



装备科技译著出版基金

无人机制导控制技术丛书



四旋翼无人机控制 ——基于视觉的悬停与导航

Quad Rotorcraft Control Vision- Based Hovering and Navigation



[美] Luis Rodolfo García Carrillo

[墨] Alejandro Enrique Dzúl López

[法] Rogelio Lozano

[法] Claude Pégard

刘树光 孙秀霞 王 栋 邵 玮

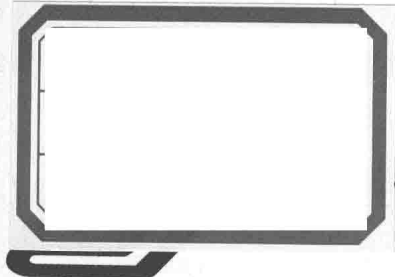
祝小平

著
译
主审



国防工业出版社

National Defense Industry Press



人机制导控制技术丛书

装备科技译著出版基金

四旋翼无人机控制 ——基于视觉的悬停与导航

Quad Rotorcraft Control Vision-Based Hovering and Navigation

[美] Luis Rodolfo García Carrillo

[墨] Alejandro Enrique Dzul López

[法] Rogelio Lozano

[法] Claude Pégard

著

刘树光 孙秀霞 王 栋 邵 玮 译

祝小平 主审

国防工业出版社

· 北京 ·

著作权合同登记 图字:军-2014-051号

图书在版编目(CIP)数据

四旋翼无人机控制:基于视觉的悬停与导航/(美)
路易斯·鲁道夫·加西亚·卡里略等著;刘树光等译.
—北京:国防工业出版社,2016.6
书名原文:Quad Rotorcraft Control
ISBN 978-7-118-10906-1

I. ①四… II. ①路…②刘… III. ①无人驾驶飞机
—飞行控制 IV. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第173560号

Translation from English language edition:

Quad Rotorcraft Control

by Luis Rodolfo García Carrillo, Alejandro Enrique Dzúl López, Rogelio Lozano and
Claude Pégard

Copyright © 2013

Springer London

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文版由 Springer Science + Business Media 授权国防工业出版社独家出版发行。
版权所有,侵权必究。

※

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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 插页2 印张11 字数188千字

2016年6月第1版第1次印刷 印数1—1500册 定价69.00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

当前,无人机作为信息化特征显著的新型作战装备,已经成为局部战争和军事行动不可或缺的重要作战力量,在火力打击、侦察监视、干扰欺骗、战场评估等作战任务中得到了成功应用。相对于固定翼无人机,旋翼飞行器具有垂直起降、空中悬停、低速飞行及机动性好等特性,为低空或近距离侦察与监视提供了良好平台,成为当前无人飞行器发展的一个重要方向。四旋翼无人机作为旋翼飞行器的代表,与其他旋翼飞行器相比结构相对简单、稳定性更好、机动性更高、操控性更佳,特别适合在近地面环境(如室内、丛林和城区等)中进行侦察和监视工作,具有更加广阔的军事和民用前景,吸引了众多研究者的关注。迄今为止,尽管四旋翼无人机的基础理论和试验研究已经取得了较大进展,但仍面临着诸多关键技术的挑战,如最优化总体设计、动力与能源、飞行控制、编队飞行等,这使其距离真正走向成熟、达到实用要求还有一定差距。其中,飞行控制是飞行器的技术核心和灵魂,是决定飞行器能否走向实际应用的关键技术。从控制的角度看,四旋翼无人机是一个具有六自由度(位置与姿态)和四个控制输入(旋翼转速)的欠驱动系统,具有多变量、非线性、强耦合和干扰敏感等复杂控制特性,加之控制器的嵌入式设计要求,使得实际的飞行控制系统设计更具有挑战性。因此,从实用性的角度出发研究四旋翼无人机飞行控制系统的设计与实现问题,具有重要的军事意义和实用价值。

本书正是立足于四旋翼无人机飞行控制系统设计的上述特点,紧贴工程实际,以四旋翼无人机试验平台为基础,针对其导航、制导与控制问题,研究了平台设计、模型建立、嵌入式控制和基于视觉的控制策略及其实现方法,提供了四旋翼系统在室内和其他 GPS(全球定位系统)失效环境中的研究工作及比较结果,重点是致力于研究将机器视觉系统应用于四旋翼无人机悬停与导航方面的相关技术和设计方法。纵观全书,作者并不拘泥于复杂、晦涩的理论阐述,而是通过与读者分享飞行控制系统的整个设计和改进过程,帮助读者理解复杂的技术理论。本书理论与实践相结合,具有较强的学术性、先进性和实用性,可供从事四旋翼无人机导航与控制技术研究的科研人员和工程设计人员参考,也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

本书由空军工程大学刘树光、孙秀霞、王栋、邵玮翻译,刘树光负责全书的统稿工作。徐嵩、刘希、蔡鸣等研究生参与了有关章节的初稿翻译和整理工作,感谢他们为本书出版的无私付出。诚挚感谢西北工业大学无人机所总工程师祝小平教授对本书认真负责的审校工作。本书的出版得到了中国博士后科学基金(2014M562629)、航空科学基金(20155896025、20121396008)、陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2014JM8332)等项目的支持,并获得装备科技译著出版基金资助,在此一并表示感谢。

由于无人机领域是一个新兴领域,对基于视觉的四旋翼无人机导航与控制技术的研究仍在不断发展和完善之中,很多概念标准、专业词汇还没有形成统一的翻译,加之译者水平有限,译文难免会有不妥和错误之处,恳请各位专家和读者批评指正。

译者

2016年4月于西安白鹿原

近年来,无人机系统(UAS)在科学研究和工业应用平台开发方面取得了重要进展。

如今,无人机已从质量 10t 以上、翼展数十米发展到仅几克重、翼展几厘米甚至几毫米的微米级、纳米级无人机。

多旋翼系统受到了极大关注。其中最为普遍的是四旋翼,六旋翼或八旋翼已经在发展。这些多旋翼系统能够悬停并具备良好的机动性能。从机械学的观点来看,由于它们没有旋转盘也不需要抵消旋转电机带来的回转力矩,因而结构上比直升机更为简单。另外,多旋翼飞行器比同等的主旋翼直升机更节能、更安全,并能保证在很接近人的场合进行飞行。因此,多旋翼飞行器常见于众多的研究实验室,也在许多不需要重大载荷的应用领域受到关注。

法国贡比涅技术大学 Rogelio Lozano 教授领导的团队在小型无人机系统,特别是四旋翼技术及其控制系统的研究与开发方面扮演重要角色。本书阐述了第一作者在该团队进行博士研究期间对四旋翼无人机控制技术的创新与改进工作。

建模是导航、制导与控制系统开发及其相关应用的基础。第 2 章专门阐述四旋翼无人机的建模。首先概述了小型四旋翼无人机及其操纵原理,然后采用欧拉-拉格朗日方法和牛顿-欧拉方法分别建立了四旋翼无人机的模型,同时给出牛顿方程到拉格朗日方程的转换,最后建立了“X 型”四旋翼无人机的牛顿-欧拉模型。

第 3 章设计了一种试验用四旋翼系统。它由无人机平台和可执行图像处理与控制算法的地面监控站组成。详细描述了无人机的常用传感器技术及试验平台的体系结构,法国贡比涅技术大学的四旋翼系统也在本章描述。分层控制策略用于稳定自主飞行中的四旋翼无人机,通过实时试验验证了该无人机的性能。

第 4 章介绍用于提高四旋翼无人机姿态稳定性的嵌入式控制系统。所提出的控制策略采用低成本组件,并包括了基于电机电枢电流反馈的附加控制回路。该控制策略对外部干扰具有鲁棒性。室内试验结果显示该附加控制回路显著提高了四旋翼无人机的姿态稳定性能。

大多数 UAS 的导航与制导策略基于 GPS,然而其可靠性是关乎安全的关键问题。由于在室内或其他 GPS 失效环境下存在卫星阻塞、多通道和其他无线电通信问题,这就有必要通过其他手段补充或替换 GPS。这种情况下,在 UAS 的导航、制导与控制中应用图像处理方法成为一种主要手段。

第 5 章设计了用于状态估计的图像传感器。首先介绍了有关计算机视觉的基础背景,并给出了针孔摄像机模型和摄像机标定过程;然后提出了立体成像及立体标定与校正方法,详细叙述了光流概念及其计算方法,还分析了机载嵌入式系统和地面站,对与四旋翼无人机机载成像系统实现相关的问题进行了讨论;最后设计了单目成像和立体成像系统的软、硬件。

第 6 章阐述了稳定四旋翼无人机飞行的两种不同的基于视觉的控制策略。第一种策略基于单应性估计技术和光流计算。基于这种策略,为了确定利用视觉反馈稳定无人机的最有效方法,对三种不同的控制方法进行了对比。第二种策略中,视觉系统用于稳定三维位置的姿态控制,利用光流方法调节无人机的速度。通过自主悬停与导航实时试验验证这两种基于视觉的控制策略的有效性。

第 7 章专注于四旋翼无人机的组合传感系统。特别地,组合了立体成像、惯性和高度传感器,目的在于使无人机能够实现自主起飞、相对定位、导航和着陆。另外,针对龙伯格观测器、卡尔曼滤波器和互补滤波器进行了实时对比研究,目的是确定不同传感器技术组合的最有效方法。

总之,该书针对四旋翼无人机的导航、制导与控制,结合研究了建模、控制和计算机视觉及其实现。对四旋翼系统在室内和其他 GPS 失效环境下应用的相关主要问题,提供了具有意义的研究工作和比较结果。

本书对促进航空机器人和无人机系统的技术发展具有一定贡献。本书的出版不仅有益于四旋翼系统的研究与开发,而且可为相关专业硕士研究生课程学习及对四旋翼系统开发与应用感兴趣的工程师提供参考。

西班牙,塞维利亚

Anibal Ollero

前言

当前,无人机正在承担越来越多的任务。在民用与军事应用中要求具有较高的自主能力和性能。建模和非线性控制器综合已经成为无人机采用惯性测量元件(IMU)实现方位稳定的基本手段。这种技术已运用于稳定不同结构的飞行器,包括经典直升机、四旋翼无人机和其他类型旋翼飞行器。为了将无人机稳定在期望的悬停位置,需要位置测量系统。GPS 是最普遍的位置传感器之一。然而,GPS 的位置测量误差可能会因障碍(如建筑物、天气条件等)变得难以接受。在 GPS 失效区域,计算机视觉成为一种可供选择的位置测量系统。

本书致力于研究如何将计算机视觉系统应用于估计四旋翼无人机的平移速度和直升机相对于环境地标的位置。四旋翼无人机的水平速度通过反馈控制律中的光流测量方法进行测量。期望点的悬停和速度调节任务利用相对于环境地标的位置与速度测量来实现。为了使航空机器人在未知的室内环境中实现定位,研究了立体视觉。所提出的不同方法都已在书中图示的试验平台上进行了测试。

美国,加利福尼亚州,圣塔芭芭拉市
墨西哥,科阿维拉州,托雷翁市
法国,贡比涅市
法国,亚眠市

Luis Rodolfo García Carrillo
Alejandro Enrique Dzul López
Rogelio Lozano
Claude Pégard

致谢

感谢法国贡比涅技术大学和 Heudiasyc 实验室、拉古纳技术研究所(墨西哥)、法国亚眠大学。感谢墨西哥国家科学技术委员会(CONACYT)和法国皮卡第地区项目 ALTO 为我们开展研究工作提供的财政支持。

几个朋友和同事以他们富有思想性、建设性的注释和意见帮助我们修改原稿。在此特别感谢 Eduardo Rondon 博士、Anand Sanchez 博士、Octavio Garcia 博士、Isabelle Fantoni 博士、Guillaume Sanahuja 博士、Eduardo S. Espinoza 硕士、Gerardo Flores 硕士和 Pavel Parada 硕士。没有他们的宝贵支持,本书的研究和试验平台将不可能完成。

还要感谢来自西班牙塞维利亚大学的 Anibal Ollero 博士,感谢他宝贵的注释和为本书所写的序言。我们也感谢 Springer 出版社助理编辑 Charlotte Cross 小姐的诚挚帮助,感谢 Springer 出版社编辑 Oliver Jackson 先生的帮助和无价的注释,他的支持使得本书能够出版。

最后,怀着歉意对我们的家人表示感激,感谢他们在本书准备过程中的付出、理解和鼓励。

美国,加利福尼亚州,圣塔芭芭拉市
墨西哥,科阿维拉州,托雷翁市
法国,贡比涅市
法国,亚眠市

Luis Rodolfo García Carrillo
Alejandro Enrique Dzul López
Rogelio Lozano
Claude Pégard

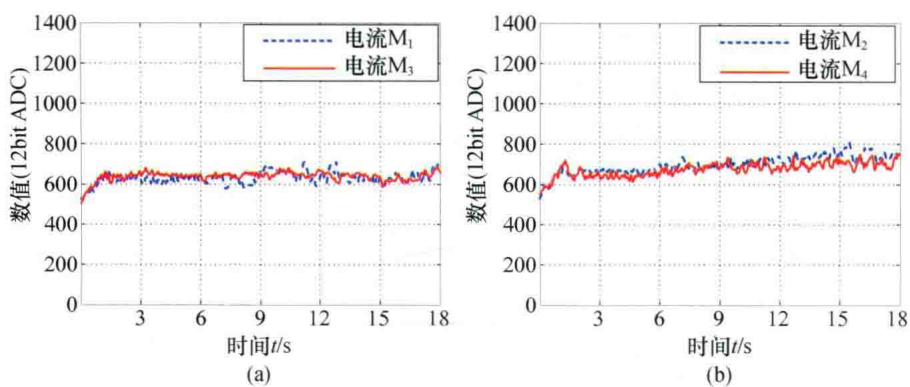


图 4.12 电流测量

(a) 电机 M_1 和 M_3 的电流值; (b) 电机 M_2 和 M_4 的电流值。

图5.3中第15幅图图像点(+)与重投影网格点(o)

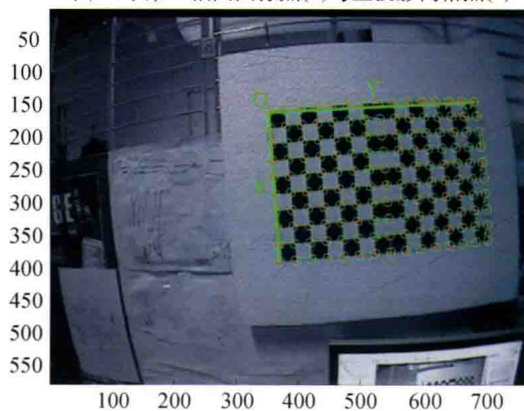


图 5.4 带有高亮角点的棋盘图

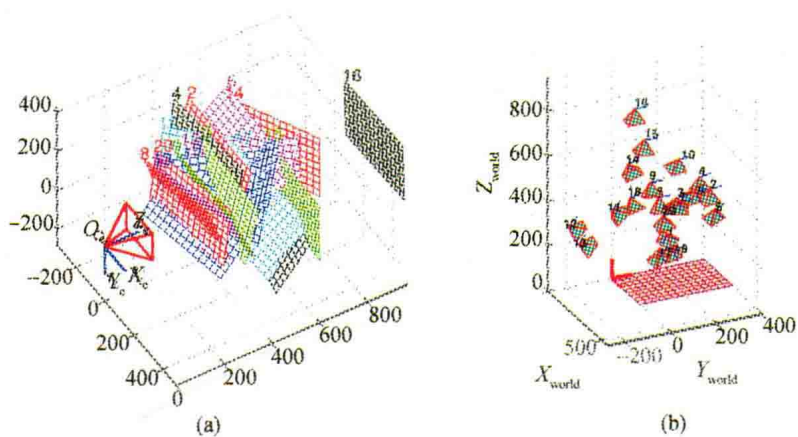


图 5.5 外参数

(a) 以摄像机为坐标中心;(b) 世界参考系为参考坐标系。

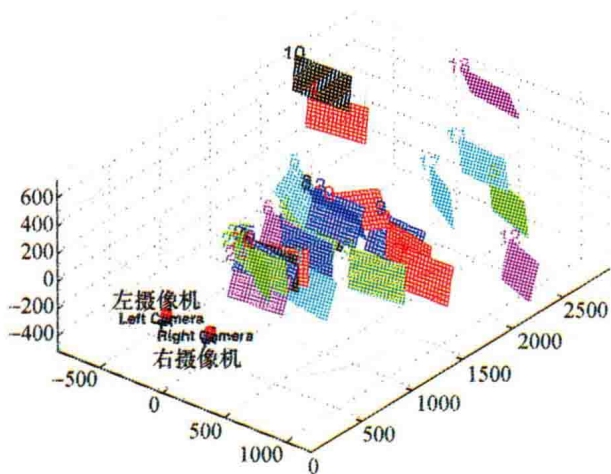


图 5.13 立体摄像机与标靶棋盘

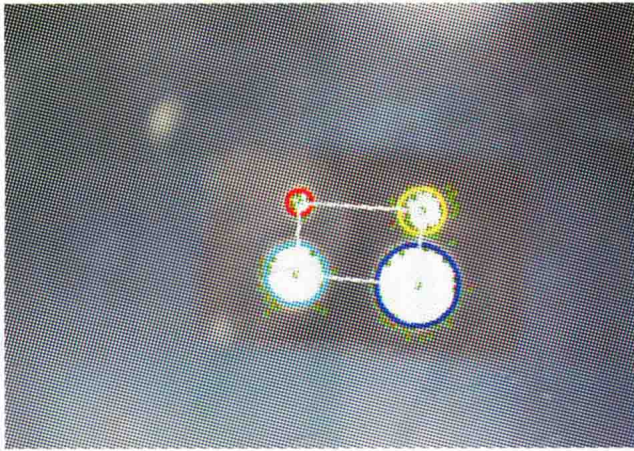


图 6.2 单应性估计图像处理:四个圆的检测和平行线的确认

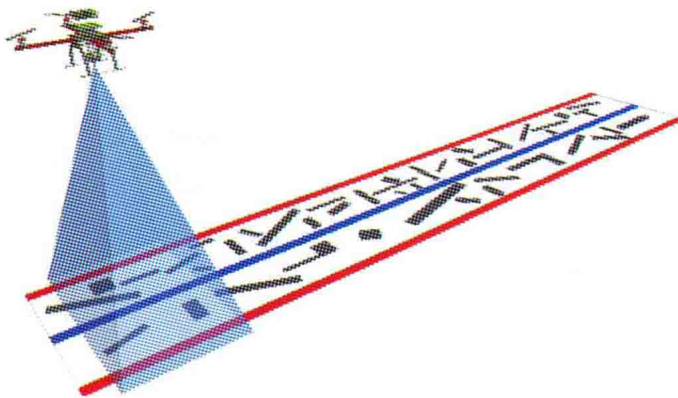


图 6.13 导航:视觉系统组成

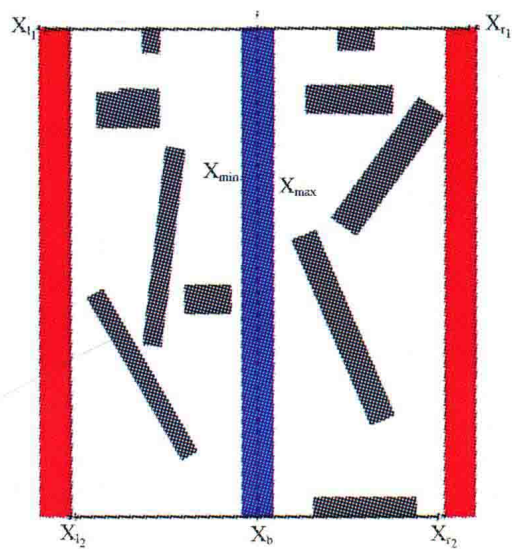


图 6.14 路径模型



图 7.8 立体成像视觉测程算法

第1章 绪论	1
1.1 无人机	1
1.1.1 发展简史	2
1.1.2 无人机的应用	7
1.1.3 无人机的分类	7
1.2 视觉导航研究现状	17
1.3 问题描述	20
1.4 主要贡献	20
1.5 章节结构	21
第2章 小型四旋翼无人机建模	23
2.1 小型四旋翼无人机概述	23
2.2 四旋翼无人机的动力学模型	25
2.2.1 欧拉-拉格朗日方法	25
2.2.2 牛顿-欧拉方法	29
2.2.3 牛顿方程到拉格朗日方程的转换	32
2.2.4 “X型”四旋翼无人机的牛顿-欧拉方法	32
2.3 本章结论	34
第3章 四旋翼无人机试验平台	35
3.1 UAV 传感技术概述	35
3.2 系统结构	37
3.3 地面监控站	38
3.4 四旋翼无人机平台设计	39
3.4.1 “十字型”四旋翼无人机设计	41

3.4.2	“X 型”四旋翼无人机设计	42
3.4.3	“改进版 X 型”四旋翼无人机设计	45
3.5	分层控制策略	46
3.5.1	高度和偏航控制	46
3.5.2	前向位置和俯仰角控制	47
3.5.3	侧向位置和滚转角控制	48
3.6	自主悬停飞行试验	50
3.6.1	“十字型”四旋翼无人机悬停效果图	50
3.6.2	“X 型”四旋翼无人机悬停效果图	51
3.6.3	“改进版 X 型”四旋翼无人机悬停效果图	53
3.7	本章小结	55
第 4 章	悬停飞行性能改善	56
4.1	引言	56
4.2	无刷直流电机和电子调速控制器	57
4.3	改善姿态稳定性能的控制策略	59
4.3.1	姿态控制	59
4.3.2	电枢电流控制	61
4.4	试验系统结构	62
4.4.1	四旋翼无人机	63
4.4.2	地面监控站	63
4.5	试验结果	64
4.6	本章小结	66
第 5 章	用于状态估计的图像传感器	67
5.1	摄像机模型	67
5.1.1	摄像机标定	71
5.2	立体成像	75
5.2.1	极几何	78
5.2.2	立体成像系统的标定	80
5.3	光流	86
5.3.1	计算方法	87
5.4	四旋翼无人机成像系统的实现	88
5.4.1	分离式与嵌入式系统	89

5.4.2	应用单目或立体视觉系统的挑战	92
5.4.3	单目成像系统的实现	93
5.4.4	立体视觉系统的实现	94
5.5	本章小结	95
第6章	基于视觉的四旋翼无人机控制	97
6.1	基于视觉的位置稳定	97
6.1.1	引言	97
6.1.2	视觉系统设置	98
6.1.3	基于视觉的位置估计	99
6.1.4	控制策略	102
6.1.5	试验系统配置	105
6.1.6	试验应用	105
6.1.7	总结	107
6.2	基于视觉反馈的非线性控制器对比	108
6.2.1	引言	108
6.2.2	系统组成	109
6.2.3	控制策略	109
6.2.4	试验应用	114
6.2.5	总结	118
6.3	基于视觉的高度和速度调节	118
6.3.1	引言	118
6.3.2	系统组成	118
6.3.3	图像处理	120
6.3.4	控制策略	122
6.3.5	试验应用	124
6.3.6	总结	127
6.4	本章小结	128
第7章	四旋翼无人机立体成像、惯性与高度组合传感系统	129
7.1	运动估计	129
7.1.1	引言	130
7.1.2	系统安装	131
7.1.3	试验平台概述	132

7.1.4	立体视觉测程法	134
7.1.5	一种简单的成像、惯性与高度数据融合策略	138
7.1.6	试验结果	139
7.1.7	总结	141
7.2	针对四旋翼无人机控制的不同状态估计算法比较	141
7.2.1	引言	141
7.2.2	问题描述	143
7.2.3	成像-惯性状态观测器设计	144
7.2.4	试验结果	147
7.2.5	总结	153
7.3	本章小结	153
第8章	总结与工作展望	155
8.1	结论	155
8.2	工作展望	157
参考文献		158