

分类号: _____

密级: _____

UDC: _____

编号: _____

工学硕士学位论文

无人机视觉稳定云台系统设计

硕士研究生 : 孟 恭

指导教师 : 曾建辉 副教授

学科、专业 : 导航、制导与控制


论文主审人 : 李光春 研究员

哈尔滨工程大学

2011 年 12 月

哈尔滨工程大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：本论文的所有工作，是在导师的指导下，由作者本人独立完成的。有关观点、方法、数据和文献的引用已在文中指出，并与参考文献相对应。除文中已注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经公开发表的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。


作者（签字）： 


日期： 2012年3月8日

哈尔滨工程大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解学校保护知识产权的有关规定，即研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于哈尔滨工程大学。哈尔滨工程大学有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件。本人允许哈尔滨工程大学将论文的部分或全部内容编入有关数据库进行检索，可采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文，可以公布论文的全部内容。同时本人保证毕业后结合学位论文研究课题再撰写的论文一律注明作者第一署名单位为哈尔滨工程大学。涉密学位论文待解密后适用本声明。

本论文（☒在授予学位后即可 ☐在授予学位 12 个月后 ☐解密后）由哈尔滨工程大学送交有关部门进行保存、汇编等。

作者（签字）： 

导师（签字）： 

日期： 2012年3月8日

2012年3月8日

分类号：_____

密级：_____

U D C：_____

编号：_____

工学硕士学位论文

无人机视觉稳定云台系统设计

硕士研究生：孟恭

指导教师：曾建辉 副教授

学位级别：工学硕士

学科、专业：导航、制导与控制

所在单位：自动化学院

论文提交日期：2011 年 12 月

论文答辩日期：2012 年 03 月

学位授予单位：哈尔滨工程大学

Classified Index:

U.D.C:

A Dissertation for the Degree of M.Eng

The Design of UAV Visual Stabilization Platform System

Candidate: Meng Gong

Supervisor: Prof. Zeng Jianhui

Academic Degree Applied for: Master of Engineering in Science

Speciality: Navigation Guidance and Control

Date of Submission: December, 2011

Date of Oral Examination: March, 2012

University: Harbin Engineering University

摘 要

近年来,无人驾驶飞行器(unmanned air vehicle: UAV, 简称无人机)在民用、工业和军事领域受到普遍关注。随着计算机技术、自动控制技术和图像处理技术等高新技术的快速发展,安装视觉跟踪设备、能对地面或低空目标进行跟踪的无人机系统也应运而生,受到各国学者的关注和研究。其主要功能是能够捕获运动目标并自动跟踪目标,将图像信息实时传送到主控平台,广泛应用在精确制导、反恐防暴、公路巡航和抗灾救援等场合。

本文以小型四旋翼无人机为载体,选择 CCD 摄像头采集视频图像,使用双轴稳定云台作为摄像机的视轴稳定平台。该平台不但可以隔离无人机的扰动,以保证摄像机能够获得稳定的图像,还需要快速响应控制信号,使摄像机视轴跟踪目标视线。本设计是一个基于无人机的视觉稳定跟踪系统,包括稳定控制、图像处理等多学科的知识,同时系统应用环境复杂,外界干扰大,因而对系统软硬件设计和跟踪控制方法都有极大挑战。

为了现实无人机视觉稳定云台对目标的跟踪,本文对相关问题进行一系列的探讨和研究。

首先,了解无人机视觉云台的研究背景及意义,对有关技术的发展和现状有初步的认识;根据系统的坐标系和动力学原理推导云台隔离载体扰动的补偿公式,建立系统的数学模型;经过频域分析,对稳定环超前校正并仿真对比,提出模糊 PID 控制器;分析影响系统精度的因素,设计陀螺漂移补偿算法。然后,对现有的跟踪算法分析并归类,根据本系统的应用环境选取几样合适的算法。硬件方面,针对双轴云台框架,选择合适的电子器件和外围设备,设计并调试控制电路板。软件方面,先要对传感器信号的采集和处理方法有一定的认识,再编写各部分的程序代码,最后,针对系统在实际应用当中可能出现的情形和外界的各种干扰,设计相关实验,分别对系统的稳定性、抗干扰性和准确性进行测试。同时,通过多次实验改进系统的硬件,验证不同的目标跟踪算法,分析其优缺点,得出合适的算法。

关键词: 无人机; 稳定云台; 相关跟踪; Hausdorff 距离

ABSTRACT

In recent years, unmanned air vehicle (UAV) in civil, industrial and military fields received the widespread attention. With the rapid development of computer technology, automatic control technology, image processing technology and so on, the ground target tracking UAV who carried vision tracking device comes into being and receives more and more attentions. Its major function is capturing moving objects, automatically tracking the target and real-time image transmission to the master control platform. So it can be used for the precision guidance, Counter-terrorism, road-cruise, emergency and disaster relief and so on.

In this paper, we use a small four-rotor UAV as a carrier, and select the CCD camera which installed on a dual-axis stabilized platform to capture video images. The platform can not only isolate the disturbance of UAV, in order to ensure stability of the camera to obtain images and make the camera track the target in response to control signals. This design is a vision tracking systems, including multi-disciplinary knowledges such as stability control and image processing. Because of the complex application environment and huge outside interference, the design of software, hardware and tracking control methods have greatly challenge.

In order to achieve tracking rapidly and steadily for moving target, a series of questions are researched in this paper.

Firstly, understand the background and significance of the reseach about the UAV vision pan-tilt head. According to the system's coordinate and the principle of dynamics infer the compensation formula of isolation carrier's disturbance, and establish system's mathematical model. After analysis in frequency domain, make anticipatory control on stable rings and contrast simulation, I choose the fuzzy PID controller. Analysis of factors affecting the accuracy of the system, design the algorithm to compensate the gyro drift. Then, according to this system's application environment, analyze and classify the existing tracking algorithmic and select several types of appropriate algorithms. Hardware diagram of system is presented. For dual-axis head frame, select the appropriate electronic devices and peripheral devices, and debug control circuit board. Software diagram of system is presented. Knowing the collection of sensor signal and processing methods, then compile various parts of code. Finally, according to system's practical application and all kinds of disturbance from outside word, design the related experiment which test system's stability and anti-jamming and accuracy. By

many experiments to improve the system hardware, and confirm the different target tracking algorithm's advantages, disadvantages, I design appropriate algorithm.

Key words: UAV; Stable Pan-tilt Head; Correlation tracking; Hausdorff Distance

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 课题的研究背景及意义	1
1.2 相关课题的发展及现状	1
1.2.1 无人机	1
1.2.2 稳定平台	2
1.2.3 视觉跟踪	3
1.3 本课题研究难点	3
1.4 论文的主要工作及内容安排	4
第 2 章 视觉稳定云台系统总体设计	6
2.1 系统组成及工作原理	6
2.1.1 视轴稳定云台结构	6
2.1.2 图像采集处理器	7
2.1.3 系统工作原理	8
2.2 跟踪算法综述	9
2.2.1 特征跟踪	9
2.2.1.1 对比度特征跟踪	9
2.2.1.2 区域特征跟踪	10
2.2.1.3 融合对比度和区域跟踪	10
2.2.2 基于滤波理论的目标跟踪方法	10
2.2.3 基于 Mean Shift 的目标跟踪方法	10
2.2.4 基于偏微分方程的目标跟踪方法	11
2.3 主要器件选取	11
2.3.1 驱动电机	11
2.3.2 陀螺加速度计模块	12
2.3.3 控制芯片	14
2.3.3.1 Freescale 单片机	14
2.3.3.2 FPGA	14
2.3.3.3 DSP	15
2.3.4 视频 AD 芯片	15
2.4 本章总结	15
第 3 章 视觉稳定云台系统模型建立	16

3.1 系统坐标系及视轴偏差角	16
3.1.1 坐标系	16
3.1.2 摄像机成像模型	17
3.1.3 视轴偏差角	18
3.2 双轴云台运动方程的建立	18
3.2.1 稳定云台坐标	18
3.2.2 扰动补偿方程	19
3.2.3 双轴稳定方案缺陷	21
3.3 稳定系统数学模型	21
3.3.1 驱动装置	22
3.3.2 PWM 功放	23
3.3.3 陀螺	23
3.3.4 视觉跟踪设备	24
3.4 系统精度影响因素	24
3.4.1 视轴稳定的影响因素	24
3.4.2 目标跟踪的影响因素	25
3.5 本章总结	25
第 4 章 控制系统设计及漂移补偿算法	26
4.1 视轴稳定环控制设计	26
4.1.1 稳定环结构分析	26
4.1.2 稳定环校正设计	27
4.1.2.1 未校正的稳定环特性	27
4.1.2.2 比例超前校正	28
4.1.2.3 校正后的稳定环特性	29
4.2 视觉稳定系统控制方法	30
4.2.1 模糊 PID 控制器	30
4.2.1.1 PID 控制器	30
4.2.1.2 模糊控制	31
4.2.1.3 模糊 PID 控制器	31
4.2.2 视觉云台系统模糊 PID 控制的设计	31
4.2.2.1 模糊 PID 控制仿真	31
4.2.2.2 MC9S12 的模糊控制实现	34
4.3 陀螺漂移补偿	35
4.3.1 Kalman 滤波补偿	35

4.3.2 加速度计补偿法	35
4.3.3 算法仿真对比	37
4.4 本章总结	39
第 5 章 目标跟踪算法设计	40
5.1 视频信号的采集和解码	40
5.1.1 摄像机视频制式分析	40
5.1.2 视频信号采集及解码	41
5.2 Canny 边缘检测的 FPGA 实现	43
5.2.1 边缘检测原理	43
5.2.2 Canny 边缘检测算法	44
5.2.2.1 Canny 准则	44
5.2.2.2 Canny 算法过程	45
5.2.3 FPGA 实现 Canny 边缘检测	47
5.3 目标跟踪算法	49
5.3.1 相关跟踪算法	49
5.3.1.1 相关跟踪算法原理	50
5.3.1.2 模板选取及更新	51
5.3.1.3 序贯相似度检测算法(SSDA)	51
5.3.2 基于 Hausdorff 距离的图像匹配	52
5.3.2.1 Hausdorff 距离	52
5.3.2.2 Hausdorff 距离匹配方法	53
5.3.2.3 距离变换	54
5.3.3 改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法	55
5.3.3.1 算法设计	55
5.3.3.2 算法步骤	57
5.3.3.3 模板更新	58
5.4 本章总结	59
第 6 章 实验分析	60
6.1 图像匹配实验	60
6.1.1 Hausdorff 距离匹配实验	60
6.1.2 抗干扰实验	61
6.2 目标跟踪实验	63
6.2.1 仿真实验	63
6.2.2 实际实验	65

6.3 本章总结	66
结论	67
参考文献.....	68
攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果	72
致谢	73

第 1 章 绪论

1.1 课题的研究背景及意义

近年来,随着计算机技术、自动控制技术和机械制造技术等高新科技水平不断的提高,以及人们对生命财产安全甚至国家安全的高度重视,无人飞行器在军事领域乃至民用领域受到普遍关注,其研究速度也大大提高。单纯无人机飞行没有任何实用价值,当安装带探测设备的机载稳定平台后就可以实现航拍、大地测量等,但是在我们往往希望无人机可以执行特殊的任务,例如精确制导、反恐防暴、交通管理和抗灾救援等,就需要无人机能够对特定目标自主跟踪飞行,实时传送目标的信息,再由指挥中心进行下一步操作。据有关资料记载,早在 20 世纪 40 年代,美国就将带电视监控系统的制导鱼雷投入战场,但其依赖人工干预,不完全是视觉跟踪系统^[23]。前不久,阿富汗基地组织领导人本拉登被美军无人机锁定并击毙。2008 年无人机在四川抗震救援方面做出突出贡献,同年在北京召开中国无人机系统峰会受到多方关注。可以看出无人机已成为当前最活跃的研究方向之一,尤其是具备视觉功能的无人机更是得到众多学者极大关注。

无人机在空中为了完成对地面或低空目标的探测和跟踪任务,要保证视觉传感器始终获得目标的图像,所以需要一个搭载探测设备的稳定平台。它有两方面的作用,一是可以隔离载体和外界的扰动,保证平台相对惯性空间始终稳定;二是能够快速响应控制器的平台转动指令。机体在空中飞行难免受到干扰,无法保持平稳,况且载体本身也造成扰动,如果平台系统能够克服这些干扰,精确地调整保持其姿态平稳,那么平台上的探测设备就可以实现对目标的监控和跟踪,因而在军事和民用领域广泛应用。随着科学技术的发展和国防军事装备的需求,从响应速度、准确度到机动性能等各方面,对武器跟踪平台提出了更高的要求。

图像的目标跟踪涉及到计算机视觉技术,该技术是计算机科学和图像工程领域中的重点研究内容。飞行中无人机对运动目标跟踪,需要复杂的图像处理和模式识别计算,是一门综合性很高的复杂课题。研究出优秀的目标跟踪算法,使其能够适应各种复杂环境,且精确度高、鲁棒性好、性能优越是当前众多学者的研究重点。

总之,无人机的视觉跟踪无论在军事领域还是民用领域都有广泛应用,对视觉跟踪技术的研究也受到愈来愈多学者的关注,设计并实现抗干扰能力强、适用范围广、精确度高的无人机视觉跟踪系统是所有研究人员共同的愿望。

1.2 相关课题的发展及现状

1.2.1 无人机

无人机是无人驾驶飞行器的简称,最早出现于 20 世纪 20 年代,从最早的单一功能

遥控无人机发展到现在的多用途自主控制无人机,由于其相对载人飞机成本低、体积小、机动性和适应性强,受到各国研究人员和军队的青睐,期望无人机在战场上发挥重要的作用。随着高新型材料的出现,先进的数字信号处理和通信传输技术的发展,以及先进的自动控制技术的研究,无人机已经不拘泥于军事应用,在其他领域也有了长足的发展,例如地形探测、反恐防暴、交通管理和灾害预防等。作为“空中骄子”无人机的发展已经向多面化、小型化、智能化、数字化、网络化、低造价、低损耗、全天候等方面发展^[5]。目前各国都有自主研发的先进无人机型号,例如美国的 RQ-4a “全球鹰”、RQ-170 “哨兵”等,以色列的“苍鹭 TP”、“幸运儿”等,俄罗斯的“尤里-E”、“巡逻-600”等,还有我国的“蓝箭”、“天眼”和“WJ-600”等。



图 1.1 美国“全球鹰”无人机

1.2.2 稳定平台

陀螺稳定平台 (gyroscope-stabilized platform), 是利用陀螺特性保持平台台体稳定的装置, 又称为陀螺平台或惯性平台。它用于测量载体的姿态变化做出反应以稳定平台上的设备。主要用在导弹、飞机、舰船和航天器等的惯性制导系统和惯性导航系统, 早在 1936 年, 军舰上就使用滚珠轴承式的动力陀螺稳定平台作测距仪的稳定器。

陀螺稳定平台自出现以来广泛应用在军用和民用领域, 随着数字信号处理、微电子技术、微机械技术和机械材料技术的高速发展, 以及高精度光纤陀螺、激光陀螺等新型惯性器件的发展, 对陀螺稳定平台技术有了更进一步的研究。90 年代以后, 集微电子、机械、半导体等技术于一身的微惯性传感器, 在稳定平台领域也得到广泛应用^[10]。未来, 陀螺稳定平台的发展会更快, 相关的误差和漂移补偿技术也将有进一步地提升。很多国家都已经使用陀螺稳定平台研制出多种型号的机载、舰载武器设备。我国 90 年代初才开始研制陀螺稳定平台, 虽然与国外相比有较大差距, 但也成功研制出不少稳定平台在国防武器装备中得以应用。

1.2.3 视觉跟踪

视觉跟踪是在序列图像的每一帧图像中找到期望目标的位置、大小或形状信息，即能在视频的不同帧中把被跟踪的目标物体标记出来^[28]。近些年来，随着跟踪算法的不断改进、高分辨率摄像机的出现和高性能数字信号处理芯片的不断升级，视觉跟踪技术取得高速发展。从最早的无线电雷达跟踪到现在的红外跟踪或热成像跟踪，以及更多更新的跟踪技术，都说明目标跟踪技术活跃的生命力和广泛的应用领域。目标跟踪是一门结合微电子、人工智能、计算机视觉和模式识别等多学科的高新技术，在军事武器、交通管理、反恐防暴、人工智能、医学检测等各领域发挥着重要作用。

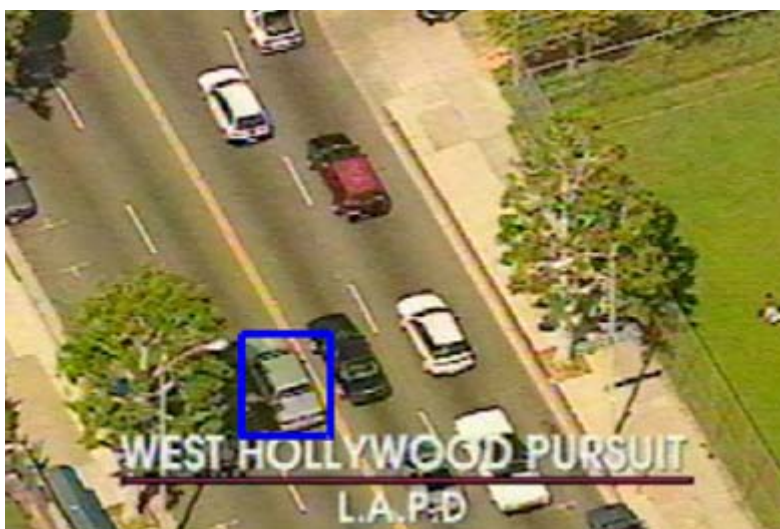


图 1.2 目标跟踪

1996 年，美国国防先进研究署(DARPA)正式开始实施为期三年的视频监视和监控技术 VSAM(Video Surveillance and Monitoring)计划，卡内基梅隆大学和萨诺夫公司等 12 大学和工业实验室参与了研究。与此同时法国、巴西、瑞典等也都开始了这方面的研究^[1]。

1.3 本课题研究难点

无人机视觉稳定云台要求具有极高的稳态精度和优秀的动态品质，同时视觉跟踪系统需要准确无误、能够快速响应、抗干扰能力强。但是在实际情况中，系统往往受到各方面的多种干扰，使系统无法正常工作，如何克服这些影响因素，是本课题的关键和难点。

(1) 陀螺信号漂移问题。陀螺仪输出的信号常常带有干扰和噪声，严重影响系统的稳定性。陀螺的误差分为随机误差和常值误差，其中随机误差具有不确定性、非线性和慢时变性，且对外部环境的影响极其敏感。虽然可以预先对其进行统计建模，但漂移模型是时变的，必须在线实时辨识参数并建立模型以达到补偿效果，这样增加了不少运算量，在实时控制中难以实现，必须寻找更可行的方法来处理。

(2) 无人机运动导致成像质量降低。无人机在空中飞行，无论是外界影响还是自身的干扰都会使其姿态改变，引起云台偏转，导致成像困难甚至丢失目标。搭载惯性稳定平台的无人机可以隔离机体姿态变化对摄像机视轴的影响。机体姿态变化的影响具有随机性、变速性，稳定平台必须能够适应各种干扰，在稳态和动态都有不错的响应。除此之外，无人机在高速运动时，目标相对探测设备也高速运动，无法清晰成像，也就不能跟踪目标。因此，要使云台跟随目标运动以减小相对速度。

(3) 目标跟踪受环境干扰。视觉跟踪设备需要在户外执行图像采集和目标识别跟踪任务，难免会受到环境的影响。例如较大的机动导致目标和背景突然改变其外形，光照强度的变化引起识别误差，目标与目标或者目标与背景的遮挡，复杂的背景影响目标的识别和匹配，所以需要优秀的目标跟踪算法。

1.4 论文的主要工作及内容安排

本文以四旋翼无人机为载体，设计能够搭载摄像机的稳定云台并采集图像对目标进行实时跟踪。本文工作重点总结如下：

云台稳定控制方面：设计并制作云台框架，分析误差来源和系统工作原理，建立数学模型并仿真，由平台角运动规律推导出隔离机体干扰的补偿方程。然后分析云台稳定控制回路，从频域角度对稳定环进行校正，设计双轴随动稳定平台的控制回路，结合多种控制理论得出稳定回路的最佳控制方法。最后，对影响云台稳定的主要因素陀螺漂移进行分析，设计补偿算法并对比仿真。

运动目标跟踪方面：对现有的目标跟踪算法逐一分析和分类，了解它们各自的优缺点和适用范围，结合本设计的应用场景和图像特点，选择合适的算法。详细分析了基于灰度的相关跟踪算法和基于特征的相关跟踪算法，了解它们的算法理论依据和计算原理，将它们融合起来，把各自的优点发挥出来。在图像匹配中，对 Hausdorff 距离深入研究，将其思想应用和相关跟踪的算法中，提高跟踪精度、可靠性和抗干扰能力。同时，介绍算法中需要使用的边缘检测方法，分析多种边缘检测算子的优劣，选择 Canny 算子作为本设计的边缘检测算子，并用 FPGA 硬件实现该算法，可靠性高，实时性强。

论文结构安排如下：

第一章：介绍本课题的研究背景及意义，相关技术的发展和现状，设计难点和内容。

第二章：介绍系统的组成和工作原理，根据需要选择合适的器件，对现有跟踪算法作总结和归类。

第三章：对系统各部分进行分析，建立数学模型，在双轴云台框架坐标系的基础上推导隔离载体扰动的补偿方程，为实际系统的开发和设计提供了理论基础。

第四章：在理论分析的前提下，校正云台稳定控制回路并采用模糊 PID 控制器进行系统控制并仿真，分析陀螺漂移对系统的影响，设计补偿算法。

第五章：介绍图像采集和预处理的过程，使用 **FPGA** 实现边缘提取，分析相关跟踪算法和 **Hausdorff** 距离匹配，针对各自优点，提出基于 **Hausdorff** 距离的相关跟踪算法并实现。

第六章：对系统的平台控制和跟踪算法进行实验，改进系统软硬件，最终取得预期的效果和跟踪性能。

第七章：总结全文，并提出一些建议和设想。

第2章 视觉稳定云台系统总体设计

视觉稳定云台不但能够使被稳定的视觉设备保持方位不变，还能够按照一定指令使方位发生变化，保证视觉设备对目标的实时跟踪。这个方位是由组成稳定云台的三个正交轴旋转一定角度来实现的，这三轴分别为俯仰轴、横滚轴和方位轴。根据不同的需要和适用范围，可以选择其中两个轴或三轴来组成稳定云台，本设计选择方位轴和俯仰轴。稳定云台隔离外界干扰，使视轴稳定，才能够实现目标跟踪。视频目标跟踪是在连续的图像帧中，检测目标并确定其位置，在许多方面都有着重要的应用，是计算机视觉领域的重点研究课题，涉及诸如图像滤波和转换，图像特征提取，目标特征描述及匹配等很多方面。只有准确的目标跟踪和精确的稳定控制才能更好的发挥视觉稳定云台的作用。

本章主要介绍双轴视觉稳定云台系统的组成及工作原理，对当前跟踪算法分类并简要分析，根据算法复杂度和实时性要求，选择系统合适的器件并介绍其作用，搭建实验硬件平台，为系统模型建立和算法设计提供基础。

2.1 系统组成及工作原理

本设计中稳定云台安装在四旋翼无人飞行器上，载体的俯仰和横滚运动较小，跟踪目标为地面或海上物体，所以稳定云台采用双轴形式，包括俯仰轴和方位轴。根据视觉稳定平台功能可把设计分为视轴稳定平台和图像采集处理器两个部分，如图 2.1 所示。

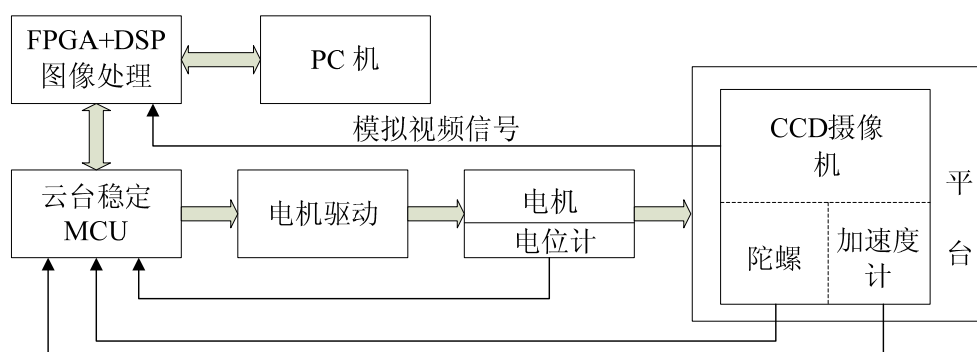


图 2.1 系统总体结构图

2.1.1 视轴稳定云台结构

视轴稳定云台由机械结构和电路控制两部分组成，硬件结构由双轴碳纤维框架、驱动舵机、陀螺加速度计模块及控制电路板四部分组成，如图 2.2 所示。双轴平台框架为俯仰和方位双环的环架结构，其中俯仰轴采用双舵机驱动，这样不仅可以增加驱动能力而且能够消除旋转回差。

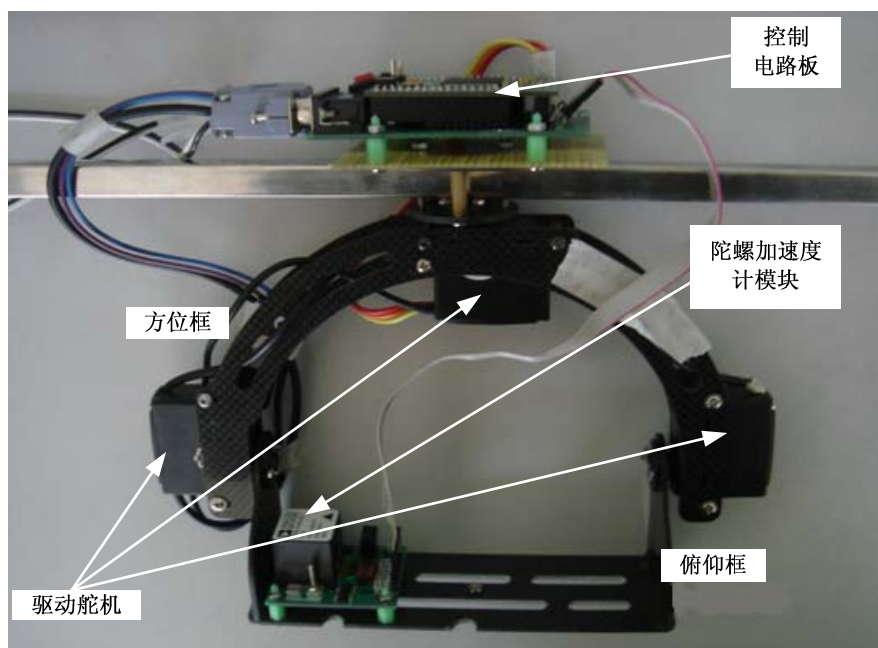


图 2.2 稳定云台

碳纤维框架质量小、韧性好、不易变性并且加工方便，是极佳的航模材料，使用非常广泛，其中俯仰轴设计能够旋转 $\pm 90^\circ$ ，方位轴可旋转 360° ，满足视觉稳定云台工作要求。

控制电路板实现与图像处理板的通信，还负责采集陀螺加速度计模块的信号并传输给稳定控制 MCU，经过 MCU 的控制算法得到控制量输出给驱动部分实现平台稳定。

2.1.2 图像采集处理器

图像的采集和处理是本设计的重点和难点，结构组成为监控摄像头、视频采集模块、图像处理单元和通讯接口，如图 2.3 所示。

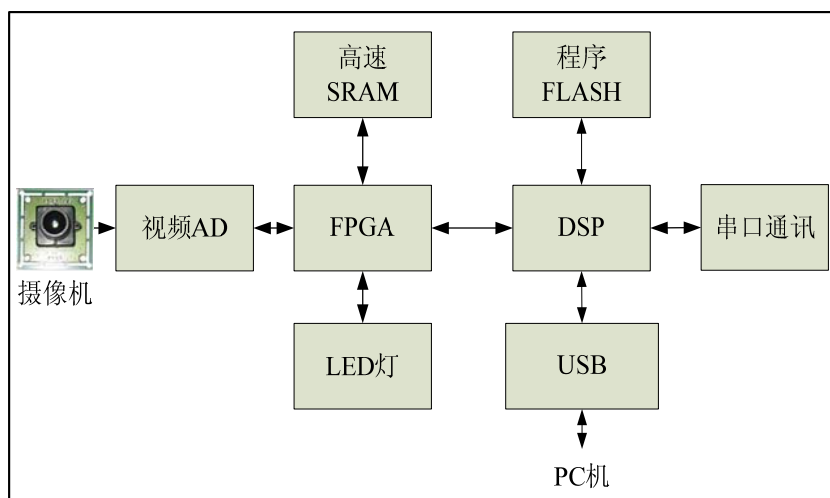


图 2.3 图像采集处理器

摄像机是整个目标跟踪系统的眼睛，固定安装的摄像机只能监视一个固定的角度的

图像，而安装在云台上的摄像机就能实现多方位的监视和目标跟踪。本设计摄像机采用 1/4 英寸彩色 CCD 摄像机，输出 PAL 制式的模拟视频信号。视频 AD 芯片采集模拟视频信号并输出 YUV422 格式的数字图像序列。FPGA 控制视频 AD 芯片采集图像并滤波，将处理后的结果存入静态随机存储器（SRAM），DSP 与 FPGA 共用 SRAM。DSP 是图像处理的控制中心，通过 USB 接口与电脑通信，并将处理结果传输给云台稳定处理器 MCU，完成目标跟踪。

电脑上使用 VC++ 编写上位机，实时显示图像和跟踪结果，以及调试的参数，如图 2.4 所示。



图 2.4 电脑上位机

2.1.3 系统工作原理

安装在稳定平台上的摄像机将 PAL 制式的模拟视频信号传输给视频 AD 芯片，提取视频同步信号和有效图像信息，再由图像处理器解算出所需目标的位置信息（即视轴偏差角）送到云台稳定控制器 MCU，由控制规律得到驱动平台电机转动的转角，实现摄像机对目标的实时跟踪。同时视频处理器将视频信息传输给 PC 机，实时显示跟踪效果。

实际中，载体运动和其他外界干扰直接影响平台系统的稳定，因此需要搭建一个稳定系统，隔离这些外在干扰因素，保证摄像机视轴相对惯性空间保持稳定。

致使平台不稳定的因素主要有：摩擦，重心偏移，轴间耦合，传感器噪声，其中合理的机械结构布局和必要的减震措施可以隔离高频分量，而低频部分可以使用平台上的陀螺检测平台的姿态变化，得到平台转速信息，反馈给平台驱动电机，抵消平台姿态变化，即隔离载体的姿态扰动，保持视轴方向稳定，从而减弱载体姿态变化对目标跟踪的影响。

视觉稳定云台以四旋翼无人飞行器为载体，采用双轴框架稳定平台，它既是摄像机安装基准和承载平台，又是摄像机实现视轴稳定和目标跟踪的执行机构，同时还起到

与载体连接的桥梁作用。相对三轴平台，双轴稳定平台体积和重量更小，忽略轴间耦合的影响，在单轴稳定平台的基础上设计双轴稳定平台^[22]。

本设计的视觉稳定云台具有两个功能：

一是稳定视轴功能，即对外界干扰起对消作用，隔离载体运动，可以用于航拍和地面监视，操作人员搜索需要跟踪的目标并标定初始模板，便于后续跟踪。以陀螺作为平台角运动敏感元件并利用加速度计的数据补偿陀螺漂移，得到较准确的平台转动角度和角速度，通过 PID 控制算法得到控制量驱动相应轴的电机转动，隔离载体的角运动，稳定摄像机云台，为目标标定和目标跟踪提供可靠的保证。

二是目标跟踪功能，FPGA 控制视频 AD 芯片采集摄像机的模拟视频信号并进行滤波处理，DSP 将数据传输给 PC 机，实时显示图像，操作人员进行目标标定，开启跟踪功能。在跟踪算法分析的基础上提出改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法，跟踪算法将跟踪误差角反馈给视轴稳定控制 MCU，控制云台转动，与电机同轴的电位计得到偏转角度，在此角度基础上继续实现云台视轴稳定，始终保持目标位于规定的视窗内。

2.2 跟踪算法综述

目标跟踪是计算机视觉领域的一个重点研究方向，受到越来越多的学者深入研究。在序列图像中目标跟踪是指根据视频图像中的时空相关信息在每一帧图像中确定目标的位置、大小或形状信息等。目标跟踪涉及图像处理、模式识别、概率统计和自动控制等多学科，在民用、工业和军事领域都有极大的研究价值。

目标跟踪所包含的内容十分广泛，算法众多，迄今为止还没有一个系统的分类。根据是否需要物体的三维结构，分为三维(3D)跟踪方法和二维(2D)跟踪方法。前者需要多个图像采集摄像机以获得目标在三维空间的信息，而后者一般使用单目摄像机获得目标的二维平面信息。根据跟踪特征不同，大致可分为对比度特征方法、区域特征方法、融合对比度和区域的方法。根据跟踪方法的不同，大致可分为基于滤波的目标跟踪方法、基于 Mean Shift 的目标跟踪方法和基于偏微分方程的目标跟踪方法^[25]。

2.2.1 特征跟踪

2.2.1.1 对比度特征跟踪

对比度是图像中黑白之间的亮度差异，差异的大小决定对比度的大小。我们就是通过不同物体间亮度和色彩的差别来分清它们。对比度跟踪就是利用这一原理区分目标和背景，达到跟踪目标的目的。

边缘跟踪也叫轮廓跟踪，是对比度跟踪的一种。图像边缘包含了目标的许多重要信息，能够保证目标的最佳提取，而且形心跟踪和峰值跟踪等也是在边缘的基础上得到的。边缘检测是计算机视觉领域一项重要技术，受到人们的广泛研究，提出了许多相关的算

子, 如 Robert、Prewitt、Kirsch、Laplace、Canny 等。其中 Canny 算子的准确度和信噪比高, 已应用于图象处理的众多领域。

2.2.1.2 区域特征跟踪

基于区域特征的跟踪方法, 对整个跟踪区域的灰度、颜色、纹理、光流及运动信息进行分析, 将目标以模板形式表示, 随后在各帧中通过匹配图像区域和模板区域的相应特征来定位目标。这种算法复杂性和计算量较大, 所以选择合适的特征及快速的计算方法有利于高效的跟踪目标, 跟踪算法还需要有合理的目标模板更新机制。

相关跟踪算法是区域特征跟踪算法中常用的运动目标跟踪方法, 也叫模板匹配法, 克服了对比度较差时无法正确地提取目标, 同时对目标局部遮蔽或模糊有较好的适应性。算法将已经设定好的目标模板图像在每帧图像的待搜索区域滑动, 统计所有相应特征点的差异, 找到最小差异位置就是最终跟踪位置。典型的跟踪算法有: 平均差值函数法(MAD)、序贯相似性检测算法(SSDA)和最大近邻距离相关匹配法(MCD)^[38]。上述算法各有利弊, 恰当的融合不但可以加快跟踪速度而且有利于提高跟踪准确度。

2.2.1.3 融合对比度和区域跟踪

单一的特征跟踪不能满足跟踪的准确性, 适用范围小, 将图像对比度信息和区域信息统一起来, 相互融合, 取长补短, 提高跟踪效果。

2.2.2 基于滤波理论的目标跟踪方法

基于滤波理论的目标跟踪方法就是用概率密度函数的估计问题代替序列图像中的目标跟踪问题, 常用的两种目标跟踪滤波器为卡尔曼(Kalman)滤波器和粒子滤波器。

这种方法包含三个要素: 先验概率密度函数(又称运动方程)、观测概率密度函数(又称观测方程)、后验概率密度函数。最初假设目标的运动方程和观测方程是线性的高斯过程, 采用卡尔曼滤波和扩展卡尔曼滤波进行跟踪; 然而实际跟踪中, 受到复杂运动和噪声影响, 这种假设往往不成立, 需要采用粒子滤波器解决非线性非高斯的跟踪问题。

2.2.3 基于 Mean Shift 的目标跟踪方法

基于 Mean Shift(均值漂移)的目标跟踪方法具有很好的实时性和鲁棒性, 利用目标函数的梯度信息来估计目标的位置, 其本质是一种梯度下降算法。Mean Shift 是基于梯度的无参密度估计方法, 解决了实际计算机视觉中涉及到的密度分布是多变量多峰的这一问题, 同时该方法具有良好的收敛性。在对目标建模的基础上, 每一帧图像都采用概率密度的相似性函数度量目标和待匹配图像之间的相似性, 完成目标的匹配, 达到跟踪目的。

2.2.4 基于偏微分方程的目标跟踪方法

基于偏微分方程的目标跟踪方法将目标跟踪问题转化为泛函优化问题，求解偏微分方程得到泛函的极值，实现目标的跟踪。实际的视觉跟踪中，可能会出现复杂形状的目标，仅仅通过简单的几何形状不能准确描述目标，基于偏微分方程的目标跟踪方法能够有效地跟踪外形复杂的目标，可以独立于目标的初始位置而且具有全局收敛性质。

综上所述，目标的跟踪算法有很多，每种算法都具有自身的优劣性和适用范围，恰当使用能达到较好的效果。实际使用时可以考虑将两种或两种以上的跟踪算法相互融合，在扩大适用范围的同时还能够取得最佳的跟踪效果。本设计对图像处理，提取灰度和边缘信息，将 SSDA 算法和 Hausdorff 算法相结合，提出改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法。

2.3 主要器件选取

为了满足视觉稳定云台系统的工作性能指标，必须精心选择系统的主要器件，能够使它们组成的系统合理运行。

2.3.1 驱动电机

电机是云台稳定系统的关键部件，由于本云台稳定系统工作在低速状态下，所以电机必须具备转速低、响应快、力矩大、功耗小、线性度好等性能。直流力矩电机就非常适合这个工作要求，但是考虑到重量、体积、成本及本设计的适用性问题，没必要选用力矩电机，本设计将选择舵机作为稳定云台选择执行部件，它也是航空云台常使用的执行部件。

舵机选用减速齿轮精度较高、传动顺滑的空心杯电机驱动的舵机，有时候也叫无核马达舵机。因为云台的稳定过程需要对电机作高速准确的调速控制，空心杯马达具有转动惯量小的特点，比一般铁心马达更加适合于这种应用。一般说来 10kgcm 力矩的舵机直接驱动时适合于稳定 500g 左右的负载。减速器的回差是严重影响稳定效果，设计使用双电机差模驱动的方式消除回差，相比单舵机驱动有较高的性能提升，同时可将驱动力矩提高近两倍。

舵机内部由电子控制电路板、小型直流马达、齿轮传动组、旋转电位计组成，如图 2.5 所示。为了满足转动的快速性和方便地控制其正反转，将舵机进行改造。打开舵机外壳，拆除控制电路板，保留原舵机的电机、电位计和齿轮传动组，将电机控制线和电位计信号线引出，连接到云台控制电路板上。这样就可以像驱动力矩电机一样驱动舵机，控制频率从普通舵机的 50Hz 提高到 8kHz，并且可以采集与输出轴同轴的电位计转动角度，相当于陀螺稳定平台的旋转变压器。

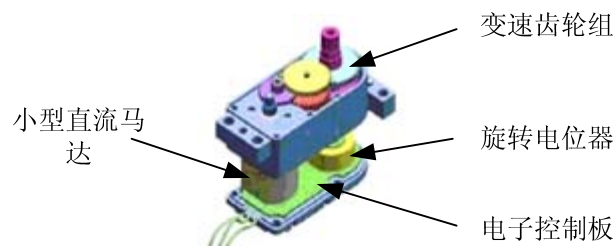


图 2.5 舵机内部结构

舵机在云台框架的安装方式也要慎重考虑，如下图对比可知，左边的安装方式舵机不随被稳定的框架转动，右边安装方式舵机随框架转动。相比之下右边的安装方式不但增加了本框架轴的负载，安装时还容易损坏舵机，也增加了框架的材料成本。

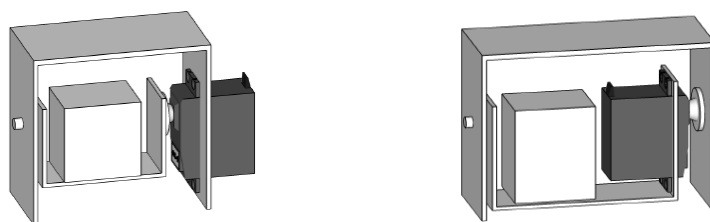


图 2.6 舵机安装对比图

2.3.2 陀螺加速度计模块

陀螺和加速度计是本设计的主要传感元件，陀螺敏感摄像机平台相对惯性空间的角运动，为隔离载体扰动提供信号，加速度计感测云台线运动信息，当载体没有加减速运动时，可以感测平台相对水平面的偏转，本设计算法中用于补偿陀螺的漂移。

本设计采用集成的惯性测量单元 ADIS16350，该传感器包涵 AD 公司的微机械和混合信息技术，提供校准后的数字惯性感应，通过 SPI 接口与外部通信，能够实现简单的内部编程，其内部结构如下：

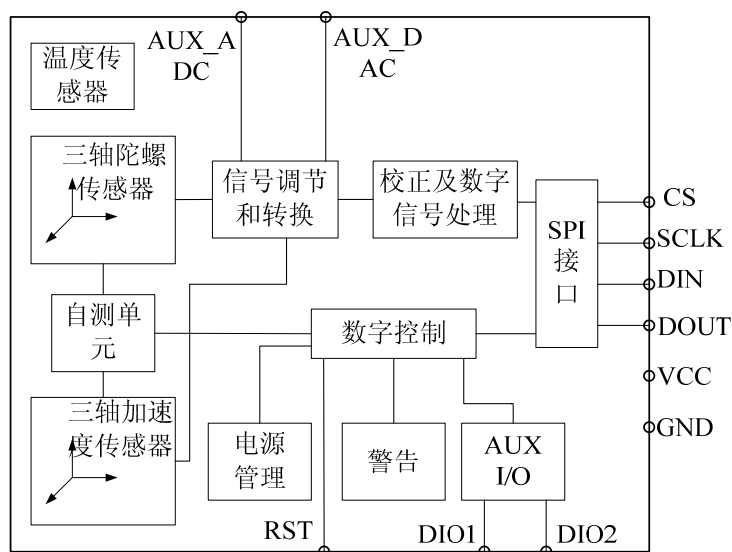


图 2.7 ADIS16350 内部结构图

ADIS16350 有以下特征:

- ◆ 三轴陀螺数字比例缩放可设定 $\pm 75^\circ/s$, $\pm 150^\circ/s$, $\pm 300^\circ/s$ 测量范围, 14 位分辨率;
- ◆ 分辨率: $0.07326^\circ/s/LSB$, $2.522mg/LSB$;
- ◆ 三轴加速度计 $\pm 10g$ 测量范围, 14 位分辨率;
- ◆ 漂移: $0.015^\circ/s$;
- ◆ 350Hz 带宽;
- ◆ 工作温度范围: $-40^\circ C \sim +85^\circ C$;
- ◆ 嵌入式温度传感器;
- ◆ 可编程采样频率;
- ◆ 可编程状态监控;
- ◆ 数字激化自检;
- ◆ 可编程电源管理;
- ◆ 辅助 12 位 ADC 输入和 DAC 输出;
- ◆ 单电源工作: 4.75V 到 5.25V;
- ◆ 2000g 震荡忍耐力。

ADIS16350 中 SPI 接口包括 4 根信号线: 片选 (CS)、串行时钟 (SCLK)、数据输入 (DIN) 及数据输出 (DOUT)。ADIS16350 工作时序有两种: 配置模式和读取模式^[59]。

配置模式: 写命令到相应寄存器, 初始化 ADIS16350, 如下图所示:

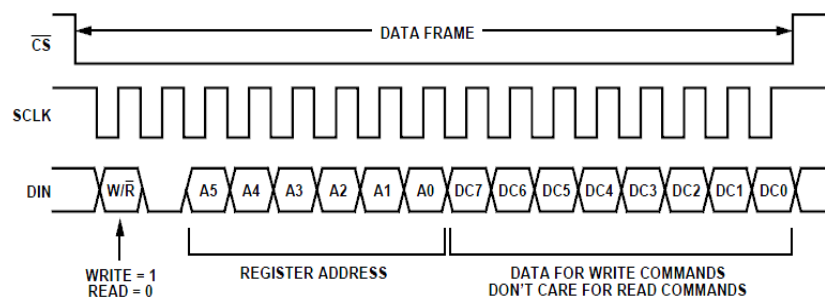


图 2.8 ADIS16350 配置模式时序图

读取模式: 写入相关地址, 获取对应的姿态信息, 比如加速度和角速率, 如下图所示:

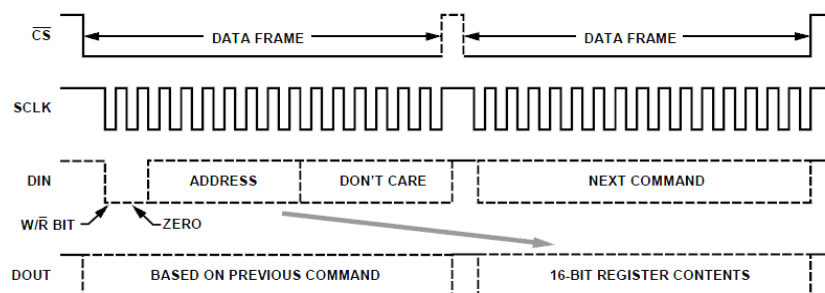


图 2.9 ADIS16350 读取模式时序图

2.3.3 控制芯片

视觉稳定云台用到的控制芯片包括云台稳定控制单片机 MC9S12DG128；视频预处理控制芯片 FPGA，使用 ALTERA 的 Cyclone II EP2C20Q240；图像处理控制芯片 DSP，使用 TMS320VC5502。

2.3.3.1 Freescale 单片机

Freescale 系列单片机是典型的哈佛结构，具有低成本，高性能等特点，内部集成多种功能模块。MC9S12DG128 是一款增强型 16 位单片机，片内资源丰富，接口模块包括 SPI、SCI、CAN、IIC、A/D、PWM 等。

使用 MC9S12DG128 单片机作为系统控制器，运算速度快，处理能力强，逻辑判断准确，可以很好地完成多种控制任务，对于本设计的信号采集和稳定控制能够完全胜任。同时 HCS12 系列是世界上第一款包含完整的模糊控制逻辑指令的标准 MCU，应用模糊控制指令可以简化控制系统，减少代码，加快程序运行速度，为云台稳定控制提供保证。

2.3.3.2 FPGA

FPGA(Field Programmable Gate Array，现场可编程门阵列)集成度高，简单的编程就可以实现相当复杂的数字逻辑电路，而且密度高、速度快，开发周期短。FPGA 可以重复配置和编程，不需要改变其硬件电路，只需在计算机上改写程序就能实现系统的修改和升级，降低成本，缩短开发周期。

EP2C20Q240 是 ALTERA 公司的 Cyclone II 系列 FPGA，240 管脚的 QFP 封装。该 FPGA 由 18752 个 LE 组成，内部有 52 个 M4K 的 RAM 块、4 个 PLL。对于数字图像分析和处理，FPGA 可以充分发挥其并行处理和时序性强的特点。视觉稳定云台使用此 FPGA 将采集来的图像滤波并边缘处理，然后输出到 SRAM，用于目标跟踪算法。

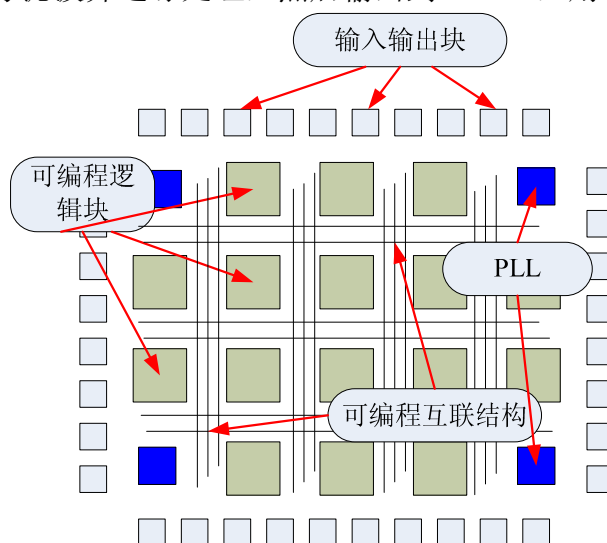


图 2.10 FPGA 基本结构

2.3.3.3 DSP

DSP 处理器自问世以来就快速地发展着,因其具有流水线结构、哈佛总线结构、快速乘法器、片内外两级存储结构、快速浮点计算等众多独特配置,使其在运算能力上大大超出其它处理器。一直被用来快速处理复杂的数字化信号。作为全球最大的 DSP 供应商,TI 公司生产了众多系列的 DSP,有着广泛的适用范围。本设计使用 TI 公司的 C5000 系列超低功耗 DSP TMS320VC5502,最高时钟频率 300MHz,每个周期可以执行 2 条指令

TMS320VC5502 的特点如下:

- (1)片上 16K×8 位的 I-Cache,用于对指令高速缓存;
- (2)片上 ROM 总容量为 16K×16 位;
- (3)片上 DARAM 总容量为 32K×16 位;
- (4)高速乘法器,所以每秒钟最多可执行 6 亿条乘加指令
- (5) 32 位外部高速并行总线;
- (6)支持 EMIF(外部存储接口),可外扩各种类型的外部存储器,最大可寻址的外部存储空间为 8M×16 位;
- (7)丰富的片上外设,4 路 64 位定时器、DMA、HPI、McBSP 接口、IIC 总线、UART 接口等。

2.3.4 视频 AD 芯片

SAA7113H 是飞利浦公司的视频解码芯片,能够将模拟视频信号解码,输出 VPO 标准的数字信号。SAA7113H 可同时输入四路视频信号,通过 IIC 总线读写内部寄存器。本设计使用 FPGA 采集 SAA7113H 输出的标准 ITU 656、YUV 4:2:2 格式,对图像滤波和边缘检测,供跟踪算法使用。

2.4 本章总结

本章介绍了视觉稳定云台的结构组成以及重要器件的选取,从总体上把握,设计云台的每个细节,为以后的工作提供硬件平台。对现有的目标跟踪算法进行分析并分类,提出适合本设计的目标跟踪方法。

第3章 视觉稳定云台系统模型建立

视觉稳定云台的稳定控制主要是为了给摄像机提供稳定的工作平台，视轴稳定是目标跟踪的关键技术，其核心是角运动敏感器件陀螺，以其敏感到的平台姿态扰动，反馈控制平台稳定，使摄像机的视轴方向相对惯性空间稳定，以保证可靠的目标跟踪。本章旨在分析视觉稳定云台系统各部分的配置和动力学理论，建立系统数学模型，分析影响精度的因素，为控制方法的设计提供理论基础。

3.1 系统坐标系及视轴偏差角

3.1.1 坐标系

无人机视觉稳定云台系统涉及多种坐标系，尤其摄像机成像涉及不同坐标系之间的变换，如图 3.1 所示：

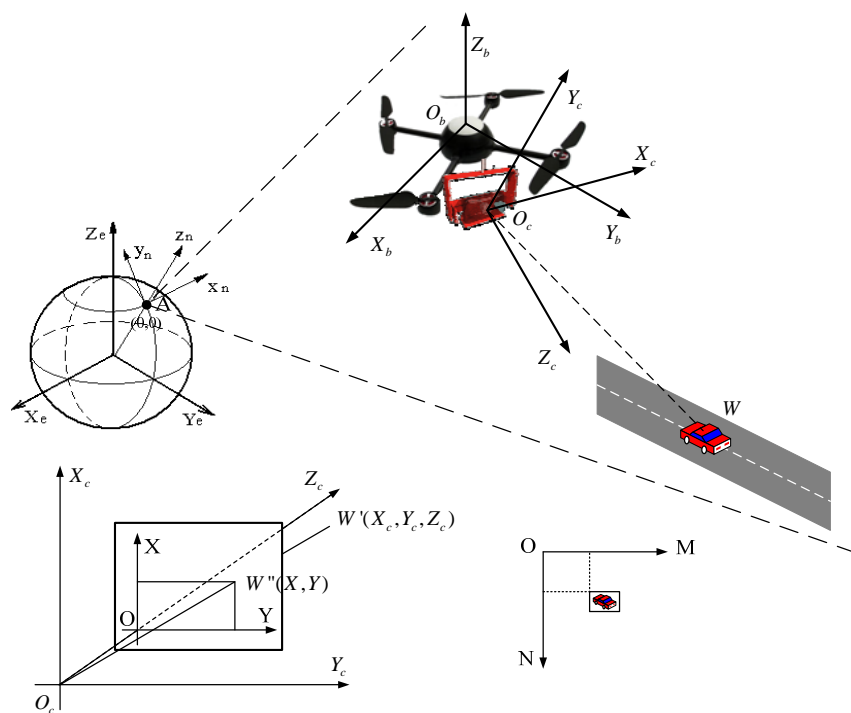


图 3.1 视觉稳定云台坐标系

图 3.1 中各坐标系定义如下：

地球坐标系 $O_e X_e Y_e Z_e$ ，其定义为：地球中心为原点 O_e ，坐标轴分别表示为 X_e 、 Y_e 、 Z_e 。 Z_e 轴为地球自转轴， X_e 轴为赤道平面与格林尼治子午面的交线， Y_e 轴与 X_e 、 Z_e 轴成右手坐标系。

地理坐标系 $O_n X_n Y_n Z_n$ ，其定义为：无人机中心在地球表面的投影点为原点， X_n 、 Y_n 、 Z_n 为三根坐标轴。 Z_n 轴垂直于当地水平面指向天， X_n 水平指东， Y_n 轴水平指北。

机体坐标系 $O_b X_b Y_b Z_b$ ，确定无人飞行器在空中的姿态，其定义为：机体质量中心为原点， Y_b 轴与无人机纵轴重合指向头部， X_b 轴与无人机横轴重合指向右方， Z_b 轴与 X_b 、 Y_b 轴构成右手直角坐标系，指向上方^[62]。

摄像机坐标系 $O_c X_c Y_c Z_c$ ，其定义为：原点位于摄像机光心， Z_c 轴与摄像机光轴重合， Y_c 垂直指向上方，与 Z_c 组成俯仰运动平面，由右手坐标系确定 X_c 。

图像物理坐标系 OXY ，即透镜成像平面，其定义为：成像平面被光轴穿过的点为原点， X 轴平行于 X_c 轴， Y 轴平行于 Y_c 轴。

图像像素坐标系 OMN ，存储图像时计算坐标系，单位为像素，其定义为：图像的左上角为坐标原点， OM 轴与 X 轴平行， ON 轴与 Y 轴平行^[63]。

3.1.2 摄像机成像模型

由透镜成像原理，物距 u 、焦距 f 和像距 v 有下列关系：

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{u} + \frac{1}{v} \quad (3.1)$$

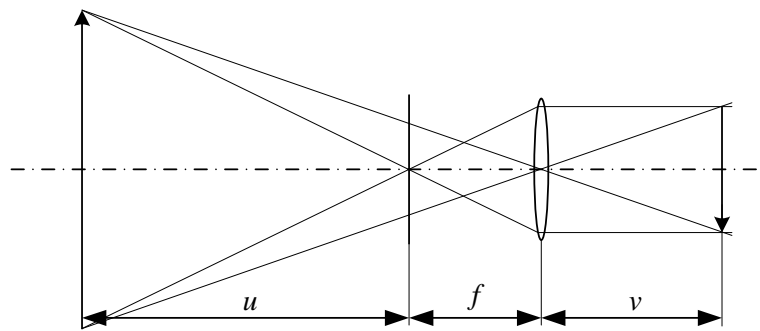


图 3.2 透镜成像

实际应用时，物距远远大于镜头焦距，可用小孔成像模型^[60]来简化摄像机成像， OO_c 为焦距， W'' 为物点 W' 在成像平面上的像，如图 3.3 所示。

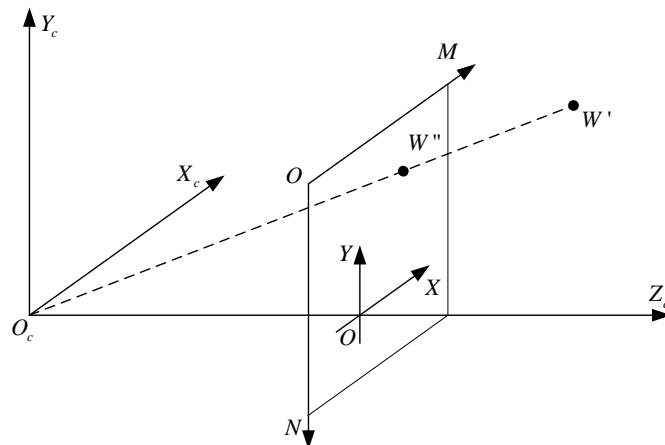


图 3.3 小孔成像模型

3.1.3 视轴偏差角

视觉稳定云台要求被跟踪目标始终处在图像中心，即目标参考点位于光轴上。当目标偏离光轴，则产生偏差角，单目摄像机将三维景物投影为二维图像，丢失了目标的一维信息，仅根据二维信息无法准确的求得偏差角，但是通过小孔成像模型可以简化求得目标偏差，如下图所示，同时在第六章的仿真实验中对其验证。

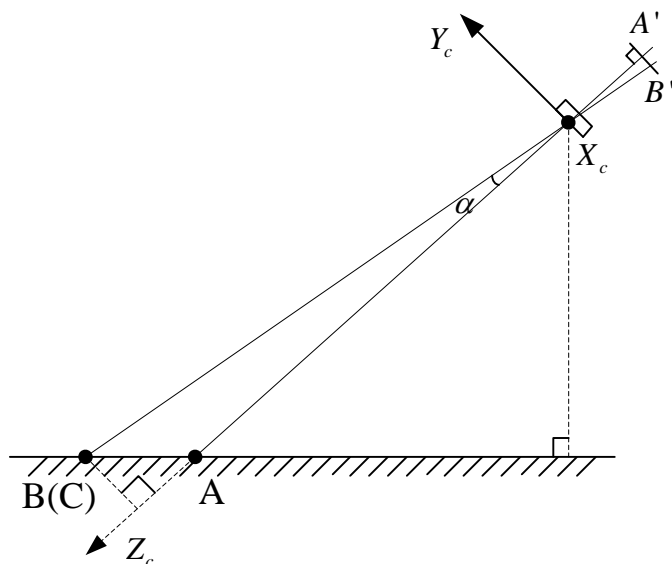


图 3.4 视轴偏差角

由于俯仰轴和方位轴结构一样，求取俯仰偏差角和方位偏差角的原理一致，现仅分析俯仰偏差角。

A 点为摄像机光轴与地面的交点，在图像像素坐标系内为 A' 点，假设初始时刻目标位于 A 点，当目标运动到 C 点时(B 点为 C 点在俯仰运动平面 Y_cZ_c 的投影点)，B 点在摄像机图像像素坐标系的映射点为 B' 。实际俯仰偏差角为 α ，本设计中将 A' 和 B' 像素之差作为俯仰偏差角，以此作为控制器输入量，从而达到目标跟踪的目的。

3.2 双轴云台运动方程的建立

3.2.1 稳定云台坐标

图 3.5 所示为双轴视觉稳定云台坐标示意图，云台由内外两个框架组成，外框架为方位框，内框架为俯仰框，方位框通过支撑轴 Z 固定在无人机上，俯仰框由支撑轴 X 固定在方位框上，X 和 Z 为相互垂直的轴系，摄像机固定在俯仰框平台上，其视轴方向与 Y 轴平行。

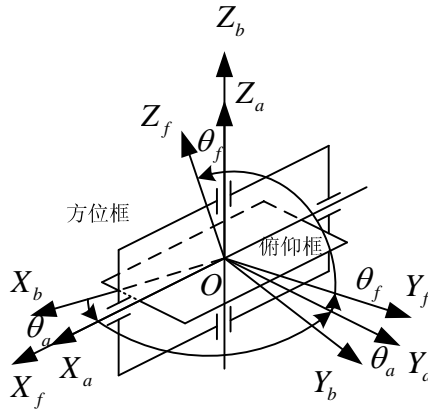


图 3.5 双轴稳定云台坐标示意图

$OX_bY_bZ_b$ 为机体坐标系, $OX_fY_fZ_f$ 为俯仰框坐标, $OX_aY_aZ_a$ 为方位框坐标, $OX_aY_aZ_a$ 绕 OZ_a 轴的转角 θ_a 是方位角, $OX_fY_fZ_f$ 绕 OX_f 轴转角 θ_f 是俯仰角。摄像机安装在俯仰框 $OX_fY_fZ_f$ 上, 视轴与 OY_f 平行^[20]。

3.2.2 扰动补偿方程

当无人机相对惯性空间有扰动角速度 ω_b 时, 通过框架传动到云台方位框和俯仰框, 致使视轴不稳定。通过运动学分析视轴稳定的机理, 得出隔离载体扰动的补偿方程。

当无俯仰框作用时, 无人机坐标系与方位框坐标系的相对关系如下图所示。

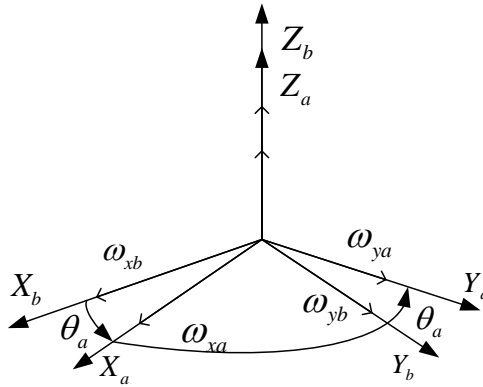


图 3.6 无人机坐标系与方位框坐标系的相对关系

无人机扰动角速度 ω_b 分解到各坐标轴的角速度分量分别为 ω_{xb} 、 ω_{yb} 和 ω_{zb} ; 通过坐标转换得沿方位框坐标轴的角速度分量 ω_{xa} 、 ω_{ya} 和 ω_{za} :

$$\begin{cases} \omega_{xa} = \omega_{xb} \cos \theta_a + \omega_{yb} \sin \theta_a \\ \omega_{ya} = -\omega_{xb} \sin \theta_a + \omega_{yb} \cos \theta_a \\ \omega_{za} = \omega_{zb} \end{cases} \quad (3.2)$$

俯仰框和方位框的相对坐标关系如下图所示:

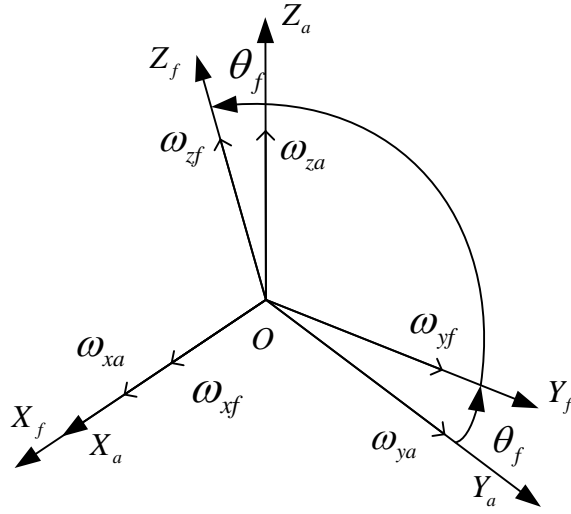


图 3.7 俯仰框与方位框的坐标关系

经过坐标转换得俯仰框坐标轴的角速度分量 ω_{xf} 、 ω_{yf} 和 ω_{zf} 为:

$$\begin{cases} \omega_{xf} = \omega_{xa} \\ \omega_{yf} = \omega_{ya} \cos \theta_f + \omega_{za} \sin \theta_f \\ \omega_{zf} = -\omega_{ya} \sin \theta_f + \omega_{za} \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.3)$$

将式(3.2)代入式(3.3)得:

$$\begin{cases} \omega_{xf} = \omega_{xb} \cos \theta_a + \omega_{yb} \sin \theta_a \\ \omega_{yf} = -\omega_{xb} \sin \theta_a \cos \theta_f + \omega_{yb} \cos \theta_a \cos \theta_f + \omega_{zb} \sin \theta_f \\ \omega_{zf} = \omega_{xd} \sin \theta_a \sin \theta_f - \omega_{yb} \cos \theta_a \sin \theta_f + \omega_{zb} \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.4)$$

式(3.4)表示无人机运动在俯仰框坐标轴上的分量。

稳定控制系统实际工作时, 输出补偿角速度 $\dot{\theta}_a$ 和 $\dot{\theta}_f$, 它们在俯仰框坐标系的分量为:

$$\begin{cases} \omega'_{xf} = \dot{\theta}_f \\ \omega'_{yf} = \dot{\theta}_a \sin \theta_f \\ \omega'_{zf} = \dot{\theta}_a \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.5)$$

将式(3.5)和式(3.4)叠加得:

$$\begin{cases} \omega_x = \omega_{xf} + \omega'_{xf} = \dot{\theta}_f + \omega_{xb} \cos \theta_a + \omega_{yb} \sin \theta_a \\ \omega_y = \omega_{yf} + \omega'_{yf} = \dot{\theta}_a \sin \theta_f - \omega_{xb} \sin \theta_a \cos \theta_f + \omega_{yb} \cos \theta_a \cos \theta_f + \omega_{zb} \sin \theta_f \\ \omega_z = \omega_{zf} + \omega'_{zf} = \dot{\theta}_a \cos \theta_f + \omega_{xd} \sin \theta_a \sin \theta_f - \omega_{yb} \cos \theta_a \sin \theta_f + \omega_{zb} \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.6)$$

当满足 $\omega_x = 0$ 且 $\omega_z = 0$ 时，就实现了视轴稳定，如下式所示：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_f + \omega_{xb} \cos \theta_a + \omega_{yb} \sin \theta_a = 0 \\ \dot{\theta}_a \cos \theta_f + \omega_{xd} \sin \theta_a \sin \theta_f - \omega_{yb} \cos \theta_a \sin \theta_f + \omega_{zb} \cos \theta_f = 0 \end{cases} \quad (3.7)$$

则补偿角速度方程为：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_f = -\omega_{xb} \cos \theta_a - \omega_{yb} \sin \theta_a \\ \dot{\theta}_a = -\omega_{xd} \sin \theta_a \tan \theta_f + \omega_{yb} \cos \theta_a \tan \theta_f + \omega_{zb} \end{cases} \quad (3.8)$$

本设计中，安装在俯仰框上的集成三轴陀螺传感器分别测量 OZ_f 轴的 ω_{zf} 和 OX_f 轴的 ω_{xa} ，由式(3.2)和式(3.4)得：

$$\begin{cases} \omega_{xf} = \omega_{xa} = \omega_{xb} \cos \theta_a + \omega_{yb} \sin \theta_a \\ \omega_{zf} = \omega_{xb} \sin \theta_a \sin \theta_f - \omega_{yb} \cos \theta_a \sin \theta_f + \omega_{zb} \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.9)$$

将式(3.9)代入式(3.8)得：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_f = -\omega_{xa} \\ \dot{\theta}_a = -\omega_{zf} / \cos \theta_f \end{cases} \quad (3.10)$$

三轴集成陀螺测量俯仰轴向的 ω_{xa} 和方位轴向的 ω_{zf} ，稳定回路控制电机绕 OZ_a 轴和 OX_f 轴以 $\dot{\theta}_a$ 和 $\dot{\theta}_f$ 转动，当满足式(3.10)时，可隔离无人机的角运动干扰，从而实现视轴稳定^[64]。

3.2.3 双轴稳定方案缺陷

通过上述分析，明显看出无人机运动在横滚轴向的干扰没有进行隔离，即 $\omega_y = \omega_{yf} + \omega'_{yf} = \dot{\theta}_a \sin \theta_f - \omega_{xb} \sin \theta_a \cos \theta_f + \omega_{yb} \cos \theta_a \cos \theta_f + \omega_{zb} \sin \theta_f \neq 0$ ，因此当载体运动产生横滚扰动时，云台不能抵消其扰动，造成视频图像旋转，这就是双轴稳定云台固有的原理缺陷^[61]。如果要解决这个问题就需要增加一个横滚控制环，建立三轴稳定云台，通过横滚轴的稳定控制回路来补偿 ω_y ，实现图像稳定。

3.3 稳定系统数学模型

通过 3.2 节的分析可知，单轴的视轴稳定环原理如图所示：

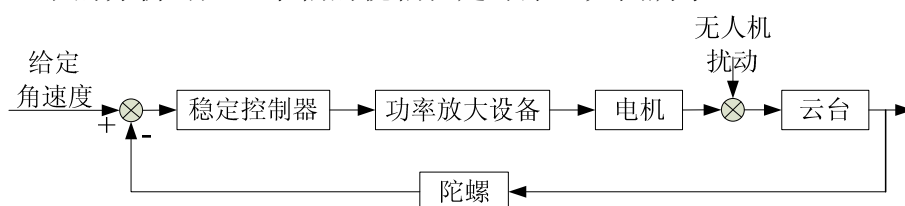


图 3.8 视轴稳定环

结合图像处理和目标跟踪控制得到视觉稳定云台系统控制回路原理图，如下图所示：

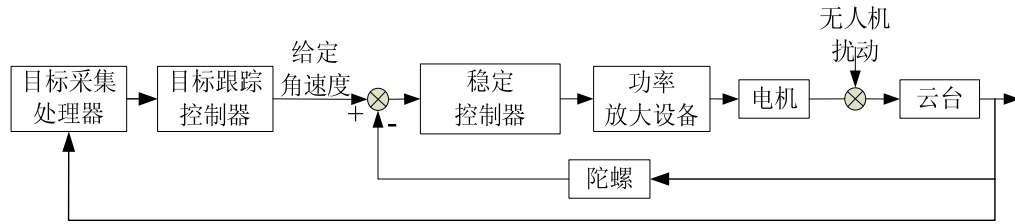


图 3.9 视觉稳定云台控制回路

3.3.1 驱动装置

本设计的驱动装置采用经改造的舵机，其模型可用直流力矩电机模型代替，下图是其等效的电路图。

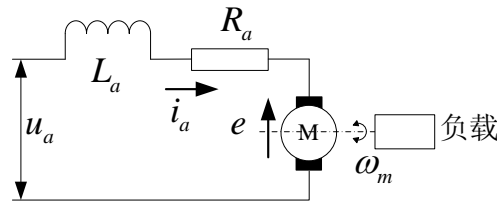


图 3.10 驱动电机等效电路图

规定符号及意义： u_a 为控制电压； L_a 为电枢绕组电感； R_a 电枢绕组电阻； ω_m 为电机角速度； e 为由 ω_m 引起的反电势； J 为平台台体的转动惯量和转子转动惯量的总和； $\tau_e = L_a / R_a$ 为电机电磁时间常数； τ_m 为电机的机电时间常数； k_m 为电机扭矩系数； k_e 为电机的反电势系数； M_m 为电机输出的扭矩。

根据电路回路原理可知

$$u_a - e = i_a R_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3.11)$$

上式的拉氏变换形式为：

$$u_a(s) = e(s) + R_a i_a(s) + L_a s i_a(s) \quad (3.12)$$

$$i_a(s) = \frac{u_a(s) - e(s)}{sL_a + R_a} = \frac{1}{R_a} \frac{u_a(s) - e(s)}{\tau_e s + 1} \quad (3.13)$$

由 i_a 产生的电机输出扭矩为：

$$M_m(s) = k_m i_a(s) = \frac{k_m}{R} \frac{u_a(s) - e(s)}{\tau_e s + 1} \quad (3.14)$$

其中反电势是由电机旋转引起的

$$e(s) = k_e \omega_m(s) \quad (3.15)$$

由动量矩得平台负载传递函数：

$$\frac{\omega_m(s)}{M_m(s)} = \frac{1}{Js} \quad (3.16)$$

综合上式得：

$$\frac{M_m(s)}{u_a(s) - k_e \omega_m(s)} = \frac{k_m}{R_a} \frac{1}{\tau_e s + 1} \quad (3.17)$$

以上可得平台负载及电机的数学模型：

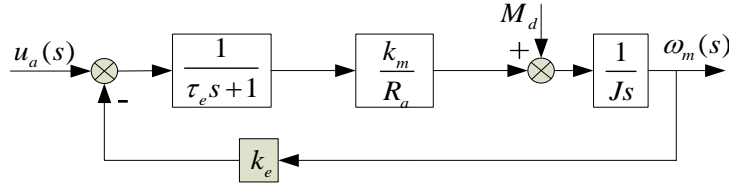


图 3.11 力矩电机模型图

在 $M_d=0$ 时，电机的传递函数为：

$$\frac{\omega_m(s)}{u_a(s)} = \frac{\frac{k_m / R_a J}{s(k_e s + 1)}}{1 + \frac{k_e k_m / R_a J}{s(\tau_e s + 1)}} = \frac{1/k_e}{\frac{R_a J}{k_e k_m} \tau_e s^2 + \frac{R_a J}{k_e k_m} s + 1} = \frac{1/k_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + 1} \quad (3.18)$$

3.3.2 PWM 功放

云台稳定系统的功率驱动模块采用 PWM 方式驱动的 H 型双极全桥电路，可作为一个滞后的比例放大环节，滞后时间为 T_p ，则 PWM 功放的传递函数为：

$$G_p(s) = k_p e^{-T_p s} \quad (3.19)$$

由于本设计的 PWM 驱动频率远远大于电机的截止频率，滞后可以省略，上式简化为单纯的放大环节：

$$G_p(s) = k_p \quad (3.20)$$

3.3.3 陀螺

陀螺敏感负载轴的转动角速度，采用集成的陀螺传感器，输出对应轴角速度的数字信号，供单片机采样，所以用一个比例环节作为陀螺的传递函数：

$$G_g(s) = k_g \quad (3.21)$$

3.3.4 视觉跟踪设备

视觉跟踪设备是由摄像机和图像处理模块组成的，根据 3.1 节的分析，当目标发生运动时，偏离摄像机光轴而造成偏差。将目标在图像像素坐标系的像素差作为输入量控制云台转动，抵消偏差，具有比例环节作用。图像采集和处理非常费时间，从采样到输出控制量有一定的视觉延迟，具有时滞环节作用，本设计图像处理需要一帧来采集图像，一帧来处理图像，一帧的时间是 20ms，所以滞后时间为 40ms。其传递函数为：

$$G_V(s) = k_V e^{-T_V s} \quad (3.22)$$

综合可得视觉稳定云台的数学模型为：

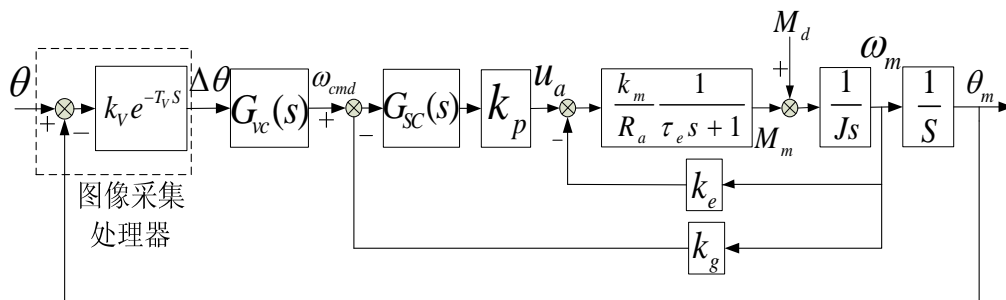


图 3.12 视觉稳定云台的数学模型

上图中， $\Delta\theta$ 为图像处理器得出偏差信号； ω_{cmd} 为给定角速度； $G_{SC}(s)$ 为视轴稳定环控制器； $G_{VC}(s)$ 为目标跟踪控制器。

3.4 系统精度影响因素

以上对视觉稳定系统的建模，省去了许多影响因素，使系统在一个理想的环境下工作，简化的系统模型建立基本能够满足视觉稳定系统控制的设计要求。但是在实际工作中，存在诸多不确定的因素，影响系统的稳定效果。对于高精度和高性能系统，简单的建模已经不能满足要求，必须考虑影响系统性能的各种因素。

3.4.1 视轴稳定的影响因素

- (1) 机械结构。主要包括云台框架轴系的不正交性，框架质量不均衡，安装误差等。
- (2) 载体振动。主要是无人机飞行时电机转动引起的高频振动。
- (3) 摩擦干扰。主要包括云台框架连接处的摩擦和电机转动的摩擦。
- (4) 器件噪声。最主要的是陀螺漂移，还包括电子线路的噪声、电机驱动的非线性输出等。

3.4.2 目标跟踪的影响因素

(1) 摄像机误差。主要包括摄像机分辨率、信噪比和线性度，还有摄像机透镜的焦距，光学偏差等。

(2) 目标特性。主要是目标的移动速度、旋转形变和距离等。

(3) 环境变化。主要有光照强度，背景复杂度等。

(4) 算法误差。包括计算时间的迟滞，图像处理的精确度等。

3.5 本章总结

本章首先介绍视觉稳定云台系统涉及的坐标系，结合坐标系和摄像机成像原理重点得出视轴偏差角的求取方法，在双轴云台框架坐标系的基础上推导出隔离无人机扰动的补偿方程，解决了载体运动对视轴稳定的影响，为系统设计提供依据。在此基础上，分析系统各个环节的内在联系，建立系统数学模型，同时还介绍了影响系统精度的各项因素，为下一步控制器的设计和研究奠定基础。

第 4 章 控制系统设计及漂移补偿算法

视觉稳定云台是在视轴稳定的基础上，保证目标始终处在摄像机光轴上，即目标在图像的中心。实际应用中，视觉云台系统不可避免要受到外界和载体的多种干扰，这些干扰是不可预测的。随着时间的推移，这些干扰将导致系统的稳定性和精度严重下降，无法完成目标的跟踪，所以有必要设计可靠的伺服控制器克服干扰的影响，提高整个系统的性能。

本章在上一章建立的系统模型基础上，分析系统时域和频域的稳定性和精度，通过校正网络提高系统性能。针对传统 PID 控制的缺陷，设计模糊 PID 控制器对视觉稳定云台进行控制，仿真并实现。同时，对影响系统性能的陀螺漂移采用算法补偿并仿真。

4.1 视轴稳定环控制设计

4.1.1 稳定环结构分析

双轴视觉云台的俯仰框和方位框通过引入陀螺角速度信号隔离载体扰动，使摄像机视轴能够稳定在预置角度，并且相对惯性空间稳定而与载体的运动无关。以目标跟踪控制器的输出作为稳定环的指令角速度信号，与陀螺测得的对应轴向角速度信号相比得到角速度误差，经过视轴稳定环控制器输出给电机驱动器。下图为稳定环结构图：

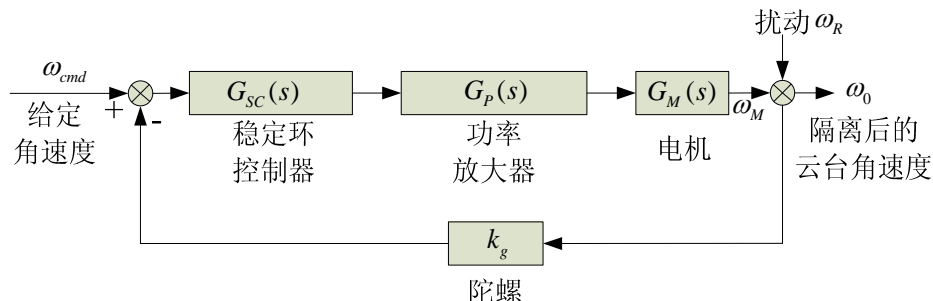


图 4.1 视轴稳定环结构图

由上图可知，稳定环作为视觉稳定控制回路的重要一个环节，不仅要求其能够隔离载体和外部的扰动，使摄像机视轴相对惯性空间保持稳定，还必须满足一定动态性，能按照给定角速度转动。

理想情况下，当云台给定角速度 ω_{cmd} 为 0 时，由于存在载体扰动角速度 ω_R ，稳定环控制器驱动电机以 $\omega_M = -\omega_R$ 角速度转动，从而隔离扰动保持云台稳定，即 $\omega_0 = 0$ 。由图 4.1 得：

$$\frac{\omega_0(s)}{\omega_R(s)} = \frac{1}{1 + k_g G_{SC}(s) G_P(s)} \quad (4.1)$$

陀螺的标度因数 k_g 及电机驱动器 $G_p(s)$ 的增益是有一定限制的, 加入校正环节, 就可以保证稳定环有足够大的附加增益, 系统性能更好^[18]。但是开环增益的增大又会造成系统动态性能的下降, 因此需要设计合适的校正环节来改善系统稳态和动态性能。

4.1.2 稳定环校正设计

本系统采用经典控制理论设计, 同时提高系统的动态和稳态性能。

4.1.2.1 未校正的稳定环特性

根据上一章系统的数学模型, 得到稳定环的开环传递函数为:

$$G_w(s) = \frac{k_p / k_e}{\tau_m \tau_e s^2 + \tau_m s + k_p / k_e + 1} \quad (4.2)$$

以俯仰环为例, 经过简化和参数确定得到

$$G_w = \frac{2.13}{5.6s^2 + 1.02s + 0.07} \quad (4.3)$$

在 Bode 图中, 对数频率特性的低频区反映闭环系统的稳态特性, 中频区反映系统的相对稳定性, 高频区反映系统的抗干扰性。因此, 校正的主要目的是中低频区获得比较高的开环增益和满意的相对稳定性, 并有足够的带宽, 以保证一定的相角裕度, 而高频区要使增益尽可能地衰减, 以抑制高频噪声。

通过仿真得到开环幅频、相频特性曲线如下图所示:

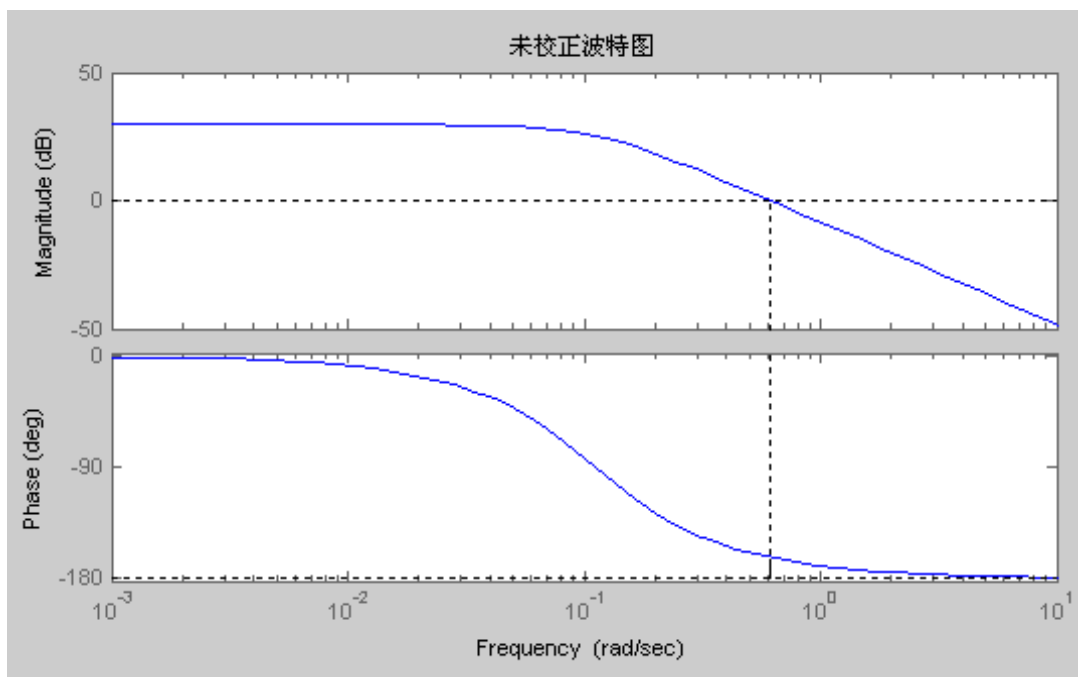


图 4.2 未校正稳定环特性曲线

由图得到未校正稳定环的低频增益只有 29.7dB, 相角裕度也仅仅 17°, 无法满足稳

定环系统的要求。

4.1.2.2 比例超前校正

为了满足低频增益的要求，加入比例校正环节 k ，把幅频特性抬高，同时减小了相角裕度，再利用超前校正网络进行修正。

超前校正网络的传递函数为：

$$G_F(s) = \frac{1+aTs}{1+Ts} \quad (a > 1) \quad (4.4)$$

其特性曲线如图 4.3 所示，最大超前相位为：

$$\varphi_m = \arcsin \frac{a-1}{a+1} \quad (4.5)$$

最大超前相角的发生频率为

$$\omega_m = \frac{1}{\sqrt{a}T} \quad (4.6)$$

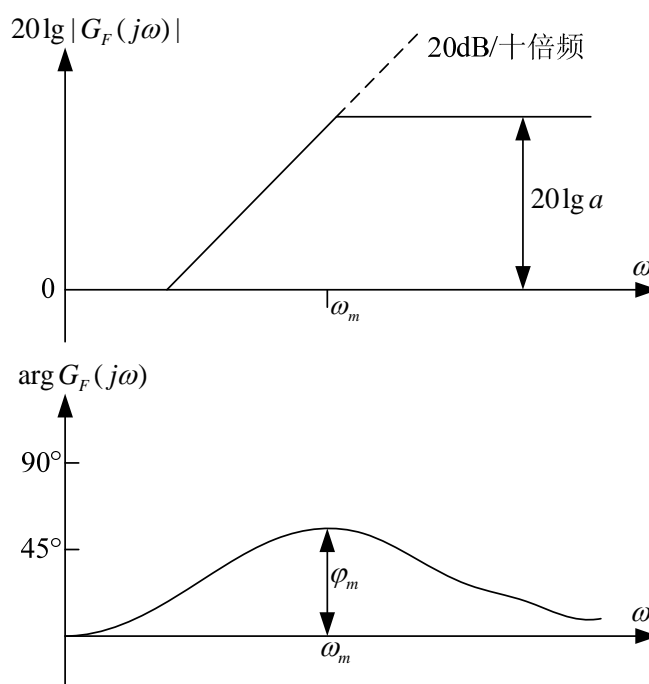


图 4.3 超前校正网络特性曲线

通过多次 Matlab 仿真和计算，确定比例 K 为 8、 T 为 0.053、 a 为 29.4，得出校正网络的传函为

$$G_F = 8 \times \frac{1.558s+1}{0.053s+1} \quad (4.7)$$

4.1.2.3 校正后的稳定环特性

稳定环校正后的幅频、相频特性如下图所示：

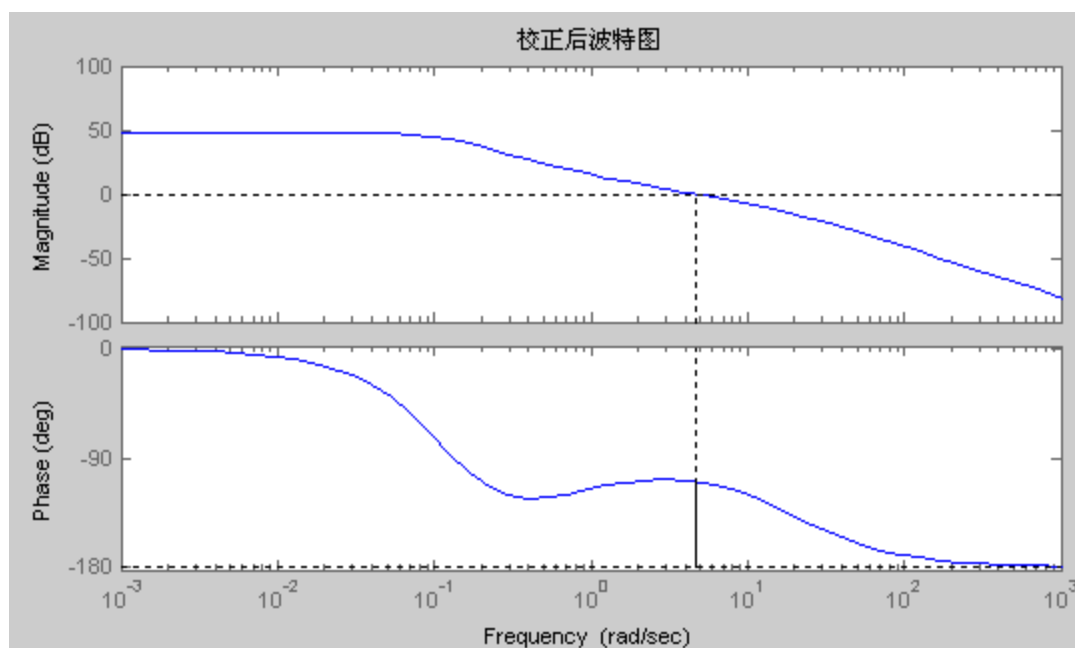


图 4.4 校正后的幅频、相频特性

由图可知，校正后的稳定环低频增益达到 47.7dB，相角裕度也提高到 70.5°。下图是校正前后稳定环单位阶跃响应曲线的对比图。

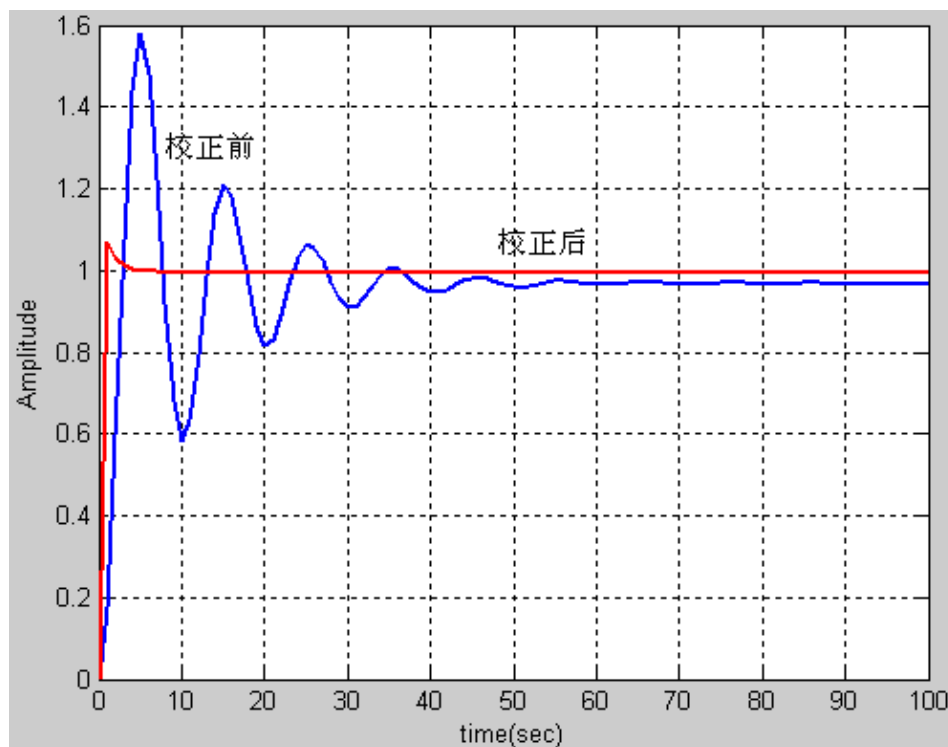


图 4.5 校正前后阶跃响应对比曲线

由图可以看出，校正后的稳定环单位响应曲线上升时间变短，超调量减小，调节时

间变短，无稳态误差。因此经过比例超前校正后，系统的稳态性能和动态性能大幅提高。

4.2 视觉稳定系统控制方法

在视轴稳定环的基础上，反馈图像处理得到目标偏差角作为位置环，实现实时跟踪目标的功能。位置环是系统的最外环，为了得到更好的控制精度和可靠的稳定性，使用模糊 PID 控制器进行视觉云台系统的伺服控制。

4.2.1 模糊 PID 控制器

分析传统 PID 控制器和模糊 PID 控制器的结构，针对各自的优缺点设计适合本系统的控制器。

4.2.1.1 PID 控制器

PID 控制器包括一个比例环节(P)、一个积分环节(I)和一个微分环节(D)，PID 控制器简单且易于实现，受到广泛使用，输入输出关系如下：

$$u(t) = k_p(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{de(t)}{dt}) \quad (4.8)$$

其传递函数为：

$$G_{PID}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = k_p(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s) \quad (4.9)$$

其中 k_p 为比例系数； k_i 为积分时间常数； k_d 为微分时间常数。

实际应用时，为了适应计算机的特点需要离散化处理，即数字 PID 控制。由上式得数字 PID 算法表达式：

$$u(kT) = k_p e(kT) + K_i \sum_{j=0}^k e(kT) + k_d [e(kT) - e((K-1)T)] \quad (4.10)$$

式中：

$u(kT)$ --- kT 时刻算法的输出量；

$e(kT)$ --- kT 时刻输入的偏差量；

$e((K-1)T)$ --- $(K-1)T$ 时刻输入的偏差量；

$k_i = k_p(T/T_i)$ --- 积分系数；

k_p --- 比例系数；

$k_d = k_p(T_d/T)$ --- 微分系数。

数字 PID 利于单片机程序编写和参数调节，从而实现视觉稳定云台反馈控制。

4.2.1.2 模糊控制

传统 PID 简单易行，具有较好的控制精度和稳定性，但是对于系统的非线性、不确定或时变环节，如电机死区、饱和以及结构谐振等，系统出现严重的畸变影响稳定性。因此，仅使用传统 PID 控制不能实现系统的高稳定性、高精度和快速性等要求。

模糊控制(Fuzzy Control)是近些年来发展很快的简单且实用的控制方法，是模糊理论在控制技术上的应用，适用于被控过程没有数学模型或很难建立数学模型，可以适应系统的非线性、不确定和参数时变特性，具有较好的动态响应特性。但是模糊控制也有其自身的缺点，对静态误差无能为力，这取决于模糊量化等级的数量，量化等级越多，静态误差越小，但同时计算量变大，实时性不能保证。

4.2.1.3 模糊 PID 控制器

鉴于模糊控制和 PID 控制的强互补性，本设计采用模糊 PID 控制算法以满足系统对快速性、平稳性和高精度的要求，其结构如图 4.6 所示。

将图像处理得到的目标偏差角和偏差角的变化率同时输入到模糊推理机制和 PID 控制器中，在模糊推理中，由事先制定好的模糊规则库推理得到 PID 控制器需要的控制参数 k_p ， k_i 和 k_d ^[65]。再由 PID 控制器得到输出量去控制云台转动，抵消偏差角，最终实现精确稳定的跟踪。

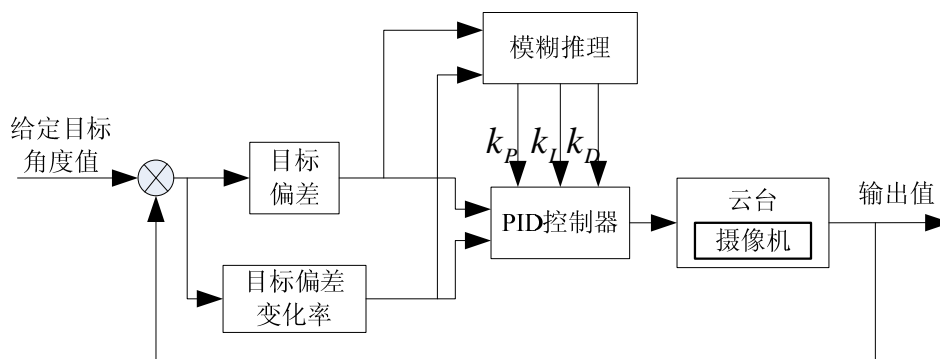


图 4.6 模糊 PID 控制算法结构

4.2.2 视觉云台系统模糊 PID 控制的设计

根据模糊 PID 控制算法结构及视觉云台系统稳定控制规律，设计输入输出隶属度函数、模糊规则表和解模糊化算法。

4.2.2.1 模糊 PID 控制仿真

使用 Simulink 设计模糊 PID 控制器，对第三章得到的系统传递函数进行仿真，下表是针对 k_p ， k_i 和 k_d 三个参数分别制定的模糊控制表。

表 4.1 k_p 的模糊规则表

$\begin{array}{c} ec \\ k_p \\ e \end{array}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PB	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NS	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

表 4.2 k_i 的模糊规则表

$\begin{array}{c} ec \\ k_i \\ e \end{array}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NS	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZO	ZO	PM	PM	PM	PB	PB

表 4.3 k_D 的模糊规则表

$\begin{array}{c} ec \\ k_D \\ e \end{array}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO

PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PM	PS	PS	PB

依据规则表，对 k_p ， k_i 和 k_d 三个参数分别进行模糊推理的建立，每个模糊规则表都是两输入单输出，49 条规则， e 和 ec 为输入， k_p ， k_i 和 k_d 为输出。视觉云台模糊 PID 控制系统的 Simulink 仿真程序如下图：

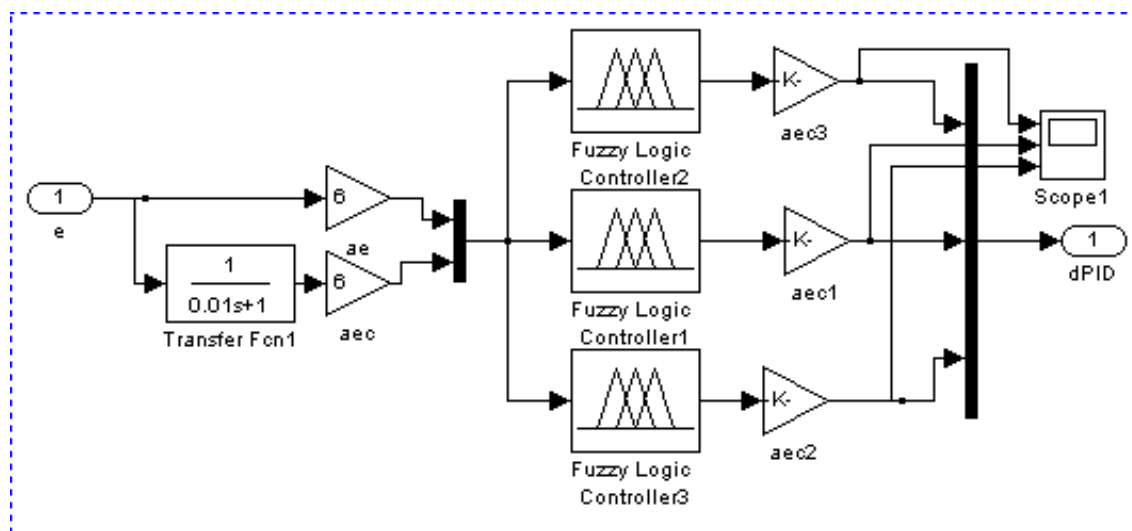


图 4.7 模糊控制的框图

分别使用模糊 PID 和传统 PID 对视觉云台系统控制，观察单位阶跃响应的曲线，如下图所示：

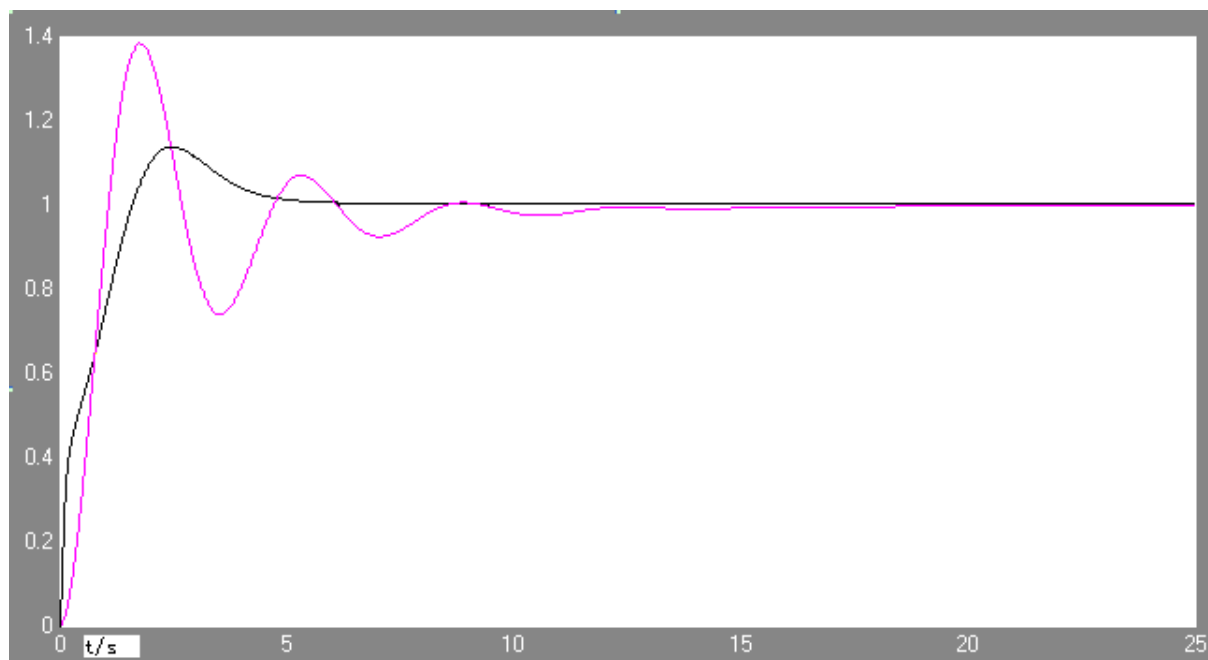


图 4.8 阶跃响应对比曲线

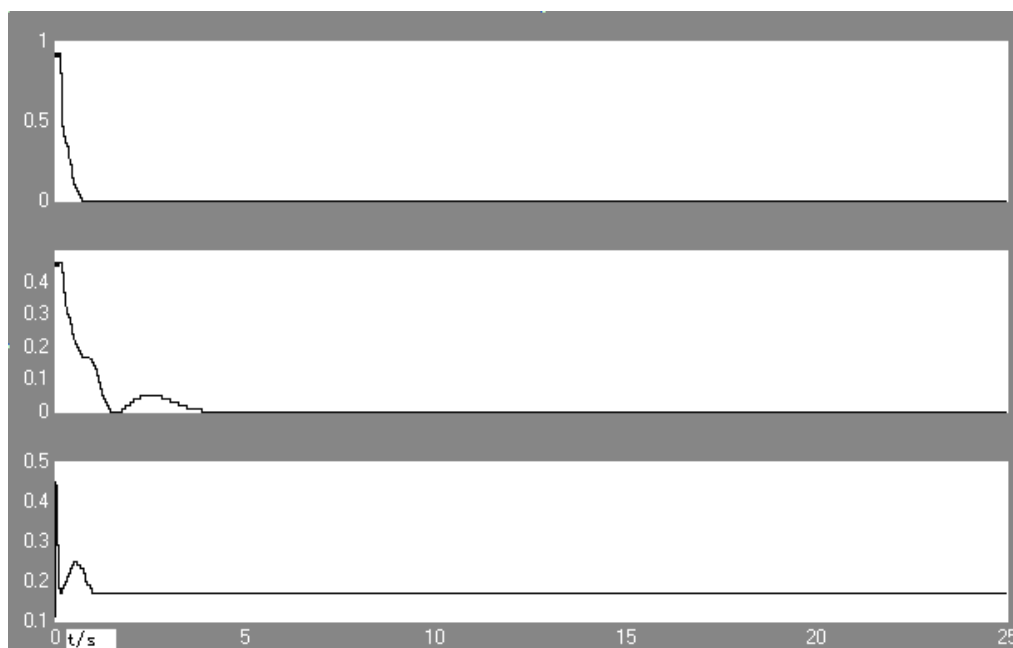


图 4.9 模糊 PID 控制 k_p ， k_i 和 k_d 变化曲线

由图可知，模糊 PID 控制的单位阶跃响应比传统 PID 控制上升时间变短，超调量减小，调节时间变短，随着 e 及 ec 的变化及时调整算法的参数，使控制效果更佳。

4.2.2.2 MC9S12 的模糊控制实现

在仿真的基础上，由云台稳定控制芯片 MC9S12DG128 来实现模糊 PID 控制算法。

MC9S12 系列的单片机具有独特的模糊控制指令 mem、rev、revw 和 wav，整体算法使用汇编语言编写，但像高级语言指令一样允许中断响应，中断后可以继续运行，避免了使用复杂的 C 语言程序去实现模糊算法，并且运行速度快，可靠性高^[65]。

运算过程如下所示：

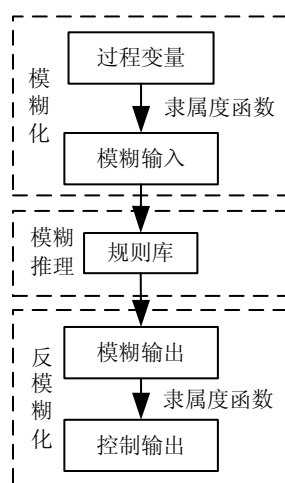


图 4.10 MC9S12 单片机模糊控制算法过程

4.3 陀螺漂移补偿

视觉稳定云台的不稳定性由诸多因素造成，其中陀螺漂移对稳定环的影响最大，尤其在没有标定目标前或者单纯空中视频监控时，即没有位置环反馈时，云台的稳定完全依靠陀螺敏感的偏转角速度来控制稳定环工作。因此，陀螺漂移的合理补偿就成为提高云台稳定性和精度的关键。

4.3.1 Kalman 滤波补偿

卡尔曼滤波是一种线性最小方差估计，它把一个变量的两个估值进行组合以形成一个加权平均值，具有递推性。按照已知的运动方程更新前一个最优估值可以得到一个估值，而另一个估值则通过测量值获得，在视觉云台系统中，第一个估值直接由陀螺提供，第二个估值是测量值，由加速度计提供。其常规方法描述如下：

$$\text{状态一步预测: } \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (4.11)$$

$$\text{状态估计: } \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}] \quad (4.12)$$

$$\text{一步预测误差阵: } P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + T_{k,k-1} Q_{k-1} T_{k,k-1}^T \quad (4.13)$$

$$\text{增益矩阵: } K_k = P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (4.14)$$

$$\text{估计误差方阵: } P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} [I - K_k H_k]^T + K_k R_k K_k^T \quad (4.15)$$

其中 X_k 为系统状态序列， Z_k 为系统观测序列， H_k 为观测矩阵， $\Phi_{k,k-1}$ 为状态转移矩阵， Q_k 为系统过程噪声， R_k 为系统观测噪声。由初值 \hat{X}_0 、 P_0 及 k 时刻的观测值 Z_k ，递推计算得出 k 时刻的状态估计值 \hat{X}_k ($k=1, 2, 3, \dots$)。

4.3.2 加速度计补偿法

本设计中引入加速度计的值，利用加速度计精度高、误差不累积的特点。云台系统中，安装在俯仰框上的加速度计只能求得云台的俯仰角，对于偏航角可以考虑采用磁航向仪，鉴于本系统工作时无无人机的偏航基本不变，只考虑俯仰轴向的陀螺补偿。

当载体无加减速运动且云台水平时，即俯仰框坐标系 z_f 轴与地理坐标系 z_n 轴重合，加速度计 y_{Acc} 轴输出为 0；当载体发生运动，云台不水平，加速度计 y_{Acc} 轴输出值就不为 0，假设为 Y_A ，利用三角函数可得俯仰偏转角度为：

$$\theta_{Acc} = -\arcsin(Y_A) \times 180 / \pi \quad (4.11)$$

将此角度和陀螺信号积分得到俯仰角度 θ_{Gyro} 比较，进行一定限制和缩放得到补偿角度，校正陀螺漂移。

当载体持续加减速运动时，加速度计输出的信号包含了载体的加速度信息，无法提取出云台偏转角度，不能进行补偿，但对于载体的瞬时加减速和振动，可以通过数据滤波和总加速度值阈值限制进行去除，仍然可以补偿。下图为补偿算法流程图。

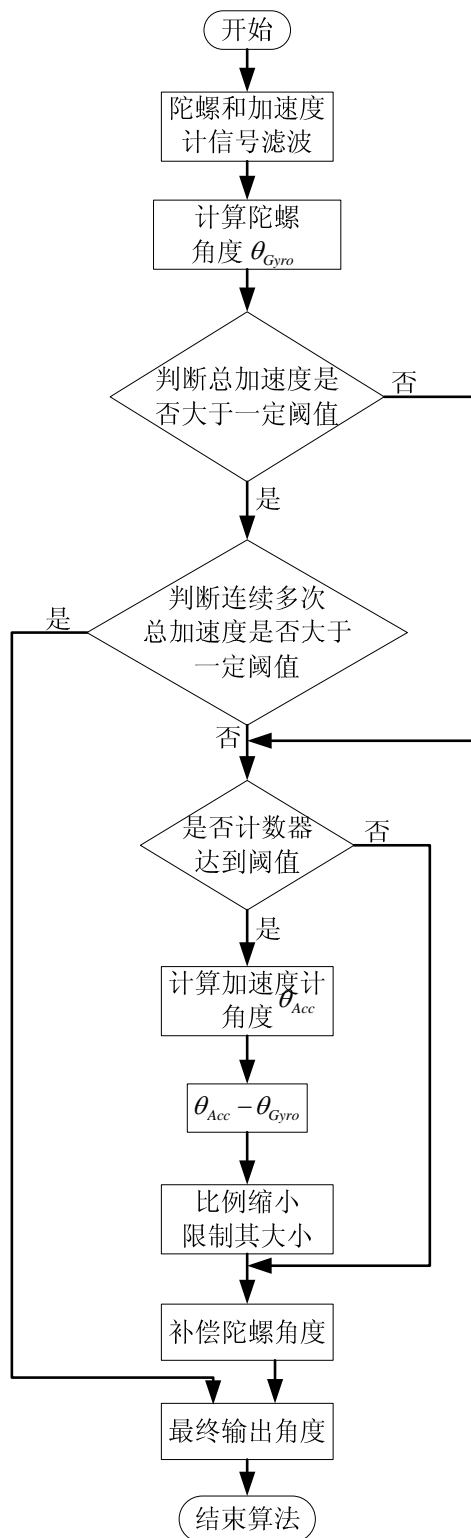


图 4.11 加速度计补偿算法流程图

4.3.3 算法仿真对比

采集载体在不同情况下的陀螺信号和加速度计信号，使用 Matlab 仿真算法，并与 Kalman 滤波算法进行比较。

(1) 载体无加减速运动，也不进行俯仰摇摆运动。

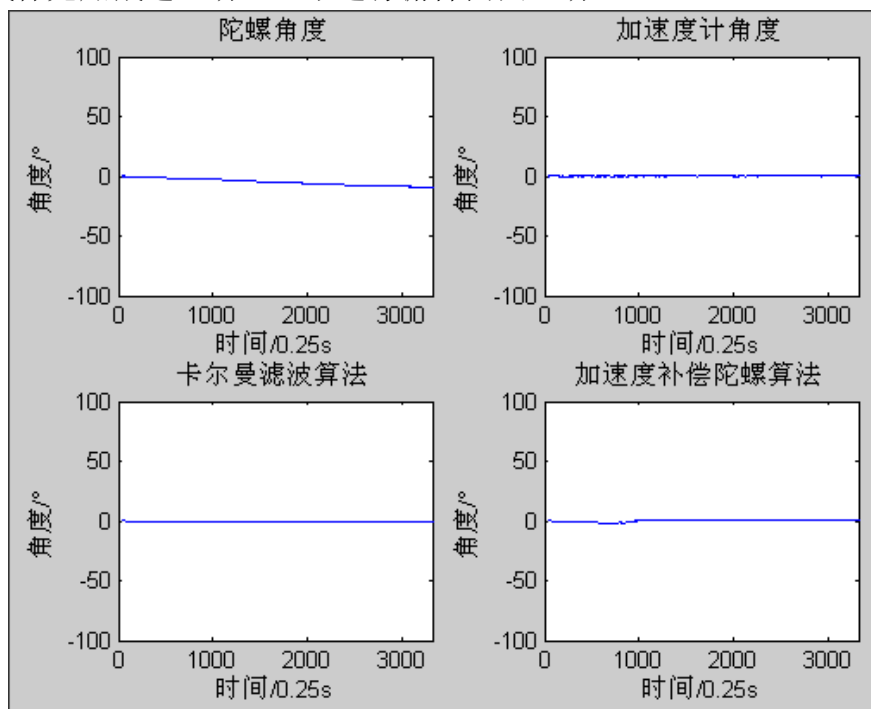


图 4.12 算法仿真比较(1)

(2) 载体无加减速运动，但进行俯仰摇摆运动。

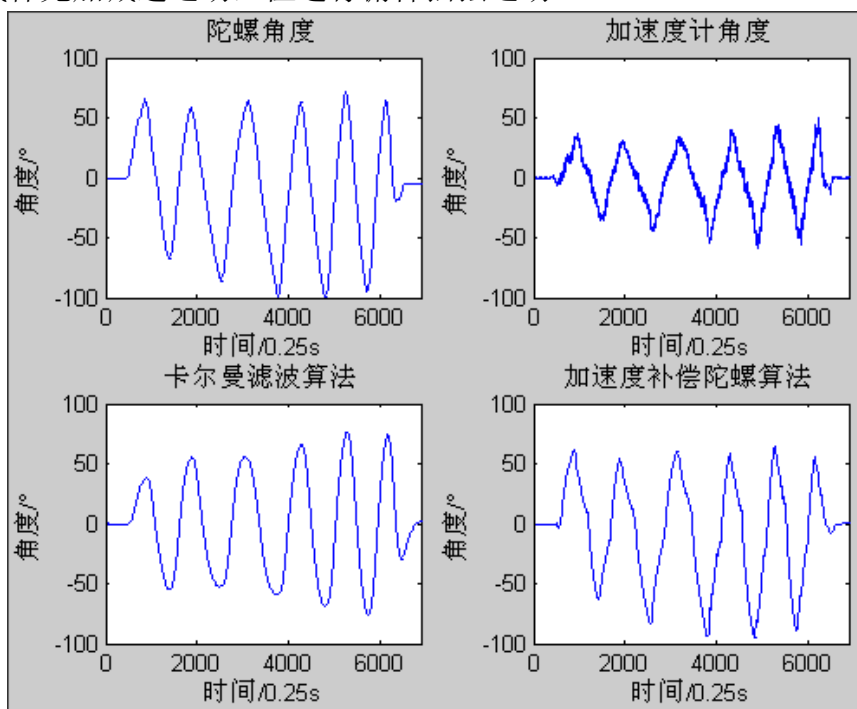


图 4.13 算法仿真比较(2)

(3) 载体有短时间加减速运动，但不进行俯仰摇摆运动。

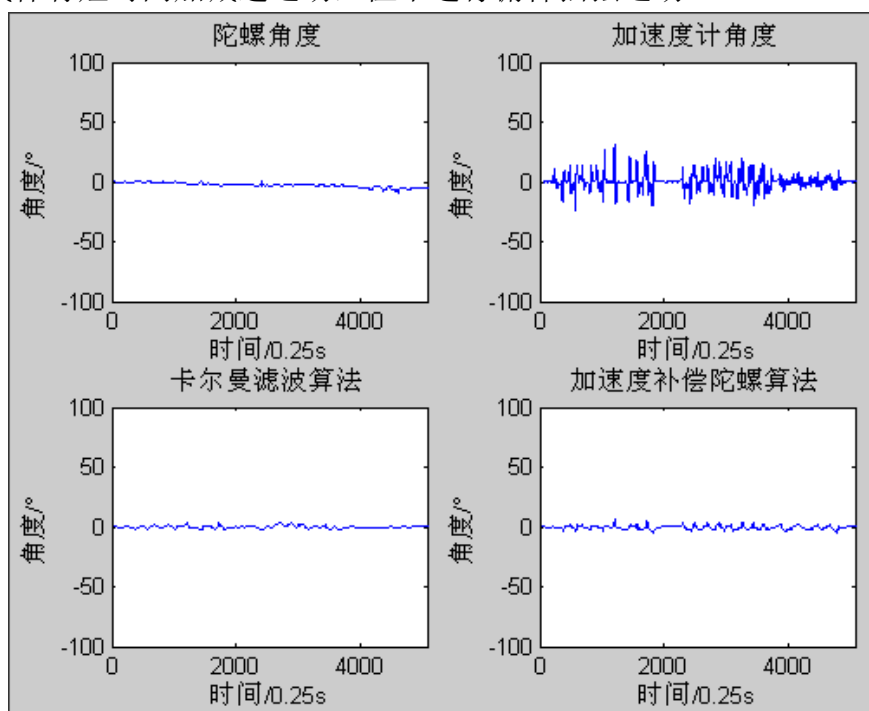


图 4.14 算法仿真比较(3)

(4) 载体有短时间加减速运动，且进行俯仰摇摆运动。

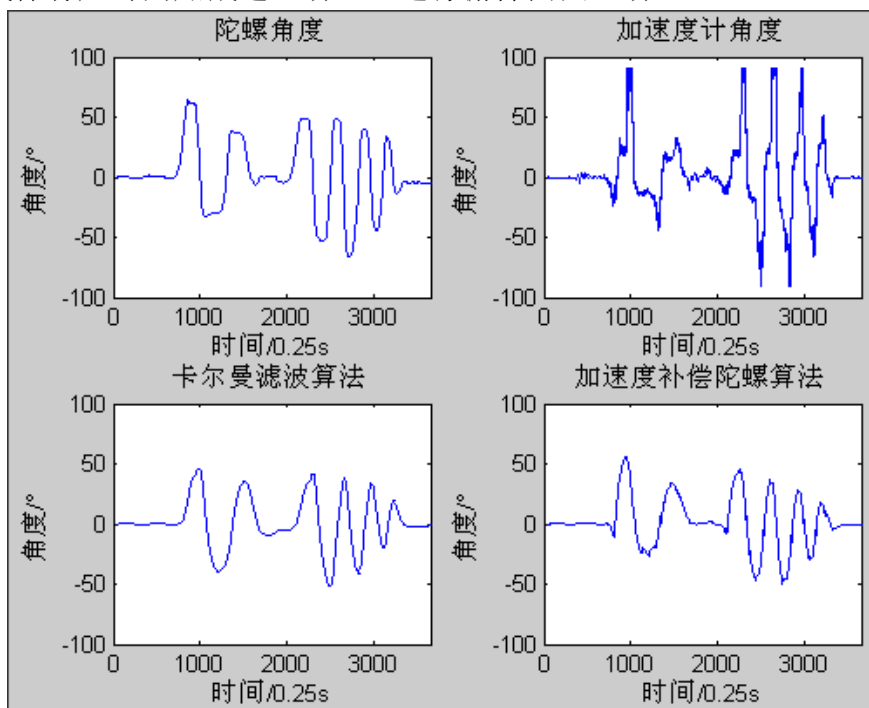


图 4.15 算法仿真比较(4)

通过以上曲线可知，当不对陀螺漂移进行补偿时，陀螺计算得到的角度随时间逐渐增大；载体无加减速运动时，加速度计得到的角度精度较高，能够较好的补偿漂移；当载体有短时间加减速运动时，加速度计依然能够补偿陀螺漂移，但是一旦载体长时间加减速运动，就无法进行补偿；加速度计补偿陀螺漂移的算法和 Kalman 滤波算法得到的

结果基本一致，并且加速度计补偿法计算量小，算法复杂度低，实时性高，适合小型无人机稳定云台系统使用。

4.4 本章总结

本章在第三章系统数学模型的基础上，分析视轴稳定环的幅频特性，通过比例超前校正以满足系统动态和稳态的性能要求。设计并实现模糊 **PID** 控制器对视觉稳定云台系统的控制，针对陀螺漂移问题，提出加速度计补偿陀螺漂移的算法，并进行仿真分析。

第 5 章 目标跟踪算法设计

序列图像中目标跟踪是在每一帧图像中根据视频图像的时空相关信息确定目标的位置、大小和形状信息等，广泛应用于视频监控、医疗诊断、交通管理和精确制导等领域。在实际应用中，安装摄像机的载体和目标会发生相对运动，图像背景复杂多变，并且视频图像的采集还受到环境光照、干扰噪声和目标变化的影响，因此目标跟踪算法的研究成为计算机视觉领域的热点。

本系统使用安装在无人机上的视觉跟踪稳定装置采集摄像机的实时视频信号，经过图像处理，将图像的特征体现出来，与事前标定好的目标特征进行对比，寻找最佳匹配位置，得到视轴偏差角，反馈控制云台转动，保证目标始终处在图像中心，实现目标跟踪。

本章在硬件电路的基础上，通过 FPGA 控制视频 AD 芯片采集视频信号并对其解码，提取需求信号；使用 FPGA 实现 Canny 边缘检测，得到边缘图像；结合多种目标跟踪算法的优点，设计提出改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法。

5.1 视频信号的采集和解码

视觉稳定云台的摄像机将光学图像信号转变为电信号，以便于传输和存储。按照感光器的不同分为 CCD 摄像机和 CMOS 摄像机，其输出的电视信号制式有 PAL、NTSC 和 SECAM 等，不同摄像机输出虽然有所差别，但本质上是相同的，通过视频 AD 芯片可以转换为需要的格式，供 FPGA 采集。本设计使用输出 PAL 制式的 CCD 摄像机。

5.1.1 摄像机视频制式分析

摄像机工作原理和广播电视系统一致，本设计中，摄像机采用隔行扫描的方式，将一帧图像分为奇偶两场，奇场扫描奇数行，偶场扫描偶数行。每行图像都按照一定的分辨率从左向右扫描，将对应像素点的灰度值转换为电压值输出，即一行的图像以连续的模拟电压形式输出。每当扫描完一行图像，就会出现一段比视频信号电压还低的电平，并持续一段时间，以表示本行扫描结束，开始下一行扫描，这段低电平叫做行同步脉冲。随后开始下一行的扫描，周而复始，当结束一场图像所有行的扫描又会出现一段比行同步脉冲要宽很多的低电平区域，称为场消隐区，其中有个持续时间远长于其他的低电平脉冲，称为场同步脉冲，说明新的一场到来^[66]，如下图所示。

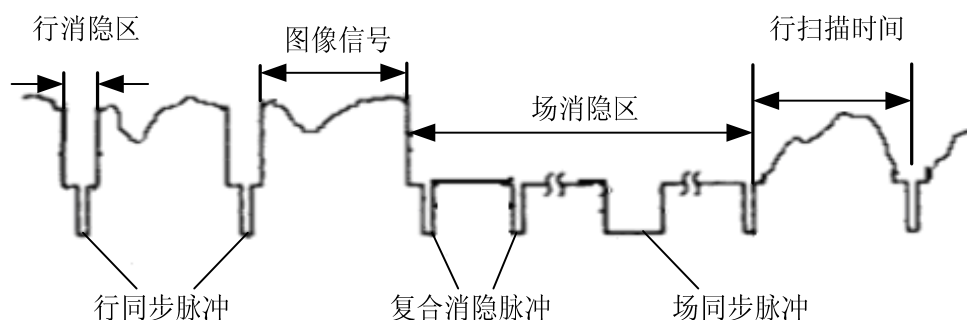


图 5.1 模拟视频信号

5.1.2 视频信号采集及解码

摄像机输出的模拟视频信号，FPGA 无法直接采集并使用，因此需要视频 AD 芯片从模拟视频信号中分离出有效视频数字信号，以及行、场同步信号。本设计使用飞利浦公司的视频转换芯片 SAA7113H，针对 PAL 制式的摄像机，转换输出的数字视频格式如下图所示。

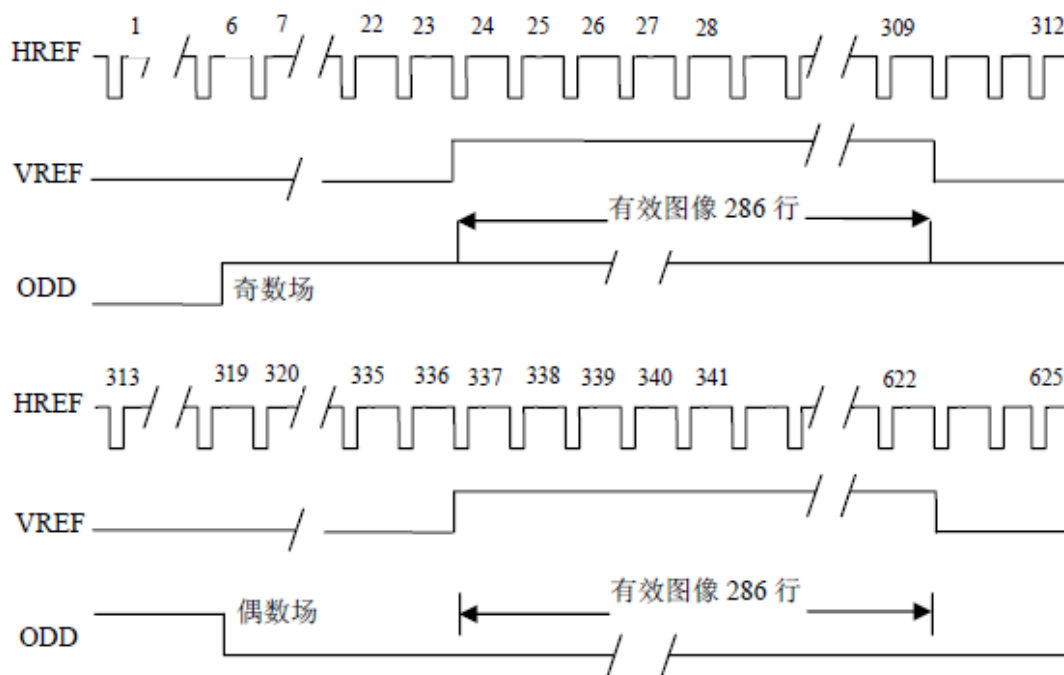


图 5.2 帧图像的时序关系

SAA7113H 输出的信号包括数字图像信号 VPO[7..0]、时钟信号 LLC、可配置输出 RTS1 和 RSCO，根据摄像机 PAL 制式和 FPGA 采集图像设计需要，来进行配置。

时钟频率为 27MHz 的 LLC，每个 LLC 的上升沿 VPO 总线输出 8 位解码数据，作为 FPGA 采集图像时的时钟信号。SAA7113H 输出的数字图像数据时标准的 ITU-656 YUV4:2:2 格式，其中 Y 为黑白亮度分量，U 和 V 为色差分量，数字视频格式如下表所示。

表 5.1 数字视频数据格式

消隐期			时序信号				YUV4:2:2 数据 (720 像素)						消隐期			
...	80	10	FF	00	00	SAV	Cb0	Y0	Cr0	Y1	...	Y719	FF	00	00	EAV

表中，当输出的数据持续为"8010"时，视频信号处于消隐期；"FF0000SAV"和"FF0000EAV"是时间参考代码；在它们之间的是 720 个像素的视频数据。其中 SAV 和 EAV 分别表示有效视频数据开始和结束，SAV 和 EAV 的数据格式如下表所示：

表 5.2 EAV 和 SAV 格式

BIT7	BIT6	BIT5	BIT4	BIT3-0
始终是 1	奇场：F=0 偶场：F=1	有效数据：V=0 场消隐期：V=1	SAV：H=0 EAV：H=1	保留

从上表可得到行同步信号 HREF，再通过配置 SAA7113H 使 RTS0 输出场同步信号 VREF，RTS1 输出奇偶场信号 ODD 就可以在 FPGA 的控制下采集图像了。在 Quartus II 中用硬件描述语言编写 SAA7113H 的接口模块。

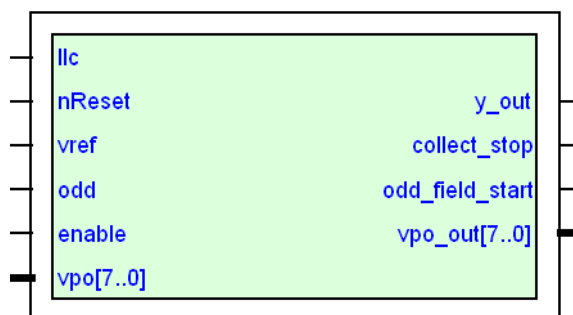


图 5.3 SAA7113H 接口模块

本设计中，图像的分辨率为 256*256，只采集反映灰度信息的亮度分量 Y。由于目标跟踪的实时性要求，所以一帧图像只采集一场，用另一场的时间来进行目标跟踪运算。因此，该模块主要功能是在每一帧图像的奇场中采集 256 行有效的 Y 数据，每行数据只采集 256 个像素点，将这 256*256 个 Y 数据输出，同时同步输出 Y 有效信号，以确认当前 vpo_out[7..0] 输出的是 Y 数据。其仿真时序图如下所示。

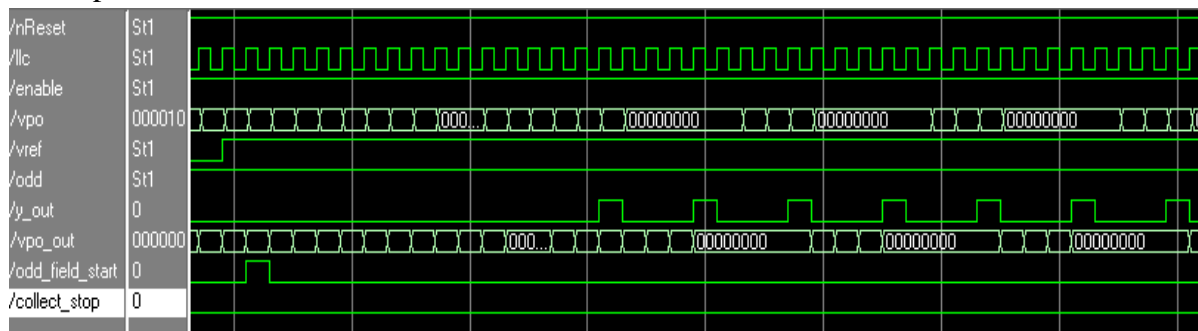


图 5.4 SAA7113H 接口模块仿真时序图

5.2 Canny 边缘检测的 FPGA 实现

5.2.1 边缘检测原理

图像的边缘可以反映图像的很多信息，例如方向、位置和形状等，边缘主要表现在灰度发生剧烈变化的地方，图像匹配是以图像的边缘提取为基础。

根据图像边缘灰度的变化，将边缘分为三类，如下图所示^{[26][67]}。

- (1) 阶梯形边缘：灰度值突然出现比较大的跳跃。
- (2) 屋顶形边缘：灰度从一个值逐渐变化到另一个值，随后又逐渐地变回来。
- (3) 线性边缘：灰度突然从一个值跳跃到另一个相差较大值再迅速跳回来。

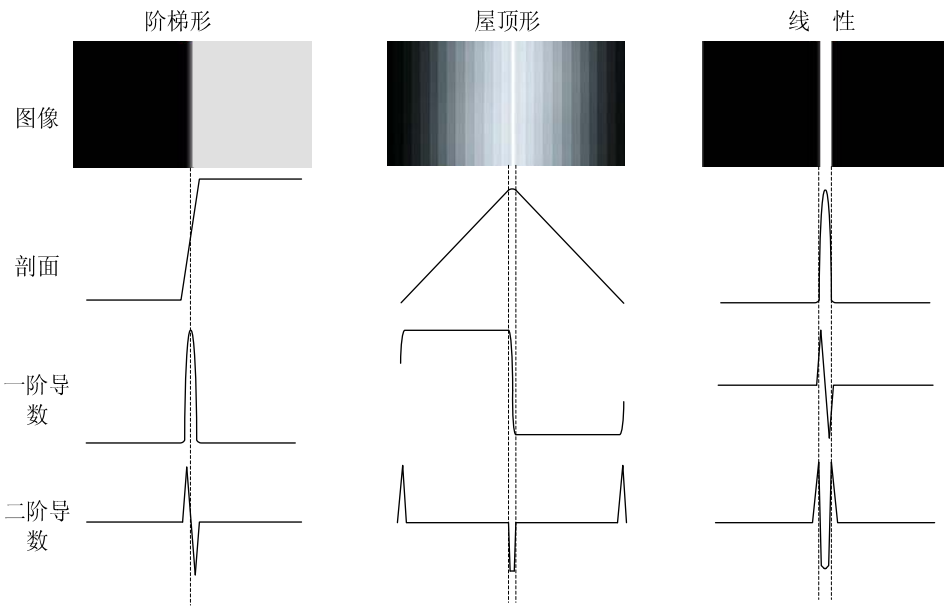


图 5.5 边缘分类及导数

由图可知，虽然形成边缘的灰度分布不同，但是可以发现平行边缘方向的灰度值变化小，而垂直边缘方向的灰度值变化大，从数学角度分析可得边缘处的一阶导数较大，二阶导数为零^[67]。

下图是一幅灰度图像及其灰度值 3D 图，将不同灰度值用不同的三维高度显示。

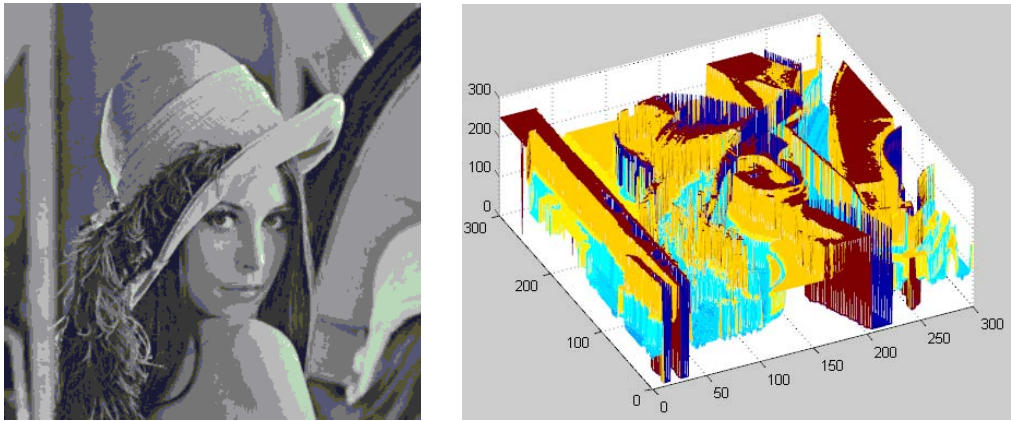


图 5.6 图像灰度的 3D 显示

由图可以看出，在灰度值变化较大的地方就会产生边缘，但是有些边缘并不清晰和完整，因此需要较好的算法来提取图像的边缘。常用的边缘检测算子有：梯度算子(Roberts、Prewitt、Sobel)、方向微分算子(Kirsch)和二阶导数算子(Laplacian、Marr、Canny)。

通常边缘检测的过程是：

- (1) 对图像进行滤波，去除噪声；
- (2) 将图像的边缘增强，去除了图像灰度平缓的区域；
- (3) 经过阈值分割，突显边缘点；
- (4) 连接边缘点。

5.2.2 Canny 边缘检测算法

Sobel 等边缘检测算子对噪声敏感，适用于画面不复杂的图像。然而实际中，图像往往不是那么理想，会受到光照或阴影的影响，画面本身边缘复杂，不能使用上述算子。1986 年 John Canny 对以往的边缘检测方法进行总结，用单位函数极大值的解析代替图像边缘的检测，提出三个边缘检测准则并用数学形式表示出来，得到一个实用边缘检测算法。

5.2.2.1 Canny 准则

- (1) 信噪比(SNR)准则，算法能抑制虚假边缘，标识出准确的图像边缘。

其定义为：

$$SNR = \frac{\left| \int_{-W}^{+W} G(-x)h(x)dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-W}^{+W} h^2(x)dx}} \quad (5.1)$$

其中， $G(x)$ 为边缘函数； $h(x)$ 为滤波器脉冲响应； σ 为高斯噪声均方差。信噪比的大小反映边缘提取正确率的高低。

- (2) 定位精度准则，标识出的边缘就是实际的边缘。

边缘定位精度 L 定义为：

$$L = \frac{\left| \int_{-W}^{+W} G'(-x)h'(x)dx \right|}{\sigma \sqrt{\int_{-W}^{+W} h'^2(x)dx}} \quad (5.2)$$

$G(x)$ 和 $h(x)$ 的一阶导数为 $G'(x)$ 和 $h'(x)$ 。 L 决定提取的边缘是否在其真实的位置上， L 越大则定位精度越高。

- (3) 单边缘响应准则，为了抑制虚假边缘，图像中的每个实际边缘点有且只有一个响应。

$h'(x)$ 与单边缘响应的零交叉点的平均距离为：

$$D_{zca}(f') = \pi \left\{ \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} h'^2(x) dx}{\int_{-W}^{+W} h''(x) dx} \right\}^{1/2} \quad (5.3)$$

当满足上式，则边缘检测得到的边界为单像素宽^[68]。这对随后利用边缘为特征的目标跟踪算法很重要。

上述三条准则相互有联系，如果提高信噪比，那定位精度就会下降，反之提高边缘位置检测精度，那信噪比就会下降，错误率上升。经分析，高斯函数的一阶导数可以实现最佳逼近，是定位精度和信噪比之间的折中方案。

5.2.2.2 Canny 算法过程

(1) 高斯滤波，平滑图像

二维高斯函数如下：

$$G(x, y, \sigma) = \exp[-(x^2 + y^2) / 2\sigma^2] / 2\pi\sigma^2 \quad (5.4)$$

其梯度矢量为：

$$\nabla G = \begin{bmatrix} \partial G / \partial x \\ \partial G / \partial y \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

分解得到两个一维滤波器：

$$\partial G / \partial x = kx \exp[-x^2 / 2\sigma^2] \exp[-y^2 / 2\sigma^2] = h_1(x)h_2(y) \quad (5.6)$$

$$\partial G / \partial y = ky \exp[-y^2 / 2\sigma^2] \exp[-x^2 / 2\sigma^2] = h_1(y)h_2(x) \quad (5.7)$$

$$h_1(x) = \sqrt{k} x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad h_2(y) = \sqrt{k} y e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad (5.8)$$

$$h_1(y) = \sqrt{k} y e^{-\frac{y^2}{2\sigma^2}} \quad h_2(x) = \sqrt{k} x e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5.9)$$

其中， k 为常量， σ 为高斯滤波器参数，决定平滑程度， σ 越大，噪声平滑效果越好，信噪比高，但是边缘定位精度就降低了。

令原始图像为 $f(x, y)$ ，平滑后的图像为：

$$g_x(x, y) = \frac{\partial G(x, y, \sigma)}{\partial x} * f(x, y) \quad (5.10)$$

$$g_y(x, y) = \frac{\partial G(x, y, \sigma)}{\partial y} * f(x, y) \quad (5.11)$$

式中， $*$ 表示卷积。

在实际算法中，使用 5×5 的高斯滤波器模板，参数 $\sigma^2 = 2$ ，整数化和归一化后为：

$$\begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 3 & 6 & 7 & 6 & 3 \\ 2 & 4 & 6 & 4 & 2 \\ 1 & 2 & 3 & 2 & 1 \end{pmatrix}$$

将高斯模板依次对图像中每个像素使用，以达到滤波效果。

(2) 计算梯度幅值及方向

Canny 算法采用 2×2 邻域进行计算，两个方向的偏导数阵列为：

$$P_x[i, j] = (g[i, j+1] - g[i, j] + g[i+1, j+1] - g[i+1, j]) / 2 \quad (5.12)$$

$$P_y[i, j] = (g[i, j] - g[i+1, j] + g[i, j+1] - g[i+1, j+1]) / 2 \quad (5.13)$$

梯度幅值，即边缘强度为：

$$M[i, j] = \sqrt{P_x[i, j]^2 + P_y[i, j]^2} \quad (5.14)$$

梯度方向，即边缘方向为：

$$\theta[i, j] = \arctan(P_x[i, j] / P_y[i, j]) \quad (5.15)$$

实际应用中， 2×2 邻域使用的像素点较少，检测的边缘不准确。因此，采用模板 3×3 领域的 Sobel 算子计算每个像素在水平、垂直方向的偏导数，分别记为 $sobel_x$ 和 $sobel_y$ ，Sobel 算子卷积核如下：

$$S_x = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -2 & 0 & 2 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad S_y = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ -1 & -2 & 1 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

梯度幅值用两个偏导数的绝对值之和来近似，这样大大减少了计算量。

$$f(i, j) = |sobel_x| + |sobel_y| \quad (5.17)$$

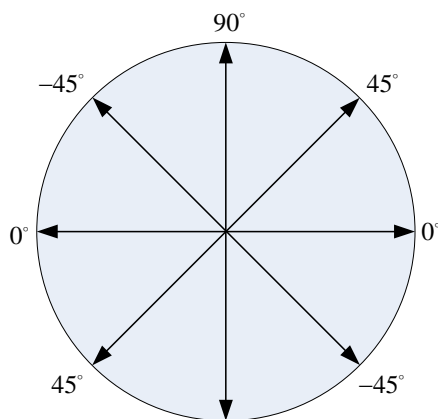


图 5.7 梯度方向

梯度方向不需要具体计算，只需近似地分成水平、垂直、45°和-45°这4个方向。

$|sobel_y| < |sobel_x| * \tan(22.5^\circ)$ 时方向为水平； $|sobel_y| > |sobel_x| * \tan(67.5^\circ)$ 时方向为垂直；中间的情况可以用 $sobel_x$ 和 $sobel_y$ 的符号来判断，两者符号相同时为45°方向，相异时为-45°方向。

(3) 非极大值抑制

为保证单一响应，即边缘只有一个像素点宽，需要细化梯度幅值图像 $M[i, j]$ 中的边缘地带，保留局部变化最大的幅值点^[69]。

遍历图像，当每个 3*3 领域的中心像素 M 的梯度值小于两个梯度方向的像素的梯度值，令 $M=0$ 。其数学表示为：

$$N[i, j] = NMS(M[i, j], \xi[i, j]) \quad (5.18)$$

(4) 阈值分割及边缘连接

设定高、低2个阈值 T_h 和 T_l ，一般来说 $T_l = 0.4 \times T_h$ ，对经过(3)处理后的图像进行分割。对图像中任一像素点进行检测，若该点的梯度幅值大于 T_h ，则认为该点是边缘点；若小于 T_l ，则一定不是边缘点；处在 T_h 和 T_l 之间的点，可能是边缘点，需等待边缘连接时进一步处理。

具体做法是：把经 T_l 阈值分割的边缘图像设为 A ，把经 T_h 阈值分割的边缘图像设为 B ，图像中小于阈值的像素点对应的灰度值置为0。图像 B 的分割阈值高，没有假边缘，但边缘轮廓可能不完整；图像 A 的分割阈值低，保留大部分边缘信息，但可能存在虚假边缘。在图像 B 的基础上，通过图像 A 连接边缘^[70]。

5.2.3 FPGA 实现 Canny 边缘检测

Canny 边缘检测算法具有一定时序性和规律性，可以用 FPGA 实现其算法。FPGA 特有的并行计算，可以实现一边采集图像一边进行计算，提高了整体跟踪算法的运行速度，保证实时性。

(1) 高斯平滑

使用 5*5 高斯模板来平滑处理，考虑 FPGA 实现乘法运算较复杂，耗费资源过多，同时会增加时钟周期。因此，将模板修改为

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{16} & \frac{1}{4} & \frac{3}{8} & \frac{1}{4} & \frac{1}{16} \end{bmatrix}$$

使用移位和加减运算代替乘法运算，随着图像数据进入依次滤波，整个高斯平滑算法的硬件结构如下图所示。

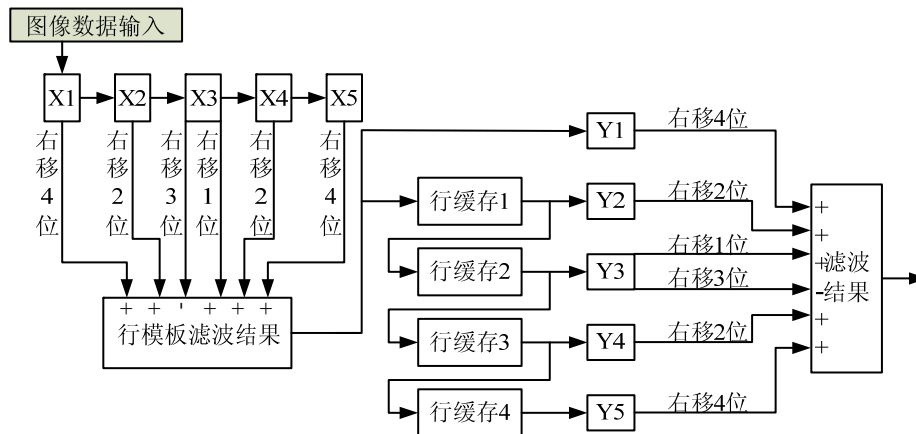


图 5.8 高斯平滑的硬件结构

(2) 梯度幅值和方向

对高斯平滑后的数据经过行缓存得到 3×3 窗口，扩展其符号位，根据 Sobel 算子系数进行移位和加减运算得到该像素在 X 和 Y 方向上的偏导数 $sobel_x$ 和 $sobel_y$ ，使用 5.2.2.2 节的方法就可以得到梯度幅值和梯度方向，硬件结构图如下所示。

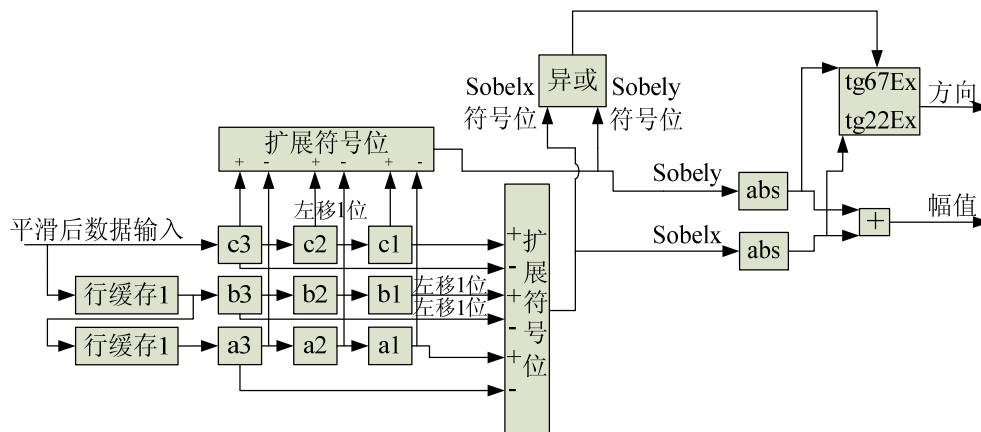


图 5.9 幅值和方向计算的硬件结构图

由于判断梯度方向时需要乘法计算 $tg(22.5^\circ)$ 和 $tg(67.5^\circ)$ ，所以用 2 的幂次和来近似它们：

$$tg(22.5^\circ) = 0.4142 \approx 1/2 - 1/16 - 1/64 - 1/128 \quad (5.19)$$

$$tg(67.5^\circ) = 2.4142 = 2 + tg(22.5^\circ) \quad (5.20)$$

(3) 非极大值抑制和阈值分割

对梯度幅值图像数据取 3×3 窗口，记为 GA1、GA2、GA3、GB1、GB2、GB3、GC1、GC2、GC3，而梯度方向也要缓存一行加一个数据后得到与 GB2 对应的方向，记为 DB2。随后进行非极大值抑制和高低阈值分割，得到强弱边缘图像，写入 SRAM 以备边缘连接时使用。其中将强边缘的图像坐标写入 fifo 中。由于硬件流水的特点，图像边界上的像素的计算结果是无效的，将图像边界上的 4 行和 4 列都置为背景点，其硬件结构图如

下所示。

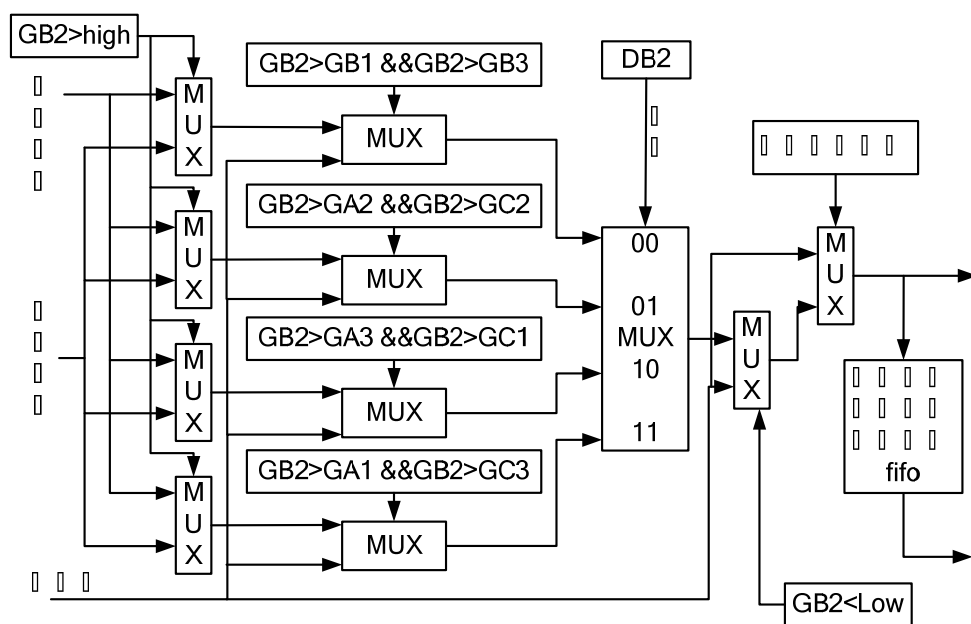


图 5.10 非极大值抑制和阈值分割的硬件结构图

(4) 边缘连接

通过写入 SRAM 的强、弱边缘图像以及存储在 fifo 中的强边缘点坐标来连接边缘，此部分算法需顺序方式控制，因此使用有限状态机来实现，其状态转换图如下所示。

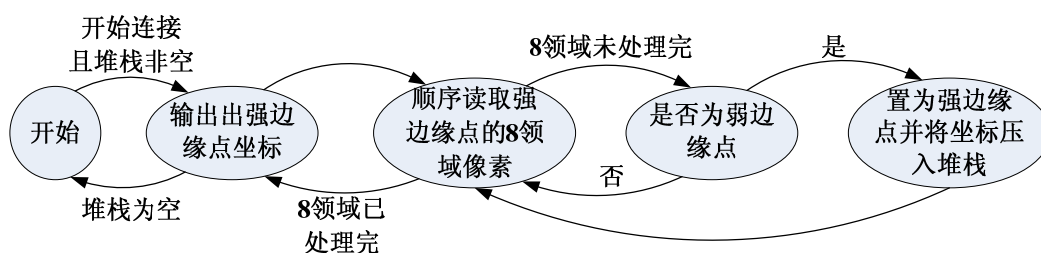


图 5.11 边缘连接的状态转换图

5.3 目标跟踪算法

经过 FPGA 控制视频 AD 芯片采集灰度图像，并硬件边缘检测得到边缘图像，把图像特征提取出来，在此基础上完成目标跟踪算法。

5.3.1 相关跟踪算法

相关跟踪算法，是经典的图像跟踪算法，如果将序列图像跟踪拆分成单帧图像时，就是我们熟知的图像匹配，所以相关跟踪又叫模板匹配算法。相关跟踪主要研究和分析模板图像与待匹配图像所有可能位置的相似度，最相似的位置就是目标位置。这种跟踪算法定位精度高，受噪声影响小，但是计算量大，不适合实时跟踪。因此，需要设计高效的跟踪算法降低计算量，但不降低跟踪性能。

5.3.1.1 相关跟踪算法原理

相关跟踪算法的基本思路是：将预先标定的目标存储为模板，然后用模板与图像搜索区域的所有待匹配子图作对比，使用相似性度量函数逐像素计算它们的相似程度，最相似的待匹配子图的位置就是所要搜索的目标位置。其原理框图如下所示。

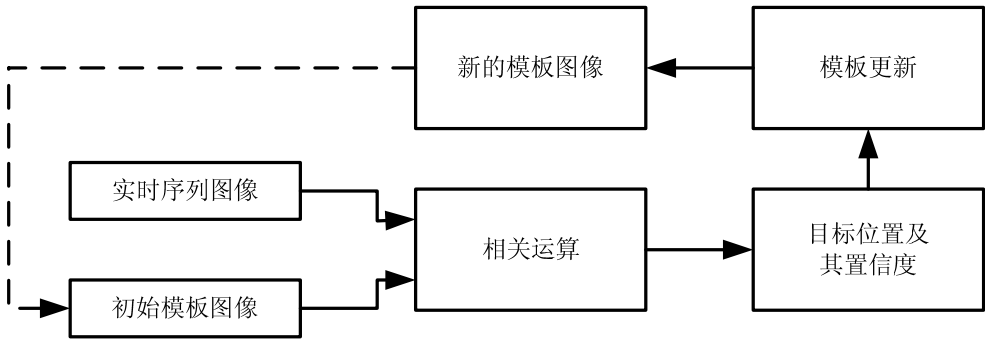


图 5.12 相关跟踪框图

全图像搜索目标计算量太大，而且考虑目标运动速度的限制，因此采用搜索区的办法，使搜索区窗口跟随目标移动，这对跟踪性能不会有影响，而且会减少错跟目标的事件。搜索区大小的确定要考虑目标样板的尺寸和跟踪目标运动的速度。如图 5.13 所示。

图像坐标系 (x,y) ，一帧图像的左上角为原点， x 轴向右， y 轴向下；搜索区坐标系 (u,v) ，以搜索区左上角为原点， u 轴向右， v 轴向下；待匹配子图坐标系 (q,r) ，以子区左上角为原点， q 轴向右， r 轴向下；模板坐标系 (m,n) ，以模板图像左上角为原点， m 轴向右， n 轴向下^[23]。

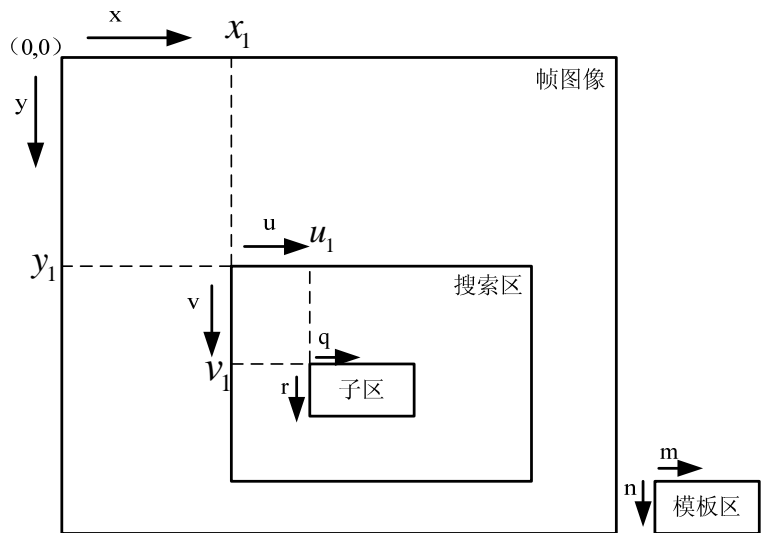


图 5.13 相关跟踪坐标系

由图可知，相关跟踪运算时，模板区任一点 (m_1, n_1) 对应的子区内的点 (q_1, r_1) 在帧图像的坐标为： $x = x_1 + u_1 + q_1$ ； $y = y_1 + v_1 + r_1$ 。

5.3.1.2 模板选取及更新

模板的选取和更新在相关跟踪算法中占据重要方面，匹配精度和跟踪精度都和模板大小有关，通常模板尺寸小于实际帧图像。

当模板较大时，包含较多信息，有更多的目标细节，匹配运算正确性高，但是大模板引入较多背景信息和干扰，造成跟踪误差，逐帧累积使模板偏离目标，且计算量大、实时性差；当模板较小时，包含的目标信息少，匹配不可靠，但是引入干扰和噪声少，跟踪精度高，计算量小。因此，模板选取可以大些，但不能影响实时性，同时要保证目标信息在模板中的比例也要大。

模板更新是相关跟踪的关键环节，更新要及时可靠，这也是需要折中考虑的问题。更新过快，计算量大，影响实时性；更新太慢，计算量小但无法保证模板准确包含目标信息。同时，更新算法需要随着目标大小和姿态变化而实时跟踪，还能够克服目标的遮蔽、阴影干扰和光照影响，所以模板更新算法也是设计相关跟踪算法的重要部分。

5.3.1.3 序贯相似度检测算法(SSDA)

序贯相似度检测算法(Sequential Similarity Detection Algorithm)是一种高速、可靠的相关跟踪算法^[38]，与 MAD 的相关函数相同，设大小为 $M \times N$ 的模板图像 $T(i, j)$ 在搜索区 $f(i, j)$ 上匹配，其绝对误差为：

$$\varepsilon = |(f(i, j) - f'(i, j)) - (T(i, j) - T'(i, j))| \quad (5.21)$$

$$\text{其中} \quad f'(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(i, j) \quad T'(i, j) = \frac{1}{M \times N} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N T(i, j) \quad (5.22)$$

在 MAD 中对模板和子图的所有像素点进行相关运算，将所有像素点的误差求和，再比较得出哪个子图的误差最小，而 SSDA 提前设定阈值，逐点计算误差并随时将误差和与阈值比较，当超过该阈值就停止比较，不再计算剩下点的误差，匹配过程中不断调整阈值，使得下次计算量更小，匹配更准。这样就减少每次匹配像素的比较次数，实现快速匹配。如下图所示。

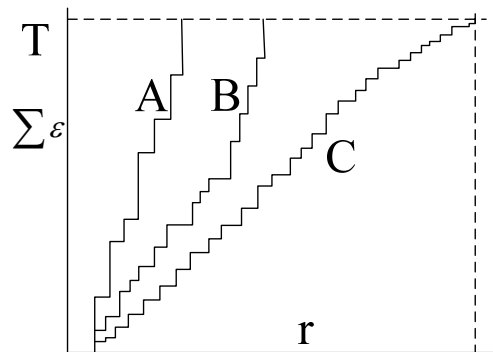


图 5.14 误差累积增长曲线

非目标位置的匹配误差增长很快，几次计算就超出阈值，马上被排除，如 A 和 B，只有真正的目标位置，匹配才会进行到最后。

实际应用中，阈值的大小直接影响处理速度和跟踪精度，阈值很难快速估计出来，需要经过大量的实验和分析才能得出，而自适应阈值就可以很好地解决这一问题。

自适应阈值 SSDA 的步骤：

(1) 标定好模板后开始匹配，先计算当前目标位置的子图和模板图像所有对应点的误差 ε ，累加求和作为自适应阈值 SSDA 的初始阈值 T 。

(2) 从待搜索区左上角开始，依次选取待匹配子图，开始匹配检测，若计算中误差累积 $T_{i,j}$ 大于阈值 T ，放弃该子图的误差计算，开始下一个待匹配子图的误差计算；若该子图所有点误差累积 $T_{i,j}$ 小于 T ，则用 $T_{i,j}$ 代替阈值 T ，如下式所示：

$$T = \begin{cases} T & T_{i,j} \geq T \\ T_{i,j} & T_{i,j} < T \end{cases} \quad (5.23)$$

(3) 重复步骤 (2)，将搜索区扫描完就得到最佳匹配位置。

如果除了上次匹配位置的子图没有任何一个子图的误差累积和 $T_{i,j}$ 小于初始阈值 T ，说明目标没有移动，匹配位置不变。在不匹配子图处省去了大部分误差计算，大大减少运算量。

5.3.2 基于 Hausdorff 距离的图像匹配

5.3.2.1 Hausdorff 距离

Hausdorff 距离定义了两组点集间的距离，表征它们的相似程度。设有两组点集 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots\}$ 和 $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots\}$ ，则它们的 Hausdorff 距离为：

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (5.24)$$

$$h(A, B) = \max_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (5.25)$$

$$h(B, A) = \max_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (5.26)$$

其中 $\|\bullet\|$ 是点集 A 和点集 B 之间的距离式。 $h(A, B)$ 是从点集 A 到点集 B 的距离， $h(B, A)$ 是从点集 B 到点集 A 的距离， $H(A, B)$ 是 $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 中的较大值，度量两点集间的最大不匹配程度。将 A 集合中的每个点 a_i 到距离此点最近的 B 集合中点 b_j 组成的一系列距离，取这些距离中的最大值作为 $h(A, B)$ 的值， $h(B, A)$ 同理可得。如下图所示。

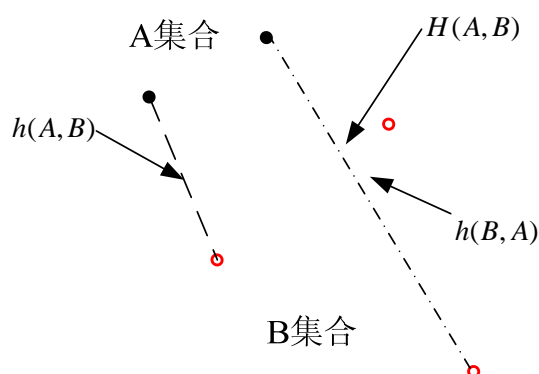


图 5.15 两点集间的 Hausdorff 距离

5.3.2.2 Hausdorff 距离匹配方法

图像经过边缘处理后成为二值图像，二值图像可以看作二维平面上的点集，模板图像和待匹配子图的二值边缘图像分别为点集 A 和点集 B，Hausdorff 距离度量这两个点集的相似度，可以作为模板和子图的匹配算法。Hausdorff 距离图像匹配算法流程如下图所示：

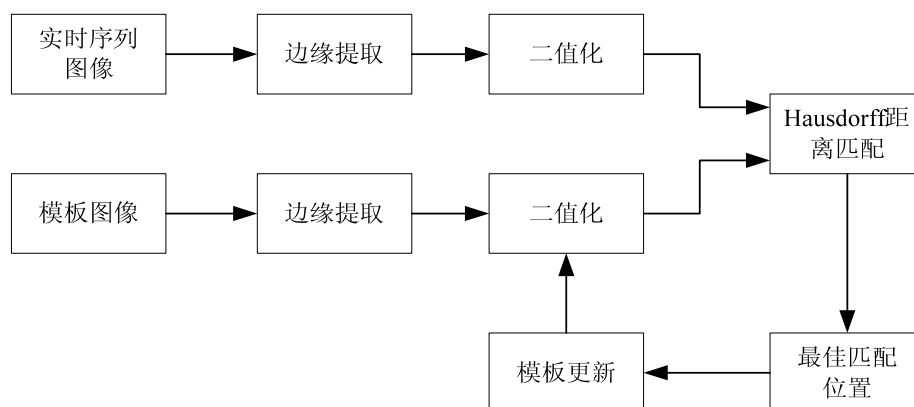


图 5.16 Hausdorff 距离匹配算法流程

Hausdorff 距离匹配算法不需要模板与子图一一对应，哪怕图像有遮蔽，也能实现部分匹配。扫描整个搜索区，计算每个子图与模板的 Hausdorff 距离，取最小的 Hausdorff 距离的子图（即相似度最大）作为最佳匹配位置，具备其他匹配算法没有的优点：

- (1) 对子图像中目标的部分遮挡有良好的适应性；
- (2) 算法简单，计算量小；
- (3) 抗干扰性强。

由上面公式可知，模板图像和子图像中的所有点都进行 Hausdorff 距离运算，两个集合中最不匹配点决定了 Hausdorff 距离，实际应用中，极易受到噪声和阴影的干扰，导致在匹配位置出现较大的 Hausdorff 距离。因此，实际中常使用两种改进的 Hausdorff 距离：平均 Hausdorff 距离和部分 Hausdorff 距离。

平均 Hausdorff 距离，其定义如下：

$$H(A, B) = \max\{h(A, B), h(B, A)\} \quad (5.27)$$

$$h(A, B) = \frac{1}{N_A} \sum_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (5.28)$$

$$h(B, A) = \frac{1}{N_B} \sum_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (5.29)$$

上式中，点集 A 有 N_A 个元素，点集 B 有 N_B 个元素。和普通 Hausdorff 距离一样，将 A 集合中的每个点 a_i 到距离此点最近的 B 集合中点 b_j 组成的一系列距离，不同的是不是取这些距离的最大值，而是求其平均值最为 A 到 B 得单向距离 $h(A, B)$ ， $h(B, A)$ 同理可得，最后 $H(A, B)$ 还是取 $h(A, B)$ 和 $h(B, A)$ 中的较大值。此方法可以降低个别噪声点的干扰，实现最终匹配。

部分 Hausdorff 距离，其定义如下：

$$H_{lk}(A, B) = \max\{h_l(A, B), h_k(B, A)\} \quad (5.30)$$

$$h_l(A, B) = l^{th} \min_{a \in A} \min_{b \in B} \|a - b\| \quad (5.31)$$

$$h_k(B, A) = k^{th} \min_{b \in B} \min_{a \in A} \|b - a\| \quad (5.32)$$

上式中， $1 \leq l \leq N_A$ ， $1 \leq k \leq N_B$ ，当 $l = N_A$ 且 $k = N_B$ 时，式(5.31)与式(5.25)等价，式(5.32)与式(5.26)等价。将 A 集合中的每个点 a_i 到距离此点最近的 B 集合中点 b_j 组成的一系列距离，将这些距离由小到大排序，取第 l 个值作为 $h(A, B)$ ， $h(B, A)$ 同理取第 k 个值，若点集 A 为模板，点集 B 为子图通常选取 $l = 0.6N_A$ ， $k = [0.3 \sim 0.6]N_B$ 。这种距离只关心模板的哪些部分得到匹配，因此能够处理目标被遮蔽或目标形状快速变化的匹配问题。

5.3.2.3 距离变换

使用边缘点求取 Hausdorff 距离，距离的表示可以有多种方式。例如：

欧氏距离 $d_o(a, b) = \sqrt{(x_a - x_b)^2 + (y_a - y_b)^2}$ ；

绝对值距离 $d_A(a, b) = |x_a - x_b| + |y_a - y_b|$ ；

棋盘距离 $d_Q(a, b) = \max\{|x_a - x_b|, |y_a - y_b|\}$ 。

但是考虑到计算量和实时性，设计采用距离变换方法，通过距离变换的掩码模板对边缘图像进行预处理，得到每个像素点到最近边缘点的距离。

模板距离变换本质是小领域内距离的整数近似^[30]，使用 chamfer3-4 模板的距离变换来计算 Hausdorff 距离。模板越大生成的距离越准确。

4	3	4
3	0	3
4	3	4

图 5.17 chamfer3-4 模板

新建一副图像其边缘点处的值置为 0，非边缘点的值置为无穷大或足够大的数，该图像的每个输出像素被设定为与输入像素中 0 像素最近的距离。然后依次将模板的中心置于图像每个像素的上，将模板的领域距离值加到模板下方对应像素的距离值上，用这些值中的最小值更新中心像素的值，当全部点的值不再改变，就得出距离转换后的图像。如下图所示。



图 5.18 边缘图像及其距离图像

上图中，暗的地方表示到最近边缘点距离近，而亮的地方则代表到最近边缘点距离远。距离变换后的图像就可以直接从距离变换中读取 $h(A, B)$ 的 $\min \|a - b\|$ 或者 $h(B, A)$ 的 $\min \|b - a\|$ 。例如，设集合 A 中的点 a_i 的坐标 (x_i, y_i) ，在 (x_i, y_i) 处的距离变换值（该点到最近边缘点的距离）就是 a_i 到集合 B 所有点的最小距离，即 $\min \|a_i - b\|$ 。

5.3.3 改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法

鉴于本系统应用场景和跟踪算法的适用性，结合并改进已有算法，使其适合视觉跟踪云台系统。

5.3.3.1 算法设计

通过上面的分析可知，基于灰度相关跟踪算法和基于特征的相关跟踪算法都有自身的适用范围，前者在信噪比较低的情况下仍能可靠跟踪，局部抗干扰能力强，后者不受目标形变、环境光照和背景干扰的影响。但是实际应用中，单独使用其中一种方法无法保证跟踪可靠性和实时性。因此，可将两者融合，在此基础上再加入 Hausdorff 距离匹配不但能减少计算量，还充分利用图像边缘特征和灰度信息，提高跟踪性能。

(1) 自适应阈值 SSDA 与边缘特征的融合。

图像边缘包含目标及背景的很多特征信息，例如角点、形状和大小等，同时图像的边缘不像图像灰度那样受光照影响大，但是当目标被遮蔽导致边缘消失或者目标发生快速形变、旋转时，边缘信息就不能保证跟踪的可靠而灰度信息恰恰适合这样的应用。因此，将两者恰当的融合，取长补短，还能降低计算量，保证可靠性和实时性。

具体实现方法如下：

首先，提取已经标定好的模板图像的边缘。然后从模板边缘图像的左上角开始从左往右，从上至下依次扫描，得出目标的轮廓，一般来说轮廓是闭合的（即使不闭合，依然适用），将轮廓以及轮廓所包围像素点的坐标全部存储下来，同时存储坐标对应的灰度值。具体对一行边缘图像而言，如果此行目标的左右两个边缘点都完整，那么就存储左右两边缘点及中间坐标；如果只有一边有边缘点，那么只存储此边缘点坐标。最后使用这些坐标的灰度值和待匹配子图对应坐标的灰度值进行 SSDA 运算，并更新模板。

算法不但将边缘和灰度信息结合使用，提高可靠性，而且去除了待匹配子图中对应目标轮廓外的灰度误差的计算，大大减少计算量。在跟踪过程中，若出现目标被遮挡，那么更新模板时保留未遮挡部分的轮廓及内部信息，对于遮挡部分只保留其未遮挡一边的轮廓，另一边的轮廓和中间部分不予存储。如下图所示。

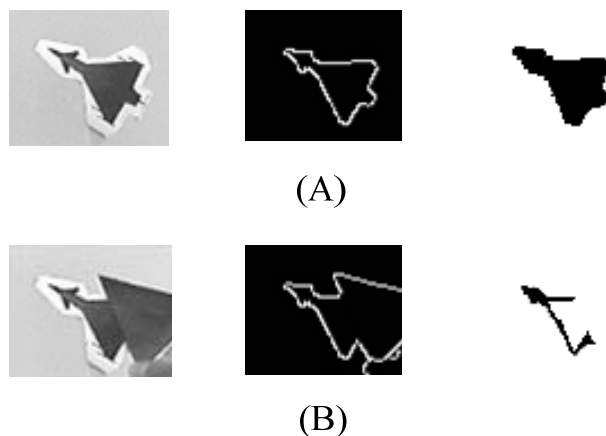


图 5.19 由边缘提取匹配区域的示意图

(A)图中，目标的边缘清晰完整，将目标轮廓和内部的坐标作为 SSDA 运算的区域，去除对目标轮廓外区域的对比计算，降低干扰减少计算量；(B)图中，目标被遮挡，根据算法对左右边缘完整的行提取边缘点及中间点的坐标，只有一边有边缘的，只提取该边缘点，作为 SSDA 计算区域，避开遮挡干扰，只利用最可靠的区域对比做运算。

(2) Hausdorff 距离匹配与边缘灰度相关跟踪的结合。

在 (1) 的基础上，加入 Hausdorff 距离匹配算法，可以准确地在搜索区得出子图与目标边缘的相似度，这样引入目标的形状信息，可以解决跟踪时在搜索区出现于目标灰度相当的物体而导致误跟踪，并且 Hausdorff 距离计算量小鲁棒性强，能很好的适应目

标形变、遮挡等情况，如下图所示。设定一个阈值，对于 Hausdorff 距离小于该阈值的子图运用基于边缘的 SSDA 进一步判断，得出两者都最匹配的子图作为最终跟踪结果。

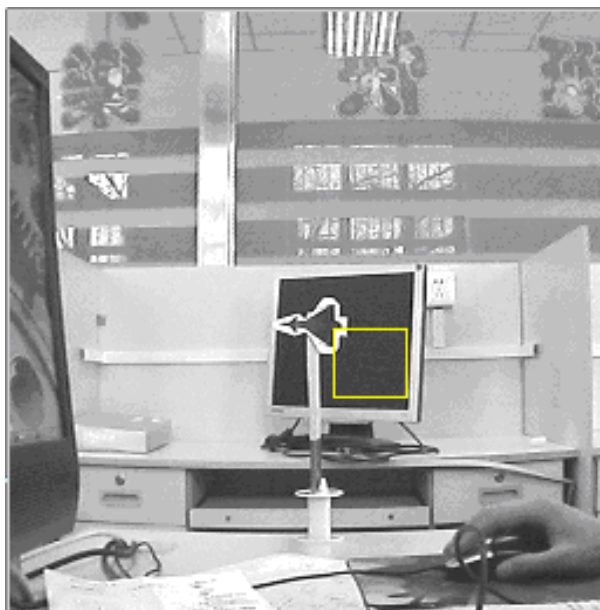


图 5.20 未结合 Hausdorff 距离的跟踪图

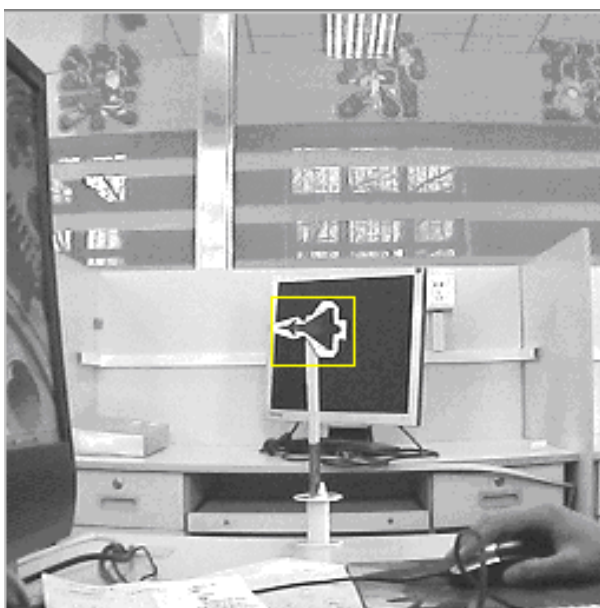


图 5.21 结合 Hausdorff 距离的跟踪图

由图可知，只利用灰度的相关运算，如果搜索区出现和目标灰度和大小基本一致的干扰，会导致跟踪失败；而结合 Hausdorff 距离的跟踪，由于加入了目标的形状信息，不会出现误跟踪，增强抗干扰能力。

5.3.3.2 算法步骤

在获得灰度图像和边缘图像的基础上，标定目标，开始执行匹配算法。算法分成两部分，一部分使用自适应阈值 SSDA 与边缘特征融合的匹配，另一部分使用基于

Hausdorff 距离的匹配，最后将两者结合选出最佳匹配位置，根据需要更新模板，周而复始，实现目标跟踪。其算法结构图如下所示。

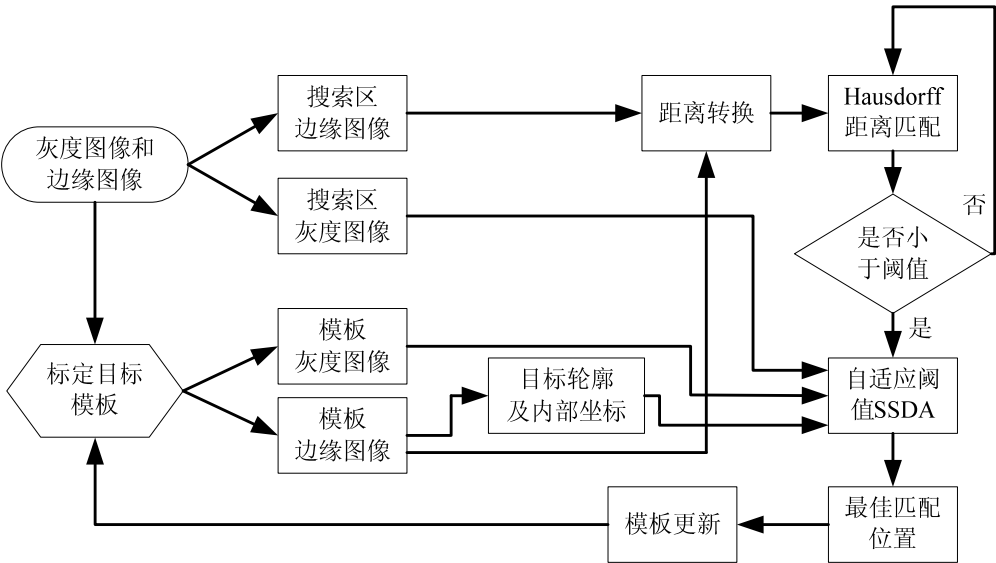


图 5.22 跟踪算法框图

5.3.3.3 模板更新

目标跟踪准确与否不但与外界干扰有关，还与目标自身有关。例如目标与摄像机的相对运动、目标的形变和目标旋转等。如果不能较好的适应目标的变化，跟踪就会出现误差。因此在跟踪过程中，除了对已有模板的最佳跟踪外，还需要根据情况实时更新模板。本设计中要更新模板的灰度图像和边缘图像，模板灰度图像的更新是在边缘更新的基础上更新的。确切的说，根据当前帧的边缘图像和模板边缘图像，选择合理的边缘像素得到新的模型，作为下一帧的模板边缘图像，再利用其边缘坐标和子图像的灰度得到新的模板灰度图像。

设前一帧模板边缘图像的集合为 $M_f = \{m_1, m_2, \dots\}$ ，已经定位目标位置的子图的边缘图像集合为 $E = \{e_1, e_2, \dots\}$ ，要求得的新模板边缘图像的集合为 $M_N = \{m'_1, m'_2, \dots\}$ 。Hausdorff 距离中的单向距离 $h(E, M)$ 表示子图到模板的距离，利用已定位目标的子图集合 E 中每一个边缘点 e_i 到模板边缘点的最近距离 $\min \|e_i - m_j\| (m_j \in M_f)$ 来确定是否该边缘点 e_i 可以作为新模板的边缘点。如果 $\min \|e_i - m_j\|$ 大于一定阈值，说明该边缘点 e_i 不是目标上的边缘点，可能是遮挡或者外界干扰，不能作为新模板的边缘点；如果 $\min \|e_i - m_j\|$ 小于阈值甚至等于 0，说明该点是目标的边缘点，可以继续作为新模板的边缘点。本方法必须逐帧运算，只要在一帧的时间内，目标的运动或变化不超过一定范围就可以实现模板更新。如下图所示，目标运动时不同帧的模板更新结果。

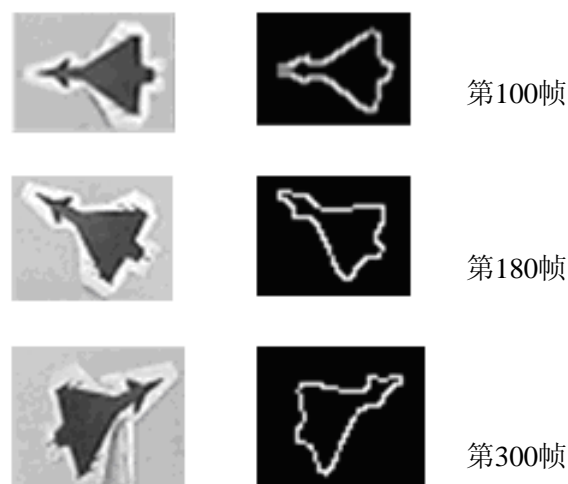


图 5.23 模板更新结果

这里的范围就是前面的阈值，当阈值选取过大时，目标可以变化的范围就大，但是更新模板时容易引入干扰，模板会越来越偏离真实目标；当阈值选取过小时，模板不能随目标及时更新，跟踪精度下降。因此，阈值选取要根据目标的变化情况和背景干扰的复杂程度折中旋转。

5.4 本章总结

本章首先介绍了视觉云台系统的视频采集和解码，在获得视频图像的基础上，根据边缘检测原理，说明 Canny 边缘检测算法内容，使用 FPGA 硬件方法获得图像的边缘。本设计的跟踪系统主要使用的方法是基于灰度和特征的相关跟踪，分别介绍自适应阈值 SSDA 算法和基于 Hausdorff 距离的图像匹配算法，分析各自优缺点，结合使用得出改进 Hausdorff 距离的相关跟踪算法，详细说明了算法的内容和步骤以及模板更新的方法。

第 6 章 实验分析

本章主要针对设计完成的视觉稳定云台系统，调试其硬软件，对其性能进行试验并分析。实际应用中，系统的稳定性会受到畸变干扰（目标姿态或形状变换）、图像噪声、环境光照、阴影干扰和载体运动等多种影响，因此必要的实验和分析是必不可少的，同时实验要尽量与实际情况接近，得出真实的实验结论。

6.1 图像匹配实验

6.1.1 Hausdorff 距离匹配实验

前面 5.3.2 节已经详细介绍了基于 Hausdorff 距离的图像匹配算法，其中提到实际应用中，传统的 Hausdorff 距离匹配法对远离中心噪声点非常敏感，极易受到噪声和阴影的干扰，所以提出两种改进方法：平均 Hausdorff 距离和部分 Hausdorff 距离。下面就对着三种 Hausdorff 距离匹配进行实验分析，寻找适合本系统的方法。

（1）单纯 Hausdorff 距离匹配法

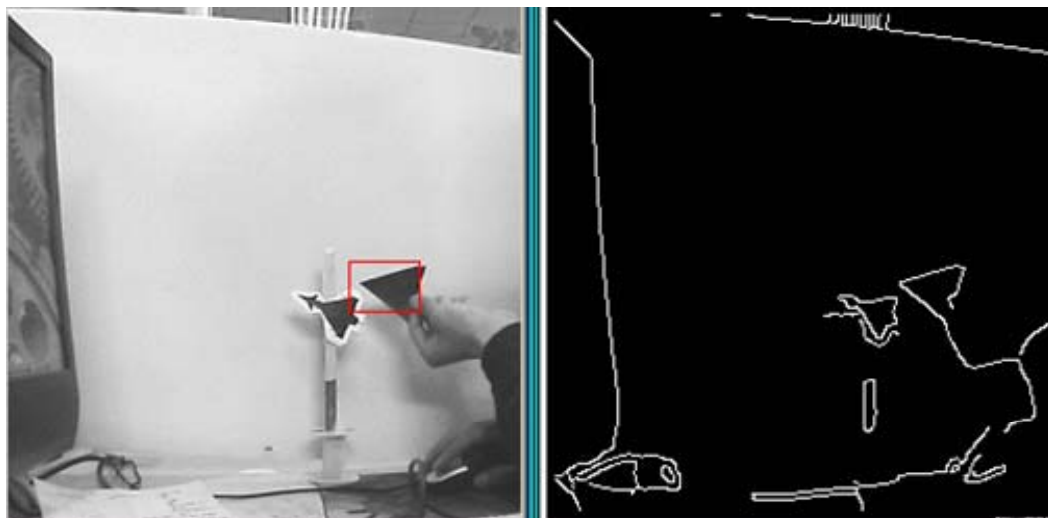


图 6.1 单纯 Hausdorff 距离匹配实验

由图可知，单纯 Hausdorff 距离匹配，对远离中心的噪声点非常敏感，致使 Hausdorff 距离变大，造成误跟踪，尤其在背景复杂的情况下，一旦跟丢，就不容易再次正确跟踪。

（2）平均 Hausdorff 距离匹配法

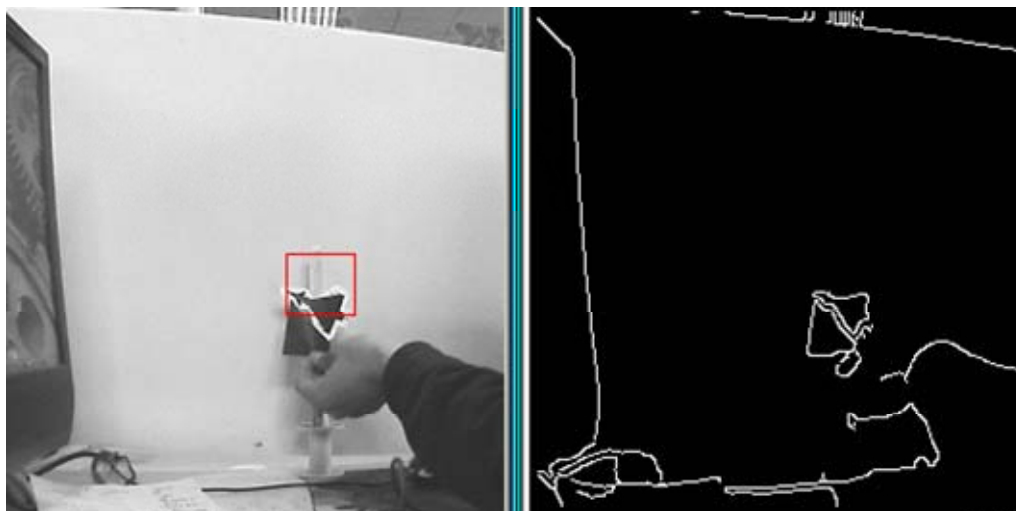


图 6.2 平均 Hausdorff 距离匹配实验

由图可知，虽然平均 Hausdorff 距离匹配降低了个别噪声的影响，但同时弱化了目标的特征，跟踪精度不高。

(3) 部分 Hausdorff 距离匹配法

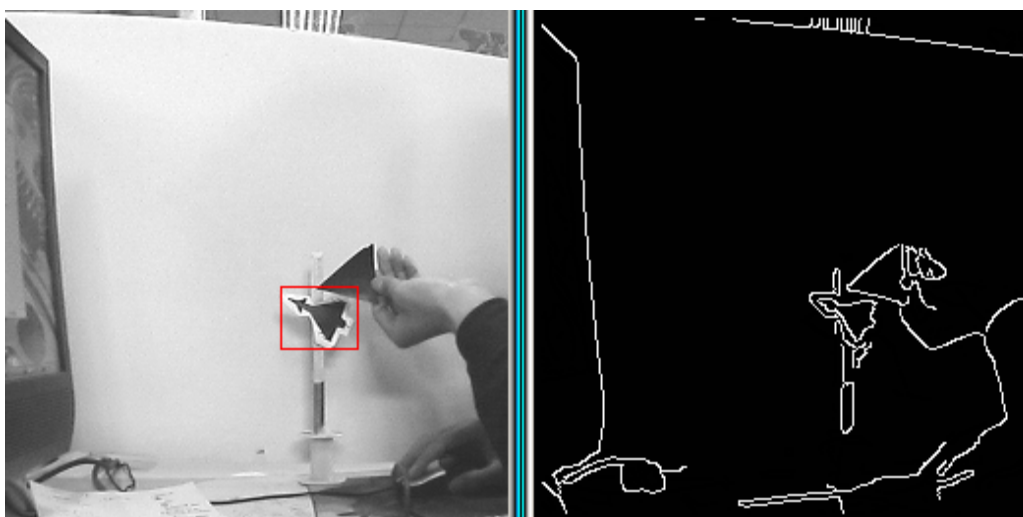


图 6.3 部分 Hausdorff 距离匹配实验

由图可知，部分 Hausdorff 距离匹配，只关心模板的哪些部分得以匹配，对目标被遮蔽或阴影等干扰有很好的抑制作用，且定位准确。

6.1.2 抗干扰实验

目标跟踪系统在实际应用中不可避免会受到外界干扰，导致误跟踪或者跟踪精度变差，下面对系统在实际中可能会遇到的情况进行实验分析。

(1) 光照干扰

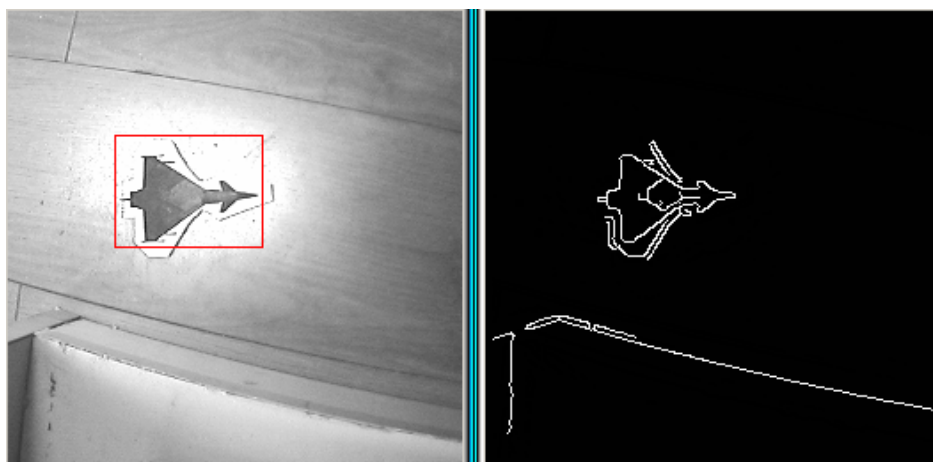


图 6.4 光照干扰实验

上图可得，环境光照使得目标灰度发生变化，还出现许多干扰边缘点，但是本设计的算法仍然能够精确跟踪目标。

(2) 遮挡干扰

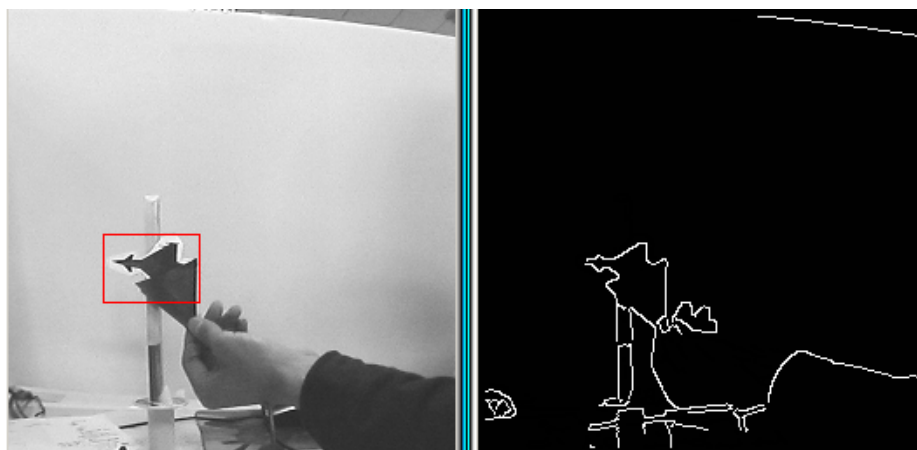


图 6.5 遮挡干扰实验

本设计算法对遮挡干扰有很好的抑制作用，不会跟丢或误跟。

(3) 阴影干扰

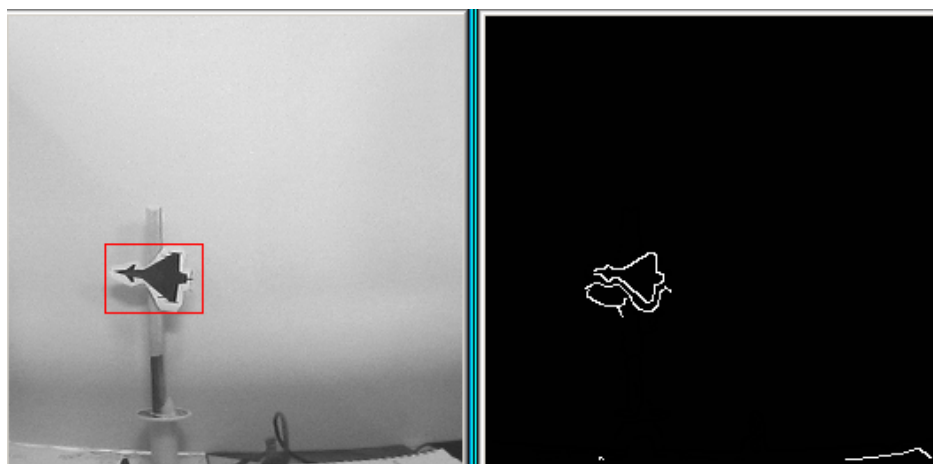


图 6.6 阴影干扰实验

当由于光照出现阴影时，产生干扰边缘点，但不会影响本算法的跟踪效果。

(3) 复杂背景干扰



图 6.7 复杂背景干扰实验

由图可知，本设计算法能够克服复杂背景的影响，抗干扰能力强。

6.2 目标跟踪实验

6.2.1 仿真实验

根据摄像机成像模型和视轴偏差角的简化模型，对目标跟踪云台系统进行仿真，验证模糊 PID 控制器的可行性和可靠性。

实验中摄像机空间坐标为(0,0,15)，目标初始坐标为(15,0,0)，即摄像机在高度为 15 米的空中，目标初始位置在摄像机正前方 15 米处，位于摄像机光轴上，摄像机成像平面与地面成 45° 角，既初始俯仰角为 45° 。目标在地面螺旋运动，其三维示意图和系统跟踪控制的 Simulink 仿真程序如下所示。

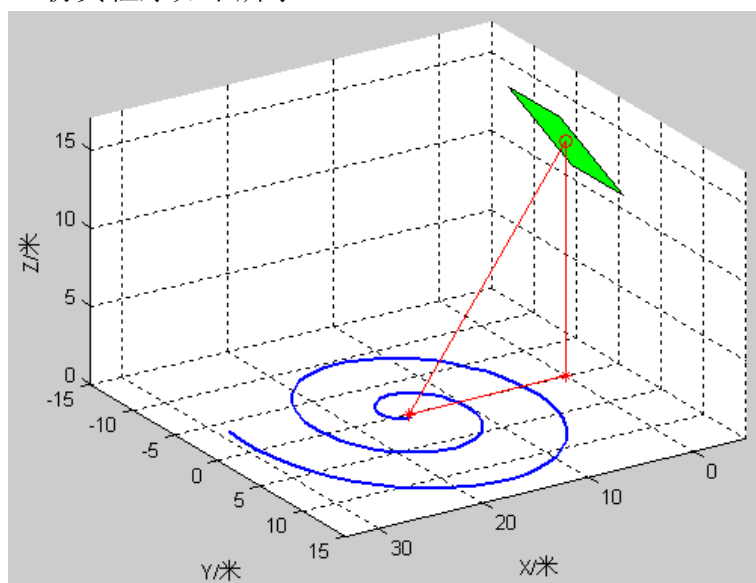


图 6.8 跟踪仿真三维示意图

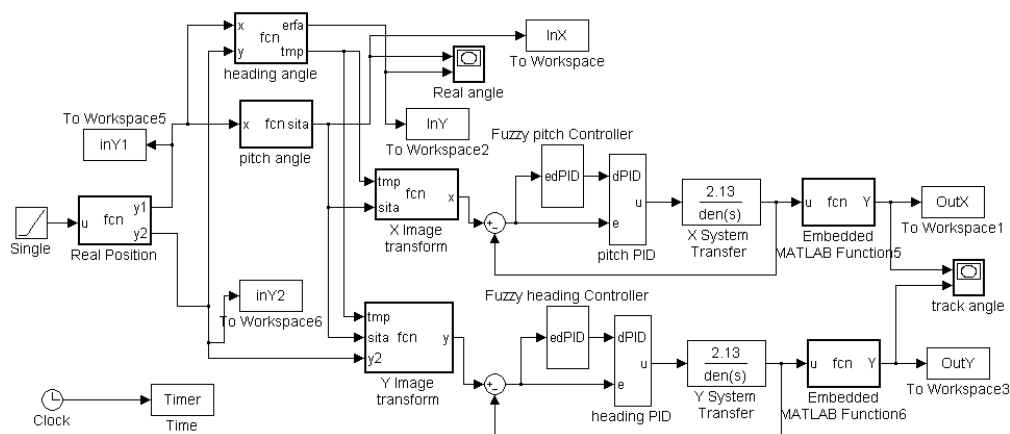


图 6.9 跟踪控制仿真的 Simulink 程序

图 6.9 中，首先产生目标在地面的螺旋运动信息，得出摄像机实际的视轴偏差角；然后由目标所处三维坐标系转换为摄像机的像素坐标系，即完成由三维变二维的过程，由目标的像素简化得到视轴偏差角；最后，将偏差角输入到模糊 PID 控制器，控制跟踪偏差角，输出后与实际的视轴偏差角作对比，并得到俯仰角和方位偏差角的跟踪误差角。实验结果如下图所示。

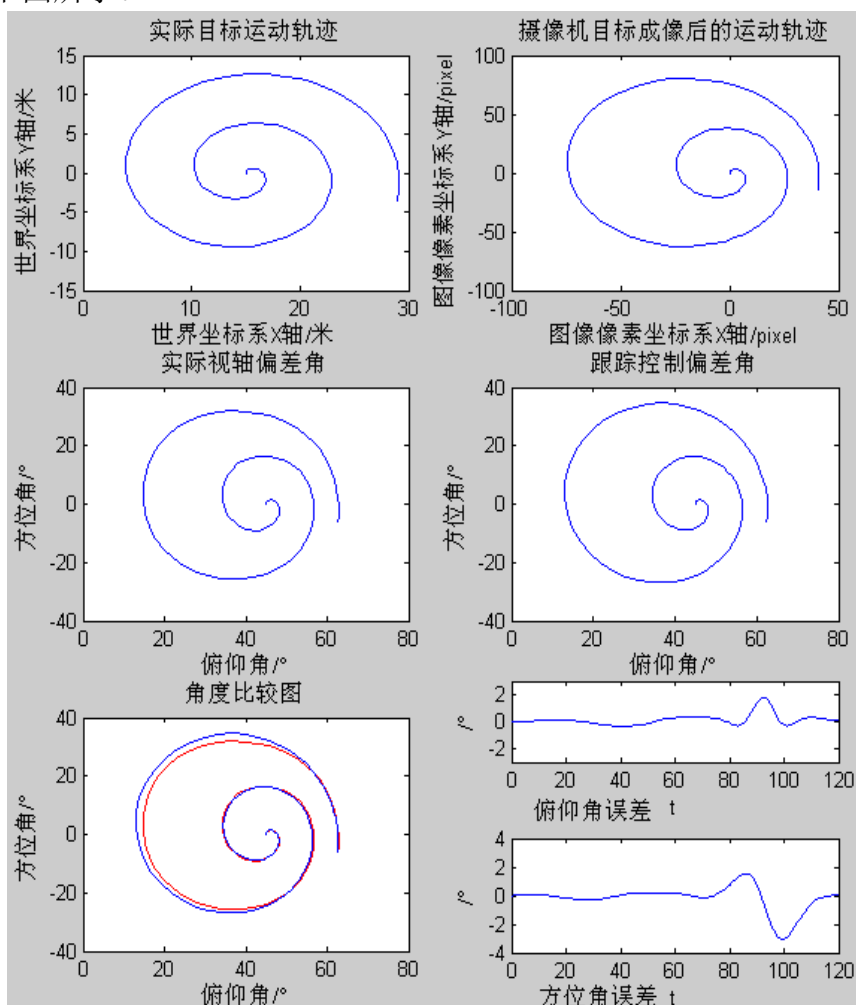


图 6.10 仿真实验结果

上图中第一行两图表示，由于俯仰角的原因，摄像机成像导致实际轨迹发生扭曲，表现在距离摄像机近处成像距离比实际距离宽，而远处成像距离比实际距离窄。

上图中第二、三行五图表示，模糊 PID 控制系统跟踪由目标像素坐标简化得到的视轴偏差角，其输出的视轴跟踪偏差角与实际的视轴偏差角基本重合，说明算法中视轴偏差角的简化求取是可行的，目标跟踪的模糊 PID 跟踪控制的稳定性、准确性、可靠性都较好。

最后两图表示跟踪过程中俯仰误差角和方位误差角的变化，其最大值不超过 4° ，产生误差的原因是目标视角过大导致视轴偏差角的简化计算出现误差，而实际跟踪中，使目标始终处在摄像机的光轴上，视轴偏差角的简化计算就不会出现误差。

6.2.2 实际实验

单纯的仿真不能反映出真实环境和系统的可靠性，因此，搭建实际实验平台，对无人视觉稳定云台系统进行实验，如下图所示。



图 6.11 无人机及视觉云台

在无人机实验平台上，对目标进行实时跟踪，需要说明的是，此实验中不需要目标始终在图像中心，而是设定一个监视范围，如下图所示，以目标偏离监视范围的差值作为反馈，控制跟踪目标，保证目标处在跟踪监视范围内。

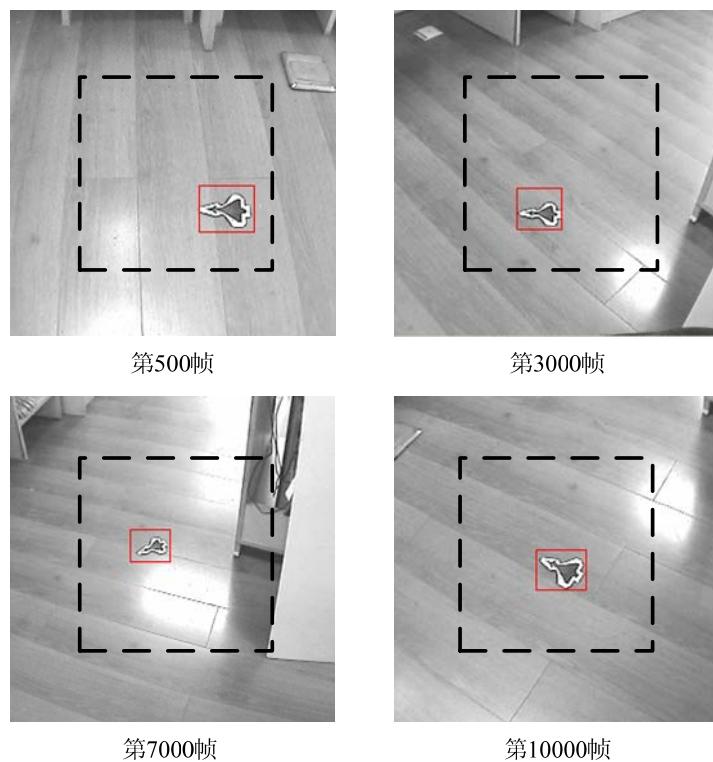


图 6.12 实验跟踪片段序列

经过多次实验和分析，软硬件得到进一步改进，解决了许多目标跟踪的干扰问题，达到满意的效果。

6.3 本章总结

本章针对无人机视觉稳定云台系统，设计不同的验证实验并分析实验结果。经过多次实验，对软硬件进行改进，成功解决控制策略、图像处理和软件算法等问题，最终取得预期效果和跟踪性能。

结 论

无人机视觉稳定运动是一个复杂的伺服系统，包括无人飞行器、陀螺稳定平台和视觉跟踪三个方面，其涉及到惯性导航、伺服控制和图像处理等诸多学科。实际应用中系统受到外界的干扰，必须要具有极高的稳态精度和优秀的动态品质，能够准确的识别和跟踪目标，这对跟踪控制方法和系统的软硬件设计都有很大的挑战。

通过对相关课题的资料查阅和研究设计，最终实现了视觉云台对目标的跟踪和控制，主要在以下几个方面取得研究成果：

（1）搭建云台稳定系统和图像处理系统，分析系统的可行性，选取系统需要的电子器件；

（2）对云台稳定环进行频域分析，设计比例超前校正环节并仿真比较校正前后的性能；

（3）针对目标跟踪的特点，设计模糊 PID 控制器，仿真分析其性能并在具有模糊指令的处理器上用软件实现；

（4）对现有的跟踪算法分析并归类，提出适合本系统的目标跟踪算法，同时，使用 FPGA 对图像进行采集控制和预处理，得到图像的边缘。

视觉跟踪和云台稳定都是极复杂的系统工程，目前国内在这方面的成绩较发达国家还有一点差距，因此需要不断的努力研究和探索分析。从理论分析到样品实验再到实际的成品，是一个长期的过程，需要对各方面研究和改进。本课题还可以在以下几个方面进行深入研究：

（1）寻找更好的系统辨识方法建立更准确的系统模型，对仿真分析和控制器设计都有促进作用。

（2）选取更加精密的器件和高运算速度、高可靠性的处理器，实现更佳的图像处理和目标跟踪算法。

（3）研究更好的伺服控制方法，此外对控制回路设计时遇到的问题进行更深层次的研究。

参考文献

- [1] Canals R, Roussel A, Famechon J-L, et al. A biprocessor-oriented vision based target tracking system [J]. Industrial Electronics, IEEE Transactions on, 2002, 49(2): 500-506P
- [2] Lipton A J, Fujiyoshi H, Patil R S. Moving Target Classification and Tracking from Real-time Video[C]. Proceeding of IEEE Workshop on Applications of Computer Vision(WACV), Princeton NJ, October 1998, 8-14P
- [3] Efros AA, Berg AC, Mori G, Malik J. Recognizing Action at a Distance[C]. International Conference on Computer Vision, 2003, Vol. 43(1), 45-68P
- [4] Cohen I, Medioni G. Detecting and Tracking Moving Objects in Video from an Airborne Observer [A]. DARPA Image Understanding Workshop, IUW98, Monterey, November 1998
- [5] 秦博, 王蕾. 无人机发展综述[J]. 飞航导弹, 2002 (8): 4-10 页
- [6] 马凌, 朱爱平. 舰载无人机发展综述[J]. 飞航导弹, 2009 (11): 36-41 页
- [7] 任清论. 微型飞行器中视觉跟踪系统的研究及应用[D]. 上海: 上海大学, 2004: 1-57 页
- [8] 丁卫. 基于超小型无人机的地面目标实时图像跟踪[D]. 上海: 上海大学, 2007: 1-117 页
- [9] 吴显亮, 石宗英, 钟宜生. 无人机视觉导航研究综述[J]. 系统仿真学报, 2010, 22 (z1): 62-65 页
- [10] 张智永. 移动载体稳定跟踪平台测控技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002: 1-30 页
- [11] 辛哲奎, 方勇纯. 无人机地面目标跟踪系统的建模与控制[J]. 高技术通讯, 2009, 19 (4): 398-403 页
- [12] 辛哲奎, 方勇纯, 张雪波. 小型无人机地面目标跟踪系统机载云台自适应跟踪控制 [J]. 控制理论与应用, 2010, 27 (8): 1001-1006 页
- [13] 范保杰, 朱琳琳, 崔书平, 李向军, 唐延东. 旋翼无人机视觉跟踪系统[J]. 红外与激光工程, 2011, 40 (1): 149-152 页
- [14] 杨依光. 摄像稳定平台研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 1-81 页
- [15] 傅湘国. 地面目标低空跟踪伺服云台控制系统研究[D]. 上海: 上海大学, 2006: 1-72 页
- [16] 王芳菲. 两自由度稳定平台的控制策略分析[D]. 大连: 大连海事大学, 2009: 1-69 页

- [17]周璇. 陀螺稳定平台数字控制系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008: 1-55 页
- [18]任远航. 陀螺稳定伺服平台设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 1-66 页
- [19]魏春雨. 移动视频监控中的云台跟踪系统[D]. 天津: 河北工业大学, 2009: 1-32 页
- [20]姬伟. 陀螺稳定光电跟踪平台伺服控制系统研究[D]. 南京: 东南大学, 2006: 1-117 页
- [21]李东明,党纪红,郝颖. 惯性平台稳定回路的双闭环控制[J]. 应用科技, 2003, 30 (8): 48-50 页
- [22]秦永元. 惯性导航[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [23]李尊民. 电视图像自动跟踪的基本原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [24]杨睿. 机载随动稳定平台伺服控制系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009: 1-71 页
- [25]李培华. 序列图像中运动目标跟踪方法[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [26]章毓晋. 图像工程[M]. 2nd ed. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [27]侯志强,韩崇昭. 视觉跟踪技术综述[J]. 自动化学报, 2006, 32 (4): 603-617 页
- [28]杨戈,刘宏. 视觉跟踪算法综述[J]. 智能系统学报, 2010, 5: 95-105 页
- [29]陈远祥. 视频图像运动目标跟踪技术的研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2010: 1-65 页
- [30]张如礁. 一种噪声视频序列中视频对象的分割方法[D]. 济南: 山东大学, 2008: 1-52 页
- [31]李凤玲. 基于图像序列的运动目标检测与跟踪算法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 1-99 页
- [32]王书朋. 视频目标跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 1-107 页
- [33]肖思兴. 复杂场景下的运动目标检测与跟踪算法研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2009: 1-65 页
- [34]王迺波. 基于图像识别的运动目标检测与跟踪系统[D]. 大连: 大连理工大学, 2009: 1-58 页
- [35]宋家慧. 图像跟踪系统的研制及跟踪算法的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005: 1-59 页
- [36]张华. 运动目标跟踪算法的若干方法研究[D]. 南京: 南京理工大学, 2008: 1-63 页
- [37]陈潇. 基于特征的视频跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2008: 1-53 页
- [38]沈晓芳. 相关跟踪算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009: 1-55 页

- [39]张强. 图像匹配算法研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2006: 1-59 页
- [40]吉训生. 硅微陀螺漂移信号处理方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2008: 1-118.
- [41]陆芳,刘俊. 卡尔曼滤波在陀螺仪随机漂移中的应用[J]. 微计算机信息, 2007, 23(23): 222-224 页
- [42]朱晓宏,邵冬明,游道华. 参数自整定 PID 模糊控制器的设计及 Simulink 仿真[J]. 汽车科技, 2003 (1): 10-12 页
- [43]姬伟,李奇. 陀螺稳定平台视轴稳定系统自适应模糊 PID 控制[J]. 航空学报, 2007, 28 (1): 191-195 页
- [44]徐永权,曾碧. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1995 页
- [45]马强,高岚,胡有为,李小泉. 一种复杂背景下图像匹配的快速算法[J]. ITS 通讯, 2005 (3): 10-12 页
- [46]张桂林, 张天序, 魏洛刚, 谢先明. 基于边缘特征的运动目标提取与跟踪[J]. 华中理工大学学报(社会科学版), 1994 (5): 42-45 页
- [47]张云峰,宋建中. 利用图像边沿特征实现相关跟踪[J]. 仪器仪表学报, 2004, 25 (z1): 698-699 页
- [48]董鸿燕. 边缘检测的若干技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008: 1-133 页
- [49]刘建磊. 边缘检测的自适应算法研究[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2007: 1-35 页
- [50]陈宇云. 灰度图像的边缘检测研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2009: 1-72 页
- [51]李俊山,谭园园,张媛莉. SSDA 的改进算法[J]. 电光与控制, 2007, 14 (2): 66-68 页
- [52]米长伟,刘晓利,徐明友. 基于 SSDA 的改进算法[J]. 弹箭与制导学报, 2004, 24 (1): 85-87 页
- [53]王文成. 基于 Hausdorff 距离的轮廓线匹配[D]. 西安: 西安理工大学, 2007: 1-41 页
- [54]刘福新,杜世培,陈益强. 基于改进 Hausdorff 距离的人脸匹配方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43 (35): 169-171 页
- [55]刘珂,张宪民,付永会. 一种改进的 Hausdorff 距离目标跟踪算法[J]. 微计算机信息, 2007, 23 (8): 237-238 页
- [56]张良国,吴江琴,高文,姚鸿勋. 基于 Hausdorff 距离的手势识别[J]. 中国图象图形学报 A 辑, 2002, 7 (11): 144-150 页
- [57]车武军. 距离变换与中轴变换在变形问题中[D]. 浙江: 浙江大学, 2003: 1-123 页
- [58]黄杰华,李德强. 基于先验模板与更新模板的目标跟踪[J]. 红外与激光工程, 2007, 36 (z2): 213-215 页
- [59]陈远炫,裴海龙,陈勇. 基于微惯性测量单元的导航系统研究[J]. 自动化与仪表, 2009,

24 (10): 1-5 页

- [60]黄孝明,陈锡爱. 应用于自动化生产线的视觉机器人系统[J]. 可编程控制器与工厂自动化, 2005,12: 104-106 页
- [61]姬伟,李奇. 陀螺稳定平台伺服系统非线性特性补偿控制[J]. 电气传动, 2005,7 (35): 31-34 页
- [62]刘振高. MRH 三维航姿仪的研究[D]. 北京: 北京机械工业学院, 2007: 1-78 页
- [63]邹华. 计算机视觉中的摄像机自标定[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2005: 1-65 页
- [64]杨景照. 观瞄仪稳定平台控制系统研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009
- [65]何丽芳. 光纤陀螺温度控制及补偿技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2009: 32-34 页
- [66]许寰. 智能小车的运动控制系统研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009: 13-15 页
- [67]金刚. 自适应 Canny 算法研究及其在图像边缘检测中的应用[D]. 浙江: 浙江大学, 2009: 1-2 页
- [68]李超. 静态图像感兴趣区域提取关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2007: 13-18 页
- [69]李群林,刘波峰,肖湘等. 使用照相法测量汽轮机湿蒸汽中水滴尺寸的研究[J]. 中国仪器仪表, 2006, 12: 66-68 页
- [70]刘笑楠. 计算机视觉防撞系统中图像特征提取算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2004

攻读硕士学位期间发表的论文和取得的科研成果

- [1] 曾建辉, 孟恭. OpenCV 边缘检测算法的 FPGA 实现. 2011 哈尔滨工程大学自动化学
院学术年会.已录用

致 谢

本论文的撰写是在曾建辉老师的悉心指导下完成的。曾建辉渊博的知识，严谨的治学态度、深邃的洞察力和高尚的人格使我受益颇深，您不仅教给我学术和科研上的知识，更让我懂得为人处事的道理。硕士期间所学到的知识将是我一生的财富，曾老师不仅在毕业设计的过程中给我细心的帮助和热心的指导，而且在撰写论文时给予了无微不至的关怀，在此特向尊敬的曾老师表示深深的敬意和诚挚的感谢！

回想在 402 教研室的点点滴滴，感触颇多。这个大家庭的每一位老师，每一位师兄、师姐、师弟、师妹都将是我一生最珍贵的记忆。我要感谢高延滨老师，李光春老师，孙华老师，何昆鹏老师，魏延辉老师，胡文彬老师，张庆老师，霍亮老师，还有梁海波师兄和郭立东师兄，能得到你们的帮助和指点，是我一生的荣幸。

感谢每天和我一起工作学习的兄弟们，他们是刘伟，郭航航，王璐，张俊山，周夏辉，赵现强等。祝福我们的友谊天长地久。

感谢母校哈尔滨工程大学对我的教育和培养。研究所期间所学的一切是我一生都不可忽视的宝贵财富，在以后的人生道路上，我会时时以这段经历来勉励自己，继续攀登事业的高峰。

最后，我要感谢我的父母和家人，感谢我的女朋友，你们是我前行的动力和坚实的后盾，谢谢你们这么多年对我的支持！