

文本复制检测报告单(全文标明引文)

№:ADBD2019R_2019050912465020190521102835439383667659

检测时间:2019-05-21 10:28:35

检测文献: 视觉伺服多旋翼追踪打击

作者:

检测范围: 中国学术期刊网络出版总库

中国博士学位论文全文数据库/中国优秀硕士学位论文全文数据库

中国重要会议论文全文数据库

中国重要报纸全文数据库

中国专利全文数据库

图书资源

优先出版文献库

大学生论文联合比对库

互联网资源(包含贴吧等论坛资源)

英文数据库(涵盖期刊、博硕、会议的英文数据以及德国Springer、英国Taylor&Francis 期刊数据库等)

港澳台学术文献库

互联网文档资源

CNKI大成编客-原创作品库

个人比对库

时间范围: 1900-01-01至2019-05-21

检测结果

去除本人已发表文献复制比: 8.6%

跨语言检测结果: 0%

去除引用文献复制比: 8.6%

总文字复制比: 8.6%

单篇最大文字复制比: 3.9% (基于视觉伺服的小型四旋翼无人机自主飞行控制研究进展)

重复字数: [1981]

总字数: [22904]

单篇最大重复字数: [894]

总段落数: [3]

前部重合字数: [278]

疑似段落最大重合字数: [1172]

疑似段落数: [2]

后部重合字数: [1703]

疑似段落最小重合字数: [809]

指标: ☐ 疑似剽窃观点 ☒ 疑似剽窃文字表述 ☐ 疑似自我剽窃 ☐ 疑似整体剽窃 ☐ 过度引用

表格: 0 公式: 14 疑似文字的图片: 0 脚注与尾注: 0

12% (1172) 视觉伺服多旋翼追踪打击_第1部分 (总9801字)

9.2% (809) 视觉伺服多旋翼追踪打击_第2部分 (总8837字)

0% (0) 视觉伺服多旋翼追踪打击_第3部分 (总4266字)

(注释: 无问题部分 文字复制部分 引用部分)

1. 视觉伺服多旋翼追踪打击_第1部分

总字数: 9801

相似文献列表

去除本人已发表文献复制比: 12%(1172) 文字复制比: 12%(1172) 疑似剽窃观点: (0)

1	基于视觉伺服的小型四旋翼无人机自主飞行控制研究进展 吕强;马建业;王国胜;林辉灿;梁冰; - 《科技导报》 - 2016-12-28	8.0% (780)
	是否引证: 否	
2	考虑攻击角约束的导弹末制导律研究 姜丽松(导师: 李传江) - 《哈尔滨工业大学博士论文》 - 2017-06-01	2.1% (207)
	是否引证: 否	
3	基于PixHawk和Matlab的多旋翼控制算法快速开发和教学示范 刘凡宁 - 《大学生论文联合比对库》 - 2018-05-26	1.0% (100)
	是否引证: 否	
4	12850130_刘凡宁_基于MATALB和Pixhawk的多旋翼控制算法快速开发和教学示范 刘凡宁 - 《大学生论文联合比对库》 - 2018-05-26	1.0% (100)
	是否引证: 否	
5	基于视觉伺服的四旋翼飞行器悬停控制 陈旭潮;曹志强;于莹莹;周超; - 《华中科技大学学报(自然科学版)》 - 2015-10-16 0	0.6% (58)
	是否引证: 否	

原文内容

摘要

多旋翼飞行器因其体积小、重量轻、造价低，具有良好的机动性能和操纵性能而才成为一种被广泛使用的现代工具，在搜索、航拍、监视等领域表现出出色的特征优势，更被应用到军事行动等特殊领域。现代战争中已经开始将多旋翼投入到狭窄空间和街头楼巷的作战任务中，但是通常需要经验丰富的操纵手控制其对目标实现精确打击，这种方法有高风险性、低易用性等弊端，所以本文希望提出一种可靠的基于图像的伺服控制方法，使多旋翼自主飞行打击目标。

本文的主要目标是设计一种基于图像的伺服控制方法，可以在近距离自主打击目标并且打击过程中目标收敛在图像视域内。本文首先建立了多旋翼通道模型和视觉伺服模型，作为算法设计的数学基础；因为本文设计重点在伺服控制算法，所以随后介绍了实验中应用的成熟的视觉追踪算法；然后是核心章节设计视觉伺服算法，基于数学模型设计竖直和横侧向通道的控制算法，并带入到解耦后的雅阁比矩阵证明算法的收敛性。

本文在MATLAB上利用虚拟现实工具箱对视觉伺服算法进行视景仿真验证。采用V-Realm Builder建立三维场景模型，在Simulink中搭建完整视觉伺服系统所需的多旋翼模型、VR视景、图像追踪模块和视觉伺服控制器。仿真结果表明，本文设计的方法可以实现多旋翼飞行器的基于图像的近距离追踪打击控制，最后探讨了目标不同运动轨迹、不同运动速度对控制效果的影响。

关键词：多旋翼飞行器，视觉伺服，图像追踪，视景仿真

Image Based Visual Servo Control System of Multi-rotor Aircrafts

Abstract

The multi-rotor aircraft has become a widely used modern tool, due to its small size, light weight, low cost, good maneuverability and stability, showing excellent features in the fields of search, aerial photography, surveillance, etc. It is also applied to special areas such as military operations. In modern warfare, multi-rotors have been put into the battle missions of narrow spaces and street buildings, but the tasks usually require experienced manipulators to accomplish precision strikes, which has many disadvantages such as high risk, low ease of use, etc. So this paper hopes to propose a reliable image-based servo control algorithm, so that multi-rotor aircrafts are able to autonomously accomplish precision blow.

The main goal of this paper is to design an image-based servo control algorithm, which can autonomously strike the target at close range and lead the target to converge in the image field of view. In this paper, the multi-rotor channel model and the visual servo model are first established as the mathematical basis of algorithm design. Because the design focuses on the servo control algorithm, the mature visual tracking algorithm applied in the experiment is introduced. Then the core chapter is about the design of visual servo algorithm. Based on the mathematical model mentioned above, the paper designs the control algorithm for the vertical and horizontal channels, and brings the convergence of the decoupled Interaction Matrix to prove the algorithm.

In this paper, the virtual reality toolbox is used to verify the visual servo algorithm on the MATLAB. The V-Realm Builder is used to build a 3D scene model, and the multi-rotor model, VR view module, image tracking module and visual servo controller required for the complete visual servo control system are built in Simulink. The simulation results show that the proposed method can realize the image-based close-range tracking control of multi-rotor aircraft. Finally, the effects of different motion trajectories and different motion speeds on the control effect are discussed.

Key words: multi-rotor aircrafts, image based visual servo control, image tracking

目录

1.绪论.....	6
1.1研究背景.....	6
1.2研究意义.....	7
1.3国内外研究现状.....	8
1.3.1图像追踪算法.....	8
1.3.2视觉伺服概论.....	8
1.3.3带有视场角约束的制导律.....	10
1.3.4小结.....	11
1.4研究目标与研究内容.....	11
1.4.1研究目标.....	11
1.4.2研究内容.....	11
1.4文章组织结构.....	14
2.多旋翼视觉伺服模型.....	15
2.1多旋翼飞行器通道模型.....	15
2.2视觉成像模型.....	17
2.3视觉伺服模型.....	19
2.3.1视觉伺服公式.....	19
2.3.2雅阁比矩阵.....	20
2.3.3竖直通道和横侧向通道的雅阁比矩阵.....	21
2.4本章小结.....	22
3.图像追踪算法.....	23
3.1图像追踪算法比较与选取.....	23

3.2本章小结.....	25
4.视觉伺服控制.....	26
4.1纵向通道控制器设计.....	26
4.2横侧向通道控制器设计.....	27
4.3仿真测试和性能分析.....	29
4.4本章小结.....	34
5.仿真平台和综合实验.....	35
5.1仿真环境搭建.....	35
5.2 综合控制系统框架.....	36
5.2.1子模块构成.....	37
5.2.2仿真框架.....	40
5.3仿真测试和性能分析.....	42
5.4本章小结.....	47
6.总结和展望.....	48
总结.....	48
展望.....	48
致谢.....	49
参考文献.....	50

1 绪论

1.1 研究背景

多旋翼无人机正快速成为一种适用范围广泛的现代工具，它在搜索、远程遥感、救援、航拍、监视等领域已经表现出出色的特征优势[1]，更被应用于军事行动等特殊领域。小型多旋翼无人机由于体型小、质量轻、可垂直起降、安全性好、机动灵敏、结构简单等特点，在现代战争中开始被应用于狭窄空间和街头楼巷的作战任务中，到现在更是已经推广到更多场景。近年来，小型多旋翼无人机因体型小、造价低、易操作、易维护、易携带、隐蔽性高和适用于严峻环境等特点，频频出现在叙利亚、利比亚战场上。

目前主流采用遥控多旋翼，需要经验丰富的操纵手操控多旋翼无人机实现对目标精确打击。然而这种方式存在诸多不足，首先完成打击需要经验丰富的操纵手，降低了多旋翼作战的易用性和广泛应用潜力，大大增加操纵手的培训成本；并且几乎只能对侦查过的固定目标进行打击，例如对入侵的多旋翼无人机这种灵活目标这种方法就难以奏效；在复杂地形中需要保持多旋翼处于操纵手视域之内，操纵手的人身安全威胁增加，因此一个合理的需求是制定一种可靠的方法控制飞行器自主飞行[2]。

图1.1 竖直平面目标打击示意图

本文针对这种需求考虑使用视觉伺服近距离打击控制的方法完成目标，竖直平面目标打击示意图如图1.1所示，红色块为目标，小型多旋翼无人机的机架上固连着摄像头获取图像。在机载处理器处理信息的情况下，通过摄像头获取图片，使用视觉追踪算法捕获目标在图像中的位置坐标，利用视觉伺服算法控制飞行器运动使得目标始终在摄像头视域之内并向中心收敛，完成一个控制闭环。这种新型作战方式脱离了操纵手的限制，减少大规模培训操纵手所需的经济成本和时间成本，对于普通士兵更加易用，对移动的灵活目标更具威胁，应用场景更加广泛，并且保护了操纵人员的安全。

1.2 研究意义

相较于传统的单兵打击方式，利用多旋翼飞行器这种现代工具进行打击无疑是更加优秀的，多旋翼飞行器打击是一种远程打击，所以可以有效降低士兵所受到的危险，并且适用于更加广泛的地形环境，可以打击士兵所不能及的目标区域，多旋翼飞行器还在一定程度上具有视距外打击能力，增强了打击的隐蔽性和突发性。

使用操纵手控制多旋翼无人飞行器打击是目前战场主流作战方式，大多需要操纵手操控到达指定地点完成任务，操纵手在靠近目标的地方是非常危险的，采用视觉伺服进行近距离跟踪控制打击脱离了对于经验丰富的操纵手的需求，保护了操纵手的安全，同时降低了培训操纵手的经济和时间成本，面向普通士兵使用更加友好，提高这种新型作战方式的易用性和推广性，降低军队列装难度，并且该方法对于灵活移动物体具有有效打击能力。

传统的多旋翼飞行器一般采用全球定位系统（GPS）和惯性测量单元（IMU）提供飞机的位姿信息。但是GPS信号穿透性弱，信号强度大大影响定位精度，在山区、森林、洞穴以及建筑物繁多的城市等复杂地形和室内都不具有很高的可靠性，尽管IMU/GPS组合导航方法可以充分利用二者互补特性以提高位姿测量的精度和实时性，但其局部定位精度依然难以满足需求，因此借助视觉传感器获取图片感知局部环境是一种有效的代替方案[3]。

在目前现有传统控制多旋翼方法中，大多只适用于打击侦查过的固定目标，或者不灵活的移动目标，对于例如入侵己方领空的多旋翼无人机这种灵活机动性极高的目标不具有打击能力，而使用视觉伺服的方法可以打击灵活目标，增加了打击目标范围。

在跟踪目标并且打击和设计制导律方面，对于导弹的研究比较充分，然而多旋翼飞行器具有导弹所不具备的优势，小型多旋翼无人机体型小、造价低、易操作、易维护、易携带、隐蔽性高，适用于严峻环境，所以适用于在狭窄复杂的环境，灵活机动的任务中，并且容易单兵携带，所以研究小型多旋翼的制导打击是具有现实意义的。

1.3 国内外研究现状

多旋翼最初多使用GPS（Global Positioning System）进行控制，但是考虑到GPS信号被环境影响很大，研究人员考虑使用视觉信息来获取多旋翼的位置信息。现在已经有了一些多旋翼的视觉控制应用。事实上，因为在很多多旋翼平台上已经有视觉系统，所以收集到的视觉信息可以很容易地替换掉GPS和IMU在控制闭环中所起到的作用。

例如，文献[4]利用基于图像的视觉伺服算法实现直升机自主悬停在一个固定标定上空，相似的应用还有[5]中通过实时的视觉伺服算法实现直升机在固定标定上降落，文献[6]中使用视觉伺服算法延道路飞行。这些应用的目标都是固定目标或者缓

慢目标，本文希望利用视觉伺服算法追踪一些移动方式不同的目标。

1.3.1 图像追踪算法

在线视觉追踪旨在实景中追踪目标位置。广义来讲，一种视觉追踪算法包含两个组成部分：一种运动模型，描述物体随时间的状态并预测其可能的状态；一个观测模型，描述目标的外表特征并在每一帧进行预测。一些学者已经证实了，观测模型比运动模型更重要。视觉追踪是计算机视觉的诸多应用中一种基础的任务类型，并且已经被研究了数十年。尽管研究者们已经提出了很多实现方法，稳定有效的视觉追踪任然是一个艰巨的挑战。视觉追踪的困难在于目标运动、特征变化、目标结构变化和摄像头运动。目前的算法正逐步解决这些问题。

传统的追踪算法专注于从在线学习算法或者指定的特征中研究稳定的表征模型。这些算法包括IVT[7], MIL[8], APGL[9], KCF[10], ASLAS[11]。

在近几年，深度学习因为成功通过多层非线性变换实现了特征提取，在计算机视觉领域取得了重要进步。有一些使用深度学习的追踪算法，比如MDNet[12], STCT[13], SiameFC[14]已经证明了他们提升追踪效果的潜力。

本文将比较一些成熟的、可以在线使用的视觉追踪算法在视景仿真中的效果，并选用一种已经成熟的追踪算法作为完成视觉伺服系统的必要模块。

1.3.2 视觉伺服概论

视觉伺服指的是利用计算机视觉数据对机器人的运动进行控制，依赖于控制理论、图像处理和计算机视觉等技术。图像数据由摄像头获取，摄像头可以直接固连在多旋翼上，这样摄像头的位姿和多旋翼位姿耦合；也可以将摄像头固定在一个工作空间周围，这样可以在惯性系下观察获取多旋翼位姿。根据这两种不同的方式，我们将前一种称为于图像的视觉伺服（Image-Based Visual Servo, IBVS），后一种称为基于位置的视觉伺服（Position-Based Visual Servo, PBVS）

所有基于视觉伺服的方案，目的都是减小图像误差。误差表示为

其中，矢量是图像的测量值；是视觉特征点矢量；为期望特征值；为摄像头固有参数。

在PBVS中，定义为一组三维参数，必须从图像中估计；而在IBVS中，图像中直接可用的一系列特征点，即跟踪点在图像平面中的坐标，可以在图像中直接读出[15]。

在基于位置的视觉伺服中，视觉传感器被利用视觉算法通过获取深度信息，构建三维空间的方法，实现位置估计，因而被认为是一种三维传感器。但是控制定律是在笛卡尔空间中定义的，因此摄像头只有在笛卡尔空间能找到最有曲线，而图像空间中则不能跟踪最优轨迹，所以使用这种方法时，利用图片即使在图像测量的错误都会可能导致位姿的严重误差，因而影响整个系统。多旋翼飞行器的PBVS基本结构如图1.2所示。

图1.2 PBVS基本结构

在基于图像的视觉伺服中，视觉传感器直接从图像空间中提取特征，被认为是一种二维传感器，相较于PBVS使得IBVS对于校准和图像误差具有显著的鲁棒性。但是IBVS也有缺点，当移位过大，摄像头会达到局部最小值或跳过交互矩阵的奇点，从而不可预知摄像头的运动。多旋翼飞行器的IBVS基本结构如图1.3所示[16]。

图1.3 IBVS基本结构

PBVS和IBVS的主要优缺点总结如下表1.1

表1.1 PBVS和IBVS优缺点总结

特点 PBVS IBVS

优点可以直观地在直角坐标空间定义目标的运动，符合现有机器人的工作方式无需三维空间定位、对摄像机和机器人标定不敏感；计算量较小

缺点控制精度很大程度上依赖于位姿估计精度，而位姿估计精度依赖于摄像机和机器人的标定精度等；此外计算较大伺服控制器复杂且缺乏适应性；需要额外的传感器获取深度信息；移位过大会导致不可预知摄像头运动

本文使用基于图像的视觉伺服，在图像中获取目标的图像坐标系坐标，利用交互矩阵建立摄像头的速度、角速度和图像目标偏差的矩阵运算关系，从而完成接下来的控制闭环。

1.3.3 带有视场角约束的制导律

多旋翼基于视觉伺服的制导可以参考有视角约束的制导问题，因为多旋翼打击过程中需要保持目标在摄像头视域之内。可以通过研究导弹导引头带视角约束的末制导律设计，得到四旋翼飞行器带有视角约束制导律设计问题的解决思路。

文献[17]首次对导引头视场约束进行了讨论，该问题被假设为非线性最优控制问题，计算垂直于视角的速度和能量，作为最优加权函数。文献[18]仅考虑导引头视场约束，设计了两段具有切换逻辑的制导律，拼接成复合制导律，第一段被称为原制导律，第二段为恒定目标视角制导律。在此基础上，文献[19]设计了带有状态变量不等式约束的三段复合制导律，第一段制导律在初始阶段起作用，目标是导引头达到最大视角，第二段制导律在中段起作用，目标是导引头视角始终保持在边界值内，第三段制导律在末段起作用，目标是保证导弹以期攻击角成功拦截目标。

1.3.4 小结

多旋翼飞行器平台可以容易地获取摄像头的图像信息，经过视觉伺服算法建立摄像头速度、角速度与图像坐标系中目标偏差的矩阵运算关系，因为摄像头固连在机架上，摄像头的运动状态可以近似的认为就是飞行器的运动状态。为了目标向图像中心收敛，可以考虑参考导弹的带视角约束的制导问题解决方案，据此获得期望的飞行器控制向量，可以完成控制闭环，基于图像的视觉伺服。

1.4 研究目标与研究内容

本节将列出本文的研究目标与研究内容，下面将分别描述。

1.4.1 研究目标

研究目标是实现多旋翼飞行器基于视觉伺服的近距离攻击控制，设计制导律并且完成整个过程的仿真。具体可以分为以下几个目标：

- (1) 建立多旋翼飞行器运动和通道模型，视觉成像和视觉伺服模型。
- (2) 选取图像追踪算法，根据数学模型分别设计竖直平面和水平面上视觉伺服实验公式
- (3) 在MATLAB上设计控制器并设计示意仿真实验，验证公式的正确性并比较偏差，分析示意实验中各参数的作用和影

响，指导之后实验中的参数选取。

(4) 基于推导的公式需求，修改实验室搭建的MATLAB/Simulink平台多旋翼模型输入向量和一系列内部模块，使用VRML搭建仿真环境，并用结合VR工具库获取图像，完成MATLAB/Simulink上的三维视觉伺服仿真。

(5) 评价方法完成情况和效率。

1.4.2 研究内容

1.4.2.1 研究内容简介

本文描述的应用场景是，具有固连在其机架摄像头地多旋翼无人飞行器利用视觉伺服算法追踪以不同方式运动的目标。

研究流程：多旋翼飞行器平台可以容易地获得图像信息，利用已有的图像追踪算法追踪目标在图像坐标系中的坐标，将图像坐标偏差输入到视觉伺服控制器中，控制器输出多旋翼飞行器的控制向量，改变多旋翼位姿，因为摄像头与飞行器固连，即改变了摄像头视角和目标的图像坐标位置，从而完成反馈，形成控制闭环，令目标向图像中心收敛并追踪目标移动。控制整体流程框架如图1.4。

图1.4 控制整体框架

本文重点在于控制算法，即视觉伺服部分的设计、编写、仿真和效果评价，因为目前视觉跟踪算法已经很多并且很成熟，所以不作为本文研究的重点，只需要在应用时选取已有图像追踪算法。

1.4.2.2 研究内容解析

(1) 建立数学模型

1. 研究多旋翼飞行器运动模型和通道模型，对非线性模型新型适当线性化简化和线性化处理，最终得到多旋翼的水平通道模型、高度通道模型和姿态模型。

2. 研究视觉成像模型，通过针孔模型确定物理图像坐标系和世界坐标系转换关系。

3. 研究视觉伺服模型，通过摄像机模型推导图像坐标系坐标和相机坐标系坐标转换关系，得到雅阁比矩阵，并根据水平竖直分解后的运动公式，得到水平竖直化简后的雅阁比矩阵。

(2) 设计视觉并推导伺服控制公式

1. 选取MedianFlow图像追踪算法，了解算法原理并实现算法。

2. 在竖直平面上，根据已建立的多旋翼通道模型和视觉伺服模型，推导设置参数，使目标在图像中可以向中心收敛。

3. 在水平面上，根据已建立的多旋翼通道模型和视觉伺服模型，推导设置参数，使目标在图像中可以向中心收敛。

(2) MATLAB示意仿真和结果分析

1. 根据竖直平面和水平面设计的视觉伺服公式，在MATLAB上编写控制器，进行示意仿真。

2. 分析示意仿真结果，分析参数在公式中的意义和对结果的影响，对之后的仿真参数整定起指导作用。

(3) 搭建MATLAB/Simulink平台模型

1. 基于实验室搭建的多旋翼Simulink模型和多旋翼运动学公式，根据实验中输入控制向量需求，修改多旋翼模型。

2. 使用VRML搭建3D仿真环境，根据需求模拟真实的环境，设置目标运动轨迹。

3. 使用MATLAB/Simulink中的VR工具库获得VR显示图像，并进行必要的图像处理，使用图像跟踪算法得到每帧目标点图像中的坐标位置。

4. 搭建视觉伺服算法模块作为控制器，并将返回的控制向量反馈给多旋翼完成控制闭环。

(4) MATLAB仿真

1. 在MATLAB / Simulink平台上按照制导律编写控制器，输入图像坐标、已知量和多旋翼飞行控制参数，输出飞行器控制向量。

2. 在MATLAB平台上完成仿真全过程，改变目标的运动方式，检验在目标不同运动方式和速度下的视觉伺服算法。

3. 绘制每次仿真中目标和多旋翼飞行器的运动轨迹，根据飞行器轨迹计算控制评价指标，比较对应的目标和多旋翼参数，得到一些结论对算法有一些定性认知。

1.4 文章组织结构

本文分章节详细介绍了多旋翼飞行器利用视觉伺服算法追踪移动目标整个系统的设计和仿真过程。其中第1章主要介绍了课题来源、研究背景和研究内容，并说明了国内外对图像追踪算法、视觉伺服、带视觉约束的控制律设计的研究现状。第2章在数学基础上对本研究课题进行支撑，介绍了多旋翼运动模型、视觉成像模型和视觉伺服模型，并明确了每个模型的输入输出关系。第3章主要介绍了视觉跟踪算法，当第一帧的目标图像坐标系位置标定出时，可以通过本算法持续获得目标的坐标信息。第4章是视觉伺服控制算法的设计过程并通过示意仿真比较全面地了解了算法中的参数影响。在本章中，将多旋翼在三维空间中的运动拆分成竖直平面和水平面的运动分别进行控制设计，以简化模型和运算，然后进行平面中的示意仿真，定性地得到每个参数对控制的影响程度和参数的合理范围，对之后仿真中的参数整定打下基础。第5章基于第2，3，4章的设计过程进行VR场景中的仿真实验，首先是搭建虚拟场景，然后在Simulink中编写控制器，搭建控制闭环，改变目标的运动方式验证多旋翼视觉伺服算法，最后对仿真过程进行评价。最后纵观全文，对本文做出总结，对不足之处做出以后的期望和改进方向探讨。

2 多旋翼视觉伺服模型

2.1 多旋翼飞行器通道模型

直接建立的多旋翼模型是非线性模型，为了便于控制器控制，需要对非线性模型进行适当的线性化简化和线性化处理。多旋翼非线性模型[20]：

位置方程可以进一步写成为

下文为了渐变，将忽略上标、下标，即默认，，，。从公式(1)~(4)可见，多旋翼飞行控制系统是一个典型的非线性系统，这使得多旋翼的分析和控制器设计十分复杂。此外，多旋翼还具有欠驱动、强耦合、阶数高的特点。因此需要更具多旋翼飞行特点对非线性模型进行化简，然后基于化简的系统模型设计控制器。假设多旋翼的飞行特点是俯仰角和滚转角都非常小，总拉力约等于多旋翼的重力。这些假设进一步可以写为

此时，式(3)中的矩阵似为单位矩阵式(2)中的变为

最终，原始模型(1)~(4)解耦为三个线性模型，即水平位置通道模型，高度通道模型和姿态模型。

1、水平位置通道模型
根据小角度假设，式（5）前两个式子化简为
其中，
在水平通道模型（8）中，因为
-g AΨ已知，
-g AΨ可以看作输入，看成输出，水平位置通道模型（8）实质上是一个线性模型。

2、高度通道模型
根据小角度假设，式（5）第三个式子化简为
与水平通道模型化简不同，不是高阶无穷小，因此不能忽略，否则高度通道没有输入了。显然，高度通道模型也是一个线性模型。

3、姿态模型
联立（3）和（4）可得到如下姿态模型：
这也是一个线性模型。
将多旋翼模型从非线性模型线性化后，得到水平通道模型、高度通道模型、姿态模型三个通道模型，可以非常直观地得到期望多旋翼速度、角速度和控制向量之间的线性方程关系。

指 标
疑似剽窃文字表述
1. 小型多旋翼无人机由于体型小、质量轻、可垂直起降、安全性好、机动灵敏、结构简单等特点， 2. 近年来，小型多旋翼无人机因体型小、造价低、易操作、易维护、易携带、隐蔽性高和适用于严峻环境等特点， 3. 小型多旋翼无人机体型小、造价低、易操作、易维护、易携带、隐蔽性高，适用于严峻环境， 4. 视觉伺服概论 视觉伺服指的是利用计算机视觉数据对机器人的运动进行控制，依赖于控制理论、图像处理和计算机视觉等技术。 5. 但是控制定律是在笛卡儿空间中定义的，因此摄像头只有在笛卡儿空间能找到最有曲线，而图像空间中则不能跟踪最优轨迹，所以使用这种方法时，利用图片即使在图像测量的错误都会可能导致位姿的严重误差，因而影响整个系统。多旋翼飞行器的PBVS基本结构如图1.2所示。 6. 使得IBVS对于校准和图像误差具有显著的鲁棒性。但是IBVS也有缺点，当移位过大，摄像头会达到局部最小值或跳过交互矩阵的奇点，从而不可预知摄像头的运动。 7. PBVS和IBVS优缺点总结 特点 PBVS IBVS 优点可以直观地在直角坐标空间定义目标的运动，符合现有机器人的工作方式 8. 控制精度很大程度上依赖于位姿估计精度，而位姿估计精度依赖于摄像机和机器人的标定精度等；此外计算较大伺服控制器复杂且缺乏适应性；需要额外的传感器获取深度信息；移位过大会导致不可预知摄像头运动 本文使用基于图像的

2. 视觉伺服多旋翼追踪打击_第2部分		总字数：8837
相似文献列表		
去除本人已发表文献复制比：9.2%(809) 文字复制比：9.2%(809) 疑似剽窃观点：(0)		
1	高职院校基于VRML的室内设计虚拟实验环境的构建 吴亚莉;-《青春岁月》-2018-10-08	2.7% (242) 是否引证：否
2	基于3D重建技术的图像合成 - 豆丁网 -《互联网文档资源 (http://www.docin.com) 》- 2016	2.5% (225) 是否引证：否
3	基于3d重建技术的图像合成 - 豆丁网 -《互联网文档资源 (http://www.docin.com) 》- 2016	2.5% (225) 是否引证：否
4	ArcGIS构造三维水文地质模型探讨 丁赛;陶月赞;-《地理空间信息》-2011-06-28	2.2% (192) 是否引证：否
5	VRML虚拟现实技术在中学化学教学中的应用 颜韡;-《中小学电教(下)》-2010-06-20	2.2% (192) 是否引证：否
6	基于网络的虚拟实验室平台研究 曹剑文;-《企业技术开发》-2014-09-26	2.2% (190) 是否引证：否
7	基于J2EE的JAVA3D在虚拟服装WEB展示上的应用 茆丽丽(导师：赵野军)-《北京服装学院硕士论文》-2008-12-01	2.1% (185) 是否引证：否
8	3D技术在室内设计中的应用研究 杨硕 -《大学生论文联合比对库》-2012-04-22	2.1% (184) 是否引证：否
9	南昌市雒文化广场虚拟漫游系统的设计与实现 李轩(导师：罗蕾;吴三胜)-《电子科技大学博士论文》-2011-03-18	2.0% (180) 是否引证：否

10	通用技术课程虚拟技术试验设计与应用研究 孙宏志(导师：解月光) - 《东北师范大学博士论文》 - 2013-05-01	2.0% (180) 是否引证：否
11	计算机图形学基本图元生成算法演示系统 方淳杰 - 《大学生论文联合比对库》 - 2015-03-21	2.0% (180) 是否引证：否
12	1-9毕业设计说明书(论文)正文、结论、参考文献等标准格式(理工科专业学生用) 2 - 《大学生论文联合比对库》 - 2013-05-07	2.0% (179) 是否引证：否
13	机械手远程遥控——三维虚拟仿真 邵海建 - 《大学生论文联合比对库》 - 2013-06-03	2.0% (179) 是否引证：否
14	机械手远程遥控——三维虚拟仿真 邵海建 - 《大学生论文联合比对库》 - 2013-06-04	2.0% (179) 是否引证：否
15	柴油机关键件全三维模型参数化设计及数字化定义 江荣波 - 《大学生论文联合比对库》 - 2014-05-25	2.0% (179) 是否引证：否
16	张庆 正文、结论、参考文献等标准格式 2 - 《大学生论文联合比对库》 - 2013-05-19	2.0% (179) 是否引证：否
17	基于视觉伺服的小型四旋翼无人机自主飞行控制研究进展 吕强;马建业;王国胜;林辉灿;梁冰; - 《科技导报》 - 2016-12-28	1.3% (114) 是否引证：否
18	基于CUDA加速的视觉算法软件实现 徐晋鸿 - 《大学生论文联合比对库》 - 2015-06-09	1.1% (100) 是否引证：否
19	基于机器视觉的可转位刀片几何参数测量及周边刃边缘检测技术 陈宇彤(导师：叶军君) - 《厦门大学博士论文》 - 2017-11-01	0.8% (69) 是否引证：否
20	基于深度神经网络的形变中文文档矫正研究 程雷雷(导师：邢延超) - 《青岛理工大学博士论文》 - 2018-12-01	0.4% (36) 是否引证：否
21	基于正交彩色条纹投影的相位辅助双目视觉测量研究 刘慧娴(导师：张宗华) - 《河北工业大学博士论文》 - 2017-05-01	0.4% (34) 是否引证：否
22	基于编码结构光的三维测量技术研究 吴加凤(导师：李锋) - 《江苏科技大学博士论文》 - 2018-06-04	0.4% (34) 是否引证：否
23	基于DIC柱体试样表面场变形的测量研究 赵健龙(导师：桑勇) - 《大连理工大学博士论文》 - 2018-06-01	0.4% (32) 是否引证：否

原文内容

2.2视觉成像模型

在建立摄像机模型之前，首先需要明确相机坐标系，世界坐标系，图像物理坐标系和图像像素坐标系的关系。

2.2.1 坐标系定义

世界坐标系是描述摄像机的位置以及空间物体位置的坐标系，一般使用的是三维直角坐标系。这个坐标系的选定没有特殊的要求。

相机坐标系使用的是三维直角坐标系，轴方向指出屏幕，垂直于摄像机镜头，摄像机镜头光心作为原点，平面平行于屏幕，且轴、轴分别与图像像素坐标系的轴、轴平行。

图像像素坐标系是直角坐标系，坐标的原点在图像的左上角，两条坐标轴分别指示行数和列数，衡量单位使用图像像素。

图像物理坐标系同样是直角坐标系，坐标系原点一般在图像的中心，两条轴分别与图像像素坐标系的平行，衡量单位是毫米。图像像素坐标系描述的是产生的图片，图像物理坐标系描述的是成像平面。

将坐标为的物理点映射到投影平面上坐标为的点的过程叫投影变换。必须使用齐次坐标进行这种变换。

齐次坐标：齐次坐标就是一个n维向量的n+1 维矢量表示方法，其集合意义可理解为三维空间的剖视图，即某一维是常数的三维坐标，作为二维平面。

2.2.2 针孔模型

对于假想的针孔摄像机，从屏幕到针孔的距离作为焦距。符号表示：是摄像机焦距，是摄像机到物体的距离，是物体长度，则。假设世界坐标系原点在光心，即和相机坐标系重合，如图2.1，然后将成像平面理想化到光心的前方，这样方便进行计算。

图2.1 相机坐标系与物理坐标系映射关系

此时，给一个世界坐标系中的点（单位是mm），则由于假设，该点在相机坐标系下坐标也是，它经过投影变换产生的成像平面上图像物理坐标系下的点坐标为（单位是mm），易得以下关系：

如果用齐次坐标表示，可以表示成

，其中

再假设图像像素坐标系的原点在图像中心，即和图像物理坐标系重合。若（单位mm）对应的图片上的像素的点为（单位像素，位于图像像素坐标系下），由成像平面到图像平面是CCD在起作用。由于CCD像素的横纵往往不同，所以用示CCD横向每毫米多少像素，即单位是像素/mm，用表示CCD纵向每毫米多少像素，即单位是像素/mm。则有

带入上式（11）和（12），即

，其中

2.3 视觉伺服模型

2.3.1 视觉伺服公式

视觉伺服指的是利用计算机视觉信息控制机器人的运动，依赖于控制理论、图像处理和计算机视觉等技术。所有基于视觉伺服的方案，目的都是减小误差。误差表示为[21]

式中，矢量为一连串的图像测量值（图像特征点或者物体的中心点）；视觉特征点矢量；摄像头固有参数；期望特征值

采用IBVS（基于图像的视觉伺服）时，一组可以在图像中立即获得的特征点，为了设计出一个速度控制器，需要求出摄像头速度的关系。设其中摄像头的瞬时线速度，摄像头的瞬时角速度，则和的关系是

其中称为交互矩阵或者雅各比矩阵，根据公式（15）和（16），可以得到摄像头速度和的关系：

并且。将作为输入量，如果雅各比矩阵已知，就可以得到输出，即摄像头的速度、角速度值，所以关键问题在于求出雅各比矩阵。

2.3.2 雅各比矩阵

首先设置坐标系，在摄像头坐标系下的3-D点坐标为，对应在2-D像平面上的坐标为，单位是mm，所以是对应点以像素为单位的坐标，是一组相机内部参数，这一部分详见视觉成像部分。

将（18）求导，得

3-D坐标的速度可以表示为

联立（19）和（20）可以得到

也就是

其中可以表达为

被称为交互矩阵，或雅各比矩阵

2.3.3 竖直通道和横侧向通道的雅各比矩阵

雅各比矩阵的三维表达，与全部相关，因为多旋翼是欠驱动，六个变量不互相独立，仍然有四个变量未知，为了计算方便并且消掉一些影响不大的变量，还可以对三维空间进行水平竖直分解，将分解后的线性方程组组成新的雅各比矩阵。

水平分解时，在x-z平面上，三个自由度

由（20）得

联立得

竖直分解时，在y-z平面上，三个自由度

由（20）得

联立得

由（27）和（31），可以联立出分解后

由式，并且。

2.4 本章小结

本章是整个系统使用视觉伺服算法控制的数学基础，第4章的算法公式设计就是建立在本章的模型基础之上。本章中将多旋翼非线性模型做一些近似假设后写成线性模型，并且将水平面通道和高度通道解耦，为后文水平竖直分别控制打下基础。本章2.3.1中介绍现有的视觉伺服公式是在三维空间中成立并相互耦合的，本文做的工作是根据已有的推导加以改进，推导出竖直平面和水平面分解的视觉伺服公式。

3 图像追踪算法

在前文中已经说明的是，本文的重点设计内容在于视觉伺服控制算法部分，而不在于图像追踪算法的推导，所以在本章中我将主要选取一些成熟的可以在多旋翼平台在线使用的图像追踪算法，进行试验和比较，得出效果最优算法进行使用。

3.1 图像追踪算法比较与选取

视觉跟踪是具有许多应用的经典计算机视觉问题。在一般跟踪任务中，仅在给定其初始位置的情况下估计图像序列中的目标的轨迹。这个问题特别具有挑战性，跟踪器必须将目标外观从非常有限的一组训练样本实现一个稳定鲁棒的滤波器，抵抗快速运动和变形。

这些经典相关滤波方法需要从一组训练样本中学习得相关滤波器。为了获得更多的训练样本，一般将一个基础的正样本进行循环移位，得到若干虚拟的负样本，如图3.1，来训练一个分类器，这对应于对这些样本的周期性扩展[22]。基于循环样本周期性假设，通过利用快速傅立叶变换（FFT）可以实现有效的训练和检测。

图3.1 一维向量的循环移位[10]

本节比较的是Boosting, MIL, KCF, TLD, MediaFlow, MOSSE六种算法的追踪效果。对多组已经标定好的图像序列运行以上追踪算法，用方框框出追踪的目标，追踪效果如图3.2所示

图3.2 追踪效果图

将运行结果与标定比较，测量计算每种方法的运行FPS和偏差值均值，获得表格3.1,目标追踪方框和标定方框都是用表示，表中x偏差和y偏差均指方框的左上角坐标。当算法追踪过程丢失时，偏差是没有任何实际意义的，所以标注“丢失”。

表格3.1 追踪算法效果比较

方法名称 FPS x偏差均值(px) y偏差均值(px)

Boosting 55 丢失丢失

MIL 10 丢失丢失

KCF 110 -7.26 -1.10

TLD 10 丢失丢失

MediaFlow 100 2.29 3.35

MOSSE 150 丢失丢失

在目标运动比较快速的情况下，可以看到六种方法中的四种表现都完全不能投入实际应用，出现了突然丢失或者严重的

漂移，对于KCF方法和MediaFlow方法，都可以进行使用，但是考虑到与标定偏差问题，选用MediaFlow方法。

3.2本章小结

本章中主要选取一些成熟的可以在多旋翼平台在线使用的图像追踪算法，进行试验和比较。选取的六种算法中只有两种在目标移动较快时可以追踪到目标，考虑到与标定偏差，最终选用了MediaFlow方法，作为本文的图像追踪方法。

4 视觉伺服控制

在第二章中，本文已经通过一些线性化手段将多旋翼飞行器运动学模型的水平通道和高度通道解耦，并且又在2.3中将三维空间中的视觉伺服模型拆分成水平面和竖直平面模型，并且重新求得拆分后的雅可比矩阵。在第三章中使用图像跟踪算法得到每一帧中目标的图像坐标。至此，已经有充分的理论基础将三维空间中的多旋翼视觉伺服控制实验拆分成竖直平面与水平面分别控制，简化模型和运算。

下文将分别进行竖直平面和水平面视觉伺服过程的公式推导和设计。

4.1纵向通道控制器设计

本实验要求多旋翼飞行器可以在高速度、高机动情况下受控制，所以挑选为控制向量，即电机拉力和力矩，这二者因为是控制中的底层环，可以直接控制，速度快并且没有中间过程，符合实验要求。

在竖直平面上，将图像坐标系中作为控制期望，以此保证目标在图像中像中心收敛，防止目标脱离视线范围。因此可以得到，由视觉伺服模型可知

由式(31)可以得知竖直分解后展开式

在竖直平面中，是可测量值，是可计算值，我们需要用可测量值、计算值和一些已知量来表示控制向量，从而完成控制闭环。

对y方向速度和俯仰角速度进行比例控制，即

将式(40)(41)带入式(39)可化简得

即形式，只需保证就能确定向图像中心收敛，即只需保证就可以保证向图像中心收敛，可以在实验中得到。

对期望速度和期望角度的控制并非直接控制，而是有中间过程的，所以对达到期望角度和速度的过程进行比例控制，即

将式(44)与式(41)合并可得到的表达式

由式(9)得到的高度通道模型与式(43)联立可以得到的表达式：

将式(45)(46)作为控制向量的输入表达式输入多旋翼飞行器模型，即在竖直平面上实现基于视觉伺服的多旋翼追踪打击控制。

4.2横侧向通道控制器设计

同样本实验在水平面上要求多旋翼飞行器可以在高速度、高机动情况下受控制，所以挑选角速度为控制向量，即力矩，因为是控制中的底层环，可以直接控制，速度快并且没有中间过程，符合实验要求。

在水平面上，将图像坐标系中作为控制期望，以此保证目标在图像中像中心收敛，防止目标脱离视线范围。因此可以得到，由视觉伺服模型可知

由式(27)可以得知水平分解后展开式

在实验中，是可测量值，我们需要用可测量值、计算值和一些已知量来表示控制向量，从而完成控制闭环。

首先考虑水平方向的收敛性。因为希望能将滚转角作为以后避障实验中用到的控制量，所以在本次基于视觉伺服的导航实验中希望滚转角动态为零。在横向上对多旋翼进行受力分解，可以得到

之前假设多旋翼飞行特点是滚转角和俯仰角很小(小于10度)，总拉力约等于多旋翼的重力，所以可以进一步简化得到，当滚转角动态为零时，动态为零，所以很小可以忽略。

对于偏航角进行比例控制，即

所以水平分解后的视觉伺服公式可以化简成

即形式，只需保证就能确定向图像中心收敛，即只需保证足够大，并且距离不过小。因为在视觉实验中距离过大和过小都会严重影响图像算法的识别精确度，本次视觉伺服实验并不应用于距离过小的情况，距离足够小时可以使用运动预测等方法打击，所以上式在应用区域内收敛。

最后为了保持滚转角动态为零，对其进行比例控制，设=0

所以得到控制向量。

4.3仿真测试和性能分析

在MATLAB上进行示意仿真，利用第二章中的针孔模型创建一个Camera类作为虚拟的相机，在虚拟相机中有一个虚拟焦平面，设质点目标在焦平面上的投影为目标在图像坐标系下的坐标，从而满则目标点图像坐标已知的控制算法输入条件，开始视觉伺服的示意仿真测试。

对竖直平面的视觉伺服控制过程进行示意仿真，侧视图如图4.1

图4.1 不同起点的竖直平面多旋翼追踪打击示意仿真轨迹

对水平面的视觉伺服控制过程进行示意仿真，俯视图如图4.2

图4.2 不同起点的水平面多旋翼追踪打击示意仿真轨迹

实验中需要设定的参数有，通过设定这些参数可以影响系统的稳定性、轨迹的曲线和逼近目标速度的大小，其中在竖直平面上影响控制效果，在水平面上影响控制效果，本文将对这些参数的影响进行分别研究，并显示当参数值过大时轨迹曲线的变化。

参数是对y方向图像坐标系偏差的比例控制，前文中已经说明，为了保证稳定收敛于零点，需要，因为是对速度的控制可以保持一个较大的变化范围，但是当过大时，速度比例控制为主，容易出现y方向震荡，如图4.3。

图4.3过大时多旋翼追踪轨迹

参数是对俯仰方向图像坐标系偏差的比例控制，因为在式(41)中是对角速度的直接控制，对视角影响很大，所以稳定变化范围较小，当过大时曲线变化剧烈并且不容易稳定，如图4.4。

图4.4过大时多旋翼追踪轨迹

参数是对实际角度与期望角度偏差的比例控制, 见式 (44), 目的是控制实际角度到达期望角度的中间过程, 因为是对角速度的直接控制, 对视角影响较大, 变化范围较小, 当过大时, 曲线变化剧烈并且不容易稳定, 如图4.5。

图4.5过大时多旋翼追踪轨迹

参数是对y方向速度与速度期望偏差的比例控制, 目的是控制实际y方向速度到达期望速度的中间过程, 可变化范围较大。需要注意的是根据式 (46) 计算拉力的公式, 当过大时, 可能出现饱和, 计算值为负值的情况, 这时需要采用额外的角度变化来补偿拉力的不足, 即当饱和时, 增大设计值。如图4.6为过大时追踪轨迹。

图4.6过大时多旋翼追踪轨迹

参数用于保持多旋翼飞行器始终向目标方向飞行, 即向Z正方向飞行, 越小, 越大, 飞行器越快到达目标。因为在式 (45) 中由两项之和构成, 所以随时间向变化, 但是没有达到。图4.7可见, 当时, 去除首尾几帧震荡比较剧烈, 中间过程始终向-0.1收敛。

图4.7 追踪过程时域图

在水平面上进行对参数进行影响分析, 示意仿真为俯视图, 坐标X,Z如图4.8所示, 为了去除与水平面控制无关的因素影响, 设多旋翼以恒定速度向机头方向飞行。是对水平方向偏差的比例控制, 因为是对视角的控制, 不能过大, 当过大时曲线不稳定。

图4.8过大时多旋翼追踪轨迹

4.4本章小结

本章是本文的核心章节, 详细描述了多旋翼飞行器在目标图像坐标已知的情况下进行视觉伺服的过程, 并进行了核心算法公式推导设计。其中4.1和4.2节分别从竖直平面和水平面解耦地控制设计出发, 明确了已知量、可测量量和输出控制向量, 设计好控制算法后利用第2章中的分解视觉伺服模型证明了算法的收敛性, 证明算法理论上可行。又在4.3中进行示意仿真, 探讨设置的每个参数对控制有何影响、影响大小和参数本身的大致区间, 为后文仿真中的参数整定打下基础。

至此, 本文涉及的算法设计部分全部完成, 并证明了其理论上的可行性, 但是还需要在仿真平台上进行进一步检验, 对误差进一步分析, 这一部分将在下一章中介绍。

5 仿真平台和综合实验

5.1仿真环境搭建

VRML (Virtual Reality Modeling Language) 是虚拟现实建模语言[23], 即一种用于建立人们虚构的三维世界或真实世界的场景模型的建模语言, 有平台无关性。本质上是一种面向web, 面向对象的三维造型语言, 而且它是一种解释性语言。VRML的对象称为结点, 子结点的集合可以构成复杂的景物。结点可以通过实例得到复用, 对它们赋以名字, 进行定义后, 即可建立动态的VR (Virtual Reality) , 是目前Internet上基于 WWW的三维互动网站制作的主流语言。

V-Realm Builder是一个强大的三维物体结构工具包, 在MATLAB自带的安装库中, 它提供了最小化文件存储容量的工具, 它生成的三维物体和虚拟世界可以用浏览器的VRML插件进行观察, 而且使复杂物体建模简单化。

V-Realm Builder采用树状图对场景中的三维物体进行多元化描述, 树状图中每个节点对应对象的某一个特征, 可以直接对界面中的每个节点信息编辑, 相对应的场景信息立即更改; 也可以很容易地对节点进行增加、编辑、修改和删除。节点可以设置多种属性, 比如尺寸、中心点位置、轴角表示的旋转运动和平移运动等, 可以通过修改这些属性来改变对象的初始位姿; 并且在节点中可以很容易地添加不同属性的子类, 这些子类既可以是和父类具有耦合的运动关系的小部件和视角, 也可以是描述父类某种特性的属性声明, 这一切取决于创建子类时定义的子类类型。为了更好地观察仿真全过程, 同时可以建立多个观察点获取不同角度的图像信息, 通过设置从属关系, 既可以让观察点和一些物体一起运动, 也可以静止在某处观察, 并且支持设置观察点的位置、角度、从属等信息, 全面展现仿真过程中的各个细节。除此之外, 为了环境更加逼真, 物体更加写实, V-realm Builder中还支持添加纹理、涂装、色彩, 添加不同角度的环境灯, 使搭建的场景具有各种物理特征。

如图5.1, 为本文实验中在V-realm Builder内搭建的场景、目标标志桶和多旋翼飞行器。

在前文中已经阐明, 本文的研究重点在于视觉伺服控制算法的研究, 在于当目标在图像坐标系中的坐标已知时, 使用控制令多旋翼飞行器准确打击到目标, 并且过程中始终保持目标在视域之内, 所以利用图像处理和图像跟踪算法获取每一帧目标的坐标并非重点。所以在建立场景时应该使场景尽量简单明了, 不出现对跟踪算法和图像处理的干扰信息, 干扰对控制算法结果误差的测评。本文中搭建的场景只有地板、目标和飞行器, 正是为了减小获取目标图像坐标的难度, 专注于控制算法仿真实验。

图5.1 仿真环境视角图

在V-realm Builder中的多旋翼模型只是具有位姿、桨转速等输入参数的显示模型, 并不具有物理引擎支撑, 所以需要在Simulink中VR模块的外部搭建多旋翼飞行器模型, 获取多旋翼的位姿输入和桨转速等数据参数。下文将具体介绍多旋翼飞行器和Animation 3D中的VR模块搭建连接情况。

5.2 综合控制系统框架

整个视觉伺服仿真系统主要分为四大部分, 分别为Simulink多旋翼模型、VR模型、视觉跟踪算法模块和视觉伺服控制模块, 由这五个部分经过一些坐标变换等辅助运算就构成了一个完整的仿真系统。首先介绍一些各模块的搭建情况。

5.2.1子模块构成

1、多旋翼模块

多旋翼模块是本文实验中的控制对象, 控制算法中的输入角速度和力可以根据多旋翼模型反解出多旋翼的期望速度, 本文使用的多旋翼模型也正是使用期望速度和期望偏航角速度作为输入控制量进行控制的。多旋翼模型的输出为12维列向量, 分别输出的是多旋翼的世界坐标系下坐标、速度、滚转角、俯仰角、偏航角和滚转角速度、俯仰角速度和偏航角速度, 可以供之后的控制和VR显示模块使用。下面将具体地介绍多旋翼模型内部结构。

模块的Simulink模型如图5.2所示, 由外部的控制部分 (Control System) 和多旋翼的运动模型 (Quadcopter Dynamic) 组成, 本文实现对多旋翼控制主要研究对控制系统的改写和使用。

图5.2 多旋翼Simulink模型

多旋翼控制系统中输入量为三个世界坐标系下的速度和偏航角速度, 本实验模型为了贴合使用遥控器控制, 控制量输入

量级接近信道信号输入，并且为了限制输入信号要求不超过多旋翼自身物理限制，对输入信号添加饱和进行限幅。此外，为了使模型接近实际使用，还对输入量添加了死区，对过小的输入信号不响应。

输入量是对多旋翼位姿的期望值，而多旋翼本身会输出速度和角速度的实际值，速度上用期望值减去实际值的偏差乘上一个比例系数就是多旋翼的期望加速度。在第二章的多旋翼数学模型建立中，已经建立一些假设，假设多旋翼飞行特点是滚转角和俯仰角都非常小，总拉力约等于多旋翼的重力。输入z方向期望加速度，根据第二章给出的多旋翼高度通道模型，可以得到期望拉力；输入多旋翼偏航角，期望加速度可以根据多旋翼模型得到期望俯仰角和滚转角

通过期望俯仰角和期望滚转角与实际输出值做差，乘以比例系数后可以得到期望滚转角速度和期望俯仰角速度，因为本模型中输入还有期望偏航角速度，所以可以将这三个期望角速度直接减去对应的实际角速度，因为力矩与角速度成正比，所以得到三个角方向的力矩。

根据三个角方向的力矩和计算出的期望拉力，可以对多旋翼四个桨进行转速分配，分配的结果即整个多旋翼控制系统的最终输出，结合多旋翼的动力模型就可以得到在四桨转速如此分配时的12维输出向量。至此，多旋翼控制系统构建完成。

2、VR模块

VR模块本身不具有物理引擎，主要作用有两种，一种是根据期望坐标、姿态输入在虚拟场景中显示仿真过程，可视化验证算法；第二种是通过设置视角获取摄像机视域图像。本实验中VR模块分为两块，一块输入目标期望的移动方式，做多种目标移动方式的仿真；另一块连接多旋翼模块，显示仿真过程并获取摄像头图像。主要部分是多旋翼的显示仿真，为了显示仿真过程，如图5.3左所示，需要输入多旋翼平移和轴角旋转向量，输出的是固连在多旋翼前方的摄像机获得的DriverView图像，作为下一步图像跟踪算法的输入图像。

图5.3 VR模块输入输出和结构图

为了在Simulink中实现视景仿真，选用Simulink中虚拟现实工具箱Simulink 3D Animation中的VR Sink和VR To Video模块。它们可以很方便地将在V-Realm Builder中构建的虚拟场景导入，并且导入也可以直接在Editor中添加、编辑、删除场景的所有信息，可以高效地及时修改虚拟场景。使用VR Sink和VR To Video需要

在图5.3右中展示了VR模块的具体搭建方式，为了输入多旋翼输出的平移坐标和旋转轴角矩阵，选择VR Sink模块作为VR输入，并且将桨的转速参数分别接入桨转速的输入。选用VR To Video模块，同样接入多旋翼的平移坐标和旋转轴角矩阵，因为图像追踪算法需要的是多旋翼摄像头第一视角图像，并且摄像头固连在多旋翼机架前方，所以在VR Builder中设置DriverView为多旋翼下子类，并且位于机架正前方，以达到视角要求。为了视角保持DriverView不跳变到其他观察视角，外接置1信号到DriverView的设置开关，因此VR模块的输出就可以保证是固连在多旋翼机架前方的摄像头第一视角图像，达到图像追踪需求。

3、图像追踪算法模块

图像追踪算法模块输入VR模块中输出的DriverView图像，经过选取算法追踪目标，得到其在图像中坐标位置，减去中心坐标，就得到了目标与图像中心偏差，作为视觉伺服模块的输入，控制目标在图像中向中心收敛。

指 标
疑似剽窃文字表述
<div>1. 需要明确相机坐标系，世界坐标系，图像物理坐标系和图像像素坐标系的关系。 2.2.1 坐标系定义 世界坐标系是描述摄像机的位置以及空间物体位置的坐标系，一般使用的是三维直角坐标系。这个坐标系的选定没有特殊的要求。 2. 方向指出屏幕，垂直于摄像机镜头，摄像机镜头光心作为原点，平面平行于屏幕，且轴、轴分别与图像像素坐标系的轴、轴平行。 图像像素坐标系是直角坐标系，坐标的原点在图像的左上角，两条坐标轴分别指示行数和列数，衡量单位使用图像像素。 图像物理坐标系同样是直角坐标系，坐标系原点一般在图像的中心，两条轴分别与图像像素坐标系的平行，衡量单位是毫米。图像像素坐标系描述的是产生的图片，图像物理坐标系描述的是成像平面。 3. 坐标为的物理点映射到投影平面上坐标为的点的过程叫投影变换。必须使用齐次坐标进行这种变换。 4. 针孔模型 对于假想的针孔摄像机，从屏幕到针孔的距离作为焦距。符号表示：是摄像机焦距，是摄像机到物体的距离，是物体长度， 5. 本质上是一种面向web，面向对象的三维造型语言，而且它是一种解释性语言。VRML的对象称为结点，子结点的集合可以构成复杂的景物。</div>

3. 视觉伺服多旋翼追踪打击_第3部分	总字数：4266
相似文献列表	
去除本人已发表文献复制比：0%(0)	文字复制比：0%(0) 疑似剽窃观点：(0)
原文内容	

模块输入输出如图5.4所示

图5.4 图像追踪算法输入输出图

4、视觉伺服算法模块

视觉伺服算法模块是本次仿真的检测目标所在，根据在第二章中建立的视觉伺服模型、多旋翼通道模型和第四章中设计

的纵向和横侧向通道视觉伺服算法，编写控制器程序。前文介绍多旋翼模块时提及多旋翼输入控制向量为，而视觉伺服算法设计输出是，可以通过多旋翼通道模型反解出多旋翼控制向量，从而实现多旋翼控制。模块输入输出如图5.5所示

图5.5 视觉伺服算法输入输出图

5.2.2 仿真框架

首先说明仿真中四部分模块的连接方式，如图5.6。多旋翼模块输出三维位置与姿态信息，经过相应的坐标转换后得到视景坐标系下多旋翼的平移与旋转轴角向量；VR模块中通过固连在机架正前方的视角模拟摄像头获取多旋翼在运动中的RGB图像，经过VR To Video输出到图像追踪模块，经过图像追踪算法后获取每一帧目标在图像中坐标位置，从而得到目标与中心点偏差；然后根据4.2和4.3中推导的竖直和横侧向通道视觉伺服算法，由图像偏差得到多旋翼的控制向量，包含拉力、俯仰角速度，偏航角速度和滚转角速度，经过坐标变换输入到多旋翼，引导多旋翼正确打击目标，完成一个控制闭环。

图5.6 仿真系统框图和坐标系变换

仿真过程中每个模块都有不同的坐标系，所以连接模块的输入输出时进行了多次坐标变换，如图5.6所示，多旋翼模型中使用NED机体坐标系，（x轴指北，y轴指东，z轴指地）输出的多旋翼位姿信息需要变换到VR模块的视景坐标系；视觉伺服算法本身使用的是相机坐标系，因为相机固连在机架上，所以近似地可以认为相机的运动状态和多旋翼飞行器的运动状态是一致的，所以运动位姿信息大小不变，只需要从相机坐标系变换到机体坐标系。

根据以上的仿真模块、仿真框架和模块间坐标系转换连接，在MATLAB/Simulink中搭建仿真整体，最终如图5.7所示

图5.7 视觉伺服仿真系统Simulink模型

5.3 仿真测试和性能分析

本文的控制器性能分析部分旨在通过改变目标物体运动轨迹、目标运动速度、物体运动速度等，观察视觉伺服控制多旋翼飞行器伺服轨迹，比较图像坐标系下与中心点偏差大小，计算偏差的时间均值和标准差，分析多旋翼速度、目标速度和目标轨迹形状对伺服控制器效果的影响。下文将就这几个方面进行多维度的展开讨论。

(1) 目标摇摆式上升

令目标横侧向坐标成运动，竖直匀速2m/s上升，多旋翼处于较高速运动中，速度为6m/s，目标与多旋翼飞行器在地面的投影距离为15m，多旋翼视域内初始时目标处于一个与中心较大偏差的位置，具有一个阶跃初始输入。

图5.8 目标摇摆式上升多旋翼视觉伺服打击轨迹

因为DriverView视角的视频不易在论文中展示，绘制多旋翼视觉伺服控制打击目标的轨迹曲线，如图5.8所示，红色是目标轨迹，蓝色是多旋翼轨迹，可见多旋翼完成了打击任务，最终与目标相遇。曲线中最初的一段平稳上升是没有伺服控制的，目的是多旋翼起飞并保持平稳，到达伺服控制起点；然后开始伺服控制时，根据第四章中公式推导，因为多旋翼飞行器需要达到目标俯仰角，所以竖直方向上初始时以俯仰角速度控制为主，之后以高度方向速度控制为主。

为了评价本次多旋翼伺服控制打击的控制效果，绘制图像坐标系下目标坐标与中心偏差的时域图，如图5.9所示

图5.9时域图

图像中在第2.2秒之前是多旋翼上升和加速的过程，所以可以看到偏差增大。之后开始视觉伺服控制，具有非常明显的向中心收敛的趋势，并在中心附近震荡。最终并没有收敛到零位，而是收敛到零位附近有两方面原因，一是目标在不断运动，目标点坐标持续变化，每帧之间具有偏差；二是为了更好仿真实场景中的多旋翼模型，加入了控制死区，对于非常小的输入没有控制响应，所以理论上也不可能收敛到零位，只能在附近震荡。

对图像偏差进行定量计算，分别计算x方向图像偏差的均值和标准差，y方向图像偏差的均值和标准差，单位是像素。多旋翼速度6m/s不变，多旋翼与目标在地面投影距离15m不变，改变目标的水平速度大小，调节目标实际速度，进行多次测量和计算，仿真测量结果如表格5.1所示：

表格5.1 仿真图像坐标偏差结果

目标最大速度(m/s)	2	3	4
平均值(px)	-3.0523	-1.8102	1.4920
视域占比(%)	0.94	0.56	0.47
平均值(px)	-1.4504	-9.2546	-1.1091
视域占比(%)	0.72	4.62	0.55
标准差(px)	1.8528	2.2902	5.3570
标准差(px)	5.8346	6.2965	6.5727

可以根据平均值占视域的比例可以评价视觉伺服算法控制效果。表格中单位是像素（pixel），可以根据视域被像素宽度计算目标偏差所占视域比例，在x方向上视域内像素宽度320px，在y方向上视域内像素宽度200px。

经过表格对比，发现目标在这种运动方式下，当目标速度增大时，的绝对值和所占视域呢比例并没有相关特征，但是的标准差随着目标速度增大逐渐增大，也就是说当目标速度增大时，目标仍在图像中心附近震荡，但是离散程度增大。

(2) 目标左斜上升

令目标横侧向坐标成运动，竖直匀速2m/s上升，多旋翼速度为4m/s，目标与多旋翼飞行器在地面的投影距离为15m，多旋翼视域内初始时目标处于一个与中心较大偏差的位置，具有一个阶跃初始输入。

图5.10 目标左斜上升多旋翼视觉伺服打击轨迹

因为DriverView视角的视频不易在论文中展示，绘制多旋翼视觉伺服控制打击目标的轨迹曲线，如图5.10所示，红色是目标轨迹，蓝色是多旋翼轨迹，可见多旋翼完成了打击任务，最终与目标相遇。曲线中最初的一段平稳上升是没有伺服控制的，目的是多旋翼起飞并保持平稳，到达伺服控制起点。

为了评价本次多旋翼伺服控制打击的控制效果，绘制图像坐标系下目标坐标与中心偏差的时域图，如图5.11所示

图5.11时域图

同样的，图像中在第2.2秒之前是多旋翼上升和加速的过程，所以可以看到偏差增大。之后开始视觉伺服控制，具有非常明显的向中心收敛的趋势，并在中心附近震荡。最终并没有收敛到零位，而是收敛到零位附近有两方面原因，一是目标在不断运动，目标点坐标持续变化，每帧之间具有偏差；二是为了更好仿真实场景中的多旋翼模型，加入了控制死区，对于非常小

的输入没有控制响应，所以理论上也不可能收敛到零位，只能在附近震荡。

对图像偏差进行定量计算，分别计算x方向图像偏差的均值和标准差，y方向图像偏差的均值和标准差，单位是像素。多旋翼速度4m/s不变，多旋翼与目标在地面投影距离15m不变，改变目标的实际速度大小，进行多次测量和计算，仿真测量结果如表格5.2所示：

表格5.2 仿真图像坐标偏差结果

目标速度(m/s)	2.3	2.8	3.5
平均值(px)	4.0611	4.1666	4.1081
视域占比(%)	1.3	1.3	1.3
平均值(px)	-4.7605	-5.1571	-8.6771
视域占比(%)	2.3	2.6	4.3
标准差(px)	2.0321	1.5803	5.3570
标准差(px)	2.6518	5.3646	6.5727

可以根据平均值占视域的比例可以评价视觉伺服算法控制效果。表格中单位是像素(pixel)，可以根据视域被像素宽度计算目标偏差所占视域比例，在x方向上视域内像素宽度320px，在y方向上视域内像素宽度200px。

经过表格对比，发现目标在这种运动方式下，当目标速度增大时，的绝对值和所占视域呢比例大致呈增大趋势，并且标准差随着目标速度增大逐渐增大，也就是说当目标速度增大时，目标仍在图像中心附近震荡，但是偏离程度和离散程度增大。

5.4本章小结

本章是对前几章理论推导的仿真实验验证部分，并对视觉伺服算法在不同参数情况下的控制效果进行评价，最后得出了一些定性的结论。在5.1节中介绍了仿真环境搭建过程、三维建模工具V-Realm Builder。5.2节主要介绍了构成仿真系统的四个主要模块和仿真框架，并将每个模块的坐标系和连接每个模块的坐标变换进行了详细绘图说明。5.3节是对控制效果的测试评价环节，通过令目标进行两种不同轨迹的运动，改变目标速度和多旋翼运动速度，比较控制过程图像偏差平均值和标准差，得出定性的结论。

总结和展望

总结

多旋翼飞行器因其体积小、重量轻、造价低，具有良好的机动性能和操纵性能而才成为一种被广泛使用的现代工具，在搜索、航拍、监视、军事等领域表现出出色的特征优势。现代战争中已经开始将多旋翼投入到狭窄空间和街头楼巷的作战任务中，但是主流作战方式需要经验丰富的操纵手控制或者使用GPS实现多旋翼对目标的精确打击。这两种方法各自有其弊端，第一种有高风险性、低易用性，第二种因为信号问题地域局限很大，所以本文希望提出一种可靠的基于图像的伺服控制方法，能够使多旋翼自主飞行打击目标。

本文的主要目标是设计一种基于图像的伺服控制方法，可以在近距离自主打击目标并且打击过程中目标收敛在图像视域内。视觉伺服系统全过程为首先从固连在机架前方的摄像头获取实时的图像信息，利用图像追踪算法获取每一帧中目标在图像中的坐标，利用视觉伺服算法得到多旋翼控制向量，从而改变多旋翼位姿，也就改变了摄像头位姿，从而完成一个控制闭环。

本文在MATLAB上利用虚拟现实工具箱对视觉伺服算法进行视景仿真验证。采用V-Realm Builder建立三维场景模型，在Simulink中搭建完整视觉伺服系统所需的多旋翼模型、VR视景、图像追踪模块和视觉伺服控制器。仿真结果表明，本文设计的方法可以实现多旋翼飞行器的基于图像的近距离追踪打击控制，最后探讨了目标不同运动轨迹、不同运动速度对控制效果的影响。

展望

本文完成了算法的视景仿真，下一步工作还可以从如下方向进行：

(1) 本文的所有仿真模型和控制器都是在Simulink平台上完成的，可以将控制器和图像追踪算法迁移到Pixhawk上进行半物理仿真，进一步验证算法。

(2) 本算法研究的是多旋翼与目标距离不过长也不过短，即图像中必须能够识别出目标这段区间的控制算法。距离过远时可以使用GPS导航到目标附近再使用视觉伺服，对距离过短的情况可以使用运动预测，还需要进一步探讨。

说明：1.总文字复制比：被检测论文总重合字数在总字数中所占的比例

2.去除引用文献复制比：去除系统识别为引用的文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

3.去除本人已发表文献复制比：去除作者本人已发表文献后，计算出来的重合字数在总字数中所占的比例

4.单篇最大文字复制比：被检测文献与所有相似文献比对后，重合字数占总字数的比例最大的那一篇文献的文字复制比

5.指标是由系统根据《学术论文不端行为的界定标准》自动生成的

6.红色文字表示文字复制部分;绿色文字表示引用部分;棕灰色文字表示作者本人已发表文献部分

7.本报告单仅对您所选择比对资源范围内检测结果负责



✉ amlc@cnki.net

🌐 <http://check.cnki.net/>

👤 <http://e.weibo.com/u/3194559873/>