无人机运用研究的热点。

本书是由加拿大西安大略大学的 Abdelkader Abdessameud 博士和加拿大湖首大学的 Abdelhamid Tayebi 教授合著的,作者在对非线性控制理论进行深入研究的基础上,将其应用到多无人机协调运动控制领域。在建立适用于各种类型垂直起降无人机(如四旋翼飞行器、涵道风扇飞行器等)通用刚性结构模型的基础上,分析了多刚体系统的姿态同步问题,研究了通信时延对姿态同步控制器的影响,提出了一种无需进行角速度测量的姿态同步方案;通过对欠驱动垂直起降无人机控制方法的研究,提出了一种垂直起降无人机的编队控制算法,并解决了存在通信时延情况下的垂直起降无人机编队控制问题。

原著在编写过程中大量使用了非线性控制理论方面的公式,但可能由于出版过程中的疏漏等原因,存在一些不尽合理之处。译者在忠实原著的前提下,对一些明显的错误进行了纠正,并对相关用词进了规范,以尽可能

减少阅读中的混淆。尽管译者尽了很大努力,但由于研究深度和能力有限,难免存在偏差,恳请读者批评指正!

都基焱

2014年12月

前言

本书研究了一群无人机 (UAV) 的协调运动控制问题。由于这种类型的系统往往是欠驱动的, 其受到复杂非线性动力学模型的支配, 因而该问题特别具有挑战性。同样地, 线性多 Agent 系统的协调控制方案不能直接应用到该类型的系统中。在过去几年里, 上述问题激发了我们在该领域的研究兴趣, 特别是, 对多刚体系统的姿态同步问题和一群垂直起降无人机 (VTOL UAV) 的编队控制问题感兴趣。

在深空应用中, 将会用更为简单的微型卫星群去代替大而复杂的传统航天器, 该方式已被证明在任务性能与成本方面具有一定的优势, 在这样的深空应用中通常要考虑姿态同步问题。目前, 与航天器姿态同步相关的大多数研究都是假定状态变量可用于反馈。

利用最少的实测状态变量去设计高效控制器是一个理论上的挑战, 然而却具有重要的实际意义。控制器设计最关心的就是尽量不要测量一些至关重要 (或关键) 的变量, 因为这些变量需要复杂、昂贵和/或易于失效的传感器去测量。根据这个观点, 无速度测量的姿态控制方案设计将会作为一个重要且具挑战性的问题而凸显出来。

VTOL UAV 包括几种推力推进型飞行器, 例如, 直升机、四旋翼飞行器以及涵道风扇飞行器。由于它们可在受限的环境中实现悬停和机动, 因而构成了一类重要的飞行系统。这使它们非常适合于需要飞行器静止飞行的应用场合, 如监视、搜索和营救任务, 以及纪念碑/桥梁检查。这类欠驱动机械系统的协调控制非常具有挑战性, 尤其当一些状态变量不可用于反馈时。

编队中涉及的飞行器间信息交换对于成功实现运动协调非常重要。这个信息交换易受时延的影响,而时延是通信系统中所固有的。许多令人感兴趣的研究论文利用一阶和二阶动力学模型,讨论了线性多 Agent 系统中通信时延的影响。旋转刚体的复杂非线性姿态动力学模型阻碍了这些结果应用于航天器的姿态同步。另外,VTOL UAV 欠驱动的本质带来了几个控制设计方面的困难(或难点)。而且,在大部分涉及多 Agent 系统的研究中,仅在全状态信息情况下考虑通信时延,这就是研究新方法以在仅有部分系统状态变量可用于反馈的情况下处理通信时延的一个激发因素。

撰写本专著的目的就是总结最近已取得的与协调控制问题相关的研究成果,为姿态同步问题提出不同的控制设计方法。同步方案只需要姿态测量和相邻信息交换,信息交换可以是延迟的(或滞后的)。另外,将控制设计新技术与多 Agent 系统的一些概念相结合,为 VTOL UAV 的运动协调搭建了一个新的理论框架。

本书非常适合机器人学、控制工程和航空航天界的研究员和工程师阅读,它也可以作为这些领域研究生的一个补充读物。

加拿大,安大略省,伦敦市 Abdelkader Abdessameud

加拿大,安大略省,桑德贝市 Abdelhamid Tayebi

致谢

感谢所有为本书编写做过贡献的人, 特别感谢加拿大自然科学与工程研究委员会 (NSERC) 的基金支持, 感谢 Ilia Polushin 和 Andrew Roberts 富有成效的讨论, 感谢 Michael Johnson (Joint Editor, AIC Springer) 和 Oliver Jackson (Editor, Springer) 在底稿编辑期间所给予的支持和指导。另外, 感谢电气与电子工程师协会 (IEEE) 和 Elsevier 允许我们复制一些下列文献中的资料:

Abdessameud A, Tayebi A (2008) Attitude synchronization of a spacecraft formation without velocity measurement. In: Proceedings of the 47th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 3719–3724, ©2008 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2009) Attitude synchronization of a group of spacecraft without velocity measurements. IEEE Transactions on Automatic Control 54(11):2642–2648, ©2009 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2009) On the coordinated attitude alignment of a group of spacecraft without velocity measurements. In: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control, pp. 1476–1481, ©2009 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2009) Formation control of VTOL UAVs. In: Proceedings of the 48th Conference on Decision and Control, pp. 3454–3459, ©2009 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2010) Formation control of VTOL UAVs without linear-velocity measurements. In: Proceedings of the American Con-

trol Conference, pp. 2107–2112, ©2010 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2010) Formation stabilization of VTOL UAVs subject to communication delays. In: Proceedings of the 49th Conference on Decision and Control, pp. 4547–4552, ©2010 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A, Polushin I G (2012) Attitude synchronization of multiple rigid bodies with communication delays. IEEE Transactions on Automatic Control 57(9):2405–2411, ©2012 IEEE.

Abdessameud A, Tayebi A (2010) Global trajectory tracking control of VTOL UAVs without linear velocity measurements. Automatica 46(6):1053–1059.

Abdessameud A, Tayebi A (2011) Formation control of VTOL Unmanned Aerial Vehicles with communication delays. Automatica 47(11): 2383–2394.

目录

| | |
|----------------------|----|
| 第 1 章 引言 | 1 |
| 1.1 协调方法综述 | 2 |
| 1.2 刚体系统的姿态同步 | 3 |
| 1.3 垂直起降无人机的编队控制 | 6 |
| 1.4 通信时延处理 | 8 |
| 1.5 本书概要 | 9 |
| 第 2 章 背景和预备知识 | 11 |
| 2.1 预备知识 | 11 |
| 2.1.1 符号和定义 | 11 |
| 2.1.2 有用的引理 | 12 |
| 2.1.3 有界函数 | 13 |
| 2.1.4 信息流建模 | 14 |
| 2.2 姿态表示和运动学 | 17 |
| 2.2.1 姿态表示 | 17 |
| 2.2.2 姿态运动学 | 22 |
| 2.3 垂直起降无人机的动力学模型 | 22 |
| 2.3.1 四旋翼飞行器举例 | 22 |
| 2.3.2 涵道风扇飞行器举例 | 24 |
| 2.3.3 垂直起降无人机的标称模型 | 26 |

| | |
|-------------------------------------|----|
| 第 3 章 刚体姿态同步 | 28 |
| 3.1 姿态同步问题 | 28 |
| 3.2 预备知识 | 29 |
| 3.2.1 相对姿态误差 | 29 |
| 3.2.2 姿态跟踪误差 | 31 |
| 3.3 状态反馈姿态同步 | 32 |
| 3.4 免速度测量的姿态同步 —— 方法一 | 34 |
| 3.4.1 无主和主从式姿态同步 | 35 |
| 3.4.2 最终速度为零的无主姿态同步 | 39 |
| 3.4.3 协同姿态跟踪 | 41 |
| 3.5 免速度测量的姿态同步 —— 方法二 | 43 |
| 3.5.1 无主和主从式姿态同步 | 43 |
| 3.5.2 协同姿态跟踪 | 46 |
| 3.6 仿真结果 | 48 |
| 3.7 讨论与结束语 | 61 |
| | |
| 第 4 章 带通信时延的刚体姿态同步 | 63 |
| 4.1 状态反馈姿态同步 | 64 |
| 4.1.1 无主和主从式姿态同步 | 64 |
| 4.1.2 协同姿态跟踪 | 67 |
| 4.2 无角速度测量的姿态同步 | 69 |
| 4.2.1 无向网络和时变通信时延的情况 | 70 |
| 4.2.2 有向网络和恒定通信时延的情况 | 75 |
| 4.3 仿真结果 | 78 |
| 4.4 讨论和结束语 | 82 |
| | |
| 第 5 章 垂直起降无人机的位置跟踪 | 84 |
| 5.1 位置控制设计方法 | 85 |
| 5.1.1 推力和目标姿态提取 | 85 |
| 5.1.2 控制设计过程 | 87 |
| 5.2 垂直起降无人机的位置跟踪控制 | 88 |
| 5.2.1 全状态信息情况下的设计 | 88 |
| 5.2.2 无线速度测量的设计 | 93 |

| | | |
|--------------|---------------------|------------|
| 5.3 | 仿真结果 | 99 |
| 5.4 | 结束语 | 102 |
| 第 6 章 | 垂直起降无人机的编队控制 | 103 |
| 6.1 | 全状态信息下的编队控制 | 104 |
| 6.2 | 无线速度测量的编队控制 | 111 |
| 6.3 | 用简化信息流重新设计 | 116 |
| 6.4 | 仿真结果 | 120 |
| 6.5 | 结束语 | 125 |
| 第 7 章 | 带通信时延的编队控制 | 126 |
| 7.1 | 全状态信息情况下的编队控制 | 126 |
| 7.1.1 | 时滞相关的编队控制方案 | 128 |
| 7.1.2 | 时滞无关的编队控制方案 | 134 |
| 7.2 | 无线速度测量的编队控制 | 137 |
| 7.2.1 | 时滞相关的编队控制方案 | 138 |
| 7.2.2 | 时滞无关的编队控制方案 | 140 |
| 7.3 | 仿真结果 | 143 |
| 7.4 | 结束语 | 149 |
| 第 8 章 | 结束语 | 150 |
| 8.1 | 刚体姿态同步 | 150 |
| 8.2 | 多垂直起降无人机的编队控制 | 151 |
| 8.3 | 未解决的问题 | 151 |
| 附录 | | 153 |
| A.1 | 引理 2.9 的证明 | 153 |
| A.2 | 引理 3.1 的证明 | 154 |
| A.3 | 引理 3.2 的证明 | 156 |
| A.4 | 定理 3.3 的证明 | 157 |
| A.5 | 定理 3.5 的证明 | 159 |
| A.6 | 定理 3.6 的证明 | 161 |
| A.7 | 引理 4.1 的证明 | 163 |

| | |
|---------------------------|------------|
| A.8 定理 4.2 的证明 | 163 |
| A.9 定理 4.6 的证明 | 165 |
| A.10 引理 7.1 的证明 | 166 |
| 参考文献 | 168 |

自主式运载工具的协调运动是一个活跃的研究领域。这些自主式运载工具包括飞行器、航天器、移动机器人和水下运载工具等。随着嵌入式系统技术、网络基础设施及控制技术的快速发展,人们现在通过有效的方式可以协调大量自主式运载工具。自主式运载工具的协调部署将有利于执行各种各样的任务,比如增强型监视、危险物品处理、搜索救援和太空探测等。正如在许多生物系统中观察到的一样,大多数任务要求将自主式运载工具群成员排成某个特定的几何形状,即所谓的编队。事实表明编队行为在很多方面有利于这些动物,包括群中个体成员的生存和行动。例如,一群动物联合起来既可进行高效的捕猎,也可将遇到掠夺者的概率降到最低;鸟群以 V 形编队飞行时,其飞行距离能够提升 70%^[91]①;类似的现象还可在鱼群中见到,它们通过编队可提高游泳效率^[150] (图 1.1)。自然界中的编队激发了我们对多机编队协调运动的研究兴趣。

这种保持自主式运载工具群相对彼此间的或相对参考物间的距离的能力被称为编队控制。在一个特殊任务中,使用多机编队来取代单机往往可以获得更多的优势,这就激发了编队控制的研究兴趣。例如,在太空应用中,通过卫星编队使大孔径空间望远镜和可变基线空间干涉仪成为可能^[85],多无人机编队部署提高了监视和/或搜寻任务的精度与成功率^[19]。

以上多数应用中,信息共享是群运动协调的关键。过去的几年中,对于分布式多 Agent 协调的研究热情很高,特别是对多 Agent 网络互联本质相

① 原著参考文献在正文的引用中没有按照参考文献的顺序依次出现,这与国内的出版标准不统一,但是为了出版的严谨和与原著保持一致,我们仍然保留了原著的引用方式。

关问题的研究。对于线性系统来说, 矩阵理论和代数图论可以为一致性和群聚问题 (与编队控制密切相关, 参见文献 [49,64,105,106,117,119,120,139] 及其中的参考文献) 提供很多令人感兴趣的解决方案。文献 [23,110,118,123] 也从不同角度分析了某些非线性系统的群控制问题。

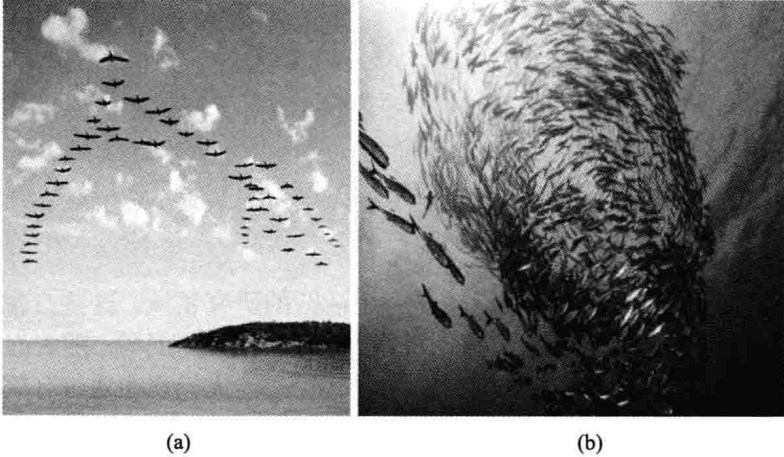


图 1.1 动物的编队行动

(a) 鸟群; (b) 鱼群。

1.1 协调方法综述

为了使两个或多个彼此连接的智能体 (运载工具) 通过协调运动完成某个给定任务, 需要对控制系统进行协调控制设计。多网络系统的控制设计可分为集中式和分散式, 其中集中式控制采用单一智能体 (或站), 根据所有群成员状态指定其他智能体的目标。集中式控制具有诸多优势, 但却需要大量的多向信息流。相比之下, 分散式控制设计仅需要智能体间交换的本地信息, 通过智能体合作来实现全局目标。然而, 分散式控制系统的设计和性能分析比集中式控制系统更难。文献 [116,128] 已经为互联系统研究了几种协调控制方法, 这些协调控制方法大体上可以分为以下几类: 主从式方法 (leader-follower)、基于行为的方法 (behavior-based) 和虚拟结构法 (virtual structure)。

在主从式方法中, 某些智能体作为主导者 (leader), 另一些则作为跟从者 (follower)。在该方法下, 协调任务使跟从者 (follower) 跟踪主导者

(leader)。主从式方法已成功应用于移动机器人^[40,151]、机器人机械手^[30]、移动机械手^[87]、航天器编队^[74,145,148]、海上运输工具^[62]和无人机^[51,54]。主从式方法的优势在于通过主导者 (leader) 的运动来指导群的行为。然而该方法的弱点是主导者 (leader) 是一个单点故障。此外,该方法基本上不使用由跟从者 (follower) 至主导者 (leader) 的直接反馈,因此主导者 (leader) 无法知道跟从者 (follower) 的状态。为了解决这一问题,目前的一些解决方法(如文献 [112]) 允许主导者 (leader) 从一些跟从者 (follower) 处获取信息,但是这也增加了控制设计和分析的复杂度。

基于行为式 (behavioral architecture) 的基本思路是为每一个智能体规定一些预期行为,并且基于控制输入的加权平均为每一个行为设计单独控制输入。可能出现的行为包括轨迹跟踪 (trajectory)、邻近跟踪、避撞和避障以及队形保持^[24]。因为相邻之间的交互包括了明确的队形反馈,所以这种方法在多目标的应用方面具有一定的优势。然而,除了一些基于物理机理势函数而行为可以被明确定义的情况外,保证编队的一些特征是很困难的。这种方法已经被用于不同的应用领域,包括航天器编队^[78]、水下自动驾驶工具^[135]、机器人机械手^[32]和机器人^[20,70,80,81,97]。

在虚拟结构法中,编队被看成一个单一的虚拟主体,其动力学方程用来为每一个智能体生成合适的参考轨迹。因此,可以把编队视为一个虚拟结构,用占位符来描述各个智能体的理想化轮廓^[16,152]。文献 [84,152] 描述了这种方法在移动机器人编队中的应用;文献 [25,26,116] 描述了这种方法在航天器编队中的应用。这种方法也在机器人^[44,59]和船只补给^[77]的主从式架构中使用。

以上几种方法及应用涉及该研究领域许多难题,本专题著作重点研究飞行器的运动协调。目前飞行器的运动协调已广泛用于多个领域,其应用范围包括从简单的监视任务到复杂的宇宙空间应用。本专著主要探究与飞行器协调运动相关的两个主题,即多刚体 (rigid-body) 系统的姿态同步问题与垂直起降无人机的编队控制问题。

1.2 刚体系统的姿态同步

刚体系统群(如航天飞行器)的姿态同步,是基于本地信息交换,为每个刚体设计一个合适的控制输入,以实现全系统向同一方位校准它们的姿态。在外层空间的应用中探讨了该问题,以图 1.2 为例,用相对简易的

卫星群取代传统的大型复杂航天飞行器,在任务性能和成本方面会更有优势^[55]。

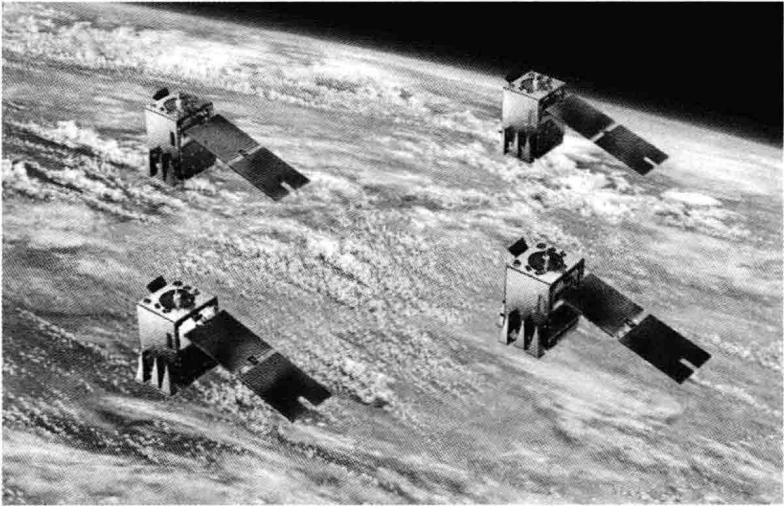


图 1.2 卫星的编队飞行

航天飞行器编队的一个令人感兴趣的应用就是进行长基线干涉测量。类地行星发现者 (TPF) 就是采用干涉测量技术来获得太阳系外其他行星特性的,在类地行星发现者天文台上将装备有光学传感器的自由飞行太空船进行编队以实现长基线干涉测量。文献 [85] 报道了太空船之间保持较大的距离 (基线) 有利于提高编队中多传感器的性能,得到的分辨率比结构相连型干涉仪更高。

航天飞行器编队的应用非常有实际使用价值,包括多个合成孔径雷达 (SAR) 卫星的应用。这些卫星的姿态校准可以增加相关物理量测量数据的总量和质量,对于一些应用而言是至关重要的,如监视和环境监测。另外,使用一组卫星提升了系统的容错能力,因为单个小卫星的故障处理比独立任务中复杂卫星更简单、低廉^[73]。

近期的文献越来越多涉及多刚体系统的姿态同步问题,并取得了一些成果。文献 [145] 为多航天飞船设计了一个带多主导者 (leader) 的协调姿态控制方案,可能是在该领域的先驱工作之一,作者使用了最近邻控制器的概念,展示了航天飞行器编队的全局渐近稳定性。文献 [148] 采用同样的表示法,针对航天飞船群的位置与姿态控制问题,研究了一种基于单一领导者 (one-leader-based) 的协调控制律。文献 [67] 通过使用目标姿态和