

无人飞行器 航迹规划

丁明跃 郑昌文 周成平 严 平

编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

无人飞行器 航迹规划

丁建明 张德生 张庆华 尹 华

国防工业出版社



ISBN 7-118-04511-4
定价：35.00元

无人飞行器航迹规划

丁明跃 郑昌文 周成平 严 平 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

飞行器航迹规划是实现飞行器自动导航的一项关键技术,是人工智能及导航与制导领域中的重要研究方向之一。本书结合作者的研究工作,系统、深入地介绍了无人飞行器航迹规划的概念、理论及方法。主要内容包括航迹规划建模、飞行器离线航迹规划、飞行器在线航迹规划、多飞行器协调航迹规划、航迹规划中的地形/影像匹配以及采用 GPS 导航的规划方法等多个方面。适合于航迹规划领域的科研工作者和工程技术人员作为参考资料,也适合于人工智能及导航与制导相关专业的硕士、博士研究生作专业参考书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

无人飞行器航迹规划/丁明跃等编著. —北京:电子工业出版社, 2009.1
ISBN 978-7-121-07586-5

I. 无… II. 丁… III. 无人航天器—最佳航迹—规划 IV. V476.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 164352 号

责任编辑:秦绪军

印 刷:北京天宇星印刷厂

装 订:涿州市桃园装订有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:850×1168 1/32 印张:10.125 字数:273 千字 彩插:1

印 次:2009 年 1 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:26.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

前 言

无人飞行器 (Unmanned Aerial Vehicles) 是指在大气层内或大气层外空间 (太空) 飞行的无人机、无人飞艇、导弹等飞行器。与有人驾驶或者遥控飞行器不同, 无人飞行器具有自动起降 (发射)、自动驾驶、自动导航、自动快速准确定位、自动信息采集与传送等多项功能, 特别适合代替人在危险、恶劣和极限的环境下完成特定的工作和任务, 因此在军事、测绘、航空航天、商业等领域有着广泛应用。

无人飞行器在完成任务过程中, 需要对如何有效、安全地完成自己的任务过程进行规划, 这就是所谓的任务规划 (Mission Planning)。在任务规划过程中, 最重要、也是最复杂的就是为无人飞行器规划出一条完成飞行任务所需要的飞行航迹, 即无人飞行器航迹规划 (Route Planning for Unmanned Aerial Vehicles)。在无人飞行器, 特别是导弹, 如巡航导弹的航迹规划过程中, 不仅需要考虑到发射区、目标区的各种信息, 对于飞行器途中飞过的区域也要满足一定的条件限制。这些限制不仅包括威胁区、禁飞区、障碍区等地理与作战信息, 还必须包括飞行器自身的各种飞行限制性条件, 比如匹配区、导航点、最小转弯半径和最低飞行高度等。对于导弹而言, 在实际使用过程中, 为了达到特定的目的, 如为了达到突防和饱和攻击的目的, 还必须考虑多航迹规划、协调航迹规划等问题, 以最大限度地发挥无人飞行器的功效。

本书是作者 1995 年以来从事无人飞行器航迹规划研究工作的总结。虽然, 一部分研究是针对无人机展开的, 但大多数假定的研究对象都是导弹, 特别是能够贴地巡航飞行的巡航导弹。因此, 除非特别说明, 在本书中所指无人飞行器主要是指导弹, 特

别是巡航导弹。按照航迹规划理论的发展历程,本书主要分为离线航迹规划、在线协调航迹规划、多航迹规划等部分。第 1 章绪论,在对国内外主要航迹规划方法综述基础上,重点讨论了已有这些方法在实际使用过程中所存在的主要问题;在航迹规划过程中,一个首先必须解决的问题就是航迹规划问题的理论建模,包括规划空间的定义,约束条件的表达,航迹代价的计算等,是第 2 章的主要内容;第 3 章分别介绍了三种离线航迹规划方法,包括稀疏 A*算法,基于飞行路线图的自适应航迹规划方法以及基于进化计算的航迹规划方法;为了满足实际应用过程的需要,第 4 章和第 5 章讨论了在线航迹规划和协调航迹规划问题,特别研究了针对运动目标的基于进化计算的航迹规划算法;第 6 章针对多飞行器所涉及的任务分配问题讨论了基于对称群的混合搜索策略和基于进化计算的任务分配算法。第 7 章,以美国战斧式巡航导弹为例,介绍了美国巡航导弹的发展过程以及航迹规划系统的演变历程,为今后开展我国自行开发导弹航迹规划系统提供参考和借鉴。

书中包含了在 1995 年至 2008 年期间在华中科技大学图像识别与人工智能研究所的十多名博士、硕士研究生的工作,对于他们所做出的贡献表示感谢!由于作者水平的限制,书中难免存在一些问题和不足,欢迎读者批评指正!

丁明跃
2008 年 10 月 21 日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 航迹规划研究的背景和意义	1
1.2 无人飞行器航迹规划综述	3
1.2.1 无人飞行器航迹规划问题	3
1.2.2 常用的航迹规划方法	6
1.2.3 传统航迹规划算法存在的问题	16
1.3 本书的主要内容和安排	19
第 2 章 无人飞行器航迹规划建模	23
2.1 规划空间表示方法	23
2.2 飞行航迹的表示方法	27
2.3 航迹代价	28
2.3.1 代价函数的选取	28
2.3.2 权系数的确定	30
2.4 巡航导弹航迹规划模型	34
2.4.1 巡航导弹简介	34
2.4.2 航迹规划模型	39
2.4.3 航迹的表示	39
2.4.4 航迹的约束条件	41
2.4.5 航迹评价	43
2.5 本章小结	45
第 3 章 离线航迹规划方法	46
3.1 稀疏 A* 搜索算法	47
3.1.1 航迹节点的扩展	47

3.1.2	算法描述	52
3.1.3	实验结果分析	54
3.2	基于飞行路线图的自适应航迹规划	58
3.2.1	随机路线图方法	59
3.2.2	基于 PRM 方法的飞行路线图	61
3.2.3	航迹再规划原理	67
3.2.4	威胁/任务自适应航迹规划方法	70
3.2.5	仿真结果与分析	75
3.3	基于进化计算的航迹规划方法	81
3.3.1	进化计算	82
3.3.2	基于进化计算的航迹规划方法——ERP	89
3.3.3	实验结果分析	100
3.4	本章小结	109
第 4 章	在线航迹规划方法	110
4.1	无人飞行器在线实时航迹规划方法	111
4.1.1	节点的扩展与启发式信息	111
4.1.2	算法描述	112
4.1.3	算法收敛性证明	113
4.1.4	算法改进	115
4.1.5	模拟实验结果	117
4.2	针对运动目标的飞行器在线航迹搜索算法	119
4.2.1	节点的扩展与启发式信息	119
4.2.2	算法描述	120
4.2.3	收敛性分析	121
4.2.4	算法改进	125
4.2.5	实验结果分析	126
4.3	基于可行优先准则的实时航迹规划方法	130
4.3.1	问题描述	130
4.3.2	引导点集	134

4.3.3	遗传算法获得引导点集	136
4.3.4	FFS 算法的实现	142
4.3.5	改进局部航迹的三维规划	143
4.3.6	飞行状态保持	148
4.3.7	动态网格	150
4.3.8	目标引导点	152
4.3.9	实验结果与分析	154
4.4	本章小结	159
第 5 章	无人飞行器多航迹规划方法与协同航迹规划	161
5.1	多峰值函数优化与进化计算	163
5.2	K-均值聚类	165
5.3	基于进化计算的 UAV 多航迹规划方法	166
5.3.1	多种群进化算法	166
5.3.2	UAV 多航迹规划方法	167
5.3.3	实验结果分析	170
5.4	基于时间协同的多航迹规划方法	174
5.4.1	协同航程	175
5.4.2	协同代价函数	178
5.4.3	协同航迹搜索	178
5.4.4	实验结果与分析	183
5.5	多飞行器协调航迹规划	192
5.5.1	多 UAV 协调航迹规划问题描述	193
5.5.2	协同进化计算简介	195
5.5.3	多 UAV 协调航迹规划进化算法——CCRP	198
5.5.4	实验结果分析	205
5.6	本章小结	211
第 6 章	多飞行器任务分配	213
6.1	UAV 任务分配的数学模型	214
6.1.1	UAV 任务分配问题描述	214

6.1.2	UAV 任务分配中的约束条件	215
6.1.3	UAV 任务分配的数学模型	217
6.2	UAV 任务分配的群论基础	220
6.2.1	群的基本概念	220
6.2.2	确定性方法与交换群	223
6.2.3	启发式算法与对称群	226
6.3	基于对称群的邻域构造方法	228
6.3.1	邻域搜索中解的形式	228
6.3.2	邻域定义的基本形式	229
6.3.3	邻域构造方法	230
6.4	基于对称群的混合搜索策略	232
6.4.1	超启发式算法的集中性与多样性分析	232
6.4.2	进化计算与禁忌搜索的结合	234
6.4.3	群论与禁忌搜索的结合	237
6.5	UAV 任务分配算法	241
6.5.1	编码方式	241
6.5.2	适应值函数	243
6.5.3	进化操作	244
6.5.4	算法小结	247
6.6	动态环境中的 UAV 任务分配	248
6.6.1	任务执行中的动态环境	248
6.6.2	UAV 任务再分配的一般策略	249
6.6.3	新增任务时的任务再分配算法	251
6.6.4	UAV 失效时的任务再分配算法	252
6.7	仿真结果分析	253
6.7.1	仿真环境	253
6.7.2	静态任务分配实验	255
6.7.3	动态任务分配实验	263
6.8	本章小结	269

第 7 章 战斧式巡航导弹及其航迹规划系统	271
7.1 战斧式巡航导弹简介	271
7.2 战斧式巡航导弹发展历程	275
7.2.1 BGM—109 Block I 战斧系列巡航导弹	275
7.2.2 BGM—109 Block II 战斧系列巡航导弹	279
7.2.3 BGM—109 BLOCK III 战斧系列巡航导弹	283
7.2.4 BGM—109 BLOCK IV	286
7.2.5 BGM—109 BLOCK IV + 战术战斧	287
7.3 战斧式巡航导弹航迹规划系统发展历程	288
7.3.1 战区任务规划中心	288
7.3.2 BlockIII 任务规划系统改进型	289
7.3.3 战术战斧任务规划系统	290
7.4 结束语	291
参考文献	293

第 1 章 绪 论

1.1 航迹规划研究的背景和意义

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，使飞行器的操纵越来越复杂。同时，随着现代飞行任务的难度、危险度，以及强度的不断增加，受飞行员生理和心理等因素的限制，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。为解决这些问题，一种有效的解决途径就是采用航迹规划（Route Planning）技术。

作为任务规划系统（Mission Planning System）的核心之一，航迹规划是一门伴随现代信息技术而发展起来的高新技术。它已被广泛应用于飞行器、水面舰艇、地面车辆及机器人等的导航系统中。对舰艇、自主战车、机器人等应用来说，一般称为路径规划^[1~5]。本书主要研究巡航导弹等无人飞行器中的航迹规划问题。

准确地说，无人飞行器（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）航迹规划就是在综合考虑 UAV 到达时间、燃料消耗、威胁以及飞行区域等因素的前提下，为飞行器规划出一条最优，或者是最满意的飞行航迹，以保证圆满完成飞行任务^[6]。

在现代战争中，随着防空系统性能的日益提高，飞行器安全突防是实现精确打击的关键。任务规划系统作为精确制导武器必



不可少的支持工具,是提高武器系统实际作战效能的关键技术之一,因而备受世界各国的关注。目前,美国在这一领域处于领先地位^[7]。

美国空军莱特航空实验室最初为了减轻飞行员工作负荷,提高执行任务的有效性和飞机的生存性,利用民机飞行管理系统的经验和成果,将四维导航和能量管理技术用于战斗机的飞行管理,首先提出了“战术飞行管理系统”概念^[8]。战术飞行管理系统的核心是轨迹生成和轨迹跟踪,其前提是最优轨迹的生成,即航迹规划。美国陆海空三军都装备有不同类型的任务规划系统^[9],如空军的任务支援系统,海军的战术飞机任务规划系统等。其中,空军的任务支援系统曾在海湾战争中广泛使用并取得了显著成效。目前,美国研制的任务规划系统已发展到第三代,并继续朝着提高效率和降低系统成本等方面发展。英国最新的先进任务规划装置的研制方案已提交给英国空军。它能够在夜间和恶劣天气条件下支持鹞式及狂风等战机进行隐蔽攻击。法国目前正在进行三个系列任务规划系统的研制。

航迹规划作为任务规划的主要功能之一,在任务规划系统中占有重要地位。但由于受到多种条件的限制,长期以来,航迹规划基本上依赖规划人员的手工操作。在 20 世纪 80 年代初,人工航迹规划的缺陷还没有完全显现出来。这主要是由当时技术落后,防空体系不完善,以及军用飞行器对航迹规划要求不高等因素所决定的。随着防空技术和体系的不断发展和完善,人工规划的粗糙航迹已难以达到有效突防目的。同时,由于卫星、通信技术的飞速发展,航迹规划人员获得的信息越来越多,例如,通过卫星、无人机等侦察手段可以得到敌方防空阵地的精确信息,如位置、类型、火力圈范围等;通过数字地形图可以获得相关地区地形信息,如高山、峡谷和平原等。为了最大限度减小突防飞行器被敌方雷达发现的概率,航迹规划必须为飞行器规划出超低空地形跟随、地形回避和威胁回避的飞行航迹,同时满足飞行器自身性能等



约束要求。由于其中涉及因素太多,各种因素之间需要进行仔细权衡,因此传统的手工规划方式难以完成如此复杂的任务^[7]。

20 世纪 80 年代中后期以来,美国投入大量的人力物力进行自动航迹规划技术的研究,取得了一定成绩。其中最具代表性的是系统控制技术公司为空射巡航导弹开发的自动航迹生成模块和波音航空航天公司开发的基于人工智能的任务规划软件。但这两个航迹规划系统在实际应用上还存在许多缺陷,如 ARM 采用直观推断法,它的许多航迹产生规则与人工方法相似,计算量大;而基于人工智能的任务规划软件中知识的表达和抽象层的构造是一大难题。

20 世纪 90 年代以来, NASA 和美国军方联合开展了一项名为 ANOE (Automated Nap of the Earth) 的研究计划,旨在辅助直升机驾驶员实施贴地 (NOE) 飞行。从公开发表的文献[10~11]等来看,该计划主要是利用机载传感器获取环境信息结合导航系统数据,实时产生 NOE 最优轨迹,并给出沿最优轨迹飞行的导引控制指令。ANOE 实际上研制的是一个实时航迹规划系统。

UAV 航迹规划的核心内容是选择满足一系列约束条件的最优航迹,从某种意义上讲,就是使明确的目标与各种限制函数相匹配的最优化问题。由于涉及约束较多,数学模型建立困难,这个问题的解决受到了理论和技术上的种种限制。现有的系统在提高航迹规划的模型保真度、优化精度和执行效率方面还有许多工作要做^[7]。本书中考虑 UAV 的不同任务情形,针对 UAV 航迹自动搜索算法展开研究。

1.2 无人飞行器航迹规划综述

1.2.1 无人飞行器航迹规划问题

军用 UAV 航迹规划的目的是要找到一条能够保证 UAV 安全突防的飞行航迹,既要尽量减少被敌防空设施捕获和摧毁的概



率,又要降低坠毁的概率,同时还必须满足各种约束条件。这些因素之间往往相互耦合,改变其中某一因素就会引起其他因素的变化,因此在航迹规划过程中需要协调多种因素之间的关系。具体来说,军用 UAV 航迹规划需要考虑如下因素^[12~14]:

1. 航迹的隐蔽性

航迹的隐蔽性是航迹规划问题需要考虑的首要因素。在现代战争环境中,隐蔽意味着安全。在现代飞行器设计过程中,一般会使雷达散射截面(Radar Cross Section, RCS)尽可能小,以降低被敌方预警雷达和截获雷达探测到的概率,延迟或消除被地空导弹系统或机载拦截导弹的火控雷达对它们的跟踪,从而提高 UAV 的生存能力。

然而,尽管飞行器在设计时已采用了多种隐身技术,但在高空仍然会有部分雷达信号被反射回去,于是设计一条具有良好隐蔽性的飞行航迹就十分关键。通常人们所采用的隐蔽方式有两种:一是使规划航迹远离威胁源;二是降低飞行高度,利用地形遮挡作用和反射的地面杂波来降低被雷达探测到的概率。

2. 飞行器的物理限制

航迹规划时必须考虑 UAV 的物理限制,否则飞行器将不可能按生成的航迹进行飞行。UAV 的物理限制对航迹的约束主要有:

(1) 最大拐弯角:它限制了生成的航迹只能在小于或等于预先确定的最大角度范围内转弯。该约束条件取决于具体 UAV 的性能和飞行任务。例如,在密集编队飞行中的 UAV 剧烈转弯将大大增加它们之间的碰撞概率。

(2) 最大爬升/俯冲角:由 UAV 自身的机动性能决定,它限制了航迹在垂直平面内上升和下滑的最大角度。

(3) 最小航迹段长度:它限制了 UAV 在开始改变飞行姿态



之前必须直飞的最短距离。为减少导航误差, UAV 在远距离飞行时一般不希望迂回行进和频繁地转弯。

(4) 最低飞行高度: 在通过敌方防御区时, 需要在尽可能低的高度上飞行, 以减少被敌防御系统探测到并摧毁的概率。但是飞得过低往往会使得与地面相撞的坠毁概率增加。一般在保证离地高度大于或等于某一给定高度的前提下, 使飞行高度尽量降低。

3. 飞行任务要求

UAV 的每一次飞行都是为了完成特定的飞行任务。在战场环境下, 具体给定的飞行任务一般包括 UAV 的到达时间和进入目标方向等。这就要求生成的航迹满足:

(1) 航迹距离约束: 即限制航迹的长度必须小于或等于一个预先设置的最大距离。它对应于燃料的供应量或在某一固定时间内必须到达目标。

(2) 固定的目标进入方向: 确保 UAV 从特定的角度接近目标, 从而对目标的最薄弱部位进行有效攻击。

4. 协作性要求

UAV 的协作性能也是航迹规划必须考虑的因素之一。例如, 某一特定的任务要求多个 UAV 从不同的方向对同一目标实施攻击。为了使摧毁目标的概率达到最大, 要求所有 UAV 同时到达。在此任务执行过程中, 如果某一 UAV 遇到威胁需要改变其到达时间的话, 其他 UAV 必须作相应调整。因此, 整个飞行编队的预计到达时间 (Estimated Time of Arrival, ETA) 并不一定是完全按照原定的时间, 而是在规划过程中相互协调的动态结果。在这种情形下, 如何为每一 UAV 生成有效的航迹并协调 UAV 的到达时间是完成攻击任务的关键。



5. 实时性要求

当预先具备完整精确的环境信息时,人们可一次性规划出一条自起点到终点的最优航迹^[15~16]。然而在现代战争中,一方面由于战场环境的瞬息万变,难以保证获得的环境信息不发生变化。另一方面,由于任务的不确定性,UAV常常需要临时改变所担负的飞行任务。例如,UAV需要执行紧急救援任务,或者需要迅速逃离威胁区域等。在这些情况下,不可能预先在地面规划出满足要求的航迹。对于上述第一种情形,在环境的变化区域不是很大的情况下,可以通过局部更新的方法进行航迹在线再规划。对于第二种情形,或者环境的变化区域较大时,则必须具备实时在线规划功能。

1.2.2 常用的航迹规划方法

航迹规划是机器人学研究中最重要领域之一,这方面的研究已有很长的历史。Canny在1988年已经证明航迹规划是一个NP问题^[17],对其直接求解往往会导致组合爆炸。为了加速规划进程,近年来国外学者已提出了许多不同的规划方法。下面我们对已有的规划方法分类加以概述^[2~3, 18~19]。

1. 基于概略图的规划方法

概略图(Skeleton)也称路线图(Roadmap)。在基于概略图的路径规划方法中,首先根据一定的规则将自由的C空间(Configuration Space)表示成一个由一维的线段构成的网络图,然后采用某一搜索算法在该网络图上进行航迹搜索。这样,路径规划问题被转化为一个网络图的搜索问题。概略图必须表示出C空间中的所有可能的路径,否则该方法就是不完全的,即可能丢失最优解。常用的概略图方法包括通视图法(Visibility Graph)、Voronoi图法、轮廓图法(Silhouette)、子目标网络法(Subgoal Network)和随机路线图法(Probabilistic Roadmap, PRM)。