



国防科技著作精品译丛

无人机系列

Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles

无人机协同路径规划

【英】Antonios Tsourdos Brian White Madhavan Shanmugavel 著
祝小平 周洲 王恽 译 高晓光 审校



WILEY



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

无人机协同路径规划

Cooperative Path Planning of Unmanned
Aerial Vehicles

[英] Antonios Tsourdos Brian White 著
Madhavan Shanmugavel
祝小平 周 洲 王 恽 译
高晓光 审校

 国防工业出版社
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2011 -154 号

图书在版编目 (CIP) 数据

无人机协同路径规划 / (英) 楚拉多斯 (Tsourdos, A.), (英) 怀特 (White, B),
(英) 尚穆加韦尔 (Shanmugavel, M.) 著; 祝小平, 周洲, 王恽译. — 北京:
国防工业出版社, 2013.1
(国防科技著作精品译丛. 无人机系列)
书名原文: Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles
ISBN 978-7-118-08413-9

I. ①无… II. ①楚… ②怀… ③尚… ④祝… ⑤周… ⑥王…
III. ①无人驾驶飞机—航空航线 IV. ①V323

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第259690号

Translation from the English language edition:

Cooperative Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles by Antonios Tsourdos, Brian White,
Madhavan Shanmugavel; ISBN 978-0-470-74129-0

Copyright©2011, John Wiley & Sons Ltd

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with National Defence Industry Press and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

本书简体中文版由 John Wiley & Sons Ltd. 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有, 侵权必究。

无人机协同路径规划

[英] Antonios Tsourdos Brian White Madhavan Shanmugavel 著
祝小平 周洲 王恽 译 高晓光 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公司印刷

开 本 700 × 1000 1/16

印 张 11¹/₄

字 数 174 千字

版 次 2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—3000 册

定 价 52.00 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

无人机是新军事变革的代表性装备,是信息化装备与机械化装备的有机结合,充分体现了未来战争信息化、网络化、无人化、非接触的特点,是最符合未来战争需求和世界装备发展潮流的航空武器装备,已逐步成为现代战争中不可或缺的重要装备之一。随着无人机技术和性能的不断发展和其军事任务需求的不断提高,很多情况下,单架无人机已无法满足任务要求,若能由多架无人机协同工作,它们不但能完成单架无人机不能完成的任务,而且能使系统的作战效能大大提高。美国国防部 2011 年 10 月 17 日发布的《2011—2036 财年无人系统综合路线图》明确把无人机自主控制、协同编队飞行、无人机—有人机编队飞行等新技术列入未来重点发展的技术路线图中,以满足高技术信息化战争中联合作战的基本需求。无人机协同路径规划正是实现无人机协同编队飞行、无人机—有人机编队飞行的关键技术,因此,开展无人机协同路径规划具有重要意义,并受到了国内外专业人员的广泛关注。《无人机协同路径规划》一书正是对无人机的协同路径规划问题研究的一部专著,并对现有的路径规划方法做了较全面的总结,研究提出了适用于无人机路径规划的新方法,并将这些方法由二维空间扩展到三维空间。

本书的作者 Antonios Tsourdos 在单架和多架无人机的路径规划、碰

撞回避以及路径跟随等方面取得了丰硕的研究成果,是国际机械工程师协会等多家期刊的编委、国际自动控制联合会 (IFAC) 等多个技术委员会成员。作者 Brian White 多年担任航空航天、能源与传感器部门的系主任,任职期间组建了具有强大科研实力的航空航天系统部,并领导控制与导航组在无人机控制、导航与制导领域成为世界领先的团队。作者 Madhavan Shanmugavel 参与多个项目,并将路径规划算法扩展应用于地面机器人和无人机中,他主要的研究方向是协同系统、制导与控制、机器人和无人系统的路径规划。

本书是一部反映无人机路径规划方面的最新著作,内容系统、新颖,突出了无人机任务规划可飞行路径和安全路径的特色。同其他路径规划文献相比:本专著的突出特色为:①考虑了无人机动力学特性,提出了适用于无人机二维、三维曲率连续的路径规划方法和探测、回避障碍物或威胁的算法;②从无人机飞行可实现的角度,提出了几种无人机飞行制导算法,包括线性制导算法和基于非线性动态逆的非线性制导算法,以及一组无人机同时到达目的地的制导算法;③全书结合无人机工程实际,工程可实现性强。因此,本书很值得我国无人机领域的科研人员和工程技术人员参考使用,相信对我国无人机技术发展具有较大的促进和推动作用。

感谢崔晓莉编辑以专业和敏锐的目光向我们推荐了该书,并为本译著的出版付出了艰苦的努力,也感谢国防工业出版社相关人员为本书出版付出的辛勤劳动。感谢高晓光教授认真、细致的审校工作,为保证本书重量付出了辛勤汗水。

无人机协同任务规划理论和方法还正在大力发展中,许多新理论、新方法会不断出现和应用。可能由于时间问题,原著中存在不少笔误,译者均做了更正。鉴于译者水平有限,难免尚存在偏差,敬请读者批评斧正。

译者

2012年10月于西安

译审者介绍

祝小平, 工学博士, 教授, 博士生导师, 2009 年长江学者成就奖获得者, 享受国家政府特殊津贴。1986 年、1989 年、1992 年毕业于西北工业大学飞行力学专业, 分别获工学学士、工学硕士和工学博士学位。现任西北工业大学教授, 无人机研究所总工程师, 飞行器设计和导航、制导与控制两个学科博士生导师。主要从事无人机总体设计和制导控制与仿真研究工作。

主持和参加无人机方面国家重点型号、国防预研、国家高技术 863 等项目 20 多项, 获国家和部级科学技术奖 9 项, 其中国家科技进步一等奖 1 项, 国防科技进步一等奖 4 项, 获国家发明专利 8 项, 荣立国防科技工业装备型号研制个人一等功 1 次, 发表论著 107 篇, EI 收录 39 篇, 先后入选国防科技工业“511 人才工程”和国家级“新世纪百千万人才工程”, 获“国防科技工业有突出贡献的中青年专家”、国防科技工业百名优秀博士、硕士和“科学中国人(2009) 年度人物”等荣誉称号。主编《无人机设计手册》, 2007 年 5 月国防工业出版社出版。

周洲, 工学博士, 教授, 博士生导师, 1986 年、1989 年、1992 年在西北工业大学分别获工学学士、工学硕士和工学博士学位。长期致力于无人机前沿性、探索性研究, 现任无人机特种技术重点实验室主任、西北工业大

学无人机所副总工程师。主持和参加无人机方面国防基础研究、国防重点基金、国家高新技术项目、国防预先研究、新世纪人才计划、国防关键技术演示验证和国家重点型号关键技术攻关等项目 20 多项。获国家发明专利 8 项, 国家科技进步一等奖 2 项、国防科技进步一等奖 2 项、部级科技进步二等奖 3 项、三等奖 1 项, 发表论文 100 多篇。入选教育部首届“新世纪优秀人才计划”, 获中华全国总工会“全国女职工建功立业标兵”, “国防科技工业优秀出站博士后”和第十二届中国青年科技奖, 指导培养博士后 3 人、博士 18 人、硕士 39 人。

王恽, 2007 年、2010 年在西北工业大学分别获工学学士、工学硕士学位, 现为西北工业大学无人机特种技术重点实验室博士研究生, 从事多无人机协同路径规划、导航与控制等方面的研究工作。

高晓光, 工学博士, 教授, 博士生导师, 享受国家政府特殊津贴。1989 年西北工业大学导航、制导与控制专业毕业, 获工学博士学位。曾任西北工业大学电子信息学院院长, 现为中俄联合航空系统效能教学科研中心主任, 航空火力与指挥控制系统航空科技重点实验室副主任。承担了国家自然科学基金, 国防 973、863 计划等国家级基金及重点型号工程项目共计 30 余项, 率先研究了无人机和空天飞行器的火力指挥控制及智能化任务规划技术。近年来, 通过开展无人航行器和空天飞行器火控领域开创性的工作, 对传统的航空火力控制理论作了重要的发展和补充。荣获省部级科技奖及成果奖 9 项, 发表论文 120 多篇, 40 多篇被 EI、ISTP 收录, 出版教材专著 2 部, 获得全国高等学校优秀骨干教师称号, 入选国防科工委“511 人才工程学术技术带头人”和“陕西省师德标兵”等荣誉称号。

原著作者介绍

Antonios Tsourdos 于 2007 年被任命为克兰菲尔德大学 (Cranfield University) 自主控制系统组的组长。他于 1999 年在克兰菲尔德大学获得非线性鲁棒飞行控制设计与分析的博士学位, 是 Stellar 竞赛队的成员之一, 该竞赛队是 2008 年英国国防部大挑战 (UK MoD Grand Challenge) 的获胜队。他是“国际机械工程师协会期刊 G 分刊——航空航天工程”(Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering)、“国际系统科学”(the International Journal of Systems Science)、“IEEE 仪器与测量”(the IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement)、“国际智能系统研究进展”(the International Journal on Advances in Intelligent Systems) 和“MESA 国际杂志”(the International Journal Mathematics in Engineering, Science and Aerospace) 等期刊的编委。此外, 他还是英国 ADS 自主控制系统决策组和 A&D KTN 国家技术委员会在自主控制系统领域的成员, 是国际自动控制联合会 (IFAC) 技术委员会在空天控制领域和网络系统领域的委员, 是 AIAA 技术委员会关于制导、控制与导航领域的委员, 是 IEEE 控制系统协会技术委员会在空天控制领域的委员 (TCAC), 是 IEEE 技术委员会在空间机器人和无人

机领域的成员。

Brian White 在莱斯特大学 (University of Leicester) 获得工学学士学位, 在曼彻斯特科技大学 (UMIST) 获得硕士学位并于 1974 年获得博士学位。一直以来, 他为欧洲导弹集团公司 (MBDA) 的航空航天产业工作, 致力于导弹系统的新型制导技术研究, 是首次将卡尔曼滤波引入组合制导系统中的研究人员之一。此外, 他还是巴斯大学 (University of Bath) 和克兰菲尔德大学的教学人员, 并多年担任航空航天、能源与传感器部门的系主任。任职期间, 他组建了具有强大科研实力的航空航天系统部, 并领导控制与导航组在无人机控制、导航与制导领域成为世界领先的团队。他于 2008 年退休, 并担任荣誉退休教授, 与自主系统组致力于无人机自主系统的研究。迄今为止, 他在制导、控制估计与自主控制领域发表论文 100 余篇, 并多次应邀在大学和国际会议上作专题讲座。他利用自己在多个领域多年的专业知识积累, 提出了一种简便、鲁棒性好和有效的多无人机系统设计方法, 本书体现了他的部分丰富的经验。

Madhanvan Shanmugavel 目前是英国国防研究院克兰菲尔德大学什里弗纳姆校区 (Shrivenham) 国防管理科技学院的安全与防御领域研究员。他于 2007 年开始在克兰菲尔德大学进行无人飞行器路径规划算法的研究。他 2000 年毕业于印度钦奈 (Chennai) 的印度理工大学 (Indian Institute of Technology) 并获得硕士学位。自 2004 年起, 他就职于印度塔塔汽车公司 (TATA Motors)。目前, 他参与多个项目, 并将路径规划算法扩展应用于地面机器人和无人机中。他已发表会议论文 14 篇, 期刊论文两篇。他主要的研究方向是协同系统、制导与控制、机器人和无人系统的路径规划。

原著系列丛书前言

航空航天系列丛书是面向航空与航天科技方面专业人才和操作使用者的参考书籍,内容涵盖了该领域的设计、研发、制造、操纵、维护以及基础设施研发等方面的技术和发展,作者是来自全世界从事航空航天技术专业人员或各大专院校、教育机构的研究人员。

在过去的 20 年里,现代战场对无人机的需求成指数增长,越来越多战场行动由自主控制的无人机取代,因而对无人机进行有效的任务管理至关重要,实现这一技术要求的一个重要的研究领域就是路径规划,也是本书研究的主题。在这本书中,作者 Antonios Tsourdos、Brian White 和 Madhavan Shanmugavel 全面且完整地阐述了无人机的路径规划方法。书中首先介绍了地面机器人的路径规划算法,然后给出了无人机在考虑运动学约束、环境约束和安全性条件下的二维和三维路径规划算法以及协同任务/路径规划技术,书中还介绍了探测和回避障碍物的算法。《无人机协同路径规划》为不断发展的自主飞行器研究人员提供了重要参考。

Allan Seabridge, Roy Langton, Jonathan Cooper 和 Peter Belobaba

原著前言

路径规划是一个复杂的问题,它需要考虑无人机自身的物理约束、飞行环境的约束以及其他的操作使用需求。其中,首先需要满足的约束条件就是产生的路径应该是可飞行的,可飞行路径是那些能够满足无人机运动学约束的路径,满足这一约束可以使无人机的运动限制在最大的运动曲率边界内。路径的安全性是由回避威胁体、障碍物以及其他无人机来确定,也就是说,规划的路径必须避免与其他的无人机相撞,同时又要有足够的灵活性避开环境中的障碍物和威胁体。此外,为了能更好地执行任务和提高完成任务的效率还需要考虑其他的约束,如产生最短路径和消耗最少燃料和能源的路径。

本书整理了作者过去十年间在单架和多架无人机的路径规划、碰撞回避以及路径跟随等方面的研究成果,所给出的算法不仅能得到可飞行的安全路径,而且还能用于实时路径规划。

Antonios Tsourdos

Brian White

Madhavan Shanmugavel

原著致谢

非常感谢为本书提供帮助的各位同事, 感谢他们发展了本书中所描述的路径规划算法, 尤其感谢 Hyo Sang Shin, Luigi Caravita, Matt Robb, Seung Krun Kim, Samuel Lazarus 和 Arpita Sinha 等人!

目录

第 1 章 引言	1
1.1 路径规划公式	2
1.2 路径规划的约束条件	3
1.2.1 可飞行的路径: 满足运动学特性	4
1.2.2 无人机的惯性运动坐标系	5
1.2.3 在路径规划中产生安全路径	6
1.3 协同路径规划与任务规划	6
1.4 路径规划 —— 综述	9
1.5 路图法	11
1.5.1 可视图法	12
1.5.2 Voronoi 图	13
1.6 概率法	14
1.7 势场法	14
1.8 单元分解法	15
1.9 最优控制	15
1.10 最优化技术	16
1.11 路径规划的轨迹	16
1.12 本书的主要内容	17
参考文献	19

第 2 章 二维路径规划	27
2.1 Dubins 路径	28
2.2 采用解析几何方法设计 Dubins 路径	28
2.2.1 Dubins 路径: 外切线解	30
2.2.2 Dubins 路径: 内切线解	32
2.3 Dubins 路径的存在条件	35
2.4 Dubins 路径的长度	35
2.5 采用微分几何方法设计 Dubins 路径	36
2.6 曲率连续的路径	40
2.7 可飞行的回旋路径产生方法	42
2.8 可飞行的 PH 路径产生方法 (二维)	50
参考文献	56
第 3 章 三维路径规划	57
3.1 采用微分几何方法设计三维 Dubins 路径	59
3.2 三维 Dubins 路径的长度	63
3.3 三维空间的 PH 曲线路径	63
3.3.1 空间 PH 曲线	64
3.4 可飞行 PH 路径的设计	65
3.4.1 可飞行路径的设计	66
参考文献	69
第 4 章 碰撞回避	71
4.1 障碍物回避研究	73
4.2 避开已知障碍物的算法	75
4.2.1 障碍物与直线相交的检测方法	75
4.2.2 直线段与障碍物相交	79
4.2.3 圆弧段与障碍物相交	83
4.3 回避环境中未知的静止障碍物	91
4.3.1 安全圆算法	91
4.3.2 中间航点算法	92

4.4 算法的应用	93
4.4.1 Dubins 路径的修正	94
4.4.2 Clothoid 路径的修正	96
4.4.3 PH 路径修正	97
4.4.4 三维空间内的障碍回避	100
参考文献	102
第 5 章 路径跟随制导	105
5.1 跟随 Dubins 路径	106
5.2 线性制导算法	110
5.3 非线性动态逆制导	113
5.4 回避动态障碍物制导	118
5.4.1 无人机的方向控制	121
5.4.2 多碰撞解决方法	127
参考文献	129
第 6 章 多无人机路径规划	131
6.1 问题描述	133
6.2 同时到达问题	134
6.3 阶段一: 产生可飞行路径	136
6.4 阶段二: 产生可行路径	136
6.4.1 最小分离距离法	136
6.4.2 不相交路径法	138
6.4.3 偏移曲线法	138
6.5 阶段三: 产生等长度路径	139
6.6 产生多条路径算法	139
6.7 多无人机路径规划算法的应用	140
6.7.1 二维 Dubins 路径	140
6.7.2 二维 Clothoid 路径	144
6.8 二维 PH 路径	145
6.9 三维 Dubins 路径	147
6.10 三维 PH 路径	151
参考文献	155

附录 A 微分几何	156
A.1 Frenet-Serret 等式	158
A.2 曲率和的挠率重要性	159
A.3 运动与坐标系	160
参考文献	161
 附录 B Pythagorean Hodograph 曲线	 162
B.1 Pythagorean Hodograph 曲线	163
参考文献	164

在很多应用领域,自主性正在替代人工操作。例如,军事中自主性正替代人类做一些危险的事情,民用中自主性正替代人类处理有危害的物质,以及监视和侦察等单调性工作,完成一些枯燥、肮脏和危险的任务,包括在化学和生物环境中的作业 (Blyenburgh 1999; NMAB and ASEB2000) 以及环境监测 (Roberts 等 2008) 等,这些替代人工操作的需要促进了自主系统技术的发展,这些自主系统可应用在空中、水下、太空和陆地等各种环境中。

本书研究无人机,并且是执行任务的一组无人机。无人机在军事和民用领域广阔的应用前景引起了许多学术上和商业上的研究 (OSD 2005; Wilson 2007)。受到自然界鸟群、鱼群、蜂群和蚁群等启发,协同控制 (Rabath 等 2004; Uny Cao 等 1997) 已经成为自主系统中主要研究内容之一。使用一组无人机而非单架无人机具有更好的效费比和容错性。航空电子设备、基于全球定位系统 (GPS) 的导航、飞行控制技术和低成本电子设备的快速发展,加速了无人机在军用和民用领域的应用。相比于现今使用的遥控侦察平台,将来的无人机会更多的自主性。

在自主系统的发展中,路径规划已成为关注的问题之一。一个路径规划算法可以为无人机产生一个或多个安全的可飞行的路径,这个路径必须有确定的长度 (通常是最短),同时,由于无人机的飞行范围有限,用于探测特定区域的时间也必须最小化。此外,在探测一个特定区域或位置时,从某一个特定方向接近是有益的,因为这样可以减少遮蔽和便于辨识。因此,在任何路径规划算法中,路径的长度和方向都是主要考虑的因素。

无人机应该有能力跟踪任何解算出的路径,这就意味着,飞行轨迹必