



装备科技译著出版基金



小型无人机理论与应用

SMALL UNMANNED AIRCRAFT

Theory and Practice

[美] 兰德尔·W·比尔德 (Randal W. Beard)

著

[美] 蒂莫西·W·麦克莱恩 (Timothy W. McLain)

王强 沈自才 伍政华 丁义刚 译



国防工业出版社

National Defense Industry Press



装备科技译著出版基金

小型无人机理论与应用

SMALL UNMANNED AIRCRAFT

Theory and Practice

[美] 兰德尔·W·比尔德(Randal W. Beard)

[美] 蒂莫西·W·麦克莱恩(Timothy W. McLain)

著

王 强 沈自才 伍政华 丁义刚 译

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字：军-2014-200 号

图书在版编目(CIP)数据

小型无人机理论与应用 / (美) 兰德尔·W·比尔德 (Randal W. Beard), (美) 蒂莫西·W·麦克莱恩 (Timothy W. McLain) 著; 王强等译. —北京: 国防工业出版社, 2017. 2

书名原文: Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice

ISBN 978-7-118-10969-6

I. ①小… II. ①兰… ②蒂… ③王… III. ①无人驾驶飞机-研究 IV. ①V279

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 023035 号

Small unmanned aircraft: theory and practice (ISBN 978 - 0 - 691 - 14921 - 9) by Randal W. Beard, Timothy W. McLain. Copyright © 2012 by Princeton University Press. All rights reserved. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form of by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording or by any information storage and retrieval system, without permission in writing from the Publisher.

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 15 1/4 字数 292 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 89.00 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

前 言

无人机(Unmanned Aircraft Systems, UAS)在世界范围内的防御计划和防御策略中扮演着越来越重要的角色。技术上的进步同时推动了大型无人机(如“全球鹰”“肉食动物”)和小型并且越来越适合于无人操控的飞机(如“黄蜂”“夜鹰”)的发展。近期的军事冲突表明,无人机在军事上有着广泛的应用,如反恐、监控、战场破坏评估以及通信中继。

在民用及商业领域同样有着广泛的潜在应用,包括环境监测(如污染、天气、科学应用),森林火灾监测,国土安全,边境巡逻,毒品禁止,空中监视与测绘,交通监测,精细化农业,减灾救灾,自组通信网络,乡村搜索及搜救。但是,这些应用要想得到成熟的发展,必须要增加无人机系统的可靠性,拓展其功能,改善其易用性并且降低其成本。除了这些技术和经济方面的因素之外,应用无人机在本国和国际空间飞行也需要解决在管理方面的限制。

无人机系统不单指飞机本身,还包括系统中应用的所有支持设备,包括传感器、微控制器、软件、地面站计算机、用户界面以及通信设备。本书主要集中在飞机及其导航、制导与控制子系统。无人机通常可以分为两大类:固定翼飞机和旋翼飞机。两类飞机在自动飞行设计方面各有其独特的性质。本书主要集中介绍固定翼飞机,并根据飞机的尺寸对其进行分类。小型无人机主要是指翼展在5~10英尺(1英尺=0.3048m)的固定翼飞机。小型无人机通常是由汽油驱动的,而且一般情况下需要跑道进行起飞和降落。当然,有一个著名的特例是波音公司的“扫描鹰”,它采用弹射装置起飞。小型无人机通常的设计工作时间为10~12h,载质量为10~50磅(1磅=0.4536kg)。

微小型飞机(Miniature Air Vehicle, MAV)是指翼展小于5英尺的固定翼飞机。MAV通常是由电池驱动、手动发射并用机身着陆,因此其起飞和降落不需要跑道。其设计飞行时间从20min到几小时。负载质量可以从几盎司到几磅。负载能力小限制了MAV上可以装配的传感器模块和机载计算机。这些限制给MAV自动操作模式的设计带来了有趣的挑战。不过,本书中所描述的很多概念也适用于更大或者更小的飞机,本书的重点是如何实现制导和控制负载能力受限的小型 and 微型飞机。

本书原本的创作意图是要为研究生讲授一门课程,使学生们能够从事无人机协同控制方面的研究工作。我们的大多数学生具有电气工程、计算机工程、机械工程或者计算机科学的研究背景。只有很少的学生上过空气动力学方面的课

程,电气工程、计算机工程和计算机科学专业的学生一般都没有上过运动学、动力学或者流体力学等课程。不过,多数学生上过信号与系统、反馈控制、机器人学和计算机视觉的课程。

在飞机动力学与控制方面有很多相关的教材,不过大多假设读者具有航空学的背景但却没有接触过反馈控制。文献[1-6]等教材在没有介绍流体动力学和航空学基本概念的情况下讨论空气动力学。同时,这些教材通常包括反馈控制概念的详细介绍,如根轨迹等。文献[7]更接近于我们所要教给学生的,但是其重点在于自动控制中的稳定性增强系统。自动操作需要的不仅是简单的自动驾驶,还包括自动起飞和降落、路径规划、路径跟踪等操作,并且要集成高度的自主决策过程。据我们所知,目前并没有涵盖飞机动力学模型、底层自动驾驶仪设计、状态估计以及高级路径规划等内容的教材。我们希望这本书能够填补这个空白。我们的目标读者是具有反馈控制和机器人学背景知识的电气工程、计算机工程、机械工程和计算机科学专业的学生。我们希望本书也能够对那些航空领域的工程师在自动控制系统方面有所帮助。

在本书的写作过程中,我们的目标是写作13章,每章包括3个小时课程,这样这个课程就很适合一学期的教学内容。不过其中某些章节比我们原来预想的要长一些,我们的经验是书中的内容能够在一学期的课程中完整讲述。附加的材料可以让指导教师在讲述内容上有一些自由度。

本书的一个独特之处在于附带的设计项目。在我们讲述这门课程的时候,从原来布置书写作业发展到计算机仿真任务。我们发现当学生们完成计算机仿真的时候,他们会更仔细地分析资料,而且理解得也更深入。

我们讲授这门课的时候,让学生们开发一套完整的飞行模拟器,包括真实的飞行动力学、传感器模型、自动驾驶仪设计以及路径规划。在课程结束的时候,学生们已经完成了这个项目的每个部分,而且也理解了这些部分是如何整合在一起的。此外,他们理解了一个相当复杂的飞行模拟软件的内部工作原理,并可以在他们今后的研究项目中应用。

我们的设计项目原来是要用C/C++语言来开发实现的,这需要学生具有熟练的编程能力。有些时候,这给学生和指导教师增加了额外的负担。因此,我们修改了练习项目,用Matlab/Simulink就可以实现。我们觉得这可以使学生的精力能够更加集中于MAV相关的概念而不是编程方面的细节。附录中给出了在MAV仿真的开发中将要用到的主要的Matlab/Simulink工具。与本书相关的网站也给出了能够帮助读者完成书中项目的仿真设计文件。

目 录

第1章 引言	1
1.1 系统架构	1
1.2 设计模型	3
1.3 设计项目	5
第2章 坐标系	6
2.1 旋转矩阵	6
2.2 MAV 坐标系	8
2.2.1 惯性坐标系 $\mathcal{F}^i$	9
2.2.2 飞机坐标系 $\mathcal{F}^v$	9
2.2.3 飞机-1 坐标系 $\mathcal{F}^{v1}$	10
2.2.4 飞机-2 坐标系 $\mathcal{F}^{v2}$	10
2.2.5 机体坐标系 $\mathcal{F}^b$	11
2.2.6 稳定坐标系 $\mathcal{F}^s$	12
2.2.7 风轴坐标系 $\mathcal{F}^w$	13
2.3 空速、风速和地速	14
2.4 风速三角	15
2.5 矢量的微分	18
2.6 本章小结	19
注释和参考文献	19
2.7 设计项目	19
第3章 运动学与动力学	22
3.1 状态变量	22
3.2 运动学	23
3.3 刚体动力学	24
3.3.1 平移运动	25
3.3.2 旋转运动	26
3.4 本章小结	29
注释和参考文献	29
3.5 设计项目	30

第4章 力与力矩	31
4.1 重力	31
4.2 空气动力与力矩	32
4.2.1 控制面	33
4.2.2 纵轴空气动力学	35
4.2.3 横向空气动力学	39
4.2.4 空气动力学系数	40
4.3 推进力与力矩	41
4.3.1 推进器推力	41
4.3.2 推进器扭矩	42
4.4 空气干扰	42
4.5 本章小结	45
注释和参考文献	46
4.6 设计项目	46
第5章 线性设计模型	47
5.1 非线性运动方程的总结	47
5.2 协调转弯	49
5.3 平衡条件	51
5.4 传递函数模型	52
5.4.1 横向传递函数	53
5.4.2 纵向传递函数	55
5.5 线性状态空间模型	60
5.5.1 线性化	60
5.5.2 横向状态空间方程	60
5.5.3 纵向状态空间方程	64
5.5.4 降阶模式	67
5.6 本章小结	70
注释和参考文献	71
5.7 设计项目	71
第6章 基于连续闭环的自动驾驶仪设计	73
6.1 连续闭环	73
6.2 饱和约束和性能	75
6.3 横向自动驾驶仪	76
6.3.1 滚转姿态环设计	76
6.3.2 航迹保持	79
6.3.3 侧滑保持	80

6.4 纵向自动驾驶仪	81
6.4.1 俯仰姿态控制	82
6.4.2 利用俯仰指令的高度控制	83
6.4.3 利用俯仰指令的空速控制	85
6.4.4 利用油门的空速控制	86
6.4.5 高度控制状态机	87
6.5 PID 环的数字实现	87
6.6 本章小结	90
6.6.1 横向自动驾驶仪设计过程总结	90
6.6.2 纵向自动驾驶仪设计过程摘要	91
注释和参考文献	91
6.7 设计项目	91
第7章 MAV 的传感器	93
7.1 加速度计	93
7.2 速率陀螺	96
7.3 压强传感器	97
7.3.1 高度测量	98
7.3.2 空速传感器	100
7.4 数字指南针	101
7.5 全球定位系统	103
7.5.1 GPS 测量误差	103
7.5.2 GPS 定位误差的瞬时特性	106
7.5.3 GPS 速率测量	107
7.6 本章小结	108
注释和参考文献	108
7.7 设计项目	108
第8章 状态估计	110
8.1 基准机动飞行	110
8.2 低通滤波器	111
8.3 逆推传感器模型状态估计	111
8.3.1 角速率	112
8.3.2 高度	112
8.3.3 空速	112
8.3.4 转动和倾斜角度	113
8.3.5 位置、航线和对地速率	114
8.4 动态观测器理论	115

8.5	连续 - 离散卡尔曼滤波器推导	117
8.6	姿态估计	120
8.7	GPS 平滑	122
8.8	本章小结	125
	注释和参考文献	125
8.9	设计项目	126
第 9 章	制导系统的设计模型	127
9.1	自动驾驶仪模型	127
9.2	受控飞行的运动模型	127
9.2.1	协调转弯	128
9.2.2	加速爬升	129
9.3	运动制导模型	130
9.4	动态制导模型	132
9.5	本章小结	133
	注释和参考文献	133
9.6	设计项目	134
第 10 章	直线和轨道跟踪	135
10.1	直线路径跟随	135
10.1.1	直线跟随的纵向制导策略	138
10.1.2	直线跟随的侧向制导策略	138
10.2	轨道跟随	140
10.3	本章小结	142
	注释和参考文献	144
10.4	设计项目	144
第 11 章	路径管理器	146
11.1	位置点间的转换	146
11.2	Dubins 路径	152
11.2.1	Dubins 路径定义	152
11.2.2	路径长度计算	153
11.2.3	Dubins 路径追踪算法	157
11.3	本章小结	161
	注释和参考文献	161
11.4	设计项目	162
第 12 章	路径规划	163
12.1	点到点算法	163
12.1.1	维诺图	163

12.1.2 快速探测随机树	167
12.2 覆盖算法	174
12.3 本章小结	177
注释与参考文献	177
12.4 设计项目	178
第 13 章 基于视觉的导航	179
13.1 框架、相机坐标系与投影几何	179
13.1.1 相机模型	180
13.2 框架指向	182
13.3 地理定位	183
13.3.1 使用平地模型确定到目标的距离	183
13.3.2 使用扩展卡尔曼滤波进行地球定位	184
13.4 图像平面内目标运动预估	185
13.4.1 数字低通滤波器和差分	186
13.4.2 旋转导致的视运动	186
13.5 碰撞时间	188
13.5.1 由目标尺寸计算碰撞时间	189
13.5.2 由平面地球模型计算碰撞时间	189
13.6 精确着陆	190
13.7 本章小结	193
注释和参考文献	193
13.8 设计项目	194
附录 A 术语和符号	195
术语	195
符号	195
附录 B 四元数	201
B.1 四元数的旋转	201
B.2 飞机的运动学和动力学方程	202
B.2.1 用单位四元数姿态表征的 12 状态-6 自由度动力学模型	203
B.3 欧拉角和四元数之间的转换	205
附录 C 动画仿真	206
C.1 利用 Matlab 进行图形处理	206
C.2 动画举例:倒立摆	206
C.3 动画举例:线绘航天器	209
C.4 动画举例:使用顶点和面的航天器	213

附录 D 基于 S - 函数的 Simulink 建模 216

 D. 1 举例:二阶微分方程 216

 D. 1. 1 1 级 m 文件 S - 函数 216

 D. 1. 2 C 文件 S - 函数 218

附录 E 机身参数 221

 E. 1 Zagi 飞翼 221

 E. 2 无人机 222

附录 F 在 Simulink 中修正和线性化 223

 F. 1 使用 Simulink 中的 trim 命令 223

 F. 2 trim 的数值计算 224

 F. 2. 1 修正算法 225

 F. 2. 2 梯度下降法的数值实现 226

 F. 3 利用 Simulink 的 linmond 命令生成状态空间模型 227

 F. 4 状态空间模型的数值计算 229

附录 G 概率论要点 230

附录 H 传感器参数 232

 H. 1 速率陀螺 232

 H. 2 加速度计 232

 H. 3 压力传感器 233

 H. 4 数字罗盘/磁力计 233

 H. 5 GPS 233

参考文献 234

第 1 章 引 言

1.1 系统架构

本书的目的是使读者能够在这个令人兴奋且快速发展的无人机自主导航、制导与控制领域从事相关研究工作。本书的重点在于自动和半自动飞行软件算法的设计。为了能够在这个领域里工作,研究人员需要熟悉广泛的研究内容,包括坐标系变换、空气动力学、自动驾驶仪设计、状态估计、路径规划以及计算机视觉。本书的目标就是要涵盖这些关键内容,并特别强调这些理论在微小型飞机(Miniature Air Vehicle, MAV)中的应用。

在讨论过程中,我们需要记住如图 1.1 所示的软件结构。图中标注为无人机的是一个 6 自由度的真实飞机,会对控制命令输入(升降翼、副翼、舵和油门)、风和其他干扰做出响应。固定翼飞行的数学模型相对复杂,相关内容会在第 2 章~第 5 章以及第 9 章中介绍。特别地,第 2 章会讨论坐标系及其间的变换。研究坐标变换是必要的,因为对 MAV 的很多设定都是在惯性系下(如在特定轨道运行),而大多数传感器的测量值是相对于体坐标系,执行器施加力和力矩也是相对体坐标系。第 3 章提出刚体运动的运动学和动力学方程。第 4 章介绍作用在固定翼飞机上的空气动力和力矩。第 5 章将第 3 章和第 4 章的结果进行结合,并得出 MAV 的 6 自由度、12 状态的非线性动态模型。由于希望在仿真中达到较高的精度,这个 6 自由度的模型相对复杂,处理起来也会麻烦一些。如果用较低阶的线性模型,那么飞机控制方法的设计与分析会容易一些。第 5 章推导出了进行适当简化后的线性模型,包括线性传递函数和状态空间模型。

图 1.1 中的自动驾驶仪模块指的是用来保持滚转和俯仰角度、飞行速度、高度和航向角度等的底层控制算法。第 6 章介绍设计自动驾驶仪闭环控制规律的标准方法。嵌套的控制回路逐级来实现,其中内环控制实现滚转和俯仰角度保持,外环控制实现飞行速度、高度和航线控制。

自动驾驶仪和更高阶的模块依赖于对状态的精确估计,包括对加速度计、速率陀螺、压力传感器、磁力计和 GPS 接收器等板载传感器进行动态滤波所得到的状态。对这些传感器及其数学模型的描述在第 7 章给出。由于无法用标准传感器测出小型飞机的所有状态,所以状态估计算法起到了非常重要的作用。第 8 章给出了几种对 MAV 进行状态估计非常有效的方法。

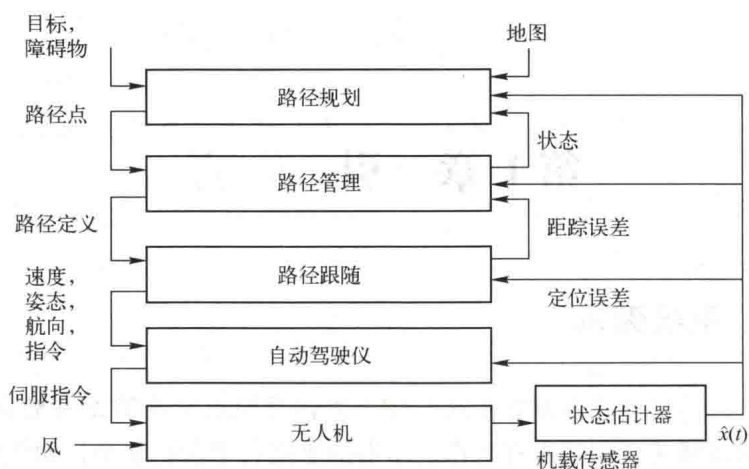


图 1.1 本书所采用的系统架构。路径规划模块能够产生通过有障碍环境的直线或者 Dubins 路径。路径管理模块通过在轨迹跟踪和直线路径跟踪之间切换实现沿预定路线的运行。路径跟踪模块则向底层的自动驾驶仪发送命令对飞机进行控制。上述模块都依赖于对板载传感器的数据进行滤波而得到的状态估计结果

一个包括自动驾驶和状态估计方法在内的完整的飞行动力学模型会表现为一个高维、高复杂度、非线性的方程组。系统的完整方程过于复杂不利于高层的制导算法的开发。因此,第 9 章介绍了能够描述系统闭环特性的低阶非线性方程组模型。后续的章节中用这些模型来设计制导算法。

MAV 的主要设计难点之一是在有风的条件中飞行。MAV 正常的飞行速度为 20 ~ 40 英里/h (1 英里 = 1.6093km),而地表几百英尺之上的风速通常超过 10 英里/h。因此,MAV 必须具备在风中灵活飞行的能力。机器人领域中的传统轨迹跟踪方法不能很好地适用于 MAV。应用这些方法的主要难点是其要求在确定的时间到达确定的地点,而这在由于风速的未知变化而导致飞机实际飞行速度变化的情况下难以精确实现。反而,这种简单地保持飞机运行在期望路径上的路径跟踪算法在实际的飞行测试中被证明是有效的。第 10 章介绍了图 1.1 中路径规划模块相关的算法和技术。我们集中讨论的是直线路径、圆形和弧形轨迹。其他要用到的路径形式可以通过这些直线和弧线的路径组合来实现。

图 1.1 中的路径管理模块是一个有限状态机,将一系列路径点配置(位置和方向)转换为一系列的直线路径和弧形轨迹以方便 MAV 跟踪。这样可以简化路径规划问题,路径规划可以设计一系列直线路径的组合指引 MAV 通过有障碍物的区间,也可以设计一条 Dubins 路径通过障碍区间。第 11 章介绍路径管理,第 12 章介绍路径规划。在路径规划中,我们考虑两类问题。第一类问题为点到点的算法,即目标是在躲避一组障碍物的同时,从起始位置运动到终止位

置。第二类问题是搜索算法,其目标是在具有位置传感器的条件下覆盖一个确定的区间,搜索过程可以不要求明确的终止位置。

几乎所有用到 MAV 的应用都会用到板载的电子-光学/红外(EO/IR)照相机,其典型目的是为用户提供视觉信息。不过 MAV 的负载能力有限,用照相机进行导航、制导和控制也是有实际意义的。如何有效利用照相机信息是目前一个活跃的研究领域。第 13 章会讨论在 MAV 中应用照相机的几种方法,包括地理定位和基于视觉的着陆。地理定位利用图像序列以及板载传感器来估计地面上物体的世界坐标。基于视觉的着陆则利用 MAV 获得的视频信息将其导引到一个图像中可识别的目的地。我们觉得对这些问题的理解有助于进一步研究基于视觉的 MAV 制导方法。

第 13 章采用图 1.2 所示的软件体系,其中路径规划模块已经被替换为基于视觉的制导模块。不过,基于视觉的制导控制律在与软件体系中的模块进行交互时,与路径规划模块采用相同的模式。该体系的模块化性质是其最明显的特征之一。

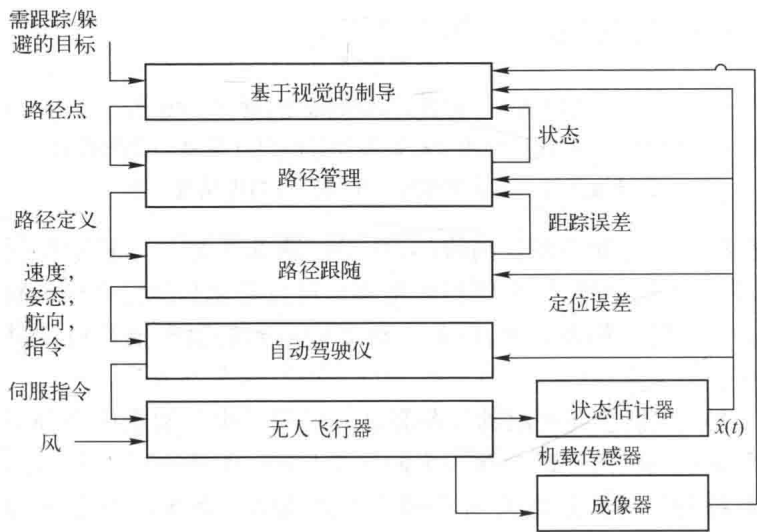


图 1.2 基于视觉的制导与控制的系统架构。加入了照相机作为额外的传感器,并且将路径规划模块替换为基于视觉的制导模块

1.2 设计模型

本书所遵循的设计思路如图 1.3 所示。在某一环境工作的无人机在图 1.3 中描述为“物理系统”,包括执行器(控制翼和推进器)和传感器(惯导测量单元(IMU)、GPS、照相机等)。设计过程的第一步是利用非线性差分方程对物理系

统进行建模。在这一步中,近似和简化是必不可少的,以期能够用数学的方法抓住物理模型的所有重要特性。在本书中,物理系统的模型包括刚体运动学和动力学(第3章),飞行动力和力矩(第4章),板载传感器(第7章)。得到模型称为图1.3中的“仿真模型”,将来用来对物理系统进行高可信度的计算机仿真。但是,必须说明这个仿真模型只是物理系统的近似,我们用这个模型是因为用它来进行设计是有效的,但不能假定其会在物理系统中正常工作。

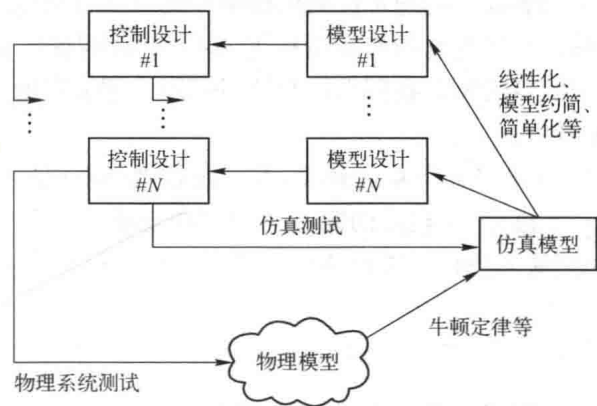


图 1.3 设计过程。利用物理学原理,对物理模型进行数学建模,得到仿真模型。

对仿真模型进行简化得到用于控制器设计的设计模型。控制器的设计
通过仿真进行测试和调试,并最终在物理系统上实现

仿真模型通常是非线性且高阶的,数学计算非常复杂不利于控制系统的设计。因此,为了方便设计,仿真模型通常需要进行简化和线性化进而得到低阶的设计模型。对于任一物理系统,可能会有多种不同的模型描述设计过程的不同特性。

对于 MAV,我们会在底层的控制和高层的制导中分别应用多种不同的设计模型。第5章把飞机的运动分解为纵向运动(俯仰和爬升)和侧向运动(滚转和转向),并对每种不同的运动采用不同的设计模型。第5章中推导的线性设计模型将在第6章中用来设计底层的自动驾驶回路以实现飞机空速、高度和航线角度的控制。第8章将介绍如何用小型无人机上常见的传感器来估计自动驾驶回路所需要的系统状态。

描述系统物理特性、自动驾驶控制和状态估计的数学方程在作为整体考虑的时候非常复杂,对于高层的制导规律设计并不适用。因此,第9章中,我们对系统的闭环特性提出了非线性设计模型,其输入为需要的速度、高度和航向角,其输出为飞机的惯性位置和方向。第9章提出的设计模型将在第10章~第13章中用来设计 MAV 的制导策略。

如图1.3所示,设计模型是用来设计制导和控制系统的。设计结果要通过高置信度的仿真模型进行测试,如果设计模型没有描述系统的某些关键特征,则

需要根据高置信度仿真模型对其进行修改和强化。将设计结果在仿真模型上进行彻底的测试之后,就可以在实际物理系统上实现、测试和调试该设计结果,有时需要修改仿真模型使其更加匹配物理系统。

1.3 设计项目

本书将传统的纸笔练习题的形式转换为一个完整并具有一定扩展性的设计项目。该设计项目是本书的一个重要组成部分,我们相信这个设计项目能够非常有效地帮助读者理解本书各个研究内容的内在联系。

设计项目包括从头开始建立一个 MAV 的飞行模拟器。该模拟器用 Matlab/Simulink 来建立,而且我们的设计任务并不需要安装额外的扩展包。本书的网页上,包括一系列不同的 Matlab 和 Simulink 文件,可以帮助读者完成飞行模拟器的设计。我们的策略是给读者提供一个基本的文件框架,其各个模块之间能够正确地传递信息,需要读者自己来实现每个模块的内部功能。这个项目的设计要逐步递进,即成功地完成前一章的设计内容才能开始下一章的设计工作。为了帮助读者了解每章内容的设计是否工作正常,本书的网站上提供了很多图形用以展示飞行模拟器在每个阶段的输出状态。

第 2 章的项目设计任务是设计一个飞机的动画,以确保您在屏幕上能够适当地旋转飞机的机体。附录 C 提供了在 Matlab 中设计动画的教程。第 3 章的设计任务是用刚体的运动方程来驱动动画。第 4 章,在模拟器中加入了作用在固定翼飞机上的力和力矩。第 5 章的任务是用 Matlab 的命令 trim 和 linmod 找到飞机的稳态参数,并导出系统的线性传递函数和状态空间模型。第 6 章的设计任务是加入利用真实状态对飞机进行控制的自动驾驶模块。第 7 章将传感器的模型加入到模拟器中。第 8 章加入了状态估计的方法,可以实现用现有的传感器估计出实现自动驾驶需要的状态。第 8 章的设计任务完成后,可以得到只利用现有传感器信息控制飞行速度、高度和航线角的闭环系统。第 9 章的设计任务是用简单的设计模型来近似闭环系统的特性,并调整设计模型的参数使其能够很好地匹配闭环高置信度仿真模型的特性。第 10 章的任务是为直线跟踪和有风条件下的环形循迹设计制导算法。第 11 章用直线跟踪和环形循迹来合成更加复杂的路径,其中特别强调 Dubins 路径的跟踪。第 12 章的设计任务是实现快速探测随机树(RRT)路径规划,设计出能够通过障碍物空间的 Dubins 路径。第 13 章的设计任务是在一个移动的目标上安装摄像机,并通过板载传感器和摄像机数据估计该目标的惯性位置(地理定位)。

第2章 坐标系

在研究无人机系统的过程中,理解不同物体间彼此如何确定方位是十分重要的。显然,我们需要了解如何确定飞机相对于地球的方位,也需要了解如何确定传感器(如相机)相对于飞机的方位,或者是天线相对于地面信号源的方位。本章将具体介绍用于描述飞机、传感器位置和方向的不同坐标系,以及这些坐标系之间的坐标变换。而使用不同的坐标系十分必要,具体有如下原因:

(1) 牛顿运动学方程是在固定的惯性系下推导出来的,但机体坐标系下描述运动会更容易。

(2) 空气动力和力矩施加于飞机本身,更容易在机体坐标系下表示。

(3) 加速度计、速率陀螺等板载传感器相对机体坐标系测量信息,而 GPS 相对惯性系测量位置、对地速度和航线角。

(4) 大多数任务需要的徘徊点(loiter points)、飞行轨迹等信息都在惯性系中规定。此外,地图信息也在惯性系中给出。

一个坐标系变换到另一个坐标系要通过两种基本操作,即旋转和平移。2.1 节描述旋转矩阵及其在不同坐标系变换中的应用。2.2 节描述微型飞机系统中所应用的特定坐标系。2.3 节定义空速、地速、风速和这些量之间的关系。2.4 节进行风速三角形的进一步讨论。2.5 节推导在旋转平移坐标系中矢量微分的表达式。

2.1 旋转矩阵

首先来考虑图 2.1 所示的两个坐标系。矢量 $\mathbf{p}$ 可分别在 $\mathcal{F}^0$ 系(以 $(\mathbf{i}^0, \mathbf{j}^0, \mathbf{k}^0)$ 为基底)和 $\mathcal{F}^1$ 系(以 $(\mathbf{i}^1, \mathbf{j}^1, \mathbf{k}^1)$ 为基底)。在 $\mathcal{F}^0$ 系中,有

$$\mathbf{p} = p_x^0 \mathbf{i}^0 + p_y^0 \mathbf{j}^0 + p_z^0 \mathbf{k}^0$$

在 $\mathcal{F}^1$ 系中,有

$$\mathbf{p} = p_x^1 \mathbf{i}^1 + p_y^1 \mathbf{j}^1 + p_z^1 \mathbf{k}^1$$

矢量集 $(\mathbf{i}^0, \mathbf{j}^0, \mathbf{k}^0)$ 和 $(\mathbf{i}^1, \mathbf{j}^1, \mathbf{k}^1)$ 的元素都是互相垂直的单位矢量。

由以上两式有

$$p_x^1 \mathbf{i}^1 + p_y^1 \mathbf{j}^1 + p_z^1 \mathbf{k}^1 = p_x^0 \mathbf{i}^0 + p_y^0 \mathbf{j}^0 + p_z^0 \mathbf{k}^0$$

将上式两侧同时与 $\mathbf{i}^1, \mathbf{j}^1, \mathbf{k}^1$ 作点乘,并将结果表示为矢量形式: