

哈 尔 滨 工 业 大 学

硕士学位论文开题报告

题 目：基于双目视觉的四旋翼定位系统设计与实现

院 （系） 航天学院

学 科 控制科学与工程

导 师 马杰

研 究 生 何芳

学 号 15S104141

开题报告日期 2016.9.12

研究生院制

目录

1 课题来源及研究的目的和意义	3
2 国内外在该方向的研究现状及分析	4
2.1 国外无人机自主定位研究现状及分析	4
2.2 国内无人机自主定位研究现状及分析	7
2.3 国内外文献综述的简析	7
3 主要研究内容	8
3.1 鲁棒的基于关键帧的双目视觉定位方法设计	8
3.1.1 基于 ORB-SLAM2 定位方法研究	8
3.1.2 基于关键帧的多单应矩阵的特征追踪方法研究	8
3.1.3 基于 EKF 滤波器的视觉-惯性定位方法研究	9
3.2 四旋翼双目视觉定位系统的软硬件设计与实现	9
3.3 四旋翼双目视觉定位系统实验验证	9
4 已完成的研究工作	10
4.1 双目立体视觉的几何原理	10
4.2 双目立体视觉的数学模型	11
4.3 双目立体视觉定位系统的基本原理	13
4.4 整题研究技术路线	14
5 研究方案及进度安排，预期达到的目标	15
5.1 研究方案	15
5.1.1 基于关键帧的多单应矩阵的特征跟踪方法研究	15
5.1.1.1 基于关键帧的特征跟踪方法研究	15
5.1.1.2 单应矩阵的几何意义	15
5.1.1.3 程序设计方案	16
5.1.1.4 多单应矩阵的估计	18
5.1.1.5 基于多单应矩阵的鲁棒特征追踪	19
5.1.2 四旋翼双目视觉定位系统搭建	20
5.1.2.1 四旋翼双目视觉定位硬件系统搭建	20
5.1.2.2 四旋翼双目视觉定位软件系统搭建	21
5.1.3 实验方案设计及结果分析	21

5.2 预期达到的目标和取得的成果	22
5.3 进度安排	22
6 为完成课题已具备和所需的条件和经费	22
7 预计研究过程中可能遇到的困难和问题，以及解决的措施	23
8 参考文献	23

1 课题来源及研究的目的和意义

无人机（Unmanned Aerial Vehicle, UAV）是一种由动力驱动，通过无线电远程遥控或在机载程序控制下自动飞行的无人驾驶航空器^[1]。自 1914 年无人机的概念被首次提出，直到近几十年无人机产业的迅猛发展。无人机以其体积小、造价低、使用方便、易于隐藏、对环境要求低等优点，无论是在军事领域还是在商业领域，均备受关注并投入实际应用。尤其是在经过越南战争、中东战争、海湾战争、阿富汗战争等各大战争后，无人机以其各国越来越意识到无人机技术应用的重要性，在世界的范围内掀起了无人机技术发展的新一波浪潮。

20 世纪 90 年代以来，无人机的机械机构大大简化，逐渐向着小型化方向发展。旋翼式无人机不同采用直升机通过尾桨这样复杂的机械结构解决自悬的问题，以其简单的机械结构、产生较大的推力、低成本、良好的动态特性和较强的鲁棒性等特点，成为目前无人机领域最热门的研究对象之一，世界各国都开始竞相开发研制遥控式、半自主式或自主式的旋翼式无人机，大量投入军事和民用领域。其中，航拍、送货、农业应用、军事侦察、目标搜索、地区反恐、信息搜集、核生化信息检测、抢险救灾、安全防护等应用领域的迫切要求，推动了能够在室外和室内复杂环境下进行导航和飞行工作的旋翼式无人机的快速发展^[2]，其中四旋翼飞行器是旋翼式飞行器的主要代表。

在无人机的发展历程中，四旋翼无人机的定位问题受到越来越多的关注^[3]。四旋翼无人机现在研究的领域越来越广泛，如：避障、路等路径规划以及抓取^[4-6]等等。对于实现这些复杂任务的基础和前提就是对其准确地、实时的自主定位。因此，自主定位是各类型无人机以及各种移动机器人的必然发展趋势。目前应用最为广泛的定位方法分为两类：一类是基于四旋翼无人机机载摄像头估计自身姿态和实时地重建场景，这也是即时定位与地图构建（SLAM）^[6-8]；另一类是基于外部传感器提供精确的导航参数，如 GPS(Global Position System, 全球定位系统)^[9]，运动捕捉系统^[10-12]。近几年，技术人员采用基于外部传感器提供位置信息的方法进行定位，尽管精度较高但是局限性较大，运动捕捉系统只能应用在特定的场合。同样，利用全球卫星定位系统实现定位的方法对应用环境也有一定的限制，因为在建筑物密集、室内、隧道等地方 GPS 定位几乎是不可用的，导致四旋翼无人机的应用范围受到极大的限制。将两类方法进行比较，采用 SLAM 系统获取精确的无人机的位置普适性更强。但目前现有 SLAM 系统的研究主要是应用在搭载传感器的移动机器人上，SLAM 同时包含定位与建图两个问题，被认为是实现机器人自主性的关键问题之一，对机器人领域的发展有重要的研究意义^[13]，但

是，至今仍未出现简单易用的，具有实际应用价值的 SLAM 系统^[14]。目前该问题仍处于研究室的开发阶段。

SLAM 定位问题可以使用多种类型的传感器，还可以同时使用两种或多种传感器，如：激光测距仪^[15-17]，单目摄像头^[18-19]，双目摄像头^[20-21]和 RGB-D 传感器^[22-23]。双目摄像头的应用，即立体视觉技术作为计算机视觉技术的一个重要分支，在解决四旋翼定位问题上起到重要的作用。双目摄像头不仅具有功耗低、信息量丰富、可靠性高、质量轻等特点，而且还可以确定场景中的三维深度信息，可以估算出精确的轨迹。因此，立体视觉技术广泛的应用于未知场景下的导航信息获取，这使得立体视觉定位系统在室内和室外环境均可以使用。但是双目摄像头也有缺点：信息量丰富处理的数据量过大导致计算量大，实时性差，用于四旋翼平台，受到四旋翼机载电脑处理能力的限制，需要解决在线实时姿态估计这一难点。需要满足一定的假设条件才可以用于后续处理等缺点。在四旋翼出现快速运动和大机动的情况下，跟踪频繁丢失或明显出现漂移，导致定位系统不可用。

综上所述，基于机载双目视觉的四旋翼定位与导航，实现四旋翼在复杂环境中的实时获取位置信息，在四旋翼出现大机动和快速运动情况下高效而鲁棒的实现定位功能，将为无人机智能自主导航技术奠定坚实的基础，具有重要的理论研究意义及应用参考价值。

2 国内外在该方向的研究现状及分析

对于无人机实现一些复杂任务的基础和前提就是对其准确地、实时的自主定位。因此，自主定位是一个极具综合性的跨领域研究课题，研究对象包括移动机器人、地面车辆、飞行器等。自上世纪 50 年代以来，国内外各领域的学者根据各自的学科背景和专业领域，提出了多种自主定位的方法。然而，在自主定位领域，无人机实时定位仍然是一个棘手的问题，由于种种条件限制，无人机很难得到精确的位置信息，而环境的复杂性、状态的不确定性等都为无人机的自主定位增加了难度。下面将国内外相关文献作简要的概述。

2.1 国外无人机自主定位研究现状及分析

西方国家在自主定位研究方面发展较早且迅速。早期的飞行器自主定位研究起源于战斗机的任务规划系统。自上世纪后期的几大局部战争以来，以美国为首的世界各国逐渐认识到，空中力量已成为现代战争中的核心力量，而空对地作战要求对敌方的关键目标实施快速精确打击，并在确保掌握战场控制权的前提下尽

量减少双方的人员伤亡。这种作战方式就需要根据战场任务要求和战略要求，对战场各类信息进行收集、整理、分析后，为己方战斗机制定对敌方地面目标实施精确打击的攻击计划与协同方案，由此产生的计算机智能辅助系统就称为任务规划系统^[24]。而任务规划系统的核心，就是飞行器的自主定位。

随着无人机的快速发展，无人机自主导航技术作为自主飞行的基础研究内容，贯穿于无人机飞行技术的整个发展历程。在无人机的研发历史中，随着无人机于二十世纪初的革新到现在，已有四代无人机自主飞行技术。无人机自主飞行的第一个阶段，开始于第一次世界大战，这时的无人机基本没有自身的动力来源，自主飞行程度很低。1916 年无人机自主飞行开始了第二阶段，在这个阶段研发的无人机相对第一阶段能为自身提供动力，多数采用遥控式的控制方式，依靠人为控制，人眼观察实现系统闭环。在这一阶段具有几个代表性的无人机，如：A.M. Low 改进出第一架具有动力供应系统的无人机“空中目标”^[25]，在 1935 年，电影明星兼模型飞机爱好者 Reginald Denny 开发出第一个比例遥控飞行器^[25]。随着导航传感器的迅猛发展，特别是 GPS 应用的普及，以及机载惯性元器件的改进，无人机飞行技术迎来了第三阶段，在这一阶段无人机具有了定位系统，再定位系统的出现大大提高了其自主飞行的能力，RQ-4A“全球鹰”^[23]和 A160T“蜂鸟”^[26]等均是这一阶段的代表飞行器。在近几年的迅猛发展过程中，双目立体传感器、RGB-D 相机、TOF 深度传感器、激光雷达等新型传感器的普及，这些传感器对环境有了一定的自主感知能力，无人机结合一种或多种新型传感器作为第四代自主飞行的研究方向呼之欲出。

第四代无人机自主飞行方面的技术还处于研究室的开发阶段，尚未实际应用。但是这在四旋翼无人机的发展史上却有举足轻重的意义。在国外多国高校均展开了新一代自主飞行无人机的开发和研制工作，如：美国的耶鲁大学^[27]、宾夕法尼亚大学^[28]、麻省理工学院^[29]，瑞士的苏黎世联邦理工学院^[30]等，其研究方向大致包括新式传感器的应用，传感器数据融合应用，环境感知和定位，蔽障、跟踪控制以及轨迹规划等。

在这里也对国外各无人机自主导航研究团队的定位方法所采用的传感器以及研究成果进行了总结。早在 1991 年，卡耐基梅隆大学的机器人学院就将计算机视觉技术应用在无人机定位导航的研究上，并在 Yamaha R50 无人机的平台上搭载双目视觉系统，实现了基于立体视觉的运动估计，并通过目标跟踪实现了视觉里程计(VO)算法。图 2-1 即为 Yamaha R50 无人机。



图2-1 Yamaha R50无人机

Kinect 传感器是微软公司生产的一种可以传回深度数据的传感器，麻省理工学院的机器人实验室使用 Kinect 的部分元器件，固定到小型四旋翼无人机上，利用传回的图像和深度数据实现了室内的里程计设计和三维场景的建模。图 2-2 即为麻省理工的小型四旋翼无人机。瑞士的苏黎世联邦理工学院的计算机系将双目立体视觉系统安装在其四旋翼无人机上，先后实现了基于双目立体视觉的定位、自动避障和控制，以及实时的三维场景构图^[33]。



图2-2 麻省理工的小型四旋翼无人机

国外的商业领域也产生很大的影响。在 2015 年 3D Robotics 公司推出的 Solo 无人机可自主飞行，非常智能，同时 3D R 的开源特性深受用户的喜爱。图 2-3 所示为 3D Robotics 公司的 Solo 无人机。



图2-3 3D Robotics公司的Solo无人机

2.2 国内无人机自主定位研究现状及分析

无人机室内自主定位导航在国内的研究起步比较晚,对四旋翼无人机的定位问题研究还处于初级阶段,从事这方面研究的主要是各科研机构、各个高校以及无人机相关的商业公司。在我国商业领域,大疆公司研发的Phantom 3利用其机载的摄像头和超声波传感器采集的数据,在室内飞行时实现自主定位,见图2-4。北京航空航天大学的张博翰^[31]利用无人机双目立体视觉的灰度相关立体匹配在2010年完成了室内走廊实验的飞行,包括走廊中横向位置坐标定位、检测位置环境中的障碍物等。浙江大学的任泌源利用嵌入式的算法识别地标,通过角点检测算法提取匹配特征点实现无人机的位姿参数的估计。浙江大学的童丸丸^[32]利用基于运动视差分解的单目视觉来实现视觉的三维重建,从而实现无人机的室内导航。其中,清华大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学等高校在四旋翼无人机定位问题的研究做出了贡献。



图2-4 大疆公司的Phantom 3

目前国内针对固定环境、无人机平稳飞行的情况下定位算法的研究成果已经比较丰富,但是针对无人机出现大机动和快速运动特殊情况下的无人机定位算法的研究,在实时性、准确性以及在复杂环境下的适用性方面,与国外的研究水平相比还有一定差距。

2.3 国内外文献综述的简析

四旋翼无人机是目前各个领域的热门领域之一,世界很多高校、研究院的研究人员都在进行室内飞行器自主导航的研究工作,其主要研究内容有:基于飞行器自身传感器的定位导航、多种传感器融合的定位导航、避障、飞行控制等等,使得该领域的研究迅猛发展。

国内外关于中小型旋翼式无人机自主定位方面的研究基本停留在研究室的

开发阶段，影响其民用商业化的主要原因有三个，环境感知问题、定位问题以及轨迹规划与跟踪控制问题。而随着新型传感器（如TOF传感器）以及复杂环境下的定位方案（如SLAM方案、光流法方案）的应用，定位问题有了很大的进展，但是在无人机自主导航投入实际应用的过程中，还会存在实时性、适用性、以及鲁棒等问题。其中当无人机出现大机动、快速运动等特殊情况时，无人机是否可以处理这种情况，又能达到实时的计算效率，该问题还没被透彻的研究过，但是对无人机的自主定位有十分重要。

在无人机自主导航的多数应用中，周围环境是未知的，而且由于硬件的限制，目前国内外无人机自主定位大多停留于低速水平，而事实上，无人机的多数应用场合都是中高速（3m/s以上）。在高速运动下，立体摄像头拍摄的图像模糊，图像匹配区域小，可匹配的特征点数量少等问题则变得十分尖锐。

如何在高速飞行、大机动、强烈旋转以及跟踪失败等情况下，快速而鲁棒的估计出精确的位置信息，这个问题的解决将推动无人机自主定位领域的发展，促进无人机在民用商业化的进程。

3 主要研究内容

本课题的目的实现一个既可以处理四旋翼出现大机动和快速运动等特殊情况，又能达到实时的计算效率的无人机双目视觉定位系统。因此，该课题从鲁棒的基于关键帧的双目视觉定位方法的设计与实现，四旋翼双目视觉定位系统的软硬件设计与搭建，以及最终实验验证及性能分析三方面展开研究。

3.1 鲁棒的基于关键帧的双目视觉定位方法设计

3.1.1 基于 ORB-SLAM2 定位方法研究

1) 掌握ORB-SLAM2定位系统的设计思想，针对ORB-SLAM2应用在四旋翼平台上存在的问题进行改进。

2) 在实际系统中进行试验调试，并对性能进行测试。

3.1.2 基于关键帧的多单应矩阵的特征追踪方法研究

1) 熟悉基于关键帧的特征追踪方法的基本原理、了解该方法及其衍生方法的应用领域。熟悉单应矩阵的几何含义及其特点。

2) 针对2D到2D，以及3D到2D的特征点匹配消耗时间长的问题，结合单应矩阵可以表示两个图像之间的投影变换关系的特点，提出基于单应矩阵的定位方法。

- 3) 针对在四旋翼运动快，传统运动模型预测不可靠，以及很强的透视畸变时模板匹配或者特征描述对照不可靠，采用基于多单应矩阵的特征追踪方法定位。
- 4) 对全局和局部以及特定三维平面单应矩阵进行估计和跟踪。
- 5) 使用多单应矩阵便是鲁棒特征追踪，用于监督匹配。
- 6) 在实际系统中进行验证调试，并进行结果分析。

3.1.3 基于 EKF 滤波器的视觉-惯性定位方法研究

近来许多定位系统均通过结合IMU数据得到的惯性位姿和由双目SLAM系统得到的视觉位姿，并进行位姿预测。这种系统大部分基于滤波方法实现。但融合两个或多个传感器本质上是一个非线性优化问题，每种类型的传感器作为能量函数中的一项，难点在于运动参数需要实时的恢复出来，而变量个数在随着时间在增加。因此，在解决特征点数量少，环境纹理重复严重的环境下定位问题，融合IMU数据与双目视觉位姿信息进行处理。

3.2 四旋翼双目视觉定位系统的软硬件设计与实现

为了对基于双目视觉的四旋翼定位算法进行实验验证，也为了对性能进行分以及实际效果误差分析，搭建软硬件实验平台是课题的研究内容之一，具体研究内容如下。

- 1) 明确系统目标，分析系统需求，查阅相关资料，确定实验平台，设计整体方案。
- 2) 结合整体的设计方案，查阅相关资料，从硬件的框架，硬件的选型参数、特性等方面进行分析，以及笔记本电脑等相关实验设备的选型。完成该定位系统的硬件平台设计，对硬件系统进行测试。
- 3) 结合硬件系统的性能，从软件的功能和流程框架的角度确定系统软件方案，并确定所采用的开发平台，开发语言，开发环境。
- 4) 结合定位算法流程，实现各个模块功能，并对各个模块进行测试以及性能验证。将各个模块进行整合，实现整个算法的功能，对代码进一步进行优化。
- 5) 实现算法的平台移植，解决平台移植可能出现三方库不可用，代码不兼容等问题，在实际系统中进行调试试验。

3.3 四旋翼双目视觉定位系统实验验证

本课题的目的是再基于双目视觉对四旋翼进行室内定位，最终对定位系统进行搭建，并通过实验验证该系统的实时性、定位精度，以及根据实验效果对误差

进行分析。因此，最终需要完成整个系统的测试和实验验证。

- 1) 在无人机正常飞行的情况下，在已搭建好的四旋翼实验平台处理算法，测试本系统提出的定位算法的性能，并根据实际运动效果，进行定量分析，完成预定目标。
- 2) 在同样的实验平台和实验环境，对现有的基于四旋翼双目视觉定位算法进行性能测试，并与本系统提出的算法运行效果进行对比，进行定量分析。
- 3) 模拟四旋翼大机动、快速运动等具有特殊的情况，分别在PC机和四旋翼平台上验证算法的可行性以及鲁棒性。
- 4) 对算法实时性进行定量分析，对算法的各个模块分别进行测试，验证该方法在各个模块分别花费的时间，对算法进行系统的分析。

4 已完成的研究工作

4.1 双目立体视觉的几何原理

利用多幅摄像机的图像信息重建三维场景主要有两种手段，其一是立体视觉技术，利用两个或多个相机在不同的位置同时拍摄两幅或多幅图像，然后进行匹配并分析差异从而最终获得深度信息。另一是在运动中得到结构，这种技术是通过计算基础矩阵将不同的场景联系到一起来获得场景理解。本研究中用到的是前者，双目立体视觉是基于视差，双目立体视觉原理的核心就是三角测量原理。即由两个摄像机的图像平面(或单摄像机在不同位置的图像平面)和被测物体之间构成一个三角形。已知两摄像机之间的位置关系，便可以获取两摄像机公共视场内物体的三维尺寸及空间物体特征点的三维坐标。双目立体视觉系统一般由两个摄像机或者由一个运动的摄像机构成。图 4-1 所示为简单的平视双目立体成像原理图。

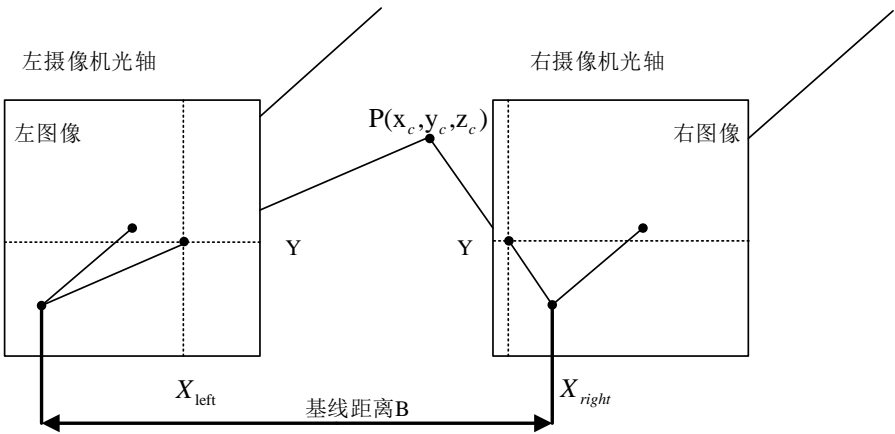


图 4-1 平视双目立体成像原理图

两摄像机的投影中心连线的距离，即基线距为 B 。两摄像机在同一时刻观看空间物体的同一特征点 P ，分别在"左眼"和"右眼"上获取了点 P 的图像，它们的图像坐标分别为 $p_{left} = (X_{left}, Y_{left})$, $p_{right} = (X_{right}, Y_{right})$ 。假定两摄像机的图像在同一个平面上，则特征点 P 的图像坐标的 Y 坐标相同，即 $Y_{left} = Y_{right} = Y$ ，则由三角几何关系得到

$$\begin{cases} X_{left} = f \frac{X_c}{Z_c} \\ X_{right} = f \frac{(X_c - B)}{Z_c} \\ Y = f \frac{Y_c}{Z_c} \end{cases} \quad (3.1)$$

则视差为: $D = X_{left} - X_{right}$ 。由此可计算出的特征点 P 在摄像机坐标系下的三维坐标为

$$\begin{cases} X_c = \frac{B \cdot X_{left}}{X_{left} - X_{right}} \\ Y_c = \frac{B \cdot Y}{X_{left} - X_{right}} \\ Z_c = \frac{B \cdot f}{X_{left} - X_{right}} \end{cases} \quad (3.2)$$

因此，左摄像机像面上的任意一点只要能在右摄像机像面上找到对应的匹配点(二者是空间同一点在左、右摄像机像面上的点)，就可以确定出该点的三维坐标。这种方法是点对点的运算，像面上所有点只要存在相应的匹配点，就可以参与上述运算，从而获取其对应的三维坐标。

4.2 双目立体视觉的数学模型

双目立体视觉可以便捷有效的获取空间的三维环境信息，而一般双目立体视觉也主要分为相交和平行两种方式，其中平行的方是相交方式的一个特例。考虑到我们的研究是在四旋翼机载立体摄像头，两个相机是相互平行的，因此采用平行式立体视觉模型。图 4-2 给出的即是平行式双目立体视觉模型。

在这个模型中主要有三种坐标系：图像坐标系、摄像机坐标系和世界坐标系。 $O_l - X_l Y_l Z_l$ 和 $O_r - X_r Y_r Z_r$ 分别表示左相机坐标系和右相机坐标系， $o_l - x_l y_l$ 和 $o_r - x_r y_r$ 分别表示左图像坐标系和右图像坐标系， $O_w - X_w Y_w Z_w$ 表示世界坐标系。

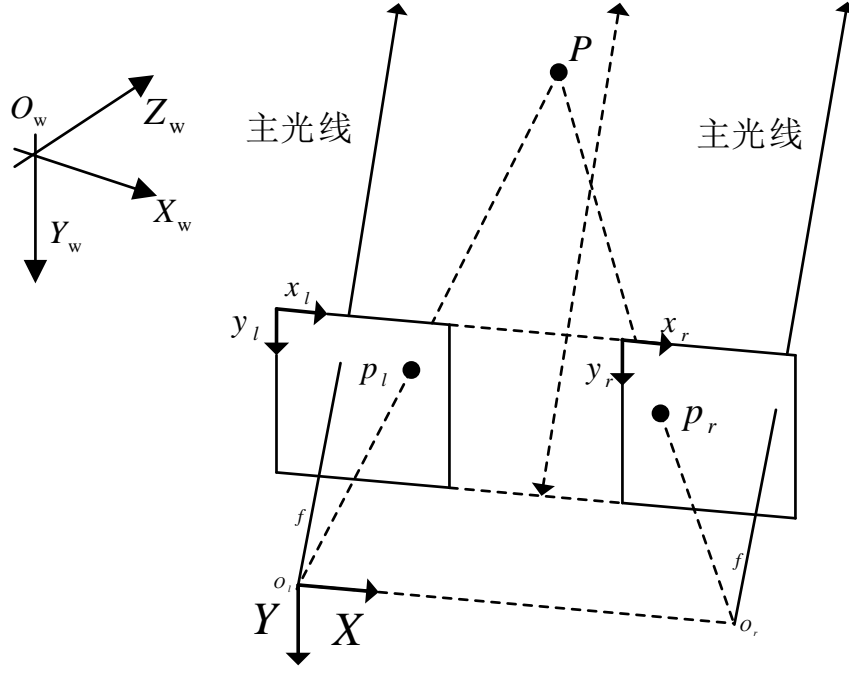


图 4-2 平行式双目立体视觉模型

其中点 P 是世界坐标系中的某一点， p_l 和 p_r 分别是点投影到左、右图像坐标系下的坐标。 z 是对应图像坐标系点 (u, v) 处深度信息， (c_x, c_y) 是左图像平面的主点的坐标， f 则是表示焦距信息。 c_x, c_y, f 以及双目相机间的距离 B 可以通过立体标定来获取。左边图像坐标系 $o_l - x_l y_l$ 和左边相机坐标系 $O_l - X_l Y_l Z_l$ 之间的关系由摄像机透视变换模有

$$s_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & c_x \\ 0 & f & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

而世界坐标系 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 与左边相机坐标系 $O_l - X_l Y_l Z_l$ 系之间的相对位置关系可以通过空间转换矩阵 M_{wl} 表示为

$$\begin{bmatrix} x_l \\ y_l \\ z_l \end{bmatrix} = M_{wl} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix}, M_{wl} = [R \mid t] \quad (3.4)$$

其中， $R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix}$ ， $T = \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \end{bmatrix}$ 分别为 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 坐标与 $O_l - X_l Y_l Z_l$ 坐标系之间的旋转矩阵和原点之间的平移变换矢量。 $o_l - x_l y_l$ 坐标系和 $O_w - X_w Y_w Z_w$ 坐标系之间的关系则如下：

$$s_l \begin{bmatrix} u_l \\ v_l \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} R & | & T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

其中 K 是从相机坐标系到图像像素坐标系的齐次变换矩阵，其通过使用标定工具箱得到。 M_{wl} 从相机坐标系到世界坐标系的齐次变换矩阵，通过里程计获得，即是我们要通过视觉里程计所要求解的相机姿态。

4.3 双目立体视觉定位系统的基本原理

近几年来，基于视觉的定位系统的鲁棒估计越来越受到关注，尤其是基于立体视觉的里程计算法。它的基本系统原理框图如图 4-3 所示。基于关键帧的双目立体视觉定位技术主要由以下几组成。

(1) 图像对的获取：采用立体相机获取来自同一场景的立体图像对的观测图像序列，并转换成灰度图像对 $I_{t|l}, I_{t+1|l}, I_{t|r}, I_{t+1|r}$ 运算效率会更高。

(2) 图像校正及视差图的获取：通过几何校正得到无畸变图像，使得立体图像外极线配准，分别计算从左右相机获取 t 时刻和 $t+1$ 时刻的图像的视差图 D_t, D_{t+1} 。

(3) 特征检测：在校正后的图像上使用 FAST 特征检测算法对图像进行特征检测。

(4) 立体特征匹配：分别对 t 时刻和 $t+1$ 时刻的特征点对进行立体特征匹配，使用视差图 D_t, D_{t+1} 来计算上一步检测到特征点的三维坐标，得到两个点云 W_t, W_{t+1} 。

(5) 特征追踪：采用跟踪算法检测出的特征到图像 I_{t+1} 中，跟踪丢失的特征在点云 W_t, W_{t+1} 中移除。如果跟踪特征有所丢失，特征数小于某个阈值，则重新进行特征检测。

(6) 三角化 3D 点云：对上一步得到的点云 W_t, W_{t+1} 进行三角化处理，得到特征点的三维坐标。

(7) 内点检测：在上一步中更新得到的 t 时刻的点云 W_t 中的任意两个特征点之间的距离，在 $t+1$ 时刻的点云 W_{t+1} 中相应的两个特征点之间的距离必须相等。选取出这样一个特征点的最大团作为内点集合。其中最大团至少有 8 个特征点。

(8) 运动估计：结合前后两个时刻图像匹配特征点的三维坐标做运动估计，采用 Levenberg-Marquardt 算法最小化重投影误差，估计出 t 时刻和 $t+1$ 时刻之间

的相对旋转矩阵 R 和平移向量 T ，其中重投影误差需要满足小于一定阈值。

(9) 位置优化：由局部捆集调整构成，进行位置优化。

(10) 重复上述过程，计算相机姿态是通过递增的方式，对每次计算的相对量进行累加，估算出绝对位置以及姿态。

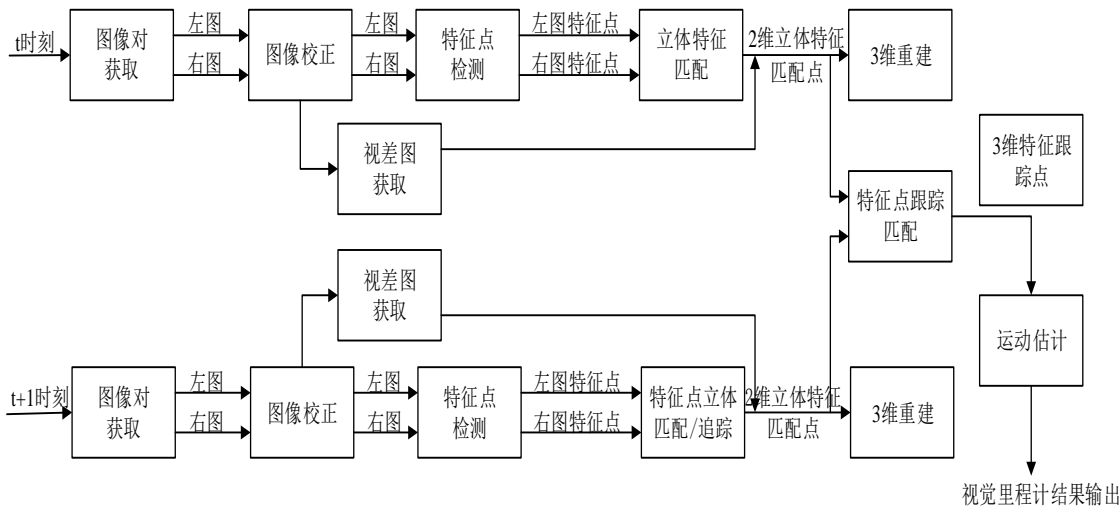


图 4-3 双目视觉定位系统原理框图

4. 4 整题研究技术路线

为便于了解本研究课题的实验方案的大体流程，这个给出本课题的研究技术路线。

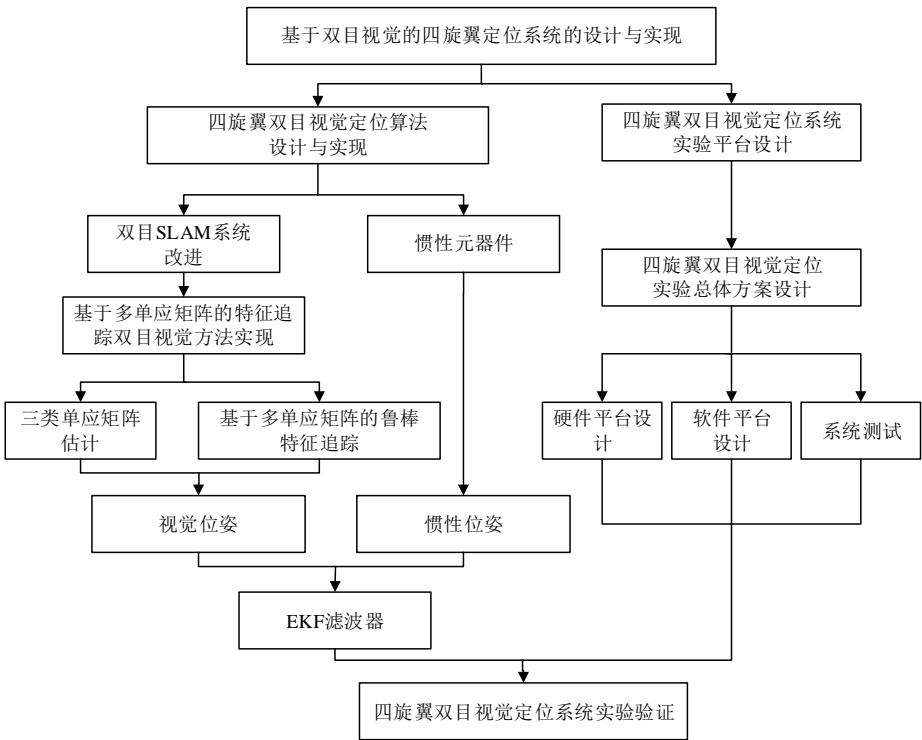


图 5-1 本课题的技术研究路线

5 研究方案及进度安排，预期达到的目标

5.1 研究方案

5.1.1 基于关键帧的多单应矩阵的特征跟踪方法研究

5.1.1.1 基于关键帧的特征跟踪方法研究

基于关键帧的实时摄像机跟踪方法具有高精度、高效、可扩展的特点。然而，正如在国内外视觉里程计发展现状中所说，基于滤波器和基于关键帧 BA 的视觉里程计通常都需要在图像中提取匹配特征点，因此对环境特征的丰富程度和图像质量（如模糊程度、图像噪声等）十分敏感。相比之下，直接跟踪法不依赖于特征点的提取和匹配，而是直接通过比较像素颜色来求解相机运动，因此通常在特征缺失、图像模糊等情况下有更好的鲁棒性。同时，在现有双目视觉里程计中主要采用特征提取是一个比较耗时的操作，即使使用了 FAST 特征检测，而且都是使用特征提取之后要进行特征匹配会追踪，通过随机采样一致性 (Random Sample Consensus, RANSAC) 模型等方法进行特征提纯等操作，整个定位所需时间大部分消耗在这部分。

由于现实场景的复杂性，以及四旋翼在飞行过程中往往会发生快速运动和大机动，传统的双目立体定位方法在实际应用中效果并不好，但是最先进的双目立体定位方法也难以处理这样的复杂情况。因此，基于本课题的研究目的，这也是机器人的协同定位与建图 (SLAM) 要解决的问题之一。在现有的 SLAM 系统中，RKSLAM 是一种鲁棒的基于关键帧的单目 SLAM 系统，该系统提出一种基于多个单应矩阵的特征跟踪方法，不仅能处理强烈旋转和快速运动，又能达到实时的计算效率。因此，本课题借鉴 cv4xv1-sc 系统的思想，使用单目系统现有的方法用于双目系统，对现有的双目视觉定位方法进行改进。

本课题采用将多单应矩阵进行特征追踪的方法应用到双目定位系统中，为了方便后文的说明，这里先给出单应矩阵的几何意义以及该方法的设计框图。

5.1.1.2 单应矩阵的几何意义

平面单应矩阵在摄像机标定和三维重建方面有重要的作用。世界坐标系的 $x-y$ 坐标平面与图像平面之间的单应矩阵可以提供关于摄像机内参数的 2 个线性约束。分层重建中从射影重建到仿射重建本质上就是确定无穷远平面的单应矩阵。事实上，平面的单应矩阵包含 2 个方面的含义：

- 1) 空间平面上的点 $x = [x, y, z]^T$ 到图像平面上的点 m （齐次坐标）之间的

映射关系，即

$$m \sim Hx = K(R + tn^T)x \quad (5.1)$$

其中， K 是摄像机内参数矩阵，是一个上三角阵； (R, t) 是世界坐标系到摄像机坐标系之间的刚体变换； n 是空间平面在世界坐标系下的法向量，即空间平面在世界坐标系下的方程为 $n^T x = 1$ ，符号“ \sim ”表示在相差一个常数因子意义下的相等。当空间平面为世界坐标系的 $x - y$ 平面时，式(5.1)可以简化为

$$m \sim H \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = K \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

其中 $\begin{pmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \end{pmatrix} = R$ 。

2) 2幅图像中对应于同一空间平面的图像对应点之间的映射关系。由文献^[33]知，如果2幅图像所对应的摄像机坐标系之间的变换为 (R, t) ，摄像机内参数矩阵为 K ，空间平面在世界坐标系下的方程 $n^T x = 1$ ，则2幅图像对应点($m \leftrightarrow m'$)之间的单应矩阵为

$$m \sim Hm = K(R + tn^T)K^{-1}m \quad (5.3)$$

从文献^[34]知，对于式(5.2)定义的单应矩阵，当单应矩阵 H 已知时，从 H 可以得到关于摄像机内参数矩阵 K 的2个线性约束方程。由于

$$H = \begin{pmatrix} h_1 & h_2 & h_3 \end{pmatrix} \sim K \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \quad (5.4)$$

所以

$$K^{-1}(h_1 \ h_2 \ h_3) \sim \begin{pmatrix} r_1 & r_2 & t \end{pmatrix} \quad (5.5)$$

又由于 $r_1^T r_2 = 0$ ， $|r_1| = |r_2|$ ，所以，对矩阵 K （更确切地说，对 $K^{-T}K^{-1}$ ，文献^[34]中称为绝对二次曲线的像）可以得到如下2个约束：

$$\begin{aligned} h_1^{-T} K^{-T} K^{-1} h_2 &= 0, \\ h_1^{-T} K^{-T} K^{-1} h_1 &= h_2^{-T} K^{-T} K^{-1} h_2 \end{aligned} \quad (5.6)$$

5.1.1.3 程序设计方案

本课题的关键是一种基于三类单应矩阵的特征追踪方法用于双目立体视觉系统。对于传统方法来说，在强烈旋转和快速运动的情况下要预测搜索范围和正确的透视畸变十分困难。通过多个单应矩阵就可以精确的确定搜索范围。同时消除或减少透视畸变。在详细说明之前先引入这三种矩阵的数学公式约定，三类单应矩阵分别为：

- 1) 全局单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^G$ ：描述了两幅图像之间的平面变化，可以通过全局图像对齐求解。

- 2) 局部的单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^L$ ：描述了两幅图像的两个局部块的对齐。可以通过多次 RANSAC 迭代得到的对应关系来估计局部单应矩阵。
- 3) 特定平面的单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^P$ ：与 $H_{k \rightarrow i}^L$ 相类似，作用对象是一个特定的三维平面。特定平面之间对应的单应矩阵可以由公式(5.7)表示。

$$H^P = K(R_i R_k^T + \frac{R_i(p_i - p_k)n_j^T R_k^T}{d_j + n_j^T R_k p_k})K^{-1} \quad (5.7)$$

如图 5-2 所示的程序框架图，程序实时地处理视频流。对任意的当前帧 I_i ，首先提取出 FAST 角点，跟踪得到关键帧 F_k 到当前帧 I_i 的全局单应矩阵集合 H_i^G 。然后使用全局单应矩阵和特定平面单应矩阵来跟踪三维点，得到相应姿态估计所需的 3D-2D 的对应关系集合。随后，采用现有的方法评估跟踪质量^[35]，分为好、不好和差。当跟踪质量好的时候，直接采用跟踪结果来扩张和优化局部地图，然后在确定是否要选一个新的关键帧。对于较大平移的快速运动，跟踪结果可能会不好甚至很差。在结果不好的时候，还是有一些匹配的特征，其中大部分还是约束充分的点，所以可以估计一个局部单应矩阵集合 $H_{k \rightarrow i}^L$ ，并重新匹配跟踪失败的特征。在结果很差时，触发中介绍的重定位程序^[35]。一旦重定位成功，用重定位后的关键帧来做全局单应矩阵跟踪，随后再做一次特征跟踪。

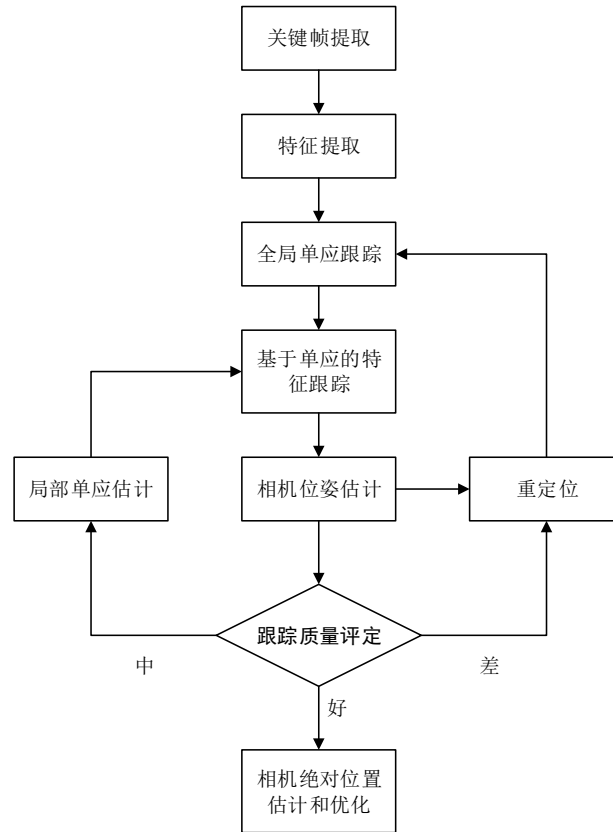


图 5-2 程序设计框架图

5.1.1.4 多单应矩阵的估计

本方法提取三种单应矩阵。本方法使用全局单应矩阵可以大致对齐整幅图像，局部和特定平面的单应矩阵可以精确地对齐局部区域。特定平面的单应矩阵可以由公式(5.7)解析求得。这部分主要掌握全局和局部单应矩阵的提取算法。

对于全局单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^G$ 可以通过关键帧 F_k 到当前帧 I_i 进行估计，由公式(5.7)解析求得。

$$H^G = \arg \min_{\mathbf{H}} \sum_{x \in \Omega} \left\| \tilde{F}_k(x) - \tilde{I}_i(\pi(\tilde{H} x^h)) \right\|_{\delta_1} \quad (5.8)$$

其中 \tilde{F}_k 和 \tilde{I}_i 分别是关键帧和当前帧的小模糊图像(SBI)。 Ω 是 SBI 域，上标 h 说明向量是齐次坐标。 \tilde{H} 中的波浪号表示将单应矩阵 \mathbf{H} 从原图像空间转化到 SBI 空间。对于求解公式(5.8)非常耗时，而且大部分的关键帧和当前帧是没有重叠的，没有必要。另外，帧 F_k 和 I_i 之间的基线一般很大，直接求解公式(5.8)会使结果偏向于主要平面。使用一种基于单应矩阵的传递性的方法解决这两个问题。合理假设两个相邻帧之间的基线很小，因此一个全局的单位矩阵可以大致地表示两者之间的平移。通过对上一帧 I_{i-1} 和当前帧 I_i 求解公式(5.8)，可以得到 $H_{(i-1) \rightarrow i}^G$ 。通过传递性可以得到 $H_{k \rightarrow i}^G = H_{(i-1) \rightarrow i}^G H_{k \rightarrow (i-1)}^G$ 。由于已有一个帧 F_k 和 I_{i-1} 之间的特征匹配集合(记为 $M_{k,i-1} = \{(x_k, x_{i-1})\}$)，所以优化的是 $H_{k \rightarrow (i-1)}^G$ 而不是 $H_{k \rightarrow i}^G$ 。用 $M_{k,i-1}$ 来确定重叠的关键帧集合，记为 K_{i-1} 。 $|M_{k,i-1}| > 20$ 挑选出前五个关键帧。对于 K_{i-1} 中的每个关键帧 F_k ，利用 $M_{k,i-1}$ 来防止累积误差和偏移，故将公式(5.8)修正为：

$$H_{k \rightarrow (i-1)}^G = \arg \min_{\mathbf{H}} \sum_{x \in \Omega} \left(\left\| \tilde{F}_k(x) - \tilde{I}_{i-1}(\pi(\tilde{H} x^h)) \right\|_{\delta_1} + L \right) \quad (5.9)$$

$$L = \sum_{(x_k, x_{i-1}) \in M_{k,i-1}} \left\| \pi(\tilde{H} x_k^h) - x_{i-1} \right\|_{\delta_x}$$

相对于公式(5.8)，公式(5.9)可以在极限较大的情况下插值多个平面运动。采用高斯牛顿法来求解公式(5.8)和(5.9)。

如果全局单应矩阵和特定三维平面单应矩阵的跟踪质量不好，可以进一步用得到的匹配来估计局部单位应矩阵。本方法采用一个简单的多个单应矩阵的提取策略^[36-389]来估计一个局部单应矩阵集合。具体来说，对 $M_{k,i}$ 采用 RANSAC 方法，根据最大数量的良好匹配来估计出最好的局部单应矩阵，记为 $H_{k \rightarrow i}^{L_1}$ 。将满足 $H_{k \rightarrow i}^{L_1}$ 的良好匹配剔除，然后对剩余匹配进行同样的操作得到 $H_{k \rightarrow i}^{L_2}$ 。重复上述步骤直到剩余的匹配少于一定数量。

5.1.1.5 基于多单应矩阵的鲁棒特征追踪

得到的多个单应矩阵可以用于监督的匹配，也就是传统方法难以处理的强烈旋转与快速运动时的特征预测和块对齐。首先，在三维点的位置无效或者不精确时，传统的运动模型预测的相机姿态会很不可靠。其次，当存在很强的透视畸变时，简单的模板匹配或者特征描述子对照很不可靠。

相对比以前的方法，这个方法采用不同的方法来确定约束充分和不充分的三维点的搜索范围，对于约束充分的三维位置可靠地点，只需要预测当前帧的相机姿态 C_i 来投影三维点并确定搜索位置。用全局单应矩阵 H_i^G 来预测 C_i 。从上一帧可以推出全局单应矩阵，而与之重叠的关键帧集合是 K_{i-1} 。为了不失一般性，将帧 $F_k \in K_{i-1}$ 的任意二位特征记为 x_k 而相应的三维点记为 X_k 。通过公式 $x_i = \pi(H_{k \rightarrow i}^G X_k)$ ，可以得到三维到二维的对应关系 (X_k, x_i) 。所有的三维到二维的对应关系集合记为 $V_{C_i} = \{(X_j, x_j)\}$ 。可以通过公式(5.10)来预测相机位置。

$$\arg \min_{C_i} \sum_{(X_j, x_j) \in V_{C_i}} \|\pi(K(R_i(X_j - p_i))) - x_j\|_{\delta_x} \quad (5.10)$$

对于异常点，首先直接把 $\pi(H_{k \rightarrow i}^G x_k)$ 作为搜索位置。如果跟踪结果很差，则根据匹配的对对应关系估计得到一个局部单应矩阵集合 $H_{k \rightarrow i}^L$ 。对于未匹配的特征，在搜索位置 $\{H_{k \rightarrow i}^{L_j} x_k \mid H_{k \rightarrow i}^{L_j} \in H_{k \rightarrow i}^L\}$ 中逐一尝试。对于每一个搜索位置，其范围以搜索位置为中心的 $r \times r$ 的正方形区域。对约束充分和不充分的点， r 分别取 10 和 30。

本方法中的多个单应矩阵的表示方法不仅可以预测得到好的起始点还能纠正透视畸变。给定单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}$ ，可以通过公式

$$\kappa(y) = I_k(H_{k \rightarrow i}^{-1}(\pi(H_{k \rightarrow i} x_k^h + y^h))) \quad (5.11)$$

将关键帧 F_k 中 x_k 的附近的局部块对齐到当前帧 I_i 中。其中 $\kappa(y)$ 是相对于块中心偏移 y 处的图像灰度。 $y \in (-W/2, W/2) \times (-W/2, W/2)$ ，其中 W 是图像块的尺寸，试验中设为 8。对于属于三维平面 P_j 的点，采用有公式(5.7)得到的平面单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^{P_j}$ 来做图像块对齐。对于其他点，与搜索范围的预测相类似，首先尝试全局单应矩阵 $H_{k \rightarrow i}^G$ ，如果跟踪结果很差，在对跟踪失败的特征逐一尝试集合 $H_{k \rightarrow i}^L$ 中的局部单应矩阵。考虑到相邻帧之间很少会出现大幅度的透视变化，所以没必要对每一个输入的帧重新计算公式(5.11)。可以计算每个对齐后的图像块的四个顶点的变化，并且只在变化超过一定阈值才会重新计算公式(5.11)。

本方法重点是在位置预测和图像块畸变矫正时没有预先假设运动模型。因此本方法对大机动和快速运动鲁棒。并且不需要代价巨大的不变描述子和图像块的大范围搜索。

5.1.2 四旋翼双目视觉定位系统搭建

本课题是软硬件相结合的课题，该部分的任务包括硬件系统选型和软件基本架构。软件系统有双目SLAM系统、EKF滤波器组成。双目定位算法主要负责视觉位姿估计，EKF滤波器进行视觉位姿和惯导位姿的融合，以及系统延迟的消除。硬件系统主要包括四旋翼无人机和数据处理平台。其中数据处理平台负责几乎全部的数据计算，如传感器数据融合、位姿解算。

5.1.2.1 四旋翼双目视觉定位硬件系统搭建

1) 四旋翼无人机机体选型

本课题由于采用平行式双目立体视觉定位的模型，所以为满足平行式模型要求，选取的两个摄像头的连接方式要相互平行。同时，本课题的目标之一为了解决无人机出现大机动、快速运动情况下的准确定位问题，这种情况会导致在四旋翼平台上固定摄像机相对位置发生变化，导致模型不匹配，所以选择内置双目摄像头的大疆四旋翼 M100。如图 5-3 所示。



图 5-3 大疆经纬 M100

2) 数据处理平台选型

数据处理平台负责四旋翼双目立体视觉定位系统几近全部的数据计算。四旋翼无人机通过无线信号将双目摄像头和惯性传感器的信息传送到数据处理平台，数据处理平台利用这些信息求解四旋翼无人机的当前位姿及 3D 点云地图。这里用到的数据处理平台有两种：一种是笔记本电脑 ThinkPad S420；另一种是 Odroid U3 单板机。

本系统首先采用笔记本电脑作为算法实现及数据处理平台搭建了基于双目视觉的四旋翼无人机定位系统。接着对系统进行两方面的处理：一方面针对在四旋翼大机动、快速运动下，跟踪频繁丢失或出现明显漂移的问题，对课题提出的方法进行复现；另一方面，结合双目 SLAM 系统的 ORB-SLAM2 算法对系统进行整体优化，完成了定位算法的嵌入式移植，移植后的数据处理平台是 Odroid U3 单板机。

5.1.2.2 四旋翼双目视觉定位软件系统搭建

四旋翼无人机软件系统由两部分构成：改进的双目 SLAM 系统、EKF 滤波器。软件系统利用无线通讯通过四旋翼无人机的传感器获取信息。该算法是在 PC 机 Ubuntu 14.04 操作系统下开发实现，同时为实际效果展示，需移植到 Odroid U3 单板机中进行数据处理，在该单片机中安装 Ubuntu 14.04 操作系统和机器人开源操作系统 ROS(Robot Operating System)的 Indigo 版本。

1) 改进的双目 SLAM 系统

双目 SLAM 系统用于视觉位姿估计，通过无线信号获取四旋翼无人机所处环境的实时图像。提取每帧图像中的 FAST 特征点，进行特征追踪，绘制环境信息的 3D 点云地图，并确定四旋翼无人机在环境中的实时视觉位姿。

2) EKF 滤波器

EKF 滤波器融合由 IMU 数据得到的惯性位姿和由双目 SLAM 系统得到的视觉位姿，并进行位姿预测。另一方面，因为传感器和数据处理平台之间是通过无线信号通信的，所以整个系统中不可避免的存在延时，而四旋翼无人机对实时性要求很高，延时的影响会很大，所以延时的消除是必须的。

本设计采用将 Odroid U3 单板机作为数据处理平台进行了算法的嵌入式移植，并将 Odroid U3 单板机直接放在四旋翼无人机上，两者之间无线信号强且稳定，这样使得系统延时时间为常值，再由 EKF 滤波器进一步对延时进行消除。基于 EKF 滤波器对位置和速度的预测以及 IMU 数据可用的条件下，在遇到场景结构性不强，重复场景较多，特征点数量较少的环境下，定位系统还可以正常使用，提升算法的鲁棒性。

5.1.3 实验方案设计及结果分析

1) 实验开始前的准备：正确安装、连接实验设备，以及室内环境的布置，为室内导航系统提供稳定可靠的飞行平台。

2) 定位系统离线验证：通过使用 KITTI 图像集中的不存在畸变的图像，对双目视觉定位系统进行离线实验验证。在相同平台，同现有的双目视觉定位方法进行对比，分析系统性能指标。

3) 鲁棒性验证：设计三种类型的运动：A)简单运动 B)慢速运动 C)快速运动并伴有强烈旋转，无人机分别进行这三种运动，对算法的鲁棒性以及可行性进行验证。同样为定量分析，在保证外界条件相同的情况下，对已有的定位方法进行试验并进行对比。

4) 实验误差分析：从定位系统的 3 个性能指标：时间、定位旋转角度、定

位位置偏差进行定量分析。

5) 最后, 通过四旋翼无人机的整机实验, 分析该定位算法的实时性以及可行性。

5.2 预期达到的目标和取得的成果

1.实现基于多个单应矩阵的特征跟踪方法即可处理四旋翼出现大机动的情况下的高精度定位, 又可达到实时的计算效率。

2.实现结合四轴飞行器内部集成的惯性导航元器件测量的数据, 优化相机姿态, 进一步提高鲁棒性和精度。

3.验证现有的双目定位算法, 分析时间消耗以及定位精度等性能, 分别在现有标准图像集验证性能, 预计达到的指标如下: (1)运行时间: 每秒处理80帧图像; (2)旋转误差: $0.0027[\text{deg/m}]$; (3)位移误差: 1.10%。

5.3 进度安排

本次硕士论文工作的进度安排如下:

2016.09.01—2016.09.30	查阅国内外资料, 深入了解课题相关内容;
2016.10.01—2016.11.30	完成整个双目视觉定位系统框架搭建工作;
2016.12.01—2017.02.15	基于多单应矩阵的特征跟踪方法设计, 完成相应的程序并进行精度、实时性分析;
2017.02.16—2017.04.15	对四旋翼内部的 IMU 数据和图像信息进行数据融合处理, 完成相应的程序, 对鲁棒性和精度进行分析;
2017.04.16—2017.05.31	完成整个系统的实验平台搭建, 对代码进行平台移植及优化, 进行试验验证, 达到实时性、精度指标要求
2017.06	撰写毕业论文, 准备毕业答辩。

6 为完成课题已具备和所需的条件和经费

本课题将基于大疆产品M100飞行器进行研究, 该产品具备复杂环境下的定位以及视觉传感器。另外, 需要计算机, 以上条件控制与仿真中心制导控制与半实物仿真课题组已经具备。

7 预计研究过程中可能遇到的困难和问题，以及解决的措施

- 1) 整个双目视觉定位系统原理分析过程需要较多的图形学和数学方面的知识，可通过阅读相应的书籍和论文，及时请教老师来弥补自己的不足。
- 2) 在双目定位系统中，采用单目方法解决问题在进行数据优化代价部分是一大难点，需要参考现有的算法解决问题。
- 3) 四旋翼出现大机动情况下稳定性、精度分析较复杂，需要参考更多文献的解决办法。
- 4) 算法实现过程需要在 Linux 操作系统下开发，以及使用 OpenCV、OpenGL、Eigen 等第三方库，对系统精度以及误差分析的过程中需要熟练使用 Matlab 等软件，需要认真学习编程软件的使用方法，多查阅书籍和资料。
- 5) 代码进行平台移植过程需要掌握机器人操作系统(ROS)，认真学习机器人操作系统的使用方法，解决系统不兼容等问题，多查阅书籍和资料。
- 6) 研究时需要大量阅读外文文献，需要进一步提高外语阅读能力，总结经验，提高阅读文献的效率。

8 参考文献

- [1] Valavanis K. Unmanned aerial vehicles [M]. Springer, 2011.
- [2] Tuna G, Gulez K. Aided Navigation Techniques for Indoor and Outdoor Unmanned Vehicles[C]//New Technologies, Mobility and Security (NTMS), 2012 5th International Conference on. IEEE, 2012:1-4.
- [3] 符小卫, 高晓光. 一种无人机路径规划算法研究[J]. 系统仿真学报. 2004 1(1):20-21.
- [4] Ghadiok V, Goldin J, Ren W. Autonomous Indoor Aerial Gripping Using A Quadrotor[C]//2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2011: 4645-4651..
- [5] Mellinger D, Shomin M, Michael N, et al. Cooperative Grasping and Transport Using Multiple Quadrotors[M]. Berlin: Springer BerlinHeidelberg, 2013: 545-558.
- [6] Michael N, Fink J, Kumar V. Cooperative Manipulation and Transportation with Aerial Robots[J]. Autonomous Robots, 2011, 30(1): 73-86.
- [7] Davison A, Reid I, Molton N, et al. Monoslam: Real-time single camera SLAM. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2007, 29(6):1052-1067.
- [8] Choi H, Yang K W, Kim E. Simultaneous global localization and mapping. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2014, 19(4):1160-1170.
- [9] Weiss S, Achtelik M W, Chli M, et al. Versatile distributed pose estimation and sensor self-calibration for an autonomous MAV[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Paul: IEEE, 2012: 31-38.
- [10] Durrant-Whyte H, Roy N, Abbeel P. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams[M]. Cambridge: MIT Press, 2012: 177-184.

- [11] Durrant-Whyte H, Roy N, Abbeel P. Construction of Cubic Structures with Quadrotor Teams[M]. Cambridge: MIT Press, 2012: 177-184.
- [12] Kushleyev A, Mellinger D, Powers C, et al. Towards A Swarm of Agile Micro Quadrotors[J]. Autonomous Robots, 2013, 35(4): 287-300.
- [13] Chen Z, Samarabandu J, Rodrigo R. Recent advances in simultaneous localization and map-building using computer vision. Advanced Robotics, 2007, 21(3-4):233-265.
- [14] Salas-Moreno R F, Newcombe R A, Strasdat H, et al. Slam++: Simultaneous localisation and mapping at the level of objects. 2013 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2013. 1352-9.
- [15] Grzonka S, Grisetti G, Burgard W. Towards A Navigation System for Autonomous Indoor Flying[C]//2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Kobe: IEEE, 2009: 2878-2883.
- [16] Du Z, Wu H. Research of Mobile Robot SLAM Based on Laser Range Finder and Binocular Vision Data Fusion[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(1): 180-183.
- [17] Genevois T, Zielinska T. A Simple and Efficient Implementation of EKF-Based SLAM Relying on Laser Scanner in Complex Indoor Environment[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(1): 180-183. [26].
- [18] Blösch, M, Weiss, S, Scaramuzza, D, et al. Vision Based MAV Navigation in Unknown and Unstructured Environments[C]//2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Anchorage: IEEE, 2010: 21-28.
- [19] Jeong W Y, Lee K M. CV-SLAM: A New Ceiling Vision-Based SLAM Technique[C]//2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2005: 3195-3200.
- [20] Achtelik M, Bachrach A, He R, et al. Stereo Vision and Laser Odometry for Autonomous Helicopters in GPS-Denied Indoor Environments[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2009, 7332(1): 373-375.
- [21] Fraundorfer F, Heng L, Honegger D, et al. Vision-Based Autonomous Mapping and Exploration Using A Quadrotor MAV[C]//2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Vilamoura: IEEE, 2012: 4557-4564.
- [22] Huang A S, Bachrach A, Henry P, et al. Visual Odometry and Mapping for Autonomous Flight Using an RGB-D Camera[C]//International Symposium on Robotics Research (ISRR). 2011: 1-16.
- [23] Bylow E, Sturm J, Kerl C, et al. Real-Time Camera Tracking and 3D Reconstruction Using Signed Distance Functions[C]//Robotics: Science and Systems (RSS) Conference 2013. 2013, 9.
- [24] 刘新艳, 黄显林, 吴强. 国外任务规划系统的发展[J]. 火力与指挥控制, 2007, 6:6-9.
- [25] Grzonka S, Grisetti G, Burgard W. A fully autonomous indoor quadrotor [J]. Robotics, IEEE Transactions on, 2012, 28(1):90-100.
- [26] 付彦飞. 无人机航迹融合与规划算法研究[D]. 桂林: 桂林理工大学硕士学位论文, 2010.
- [27] Glenn P Tournier, Mario Valenti, Jonathan P How. Estimation and Control of a Quadrotor Vehicle Using Monocular Vision and Moire Patterns[C]. Keystone, Colorado: AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit, 2006:1-16.
- [28] Fink J, Michael N, Kim S, et al. Planning and control for cooperative manipulation and transportation with aerial robots [J]. The International Journal of Robotics Research, 2011, 30(3):324-334.
- [29] Sobers Jr D M, Chowdhary G, Johnson E N. Indoor navigation for unmanned aerial

- vehicles[C]//AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference. 2009, 1:29.
- [30] Bills C, Chen J, Saxena A. Autonomous MAV flight in indoor environments using single image perspective cues[C]//Robotics and automation (ICRA), 2011 IEEE international conference on. IEEE, 2011:5776-5783.
- [31] 张博翰, 蔡志浩, 王英勋. 电动VTOL飞行器立体视觉导航方法研究[C]. 中国制导导航与控制学术会议, 中国, 上海, 2010:298-303.
- [32] 童丸丸, 用于UVA导航的合成视觉方法[D]. 浙江大学, 2010.
- [33] Monteriro J C , Oliverira A L. Implicit FSM decomposition applied to low power design [J]. IEEE Transactions on Very Large Scale Integrated (VLSI) Systems, 2002 , 10(5):560-565.
- [34] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientation[C] Proceedings of the 7th International Conference on Computer Vision , Corfu , 1999 :666-673.
- [35] G. Klein and D. W. Murray. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces. In Sixth IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality, pages 225–234, 2007.
- [36] G. Zhang, Z. Dong, J. Jia, T. Wong, and H. Bao. Efficient non-consecutive feature tracking for structure-from-motion. In Proceedings of 11th European Conference on Computer Vision, Part V, pages 422–435. 2010.
- [37] Y. Jin, L. Tao, H. Di, N. I. Rao, and G. Xu. Background modeling from a free-moving camera by multi-layer homography algorithm. In 15th IEEE International Conference on Image Processing, pages 1572–1575, 2008.
- [38] D. Zamaliev, A. Yilmaz, and J. W. Davis. A multitransformational model for background subtraction with moving cameras. In European Conference on Computer Vision, pages 803–817. Springer, 2014.