



国防科技著作精品译丛

无人机系列

Unmanned Aerial Vehicles
Embedded Control

无人机 —嵌入式控制

【法】 Rogelio Lozano 著

陈自力 蔚建斌 江涛 译



WILEY



国防工业出版社

National Defense Industry Press

无人机—嵌入式控制

Unmanned Aerial Vehicles Embedded Control

[法] Rogelio Lozano 著
陈自力 蔚建斌 江涛 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字:军-2011-158号

图书在版编目(CIP)数据

无人机—嵌入式控制/(法)洛萨诺(Lozano, R.)著;陈自力,蔚建斌,江涛译.
—北京:国防工业出版社,2014.10
(国防科技著作精品译丛.无人机系列)
书名原文:Unmanned aerial vehicles embedded control
ISBN 978-7-118-09283-7

I. ①无… II. ①洛… ②陈… ③蔚… ④江… III. ①无人驾驶飞机—自动飞行控制—研究 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第228363号

Translation from the English Language edition:
Unmanned Aerial Vehicles Embedded Control
by Rogelio Lozano
Copyright © 2010 John Wiley & Sons International Rights, Inc.
All Rights Reserved.

本书简体中文版由 John Wiley & International Rights Sons, Inc. 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—嵌入式控制

[法] Rogelio Lozano 著
陈自力 蔚建斌 江涛 译

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

印张 19³/₄

字数 319千字

版印次 2014年10月第1版第1次印刷

印数 1—2500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

本书是一本论述微小型无人机飞行控制和视觉导航专项技术的书籍,不同的专题由不同的作者撰写,主要讨论的技术问题包括两大部分。第一部分针对双旋翼、倾转机身、倾转旋翼、四旋翼、八旋翼等不同类型的微小型无人机,讨论了无人机建模、飞行控制律设计、飞行控制性能改善等技术和方法,对部分典型的无人机开发了飞行实验模型机,并给出了实际飞行实验结果,验证了无人机建模、飞行控制策略的有效性。第二部分重点研究了无人机在没有卫星导航手段可以利用的条件下自主飞行问题。采用基于视频流处理的视觉定位方法,利用单摄像头、双摄像头等实现微小型无人机二维或三维定位,完成自主航迹控制。开发了典型无人机基于视觉的自主飞行实验系统,并给出了飞行实验结果。

无论从理论分析,还是从飞行实验系统构建方面,本书对于从事微小型无人机飞行控制、无人机室内环境飞行、基于视觉的定位导航等技术研究的科技人员有很大的借鉴作用,对致力于无人机飞行控制技术研究的高年级本科生、研究生也有较大的参考价值。

由于译者水平有限,加之时间仓促,翻译过程中难免有误,敬请读者批评指正。

译者
2014.9

作者序

最近几年,很多科学家、工程师和研究者都很关注无人机的发展,本书的主要目的是研究无人机机载控制器的设计问题,使无人机能够实现稳定的水平飞行或悬停飞行,具备抗干扰能力,并且以最大限度的自主能力完成监视任务。

本书作者给出了构建几类典型无人机动态模型的方法,包括直升机、常规布局飞机、飞艇、四旋翼等无人机,分析了每一种气动布局的非线性控制策略,以及基于视觉的无人机定位与稳定飞行,并对每一种方法的理论和应用问题进行了讨论。

本书给出了几种气动布局的实验验证机和一些控制算法,并详细介绍了控制计算机结构及所采用的传感器等。

Rogelio Lozano
法国 CNRS 研究主管

目录

第 1 章 气动布局与动力学模型	1
1.1 气动布局	1
1.2 动力学模型	6
1.2.1 牛顿 - 欧拉方法	6
1.2.2 欧拉 - 拉格朗日方法	8
1.2.3 四元数方法	9
1.2.4 例子: 四旋翼无人直升机动力学模型	12
参考文献	18
第 2 章 针对二维垂直起降飞机稳定的嵌套饱和状态控制 .	20
2.1 引言	20
2.2 技术发展	21
2.3 二维垂直起降飞机模型	23
2.4 控制策略	24
2.4.1 垂直位移 y 的控制	24
2.4.2 滚转角 θ 和水平位移 x 的控制	25
2.5 二维垂直起降飞机稳定的其他控制策略	30
2.6 实验结果	31
2.7 小结	34
参考文献	34

第 3 章 双旋翼垂直起降微型无人机设计、建模与控制	38
3.1 引言	38
3.2 动力学模型	39
3.2.1 运动学	40
3.2.2 动力学	41
3.2.3 控制分析模型	44
3.3 控制策略	45
3.3.1 高度控制	45
3.3.2 水平运动控制	45
3.3.3 姿态控制	46
3.4 实验装置	47
3.4.1 机载飞行系统	48
3.4.2 地面视觉系统	49
3.4.3 实验结果	50
3.5 小结	52
参考文献	53
第 4 章 双旋翼无人机自主悬停飞行	55
4.1 引言	55
4.2 双旋翼无人机	56
4.2.1 描述	56
4.2.2 动力学模型	58
4.3 控制算法设计	62
4.4 实验平台	67
4.4.1 实时 PC 控制系统 (PCCS)	67
4.4.2 实验结果	69
4.5 小结	71
参考文献	71
第 5 章 可倾转机身无人机建模与控制	73
5.1 引言	73
5.2 可倾转机身无人机	74
5.2.1 垂直飞行模式	74

5.2.2	飞行模式转换	74
5.2.3	水平飞行模式	75
5.3	数学模型	75
5.3.1	飞行模式转换	76
5.3.2	无人机的姿态	76
5.3.3	运动方程	78
5.4	控制器设计	79
5.4.1	悬停飞行控制	79
5.4.2	倾转控制	88
5.4.3	水平飞行控制	94
5.5	嵌入式系统	98
5.5.1	实验平台	99
5.5.2	微控制器	100
5.5.3	惯性测量单元 (IMU)	101
5.5.4	传感器融合	101
5.6	小结与展望	103
5.6.1	小结	103
5.6.2	展望	104
	参考文献	104

第 6 章 不同倾转旋翼无人机的控制 106

6.1	引言	106
6.2	垂直起降飞机的动力学模型	107
6.2.1	运动学	108
6.2.2	动力学	108
6.3	垂直起降无人机的姿态控制	109
6.4	三倾转旋翼无人机: Delta	110
6.4.1	Delta 无人机动力学	111
6.4.2	作用在 Delta 无人机上的力矩	112
6.4.3	实验平台搭建	113
6.4.4	实验结果	115

6.5	单倾转旋翼无人机: T-Plane	116
6.5.1	作用在飞机上的力与力矩	118
6.5.2	实验结果	119
6.6	小结	121
	参考文献	121
第 7 章 利用驱动电机电流反馈改进四旋翼无人机的姿态稳定性		
	稳定性	123
7.1	引言	123
7.2	无刷直流电机及速度控制器	124
7.3	四旋翼无人机	126
7.3.1	动力学模型	127
7.4	控制策略	128
7.4.1	姿态控制	129
7.4.2	电枢电流控制	131
7.5	系统结构	132
7.5.1	四旋翼无人机	132
7.5.2	地面控制站	134
7.5.3	视觉系统	134
7.6	实验结果	135
7.7	小结	137
	参考文献	137
第 8 章 微型旋翼无人机鲁棒控制设计技术: 仿真与实验结果		
	结果	139
8.1	引言	139
8.2	动力学模型	140
8.3	问题描述	142
8.4	鲁棒控制设计	143
8.5	仿真与实验结果	145
8.5.1	仿真	145
8.5.2	实验平台	147

8.6	小结	148
	参考文献	149
第 9 章	采用单摄像头的四旋翼无人机悬停稳定飞行	151
9.1	引言	151
9.2	视觉伺服	152
9.2.1	直接视觉伺服	153
9.2.2	间接视觉伺服	153
9.2.3	基于视觉伺服的定位	154
9.2.4	基于图像的视觉伺服	155
9.2.5	位置-图像视觉伺服	155
9.3	摄像头标定	157
9.3.1	两平面标定方法	157
9.3.2	同质变换方法	159
9.4	姿态估计	160
9.4.1	n 点透视方法	161
9.4.2	基于平面姿态的方法	162
9.5	动力学模型及控制策略	165
9.6	实验平台组成	167
9.7	实验结果	168
9.7.1	摄像头标定结果	168
9.7.2	实验过程	169
9.7.3	飞行实验结果	170
9.8	小结	171
	参考文献	171
第 10 章	基于视觉定位控制的小型双旋翼垂直起降 无人机	175
10.1	引言	175
10.2	位置与速度估计	177
10.2.1	惯性传感器	177
10.2.2	视觉传感器	177
10.2.3	基于卡尔曼滤波的传感器融合	181

10.3	动力学模型	183
10.4	控制策略	186
10.4.1	前向子系统	187
10.4.2	侧向子系统	188
10.4.3	航向子系统	188
10.5	实验装置及结果	188
10.5.1	实验结果	189
10.6	小结	191
	参考文献	191
第 11 章 基于视频流的小型无人机自主三维定位与控制		193
11.1	引言	193
11.2	相关研究和三重嵌套卡尔曼滤波框架	195
11.2.1	视频流计算	195
11.2.2	从运动中恢复结构问题	195
11.2.3	仿生视觉的无人机导航	196
11.2.4	所提框架的简要描述	197
11.3	基于预测的自适应图像块算法用于精确高效的视频流计算	198
11.3.1	搜索中心预测	199
11.3.2	块匹配算法和差分算法组合	200
11.4	基于视频流理解的无人机三维运动估计和障碍检测 (SFM 问题)	202
11.4.1	图像模型	203
11.4.2	视频流和角速率数据融合	204
11.4.3	基于扩展卡尔曼滤波算法的运动和结构估计	204
11.5	空中平台的描述及实现	206
11.5.1	基于旋翼的无人机平台	206
11.5.2	实时软件	208
11.6	三维飞行实验和实验结果	209
11.6.1	实验方法和安全流程	210
11.6.2	基于视频流的速度控制	210
11.6.3	基于视频流的位置控制	210
11.6.4	基于视频流的室内全自主飞行	213

11.7 小结	214
参考文献	215
第 12 章 基于立体视觉和视频流的八旋翼无人机实时 稳定控制	219
12.1 引言	219
12.2 立体视觉	220
12.3 三维重构	224
12.4 特征点匹配算法	226
12.5 基于视频流的控制	227
12.6 八旋翼无人机	230
12.6.1 动力学模型	231
12.6.2 控制策略	238
12.7 系统概念	240
12.8 飞行实验	241
参考文献	244
第 13 章 三维定位	246
13.1 卡尔曼滤波器	247
13.1.1 线性卡尔曼滤波器	247
13.1.2 扩展卡尔曼滤波器	249
13.1.3 无迹卡尔曼滤波器	251
13.1.4 球形单体 Sigma 点卡尔曼滤波器	257
13.2 无人机定位	265
13.2.1 定位类型	265
13.2.2 惯性导航理论框架	266
13.3 仿真	268
13.3.1 四旋翼直升机	269
13.3.2 惯性导航仿真	269
13.4 小结	275
参考文献	276

第 14 章 有风条件下自主飞行无人机的飞行重规划	280
14.1 引言	280
14.2 建模	282
14.2.1 向下气流模型	282
14.2.2 平移动力学模型	283
14.3 飞行规划更新	286
14.3.1 基本问题阐述	288
14.3.2 层次规划结构	289
14.4 更新参考航路: 时间优化问题	289
14.5 第一组解 S_1 的分析	293
14.6 小结	300
参考文献	300

第 1 章

气动布局与动力学模型

1.1 气动布局

本章给出常用于无人机 (UAV) 控制设计的一些气动布局, 布局集中在小型飞机上, 如固定翼无人机、扑翼无人机、旋翼无人机 (MAV)。旋翼无人机还可根据采用旋翼的数量分为: 单、双、三或四旋翼无人机。

无人机也称为遥控飞机, 是一种常用的术语, 用于表示军用和民用的最新一代无人驾驶飞机。无人机定义为机上没有飞行员的飞机, 用于完成情报、监视和侦察任务。无人机技术上要服务于以上任务的完成。相对于有人驾驶飞机, 无人机有一些基本的优点, 包括机动性好、造价低、雷达特征小、续航时间长和操控员风险小等。

通常, 人们把飞机和飞行器看作是相同的, 但字典定义飞行器是任意一种可在空中飞行的人工产品, 它可能是飞机、滑翔机、导弹、气球、飞艇, 或是利用空气产生升力而飞行的任何一种运动体。而飞机只是指动力驱动、固定翼产生升力的特种运动体。

每一种小型飞行器都有其优点和不足, 用一些特征来描述不同类型的无人机, 例如, 相对于其他类型无人机, 固定翼无人机容易获得高效率 and 长续航时间, 因此适合应用于长巡航时间要求的场合; 但是由于它不能悬停, 或小角度转弯, 因此不能进入到建筑物内。与固定翼无人机相反, 旋翼无人机, 如垂直起降飞机 (VTOL) 或短距起降飞机 (STOL) 容易实现悬停, 在较短的飞行时间内^[HIR 97] 可以沿任意方向飞行。扑翼无人机相对于固定翼无人机和旋翼无人机, 在小型化和机动性方面更具潜力, 但有很多不及固定翼无人机和旋翼无人机的方面。

1. 单旋翼无人机结构布局

单旋翼无人机由一个旋翼和副翼组成,副翼用于平衡旋转力矩(偏航控制输入)。由于旋翼没有倾转盘,因此需要副翼产生额外的俯仰力矩和滚转力矩。

单旋翼无人机特别难以控制,即使对于有经验的操控员也是如此。单旋翼无人机结构布局在机械上比标准的直升机简单,但控制能力没直升机强。这两种布局都要消耗很多功率,用于平衡旋转力矩,即阻止机身沿垂直轴旋转。但正是由于其机械结构简单,比其他布局更适合微型无人机。首先发现采用这种结构布局的无人机称其为 3D 无人机(或 STOL 无人机),如图 1.1 所示。

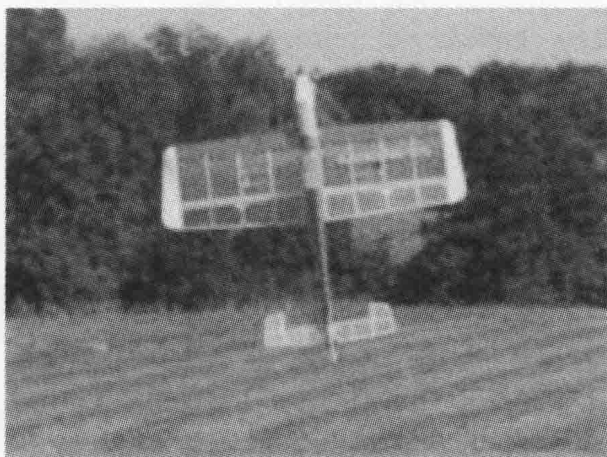


图 1.1 3D 无人机

2. 双旋翼无人机结构布局

在双旋翼无人机结构布局中,要区分采用一个或两个旋转倾转盘(即组合俯仰),还是固定倾转盘,采用圆形桨盘的无人机有:传统直升机、纵列式直升机和共轴式直升机。

对于无倾转盘的双旋翼结构布局的无人机,他有双旋翼和副翼,即两个旋翼安装在不同的轴上(或采用共轴布局)。3D 无人机中将副翼置于旋翼的气流中,以获得需要的控制力矩,这两个旋翼的旋转方向可以相反或相同。悉尼大学的 T 翼无人机就是这类布局无人机,如图 1.2(b)^[STO 01]所示。

也可以在相同的轴上安装旋转方向相反的两个旋翼,副翼处于旋翼的

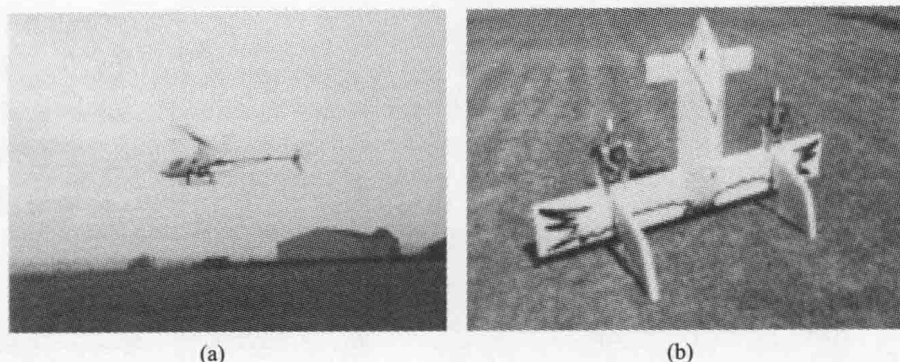


图 1.2 传统的直升机和 T 翼无人机

气流方向上, 这种布局结构非常紧凑, 但控制困难。两个旋翼可在两个轴上倾转 (纵列式双旋翼, 旋翼旋转方向相反), 这种布局中旋桨没有倾转盘, 旋翼可以朝两个不同方向倾斜, 以产生俯仰力矩和滚转力矩, 滚转力矩通过两个旋翼的不同旋转速度获得。

3. 多旋翼无人机

多旋翼无人机中有三旋翼、四旋翼和多于四旋翼等不同类型的。

四旋翼无人机在多旋翼无人机中最常见 (图 1.3), 通过平衡四个旋翼产生的力从而实现精确飞行和稳定飞行。采用多旋翼的优点之一是提高搭载能力。

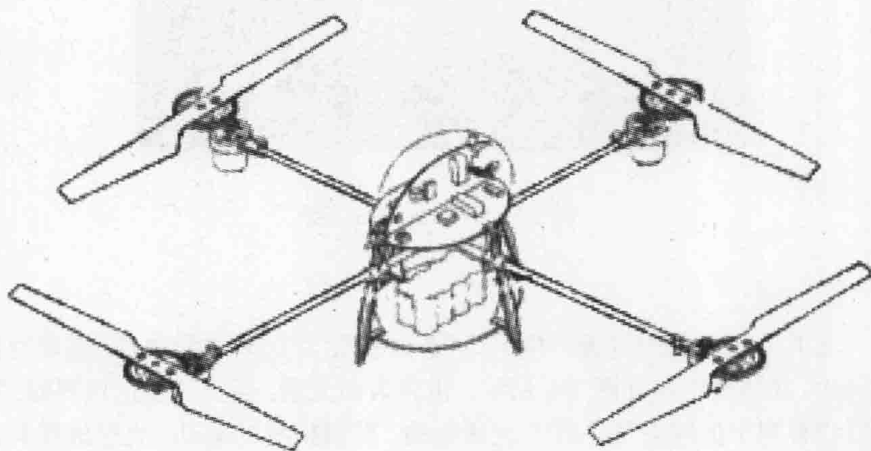


图 1.3 四旋翼无人直升机

四旋翼无人机优点是：机动性能好，可以垂直起降，能够在较恶劣环境条件下抵达特定区域。其主要不足是：由于旋翼多，能量消耗就大、质量也大。从控制能力来说，四旋翼布局优于其他多旋翼布局。控制四旋翼无人机悬停和低速飞行技术已经进行了验证，但进行持续的前向飞行控制验证之前，还需要做进一步的研究工作。如果使用内燃发动机，由于传动机构的复杂性，多旋翼布局相对于单旋翼就有明显不足。

4. 飞艇

飞艇（或飞船）是一种轻于空气的飞行器，采用方向舵、螺旋桨或其他推进手段，通过气流对其进行驱动和控制。与其他空气动力飞行器不同，如固定翼无人机、直升机等，他们通过机翼或机体在空气中的运动产生升力，空气静力飞行器（如飞艇、热气球等）通过一个很大的空腔（如气球）填充上升的气体才能飘浮在空中。主要的飞艇类型包括非刚性（或软式）、半刚性和全刚性的。软式小型飞艇没有内龙骨；半刚性飞艇体积稍大一些，具有多种形式内部支撑龙骨。LSC 公司的飞艇如图 1.4 所示。

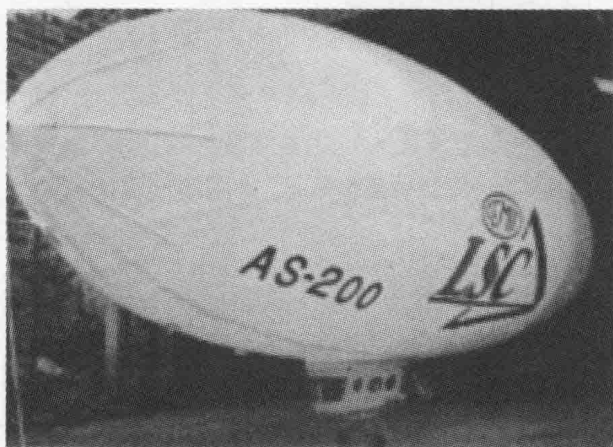


图 1.4 LSC 公司的飞艇

5. 飞机

飞机是一种利用机翼产生升力的飞行器，其身体称为机身，通常为长管形状，其结构布局如图 1.5 所示。机翼表面光滑，当空气流过机翼时，机翼形状有利于促使空气在其上表面流动。随着机翼的运动，流过机翼上表面的空气继续向前流动，且速度比下表面的要快。这样机翼上表面产生的压力比下表面产生的压力小，进而产生升力。机翼设计决定了飞机的飞行