



R 飞行器航迹规划 Route Planning For Air Vehicles

郑昌文 严平 丁明跃 孙富春 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

V249.1
1015



NUAA2009027325

V249.1
1015-1

飞行器航迹规划

Route Planning for Air Vehicles

郑昌文 严平 丁明跃 孙富春 著



国防工业出版社

· 北京 ·

2009027325

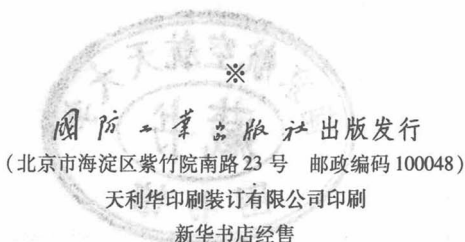
图书在版编目(CIP)数据

飞行器航迹规划/郑昌文等著. —北京:国防工业出版社,2008.12

ISBN 978-7-118-06069-0

I. 飞... II. 郑... III. 飞行器—航迹控制 IV. V249.122

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 184736 号



*

开本 850 × 1168 1/32 印张 6 $\frac{5}{8}$ 字数 162 千字

2008 年 12 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3500 册 定价 26.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革

开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金

评审委员会

国防科技图书出版基金 第六届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 宋家树 蔡镭 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 贺明

委员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟
(按姓氏笔画排序)

甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨伟 吴有生 吴宏鑫

何新贵 张信威 陈良惠 陈冀胜

周一宇 赵万生 赵凤起 崔尔杰

韩祖南 傅惠民 魏炳波

本书主审委员 韩祖南

前 言

随着计算机、自动化、信息技术的发展,现代飞行器技术发生了巨大的变化。飞行器的种类越来越多,性能越来越高,技术密集、结构复杂、协同性强,使得飞行器的操纵愈来愈复杂。与此同时,伴随着现代飞行任务的难度、危险度以及强度的不断增加,由于飞行员受生理和心理等因素的局限,单纯依靠飞行员手工操作完成复杂的飞行任务变得越来越困难。例如,在地形跟随过程中,视觉效应会使飞行员精神高度紧张,对速度的控制容易诱发长周期振荡。对于这些问题,一种有效的解决途径就是采用飞行器航迹规划技术。

飞行器航迹规划是在综合考虑飞行器到达时间、油耗、威胁以及飞行区域等因素的前提下,为飞行器规划出最优或者是满意的飞行航迹,以保证圆满地完成飞行任务。由于飞行器航迹规划的规划区域非常广阔,同时涉及多种约束条件,数学模型建立非常困难。在任务的适应性和规划的实时性等方面,现有的规划算法都难以满足不断变化的应用需求。

近年来针对飞行器航迹规划的特点和现有规划方法存在的问题,我们开展了一系列研究工作,本书是研究工作的总结。书中绝大部分内容取材于我们在国际、国内学术期刊发表的论文,细致而全面地展示了最新的研究成果和进展。

本书系统地讨论了飞行器航迹规划的基本要素。首先,给出了一种新的规划环境表示法,该方法通过采用不同的数据结构表示不同的环境要素,不仅减少了传统规划方法构建搜索图所需要的计算量,而且当规划环境发生变化时,可以及时有效地进行数据更新,较好地满足了实时应用的要求;其次,将飞行航迹表示

为三维空间中的一系列航迹节点,可以通过调整航迹节点的数目来达到所需要的航迹精度;最后,给出了一种既可提高飞行器的任务成功概率,又便于计算的航迹代价函数,为航迹搜索奠定了基础。

在飞行器离线航迹规划方法方面,首先,在稀疏 A * 搜索算法基础之上,本书提出了一种新的三维航迹规划算法。该算法通过把约束条件结合到搜索过程中去,可以有效地削减搜索空间中的无用节点,缩短了航迹搜索时间。在搜索过程中地形信息得到了充分利用,使算法生成的航迹能够自动回避地形和威胁。其次,将进化计算的思想与具体的航迹规划问题相结合,本书提出了一种基于进化计算的飞行器航迹规划算法。该算法采用一种变长实值基因编码方式和一套特定的进化算子,使生成的航迹能够满足各种航迹约束条件,并根据规划环境自动地调整航迹的节点个数。在此基础之上进一步给出了一种飞行器多航迹规划算法。该算法采用 K - 均值聚类,可以根据规划环境和任务要求确定需要生成的航迹数目,并获得空间上较为离散的多条航迹。

在飞行器在线航迹规划方面,本书首先针对飞行环境中威胁的不确定性问题,给出了一种动态稀疏 A * 搜索算法。该算法能够在具有预先未知威胁的飞行环境中实现航迹在线实时修正。当飞行器上装备的探测器探测到飞行环境中存在预先未知的威胁出现时,根据新的环境信息局部修正受到影响的航迹段来获得新的航迹。其次,本书研究了飞行器在线实时航迹规划问题。以稀疏 A * 搜索为基础,通过将飞行器的运动与航迹搜索结合在一起,调节航迹搜索的时间,给出了一种飞行器在线实时航迹规划方法。该算法不但适用于未知环境的航迹规划,而且可以对目标的移动实时地作出反映,满足拦截运动目标的需求。

本书针对多飞行器协调航迹规划问题进行了深入的研究。首先从博弈论角度分析了无人飞行器的协调航迹规划问题,指出了不同博弈模型下编队协调航迹的基本形式。在此基础上提出了一种基于博弈论的协同进化航迹规划算法,运用该算法规划出的飞

行航迹不仅满足了各种航迹约束条件,任务代价也可在各飞行器间实现均衡分配。

针对飞行器任务分配问题,本书给出了任务分配的一般数学模型,重点研究了邻域搜索的相关技术,运用对称群结构描述任务分配中搜索邻域的构造方法,在此基础上提出了一种结合进化计算和群论禁忌搜索的任务分配算法。该算法可以满足无人飞行器动态任务分配的实时性要求。

目前,世界各国正在大力发展各种无人飞行器技术,为航迹规划带来广阔应用前景的同时,也提出了新的需求和挑战。希望本书能够吸引更多的研究人员投身这一领域,将我国航迹规划的理论和应用研究提高到新的水平。

感谢国防科技图书出版基金提供的支持。在本书出版过程中,国防工业出版社唐应恒、郑廷等同志提供了大量帮助,在此表示诚挚的谢意。本书的部分研究内容还得到国家自然科学基金项目(10577021)的资助。

限于水平,错误和疏漏之处在所难免,请专家和读者不吝赐教。

著 者

2008 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 背景	1
1.2 飞行器航迹规划的基本要求	3
1.3 常用的航迹规划方法	5
1.3.1 规划空间表示方法	5
1.3.2 航迹搜索算法	13
1.4 当前航迹规划研究中存在的问题	16
1.5 飞行器任务分配问题	19
1.6 本书的主要内容及安排	24
第 2 章 飞行器航迹规划基本要素	27
2.1 规划空间的表示方法	27
2.2 飞行航迹的表示方法	31
2.3 飞行航迹的基本约束条件	32
2.4 航迹评价	34
2.4.1 影响航迹性能的主要因素	34
2.4.2 代价函数的选取	35
2.4.3 权系数的确定	37
2.5 飞行器航迹规划问题的数学描述	40
第 3 章 飞行器离线航迹规划方法	41
3.1 基于稀疏 A* 搜索的飞行器航迹规划方法	41

3.1.1 航迹节点的扩展	41
3.1.2 算法描述	46
3.1.3 仿真实验	48
3.2 基于进化计算的飞行器航迹规划方法	51
3.2.1 进化计算简介	51
3.2.2 基因编码方式	57
3.2.3 航迹评价方法	58
3.2.4 进化算子	60
3.2.5 算法描述	62
3.2.6 时间复杂性分析	63
3.2.7 仿真实验	64
3.3 飞行器多航迹规划	70
3.3.1 多峰值函数优化与进化算法	71
3.3.2 K -均值聚类	72
3.3.3 多种群进化算法	73
3.3.4 基于进化计算的飞行器多航迹规划算法 描述	75
3.3.5 仿真实验	77
第4章 飞行器在线航迹规划方法	80
4.1 飞行器在线航迹再规划	80
4.1.1 节点的扩展	81
4.1.2 再规划航迹代价的重新计算	82
4.1.3 在线实时航迹再规划方法	83
4.1.4 仿真实验	85
4.2 针对静止目标的飞行器在线航迹规划方法	88
4.2.1 动态开放环境中的实时搜索算法	88
4.2.2 节点的扩展与启发式信息	90

4.2.3	算法描述	90
4.2.4	算法收敛性证明	92
4.2.5	算法改进	94
4.2.6	仿真实验	95
4.3	针对运动目标的飞行器航迹规划方法	97
4.3.1	算法描述	98
4.3.2	收敛性分析	99
4.3.3	算法改进	102
4.3.4	仿真实验	103
第5章	多飞行器协调航迹规划方法	107
5.1	问题描述	108
5.2	飞行器协调航迹规划的博弈论分析	111
5.2.1	多飞行器协调规划的博弈格局	111
5.2.2	飞行器编队组织结构	112
5.3	协同进化计算简介	115
5.4	多飞行器协调航迹规划进化算法	118
5.4.1	算法结构	118
5.4.2	基于排挤的小生境进化	119
5.4.3	航迹评价函数	120
5.4.4	博弈——协同进化过程	121
5.4.5	协调飞行中的航迹在线再规划	123
5.5	仿真实验	124
第6章	飞行器任务分配	129
6.1	任务分配的数学模型	129
6.1.1	飞行器任务分配问题描述	129
6.1.2	飞行器任务分配中的约束条件	130

6.1.3 飞行器任务分配的数学模型	132
6.2 基于对称群的邻域构造方法	134
6.2.1 邻域搜索中解的形式	135
6.2.2 邻域定义的基本形式	135
6.2.3 邻域构造方法	136
6.3 基于对称群的混合搜索策略	138
6.3.1 进化计算与禁忌搜索的结合	138
6.3.2 群论与禁忌搜索的结合	141
6.4 飞行器静态任务分配算法	143
6.4.1 编码方式	144
6.4.2 适应值函数	145
6.4.3 进化操作	146
6.4.4 算法小结	149
6.5 飞行器动态任务再分配	150
6.5.1 任务再分配的一般策略	150
6.5.2 任务再分配算法	151
6.6 仿真实验	153
附录 A 博弈论基础	163
A.1 博弈论的基本概念	163
A.2 基本博弈模型	164
附录 B 搜索算法的群论基础	169
B.1 群的基本概念	169
B.2 确定性规划方法与交换群	171
B.3 启发式算法与对称群	173
参考文献	176

Content

1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Basic requirements of route planning for air vehicles	3
1.3 Survey of route planning for air vehicles	5
1.3.1 Representation of the configuration space	5
1.3.2 Route search algorithms for air vehicles	13
1.4 Problems of existing approaches of route planning	16
1.5 Problem of task assignment for air vehicles	19
1.6 Content organization of this book	24
2 Basic factors of route planning for air vehicles	27
2.1 Representation of the route planning space	27
2.2 Representation of the flight route	31
2.3 Constraints on the flight route	32
2.4 Evaluation of the flight route	34
2.4.1 Basic factors which impacts the performance of flight route	34
2.4.2 Cost function of the flight route	35
2.4.3 Weighting coefficients	37
2.5 Mathematic formulation of the route planning problem	40
3 Off-line route planning for air vehicles	41
3.1 Route planning algorithm based on SAS (sparse A * search)	41

3. 1. 1	Expansion of route node	41
3. 1. 2	Description of the algorithm	46
3. 1. 3	Experiments	48
3. 2	Route planning algorithm based on evolutionary computation	51
3. 2. 1	Introduction of evolutionary computation	51
3. 2. 2	Encoding of chromosome	57
3. 2. 3	Evaluation of flight route	58
3. 2. 4	Evolutionary operators	60
3. 2. 5	Description of the evolutionary route planning algorithm	62
3. 2. 6	Time complexity of the evolutionary route planning algorithm	63
3. 2. 7	Experiments	64
3. 3	Multi-route planning problem for air vehicles	70
3. 3. 1	Multi-peak function optimization and evolutionary computation	71
3. 3. 2	K-means clustering	72
3. 3. 3	Evolutionary algorithm of multi-population	73
3. 3. 4	Multi-route planning for air vehicles based on evolutionary computation	75
3. 3. 5	Experiments	77
4	On-line route planning for air vehicles	80
4. 1	On-line route re-planning for air vehicles	80
4. 1. 1	Expansion of route node	81
4. 1. 2	Recomputation of cost function	82
4. 1. 3	On-line real-time route re-planning algorithm	83
4. 1. 4	Experiments	85
4. 2	On-line route planning for air vehicles towards still targets	88

4.2.1	Real-time search algorithm in dynamic open environment	88
4.2.2	Node expansion and heuristic information	90
4.2.3	Description of the algorithm	90
4.2.4	Proof of the convergence of the algorithm	92
4.2.5	Improvement	94
4.2.6	Experiments	95
4.3	On-line route planning for air vehicles towards moving targets	97
4.3.1	Description of the algorithm	98
4.3.2	Proof of the convergence of the algorithm	99
4.3.3	Improvement	102
4.3.4	Experiments	103
5	Cooperative route planning problem of multiple air vehicles	107
5.1	Statement of the problem	108
5.2	Game theory framework of cooperative route planning	111
5.2.1	Game pattern of coordinative route planning for multiple air vehicles	111
5.2.2	Structures of air vehicle formation	112
5.3	Introduction of co-evolutionary computation	115
5.4	Co-evolutionary coordinative route planning algorithm for multiple air vehicles	118
5.4.1	Framework of the algorithm	118
5.4.2	Niched evolutionary algorithm based on crowding	119
5.4.3	Evaluation function of the flight route	120
5.4.4	Process of the co-evolutionary algorithm based on game	121
5.4.5	On-line coordinative route re-planning	123
5.5	Experiments	124

6 Task assignment for air vehicles	129
6.1 Mathematic model of task assignment	129
6.1.1 Statement of the problem	129
6.1.2 Constraints	130
6.1.3 Mathematic model	132
6.2 Neighborhood construction based on symmetrical group	134
6.2.1 Format of solution of neighborhood search	135
6.2.2 Basic format of neighborhood	135
6.2.3 Methods of neighborhood construction	136
6.3 Hybrid search approach based on symmetrical group	138
6.3.1 Combination of evolutionary computation and tabu search	138
6.3.2 Combination of group theory and tabu search	141
6.4 Static task assignment algorithm for air vehicles	143
6.4.1 Encoding	144
6.4.2 Fitness function	145
6.4.3 Evolutionary operation	146
6.4.4 Description of the algorithm	149
6.5 Dynamic task assignment algorithm for air vehicles	150
6.5.1 General strategy of task reassignment	150
6.5.2 The algorithm of task reassignment	151
6.6 Experiments	153
Appendix A Basics of the game theory	163
A.1 Basic concepts of the game theory	163