

硕士学位论文

基于视觉伺服的无人机悬挂负载控制研究

VISUAL SERVO-BASED CONTROL OF UAV WITH A CABLE SUSPENDED LOAD

贾二平



哈尔滨工业大学

2016 年 12 月

国内图书分类号：TP242

国际图书分类号：621

学校代码：10213

密级：公开

工学硕士学位论文

基于视觉伺服的无人机悬挂负载控制研究

硕 士 研 究 生：贾二平

导 师：陈浩耀 副教授

申 请 学 位：工学硕士

学 科：控制科学与工程

所 在 单 位：深圳研究生院

答 辩 日 期：2016 年 12 月

授予学位单位：哈尔滨工业大学

Classified Index: TP242

U.D.C: 621

Dissertation for the Master Degree in Engineering

**VISUAL SERVO-BASED CONTROL OF UAV
WITH A CABLE SUSPENDED LOAD**

Candidate:	Jia Erping
Supervisor:	Assoc. Prof. Chen Haoyao
Academic Degree Applied for:	Master Degree in Engineering
Speciality:	Control Science and Engineering
Affiliation:	Shenzhen Graduate School
Date of Defence:	December, 2016
Degree-Conferring-Institution:	Harbin Institute of Technology

摘 要

近几年，带悬挂负载的多旋翼无人机系统因操作灵活、运动性能好和成本低等优点，在物流、建筑和农业等领域受到人们的普遍关注。但是由于带悬挂负载的无人机系统飞行过程中会受到负载的干扰，较纯粹无人机的控制复杂的多，因此近几年成为了无人机领域的研究热点。本文针对无人机悬挂负载的控制问题，提出了基于视觉伺服的方法，实现了无人机悬挂物负载系统的稳定性控制，并根据视觉定位技术实现负载的自主投放。

针对设计要求，本文在四旋翼无人机模型的基础上，采用 Euler-Lagrange 方法建立了多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，并将该模型运用到跟踪控制器设计中。由于无人机搬运和投放过程中，地面载物平台并非静止，因此针对这个问题，本文提出了利用视觉信息跟踪控制方法。考虑到无人机与地面移动目标距离问题，本文利用计算机视觉领域流行的 OpenTLD 和 AprilTag 跟踪算法，提出了自适应目标物跟踪策略：当无人机距离移动目标较远时，采用基于 OpenTLD 目标图像位置的视觉伺服控制器；当无人机距离移动目标较近且 AprilTag 能够被稳定地检测到时，利用 AprilTag 计算得到的目标位姿作为参考输入控制无人机飞行。由于悬挂负载会对无人机的控制产生严重干扰，因此本文在视觉伺服控制器的基础上，结合无人机-悬挂负载动力学模型，设计了基于视觉伺服输出参考的跟踪控制器，其中包括无人机和悬挂负载的位置控制环、悬挂负载的姿态控制环及无人机的姿态控制环三部分。

为了验证所提出无人机悬挂搬运方法，本文利用 Gazebo 动力学引擎搭建了六旋翼无人机-悬挂负载系统仿真平台，并在该平台下对地面运动目标进行了跟踪。实验结果表明视觉伺服控制器能够稳定地跟踪地面运动目标，同时快速有效地稳定负载的摆动。最后通过 MATLAB 验证了视觉伺服跟踪控制器对负载的摆动有较好的控制效果。

本文对于单个无人机悬挂负载搬运的研究可以扩展到多无人机的协作负载搬运、悬挂负载轨迹规划跟踪控制等方面的研究，对未来对无人机搬运领域的深入研究具有重要意义。

关键词: 无人机-悬挂负载系统；动力学模型；视觉伺服控制；飞行控制器设计

ABSTRACT

In recent years, the multi-rotor unmanned aerial vehicle (UAV) system with a suspended load has attracted increasing attention in logistics, construction and agriculture due to the advantages of UAV's flexible operation, good performance and low cost. However, the UAV system with a suspended load is seriously disturbed by the load during flight, and thus it is much more complex than the UAV control. To solve the control problem of UAV with a suspended load, a method based on visual servo is proposed to realize the stability control of the UAV load system and achieve self-delivery of the load according to the visual positioning technology.

Contraposing the design requirements, the dynamic model of multi-rotor UAV with a suspended load system is established by using Euler-Lagrange method; the model is applied to the design of the tracking controller. Because the base platform is not stationary during the process of UAV transportation and delivery, this dissertation proposes a visual servo tracking control method to solve the problem. Considering the distance between UAV and the ground moving target, an adaptive target tracking strategy is presented by utilizing the OpenTLD and AprilTag tracking algorithms. When the UAV is far away from the moving target, the visual servo controller based on the OpenTLD is used. When the UAV is close to the moving target and the AprilTag can be detected stably, the target position calculated by the AprilTag is used as reference input to UAV flight controller. As the suspension load can cause serious interference to the control of unmanned aerial vehicles, the dissertation designs a multi-closed-loop PD controller; it is designed based on the visual-servo controller by combining the dynamic model of UAV and load. The designed controller includes a load position control loop, a load attitude control loop and a UAV attitude control loop.

In order to verify the proposed UAV suspension transportation method, this dissertation applies Gazebo dynamic engine to build a simulation platform. The simulation results show that the visual servo controller can stably track the ground moving target, and stabilize the swing of the load rapidly and effectively. Finally, it is verified that the visual servo tracking controller has good tracking control effect by error analysis. In this dissertation, the research of transportation using UAV with suspended load can be extended to multiple UAVs transportations, and can provide interesting reference for the future research of UAV load transportation.

Keywords: UAV suspended load system, dynamic model, visual servo control, flight controller design

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	II
第 1 章 绪 论	1
1.1 课题研究背景及意义	1
1.2 无人机负载搬运技术研究现状	2
1.2.1 国内研究现状	2
1.2.2 国外研究现状	3
1.3 无人机视觉跟踪控制研究现状	5
1.3.1 国内研究现状	5
1.3.2 国外研究现状	5
1.4 本文主要研究内容	6
1.5 本文组织结构	7
第 2 章 多旋翼无人机-悬挂负载系统建模	8
2.1 建模基础	8
2.2 无人机-悬挂物系统动力学模型	10
2.2.1 绳子张力不为零的动力学模型	11
2.2.2 绳子张力为零的动力学方程	13
2.3 混合模型	14
2.4 本章小结	14
第 3 章 移动目标的视觉跟踪	15
3.1 OpenTLD 跟踪算法	15
3.2 AprilTag 跟踪定位算法	16
3.3 本章小结	21
第 4 章 视觉伺服控制器设计	22
4.1 IBVS 控制器设计	22
4.2 跟踪控制器设计	26
4.2.1 无人机的姿态跟踪误差	26
4.2.2 悬挂负载的姿态跟踪误差	27
4.2.3 无人机和悬挂负载的位置跟踪误差	28
4.2.4 跟踪控制器设计	29
4.3 视觉伺服控制器设计	31

4.4 本章小结	32
第 5 章 仿真实验	33
5.1 仿真平台搭建.....	33
5.2 结果及分析	35
5.2.1 跟踪控制分析.....	35
5.2.2 负载控制分析.....	39
5.3 本章小结	43
结论.....	45
参考文献	47
哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限	51
致 谢	52

第 1 章 绪 论

1.1 课题研究背景及意义

无人驾驶飞机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）简称为无人机，是指一种不载人的、遥控或自主飞行的飞行器。常见的无人机一般为固定翼和旋翼两大类。近年来，随着新材料、微机电、计算机技术等的发展，微型旋翼无人机得到越来越多的关注。相比于固定翼，微型旋翼无人机有着自身独特的优点。微型旋翼无人机操控原理简单，只需要简单地控制遥控器就可实现无人机的垂直起飞、降落、悬停、偏航、横滚、俯仰等运动。同时微型旋翼无人机质量轻、个体小、结构简单、灵活性好、零部件毁坏也比较容易更换，而固定翼的零件往往是多而大，相对复杂。

基于无人机自身的优点，微型旋翼无人机深受广大研究者的喜爱，微型旋翼无人机的应用也逐渐增多。在微型旋翼无人机中，多旋翼无人机的用途最广。除了常见的航拍、农业植保、灾难救援^[1]、环境监测外，多旋翼无人机还在未知环境感知、货物搬运、三维重构、建筑等方面拥有巨大的应用前景，如图 1-1 所示为无人机在运输、农业植保、救援、航拍方面的应用。



图 1-1 无人机的应用

随着新型电池、无线充电、混合动力、定位导航、避障、微型雷达等技术的发展，多旋翼无人机的性能会更加强大，相比于固定翼的优势会更加明显，也更具备研究价值。本文主要针对多旋翼无人机-悬挂负载的搬运控制技术进行研究。这种应用常见于军事领域，飞行员控制载人直升机将货物从一个地方搬运到另外一个地方，如图 1-2 所示。由于无人机系统本身是一种高度非线性且不稳定的动力学系统，增加的悬挂负载会加重无人机系统的不稳定性，这给控制器的设计带来很大困难。同时，悬挂负载也会给无人机的控制操作带来一些危险，尤其是在一些杂乱或是人类难以到达的环境，如人口密集的城市、灾难现场等。悬挂负载对无人机的干扰很可能导致无人机飞行不稳定，甚至可能导致灾难的发生，所以必须对悬挂负载的干扰加以控制。目前国外已经有很多文献对无人机-悬挂物系统的动力学模型^[2]进行了研究，尝试使用自动控制技术来降低悬挂负载对无人机的影响。本课题正是在基于这样的现实背景和意义下提出来的。本文针对在货物搬运过程中无人机-悬挂负载系统的控制问题，提出了基于视觉伺服的控制方法，设计了悬挂负载的控制器，实现了无人机-悬挂负载系统的稳定性控制，并根据视觉定位技术实现负载的自主投放。针对在负载搬运过程中所使用的主要技术，下面将对国内外学者在无人机搬运和无人机视觉伺服控制技术两个方面的研究现状进行分析。



图 1-2 直升机悬挂负载搬运

1.2 无人机负载搬运技术研究现状

1.2.1 国内研究现状

国内对多旋翼无人机的研究起步比较晚，研究方向还较为单一，但是国内对四旋翼无人机控制技术研究仍有不少优秀的成果。

国防科学技术大学的王俊生^[3]设计了一种四旋翼无人机飞行控制系统，利

用牛顿-欧拉（Newton-Euler）方程推导了四旋翼无人机的运动学方程，研究了将跟踪微分器（TD）和自适应模糊 PI 滑模控制（PI-AFSMC）相结合的无人机姿态控制算法（TD-PI-AFSMC），实现了四旋翼无人机的姿态增稳控制。哈尔滨工业大学的王树刚^[4]分析了四旋翼无人机的动力学特性，建立了四旋翼无人机低速飞行时的非线性动力学模型，设计了 H_∞ 回路成形控制器。上海交通大学的刘焕晔^[5]首先设计了四旋翼无人机的双环 PID 控制器，内环为无人机的姿态控制，外环为无人机的位置控制，同时介绍了基于 Backstepping 方法的自适应控制系统，最后经过对比，证明了基于 Backstepping 方法的有效性。天津大学的刁琛^[6]提出了两种控制器设计方法：一种是在四旋翼无人机动力学模型和参数已知情况下，设计了基于李雅普诺夫理论和 Backstepping 方法的控制器，实现了位置和偏航角的控制；另外一种是在四旋翼无人机动力学模型已知，参数未知情况下，提出了将参数自适应和非线性 Backstepping 方法相结合的控制方法，实现了位置和偏航角的控制。浙江大学的李伟荣等在八旋翼无人机-悬挂负载系统的线性化模型，设计了 PID 串级控制器，实现负载的缓慢搬运^[7]。北京航空航天大学 S. Dai 与乔治华盛顿大学的 T. Lee 针对无人机-悬挂负载系统的负载未知，而引起的控制发散问题，提出了基于回顾成本的自适应控制方法^[8]。

实际应用中，主要是国内的顺丰和京东等公司在做测试研究，目的是通过多旋翼无人机运输快递，主要用于偏远区域的配送，以此提高配送效率，同时减少人力资源的成本。

1.2.2 国外研究现状

相比于国内来说，国外对无人机的搬运的研究较为深入，目前已经取得了不错的研究成果。早期的货物搬运都是飞行员控制直升机实现货物搬运。而由于旋翼无人机自身结构优点以及旋翼无人机的广泛使用，近几年开始了旋翼无人机的搬运研究。无人机的控制算法的研究已经取得了很不错的成果。比如，Erding Altuk 等人^[9]研究了旋翼无人机的动力学模型，提出了采用双摄像头估计无人机位姿的方法，并设计了双控制器的方法，PD 控制器控制无人机的高度和偏航角，Backstepping 控制器控制无人机的横滚角（roll）和俯仰角（pitch）。S. Bouabdallah 等人^[10]提出了 PID 控制和 LQ 控制这两种非模型控制方法，所以目前有很多优秀的无人机控制算法供研究者参考。但是这些控制算法很难直接应用到带悬挂负载的无人机控制中，因为悬挂负载的摆动会严重干扰无人机的飞行控制。近年来，许多研究人员开始将无人机的控制和悬挂负载的控制结合到一起考虑。

H. Omar 等人^[11]利用模糊控制理论的设计了一种反摆动控制器，将直升机负载系统的非线性动力学方程在悬停处线性化，由此产生的线性模型用于设计跟踪直升机的位置的 LQR 控制器。这个反摆动控制器还作用于该直升机的位置跟踪控制器。该方法使用集群技术构造模糊规则，模糊控制的输入是负载摆动角度和摆动速率，模糊控制的输出是负载摆动造成的直升机重心偏差的导数。但是该控制器只适用于直升机负载系统。

I. Palunko 等人^[12]提出了一种将非线性的悬挂负载模型在轨迹点附近线性化的方法，得到一个线性时变模型（LTV），然后用动态规划的方法生成四旋翼无人机和悬挂负载的运动轨迹。但是该方式由于悬挂负载的摆动会导致多旋翼无人机的重心发生变化。在该成果的基础上，I. Palunko 于 2012 年又提出了一种用动态规划生成最优的运动轨迹的方法^[13]，同时设计了一个自适应控制器，解决了上述无人机重心变动的问题，并证明了该自适应控制器能够准确地跟踪多旋翼无人机的位置和姿态。但是该方法需要提前规划好搬运轨迹，不能达到实时搬运的目的。

V. Kumar 等人^[14]在 2013 年提出了一种非线性控制方法。首先针对无人机-悬挂负载系统的稳定性问题，建立了多旋翼无人机-悬挂负载混合系统，该系统包含两种不同行为。一种是悬绳上张力为零时，悬挂负载做自由落体运动；另一种是悬绳上张力不为零时，无人机受到悬挂负载的影响。同时证明了在悬挂负载的位置作为输出时，该系统为微分平滑系统。微分平滑性质决定了这个系统的所有内部变量可以由某特殊的变量及其导数（称为平滑输出）来表示。最后设计了四旋翼的姿态、悬挂负载的位置和姿态的跟踪控制器，但是该方法仅限于在 2D 空间。当年 Kumar 将该方法扩展到 3D 空间^[15]。尽管使用微分平滑特性能够简化运动规划问题，保证所设计的路径的可行性。但是它仍然需要一个用于保持稳定的控制器。同时，微分平滑的平滑输出集需要人工推导，这个过程很费时，并且需要对系统的动力学等有深入的了解。

Alothman Y 等人^[16]在 2015 年针对四旋翼无人机-悬挂负载系统的搬运提出了一种线性二次型调节器（LQR）的控制方法。当无人机处于悬停时，在悬停点将无人机-悬挂负载系统的非线性动力学模型线性化，并和 PD 控制器比较，证明了其收敛速度。但是该方法只能在无人机处于悬停状态下使用。

C.de Crousaz 等人提出了一种迭代 LQG^[17]的方法，用其生成四旋翼无人机-悬挂负载系统的初始控制轨迹^[18]。最初的控制轨迹通过仿真得到，之后利用强化学习算法在线学习试验。对任意非线性成本函数，iLQG 方法经过多次迭代最终返回局部最优的线性反馈控制器。在每次迭代过程中，系统是在标准轨迹附

近线性化，非线性成本函数的二阶近似经过最小化得到一个新的控制输出。但是该方法需要提前规划好运动轨迹，不能够实时，而且在搬运过程中运动路线固定。

Aleksandra Faust 等人^[19]通过强化学习的方法生成悬挂负载的运动轨迹。为确保悬挂负载跟踪规划的参考轨迹，无人机需要学习自身运动轨迹。这个方法基于最小二乘迭代策略，是强化学习方法的一种。采用此方法的主要优点是不需要建立系统的模型，所以该方法较适合对模型复杂、难以建模的控制系统，并且该方法对噪声的影响更具鲁棒性，但是需要对特定的负载进行训练，而且不能够实时规划运动轨迹。

1.3 无人机视觉跟踪控制研究现状

1.3.1 国内研究现状

国内无人机视觉跟踪控制技术起步较晚，技术上相对落后，其主要集中在高校和研究所。经过近几年的快速发展，目前也有不少不错的成果。

中国科学院的赵晓光^[20]提出了一种基于视觉伺服的小型无人直升机地面移动目标跟踪控制系统。建立了无人直升机的速度动力学模型，根据模型和移动目标的图像信息，设计了无人直升机的视觉伺服控制系统，实现了对地面移动目标的跟踪，并在运动目标进行简单运动（如目标直线运动）和复杂运动（如 S 形运动）等情况验证了该方法的有效性。

国防科学技术大学的范才智^[21]设计了一种层级控制器，该控制器的外回路是通过图像特征估算无人直升机的期望位置，采用 PD 控制器作为无人机的高度环和姿态环，设计了两个模糊控制器作为无人机的水平位置环，控制无人机的 x 和 z 方向。该方法的优点是无须知道摄像头的内参和平移外参。

哈尔滨工业大学的姜运宇^[22]建立了无人直升机和目标的运动学模型以及云台控制系统的数学模型，定义了云台的跟踪误差，并通过卡尔曼滤波理论对运动目标的运动状态估计，得到了目标在惯性坐标系下的位置和速度，设计了云台和无人机的跟踪控制器，并在 Simulink 环境下证明了该控制器的效果。

1.3.2 国外研究现状

Heiko Helble 等人^[23]设计了一个 OATS（Oxford Aerial Tracking System）跟踪系统，该系统根据机载摄像头的视觉信息跟踪地面的移动目标。该系统通过地面站实现人机交互。用户通过地面站选择跟踪对象，随后系统进入跟踪模式。

其跟踪算法采用的是 Camshift 算法。如果在跟踪过程中目标丢失，则进入目标搜索模式，系统重新锁定跟踪的目标。

南加州大学的无人机团队 AVATAR 对无人机的视觉伺服跟踪控制^[24]、自主降落控制^[25]、视觉导航技术^[26]都进行了较为深入的研究。无人机首先通过 GPS 飞到目标上方，进入搜索模式，搜索目标，如果检测到目标就进入跟踪模式，将从图像获取的图像特征信息转化为控制信息，跟踪地面移动目标。结合光流法获取的无人机高度信息实现无人机的降落。

宾夕法尼亚大学的 Kumar 实验室提出了基于图像的视觉伺服方式完成高速空中无人机抓取的任务^[27]。通过在无人机上安装的摄像头获得图像，在图像上识别目标物并控制摄像头跟踪目标物，建立无人机位置和目标在图像中的位置的几何关系，并将标定过的图像上的目标映射到一个虚拟水平图像上来解耦无人机的姿态和图像位置。根据上面建立的几何关系，将无人机的动力学模型带入到图像空间，建立图像空间的动力学模型，并证明路径在在图像空间的微分平滑性。

Rafik Mebarki 等人^[28]针对无人机系统和机器臂系统，建立了这两个子系统之间的交叉耦合动力学。采用基于积分 Backstepping 方法设计了无人机和机械臂系统的联合控制器。通过视觉伺服技术，提供无人机和机械臂的控制速度作为视觉反馈量，使得无人机到达目标点。

但是这些视觉伺服控制的方法的共同点是没有加入悬挂负载的控制，并不适合本文的负载搬运系统，所以本文在视觉伺服控制的基础上加入负载的控制，在对地面运动目标实时跟踪的同时控制负载的摆动。

1.4 本文主要研究内容

本文研究的主要内容是根据视觉伺服控制技术实现无人机系统自主跟踪地面的运动平台，并将自身携带的悬挂负载自主的投放该平台上。围绕多旋翼无人机-悬挂负载系统对地面移动目标跟踪过程中涉及的动力学建模、视觉伺服控制和悬挂物控制器设计等技术难题，本文的研究内容主要包含以下四个方面。

(1) 由于悬挂负载的摆动会对无人机的控制产生严重的干扰，所以本文将多旋翼无人机和悬挂负载当作一个整体，采用 Euler-Lagrange 方法推导了多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，为后续跟踪控制器提供模型基础。

(2) 由于无人机搬运和投放过程中，地面载物平台并非静止，本文提出了利用视觉对其跟踪的方法。考虑到无人机与地面移动目标距离问题，本文利用计算机视觉领域流行的 OpenTLD 和 AprilTag 跟踪算法，提出了自适应目标物

跟踪策略：当无人机距离移动目标较远时，采用基于 OpenTLD 目标图像位置的视觉伺服控制器；当无人机距离移动目标较近且 AprilTag 能够被稳定地检测到时，利用 AprilTag 计算得到的目标位姿作为参考输入控制无人机飞行。

(3) 在视觉伺服控制器的基础上，结合无人机-悬挂负载动力学模型，设计了基于视觉伺服输出参考的跟踪控制器，其中包括无人机和悬挂负载的位置控制环、悬挂负载的姿态控制环及无人机的姿态控制环三部分。充分地利用悬挂负载的动力学模型及视觉估计的目标位姿信息，实现了无人机对移动目标的跟踪，同时减少了跟踪过程中悬挂负载的干扰，实现悬挂负载的稳定控制。

(4) 为了验证所提出无人机悬挂搬运方法，本文利用 Gazebo 动力学引擎搭建了六旋翼无人机-悬挂负载系统仿真平台，并在该平台下对地面运动目标进行了跟踪，实验结果表明视觉伺服控制器能够稳定跟踪地面运动目标，同时快速有效地稳定负载的摆动。最后通过 MATLAB 验证了视觉伺服跟踪控制器对负载的摆动有较好的控制效果。

1.5 本文组织结构

本文各章节的安排如下：

第一章为绪论，讨论了多旋翼无人机搬运的发展前景和意义，总结了国内外对无人机负载搬运和视觉跟踪控制的研究近况。

第二章采用 Euler-Lagrange 方法推导了多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，建立了无人机与悬挂负载的关系。然后考虑了在绳子张力为零情况下的动力学模型。

第三章分析了 OpenTLD 和 AprilTag 跟踪算法的优缺点，然后分别介绍了 OpenTLD 的跟踪器、检测器、学习器和 AprilTag 检测、定位原理，实现了对地面移动目标的跟踪，同时通过 AprilTag 定位得到了无人机期望的运动位置。

第四章首先根据 OpenTLD 算法提供的目标位置，设计了基于图像的视觉伺服控制器。然后定义了无人机的姿态、无人机和悬挂负载的位置、悬挂负载的姿态三种跟踪误差。根据第二章建立的无人机-悬挂负载系统的动力学模型，设计了多旋翼无人机姿态和悬挂负载位姿的跟踪控制器。该跟踪控制器为多闭环的非线性 PID 控制器，主要包括无人机和悬挂负载的位置控制环、悬挂负载的姿态控制环及无人机的姿态控制环三个部分。最后将基于图像的视觉伺服控制器、AprilTag 视觉定位和跟踪控制器结合，构成本文的视觉伺服控制器。

第五章在 Gazebo 软件中搭建了无人机、悬挂负载、绳子、移动目标的模型，并在该仿真环境中验证本文中的方法。

第 2 章 多旋翼无人机-悬挂负载系统建模

要实现负载搬运任务，需要控制无人机以及负载，所以本文需要确定无人机-悬挂负载系统的动力学模型。多旋翼无人机-悬挂负载控制系统由多旋翼无人机、负载和柔性绳子组成，这一章将根据无人机和悬挂负载之间是否存在耦合关系，推导多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，建立无人机和悬挂负载的关系，为后续跟踪控制器设计提供模型基础。

2.1 建模基础

为了方便对多旋翼无人机-悬挂负载系统动力学模型的推导，本文首先对推导过程中涉及的坐标系、常用物理量的定义进行简单的介绍。为了方便研究，本文将多旋翼无人机系统简化，简化后的多旋翼无人机系统如下图 2-1 所示。

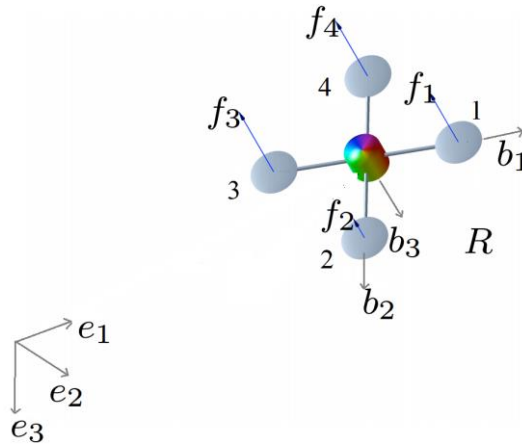


图 2-1 简化后的多旋翼无人机系统

图 2-1 中的向量 $\mathbf{e}_1 \triangleq [1, 0, 0]^T$, $\mathbf{e}_2 \triangleq [0, 1, 0]^T$, $\mathbf{e}_3 \triangleq [0, 0, 1]^T \in \mathbb{R}^3$ 分别为惯性坐标系的三个坐标轴， $\mathbf{b}_1, \mathbf{b}_2, \mathbf{b}_3$ 分别为机体坐标系的三个坐标轴。机体坐标系的原点位于多旋翼无人机的质量中心^[29]。机体坐标系的坐标轴 \mathbf{b}_1 和坐标轴 \mathbf{b}_2 位于四个旋翼上电机的中心构成的平面上，坐标轴 \mathbf{b}_3 的方向垂直于该平面向下。从机体坐标系到惯性坐标系之间的变换用旋转矩阵 $\mathbf{R} \in \text{SO}(3)$ 来表示， \mathbf{R} 属于特殊正交群 $\text{SO}(3) \triangleq \{\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{3 \times 3} \mid \mathbf{R}^T \mathbf{R} = \mathbf{I}_3, \det \mathbf{R} = 1\}$ 。 f_i 表示每个螺旋桨上的上升力。在建模之前首先定义一些推导动力学模型所用到的变量，如表 2-1 所示。

表 2-1 无人机及悬挂负载的变量

参数名称	参数值
无人机质量	$m_Q \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的惯性矩阵	$J_Q \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$
机体坐标系到惯性坐标系的旋转矩阵	$R \in \text{SO}(3)$
无人机角速度	$\Omega \in \mathbb{R}^3$
无人机位置	$x_Q \in \mathbb{R}^3$
无人机线速度	$v_Q \in \mathbb{R}^3$
无人机在机体坐标系整体上升力	$f \in \mathbb{R}$
无人机在机体坐标系下的力矩	$M \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载线速度	$v_L \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载角速度	$w \in \mathbb{R}^3$
悬挂负载质量	$m_L \in \mathbb{R}$
绳子长度	$l \in \mathbb{R}$
悬挂负载位置	$x_L \in \mathbb{R}^3$
绳子方向	$q \in S^2 \subset \mathbb{R}^3$

在这里定义的无人机和悬挂负载的位置、角速度和线速度都是位于惯性坐标系。假设作用于每个螺旋桨上的上升力直接可控，在不考虑电机和螺旋桨上的动力学的情况下，则作用于无人机上合力的大小为 $f = \sum_{i=1}^{i=4} f_i$ ，其方向沿 b_3 的反方向。

根据旋转矩阵 R 的定义，机体坐标系的第 i 个坐标轴 b_i 在惯性坐标系下的方向可由 Re_i 确定，所以 f 在惯性坐标系下为 $-fRe_3$ 。假设图 2-1 中的 1 号和 3 号电机顺时针方向旋转，1 号和 3 号电机逆时针方向旋转的情况下，沿 $-b_i$ 方向会产生一个正的 f_i ，则每个电机上产生的力矩为 $\tau_i = (-1)^i c_\tau f_i$ 。在上面的假设下，无人机的配置矩阵为：

$$\begin{bmatrix} f \\ M_1 \\ M_2 \\ M_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & -d & 0 & d \\ d & 0 & -d & 0 \\ -c_\tau f & c_\tau f & -c_\tau f & c_\tau f \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

式中 d ——无人机的质量中心到电机中心的距离；

c_τ ——力矩常数；

M_i ——无人机电机力矩。

定义 $\mathbf{M} \triangleq [M_1, M_2, M_3]^T$ ，一旦求出合力 f 和总力矩 \mathbf{M} 的大小，由式 (2-1) 就可以确定每个电机上的作用力 f_i ，又有经验公式 $f_i = kw_i^2$ ，就可以得到每个电机上的转速，最终实现对无人机的控制。

2.2 无人机-悬挂物系统动力学模型

由于悬挂负载的摆动会影响无人机的飞行状态，同时无人机的运动会改变悬挂负载的运动，所以如何建立无人机和悬挂负载之间的耦合关系是该控制系统的难点。如图 2-2 所示为多旋翼无人机-悬挂负载系统简化后的结构图。图中沿绳子方向多了一个负载作用在绳子上的额外张力，该张力会增加多旋翼无人机欠驱动控制系统的自由度，增加控制器的设计难度。

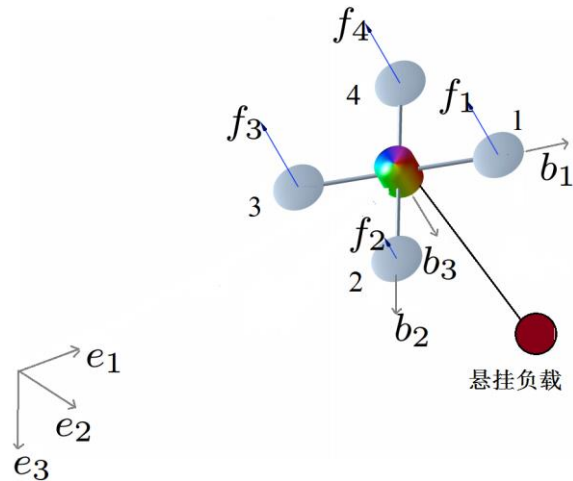


图 2-2 简化后的多旋翼无人机-悬挂负载系统

下面本文将在已有的多旋翼无人机动力学模型的基础上推导无人机-悬挂负载系统的联合动力学模型。为便于分析，对多旋翼无人机和悬挂负载作以下三个假设：

- (1) 多旋翼无人机和悬挂负载都是刚体且多旋翼无人机结构对称的；
- (2) 绳子质量和空气流动的影响可以忽略；

(3) 绳子是无弹性的，并且绳子的结点位于无人机的中心。

在目标跟踪过程中，绳子为绷紧状态的状态，绳子上张力不为零，无人机和负载之间存在耦合关系，无人机-悬挂负载系统有八个自由度。但是在负载降落过程中，绳子断开，绳子上张力为零，该系统就变成了无人机和悬挂负载两个独立的子系统。因此在绳子断开前后，无人机-悬挂负载系统的动力学模型发生了变化，而判断此状态变化的条件是绳子上的张力是否为零。下面将针对搬运过程中绳子张力是否为零，来推导无人机和负载的动力学模型。

2.2.1 绳子张力不为零的动力学模型

常用的求取无人机系统动力学模型的方法主要有 Newton-Euler 方法和 Euler-Lagrange 方法这两种。Newton-Euler 方法在建模时需要求取作用于刚体的力和力矩，若是有多刚体的系统，就很难对多个刚体之间相互作用的力和力矩建模^[30]。针对多个刚体的系统联合建模的问题，Euler-Lagrange 方法的原理是依靠机械系统的能量求取动力学模型，所以采用 Euler-Lagrange 方法对多旋翼无人机-悬挂负载系统建模就很有必要。本节将采用 Euler-Lagrange 方法对无人机-悬挂负载系统进行建模，求取跟踪过程中的无人机-悬挂负载系统动力学模型。根据上图 2-2，无人机、负载以及绳子的关系为：

$$\mathbf{x}_Q = \mathbf{x}_L - l\mathbf{q} \quad (2-2)$$

对式 (2-2) 求导，得到悬挂负载在机体坐标系下的线速度为：

$$\mathbf{v}_L = \dot{\mathbf{x}}_L \quad (2-3)$$

根据物理学知识和式 (2-3)，无人机-悬挂负载系统在惯性坐标系下的动能总和 Γ ：

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{1}{2}m_Q\mathbf{v}_Q \cdot \mathbf{v}_Q + \frac{1}{2}m_L\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \\ &= \frac{1}{2}m_Q(\mathbf{v}_L - l\dot{\mathbf{q}}) \cdot (\mathbf{v}_L - l\dot{\mathbf{q}}) + \frac{1}{2}m_L\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \\ &= \frac{1}{2}(m_Q + m_L)\mathbf{v}_L \cdot \mathbf{v}_L - m_Q l\mathbf{v}_L \cdot \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}m_Q l\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \frac{1}{2}\boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{J}_Q \cdot \boldsymbol{\Omega} \end{aligned} \quad (2-4)$$

其中，符号 \cdot 为点乘，表示对任意 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^3$ 满足 $\mathbf{x} \cdot \mathbf{y} = \mathbf{x}^T \mathbf{y}$ 。该总的动能总和 Γ 为无人机的平移动能以及旋转动能之和加上悬挂负载的动能。接着可以得到无人机-悬挂负载系统在惯性坐标系的势能总和 \mathcal{U} ：

$$\begin{aligned} \mathcal{U} &= m_Q g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_Q + m_L g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L \\ &= m_Q g \mathbf{e}_3 \cdot (\mathbf{x}_L - l\mathbf{q}) + m_L g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L \\ &= (m_Q + m_L) g \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{x}_L - m_Q g l \mathbf{e}_3 \cdot \mathbf{q} \end{aligned} \quad (2-5)$$

该系统总的势能总和 \mathfrak{U} 为无人机的势能加上悬挂负载的势能。进而，由拉格朗日公式 $L = \Gamma - \mathfrak{U}$ 得到 L 。对式 (2-4) 和 (2-5) 一阶泰勒展开，得到总的动能 Γ 和总的势能 \mathfrak{U} 的变分。

$$\begin{aligned}\delta\Gamma &= \Gamma(\mathbf{v}_L + \delta\mathbf{v}_L, \dot{\mathbf{q}} + \delta\dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\Omega} + \delta\boldsymbol{\Omega}) - \Gamma(\mathbf{v}_L, \dot{\mathbf{q}}, \boldsymbol{\Omega}) \\ &\approx \frac{\partial\Gamma}{\partial\mathbf{v}_L} \delta\mathbf{v}_L + \frac{\partial\Gamma}{\partial\dot{\mathbf{q}}} \delta\dot{\mathbf{q}} + \frac{\partial\Gamma}{\partial\boldsymbol{\Omega}} \delta\boldsymbol{\Omega}\end{aligned}\quad (2-6)$$

$$\begin{aligned}\delta\mathfrak{U} &= \mathfrak{U}(\mathbf{x}_L + \delta\mathbf{x}_L, \mathbf{q} + \delta\mathbf{q}) - \mathfrak{U}(\mathbf{x}_L, \mathbf{q}) \\ &\approx \frac{\partial\mathfrak{U}}{\partial\mathbf{x}_L} \delta\mathbf{x}_L + \frac{\partial\mathfrak{U}}{\partial\mathbf{q}} \delta\mathbf{q} \\ &= (m_Q + m_L)g\mathbf{e}_3 \cdot \delta\mathbf{x}_L - m_Q g l \mathbf{e}_3 \cdot \delta\mathbf{q}\end{aligned}\quad (2-7)$$

由于该系统满足拉格朗日-达朗贝尔 (Lagranged'Alembert) 原理，

$$\delta \int_0^\tau L dt + \int_0^\tau (\mathbf{M} \cdot \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 \cdot f \mathbf{Re}_3) dt = 0$$

其中， f 为无人机-悬挂负载系统总的上升力大小， \mathbf{M} 为无人机-悬挂负载系统在机体坐标系下的力矩， $\mathbf{W}_1 = \mathbf{R}^T \delta \mathbf{R}$, $\mathbf{W}_2 = \delta \mathbf{x}_Q = \delta \mathbf{x}_L - l \delta \mathbf{q}$ 为虚功，代入上式得：

$$\begin{aligned}& \int_0^\tau (f \mathbf{Re}_3 \cdot \delta \mathbf{W}_1 + \delta \mathbf{W}_2 + \delta\Gamma - \delta\mathfrak{U}) dt \\ &= \int_0^\tau (f \mathbf{Re}_3 \cdot (\delta \mathbf{x}_L - l \delta \mathbf{q}) + \mathbf{M} \cdot (\mathbf{R}^T \delta \mathbf{R}) + ((m_Q + m_L)\mathbf{v}_L - m_Q l \dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta \mathbf{v}_L \\ & \quad + (-m_Q l \mathbf{v}_L + m_Q l^2 \dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta \dot{\mathbf{q}} + \boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{J}_Q \cdot \delta \boldsymbol{\Omega} - (m_Q + m_L)g\mathbf{e}_3 \cdot \delta \mathbf{x}_L + m_Q g l \mathbf{e}_3 \cdot \delta \mathbf{q}) dt = 0\end{aligned}$$

经过化简得到：

$$\begin{aligned}& \int_0^\tau ((m_Q + m_L)\mathbf{v}_L - m_Q l \dot{\mathbf{q}}) \cdot \delta \mathbf{v}_L + (f \mathbf{Re}_3 - (m_Q + m_L)g\mathbf{e}_3) \delta \mathbf{x}_L dt \\ & + \int_0^\tau ((m_Q l^2 \dot{\mathbf{q}} - m_Q l \mathbf{v}_L) \cdot \delta \dot{\mathbf{q}} + (m_Q g l \mathbf{e}_3 - f l \mathbf{Re}_3) \cdot \delta \mathbf{q}) dt \\ & + \int_0^\tau (\boldsymbol{\Omega}^T \mathbf{J}_Q \delta \boldsymbol{\Omega} + \mathbf{M}(\mathbf{R}^T \delta \mathbf{R})) dt \\ & = 0\end{aligned}$$

式中这些无穷小变量满足^[31]：

$$\begin{aligned}\delta \mathbf{q} &= \boldsymbol{\varepsilon} \times \mathbf{q}, \boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbb{R}^3 \quad \text{S.T.} \quad \boldsymbol{\varepsilon} \cdot \mathbf{q} = 0 \\ \delta \mathbf{R} &= \left. \frac{d}{d\boldsymbol{\varepsilon}} \right|_{\boldsymbol{\varepsilon}=0} \exp \mathbf{R}(\boldsymbol{\varepsilon} \hat{\boldsymbol{\eta}}) = \mathbf{R} \hat{\boldsymbol{\eta}}, \boldsymbol{\eta} \in \mathbb{R}^3 \\ \delta \dot{\mathbf{q}} &= \dot{\boldsymbol{\varepsilon}} \times \mathbf{q} + \boldsymbol{\varepsilon} \times \dot{\mathbf{q}} \\ \delta \dot{\mathbf{R}} &= \dot{\mathbf{R}} \hat{\boldsymbol{\eta}} + \mathbf{R} \dot{\hat{\boldsymbol{\eta}}} \\ \delta \hat{\boldsymbol{\Omega}} &= \hat{\boldsymbol{\Omega}} \boldsymbol{\eta} + \hat{\boldsymbol{\eta}}\end{aligned}$$

其中，符号 \wedge 表示对任意 $\mathbf{x}, \mathbf{y} \in \mathbb{R}^3$ 满足 $\hat{\mathbf{x}}\mathbf{y} = \mathbf{x} \times \mathbf{y}$ ，表示将一个向量转化为反对

称矩阵，对任意向量 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, x_3]^T$ ，满足 $\hat{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}$ 。经过化简得到无

人机-悬挂负载系统在 $Q=SE(3) \times S^2$ 空间的动力学方程^[32]如下：

$$(m_Q + m_L)(\dot{\mathbf{v}}_L + g\mathbf{e}_3) = (\mathbf{q} \cdot f\mathbf{Re}_3 - m_Q l(\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}}))\mathbf{q} \quad (2-8)$$

$$\dot{\mathbf{q}} = \mathbf{w} \times \mathbf{q} \quad (2-9)$$

$$m_Q l \dot{\mathbf{w}} = -\mathbf{q} \times f\mathbf{Re}_3 \quad (2-10)$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\Omega}} \quad (2-11)$$

$$\mathbf{J}_Q \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (2-12)$$

从动力学方程式（2-12）看出无人机的姿态和悬挂负载的位置、悬挂负载的姿态解耦，同时从式（2-8）和式（2-10）看出悬挂负载的位置和悬挂负载的姿态解耦，并且重力并不影响悬挂负载的姿态。悬挂负载的姿态动力学式（2-10）等价于：

$$m_Q l \ddot{\mathbf{q}} + m_Q l(\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}}) = \mathbf{q} \times (\mathbf{q} \times f\mathbf{Re}_3) \quad (2-13)$$

为了建立混合模型的转换，本文选取向量 $\mathbf{X}_n = \{\mathbf{x}_L, \mathbf{q}, \mathbf{R}, \mathbf{v}_L, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{w}\}$ 作为无人机-悬挂负载系统状态量，将上面的动力学方程简化为：

$$\dot{\mathbf{X}}_n = \mathbf{f}_n(\mathbf{X}_n) + \mathbf{g}_n(\mathbf{X}_n)\mathbf{u} \quad (2-14)$$

式中 \mathbf{u} 表示无人机-悬挂负载系统的输入，

$$\mathbf{u} = \{f, \mathbf{M}\} \quad (2-15)$$

2.2.2 绳子张力为零的动力学方程

当负载降落时，绳子断开，绳子上的张力为零，无人机和悬挂负载分别成为两个独立的子系统，悬挂负载将做自由落体运动。该情况下的无人机和悬挂负载的动力学方程如下：

$$\dot{\mathbf{x}}_L = \mathbf{v}_L \quad (2-16)$$

$$m_L(\dot{\mathbf{v}}_L + g\mathbf{e}_3) = 0 \quad (2-17)$$

$$\dot{\mathbf{x}}_Q = \mathbf{v}_Q \quad (2-18)$$

$$m_Q(\dot{\mathbf{v}}_Q + g\mathbf{e}_3) = f\mathbf{Re}_3 \quad (2-19)$$

$$\dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}\hat{\boldsymbol{\Omega}} \quad (2-20)$$

$$\mathbf{J}_Q \dot{\boldsymbol{\Omega}} + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} = \mathbf{M} \quad (2-21)$$

式（2-17）表明悬挂负载只受其重力的影响，和无人机之间不存在约束。式（2-19）

表明无人机只受其重力和其上升力的影响，跟悬挂负载之间不存在约束。

为了建立混合模型的转换，本文选取向量 $\mathbf{X}_z = \{\mathbf{x}_L, \mathbf{x}_Q, \mathbf{R}, \mathbf{v}_L, \boldsymbol{\Omega}, \mathbf{v}_Q\}$ 作为无人机-悬挂负载系统状态量，将上面的动力学方程简化为：

$$\dot{\mathbf{X}}_z = \mathbf{f}_z(\mathbf{X}_z) + \mathbf{g}_z(\mathbf{X}_z)\mathbf{u} \quad (2-22)$$

式中 $\mathbf{u} = \{f, \mathbf{M}\}$ 是系统的输入。式 (2-18), (2-19), (2-20), (2-21) 为无人机的动力学方程。

2.3 混合模型

在绳子突然断开或者松弛的绳子突然变紧时，无人机-悬挂负载系统是一个混合系统。系统的动力学模型在悬绳中有无拉力两种模式下进行转换，这样就需要建立转换模式的临近条件，根据当前的无人机-悬挂负载系统的状态选择适当的动力学模型，用于控制部分的设计。多旋翼无人机-悬挂负载系统的混合模型为：

$$\begin{aligned} \Sigma_n : & \begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_n = \mathbf{f}_n(\mathbf{X}_n) + \mathbf{g}_n(\mathbf{X}_n)\mathbf{u}, & \mathbf{X}_n \notin S_z \\ \mathbf{X}_z^+ = \Delta_{n \rightarrow z}(\mathbf{X}_n^-), & \mathbf{X}_n \in S_z \end{cases} \\ \Sigma_z : & \begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_z = \mathbf{f}_z(\mathbf{X}_z) + \mathbf{g}_z(\mathbf{X}_z)\mathbf{u}, & \mathbf{X}_z \notin S_n \\ \mathbf{X}_n^+ = \Delta_{z \rightarrow n}(\mathbf{X}_z^-), & \mathbf{X}_z \in S_n \end{cases} \end{aligned}$$

上式中的阈值定义为：

$$S_z = \{\mathbf{X}_n | T \equiv 0\}, S_n = \{\mathbf{X}_z | \|\mathbf{x}_Q - \mathbf{x}_L\| \equiv 1, \frac{d}{dt} \|\mathbf{x}_Q - \mathbf{x}_L\| > 0\} \quad (2-23)$$

式中 $T \in \mathbb{R}$ 表示绳子的张力，绳子张力大小定义为：

$$T \triangleq \|m_L(\ddot{\mathbf{x}}_L + g\mathbf{e}_3)\| \quad (2-24)$$

转换映射 $\Delta_{n \rightarrow z}$ 为恒等映射， $\Delta_{z \rightarrow n}$ 为将碰撞建模成两个物体的非弹性碰撞，从而保证了 $\dot{\mathbf{x}}_Q^+ - \dot{\mathbf{x}}_L^+ = 0$ 。

2.4 本章小结

本章采用 Euler-Lagrange 方法推导了多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型，建立了无人机与悬挂负载的关系。考虑到在绳子张力是否为零的情况，分别对这两种情况下的无人机-悬挂负载系统的动力学模型进行讨论。在后面将把这里所推导的多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型运用到跟踪控制器设计当中。

第 3 章 移动目标的视觉跟踪

在负载搬运过程中，无人机需要对地面移动目标实时跟踪。这一章将整合 OpenTLD 和 AprilTag 这两种跟踪算法，提出了一种自适应目标跟踪策略，分阶段地对地面运动目标进行跟踪。

目前视觉领域有两种流行的跟踪算法，分别为 OpenTLD 和 AprilTag 跟踪算法。OpenTLD 跟踪算法优点在于目标发生形变、部分遮挡、丢失再出现等情况下都能稳定地跟踪目标，但是缺点在于跟踪过程中存在漂移问题；AprilTag 由于目标识别精度高，进行目标定位时相当准确，即使目标旋转运动时也能够准确地定位。但是 AprilTag 的缺点在于其在距离较远的情况下不能够被检测到，就不能进行跟踪。对此，本文提出了一种自适应目标跟踪策略。当多旋翼无人机距离移动目标较远时，采用 OpenTLD 算法跟踪目标；当无人机距离移动目标较近，能够稳定地检测到 AprilTag 时，用 AprilTag 跟踪代替 OpenTLD 算法，对目标进行精确地跟踪。

3.1 OpenTLD 跟踪算法

由于本文所跟踪的目标并未有特殊的人工标记，并且该目标在跟踪过程中可能会存在形变、遮挡等问题，同时还需要对该目标进行长时间的跟踪，所以本文采用开源的 OpenTLD^[33]（Open Tracking-Learning-Detection）目标跟踪算法。该算法相比于传统的跟踪器的优势是将跟踪器、检测器和学习器相结合，在进行跟踪的同时对目标新的外观进行学习，并检测目标，而且该算法能够对环境中的未知单目标进行长时间地跟踪。OpenTLD 算法是在 TLD 目标跟踪算法的基础上改进而来，其将 TLD 目标跟踪算法进行模块化，同时通过机器人操作系统（Robot Operating System，简称 ROS）的话题进行信息传递。TLD 跟踪算法最早是由英国萨里大学的博士生 Z. Kalal 提出的^[34]。

该算法由跟踪器、检测器、学习器三个模块组成。跟踪器确定的是目标在图像帧与帧之间的运动，检测器通过级联分类器对目标框附近的正负样本进行分类，学习器则是一种半监督在线机器学习算法，能够通过一对 PN 专家估算检测器的检测误差。跟踪器和检测器二者并行运行，它们产生的正负样本作用于学习器，而学习器又作用于跟踪器和检测器，更新检测器参数和跟踪器的最新的目标位置。将三者结合后能够有效地解决在长时间跟踪过程中目标产生形变、目标丢失又重新出现在视野、被部分遮挡等问题，并且提高了跟踪器的稳

定性和可靠性。这三个模块之间的相互关系如图 3-1 所示。

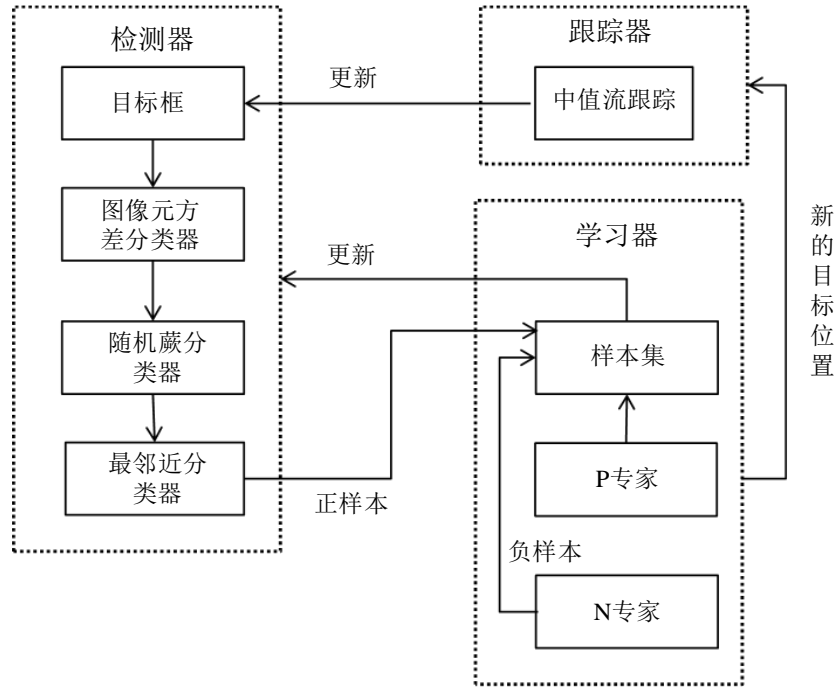


图 3-1 TLD 目标跟踪算法

跟踪模块采用的是中值流（Median-Flow）跟踪算法。该跟踪器为中值流跟踪器，是在光流法的基础上，多加了 FB 误差（forward backward error）这个约束。检测模块由图像元方差分类器、随机森林分类器和最近邻分类器三个级联分类器组成，用以产生正负样本，将产生的正样本给学习器。学习模块采用的是半监督 P-N 学习（P-N Learning）算法。在进行样本分类时，检测器会产生错误，比如将正样本误认为负样本，负样本误认为正样本。该模块通过一对 PN 专家对这些错误进行纠正，并将最终的目标位置给跟踪器。

3.2 AprilTag 跟踪定位算法

由于 OpenTLD 算法存在目标漂移等问题，会导致目标位姿估计不准，致使在悬挂负载降落时与真实位置有很大的偏差，所以在负载投放时，无人机很可能会偏离期望的目标位置，不能顺利地实现负载在移动平台上的投放。本文结合 AprilTag 定位准确的优点，当无人机距离移动目标较近时，且能够稳定地检测到 AprilTag 时，用 AprilTag 跟踪算法代替 OpenTLD 算法。

AprilTag^[35]是 Ed Olson 针对机器人技术应用开发的一款虚拟视觉识别系统。AprilTag 作为人工标志，极其易于自动识别，并且识别速度快、准确率高、鲁棒性好，即使在分辨率低、光照极不均匀、非正常旋转的情况下仍能够被识

别出来。相比于 ARTag^[36]、ARToolKit^[37]、ARToolKitPlus^[38]等二维码在定位方面具有更高的准确性。另外，AprilTag C++库可以自动检测出任意给定图片上的 AprilTag、识别该 AprilTag 的 ID 地址以及它在图像中的位置，如果相机内部参数和 AprilTag 的尺寸大小已知，利用计算机视觉技术计算摄像头与 AprilTag 坐标系的相对位姿变换，实现 6 自由度的相对位姿估计。其可用于增强现实（AR）、机器人识别、辅助定位等方面。

由于摄像头固定在无人机上，所以摄像头在机体坐标系的位姿就能确定下来。通过无人机上的里程计就能估算无人机在惯性坐标系的位置。所以要获得目标的位姿，关键在于求取 AprilTag 坐标系与摄像头坐标系的变换关系。当无人机距离移动目标较近时，一旦贴在目标上方的 AprilTag 被稳定地检测到，通过图像中的 AprilTag 就能估算移动目标的位姿。

通过 AprilTag 检测四边形边界的角点，得到这几个点的图像像素坐标，然后通过坐标系变化和求解最小二乘误差函数，计算摄像头和 AprilTag 坐标系之间的位姿变换。本文采用相机针孔模型，如图 3-2 所示。

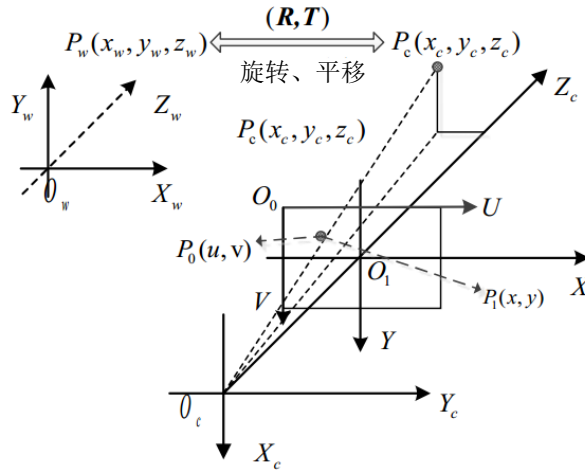


图 3-2 相机成像模型

定义相机坐标系 Σ_c ：以相机光心 O_c 作为原点，坐标轴 Z_c 与光轴重合，并垂直于成像平面，坐标轴 X_c 、 Y_c 与图像物理坐标系的 X 、 Y 轴平行，相机的焦距为 f ；定义图像像素坐标系 Σ_u ：以图像的左上角 O_0 为原点， X 、 Y 轴为其坐标轴，此坐标系以像素（pixel）为单位；定义图像物理坐标系 Σ_x ：以相机光心 O_c 作为原点， U 、 V 轴为其坐标轴，此坐标系以米为单位；定义惯性坐标系 Σ_w ：矩阵 \mathbf{R} 表示从 Σ_w 到 Σ_c 的旋转矩阵，向量 \mathbf{t} 表示从 Σ_w 到 Σ_c 的平移量。

在三维空间中选取任意一点 \mathbf{P} ，假设该点在惯性坐标系的位置为

$\mathbf{P}_w = (x_w, y_w, z_w)^T$ ，在相机坐标系的位置为 $\mathbf{P}_c = (x_c, y_c, z_c)^T$ ，该点在图像物理坐标系的投影为 $\mathbf{p}_1 = (x, y)^T$ ，在图像像素坐标系的投影为 $\mathbf{p}_0 = (u, v)^T$ 。相机光心 O_c 与图像像素坐标系的交点坐标 (u_0, v_0) 为图像物理坐标系的原点。则图像像素坐标系与图像物理坐标系之间的关系为：

$$\begin{cases} u = x / d_x + u_0 \\ v = y / d_y + v_0 \end{cases} \quad (3-1)$$

将式 (3-1) 用齐次坐标系表示为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

由相机模型得到相机坐标系与图像物理坐标系的关系满足：

$$\begin{cases} x = f \frac{x_c}{z_c} \\ y = f \frac{y_c}{z_c} \end{cases} \quad (3-3)$$

可以将式 (3-3) 写成：

$$z_c \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

结合式 (3-2) 得到相机坐标系与图像像素坐标系之间的投影矩阵为：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & 1/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \mathbf{K} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

式中 $\mathbf{K} = \begin{bmatrix} f/d_x & 0 & u_0 \\ 0 & f/d_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为摄像头内参，是固定的常数。而相机坐标系与惯

性坐标系的关系是：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = [\mathbf{R} \quad \mathbf{t}] \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-6)$$

其中， \mathbf{R} 为惯性坐标系到相机坐标系的旋转矩阵， \mathbf{t} 为惯性坐标系到相机坐标系的平移运动向量。由式 (3-5) 和式 (3-6) 得到惯性坐标系与图像像素坐标

系之间的关系为：

$$z_c \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

将式 (3-7) 变形得到：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{z_c} K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda K \begin{bmatrix} R & t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-8)$$

其中，变量 $\lambda = \frac{1}{z_c}$ 。定义以 O_a 为原点的 AprilTag 坐标系为 (X_a, Y_a, Z_a) ，如图 3-3 所示。

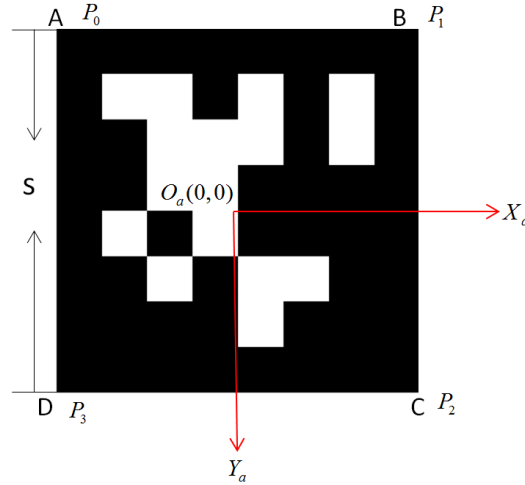


图 3-3 AprilTag 坐标系

AprilTag 的四个边界角点为 A, B, C, D，在 AprilTag 坐标系中这四个点构成一个正方形矩阵。假设矩阵的边长 AB 为 s ，那么在 AprilTag 坐标系中 A, B, C, D 这四个点的坐标分别为：

$$P_{a0} = (-\frac{s}{2}, -\frac{s}{2}, 0), P_{a1} = (\frac{s}{2}, -\frac{s}{2}, 0), P_{a2} = (\frac{s}{2}, \frac{s}{2}, 0), P_{a4} = (-\frac{s}{2}, \frac{s}{2}, 0)$$

由于该四个点在 3D 空间中位于同一平面，由式 (3-8) 知 AprilTag 坐标系与图像像素坐标系之间的关系为：

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{K} [\mathbf{R}_1 \quad \mathbf{t}_1] \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{K} \begin{bmatrix} R_{00} & R_{01} & T_x \\ R_{10} & R_{11} & T_y \\ R_{20} & R_{21} & T_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} x_a \\ y_a \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

其中, \mathbf{R}_1 为 AprilTag 坐标系到相机坐标系的旋转矩阵, \mathbf{t}_1 为 AprilTag 坐标系到

相机坐标系的平移运动向量。故最终的单应性矩阵为 $\mathbf{H} = \lambda \mathbf{K} \begin{bmatrix} R_{00} & R_{01} & T_x \\ R_{10} & R_{11} & T_y \\ R_{20} & R_{21} & T_z \end{bmatrix}$ 。二

者的关系可用函数 $\mathbf{p} = F(\mathbf{H}, \mathbf{P}_a)$ 表示。

经过 AprilTag 检测, 假设这四个点在图像像素坐标系下的坐标分别为 $\mathbf{p}_0, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3$, $\mathbf{p}_i = (u_i, v_i)$, 如图 3-4 所示。假设单应性矩阵为 \mathbf{H}_0 , 由相机模型将 AprilTag 坐标系下的 3D 点重映射图像平面, 则 A, B, C, D 这四个点的图像像素坐标的预测值为: $\hat{\mathbf{p}}_i = F(\mathbf{H}_0, \mathbf{P}_{ai})$, 则这几个像素点的重投影误差为 $\mathbf{e}_i = \hat{\mathbf{p}}_i - \mathbf{p}_i$ 。

构造目标误差函数 $\mathbf{H}^* = \arg \min_{\mathbf{H}} \frac{1}{2} \sum_i \|\mathbf{e}_i\|^2$, 优化最小二乘求解, 得到一组最优

的 \mathbf{R}^* 和 \mathbf{t}^* , 即得到了最优的 AprilTag 坐标系与相机坐标系之间的变换矩阵 \mathbf{T}_a^c , 得到在 AprilTag 坐标系下相机的位姿。

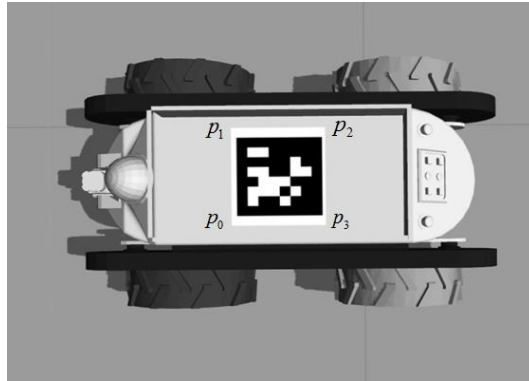


图 3-4 图像平面的 AprilTag

由于摄像头固定在多旋翼无人机上, 所以摄像头与无人机之间的变换矩阵 \mathbf{T}_c^q 是已知的。通过无人机传感器的数据, 可以确定无人机与惯性坐标系的变换矩阵 \mathbf{T}_q^w , 则 AprilTag 坐标系与惯性坐标系的关系为:

$$\mathbf{T}_a^w = \mathbf{T}_q^w \mathbf{T}_c^q \mathbf{T}_a^c \quad (3-10)$$

$\mathbf{T}_a^w = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_a^w & \mathbf{t}_a^w \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix}$, 其中 \mathbf{t}_a^w 为目标在惯性坐标系的位置, 通过旋转矩阵 \mathbf{R}_a^w 得到目

标在惯性坐标系的偏航角，实现了对运动目标的定位。并将这两个量作为后续跟踪控制器的输入，无人机期望的位置 \mathbf{x}_Q^d 为 \mathbf{t}_a^w ，目标的偏航角是无人机期望的偏航角。

3.3 本章小结

本章主要介绍了 OpenTLD 的跟踪器、检测器、学习器和 AprilTag 检测、定位原理。由于多旋翼无人机距离移动目标较远时不能检测到 AprilTag，AprilTag 失效，所以通过 OpenTLD 跟踪靠近地面移动目标。当距离较近时，采用 AprilTag 对目标定位。

第 4 章 视觉伺服控制器设计

第二章建立了无人机-悬挂负载系统的动力学模型，第三章提出了一种自适应目标跟踪策略，这一章将根据动力学模型和 AprilTag 定位设计一个视觉伺服控制器。该控制器由 IBVS 控制器（基于图像的视觉伺服控制器）、AprilTag 定位、跟踪控制器三个部分组成。对于 AprilTag 定位部分，本文在第三章已经做了介绍，下面将介绍 IBVS 控制器和跟踪控制器的设计。

4.1 IBVS 控制器设计

传统的视觉伺服都是将相机固定在机械手上^[39]，后来主要是应用在移动系统上^[40]。对于视觉伺服机器人系统，根据构建的误差来源是基于空间位置还是基于图像位置，有基于位置的视觉伺服（PBVS）和基于图像的视觉伺服（IBVS）这两种视觉伺服控制方式。PBVS 的方法是利用 2D 图像信息重构 3D 信息，视觉处理环节输出目标的三维坐标，因此可以直观地在笛卡尔坐标系定义目标的运动。但是这种控制方式的控制精度主要由 2D 图像重构 3D 位姿的估计精度决定，同时其还依赖于摄像机成像模型、标定精度、图像噪声以及初始条件等。另外还要求解逆运动学方程，因此会增大计算量^[41]。而 IBVS 的方法并不需要重构 3D 空间位置信息，直接构建的是当前的和期望的图像特征之差，同时其对相机标定精度、目标模型和图像噪声不敏感并且鲁棒性好，所以本文在这里采用基于图像的视觉伺服控制。

基于图像的视觉伺服控制是通过摄像头获取目标的图像信息，对其作处理得到目标的图像特征。然后将当前得到的图像特征与期望的图像特征之差作为 IBVS 控制器的图像输入量，经过 IBVS 控制器、机器人运动控制器以及机器人的动力学方程得到机器人的位姿或者速度等控制量，构成闭环控制系统，最终实现对机器人的控制。基于图像的视觉伺服控制的结构图如图 4-1 所示。

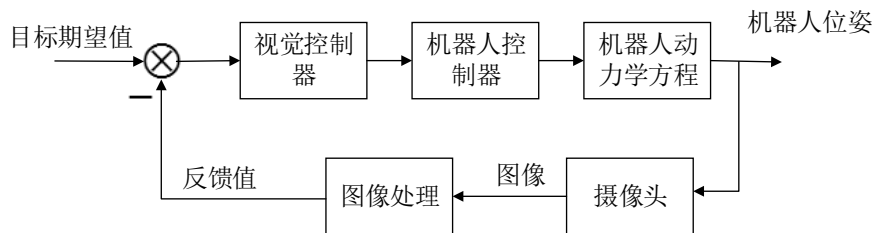


图 4-1 基于图像的视觉伺服控制的结构图

在进行负载搬运时，无人机起飞的位置距离目标较远，通过 OpenTLD 算法对地面移动目标跟踪，得到目标在图像上的位置和大小，将这些图像特征作为 IBVS 控制器的输入，通过 IBVS 控制器估算无人机期望的运动速度以及偏航角，来实现无人机对地面移动目标实时跟踪并靠近目标的目的。下面将设计一个 IBVS 控制器。整体的 IBVS 控制器结构如图 4-2 所示。

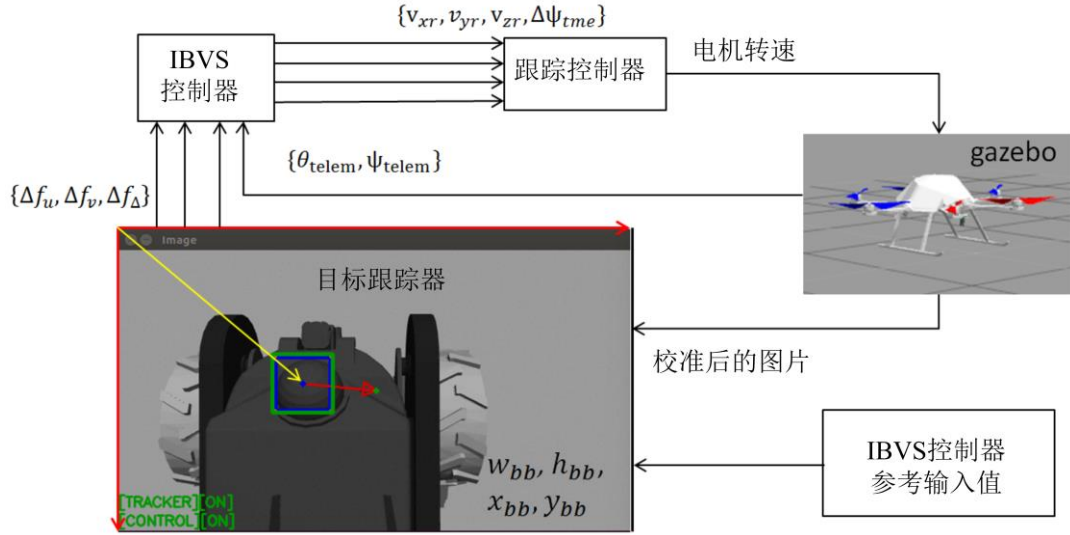


图 4-2 IBVS 控制器的结构图

本文将目标所在的区域称为感兴趣区域。从 OpenTLD 算法的跟踪器，得到目标感兴趣区域左上角的图像像素坐标 (x_{bb}, y_{bb}) 以及感兴趣区域的宽度 w_{bb} 和高度 h_{bb} 。分别用 w_{im} 和 h_{im} 表示传感器采集的图像大小，如上图 4-2 所示。本文定义目标感兴趣区域中心占整幅图片的比例分别为 f_u 和 f_v ， $\{f_u, f_v\} \in (0, 1)$ 以及整个图片面积与目标感兴趣区域的面积比 f_{Δ} 且 $f_{\Delta} > 1$ ，这三个图像特征分别为：

$$f_u = \frac{x_{bb} + \frac{w_{bb}}{2}}{w_{im}} \quad (4-1)$$

$$f_v = \frac{y_{bb} + \frac{h_{bb}}{2}}{h_{im}} \quad (4-2)$$

$$f_{\Delta} = \sqrt{\frac{w_{im} h_{im}}{w_{bb} h_{bb}}} \propto x_{tm} \quad (4-3)$$

式 (4-3) 的图像特征 f_{Δ} 近乎正比于无人机到目标的水平距离 x_{tm} ^[42]。然后计算当前图像特征与期望图像特征值的跟踪误差 $\{\Delta f_u, \Delta f_v, \Delta f_{\Delta}\}$ ，期望图像特征的参考值分别为 0.5, 0.5, 0.25^[43]。

$$\Delta f_u = 0.5 - f_u \quad (4-4)$$

$$\Delta f_v = 0.5 - f_v \quad (4-5)$$

$$\Delta f_\Delta = 0.25 - f_\Delta \quad (4-6)$$

当跟踪目标在图像平面运动时, IBVS 控制器的输入是图像特征的跟踪误差 $\{\Delta f_u, \Delta f_v, \Delta f_\Delta\}$, 输出是无人机期望的运动速度和偏航角, 也就是该控制器有三个输入量四个输出量, 所以这是一个欠驱动的系统。因此, 在设计控制器之前需要对跟踪误差进行变量解耦。定义 IBVS 控制器的四个解耦变量分别为:

$$\Delta f_{u\psi} = \Delta f_u \quad (4-7)$$

$$\Delta f_{uy} = \Delta f_u - \frac{\psi_{telem}}{FOV_u} \quad (4-8)$$

$$\Delta f_{vz} = \Delta f_v - \frac{\theta_{centroidref} - \theta_{telem} - \theta_{rot}}{FOV_v} \quad (4-9)$$

$$\Delta f_{\Delta x} = \Delta f_\Delta \quad (4-10)$$

式中变量 ψ_{telem} 为当前的无人机偏航角, 变量 $\psi_{telemref}$ 为跟踪模式下期望的无人机偏航角, 当 $|\psi_{telemref} - \psi_{telem}| > 25^\circ$ 或者无人机进入跟踪模式时, 该值随着变量 ψ_{telem} 的变化而更新。变量 θ_{telem} 是当前的无人机俯仰角, 变量 $\theta_{centroidref}$ 表示跟踪过程中期望的无人机俯仰角, 在跟踪过程中 $\theta_{centroidref}$ 值始终为零。变量 θ_{rot} 是摄像头的倾斜角度, FOV_u 为水平方向视场角, FOV_v 为竖直方向视场角。由成像几何关系和图像大小, 可以得到摄像头的水平方向视场角 FOV_u 和竖直方向视场角 FOV_v 。以水平视场角示意图 4-3 为例, 图像宽度 w_{im} 已知, f_x 已知, 就可以求取水平视场角的大小。

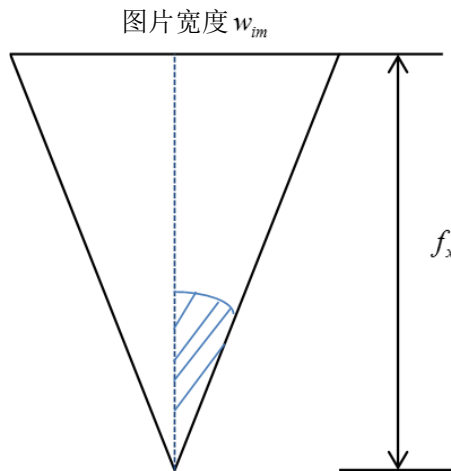


图 4-3 水平视场角示意图

$$FOV_u = 2 \arctan \frac{\frac{1}{2} w_{im}}{f_x} \quad (4-11)$$

$$FOV_v = 2 \arctan \frac{\frac{1}{2} h_{im}}{f_y} \quad (4-12)$$

然后利用解耦后的图像量去计算无人机和目标的相对位置和以及无人机的偏航角。 Δf_{uy} 为目标在图像像素坐标系 U 方向上的偏差，结合相机的水平视场角 FOV_u ，如上图 4-3，得到无人机期望的偏航角为 $\Delta \psi_{ime} = \Delta f_{uy} \cdot FOV_u$ 。 Δf_{uy} 为目标在图像像素坐标系 V 方向上（可参考图 3-6）的偏差去掉无人机本身的偏航角之后的误差量，根据成像几何关系，得到目标相对于无人机在惯性坐标系 e_2 方向的位置 Δy_{ime} 。 Δf_{vz} 为目标在图像像素坐标系 V 方向上的偏差去掉无人机本身的俯仰角和摄像头的角度之后的误差量，根据成像几何关系，得到目标相对于无人机在惯性坐标系 e_3 方向的位置 Δz_{ime} 。当目标距离无人机较远时，通过整个图片面积与目标感兴趣区域的面积比的误差 $\Delta f_{\Delta x}$ ，结合期望的目标框的面积大小 A_{exp} 估算目标相对无人机在惯性坐标系 e_1 方向上的距离 Δx_{ime} 。

$$\Delta x_{ime} = \Delta f_{\Delta x} \sqrt{A_{exp}} \sqrt{\frac{f_x f_y}{w_{im} h_{im}}} \quad (4-13)$$

$$\Delta y_{ime} = \Delta f_{uy} d_{exp} \frac{w_{im}}{f_x} \quad (4-14)$$

$$\Delta z_{ime} = \Delta f_{vz} d_{exp} \frac{h_{im}}{f_y} \quad (4-15)$$

$$\Delta \psi_{ime} = \Delta f_{uy} FOV_u \quad (4-16)$$

式中 d_{exp} ——无人机到目标期望的距离 (m)；

A_{exp} ——期望的跟踪目标的真实面积大小 (m^2)。

获取到无人机和目标的相对位置作为无人机的跟踪误差后对该位置误差做 PD 控制，

$$v_{xr} = k_p \Delta x_{ime_k} + k_D (\Delta x_{ime_k} - \Delta x_{ime_{k-1}}) + v_x \quad (4-17)$$

$$v_{yr} = k_p \Delta y_{ime_k} + k_D (\Delta y_{ime_k} - \Delta y_{ime_{k-1}}) + v_y \quad (4-18)$$

$$v_{zr} = k_p \Delta z_{ime_k} + k_D (\Delta z_{ime_k} - \Delta z_{ime_{k-1}}) + v_z \quad (4-19)$$

得到无人机期望的运动速度 $\mathbf{v}_Q^d = (v_{xr}, v_{yr}, v_{zr})^T$ 。实验中，取 $d_{exp} = 3 \text{ m}$ ， $A_{exp} = 40 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ ，这样就得到无人机期望的运动速度 \mathbf{v}_Q^d 和无人机的偏航角

$\Delta\psi_{me}$ 。这两个量将是后续跟踪控制器的参考输入。

4.2 跟踪控制器设计

为稳定跟踪过程中负载的摆动，减小对无人机的干扰，保证无人机-悬挂负载系统的稳定性，在对无人机控制的同时需要加入对悬挂负载的控制。在设计控制器之前，首先定义无人机姿态 \mathbf{R} 和角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 、绳子方向 \mathbf{q} 和绳子方向的变化率 $\dot{\mathbf{q}}$ 以及无人机和悬挂负载位置 $\mathbf{x}_Q, \mathbf{x}_L$ 和线速度 $\mathbf{v}_Q, \mathbf{v}_L$ 的跟踪误差。

4.2.1 无人机的姿态跟踪误差

本文定义在流型空间 $\text{SO}(3)$ 上的无人机姿态跟踪误差为：

$$\mathbf{e}_R = \frac{1}{2} \text{tr}(\mathbf{R}_d^T \mathbf{R} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d)^\vee \quad (4-20)$$

式中符号 \vee 表示将任意一个反对称矩阵转化为向量。如对任意反对称矩阵

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 & -x_3 & x_2 \\ x_3 & 0 & -x_1 \\ -x_2 & x_1 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x}^\vee = [x_1, x_2, x_3]^T。 \text{ 由于无人机的旋转矩阵的切向量}$$

$\dot{\mathbf{R}} \in \mathbf{T}_R \text{SO}(3)$ 和 $\dot{\mathbf{R}}_d \in \mathbf{T}_{R_d} \text{SO}(3)$ 位于不同的切空间，所以不能直接比较，本文先将期望的旋转矩阵的变化率 $\dot{\mathbf{R}}_d$ 转换到 $\mathbf{T}_R \text{SO}(3)$ 空间内，然后再和当前的无人机的旋转矩阵的变化率 $\dot{\mathbf{R}}$ 作比较，并结合旋转矩阵 \mathbf{R} 和无人机角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 的关系式 (2-11)，得到：

$$\dot{\mathbf{R}} - \dot{\mathbf{R}}_d (\mathbf{R}_d^T \mathbf{R}) = \mathbf{R} \hat{\boldsymbol{\Omega}} - \mathbf{R}_d \hat{\boldsymbol{\Omega}}_d \mathbf{R}_d^T \mathbf{R} = \mathbf{R} (\boldsymbol{\Omega} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \boldsymbol{\Omega}_d)^\wedge \quad (4-21)$$

因此，无人机的角速度跟踪误差为：

$$\mathbf{e}_\Omega = \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \boldsymbol{\Omega}_d \quad (4-22)$$

其中 \mathbf{R}_d 和 $\boldsymbol{\Omega}_d$ 分别表示无人机期望的姿态和期望的角速度。由于

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{R}_d^T \mathbf{R}) = (\mathbf{R}_d^T \mathbf{R})(\mathbf{e}_\Omega)^\wedge, \text{ 所以旋转矩阵 } \mathbf{R}_d^T \mathbf{R} \text{ 在机体坐标系下的角速度就是 } \mathbf{e}_\Omega。$$

结合无人机的动力学方程式 (2-12)，则作用在无人机上的期望力矩 \mathbf{M} 为：

$$\mathbf{M} = -\frac{1}{\varepsilon^2} k_R \mathbf{e}_R - \frac{1}{\varepsilon} k_\Omega \mathbf{e}_\Omega + \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{J}_Q (\hat{\boldsymbol{\Omega}} \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \boldsymbol{\Omega}_d - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \dot{\boldsymbol{\Omega}}_d) \quad (4-23)$$

式中 k_R, k_Ω 为正常数，且 $0 < \varepsilon < 1$ 。求解时假设初始化状态满足：

$$\psi_R(\mathbf{R}(0), \mathbf{R}_d(0)) < 2$$

$$\|\mathbf{e}_{\Omega}(0)\|^2 < \frac{2}{\lambda_M(\mathbf{J}_Q)} \frac{k_R}{\varepsilon^2} (2 - \psi_R(\mathbf{R}(0), \mathbf{R}_d(0)))$$

其中，符号 λ_M 表示矩阵特征值的最大值，闭环跟踪误差在 $(\mathbf{e}_R, \mathbf{e}_{\Omega}) = (0, 0)$ 的平衡状态下呈指数稳定，并且存在常量 α_R, β_R 满足：

$$\psi_R(\mathbf{R}(t), \mathbf{R}_d(t)) \leq \min\{2, \alpha_R e^{-\beta_R t}\}$$

从式 (4-23) 看出该控制器为带有前馈量的 PD 控制。而要计算 \mathbf{M} ，需要计算无人机的期望姿态 \mathbf{R}_d 和期望角速度 $\boldsymbol{\Omega}_d$ 。

4.2.2 悬挂负载的姿态跟踪误差

本文定义悬挂负载的姿态跟踪误差 \mathbf{e}_q 和 $\mathbf{e}_{\dot{q}}$ 分别为：

$$\mathbf{e}_q = \hat{\mathbf{q}}^2 \mathbf{q}_d \quad (4-24)$$

$$\mathbf{e}_{\dot{q}} = \dot{\mathbf{q}} - (\mathbf{q}_d \times \dot{\mathbf{q}}_d) \times \mathbf{q} \quad (4-25)$$

\mathbf{q}_d 表示悬挂负载期望的方向， \mathbf{q} 的大小以及方向由当前的无人机位置和悬挂负载的位置关系式 (2-2) 来确定。结合悬挂物的姿态动力学方程式 (2-10) 与旋转矩阵 \mathbf{R} 和无人机角速度 $\boldsymbol{\Omega}$ 的关系式 (2-11)，定义计算的无人机的姿态 \mathbf{R}_c 和角速度 $\boldsymbol{\Omega}_c$ 分别为：

$$\mathbf{R}_c = [\mathbf{b}_{1c}; \mathbf{b}_{3c} \times \mathbf{b}_{1c}; \mathbf{b}_{3c}] \quad (4-26)$$

$$\hat{\boldsymbol{\Omega}}_c = \mathbf{R}_c^T \dot{\mathbf{R}}_c \quad (4-27)$$

$\mathbf{b}_{3c} \in \mathbf{S}^2$ ，其中

$$\mathbf{b}_{3c} = \frac{\mathbf{F}}{\|\mathbf{F}\|} \quad (4-28)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_n - \mathbf{F}_{ff} - \mathbf{F}_{pd} \quad (4-29)$$

$$\mathbf{F}_n = -(\mathbf{q}_d \cdot \mathbf{q})\mathbf{q} \quad (4-30)$$

$$\mathbf{F}_{pd} = -k_q \mathbf{e}_q - k_w \mathbf{e}_{\dot{q}} \quad (4-31)$$

$$\mathbf{F}_{ff} = m_Q l \langle \mathbf{q}, \mathbf{q}_d \times \dot{\mathbf{q}}_d \rangle (\mathbf{q} \times \dot{\mathbf{q}}) + m_Q l (\mathbf{q}_d \times \ddot{\mathbf{q}}_d) \times \mathbf{q} \quad (4-32)$$

k_q, k_w 为正常数。定义向量 $\mathbf{b}_{1d} \in \mathbf{S}^2$ 为期望的无人机机头方向。在跟踪过程中 \mathbf{b}_{1d} 由 IBVS 控制器或 AprilTag 视觉定位得到。假设向量 \mathbf{b}_{1d} 和向量 \mathbf{b}_{3c} 不平行，则最终的期望的无人机机头方向 \mathbf{b}_{1c} 为：

$$\mathbf{b}_{1c} = -\frac{1}{\|\mathbf{b}_{3c} \times \mathbf{b}_{1d}\|} (\mathbf{b}_{3c} \times (\mathbf{b}_{3c} \times \mathbf{b}_{1d})) \quad (4-33)$$

式中 $\|\mathbf{b}_{3c} \times \mathbf{b}_{1d}\|$ 为矩阵 $\mathbf{b}_{3c} \times \mathbf{b}_{1d}$ 的二范数，在惯性坐标系下 \mathbf{b}_3 方向上无人机上升力的大小 f 为：

$$f = \mathbf{F} \cdot \mathbf{R}\mathbf{e}_3 \quad (4-34)$$

求解时假设初始状态满足：

$$\begin{aligned} \psi_q(\mathbf{q}(0), \mathbf{q}_d(0)) &< 2 \\ \|\mathbf{e}_{\dot{q}}(0)\|^2 &< \frac{2}{m_Q l} k_q (2 - (\mathbf{q}(0), \mathbf{q}_d(0))) \end{aligned}$$

闭环跟踪误差在 $(\mathbf{e}_q, \mathbf{e}_{\dot{q}}, \mathbf{e}_R, \mathbf{e}_{\Omega}) = (0, 0, 0, 0)$ 的平衡状态下呈指数稳定，并且存在常量 α_q, β_q 满足：

$$\psi_q(\mathbf{q}(t), \mathbf{q}_d(t)) \leq \min\{2, \alpha_q e^{-\beta_q t}\}$$

计算式 (4-23) 中定义的无人机的力矩 \mathbf{M} 时，需要用到的 $\mathbf{R}_d, \mathbf{\Omega}_d$ ，本文用这里计算的 $\mathbf{R}_c, \mathbf{\Omega}_c$ 来代替期望的 $\mathbf{R}_d, \mathbf{\Omega}_d$ 。

4.2.3 无人机和悬挂负载的位置跟踪误差

本文定义无人机和悬挂负载的位置跟踪误差以及速度跟踪误差分别为：

$$\mathbf{e}_{x_Q} = \mathbf{x}_Q - \mathbf{x}_Q^d \quad (4-35)$$

$$\mathbf{e}_{v_Q} = \mathbf{v}_Q - \mathbf{v}_Q^d \quad (4-36)$$

$$\mathbf{e}_{x_L} = \mathbf{x}_L - \mathbf{x}_L^d \quad (4-37)$$

$$\mathbf{e}_{v_L} = \mathbf{v}_L - \mathbf{v}_L^d \quad (4-38)$$

式中， $\mathbf{x}_Q, \mathbf{v}_Q, \mathbf{x}_L, \mathbf{v}_L$ 分别是当前无人机和悬挂负载的位置以及运动速度，它们是跟踪控制器的真实输入，从传感器获取。 $\mathbf{x}_Q^d, \mathbf{v}_Q^d, \mathbf{x}_L^d, \mathbf{v}_L^d$ 分别是期望的无人机和悬挂负载的位置以及运动速度。期望的无人机运动速度 \mathbf{v}_Q^d 可以通过 IBVS 控制器获取或者 AprilTag 视觉定位得到的目标位置 \mathbf{x}_Q^d 。考虑到悬挂负载位置的动力学方程式 (2-8)，最终绳子的方向为：

$$\mathbf{q}_c = -\frac{\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|} \quad (4-39)$$

式中 $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^3$ ，在假设 $\|\mathbf{A}\| \neq 0$ 和无人机的加速有界的条件下，

$$\|(m_Q + m_L)(\ddot{\mathbf{x}}_L^d + g\mathbf{e}_3) + m_Q l(\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}})\mathbf{q}\| < B$$

得到期望的无人机上升力为：

$$\mathbf{A} = -k_{x_Q} \mathbf{e}_{x_Q} - k_{v_Q} \mathbf{e}_{v_Q} - k_{x_L} \mathbf{e}_{x_L} - k_{v_L} \mathbf{e}_{v_L} + (m_Q + m_L)(\ddot{\mathbf{x}}_L^d + g\mathbf{e}_3) + m_Q l(\dot{\mathbf{q}} \cdot \dot{\mathbf{q}})\mathbf{q} \quad (4-40)$$

式中, $k_{x_Q}, k_{v_Q}, k_{x_L}, k_{v_L}$ 为正常数。定义 F_n ,

$$F_n = (A \cdot q)q \quad (4-41)$$

求解时假设初始状态满足:

$$\psi_q(q(0), q_c(0)) < \psi_1 < 2$$

$$\|e_x(0)\| < e_{x\max}$$

其中 $e_{x\max}$ 为常量。闭环跟踪误差在 $(e_{x_Q}, e_{v_Q}, e_{x_L}, e_{v_L}, e_q, e_{\dot{q}}, e_R, e_{\Omega}) = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)$ 的平衡状态下呈指数稳定, 并且满足

$$\|e_{\dot{q}}(0)\|^2 < \frac{2}{m_Q l} k_q (\psi_1 - (q(0), q_d(0)))$$

计算式 (4-37) 中期望的无人机姿态 R_c 时, 用 q_c 代替 q_d 。式 (4-34) 和式 (4-23) 分别为无人机的上升力 f 和力矩 M , 这两个控制量是跟踪控制器的输出。

4.2.4 跟踪控制器设计

该跟踪控制器为多闭环的非线性 PID 控制器, 由无人机的姿态控制环、悬挂负载的姿态控制环、无人机和悬挂负载的位置控制环组成的。下面将分别对这三个控制环的设计进行介绍。

控制量 $x_Q^d, v_Q^d, x_L^d, v_L^d$ 是跟踪控制器的参考输入, 结合无人机传感器数据 x_Q, v_Q, x_L, v_L 以及式 (4-35) 到式 (4-38) 的跟踪误差定义, 得到无人机和悬挂负载位置跟踪误差以及线速度的跟踪误差, 通过 PD 控制以及式 (4-40), 得到无人机-悬挂负载系统期望的上升力 A , 如图 4-4 所示, 为无人机和悬挂负载位置控制环结构示意图, 图中 A_F 表示前馈上升力。

通过上面的无人机和负载的位置控制环, 得到了无人机-悬挂负载系统期望的上升力 A , 将其单位化之后得到最终绳子方向 q_c , $q_c = -\frac{A}{\|A\|}$ 。用 q_c 代替 q_d , 并结合当前传感器数据, 就能得到 F_n, F_{ff}, F_{pd} , 由式 (4-29) 得到 F , 进而由式 (4-28) 得到 b_{3c} , 加上期望的无人机偏航方向 b_{1d} , 根据向量叉乘公式 (4-33) 得到最终的无人机偏航方向 b_{1c} 。 b_{1d} 作为无人机姿态控制器的参考输入, 是由 IBVS 控制器或 AprilTag 定位得到的即 b_{1d} 从 $\Delta\psi_{me}$ 获取或者从 R_a^w 获取。由无人机姿态公式 (4-26), 这样就能得到计算的无人机期望的姿态 R_c 。通过 PID 控制以及式 (4-34) 得到无人机上的上升力 f , 如图 4-5 所示, 为悬挂负载姿态控制环结构示意图。

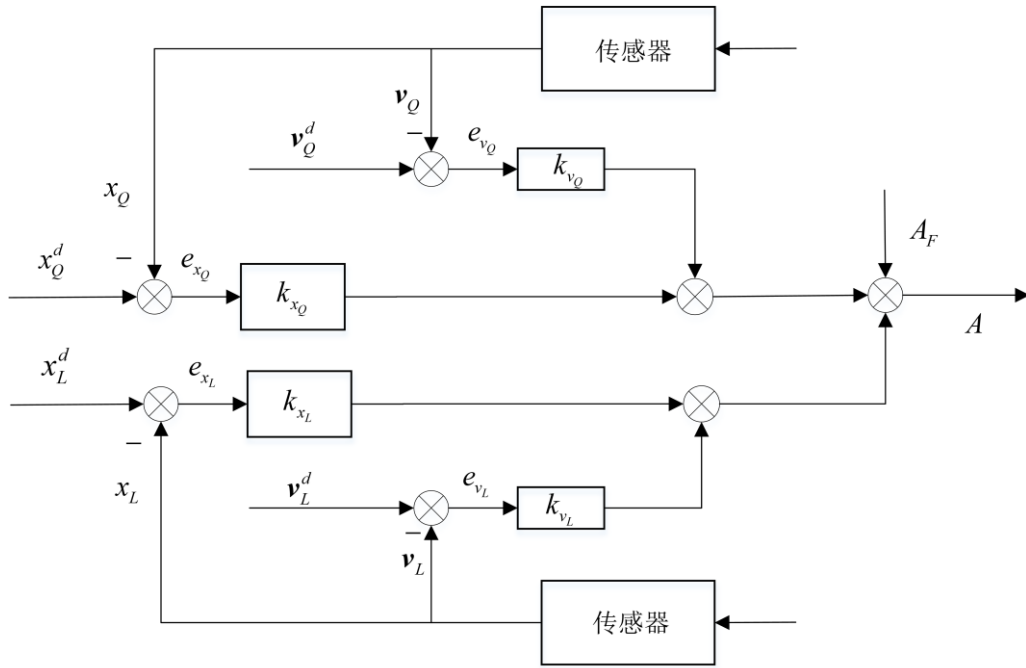


图 4-4 无人机和悬挂负载位置控制环结构示意图

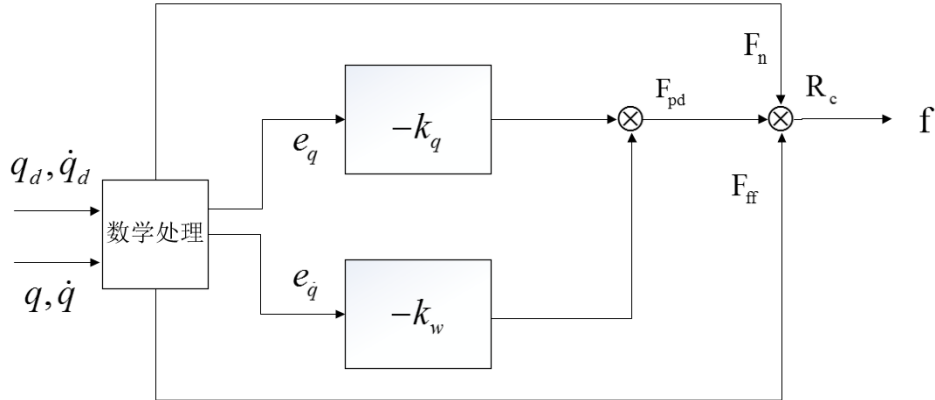


图 4-5 悬挂负载姿态控制环结构示意图

通过上面的悬挂负载姿态控制环，得到了计算的旋转矩阵 \mathbf{R}_c ，由式 (4-27) 得到计算的角速度 $\boldsymbol{\Omega}_c$ 。在式 (4-23) 计算无人机-悬挂负载系统的力矩 \mathbf{M} 时，本文用计算的 \mathbf{R}_c 和 $\boldsymbol{\Omega}_c$ 代替无人机期望的旋转矩阵 \mathbf{R}_d 和期望的角速度 $\boldsymbol{\Omega}_d$ 。结合式 (4-20) 和式 (4-22) 的无人机姿态和角速度的跟踪误差以及传感器的数据，进入无人机姿态控制环，最终得到无人机-悬挂负载系统期望的力矩 \mathbf{M} 。无人机姿态控制器结构如图 4-6 所示，图中 \mathbf{M}_F 为控制系统的前馈控制量， $\mathbf{M}_F = \boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{J}_Q \boldsymbol{\Omega} - \mathbf{J}_Q (\hat{\boldsymbol{\Omega}} \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \boldsymbol{\Omega}_d - \mathbf{R}^T \mathbf{R}_d \dot{\boldsymbol{\Omega}}_d)$ 。由式 (2-1) 的配置矩阵求取每个电机上的上升力 f_i 。由于 f_i 与电机的角速度的平方成正比关系 $f_i = k w_i^2$ ，这样就能得

到每个电机上转速 w_i ，实现了对无人机的控制。

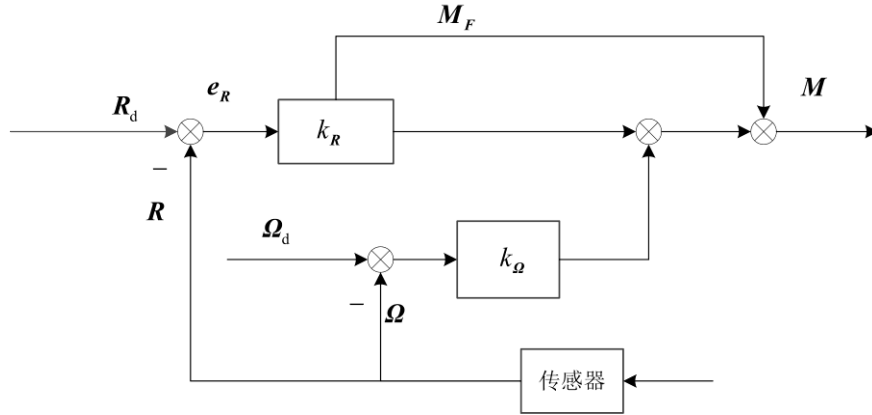


图 4-6 无人机姿态控制环结构示意图

本文将这三个相互关联的 PD 控制器结合在一起，构成无人机-悬挂负载系统的跟踪控制器，如图 4-7 所示。

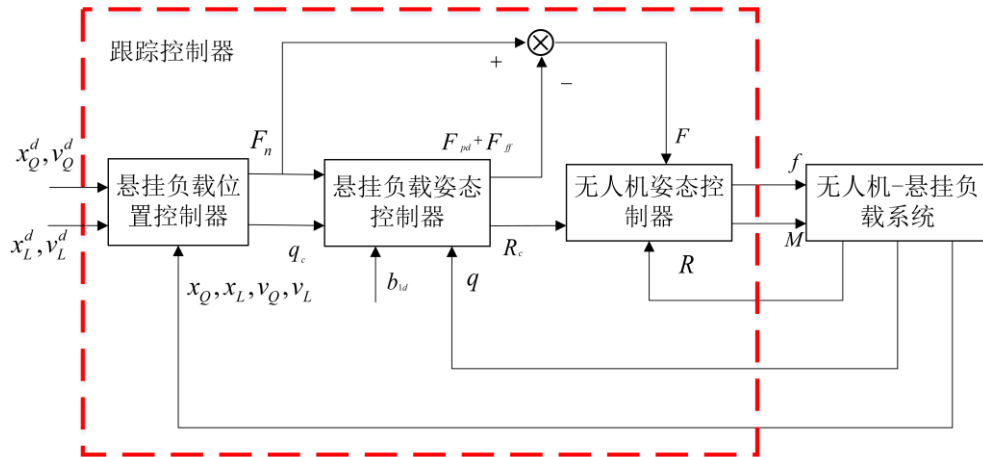


图 4-7 跟踪控制器结构示意图

4.3 视觉伺服控制器设计

该控制器是将 IBVS 控制器、AprilTag 定位、跟踪控制器三个部分进行结合，构成搬运跟踪系统的视觉伺服控制器，如图 4-8 所示。具体设计过程如下。

首先是第一个跟踪阶段，无人机距离目标较远时，通过 IBVS 控制器，得到无人机期望的运动速度 v_Q^d ，对其积分得到无人机期望的运动位置 $x_Q^d(k) = x_Q^d(k-1) + v_Q^d(k)\Delta t$ 。由无人机、负载、悬绳的关系 $x_L^d = x_Q^d - l e_3$ ，就可以确定负载期望的运动位置 $x_L^d(k)$ 和速度 $v_L^d(k) = v_Q^d(k)$ 。这些控制量 $x_Q^d(k), v_Q^d(k), x_L^d(k), v_L^d(k)$ 是跟踪控制器的参考输入。然后结合传感器数据

$\mathbf{x}_Q(k), \mathbf{v}_Q(k), \mathbf{x}_L(k), \mathbf{v}_L(k)$ ，构建无人机和负载的位置跟踪误差，完成了与跟踪控制器的对接。当无人机距离目标较近且能够检测到 AprilTag 时，由于 AprilTag 能够对目标进行精确的定位，所以用 AprilTag 定位部分代替 IBVS 控制器进行目标的跟踪。通过 AprilTag 定位部分，得到无人机期望的运动位置 $\mathbf{x}_Q^d(k) = \mathbf{t}_a^w(k)$ ，对其微分得到无人机期望的运动速度 $\mathbf{v}_Q^d(k) = \frac{\mathbf{t}_a^w(k) - \mathbf{t}_a^w(k-1)}{\Delta t}$ 。由无人机、负载、悬绳的关系 $\mathbf{x}_L^d = \mathbf{x}_Q^d - l\mathbf{e}_3$ ，就可以确定负载期望的运动位置 $\mathbf{x}_L^d(k)$ 和速度 $\mathbf{v}_L^d(k) = \mathbf{v}_Q^d(k)$ 。这些控制量 $\mathbf{x}_Q^d(k), \mathbf{v}_Q^d(k), \mathbf{x}_L^d(k), \mathbf{v}_L^d(k)$ 也是跟踪控制器的参考输入。对于跟踪控制器，在整个跟踪过程起作用，来稳定负载的摆动。

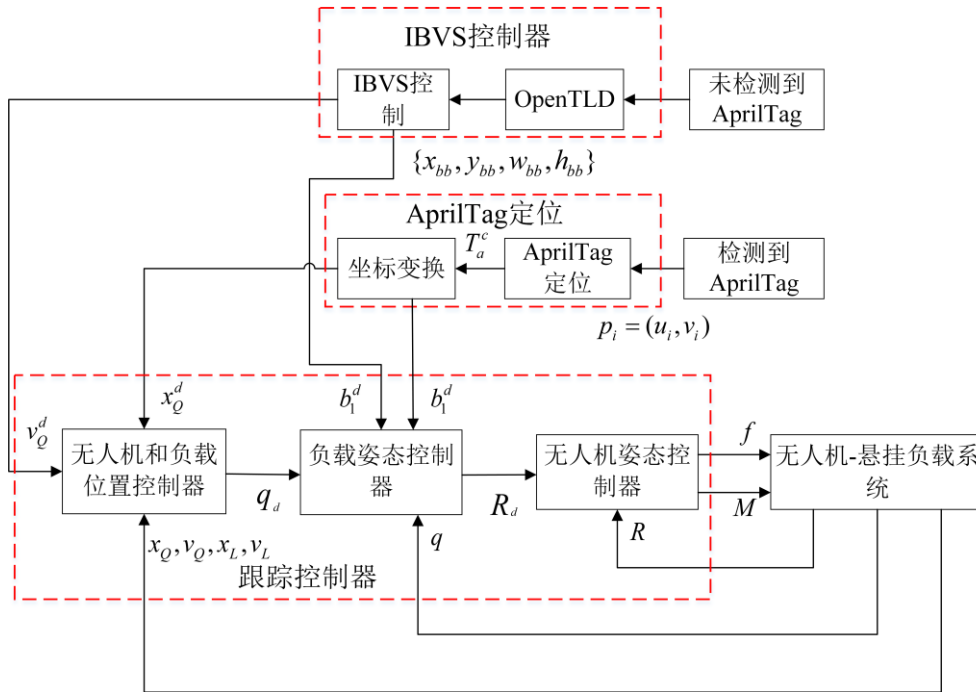


图 4-8 视觉伺服控制器结构示意图

4.4 本章小结

本章节根据 OpenTLD 算法提供的目标位置设计了 IBVS 控制器，估算了无人机期望的运动速度。然后在无人机-悬挂负载系统动力学模型的基础上，设计了跟踪控制器来稳定负载的摆动。该跟踪控制器为多闭环非线性 PD 控制器，主要包括悬挂负载位置控制环、悬挂负载姿态控制环及无人机姿态控制环三个部分。最后将 IBVS 控制器和 AprilTag 定位部分的输出作为跟踪控制器的参考输入，构成了搬运跟踪系统的视觉伺服控制器。

第 5 章 仿真实验

为了验证本文所提出的视觉伺服控制方法，本文在 ROS 的 Gazebo 仿真环境下搭建了仿真平台。该仿真平台能够逼真地模拟真实环境，而且方便算法研究、调试，所以本文用仿真平台代替真实平台进行算法的研究、验证。首先本文在仿真环境中建立了无人机、悬绳、负载和地面运动目标的模型，然后对视觉伺服控制器的目标跟踪控制效果和负载控制效果进行分析。

5.1 仿真平台搭建

本文的仿真平台是在 Ubuntu 操作系统上的 Gazebo 仿真器，结合 ROS 组成仿真环境。ROS 是一个开源的机器人操作系统。Gazebo 是一个开源的机器人仿真软件，支持多种动力学引擎，能够非常接近真实世界。本文在 Rotors-Simulator 平台上做进一步扩展。绳子由多个小型的活动关节组成，来模拟真实绳子的柔韧性。在绳子末端添加一个立方体模块作为负载。在无人机-悬挂负载模型上，通过修改 urdf 文件在无人机上添加一个摄像机模型。摄像机与机身之间由活动关节连接，所以可以转动。待降落平台为 Robotnik 公司生产的 Guardian，通过键盘或者遥控器可对其手动控制。本文通过 Google 开发的 3D 模型绘制软件 Sketchup 在原有的 Guardian 的模型上进行二次开发。在车顶表面绘制一个 AprilTag 和车斗，方便利用 AprilTag 进行位姿估计以及负载的降落。最后通过修改无人机-悬挂负载系统的 launch 文件，将 Guardian 的模型和无人机-悬挂负载的模型一起加载到 Gazebo 环境中。仿真环境效果如图 5-1 所示。

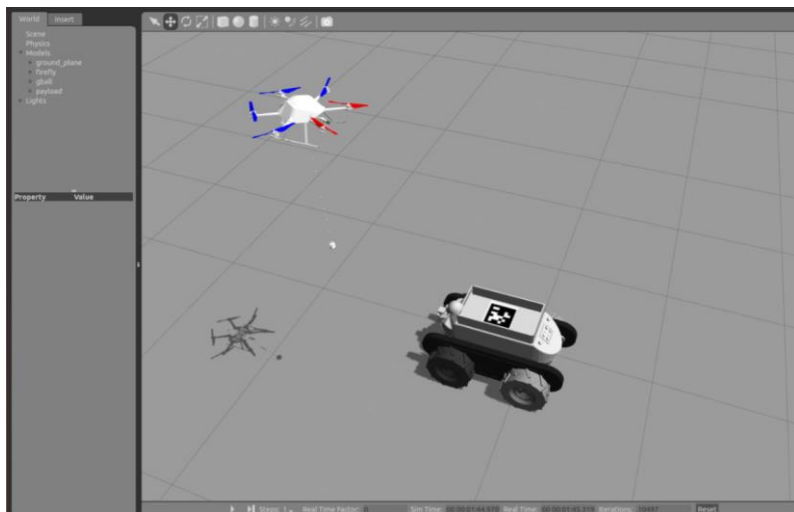


图 5-1 多旋翼无人机-悬挂负载系统仿真环境效果图

本仿真环境中使用的是 Firefly 六旋翼无人机模型。仿真环境中搭建的模型参照真实物体设置属性参数，部分参数如表 5-1 所示。

表 5-1 无人机、悬挂负载以及跟踪控制器参数

参数名称	参数值
无人机质量 m_Q	1.58 kg
重力系数 g	9.81 N/kg
相机焦距 f	381 mm
图像宽度 w_{im}	640 pixel
图像高度 h_{im}	360 pixel
悬挂物质量 m_L	0.2 kg
绳子长度 l	0.75 m
力矩常数 c_τ	1.6×10^{-2} m
惯性力矩常数 I_{xx}	0.0347563 kgm^2
惯性力矩常数 I_{yy}	0.0458929 kgm^2
惯性力矩常数 I_{zz}	0.0977 kgm^2
无人机位置控制器系数 k_{Q_x}	(2.0, 2.0, 1.5)
无人机线速度控制器系数 k_{Q_v}	(2.5, 2.5, 2.5)
悬挂负载位置控制器系数 k_{L_x}	(0.8, 0.8, 12)
悬挂负载线速度控制器系数 k_{L_v}	(1.5, 1.5, 2.5)
悬挂负载姿态控制器系数 k_q	(2.5, 2.5, 1.5)
悬挂负载角速度控制器系数 k_w	(2.5, 2.5, 2.5)
无人机姿态控制器系数 k_R	(3, 3, 0.035)
无人机角速度控制器系数 k_Ω	(0.52, 0.52, 0.025)

5.2 结果及分析

5.2.1 跟踪控制分析

首先控制无人机起飞悬停，悬停点位于惯性坐标系下(0, 0, 2.5)的位置，此时无人机与移动目标 Guardian 的位置相差 8.5 m，如图 5-2 所示。

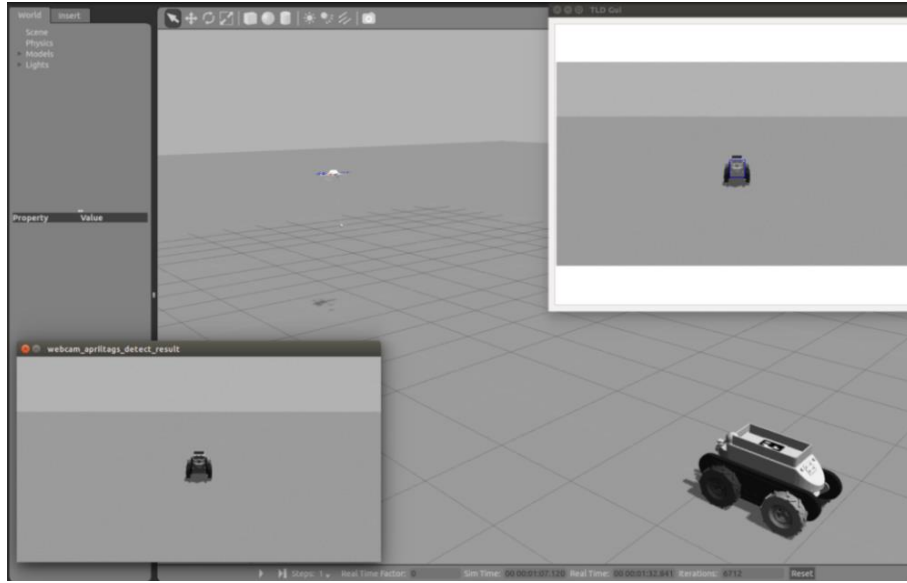


图 5-2 无人机起飞时示意图

从 AprilTag 的显示界面看出由于无人机距离目标太远并未检测到 AprilTag。然后在 TLDGui 界面手动选择要跟踪的目标。同时还设计了一个跟踪状态显示界面，将无人机的跟踪状态以及目标的信息实时地显示出来，如图 5-3 a 图。当跟踪器处于跟踪状态时，显示为 ON 的状态，同时视觉伺服控制器也处于 ON 的状态。当无人机跟踪上目标，目标上的 AprilTag 被检测出来，如图 5-3 b 图。



a) 无人机的跟踪状态

b) AprilTag 被检测到

图 5-3 无人机跟踪目标时的跟踪状态图和 AprilTag 被稳定检测到

首先，对目标远距离跟踪时的跟踪状况进行分析。如图 5-4 为无人机对目

标跟踪过程中在图像坐标系 u 方向的图像跟踪误差 Δf_u ，可参考式 (4-4)。开始跟踪之前， Δf_u 为 0.5。跟踪稳定时，目标基本上就在整个图像的中心，跟踪误差为零。

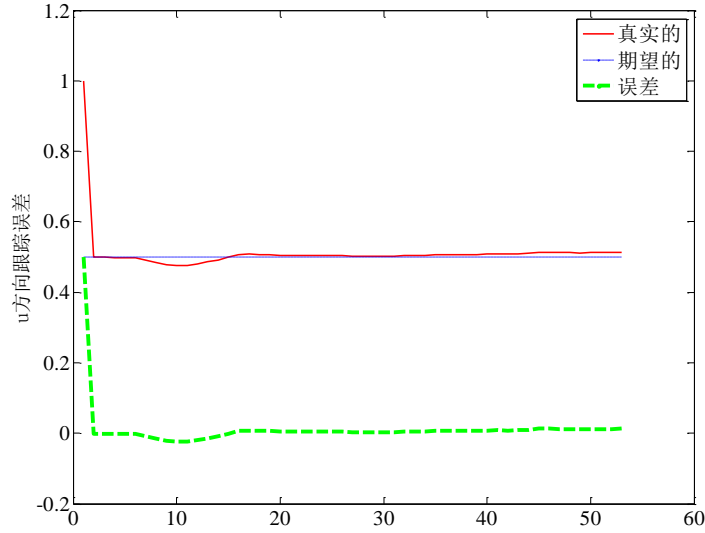


图 5-4 u 方向的图像跟踪误差

如图 5-5, 为无人机对目标跟踪过程中在图像坐标系 v 方向的图像跟踪误差 Δf_v ，可参考公式 (4-5)。在开始跟踪之前， Δf_v 为 0.5，当跟踪稳定时，目标几乎就在整个图像的中心，跟踪误差为零。虽然有一定的波动，但是影响不大。

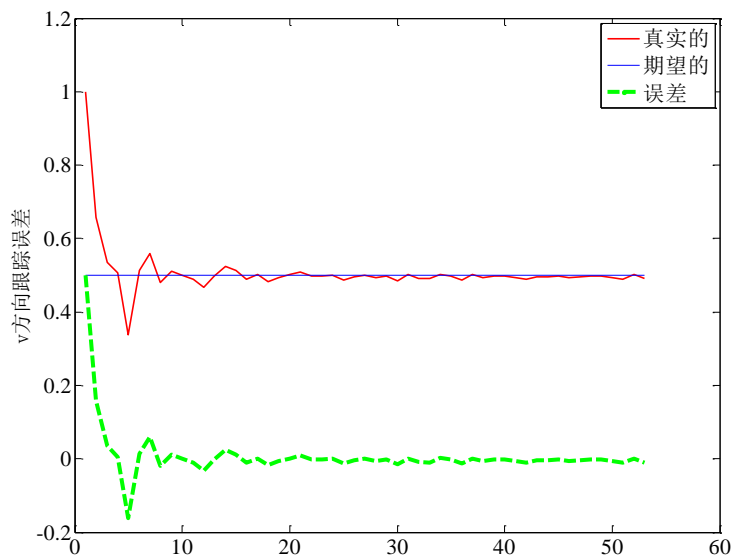


图 5-5 v 方向的图像跟踪误差

如图 5-6，为无人机对目标跟踪过程中图像特征 f_{Δ} 的跟踪误差，可参考公式 (4-6)。该值近乎正比于无人机到目标的距离。

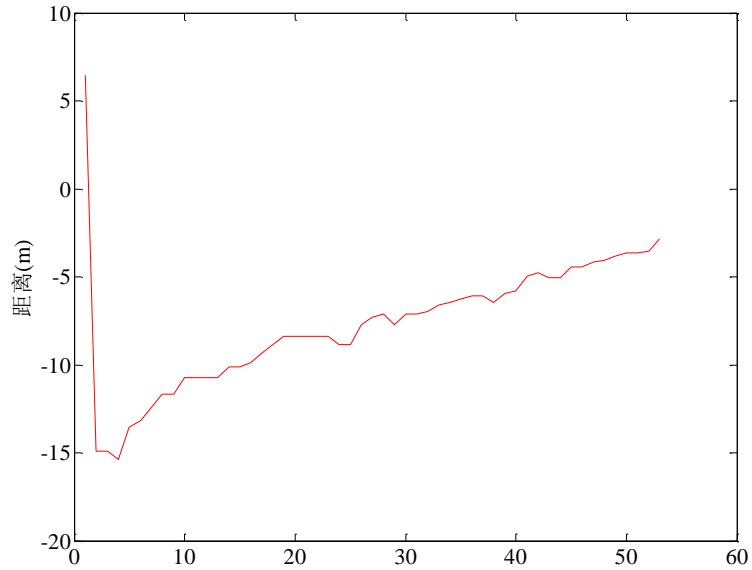


图 5-6 无人机到目标的近似距离

首先，对目标近距离跟踪时的跟踪状况进行分析。在检测到 AprilTag 时，无人机和目标之间存在一定的距离，之后该距离慢慢减小，最终无人机的位置和目标的位置一致。图 5-7 为无人机在惯性坐标系 x 方向上的跟踪效果图。

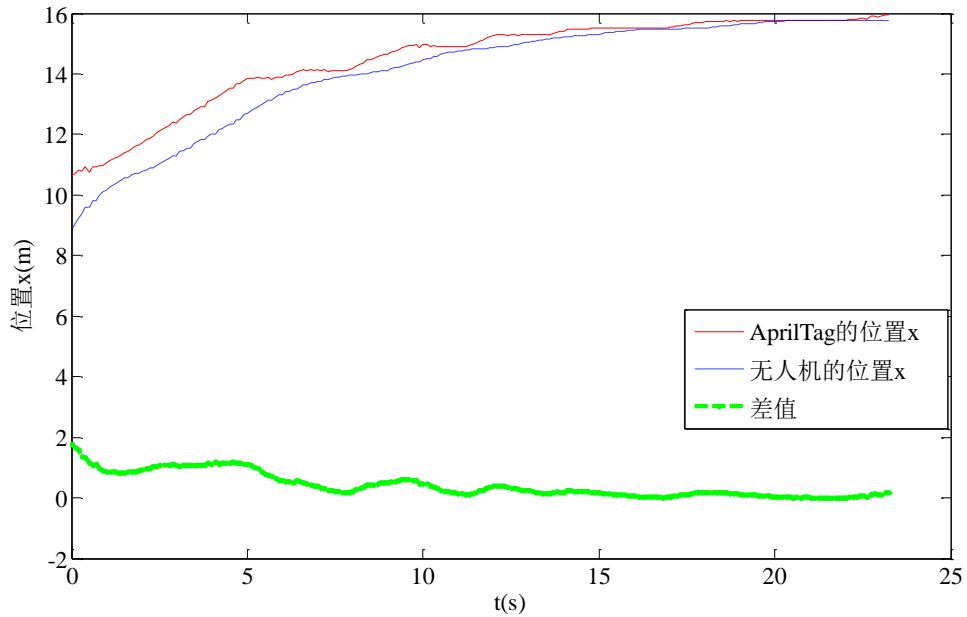


图 5-7 无人机在 x 方向上的跟踪效果

图 5-8 为无人机在惯性坐标系 y 方向上的跟踪情况。在跟踪过程中，本文控制无人机在 y 方向运动，从图上看跟踪效果还是可以的。

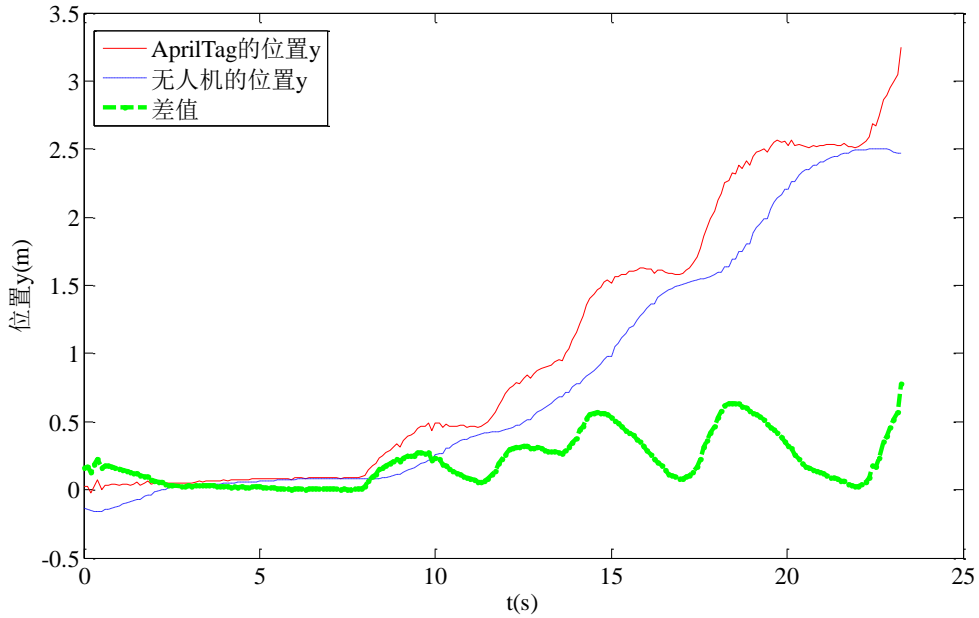


图 5-8 无人机在 y 方向上的跟踪效果

图 5-9 所示为无人机的偏航角的跟踪情况。红色的线段表示无人机期望的偏航角，由 AprilTag 定位得到。蓝色的线段表示无人机当前的偏航角，通过传感器获取。绿色的线段表示跟踪误差，其误差大概在 ± 0.4 rad 范围内。

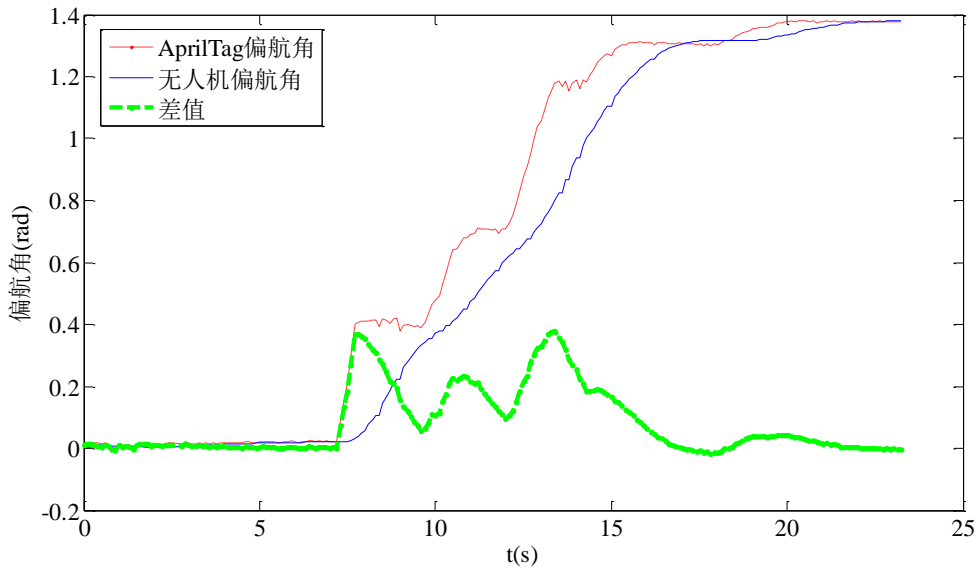


图 5-9 无人机偏航角的跟踪效果

本文通过在目标加上里程计来判断无人机和目标实际的位置差。图 5-10 为

在 x 方向无人机和目标的距离。开始跟踪之前，目标在无人机前方 8.5 m 的位置。开始跟踪之后该距离逐渐缩小，直至为零。

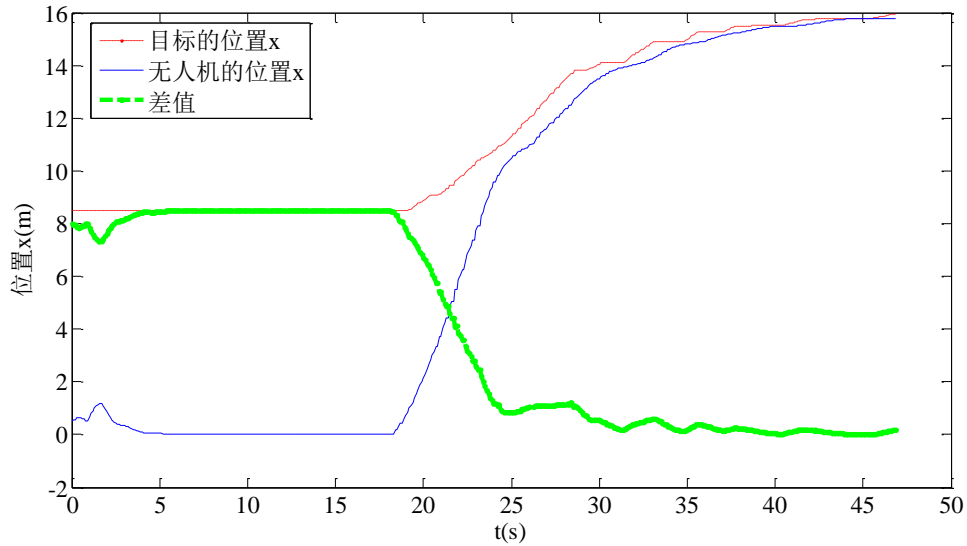


图 5-10 无人机和目标在 x 方向上的位置差

图 5-11 为无人机和目标在 y 方向距离。跟踪过程中目标在 y 方向上运动，无人机也在该方向变动。

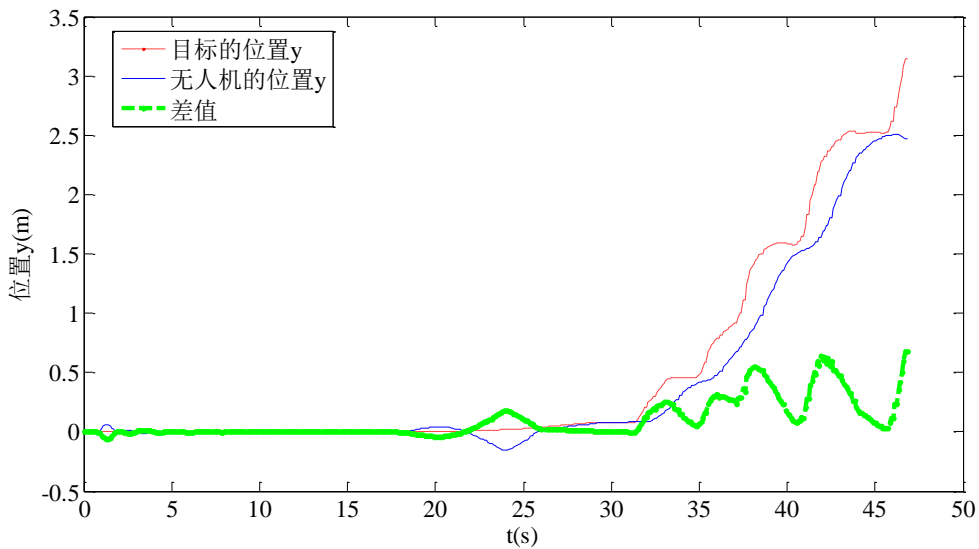


图 5-11 无人机和目标在 y 方向上的位置差

5.2.2 负载控制分析

为了验证负载控制器的必要性，本文将不加入负载控制的无人机位姿控制器和加入悬挂负载控制的跟踪控制器对无人机-负载系统的稳定情况作对比。图

5-12 为不加入负载控制的无人机稳定情况，可以看出无人机和负载 x 方向波动较大。其原因主要是负载在跟踪过程中摆动严重，最终导致无人机波动较大。

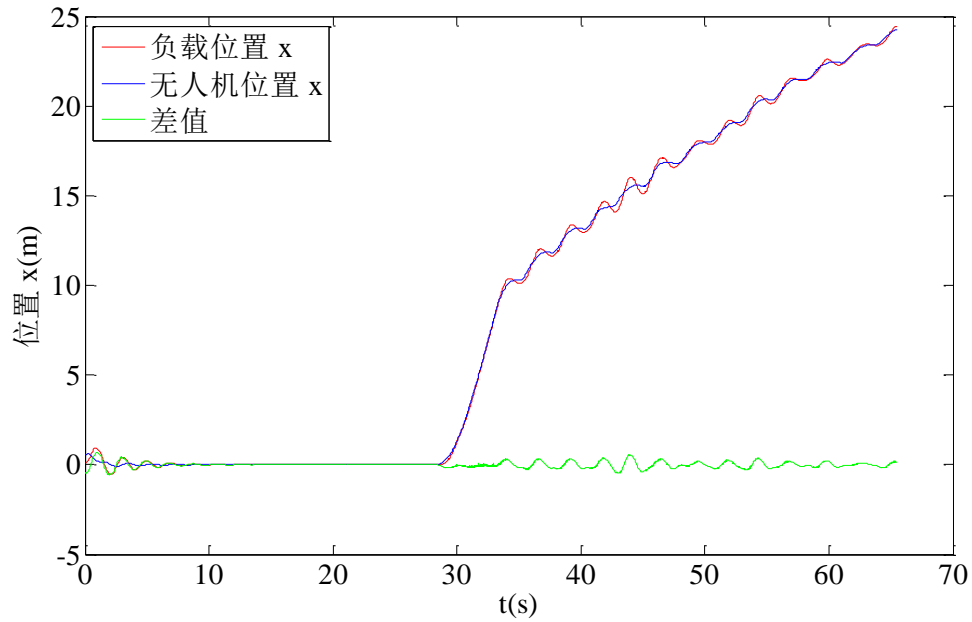


图 5-12 无悬挂负载控制 x 方向的稳定效果

图 5-13 为加入悬挂负载控制的无人机稳定情况，相比之下发现加入悬挂负载控制，无人机和负载波动大大减小，无人机飞行非常平稳。

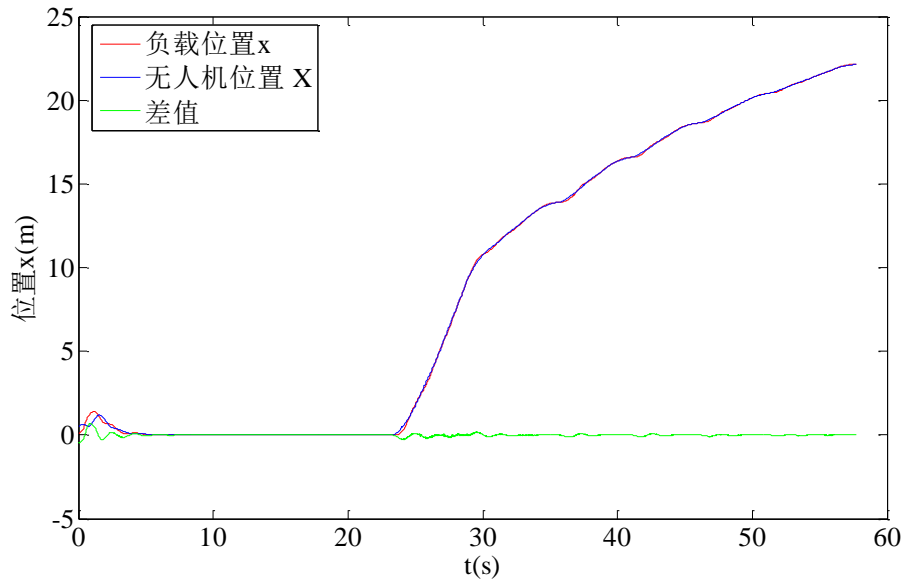


图 5-13 加入悬挂负载控制的在 x 方向的稳定效果

图 5-14 为不加入悬挂负载控制的无人机稳定情况，从图中可以看出无人机和负载在 y 方向波动较大。其原因和导致无人机在 x 方向波动的原因一致。

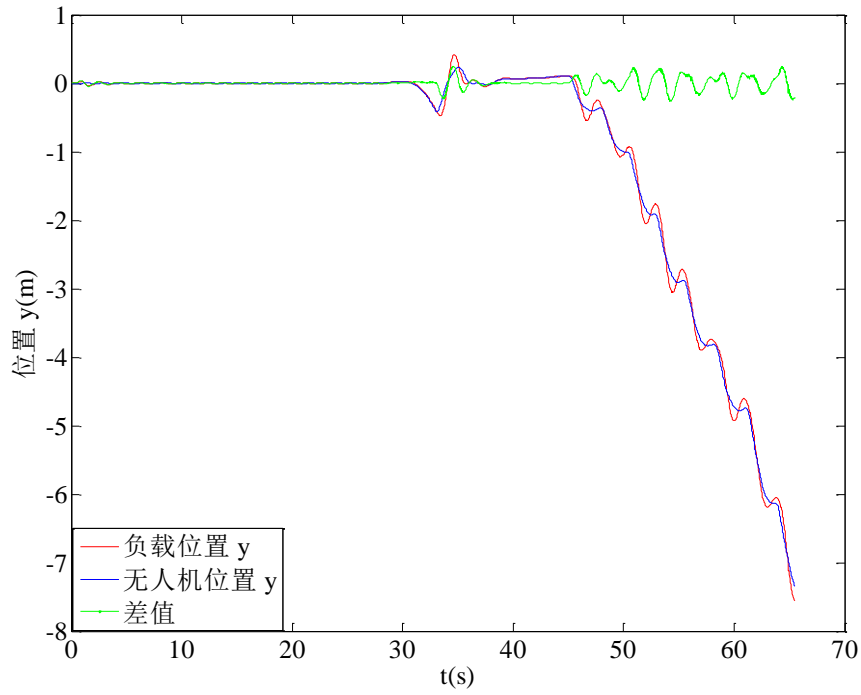


图 5-14 无悬挂负载控制在 y 方向的稳定效果

图 5-15 为加入悬挂负载控制的无人机稳定情况，相比之下发现加入悬挂负载控制，无人机和负载波动大大减小，无人机飞行非常平稳。

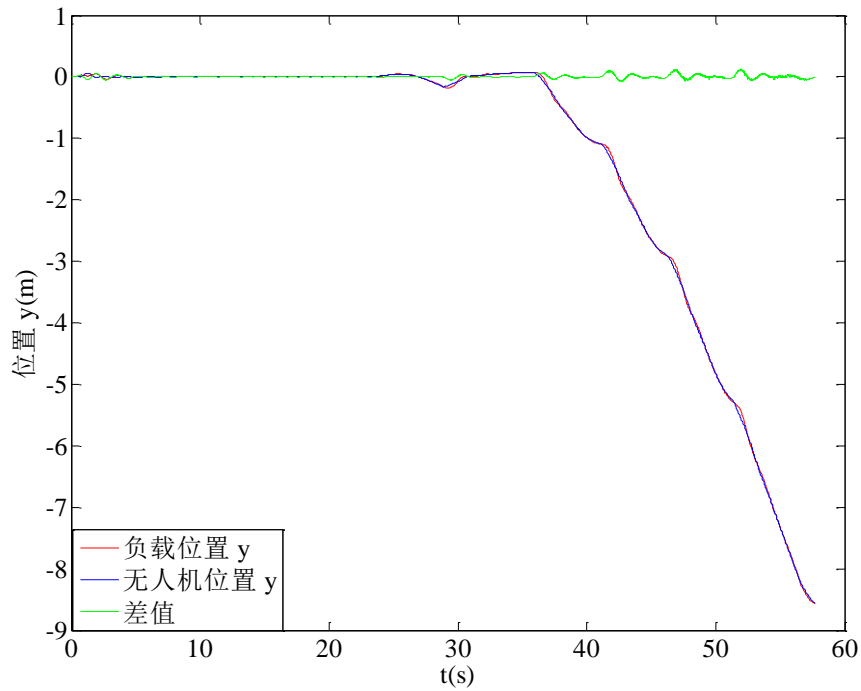


图 5-15 加入悬挂负载控制在 y 方向的稳定效果

图 5-16 为不加入负载控制情况下负载的摆动情况，负载摆动角度很大。在起飞阶段，负载需要 15 s 才能稳定下来，而且震荡频率很高。在跟踪阶段，负载的摆角达 15° 。如此大的摆角加重了无人机-悬挂负载系统的不稳定性。

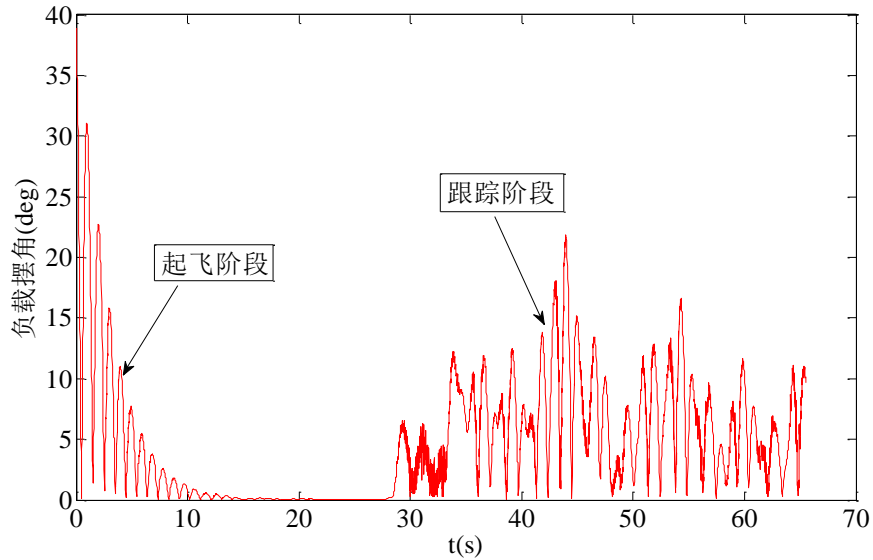


图 5-16 无悬挂负载的控制负载的摆动角度

图 5-17 为加入悬挂负载控制的负载摆动情况，从图中可以看出负载摆动角度较小。在起飞阶段，负载只需要 10 s 就能稳定下来，而且负载的摆动频率也迅速降低。在跟踪阶段，负载的摆角基本上在 5° 以下。

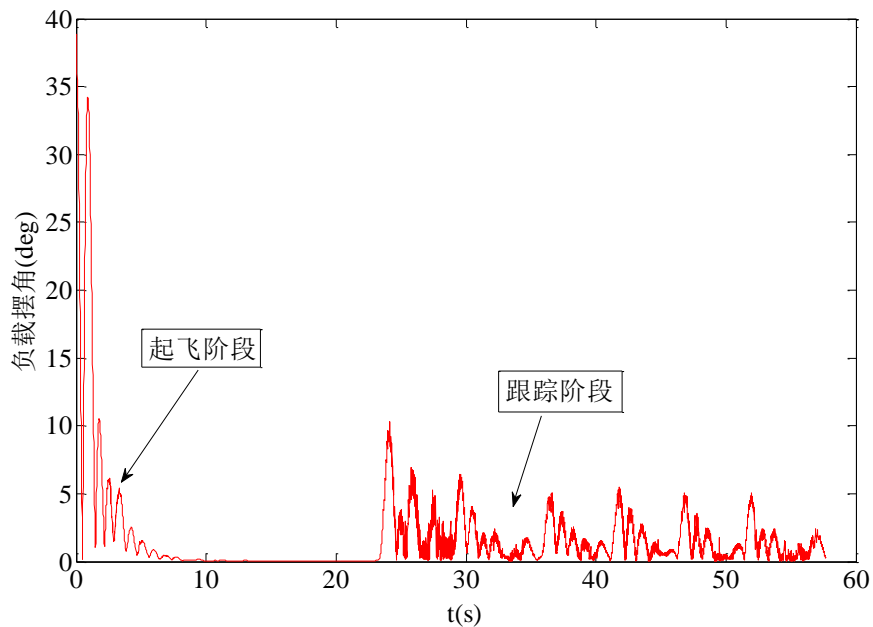


图 5-17 有悬挂负载的控制负载的摆动角度

经过实验对比，相比于不考虑悬挂负载的控制，加入悬挂负载的控制能够使无人机-悬挂负载系统很快稳定下来，震荡频率降低，明显地减小了负载摆动对无人机的干扰，增强了无人机-悬挂负载系统的稳定性。因此，在负载搬运过程中，需要加入悬挂负载的控制来稳定该搬运系统。

当无人机飞到移动目标上方，如果通过 AprilTag 定位的目标位置和无人机当前位置三个方向的偏差 ± 0.07 m 的阈值内，就断开绳子，悬挂负载就降落在无人机上，如图 5-18 所示。

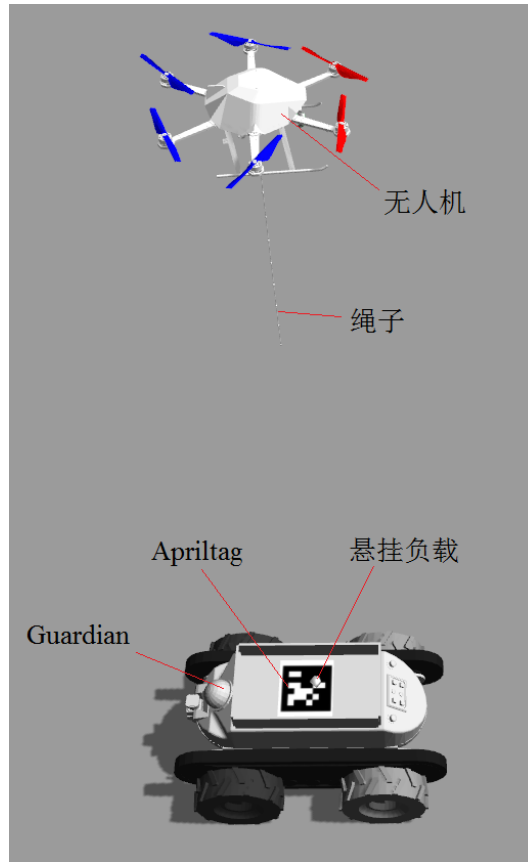


图 5-18 悬挂物降落成功示意图

通过上述几个实验，验证了本文所提出的视觉伺服控制器的有效性。该控制器能够对目标实时跟踪的同时控制负载的摆动，增强了无人机-悬挂负载系统的稳定性。

5.3 本章小结

本章在 Gazebo 环境对所提出的视觉伺服控制器的跟踪控制效果进行实验验证。首先对无人机的目标跟踪误差、AprilTag 跟踪定位进行了分析，证明了基于视觉伺服的跟踪控制器的跟踪效果。然后验证了悬挂负载控制器的必需性，

相比于不考虑悬挂负载的控制的无人机系统，悬挂物控制器能够快速稳定悬挂负载的摆动，减小了负载摆动对无人机的影响。最后控制无人机飞到目标上方，最终实现了负载在移动平台上的投放。

结论

由于多旋翼无人机具有的独特优势，多旋翼无人机成为近几年的研究热点之一，很多研究人员对其进行了深入的研究。本文主要解决的问题是在多旋翼无人机距离移动目标比较远的情况下，利用机载摄像头实现了将多旋翼无人机携带的悬挂负载投放在地面的移动平台上的目的。本文主要完成的任务有以下几点：

(1) 考虑到悬挂负载的摆动对多旋翼无人机控制的影响，本文将多旋翼无人机机体和悬挂负载当作一个整体，采用 Euler-Lagrange 方法推导了多旋翼无人机-悬挂负载系统的动力学模型。

(2) 由于无人机搬运和投放过程中，地面载物平台并非静止，因此针对这个问题，本文提出了利用视觉信息跟踪控制方法。考虑到无人机与地面移动目标距离问题，本文利用计算机视觉领域流行的 OpenTLD 和 AprilTag 跟踪算法，提出了自适应目标物跟踪策略：当无人机距离移动目标较远时，采用基于 OpenTLD 目标图像位置的视觉伺服控制器；当无人机距离移动目标较近且 AprilTag 能够被稳定地检测到时，利用 AprilTag 计算得到的目标位姿作为参考输入控制无人机飞行。

(3) 由于悬挂负载会对无人机的稳定产生严重干扰，因此本文在基于图像的视觉伺服控制器的基础上，结合无人机-悬挂负载动力学模型，设计了基于视觉伺服输出参考的跟踪控制器，其中包括无人机和悬挂负载的位置控制环、悬挂负载的姿态控制环及无人机的姿态控制环三部分。

(4) 在 ROS 系统的 Gazebo 仿真环境中搭建了六旋翼无人机-悬挂负载系统和地面移动目标平台，并在该平台下对地面运动目标进行了跟踪。实验结果表明视觉伺服控制器能够稳定跟踪地面运动目标，同时快速有效地稳定负载的摆动。最后通过 MATLAB 验证了视觉伺服跟踪控制器具有较好的跟踪控制效果。

本文的最主要特点是将目标跟踪和负载控制结合在一起，设计了视觉伺服控制器，在对目标实时跟踪的同时稳定了负载的摆动。虽然本文在 Gazebo 仿真环境下基本实现了负载的搬运，但是还有很多不够完善的地方，主要有以下几点：

(1) 在使用目标跟踪算法跟踪时，采用的手动选择待跟踪的目标，可以通过深度学习的模板匹配方式实现目标的自动识别。

(2) 当无人机与目标的距离不是很远时采用这种方式，如果目标距离无人

机非常远，目标在无人机视野中只是很微小的一点，这样，跟踪器就会失效，无法进行跟踪。如果在室外的话，可以选择地面移动目标携带 GPS 传感器，得到目标的大致位置，控制无人机靠近目标，然后再通过 AprilTag 精确定位。

（3）本文是在悬挂负载摆动较小的情况下实现负载的降落，可以通过控制悬挂负载的迅速摆动，实现快速降落。

（4）可以进一步通过实际实验验证本文方法的有效性。

根据以上分析及无人机搬运的应用需要，无人机在实际搬运应用中面临的环境更为复杂，可以选取更好的跟踪算法来解决目标部分遮挡、光照等问题，还可以加入避障算法规避飞行环境中的障碍物。

参考文献

- [1] Bernard M, Kondak K, Maza I, et al. Autonomous Transportation and Deployment with Aerial Robots for Search and Rescue Missions[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(6): 914-931.
- [2] Cicolani L S, Kanning G. Equations of Motion of Slung-Load Systems, Including Multilift Systems[J]. 1992.
- [3] 王俊生. 四旋翼碟形飞行器控制系统设计及控制方法研究[D]. 国防科学技术大学, 2007.
- [4] 王树刚. 四旋翼直升机控制问题研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2006.
- [5] 刘焕晔. 小型四旋翼飞行器飞行控制系统研究与设计[D]. 上海交通大学, 2009.
- [6] 刁琛. 四旋翼无人飞行器的非线性自适应控制器设计[D]. 天津大学, 2010.
- [7] 李伟荣, 方舟, 李诚龙. 带悬挂负载的八旋翼无人机建模与控制[J]. 计算机应用, 2015(2): 138-142.
- [8] Dai S, Lee T, Bernstein D S. Adaptive Control of a Quadrotor UAV Transporting a Cable-Suspended Load with Unknown Mass[C]//53rd IEEE Conference on Decision and Control. 2014: 6149-6154.
- [9] Altug E, Ostrowski J P, Taylor C J. Quadrotor Control Using Dual Camera Visual Feedback[C]//Proceedings of International Conference on Robotics and Automation. 2003: 4294-4299.
- [10] Bouabdallah S, Noth A, Siegwart R. PID vs LQ Control Techniques Applied to an Indoor Micro Quadrotor[C]//Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2004: 2451-2456.
- [11] Omar H M. New Fuzzy-Based Anti-Swing Controller for Helicopter Slung-Load System Near Hover[C]//IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation. 2010: 474-479.
- [12] Palunko I, Fierro R. Adaptive Control of a Quadrotor with Dynamic Changes in the Center of Gravity[J]. IFAC Proceedings Volumes, 2011, 44(1): 2626-2631.
- [13] Palunko I, Fierro R, Cruz P. Trajectory Generation for Swing-Free Maneuvers of a Quadrotor with Suspended Payload: A Dynamic Programming Approach[J]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2012, 162(4): 2691-2697.
- [14] Sreenath K, Michael N, Kumar V. Trajectory Generation and Control of a Quadrotor with a Cable-Suspended Load - A differentially-flat hybrid

- system[C]//IEEE International Conference on Robotics and Automation. 2013: 4888-4895.
- [15] Sreenath K, Lee T, Kumar V. Geometric Control and Differential Flatness of a Quadrotor UAV with a Cable-Suspended Load[C]//IEEE 52nd Annual Conference on Decision and Control. 2013: 2269-2274.
- [16] Alothman Y, Jasim W, Gu D. Quad-Rotor Lifting-Transporting Cable-Suspended Payloads Control[C]//IEEE International Conference on Automation and Computing. 2015: 1-6.
- [17] Crousaz C, Farshidian F, Buchli J. Aggressive Optimal Control for Agile Flight with a Slung Load[C]//IEEE/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2014
- [18] Todorov E, Li W. A Generalized Iterative LQG Method for Locally-Optimal Feedback Control of Constrained Nonlinear Stochastic Systems[C]//Proceedings of the American Control Conference. 2005: 300-306.
- [19] Faust A, Palunko I, Cruz P, et al. Learning Swing-Free Trajectories for UAVs with a Suspended Load[C]// IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013: 4902-4909.
- [20] 赵晓光. 基于视觉的小型无人直升机跟踪地面目标方法研究[C]//中国科学院博士后学术年会暨高新技术前沿与发展学术会议程序册. 2010.
- [21] 范才智, 刘云辉, 吴亮, 等. 无人直升机基于视觉的静止点目标跟踪[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(2).
- [22] 姜运宇. 旋翼无人机跟踪地面移动目标的视觉控制[D]. 哈尔滨工业大学, 2014.
- [23] Helble H, Cameron S. OATS: Oxford Aerial Tracking System[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2007, 55(9): 661-666.
- [24] Mejias L, Campoy P, Saripalli S, et al. Visual Servoing for Tracking Features in Urban Areas Using an Autonomous Helicopter Abstract — The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in[J]. Journal of Field Robotics, 2006, 12(3): 2503-2508.
- [25] Saripalli S, Montgomery J F, Sukhatme G. Visually-Guided Landing of an Unmanned Aerial Vehicle[J]. IEEE Trans on Robotics & Automation, 2010, 19(3): 371-380.
- [26] Kelly J, Saripalli S, Sukhatme G S. Combined Visual and Inertial Navigation for an Unmanned Aerial Vehicle[C]//Field and Service Robotics. 2008: 255-264.
- [27] Thomas J, Loianno G, Sreenath K, et al. Toward Image Based Visual Servoing for Aerial Grasping and Perching[C]//IEEE International Conference on

- Robotics and Automation. 2014: 2113-2118.
- [28] Mebarki R, Lippiello V, Siciliano B. Image-Based Control for Dynamically Cross-Coupled Aerial Manipulation[C]//Ieee/rsj International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2014: 4827-4833.
- [29] Lee T, Leoky M, McClamroch N H. Geometric Tracking Control of a Quadrotor UAV on SE(3)[C]//49th IEEE conference on decision and control. 2010: 5420-5425.
- [30] Jain R P K. Transportation of Cable Suspended Load Using Unmanned Aerial Vehicles: A Real-Time Model Predictive Control Approach[J]. 2015.
- [31] Bullo F, Lewis A D. Geometric Control of Mechanical Systems[M]. Springer, 2005.
- [32] Sreenath K, Lee T, Kumar V. Geometric Control and Differential Flatness of a Quadrotor UAV with a Cable-Suspended Load[C]//52nd IEEE Conference on Decision and Control. 2013: 2269-2274.
- [33] G. Nebehay. Robust Object Tracking Based on Tracking-Learning-Detection[D]. Vienna University of Technology, 2012.
- [34] Kalal Z, Mikolajczyk K, Matas J. Tracking-Learning-Detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 2012, 34(7): 1409-1422.
- [35] Olson E. AprilTag: A Robust and Flexible Visual Fiducial System[C]//IEEE Robotics and Automation, 2011: 3400-3407
- [36] Fiala M. ARTag: A Fiducial Marker System Using Digital Techniques[C]//IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2005: 590-596
- [37] Abawi D F, Bienwald J, Dorner R. Accuracy in Optical Tracking with Fiducial Markers: An Accuracy Function for ARToolKit[C]//Proceedings of the 3rd IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality. 2004: 260-261.
- [38] Daniel W, Dieter S. ARToolKitPlus for Pose Tracking on Mobile Devices[C]//Proceedings of 12th Computer Vision Winter Workshop. 2007.
- [39] Hutchinson S, Hager G D, Corke P. A Tutorial on Visual Servo Control[J]. IEEE Transactions on Robotics & Automation, 1996, 12(5): 651-670.
- [40] Ma Y, Kovseck á J, Sastry S. Vision Guided Navigation for a Nonholonomic Mobile Robot[M]//The confluence of vision and control. Springer London, 1998: 521-536.
- [41] 王宏杰. 机器人视觉伺服控制方法及其应用的研究[D]. 上海交通大学, 2002.

- [42] Pestana J, Sanchez-Lopez J L, Campoy P, et al. Vision Based GPS-Denied Object Tracking and Following for Unmanned Aerial Vehicles[C]//IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. 2013: 1-6.
- [43] Pestana J, Sanchez-Lopez J L, Saripalli S, et al. Computer Vision Based General Object Following for GPS-Denied Multirotor Unmanned Vehicles[C]//American Control Conference. 2014: 1886-1891.

哈尔滨工业大学学位论文原创性声明和使用权限

学位论文原创性声明

本人郑重声明：此处所提交的学位论文《基于视觉伺服的无人机悬挂负载控制研究》，是本人在导师指导下，在哈尔滨工业大学攻读学位期间独立进行研究工作所取得的成果，且学位论文中除已标注引用文献的部分外不包含他人完成或已发表的研究成果。对本学位论文的研究工作做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式注明。

作者签名：

贾二平

日期：2017年1月12日

学位论文使用权限

学位论文是研究生在哈尔滨工业大学攻读学位期间完成的成果，知识产权归属哈尔滨工业大学。学位论文的使用权限如下：

(1) 学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文，并向国家图书馆报送学位论文；(2) 学校可以将学位论文部分或全部内容编入有关数据库进行检索和提供相应阅览服务；(3) 研究生毕业后发表与此学位论文研究成果相关的学术论文和其他成果时，应征得导师同意，且第一署名单位为哈尔滨工业大学。

保密论文在保密期内遵守有关保密规定，解密后适用于此使用权限规定。

本人知悉学位论文的使用权限，并将遵守有关规定。

作者签名：

贾二平

日期：2017年1月12日

导师签名：

陈浩峰

日期：2017年1月12日

致 谢

两年半的研究生生涯已经接近尾声，这两年半以来老师以及周围的同学与室友都给予了我无数的帮助。在这里我要向所有帮助过我的人表示衷心的感谢。

首先，感谢我的导师陈浩耀副教授，这两年半里一直无私地支持我、指导我。研究生之前的我对各种专业知识几乎一无所知，是陈老师把我领进了充满挑战的无人机领域。每当我在课题研究中遭遇困难时，老师都能给我提供解决和分析思路。老师对学术的严谨以及认真态度是我学习的榜样，能够成为老师的学生是我一生的荣幸。

其次，我要感谢我的实验室的同学们。感谢都业贵同学给予我的指导和帮助，当我做课题遇到自己难以解决的问题时，他总是能帮助我，给我指导、给我思路。感谢秦野、李婷、高亚军，有你们陪伴的研究生生活过的很开心，感谢你们的帮助。感谢师兄师姐对我的指导，感谢师弟们的陪伴——一起玩耍、运动、吃饭。感谢我的室友张瑞和王晓梅同学，她们给以我生活中的帮助和陪伴。

感谢我的母校哈工大，我最快乐、最有成就感、最踏实的日子都在哈工大，我以我是哈工大人为荣。

最后我要感谢我的父母、哥哥和姐姐，是你们的无私的支持、不断的鼓励与理解，才使我走到今天，能够顺利的完成学业。今后，我将尽我最大的努力，不让你们失望。