分	类	号	TN967.2	密	级	
U	D	С		编	뮹	10486

或漢大学

硕士学位论文

基于轮式机器人的 多源实时精密定位技术

研	究	生姓	名	: 唐海亮
学			号	: 2017206180003
				刘经南 教授
指导教师姓名、职称				:牛小骥 教授
				张提升 副教授
专	业	名	称	: 电路与系统
研	究	方	向	:机器人导航定位

二〇二〇年五月

Multi-source Real-time Precise Positioning Technology for Wheeled Robot

By Hailiang Tang

Supervised By Prof. Jingnan Liu Prof. Xiaoji Niu Associate Prof. Tisheng Zhang

Wuhan University Wuhan, 430079, P. R. China May, 2020

论文原创性声明

本人郑重声明:所呈交的学位论文,是本人在导师指导下,独立 进行研究工作所取得的研究成果。除文中已经标明引用的内容外,本 论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的研究成果。对本 文的研究做出贡献的个人和集体,均已在文中以明确方式标明。本声 明的法律结果由本人承担。

学位论文作者(签名): 產海亮

2020年5月20日

摘要

随着人工智能、无人驾驶产业的迅猛发展,轮式机器人被广泛应用于消费服务、快递物流、治安巡逻、特种作战等领域,其对连续、实时、精准的低成本定位技术的需求也越来越迫切。综合复杂场景下,GNSS/INS 组合导航能够提供可靠、连续、完备的高精度导航信息,是应用最广泛的定位技术之一。然而,低成本 MEMS IMU 噪声较大,精度较低,在GNSS 失效期间组合定位误差将迅速累积,系统可用性较差。使用里程计辅助和非完整性约束等轮式机器人载体信息对GNSS/INS 组合导航系统进行辅助,能够显著降低 INS 误差的发散速度。但是,GNSS 长时间失效时,GNSS/INS/机器人信息组合定位系统仍然无法保障精度。基于低成本相机的视觉绝对定位,依靠稀疏的视觉路标来提供精准的绝对辅助信息,从而形成 GNSS/INS/机器人信息/视觉路标多源融合定位系统,能够实现GNSS 复杂场景下连续的高精度定位。

针对轮式机器人对连续、实时、精准的低成本定位技术的迫切需求,本文开展了基于 GNSS、INS、里程计、视觉等导航手段的多源组合定位技术研究,建 立了多源融合定位算法模型,并研制了轮式机器人多源实时精密定位系统,最后 通过实测实验进行了验证。本文的主要研究内容和贡献如下:

- 为了增强 GNSS/INS 组合定位系统的稳健性,提高在 GNSS 复杂环境下的高 精度定位性能,设计并实现了轮式机器人载体信息辅助的 GNSS/INS 实时组 合定位方案,即轮式机器人实时组合定位方案。首先,在 GNSS/INS 组合导 航的经典状态模型和量测模型基础上,建立 GNSS 双天线航向辅助、轮式里 程计辅助、非完整性约束和零速修正的量测模型;然后,面向实时性需求, 设计了 GNSS 和 IMU 高精度时间同步技术,并采用了 GNSS 延时更新算法; 最后,对研制的组合定位模块进行实测数据验证和分析。实测结果表明, GNSS/INS/机器人信息组合定位系统,能够实现优于 0.5°的初始航向对准; 开阔天空场景下定位精度为厘米级,航向精度优于 0.12°; GNSS 失效 30s 时,组合系统能够维持优于 0.3m 的水平定位精度。
- 2. 为了进一步提高GNSS/INS/机器人信息组合定位系统在综合复杂场景高精度 定位的连续性,设计并实现了基于视觉路标辅助的机器人组合定位方案。首 先,建立相机和 IMU 的时空同步框架,实现相机和 IMU 时间和空间上的同 步。接着,针对视觉和惯导组合的层次,分别建立视觉/惯导松组合、紧组合 卡尔曼滤波量测模型。然后,设计人工视觉路标,实现视觉路标的特征点提 取和匹配算法。最后,基于轮式机器人平台采集实测数据,对视觉融合算法 的量测效果进行了定量的评估分析。实测结果表明,无论是视觉/惯导松组合

I

还是紧组合算法,都能够显著改善GNSS 中断期间的组合定位系统性能,但 是视觉/惯导紧组合算法精度更高、效果更优。在GNSS 中断 20s 时间段内, 连续约 5s 的视觉路标辅助,采用视觉/惯导紧组合算法,GNSS/INS/机器人 信息/视觉路标组合定位系统能够维持优于 0.18m 的水平定位精度。

3. 基于上述机器人组合定位理论与方法,研制了轮式机器人多源实时精密定位系统。首先,基于轮式机器人载体信息辅助的 GNSS/INS 实时组合定位技术,研制了实时组合定位模块 INS-Probe。然后,以 INS-Probe 为核心,基于轮式机器人平台,采用基于视觉路标的视觉/惯导紧组合技术,建立 GNSS/INS/机器人信息/视觉路标组合定位系统。最后在综合复杂场景下,评估了组合定位模块和多源融合定位系统的实时性能。实测结果表明,多源融合定位系统软硬件结构完整,实时多源融合定位软件运行稳定,能够为轮式机器人提供连续、实时、精准定位。

综上所述,针对轮式机器人定位导航需求,本文对 GNSS/INS/机器人信息/ 视觉路标组合定位技术进行了深入研究,建立了完整的滤波融合模型;研制了 GNSS/INS/机器人信息实时组合定位模块,并以此研制了轮式机器人多源实时精 密定位系统;通过实测数据对算法模型和硬件系统进行了全面验证和分析。本文 的研究将为综合复杂环境下,轮式机器人的连续、实时、精准定位提供可靠的参 考方案。

关键词: GNSS/INS 组合导航;视觉定位;机器人导航;多源组合定位;实时精密定位

Abstract

With the rapid development of artificial intelligence and automatic driving industry, wheeled-robots are widely used in consuming services, express logistics, public security patrol, special operations and other fields, and the demand for continuous, real-time, precise and low-cost positioning technology is also more and more urgent. In urban environment, GNSS/INS integrated navigation can provide reliable, continuous and complete high-precision navigation parameters, which is one of the most widely used positioning technologies. However, the low-cost MEMS IMU has huge noise with low accuracy. During the GNSS outages, the positioning error will accumulate rapidly, leading to poorer usability. The GNSS/INS integrated navigation system can be aided by vehicle information of wheeled-robot such as odometer and non-holonomic constraints, which can significantly reduce the drift speed of INS error. However, due to prolonged GNSS outages, the GNSS/INS/Robot-aided integrated positioning system still cannot guarantee the accuracy. Based on the absolute vision positioning of low-cost camera, sparse visual landmarks can provide precise and absolute aiding sources, which establishes a GNSS/INS/Robot-aided/Vision-Landmark multi-source fusion positioning system, that can achieve continuous high-accuracy positioning in GNSS denied environment.

With the urgent need of continuous, real-time, precise and low-cost real-time positioning technology for wheeled-robot, this thesis studies the multi-source fusion positioning technology based on GNSS, INS, odometer, vision and other navigation sources, establishes the fusion positioning model, develops the multi-source real-time precise wheeled robot system, and finally verifies the performance by experiment. The main research contents and contributions of this thesis are as follows:

1. In order to enhance the robustness of GNSS/INS integrated positioning system and improve the performance of high-precision positioning in GNSS denied environment, a GNSS/INS real-time integrated positioning scheme aided by vehicle information of wheeled-robot is proposed and developed, which called robot real-time integrated positioning scheme. Firstly, based on the classical state and observation model of GNSS/INS integrated navigation, the observation models of dual-antennas heading, wheeled odometer, NHC and ZUPT are established. Then, for real-time requirement, high-accuracy time synchronization technology between GNSS and IMU is developed, and GNSS delay update algorithm is adopted. Finally, the developed integrated positioning module is evaluated and analyzed by real experiment. The experimental results show that the GNSS/INS/Robot-aided integrated positioning system can achieve the initial heading alignment better than 0.5° ; in open-sky environment, positioning accuracy is centimeter level, and heading accuracy is better than 0.12° ; during GNSS outages of 30 seconds, the integrated system can maintain the horizontal positioning accuracy better than 0.3m.

2. In order to further improve the continuity of high-accuracy positioning of GNSS/INS/Robot-aided integrated positioning system in urban environment, a robot integrated positioning scheme based on visual landmark is proposed and developed. Firstly, the space-time synchronization framework of camera and IMU is established. Then, the observation models of Visual/INS loose coupled and tight coupled are established respectively. Then, the artificial visual landmark is designed, with the algorithm of feature extraction and matching. Finally, with real data sampled by wheeled robot, the quantitative evaluation and analysis of the observation effect of the visual fusion algorithm are carried out. The experimental results show that the performance during GNSS outages can be significantly improved whether the loose-coupled or tight-coupled algorithm, but the Visual/INS tight-coupled algorithm has higher accuracy and better effect. During GNSS outages of 20 seconds with continuous visual-landmark aiding of about 5 seconds, using Visual/INS tight coupled GNSS/INS/Robot-aided/Visual-landmark algorithm, the multi-source fusion positioning system can maintain a horizontal positioning accuracy better than 0.18m.

3. Based on the theory and method of the robot integrated positioning above, a multi-source real-time precise positioning wheeled-robot system is developed. Firstly, based on GNSS/INS real-time integrated positioning technology aided by the vehicle information, INS-Probe, a real-time integrated positioning module, is developed. Then, taking INS-Probe as the core, the GNSS/INS/Robot-aided/Visual-landmark multi-source fusion positioning system for wheeled-robot is established by using the Visual/INS tight-coupled algorithm based on visual landmark. Finally, the real-time performance of the integrated navigation module and the multi-source fusion positioning system are evaluated in urban environment. The experimental results show that the multi-source fusion positioning software runs steadily, which can improve the continuous real-time precise positioning for wheeled robot.

In conclusion, for the positioning and navigation requirements of wheeled robot, this thesis makes an in-depth research on GNSS/INS/Robot-aided/Visual-landmark

multi-source fusion positioning technology, establishes a complete filtering model, develops a GNSS/INS/Robot-aided real-time integrated positioning module, and develops a multi-source fusion positioning robot platform based on INS-Probe, and comprehensively evaluates and analyzes the algorithm model and hardware system by experiment. The research in this thesis provides a reliable references scheme for the continuous, real-time and precise positioning of wheeled robot in urban environment.

Keywords: GNSS/INS integrated navigation; Visual positioning; Robot Navigation; Multi-source integrated positioning; Real-time precise positioning

摘	要		I
Abs	strac	t	III
第−	-章	绪论	1
	1.1	研究背景和研究意义	1
	1.2	国内外研究现状	
		1.2.1 GNSS/INS 融合定位技术	
		1.2.2 视觉/INS 融合定位技术	5
		1.2.3 SLAM 技术研究现状	6
		1.2.4 其他机器人定位技术研究现状	7
	1.3	研究目标与研究内容	
	1.4	论文章节安排	9
第二	_章	GNSS/INS/视觉定位技术基础	11
	2.1	姿态表达式与转换	
		2.1.1 欧拉角	
		2.1.2 方向余弦矩阵	
		2.1.3 四元数	
		2.1.4 等效旋转矢量	
	2.2	参考坐标系与转换	
		2.2.1 惯性坐标系(<i>i</i> 系)	13
		2.2.2 地心地固坐标系(e系)	14
		2.2.3 导航坐标系 (n系)	14
		2.2.4 计算坐标系(c系)	15
		2.2.5 平台坐标系 (p 系)	16
		2.2.6 载体坐标系(b系)	16
		2.2.7 车体坐标系(v系)	
	2.3	捷联惯性导航算法	17
		2.3.1 IMU 输出及误差校正	17
		2.3.2 速度更新	
		2.3.3 位置更新	19
		2.3.4 姿态更新	19
	2.4	GNSS/INS 组合导航算法	
		2.4.1 卡尔曼滤波原理	20

2.4.2 系统误差状态模型	21
2.4.3 GNSS 量测模型	22
2.5 视觉导航基础	23
2.5.1 相机模型	23
2.5.1.1 针孔相机模型	23
2.5.1.2 镜头畸变	24
2.5.2 相机标定	25
2.6 本章小结	25
第三章 轮式机器人实时组合定位技术	27
3.1 轮式机器人信息量测模型	27
3.1.1 零速修正	27
3.1.2 零角速率修正	
3.1.3 非完整性约束	
3.1.4 里程计辅助	29
3.1.5 双天线航向辅助	
3.2 组合定位实时性优化技术	
3.2.1 高精度时间同步	
3.2.2 GNSS 延时更新算法	34
3.3 轮式机器人组合定位算法测试验证	
3.3.1 零速修正测试	
3.3.2 非完整性约束及里程计辅助测试	
3.3.3 双天线航向辅助测试	
3.3.4 初始对准测试	40
3.4 本章小结	40
第四章 视觉路标辅助机器人组合定位技术	42
4.1 相机与 IMU 的时空同步技术	
4.1.1 时间同步	42
4.1.2 空间同步	43
4.2 视觉路标特征点提取与匹配	44
4.3 视觉/惯导组合卡尔曼滤波建模	45
4.3.1 视觉/惯导松组合量测模型	46
4.3.2 视觉/惯导紧组合量测模型	46
4.4 视觉融合定位算法实测验证	
4.4.1 实验说明	49

	4.4.2 视觉/惯导松组合评估	
	4.4.2.1 相机绝对位置精度评估	51
	4.4.2.2 松组合定位性能评估	53
	4.4.3 视觉/惯导紧组合评估	55
	4.4.3.1 视觉特征点精度评估	55
	4.4.3.2 紧组合定位性能评估	
4.5	本章小结	60
第五章	轮式机器人多源实时精密定位系统	61
5.1	低成本 GNSS/INS 组合定位模块研制	61
	5.1.1 模块硬件设计与实现	61
	5.1.2 模块嵌入式软件实现	
5.2	机器人多源精密定位系统研制	63
	5.2.1 硬件系统设计	63
	5.2.2 软件系统设计	
5.3	机器人实时组合定位性能测试	68
	5.3.1 开阔天空场景测试	68
	5.3.2 综合复杂场景测试	
5.4	多源实时精密定位系统性能测试	73
5.5	本章小结	75
第六章	总结与展望	76
6.1	工作总结	
6.2	研究展望	77
参考文	献	79
致谢		84

第一章 绪论

1.1 研究背景和研究意义

2017年国务院在《新一代人工智能发展规划》中提出,"重点突破自主无人 系统计算架构、复杂动态场景感知与理解、实时精准定位、面向复杂环境的适应 性智能导航等共性技术,无人机自主控制以及汽车、船舶和轨道交通自动驾驶等 智能技术,服务机器人、特种机器人等核心技术,支撑无人系统应用和产业发展"。 自主无人系统面向复杂环境的适应性智能导航,是新一代人工智能关键共性技术 之一。随着人工智能产业的迅猛发展,对高精度、高稳定、高可靠的轮式机器人 低成本导航定位技术需求迫切(李成进等,2016)。2016年杨元喜院士阐述了 综合 PNT(Positioning, Navigation and Time)的概念,论述了综合 PNT 关联的 核心技术,包括多源 PNT 传感器集成技术、多源 PNT 的数据融合技术(杨元喜, 2016)。随着导航技术的飞速发展,单一传感器的导航定位系统早已无法满足机 器人对连续、可靠、精准导航定位需求,多传感器融合是机器人导航定位的发展 趋势。

在众多的导航定位技术中,GNSS(Global Navigation Satellite System) (Springer, 2017)具有为用户提供全天候、不间断的高精度绝对位置和时间信息的能力,被广泛的应用于机器人领域。GNSS经过多年的发展,形成了以美国的GPS、俄罗斯的GLONASS、中国的北斗和欧盟的伽利略为主的四大全球卫星导航系统(宁津生等,2013),极大的提高了可视卫星数量,导航定位的精度得到显著提升。基于载波相位的实时动态差分定位(Real-time Kinematic, RTK)技术的出现,使GNSS的定位精度提高到厘米级。随着地基增强网络的搭建, RTK 技术在机器人导航应用中发挥着巨大作用。然而,GNSS导航卫星信号极其微弱,容易受到遮挡和干扰,进而影响定位精度和可靠性。机器人广泛应用于楼群密集和林荫道等复杂环境,甚至是室内环境,此时GNSS可用性变差或者完全不可用。同时,GNSS数据率较低,高频GNSS的噪声又较大,无法完全满足机器人对连续、可靠的精准定位需求。

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)(Savage, 2000)是以牛顿 经典力学为基础的一种完全自主式的导航系统。由加速度计和陀螺仪组成的惯性 测量单元(Inertial Measurement Unit, IMU)测量载体的角速度和加速度,通过 数学积分计算可以获得载体的位置、速度和姿态等导航信息。INS 具有完全自主、 导航数据率高、短期精度高等优点,在机器人领域已被广泛的应用。但是,高精 度 IMU 价格昂贵,大大增加了机器人的导航定位成本,不利于机器人批量推广

应用。MEMS(Micro-Electro-Mechanical Systems)(Zhanshe G, 2015)技术发展迅速,工艺水平不断提高,使惯性器件变得更加小型化、廉价化、低功耗。但 是 MEMS IMU 噪声较大,精度较低, INS 导航误差会随着时间迅速增大,无法 长时间为机器人提供高精度导航定位信息。

GNSS 和 INS 之间具有良好的优势互补特性,GNSS/INS 组合导航具有重要 意义。一方面,GNSS 可以很好的约束 INS 的误差漂移,对惯导误差进行在线估 计和补偿;另一方面,在GNSS 失效期间或粗差较大时,INS 能够提高定位的连 续精度。但是,较长时间的 GNSS 失效,定位误差将会迅速累积,特别是对于 低成本的 MEMS 惯导,导航误差发散更为严重。对于轮式机器人,里程编码器 是必不可少的传感器之一,里程计的辅助能够有效改善GNSS/INS 组合导航的性 能(Niu, 2007)。与此同时,针对轮式机器人载体的运动特性,可以施加一定 的运动学约束,进一步降低组合系统发散的速度,如非完整性约束、零速修正等。

视觉导航早在 20 世纪 80 年代就应用于火星探索计划(Moravec H P, 1980)。随着计算机水平的提高,相机已经成为机器人环境感知必不可少的一部分。在自动驾驶领域,高精度地图发挥出越来越重要的作用,相机是连接高精度地图与真实场景的纽带。相机传感器具有自主无源、定位精度高、信息量丰富等优点,同时具有低功耗、低成本的特点。一般来说,GNSS 观测条件较差的地方,视觉特征往较为丰富,视觉导航就能发挥巨大的优势;而在开阔视野的户外环境,视觉特征稀疏,GNSS 观测条件却较好,此时 GNSS/INS 组合导航系统就能够提供高精度的导航定位。与此同时,相机和 IMU (Inertial Measurement Unit)也具有很好的互补性,IMU 可为相机提供尺度信息,同时也能够增加视觉跟踪的鲁棒性;而视觉观测可以有效的减少 IMU 的误差漂移。

将以上几种导航定位技术的主要特点汇总,如表 1-1 所示。对于轮式机器人 导航定位系统,低成本、自主运行、提供全导航参数的 MEMS IMU 是必不可少 的导航传感器之一。在一个大尺度的场景下,GNSS 能够提供高精度的绝对定位 和速度量测,采用双天线的安装方式,还能够提供高精度的航向量测,因而 GNSS 能够有效的辅助 IMU。但是 MEMS IMU 精度较差,一旦进入遮挡或者室内区域, 惯性导航误差随着时间迅速增大,一分钟就会漂移几米到几十米,甚至上百米。 成本低、高精度的里程编码器,是轮式机器人的必备传感器之一,加入里程计的 辅助,能够有效缓解组合系统误差发散的速度,一分钟没有 GNSS 辅助修正,其 误差往往只有几米,甚至小于1米。但是,米级的定位误差同样不能接受,无法 满足机器人的导航控制及作业需求。低成本相机是机器人环境感知的重要组成部 分,利用高精度地图中的视觉路标,可以获取高精度的绝对定位量测,引入该信 息可以实现 GNSS 复杂环境下连续分米级的高精度定位。

特点/类别		视觉导航	GNSS	INS	轮式里程编码器
导航参数		РА	PV PVA		V
误差特性		相对定位随距离累积; 绝对定位不累积	误差不累积 随时间累积		随距离累积
优	势	距离特征越近精度越高	精度较高	自主运行、 短时间精度高	分辨率越高 精度越高
缺	陷	受光照、 周围景物特征影响	易受遮挡、 电磁干扰影响	需要初始化、 容易发散	对打滑漂移敏感
成	本	低	较高	较高	低

表 1-1 视觉导航、GNSS、INS、轮式里程计特点

注: 其中 P (Position) 为定位, V (Velocity) 为速度, A (Attitude) 为姿态。

本文选题来源于国家重点研发计划一一协同精密定位技术,基于 GNSS、 MEMS IMU、里程计和相机四种导航传感器和轮式机器人信息,致力于解决轮 式机器人在复杂环境下的实时、连续、可靠的分米级定位问题。在室外典型环境 中,GNSS/INS/里程计组合导航系统可以维持分米级甚至厘米级定位,只有在 GNSS 信号中断时间较长时,才需要额外的位置辅助信息。基于路标的视觉导航, 仅需要布设稀疏的路标或者利用自然的路标,配合高精度地图,即可提供高精度 的位置信息,为组合定位系统提供额外的位置辅助,确保复杂环境的连续分米级 定位导航。因此,本文提出基于轮式机器人的多源实时精密定位技术,将为轮式 机器人连续、实时、精准定位提供可靠的解决方案。

1.2 国内外研究现状

本文研究的基于轮式机器人多源实时精密定位技术,本质上为基于高精度地 图的视觉绝对定位,从技术上来讲分为 GNSS/INS 融合定位技术和视觉/INS 融合 定位技术。相对于有地图的导航方式,同步定位与地图构建技术(邸凯昌,2018), SLAM 技术(Simultaneous Localization and Mapping)被广泛的应用于机器人的 导航定位。与此同时,还有许多定位技术可用于机器人定位,如基于无线通信原 理的定位技术和基于可见光通信定位技术。本节将从 GNSS/INS 融合定位技术、 视觉/INS 融合定位技术、SLAM 技术和其他机器人定位技术四个方面展开,对 国内外研究现状进行总结梳理,并对不同的定位技术的利弊进行总结。

1.2.1 GNSS/INS 融合定位技术

GNSS 和 INS 具有良好的互补性,两者的组合能够达到"1+1>2"的效果。

GNSS 依赖于导航卫星,误差不随时间累积,但输出数据率较低,噪声也较大; INS 能够独立自主运行,能够连续输出高频率的导航信息,但是需要进行导航初 始化,且误差随着时间逐渐累积。GNSS/INS 组合系统能够很好的扬长避短, GNSS 能够帮助 INS 系统完成初始对准,还能够对 INS 误差进行在线估计补偿, 进而组合系统能够输出噪声更低、数据率更高、稳定连续的导航信息。因此,无 论是从精度、性能,还是从可靠性、完好性来讲,GNSS/INS 组合系统的导航性 能均优于单个系统。

GNSS/INS 组合导航算法从 GNSS 接收机组合的层次上来讲,分为松组合、 紧组合和深组合(谢刚,2009)。松组合形式最为简单,INS 和 GNSS 接收机各 自独立工作,GNSS 能够提供位置和速度观测,松组合易于实现,实时性能较好, 能够大大提高定位的连续性和可靠性,国内外发展都较早,目前算法较为成熟 (Shin E H, 2005;严恭敏,2006)。但是 GNSS 卫星信号及其脆弱,且容易受 到多路径信号干扰,导致定位迅速恶化甚至无法定位,恶化的观测导致组合系统 的不稳定,或者组合系统无法进行观测更新。紧组合是在 GNSS 原始观测(包括 多普勒、伪距和载波相位)(Springer,2017)层面进行组合,可以更好地控制 GNSS 观测量粗差,然而紧组合需要建立较复杂的系统状态模型和观测模型,实 现复杂度和计算量较大,对 CPU 资源要求高。深组合又称作超紧组合(张提升, 2013),是在 GNSS 基带层面进行组合,除了要完成松组合或者紧组合的工作之 外,还需要利用校正之后的 INS 状态信息对接收机跟踪环路进行辅助,从而提 高接收机在高动态、弱信号、强干扰等环境下的可用性。深组合涉及到 GNSS 基带信号处理,理论和实现难度都很大。

根据轮式机器人的运动特征,还可以利用运动约束和辅助信息对 GNSS/INS 系统进行辅助,能够有效的缓解 INS 发散的速度。零速修正,是一种对 INS 误 差修正的有效的方法,Skog (2010)对零速检测算法进行了评估。Niu (2007) 研究了三维速度辅助信息,包括非完整性约束和里程计辅助,在车载场景下的应 用,三维速度辅助能够很好的约束 INS。Shin (2005)利用了车辆系的航向信息 对 GNSS/INS 组合系统进行辅助,外部航向辅助可以大大的提高组合系统的性 能,同时也能够辅助 INS 完成航向初始化,提高 INS 初始对准收敛速度。

总结:为了提高轮式机器人导航定位方案的可用性,一方面尽可能采用计算量小、稳定性强的算法,另一方面充分利用各类对定位有帮助的信息源。采用GNSS/INS 松组合方式进行建模,更能够满足轮式机器人的实时性需求,配合轮式机器人的约束以及辅助信息,能够提供较好的导航定位性能。同时,松组合的灵活接口,可以很好的接入视觉导航等外部观测,进一步提高轮式机器人的导航定位性能。

1.2.2 视觉/INS 融合定位技术

视觉导航依据参考基准获取方式的不同可分为两大类:绝对定位型,相对定 位型(王力,2015)。基于地图的视觉导航就是一种典型的绝对定位型导航方式, 它的参考基准来源于预先测量或者其它方式获取得到的地图,将机器人拍摄的图 像与地图中的参考基准进行关联,进而解算出自身的导航定位参数(Olesk A, 2009)。Li(2011)对这种基于地图的视觉导航进行了可靠性研究并评估了精度, 提出了精度因子概念以评价特征点的几何分布状况。绝对定位型视觉导航的误差 不随时间积累,但是存在预先测绘或者测图的过程,需要增加额外的工作。相对 定位型视觉导航按照是否构建地图,可分为视觉里程计 VO(Visual Odometer)

(Nistér D, 2004) 和视觉 SLAM (Fraundorfer F, 2011)。VO 的基本方法是找 到前后两帧图像中的同名点,并解算出两帧图像对应的机器人的相对位姿变化, VO 关注的是运动轨迹的局部一致性,这就决定了视觉里程计是随距离逐渐发散 的。视觉里程计发展已久,早在 1980 年就已经成功的应用于火星车定位。SLAM 算法在估算相机本身在世界坐标系的位置的同时,还需要检测路标点的空间位 置,从而构建所处环境的地图,它关注的是全局地图的一致性。在大尺度范围应 用 SLAM 算法,不仅大大的增加了计算量,实时性难以保证,同时精度也会随着 尺度的增加逐渐变差。

相机和惯导具有很好的互补性,视觉惯性导航是目前的一个研究热点。惯导 在短时间内具有较高的精度,对于机器人的高动态场景也能够连续导航,但长时 间工作会导致惯导误差累积;视觉导航适合距离较远、运动较平稳的场景,但是 动态较大会导致视觉导航同名点较少,从而无法导航定位。两者的融合能够很好 的弥补它们独立运行的缺陷,提高导航定位的精度和连续性。视觉惯性导航是非 线性系统,早期的融合模型主要采用卡尔曼滤波,Kim(2005)采用扩展卡尔曼 滤波(Extended Kalman Filter, EKF) 建模, Mourikis(2007) 提出了基于 EKF 的具有多状态约束的卡尔曼滤波模型(Multi-State Constraint Kalman Filter, MSCKF)。近年来,基于非线性优化的视觉惯性导航也被广泛的研究和应用, 如 Qin Tong 设计的 VINS-Mono(2018)。Li(2013)指出 MSCKF 建模方法和 SLAM 方法具有相同的最优估计性质,但 MSCKF 解算精度更优。同样的,从 视觉组合的层次,视觉惯性导航系统可分为松组合和紧组合(Corke, 2007)。 对于松组合,视觉导航系统和惯性导航系统独立工作,视觉系统解算出的位姿对 惯导进行辅助,进而估算系统的误差状态(Lemay L, 2011; Tardif J P, 2010), 松组合系统具有较高的可靠性,但是特征点较少时,视觉系统无法定位,不能起 到观测作用。紧组合,是在图像的特征点像素坐标层面进行的组合,直接将像素 坐标作为观测信息对惯导进行辅助,因而紧组合系统的精度更高(Chu, 2011),

而且当视觉特征点小于三个时,也能够对系统状态误差进行修正(Wang, 2013)。

总结:视觉定位的引入可以大大提高组合定位系统的精度,一种方法是使用 视觉里程计,另一种使用基于视觉路标的绝对定位。考虑到轮式里程计是轮式机 器人必备传感器之一,其成本低、发散率低、稳定性好;而视觉里程计不仅计算 量较大、精度也无法保障,一旦视觉跟踪失败,就无导航定位信息可用,因而稳 定性、可用性差。因此,在机器人已具有里程计的情况下,增加视觉里程计的意 义不大。使用视觉绝对定位,预先建立高精度地图,采用视觉路标的绝对定位, 不仅可以为 GNSS 复杂环境连续高精度定位提供有效辅助,且计算量较小、硬件 成本低。

1.2.3 SLAM 技术研究现状

机器人 SLAM 技术按照导航传感器的类型可以分为,基于相机的视觉 SLAM 技术 VSLAM(Karlsson, 2005), 和基于激光雷达的激光 SLAM 技术 LiDAR-SLAM (Hess, 2016)。早期的 VSLAM 受限于硬件计算能力不足, 多采用滤波的方式, Davision(2007)提出的 MonoSLAM 是第一个基于 EKF 的单目 VSLAM 系统, 能够实时定位和建图,但还不具备闭环修正能力。Klein(2007)提出的 PTAM 在 VSLAM 领域具有重要意义, 第一次将视觉跟踪和建图分为两个单独的任务, 在两个平行的线程处理解算。苏黎世大学 Christian (2014) 等研究人员提出了一 种半直接法视觉里程计 SVO,结合了直接法和间接法的特点,在小型旋翼无人 机的嵌入式计算机实现了每秒 55 帧的实时处理,具有非常强的实时性。2014 年 慕尼黑工业大学的 Engel 等人提出的 LSD-SLAM 是一个基于直接法的单目 VSLAM 系统,直接对图像像素点进行处理,不仅能够估计出相机的位姿,同时 还能够构建半稠密的环境地图。到了 2015 年,出现了基于关键帧的 VSLAM 系 统,ORB-SLAM (Mur-Artal, 2015) 最具有代表性,其基于 ORB 特征点,将整 个 SLAM 系统分为跟踪、建图、闭环检测三个线程处理,具有较高的精度。VSLAM 发展迅速,许多研究人员将他们的研究成果发表甚至开放源代码,进一步促进了 SLAM 技术的发展。

单目相机无法确定深度,因而单目 VSLAM 具有尺度不确定性。因而往往采 用双目相机(Stereo)或者深度相机(RGB-D 相机),测量出距离信息。Kerl 在 2013 年利用 RGB-D 相机,通过最小化光度和深度误差,建立稠密的 VSLAM 算法。2015 年 LSD-SLAM(Engel)的作者将直接法应用于双目相机,提出了 Stereo LSD-SLAM,解决了单目相机的尺度问题,能够在通用处理器上实时运行。 Mur-Artal 在 2017 年提出了 ORB-SLAM2 算法,进一步增加了 Stereo 和 RGB-D 相机的支持,使定位和建图具有真实尺度信息。除此之外,视觉惯性 SLAM 算 法也被广泛的应用于机器人导航,充分发挥相机和惯导的优势。Bloesch 提出了

ROVIO(2015),这是单目视觉惯性里程计,使用 EKF 滤波进行数据融合。 Leutenegger(2015)提出了使用非线性优化实现的视觉惯性紧耦合 SLAM 算法。 2018年香港科技大学 Qin Tong 提出的 VINS-Mono 也是一个单目视觉惯性 SLAM 算法,并且在旋翼无人机实现了每秒 30 帧的实时处理。

激光雷达按照其线数可以分为 2D 激光雷达(单线)和 3D 激光雷达(多线)。 GMapping (Grisetti, 2007)是机器人社区最流行的 2D 激光 SLAM 算法,它采 用粒子滤波算法,是 ROS (Robot Operating System)基本的导航包,被广泛的应 用于许多商业服务机器人。Hector SLAM (Kohlbrecher, 2011)把 IMU 加入到 2D 激光 SLAM 算法中,但是系统没有回环检测功能,不适合大规模建图。2014 年 Zhang J 提出了 LOAM 算法,使用运动的两轴 2D 激光雷达,实现了 3D 激光 雷达里程计和环境建图,不需要高精度的测距或者惯导,使用低复杂度的算法就 可以获得低漂移的地图,其精度较高,但是也没有闭环检测及闭环修正功能。 Google Cartography(Hess, 2016)支持 2D 和 3D 激光雷达,同时还能够融合 IMU、 GNSS、里程计等信息,是一个完整激光 SLAM 方案。Cartography 引入了子图的 概念,将相邻的几帧点云作为一个子图,在机器人连续运动时,子图被加入到位 姿优化中,在闭环修正中会优化子图的位姿来减小累积误差,从而减小了帧间配 准引入的误差,牺牲了部分精度要求以提高 SLAM 的实时性。

总结:从研究现状来看,视觉 SLAM 算法和视觉惯性 SLAM 算法多用于手持设备或者旋翼无人机,前端都采用视觉里程计算法,而视觉特征数量较多,无论是采用滤波还是非线性优化,其计算量都非常大,难以保证精度和实时性兼顾。与此同时,视觉 SLAM 算法依赖闭环修正消除累积误差,这就决定了其不适用于大尺度场景,没有了闭环修正其误差会迅速累积。激光 SLAM 具有同样的问题,且 2D 激光雷达往往只适用于室内平面环境。与此同时,无论是 2D 激光雷达,还是 3D 激光雷达,其价格都不菲,激光雷达成本远远高于视觉相机。

1.2.4 其他机器人定位技术研究现状

上海的洋山港四期是国内首个全自动化集装箱码头,采用了磁钉导航方式, 使 130 台 AGV 能够在码头自主装卸货。在整个洋山港四期工程中在地面共埋了 了 61483 颗磁钉,磁导航传感器检测磁钉的磁信号来实现 AGV 的高精度定位。 其成本低,技术方案成熟,抗干扰性强,对天气变化稳定性较强。但是对磁稳定 性要求高,加大了港口施工建设的难度,且只适用于新建码头,无法在已有码头 应用。

在众多的机器人定位技术中,基于无线通信的定位技术的研究和应用愈加火热。WiFi 定位是一种比较流行的室内定位技术,其定位方法是基于信号强度的传播模型法和指纹识别法(Bose, 2007),定位精度只有米级。蓝牙定位基于

RSSI(Received Signal Strength Indication,信号场强指示)定位原理(Hallberg, 2003),随着蓝牙 5.0 的发布,降低了功耗,大大提高了定位的准确度和距离。 另一种被广泛使用的无线定位技术是 UWB(Ultra Wide Band,超宽带)定位技术(Alarifi, 2016),基于到达时间(TOA)和到达时间差(TDOA)原理实现定位。UWB定位系统包括 UWB 接收器、UWB参考标签和主动 UWB 标签,UWB系统功耗低、抗多径效果好、安全性高、系统复杂度低,且定位精度极高,可以得到分米级甚至厘米级。RFID(Radio Frequency IDentification)(Bouet, 2008)也被用于机器人定位。2002年出现的 ZigBee 定位技术(Lee, 2007),是一种介于蓝牙和 RFID 之间的无线通信技术。

自 2000 年以来,随着 LED 技术的快速发展,基于可见光通信(Visible Light Communication, VLC)的定位技术应运而生。根据 VLC 系统接收端设备的不同,可见光定位技术可分为基于图像传感器(Image Senso, IS)的成像定位技术和基于光电二极管(Photodiode, PD)的非成像定位技术(邓中亮,2003)。Zhang R 等人(2017)使用单目 IS 实现了厘米级的三维高精度 VLC 定位。Yang 等人(2013) 实现了基于 PD 的非成像 VLC 定位,使用了三个发射不同频率载波的 LED 灯,通过检测信号强度实现定位。

总结:磁钉导航只是一个特殊应用场景的专用定位方式,无法应用于城市复杂环境。基于无线定位技术的方案依赖于各种无线通讯终端,且WiFi定位、蓝牙定位、RFID定位以及ZigBee定位只有米级左右的精度,UWB虽然能够实现较高精度,但是设备成本较高,往往只适用于室内定位应用。VLC定位技术精度较高,但是依赖于LED可见光源,无法在户外大场景应用。

综上所述,为了满足轮式机器人在综合复杂场景下的实时、连续、精准定位 需求,本文将使用 GNSS、IMU、里程计、相机这四种传感器,以 GNSS/INS 融 合定位技术为基础,对轮式机器人载体信息辅助的实时组合定位技术和基于视觉 路标辅助的机器人组合定位技术展开深入研究,最终形成一套轮式机器人多源实 时精密定位的完整解决方案。

1.3 研究目标与研究内容

本文的研究目标:针对轮式机器人对连续、实时、精准的低成本定位技术的 迫切需求,本文开展基于 GNSS、INS、里程计、视觉等导航手段的多源组合定 位技术研究,建立多源融合定位算法模型,并研制轮式机器人多源实时精密定位 平台,最后通过实测实验进行验证。

基于以上研究目标,论文的研究思路如图 1-1 所示,主要研究内容可以分为 四个部分。第一,实现高精度的 INS 机械编排算法,建立 GNSS/INS 组合导航卡

尔曼滤波模型,实现 GNSS/INS 融合定位算法。第二,针对轮式机器人平台的载体特点,建立零速修正、零角速率修正、非完整性约束、轮式里程计辅助和 GNSS 双天线航向辅助的卡尔曼滤波量测模型;针对实时性需求,对高精度时间同步技术和 GNSS 延时更新算法进行研究,下文定义为轮式机器人实时组合定位。第三,在第二部分研究的基础上,引入基于视觉路标的视觉绝对定位,分别建立视觉/惯导的松组合模型和紧组合模型,建立基于视觉路标的机器人组合定位算法,下文定义为视觉路标辅助机器人组合定位。第四,基于多源融合算法研究成果,研制基于嵌入式技术的实时组合导航模块 INS-Probe,研制多源融合定位轮式机器人平台,建立完整的软硬件系统架构,形成最终的轮式机器人多源实时精密定位系统。



图 1-1 论文研究思路框架

1.4 论文章节安排

论文围绕基于轮式机器人多源实时精密定位技术展开,全文共分为六章。

第一章绪论部分,对论文的研究背景和研究意义进行介绍,总结和阐述机器 人定位技术的国内外研究现状,明确本文的研究目标和研究内容。

第二章阐述 GNSS/INS/视觉定位技术中的基础知识,为后续的多源定位建模 奠定了基础。首先,介绍融合定位常用的坐标系及转换、姿态表达式及转换。接 着,详细阐述高精度捷联惯性导航机械编排算法。然后,介绍卡尔曼滤波原理, 并建立 GNSS/INS 组合导航系统状态模型和量测模型。最后,阐述视觉传感器相 机的传感器模型和相机标定方法。 第三章围绕轮式机器人实时高精度定位需求,开展对轮式机器人实时组合定 位技术的研究。首先,针对轮式机器人高精度定位需求,在 GNSS/INS 组合导航 经典观测和状态模型基础上,建立 GNSS 双天线航向辅助、轮式里程计辅助、非 完整性约束和零速修正的量测更新模型。然后,为了适应轮式机器人实时定位导 航需求,展开对组合定位系统的精确时间同步方法及 GNSS 延时更新算法的研 究。最后,对提出的高精度组合定位方案进行实测数据测试和分析。

第四章针对 GNSS 长期失效时轮式机器人定位精度恶化的问题,研究并阐述 视觉路标辅助机器人组合定位技术。首先,建立相机和惯导的时空同步框架,实 现相机和惯导时间和空间上的同步。接着,针对视觉和惯导组合的层次,分别建 立视觉/惯导松组合和紧组合卡尔曼滤波量测模型。然后,设计人工视觉路标, 实现视觉路标的特征点提取和匹配算法。最后,基于轮式机器人平台采集实测数 据,对视觉松组合和紧组合算法的量测效果进行定量的评估和分析。

第五章讲述轮式机器人及多源融合定位系统的实现与性能验证。首先,基于 第三章阐述的实时组合定位技术,研制实时组合定位模块 INS-Probe,阐述 INS-Probe 的硬件架构和软件系统设计。然后,以 INS-Probe 为基础,基于轮式 机器人平台,建立 GNSS/INS/机器人信息/视觉路标组合定位系统,并阐述融合 定位硬件系统架构及软件系统设计。最后,基于轮式机器人在综合复杂场景下测 试评估组合定位模块和多源融合定位系统的实时定位性能。

第六章对本文基于轮式机器人的多源实时精密定位技术进行了总结分析,并 对后续的研究工作进行了展望。

第二章 GNSS/INS/视觉定位技术基础

GNSS/INS/视觉组合定位技术涵盖 INS 惯性导航技术、GNSS/INS 组合导航 技术及视觉定位技术。在这些导航定位技术中,姿态表达式和参考坐标系是最重 要的参数,它们建立起传感器和导航参数的相互联系。本章首先将介绍姿态表达 和参考坐标系及其相互转换。接着,推导实现高精度的捷联惯性导航算法。然后, 阐述卡尔曼滤波的基本原理,并基于卡尔曼滤波建立 GNSS/INS 组合导航系统状 态模型和量测模型。接着,阐述视觉定位的相机模型及相机标定技术。最后,对 本章内容进行总结。

2.1 姿态表达式与转换

姿态是指两个参考坐标系之间的相对旋转关系,是关键的导航参数之一。在惯性导航算法中,姿态的各种表达被频繁的使用,是惯性导航的一个重要组成部分。常用的姿态表达有欧拉角、方向余弦矩阵、等效旋转矢量和四元数(Savage, 2000),本节将分别介绍这四种表达式及其相互转换关系。

2.1.1 欧拉角

欧拉角是一种经典的姿态表达式,使用横滚(φ)、俯仰(θ)和航向(ψ) 三个角度值来表示两个参考坐标系的相对旋转关系。旋转具有不可交换性,因此 不能简单地用欧拉角相加来表示连续的旋转变换。而且,当俯仰角为±90°时, 无法区分横滚角和航向角的变化,此时欧拉角变换存在奇异性。由于这些原因, 欧拉角常用于姿态的表示,而不直接参与惯性导航解算。

2.1.2 方向余弦矩阵

方向余弦矩阵(Direction Cosine Matrix, DCM)又被称为"坐标转换矩阵", 是一个 3×3 正交矩阵。假如两个坐标系a和b,从坐标系a变换到坐标系b的欧 拉角为 ϕ 、 θ 和 ψ ,分别表示绕x、y和z轴旋转的角度,那么则有如下关系:

$$\mathbf{C}_{a}^{b} = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0\\ -\sin\psi & \cos\psi & 0\\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & -\sin\theta\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi & \sin\phi\\ 0 & -\sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} c\theta c\psi & -c\phi s\psi + s\phi s\theta c\psi & s\phi s\psi + c\phi s\theta c\psi\\ c\theta s\psi & c\phi c\psi + s\phi s\theta s\psi & -s\phi c\psi + c\phi s\theta s\psi\\ -s\theta & s\phi c\theta & c\phi c\theta \end{bmatrix}$$
(2.1)

注: $s = \sin; c = \cos$

方向余弦矩阵具有如下特性,其中**v**^a表示三维坐标系a内的矢量:

$$\mathbf{C}_a^b = (\mathbf{C}_b^a)^T \tag{2.2}$$

$$(\mathbf{C}_a^b)^{-1} = (\mathbf{C}_a^b)^T \tag{2.3}$$

$$\det(\mathbf{C}_a^b) = 1 \tag{2.4}$$

$$\mathbf{C}_{a}^{c} = \mathbf{C}_{b}^{c} \mathbf{C}_{a}^{b} \tag{2.5}$$

$$\boldsymbol{v}^{b} = \mathbf{C}_{a}^{b} \boldsymbol{v}^{a} \tag{2.6}$$

2.1.3 四元数

四元数是一个四维矢量,由一个实数s和一个三维矢量v组合。坐标系a到坐标系b的旋转表示为,绕参考坐标系内的矢量v旋转s单位角度。

$$\mathbf{q}_{a}^{b} = \begin{bmatrix} s & \boldsymbol{v} \end{bmatrix}$$
$$= \begin{bmatrix} q_{0} & q_{1} & q_{2} & q_{3} \end{bmatrix}$$
(2.7)

四元数可以转换为方向余弦矩阵

$$\mathbf{C}_{a}^{b} = \begin{bmatrix} q_{0}^{2} + q_{1}^{2} - q_{2}^{2} - q_{3}^{2} & 2(q_{1}q_{2} - q_{0}q_{3}) & 2(q_{1}q_{3} + q_{0}q_{2}) \\ 2(q_{1}q_{2} + q_{0}q_{3}) & q_{0}^{2} - q_{1}^{2} + q_{2}^{2} - q_{3}^{2} & 2(q_{2}q_{3} - q_{0}q_{1}) \\ 2(q_{1}q_{3} - q_{0}q_{2}) & 2(q_{2}q_{3} + q_{0}q_{1}) & q_{0}^{2} - q_{1}^{2} - q_{2}^{2} + q_{3}^{2} \end{bmatrix}$$
(2.8)

同样,也可以由欧拉角计算四元数

$$\mathbf{q}_{a}^{b} = \begin{bmatrix} \cos\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \\ \sin\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} - \cos\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \\ \cos\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} + \sin\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} \\ \cos\frac{\phi}{2}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\psi}{2} - \sin\frac{\phi}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{\psi}{2} \end{bmatrix}$$
(2.9)

四元数的乘法运算可以表示为

$$\mathbf{p} \otimes \mathbf{q} = \begin{bmatrix} p_0 & -p_1 & -p_2 & -p_3 \\ p_1 & p_0 & -p_3 & p_2 \\ p_2 & p_3 & p_0 & -p_1 \\ p_3 & -p_2 & p_1 & p_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 & -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_1 & q_0 & q_3 & -q_2 \\ q_2 & -q_3 & q_0 & q_1 \\ q_3 & q_2 & -q_1 & q_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ p_1 \\ p_2 \\ p_3 \end{bmatrix}$$
(2.10)

四元数的表示方法虽然结构简洁,但是也较为抽象,其运算不具有直观性, 会使导航解算难以理解。四元数姿态更新的本质是单子样旋转矢量法,因而会引 入不可交换误差,仅适用于低动态载体;而对高动态运载体,会产生较大的姿态 漂移(秦永元,2014)。

2.1.4 等效旋转矢量

同四元数表示类似,通过绕一个定义在参考坐标系中的矢量**Φ**的单次转动来 表示两个坐标系的转动,旋转矢量的方向表示转动轴的方向,其模值表示转动角 度的大小,转动符合右手旋转定则,如图 2-1 所示。

四元数和等效旋转矢量有如下转换关系

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos \| 0.5\boldsymbol{\phi} \| \\ \frac{\sin \| 0.5\boldsymbol{\phi} \|}{\| 0.5\boldsymbol{\phi} \|} 0.5\boldsymbol{\phi} \end{bmatrix}$$
(2.11)

方向余弦矩阵也可以写成旋转矢量的函数

$$\mathbf{C}_{a}^{b} = \mathbf{I} + \frac{\sin \|\boldsymbol{\phi}\|}{\|\boldsymbol{\phi}\|} (\boldsymbol{\phi} \times) + \frac{1 - \cos \|\boldsymbol{\phi}\|}{\|\boldsymbol{\phi}\|^{2}} (\boldsymbol{\phi} \times)^{2}$$
(2.12)

通过采用双子样或者多子样旋转矢量法进行姿态解算,可以有效的补偿不可 交换误差,适用于角运动频繁的高动态载体的姿态更新。



图 2-1 旋转矢量

2.2 参考坐标系与转换

在惯性导航技术中涉及到许多的参考坐标系,往往某一个参考坐标系的矢量 需要频繁的转换到另一个坐标系。例如,IMU 得到的比力和角速度测量值是相 对载体坐标系b系而言的,需要将这些测量值转化为导航坐标系n系下的导航信 息。本节将讨论惯性导航算法中的参考坐标系及其相互转换关系。

2.2.1 惯性坐标系(*i*系)

惯性坐标系(Inertial Frame)是一个理想的坐标系,惯性坐标系所在的空间 没有加速度。实际中,一般采用的是地心惯性坐标*i*系,不是绝对的惯性坐标系。 *i*系的原点在地球球心,*z*_i轴沿地球自转轴指向北极,*x*_i轴指向平均春分点,*y*_i轴 位于赤道平面内并与*x*_i轴和*z*_i轴构成右手坐标系,如图 2-2 所示。



2.2.2 地心地固坐标系(e系)

地心地固坐标系(Earth-Centered Earth-Fixed Frame)也称作地球坐标e系, 它与地球固连。e系的坐标原点在地球中心, z_e 轴沿地球自转轴指向北极, x_e 轴 指向格林尼治平均子午线, y_e 轴与 x_e 轴和 z_e 轴构成右手坐标系。

e系下的地球自转角速度可以表示为

$$\boldsymbol{w}_{ie}^{e} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & w_{e} \end{bmatrix} \tag{2.13}$$

其中 w_e 为地球的自转角速度值,即 $w_e = 15^\circ/h$ 。

e系下的位置坐标可以用式(2.14)表示,由地理坐标纬度(φ)、经度(λ) 和椭球高(h)表示

$$\boldsymbol{r}_{e} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (R_{N} + h)\cos\varphi\cos\lambda \\ (R_{N} + h)\cos\varphi\sin\lambda \\ (R_{N}(1 - e^{2}) + h)\cos\varphi \end{bmatrix}$$
(2.14)

其中*R_M*, *R_N*分别为子午圈曲率半径和卯酉圈曲率半径,由地球参考椭球参数, 长半轴半径*a*,椭球扁率*e*计算得到,如下式

$$R_M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2\sin^2\varphi)^{3/2}}$$
(2.15)

$$R_N = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$$
(2.16)

2.2.3 导航坐标系(n系)

导航坐标系(Navigation Frame)是一个当地地理坐标系,本文选取北东地 (NED)坐标系作为导航坐标系*n*系。*n*系坐标原点位于导航对象中心,*z_n*轴垂 直参考椭球面向下,*x_n*轴指向地理北方向,*y_n*轴与*z_n*轴和*x_n*轴构成右手坐标系。

n系到e系的方向余弦矩阵 \mathbf{C}_n^e 可以由地理经纬度表示为

$$\mathbf{C}_{n}^{e} = \begin{bmatrix} -\sin\varphi\cos\lambda & -\sin\lambda & \cos\varphi\cos\lambda\\ \sin\varphi\sin\lambda & \cos\lambda & -\cos\varphi\sin\lambda\\ \cos\varphi & 0 & -\sin\varphi \end{bmatrix}$$
(2.17)

对应的四元数q^e表示为

$$\mathbf{q}_{n}^{e} = \begin{bmatrix} \cos(-\pi/4 - \varphi/2)\cos(\lambda/2) \\ -\sin(-\pi/4 - \varphi/2)\sin(\lambda/2) \\ \sin(-\pi/4 - \varphi/2)\cos(\lambda/2) \\ \cos(-\pi/4 - \varphi/2)\cos(\lambda/2) \end{bmatrix}$$
(2.18)

惯性导航算法中常用的n系下的角速度矢量有**w**ⁿ_{ie}和**w**ⁿ_{en},其表达形式如下

$$\boldsymbol{w}_{ie}^{n} = \mathbf{C}_{e}^{n} \boldsymbol{w}_{ie}^{e} = \begin{bmatrix} w_{e} \cos \varphi & 0 & -w_{e} \sin \varphi \end{bmatrix}^{T}$$
(2.19)

$$oldsymbol{w}_{en}^n = egin{bmatrix} v_E/(R_N+h) \ -v_N/(R_M+h) \ -v_E an arphi/(R_N+h) \end{bmatrix}$$
 (2.20)

其中, v_N和v_E分别为北向和东向速度, h为椭球高。



图 2-3 地心地固坐标系和导航坐标系

2.2.4 计算坐标系 (c系)

计算坐标系(Compute Frame)是由惯性导航解算输出位置确定的导航坐标系,记作c系。如图 2-4, c系与真n系之间的微小差异,可以用等效旋转矢量 $\delta\theta$ 表示

$$\boldsymbol{\delta\theta} = \begin{bmatrix} \delta\lambda\cos\varphi \\ -\delta\varphi \\ -\delta\lambda\sin\varphi \end{bmatrix}$$
(2.21)

其中, $\delta \varphi \, n \, \delta \lambda$ 分别表示地理纬度和经度的误差, $n \,$ 系到 $c \,$ 系的方向余弦矩阵写作

$$\mathbf{C}_n^c = \mathbf{I} - (\boldsymbol{\delta \theta} \times) \tag{2.22}$$

n系下北向和东向误差可以写作

$$\delta r_N = \delta \varphi(R_M + h) \tag{2.23}$$

$$\delta r_E = \delta \lambda (R_N + h) \cos \varphi \tag{2.24}$$

将式(2.23)和式(2.24)带入式(2.21)可得

$$\boldsymbol{\delta\theta} = \begin{bmatrix} \delta r_E / (R_N + h) \\ -\delta r_N / (R_M + h) \\ -\delta r_E \tan \varphi / (R_N + h) \end{bmatrix}$$
(2.25)



图 2-4 n 系、c 系和p 系的相对关系

2.2.5 平台坐标系 (p系)

惯性导航解算出来的载体姿态所对应的导航坐标系,与真n系存在着一定的 偏差,为了更好的分析惯性导航系统的姿态误差,把这个带误差的导航坐标系叫 作平台坐标系(Platform Frame),记作p系。因此计算出来的姿态方向余弦 \hat{C}_b^n (\hat{a} 表示计算量)和**C**^{*}是等价的

$$\hat{\mathbf{C}}_b^n = \mathbf{C}_b^p = \mathbf{C}_n^p \mathbf{C}_b^n \tag{2.26}$$

如图 2-4, p系和c系之间的姿态差异称为 ψ 角,对于微小的姿态误差,有

$$\mathbf{C}_{c}^{p} = \boldsymbol{I} - (\boldsymbol{\psi} \times) \tag{2.27}$$

p系和真n系之间的姿态差异称为 ϕ 角,有如下关系

$$\mathbf{C}_{n}^{p} = \mathbf{I} - (\boldsymbol{\phi} \times) \tag{2.28}$$

$$\boldsymbol{\phi} = \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{\theta} \tag{2.29}$$

2.2.6 载体坐标系(b系)

载体坐标系(Body Frame)描述的是惯性传感器所在的坐标系,与惯导固连, 记作*b*系。*b*系的坐标原点位于惯导的测量中心,其三个轴与传感器输出轴对应, 本文采用前右下*b*系。惯导测量的加速度和角速度,都是*b*系的测量值。

2.2.7 车体坐标系(v系)

车体坐标系(Vehicle Frame)描述的是 IMU 运载体的运动,记作v系,其原 点位于运载体。对于轮式载体而言(如汽车和轮式机器人),v系一般采用前右 下坐标系,即 x_v 轴指向载体前方, y_v 轴指向载体右方, z_v 轴指向载体下方。IMU 安装在载体上,v系与b系并不完全平行,b系与v系之间由于安装产生的姿态差 异 \mathbf{C}_v^* 称为 IMU 的载体安装角。在使用非完整性约束和里程计辅助时,一般将v系 的坐标原点定义在安装了里程计的非转向车轮与地面的接触点。

2.3 捷联惯性导航算法

在捷联惯性导航系统中,惯性测量单元 IMU 与运动的载体固连,通过陀螺 仪和加速度计分别测量载体的角运动和线运动,对这些测量信息进行连续的数值 积分运算,进而求解出载体的位置、速度和姿态等导航参数。捷联惯性导航机械 编排算法由连续时间的微分方程推导而来,如下为连续时间的微分方程

$$\dot{\boldsymbol{v}}^n = \mathbf{C}_b^n \boldsymbol{f}^b + \boldsymbol{g}^n - (2\boldsymbol{w}_{ie}^n + \boldsymbol{w}_{en}^n) imes \boldsymbol{v}^n$$
(2.30)

$$\mathbf{C}_{n}^{e} = \mathbf{C}_{n}^{e}(\boldsymbol{w}_{en}^{n} \times)$$
(2.31)

$$\dot{h} = -v_D \tag{2.32}$$

$$\dot{\mathbf{C}}_{b}^{n} = \mathbf{C}_{b}^{n}(\boldsymbol{w}_{ab}^{b} \times) = \mathbf{C}_{b}^{n}(\boldsymbol{w}_{ib}^{b} \times) - (\boldsymbol{w}_{ia}^{n} \times)\mathbf{C}_{b}^{n}$$
(2.33)

2.3.1 IMU 输出及误差校正

对于高精度 IMU (如激光惯导),其内部采用模拟积分的形式进行精确的数字化,这些传感器系统往往输出的是增量型的数据,即角度增量 $\Delta \tilde{\theta}_{k}$ 和速度增量 $\Delta \tilde{v}_{f,k}^{b}$ 。但是低成本的 MEMS IMU,通常输出的是角速度 \tilde{w}_{k}^{b} 和比力 \tilde{f}^{b} 测量值。由于捷联惯导机械编排一般采用双子样算法,需要对速率型的测量值进行以下积分转化为增量型测量值

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k} = \int_{t_{k-1}}^{t_{k}} \tilde{\boldsymbol{w}}_{ib}^{b} dt \qquad (2.34)$$

$$\Delta \tilde{\boldsymbol{v}}_{f,k}^{b} = \int_{t_{k-1}}^{t_{k}} \tilde{\boldsymbol{f}}^{b} dt \qquad (2.35)$$

惯导的原始测量值带有多种误差,除了传感器噪声之外,还包括零偏、比例 因子和交轴耦合(严恭敏,2012)。对于 MEMS 惯导,陀螺仪和加速度计的测 量模型可以简写为

$$\tilde{\boldsymbol{w}}_{ib}^{b} = \boldsymbol{w}_{ib}^{b} + \boldsymbol{b}_{g} + \boldsymbol{s}_{g} \boldsymbol{w}_{ib}^{b} + \boldsymbol{n}_{g} \boldsymbol{w}_{ib}^{b} + \boldsymbol{\delta w}$$
(2.36)

$$\tilde{\boldsymbol{f}}^{b} = \boldsymbol{f}^{b} + \boldsymbol{b}_{a} + \boldsymbol{s}_{a}\boldsymbol{f}^{b} + \boldsymbol{n}_{a}\boldsymbol{f}^{b} + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{f}$$
(2.37)

其中**b**_g为陀螺零偏,**s**_g为陀螺比例因子矩阵,**n**_g陀螺交轴耦合矩阵;**b**_a为加表 零偏,**s**_a为加表比例因子矩阵,**n**_a加表交轴耦合矩阵。比例因子矩阵和交轴耦 合矩阵定义如下

$$\boldsymbol{s} = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 \\ 0 & 0 & s_z \end{bmatrix}$$
(2.38)
$$\boldsymbol{n} = \begin{bmatrix} 0 & n_{xy} & n_{xz} \\ n_{yx} & 0 & n_{yz} \\ n_{zx} & n_{zy} & 0 \end{bmatrix}$$
(2.39)

比例因子矩阵和交轴耦合矩阵可以合并成一个系数矩阵

$$\boldsymbol{sn} = \begin{bmatrix} s_x & n_{xy} & n_{xz} \\ n_{yx} & s_y & n_{yz} \\ n_{zx} & n_{zy} & s_z \end{bmatrix}$$
(2.40)

通过精密转台对 MEMS IMU 进行标定,可以有效的标定出 IMU 的常值零偏、 比例因子及交轴耦合系数(严恭敏,2012)。在进行惯性导航解算前,需要对传 感器的误差进行校正,否则将严重影响惯性导航的精度,由式(2.36)和(2.37),可 以通过如下对惯导进行校正

$$\Delta \boldsymbol{\theta}_{k} = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{s} \boldsymbol{n}_{g}^{0}]^{-1} \Big[\Delta \tilde{\boldsymbol{\theta}}_{k} - \boldsymbol{b}_{g}^{0} \Delta t_{k} \Big]$$
(2.41)

$$\Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b} = [\boldsymbol{I} + \boldsymbol{s} \boldsymbol{n}_{a}^{0}]^{-1} [\Delta \tilde{\boldsymbol{v}}_{f,k}^{b} - \boldsymbol{b}_{a}^{0} \Delta t_{k}]$$
(2.42)

其中 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$,上标'0'表示通过标定等测试方法得到的已知误差量。

2.3.2 速度更新

对*n*系下地速微分方程式(2.30)进行积分并离散化,可得式(2.43)的速度更新 方程(Shin, 2005)

$$\boldsymbol{v}_{k}^{n} = \boldsymbol{v}_{k-1}^{n} + \Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{n} + \Delta \boldsymbol{v}_{g/cor,k}^{n}$$
(2.43)

其中 \boldsymbol{v}_{k-1}^{n} 为上一时刻 t_{k-1} 的速度; $\Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{n}$ 为比力积分项,是由比力引起的速度增量; $\Delta \boldsymbol{v}_{g/cor,k}^{n}$ 为重力/哥式积分项,是由哥式加速度、向心加速度和重力加速度共同引起的速度增量。

采用双子样算法,比力积分项写作

$$\Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{n} = [\boldsymbol{I} - (0.5\boldsymbol{\zeta}_{k} \times)] \mathbf{C}_{b(k-1)}^{n(k-1)} \Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b(k-1)}$$
(2.44)

$$\boldsymbol{\zeta}_{k} = \left[\boldsymbol{w}_{ie}^{n} + \boldsymbol{w}_{en}^{n}\right]_{k-1/2} \Delta t_{k}$$
(2.45)

$$\Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b(k-1)} \approx \Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b} + \frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\theta}_{k} \times \Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b} + \frac{1}{12} (\Delta \boldsymbol{\theta}_{k-1} \times \Delta \boldsymbol{v}_{f,k}^{b} + \Delta \boldsymbol{\theta}_{k} \times \Delta \boldsymbol{v}_{f,k-1}^{b})$$

$$(2.46)$$

式(2.45)的旋转矢量 ζ_k 表示n系在相邻两个历元之间的等效旋转矢量; 'k-1/2'表示时间段[t_{k-1}, t_k]的中间时刻,由于中间时刻的位置和速度未更新,需要通过外推的方式计算等效旋转矢量 ζ_k ;式(2.46)中的第二项为旋转效应补偿项,第三项为划桨效应补偿项。

重力/哥式积分项的被积函数是时间的缓变量,可通过中间时刻*t_{k-1/2}*的值近 似代替

$$\Delta \boldsymbol{v}_{g/cor,k}^{n} = [\boldsymbol{g}_{n} - (2\boldsymbol{w}_{ie}^{n} + \boldsymbol{w}_{en}^{n}) \times \boldsymbol{v}^{n}]_{k-1/2} \Delta t_{k}$$
(2.47)

2.3.3 位置更新

四元数**q**^{*n*}^{*n*}包含表示位置的经纬度信息,通过四元数运算更新**q**^{*n*}^{*n*}即可完成经 纬度的位置更新,具体如下式

$$\mathbf{q}_{n(k)}^{e(k)} = \mathbf{q}_{e(k-1)}^{e(k)} \otimes \mathbf{q}_{n(k-1)}^{e(k-1)} \otimes \mathbf{q}_{n(k)}^{n(k-1)}$$

$$[2.48]$$

$$\mathbf{q}_{e(k-1)}^{e(k)} = \begin{bmatrix} \cos \| \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \boldsymbol{\xi}_k \| \\ -\frac{\sin \| \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \boldsymbol{\xi}_k \|}{\| \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \boldsymbol{\xi}_k \|} \mathbf{0} \cdot \mathbf{5} \boldsymbol{\xi}_k \end{bmatrix}$$
(2.49)

$$\mathbf{q}_{n(k)}^{n(k-1)} = \begin{bmatrix} \cos \| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_{k} \| \\ \frac{\sin \| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_{k} \|}{\| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_{k} \|} 0.5 \boldsymbol{\zeta}_{k} \end{bmatrix}$$
(2.50)

$$\boldsymbol{\xi}_{k} = \boldsymbol{w}_{ie}^{n} \Delta t_{k} \tag{2.51}$$

其中**\$**_k是e系在前后两个历元的等效旋转矢量;由于已经完成速度更新,可以通 过内插重新计算中间时刻的速度,重新计算n系等效旋转矢量**\$**_k。高程方向可以 通过速度积分进行位置更新,如下式

$$h_k = h_{k-1} - v_{D,k-1/2} \Delta t_k \tag{2.52}$$

2.3.4 姿态更新

使用姿态四元数方法对姿态进行更新,捷联惯性导航姿态更新算法表示为

$$\mathbf{q}_{b(k)}^{n(k)} = \mathbf{q}_{n(k-1)}^{n(k)} \otimes \mathbf{q}_{b(k-1)\otimes q}^{n(k-1)} \mathbf{q}_{b(k)}^{b(k-1)}$$
 (2.53)

上式中, b系旋转四元数为

$$\mathbf{q}_{b(k)}^{b(k-1)} = \begin{bmatrix} \cos \| \mathbf{0}.5 \boldsymbol{\phi}_k \| \\ \frac{\sin \| \mathbf{0}.5 \boldsymbol{\phi}_k \|}{\| \mathbf{0}.5 \boldsymbol{\phi}_k \|} \mathbf{0}.5 \boldsymbol{\phi}_k \end{bmatrix}$$
(2.54)

式中 ϕ_k 为b系等效旋转矢量,根据双子样假设

$$\boldsymbol{\phi}_{k} \approx \Delta \boldsymbol{\theta}_{k} + \frac{1}{12} \Delta \boldsymbol{\theta}_{k-1} \times \Delta \boldsymbol{\theta}_{k}$$
(2.55)

式中第二项为二阶圆锥误差补偿项。式(2.53)中的n系旋转四元数为

$$\mathbf{q}_{n(k-1)}^{n(k)} = \begin{bmatrix} \cos \| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_k \| \\ -\frac{\sin \| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_k \|}{\| 0.5 \boldsymbol{\zeta}_k \|} 0.5 \boldsymbol{\zeta}_k \end{bmatrix}$$
(2.56)

由于数值误差,计算得到的**q**^{*}会逐渐失去归一化的特性,因此完成姿态更新 后,需要对姿态四元数进行归一化处理,如下所示

$$e_q = \frac{1}{2} \left[\left(\mathbf{q}_b^n \right)^T \mathbf{q}_b^n - 1 \right]$$
(2.57)

$$\mathbf{q}_b^n = (1 - e_q) \mathbf{q}_b^n \tag{2.58}$$

对以上算法进行汇总整理,捷联惯导机械编排算法,包括速度更新、位置更 新和姿态更新,可以用图 2-5 表示。



图 2-5 捷联惯导机械编排算法框图

2.4 GNSS/INS 组合导航算法

MEMS IMU 系统误差较大,单纯的惯性导航是无法保障精度和有效性的。 GNSS 和 INS 具有良好的优势互补特性,GNSS/INS 组合系统能够大大提高定位 的连续性和稳定性。组合导航系统是一个非线性系统,一般采用 EKF(Extend Kalman Filter)进行数据融合。本节将介绍卡尔曼滤波的基本原理,建立 GNSS/INS 组合导航的卡尔曼滤波系统状态模型和 GNSS 量测模型。

2.4.1 卡尔曼滤波原理

卡尔曼滤波是一种最优估计算法,基于线性系统的状态方程和量测方程,根据系统误差统计特性和初始化参数等先验信息进行递推最优估计解算,离散线性系统状态方程和量测方程为

$$\boldsymbol{x}_{k} = \boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} \boldsymbol{x}_{k-1} + \boldsymbol{G}_{k-1} \boldsymbol{w}_{k-1}$$
(2.59)

$$\boldsymbol{z}_k = \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{x}_k + \boldsymbol{v}_k \tag{2.60}$$

$$\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1} = \exp\left(\boldsymbol{F}(t_{k-1})\Delta \boldsymbol{t}_k\right) \approx \mathbf{I} + \boldsymbol{F}(t_{k-1})\Delta \boldsymbol{t}_k$$
(2.61)

$$\boldsymbol{Q}_{k} = E[\boldsymbol{w}_{k}\boldsymbol{w}_{k}^{T}]$$

$$\approx \frac{1}{2} [\boldsymbol{\Phi}_{k}\boldsymbol{G}(t_{k})\boldsymbol{Q}(t_{k})\boldsymbol{G}^{T}(t_{k}) + \boldsymbol{G}(t_{k})\boldsymbol{Q}(t_{k})\boldsymbol{G}^{T}(t_{k})\boldsymbol{\Phi}_{k}^{T}]\Delta t_{k+1} \qquad (2.62)$$

式中, \boldsymbol{x}_k 为k 时刻的系统状态向量; $\boldsymbol{\Phi}_{k,k-1}$ 为k-1 时刻到k 时刻的状态转移矩阵, 由于时间间隔 $\Delta t_k = t_k - t_{k-1}$ 非常小,可采用式(2.61)进行数值近似求解; \boldsymbol{G}_k 为系统噪声驱动矩阵; \boldsymbol{w}_k 为系统噪声,其协方差阵为 \boldsymbol{Q}_k ; \boldsymbol{z}_k 为观测向量; \boldsymbol{H}_k 为 量测矩阵; \boldsymbol{v}_k 为量测噪声,其协方差阵为 \boldsymbol{R}_k 。

卡尔曼滤波器的实现分为三个部分,初始化、预测和量测更新(Shin,2005)。 系统状态向量及其协方差矩阵初始化为

$$\boldsymbol{x}_{0|0} = \boldsymbol{0}, \boldsymbol{P}_{0|0} = E[\boldsymbol{x}_{0|0} \boldsymbol{x}_{0|0}^{T}]$$
 (2.63)

预测阶段,又称为时间更新,系统状态向量及其协方差矩阵进行如下的预测

$$\boldsymbol{x}_{k|k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} \boldsymbol{x}_{k-1|k-1} \tag{2.64}$$

$$\boldsymbol{P}_{k|k-1} = \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1} \boldsymbol{P}_{k-1|k-1} \boldsymbol{\Phi}_{k|k-1}^{T} + \boldsymbol{Q}_{k-1}$$
(2.65)

接着是卡尔曼量测更新阶段,首先计算卡尔曼增益*K*_k,然后由预测阶段的参数 更新系统状态向量和协方差矩阵

$$\boldsymbol{K}_{k} = \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_{k}^{T} (\boldsymbol{H}_{k} \boldsymbol{P}_{k|k-1} \boldsymbol{H}_{k}^{T} + \boldsymbol{R}_{k})^{-1}$$
(2.66)

$$\boldsymbol{x}_{k|k} = \boldsymbol{x}_{k-1|k-1} + \boldsymbol{K}_k(\boldsymbol{z}_k - \boldsymbol{H}_k \boldsymbol{x}_{k|k-1})$$
(2.67)

$$\boldsymbol{P}_{k|k} = (\mathbf{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k) \boldsymbol{P}_{k|k-1} (\mathbf{I} - \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{H}_k)^T + \boldsymbol{K}_k \boldsymbol{R}_k \boldsymbol{K}_k^T$$
(2.68)

式中 $z_k - H_k x_{k|k-1}$ 为对量测的估计误差,又称为新息,新息对于系统状态稳定 和抗差具有重要作用。如图 2-6 给出了 GNSS/INS 组合导航中的预测和更新示意, IMU 进行频率较高的捷联惯导机械编排算法,并进行时间预测; GNSS 一般则只 有 1Hz,在 GNSS 有效时刻,进行量测更新,从而对系统状态进行估计,以修正 导航状态误差和 IMU 传感器误差。



2.4.2 系统误差状态模型

根据姿态误差建模的不同,GNSS/INS 组合导航系统误差状态传播模型,分为 \$\phi\$ 角误差模型和\$\phi\$ 角误差模型。本文采用\$\phi\$ 角误差模型对姿态误差进行建模,形式更简单。基于小失准角模型,以c 系为参考进行误差扰动分析得到如下系统状态向量

$$\boldsymbol{x} = [(\boldsymbol{\delta r}^{e})^{T} (\boldsymbol{\delta v}^{e})^{T} \boldsymbol{\psi}^{T} (\boldsymbol{\delta b}_{g})^{T} (\boldsymbol{\delta b}_{a})^{T}]^{T}$$
 (2.69)
系统状态向量 \boldsymbol{x} 为 15 维向量,分别表示位置误差、速度误差、姿态误差 $\boldsymbol{\psi}$ 角、
陀螺零偏误差及加表零偏误差。对于 MEMS IMU,不对其比例因子和交轴耦合
误差进行建模。陀螺零偏和加表零偏建模为一阶高斯马尔可夫过程,陀螺仪和加
表的系统噪声一般积分处理为随机游走噪声,分别为角度随机游走 (Angle
Random Walk,ARW)和速度随机游走(Velocity Random Walk,VRW)(El-Sheimy,
2007)。系统状态微分方程如下

$$\boldsymbol{\delta \dot{\boldsymbol{r}}}^{c} = -\boldsymbol{w}_{ec}^{c} \times \boldsymbol{\delta \boldsymbol{r}}^{c} + \boldsymbol{\delta \boldsymbol{v}}^{c}$$
(2.70)

$$\boldsymbol{\delta \dot{\boldsymbol{v}}}^{c} = \mathbf{C}_{b}^{p} \boldsymbol{\delta f}^{b} + \boldsymbol{f}^{c} \times \boldsymbol{\psi} + \boldsymbol{\delta g}^{c} - (2\boldsymbol{w}_{ie}^{c} + \boldsymbol{w}_{ec}^{c}) \boldsymbol{\delta v}^{c}$$
(2.71)

$$\dot{\boldsymbol{\psi}} = -\boldsymbol{w}_{ic}^c imes \boldsymbol{\psi} - \mathbf{C}_b^p \, \boldsymbol{\delta w}_{ib}^b$$
(2.72)

$$\boldsymbol{\delta \dot{b}}_{g} = -\frac{1}{\tau_{bg}} \boldsymbol{\delta b}_{g} + \boldsymbol{w}_{bg}$$
(2.73)

$$\boldsymbol{\delta b}_{a} = -\frac{1}{\tau_{ba}} \boldsymbol{\delta b}_{a} + \boldsymbol{w}_{ag}$$
(2.74)

$$\boldsymbol{\delta g}^{c} = \begin{bmatrix} \frac{-g\delta r_{N}}{R_{M} + h} & \frac{-g\delta r_{E}}{R_{N} + h} & \frac{2g\delta r_{D}}{\sqrt{R_{M}R_{N}} + h} \end{bmatrix}^{T}$$
(2.75)

式中g为当地重力; $\delta r^{c} = [\delta r_{N} \ \delta r_{E} \ \delta r_{D}]^{T}$ 为位置误差,分别表示北东地三个方向的位置误差;采用简化的 IMU 误差模型,只考虑零偏误差,有 $\delta w_{ib}^{b} = b_{g}$, $\delta f^{v} = b_{a}; w_{bg} \pi w_{ba}$ 为驱动噪声, $\tau_{bg} \pi \tau_{ba}$ 为相关时间,为一阶高斯马尔可夫过程的参数。

2.4.3 GNSS 量测模型

图 2-7 展示了基本的 GNSS/INS 组合导航系统框图, IMU 采集角速度及加速 度测量值,通过捷联惯性导航解算, 解算出 INS 的导航信息; GNSS 接收机接收 导航卫星信号,解码得到卫星原始观测值,通过 GNSS 定位算法,解算出 GNSS 天线处的位置和速度信息(谢刚, 2009);惯导系统通过补偿 GNSS 天线杆臂, 可以得到预测的 GNSS 天线处位置和速度,和 GNSS 量测的位置和速度作差, 输入卡尔曼滤波器,从而对系统状态误差向量进行估计,进而修正导航状态及 IMU 传感器误差。GNSS 位置和速度量测方程如下。

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{GNSS}^{n} = \hat{\boldsymbol{r}}_{IMU}^{n} + \boldsymbol{D}_{R}^{-1} \boldsymbol{C}_{b}^{n} \boldsymbol{l}_{GNSS}^{b}$$
(2.76)

$$\tilde{\boldsymbol{r}}_{GNSS}^{n} = \boldsymbol{r}_{GNSS}^{n} + \boldsymbol{e}_{r} \tag{2.77}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{r}} = \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{r}_{IMU}^{n} + (\mathbf{C}_{b}^{n} \boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} \times) \boldsymbol{\psi} - \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{r}}$$
(2.78)

$$\hat{\boldsymbol{v}}_{GNSS}^{n} = \hat{\boldsymbol{v}}_{IMU}^{n} - (\hat{\boldsymbol{w}}_{ie}^{e} \times + \hat{\boldsymbol{w}}_{en}^{n} \times) \hat{\boldsymbol{C}}_{b}^{n} \boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} - \hat{\boldsymbol{C}}_{b}^{n} (\boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} \times) \hat{\boldsymbol{w}}_{ib}^{b}$$
(2.79)

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{GNSS}^{n} = \boldsymbol{v}_{GNSS}^{n} + \boldsymbol{e}_{v} \tag{2.80}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{v}_{IMU}^{n} - (\boldsymbol{w}_{in}^{n} \times) (\boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} \times) \boldsymbol{\psi} - (\boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} \times \boldsymbol{w}_{ib}^{b}) \times \boldsymbol{\psi} \\ + \boldsymbol{C}_{b}^{n} (\boldsymbol{l}_{GNSS}^{b} \times) \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{w}_{ib}^{b} - \boldsymbol{e}_{\boldsymbol{v}}$$
(2.81)

式中, e_r 和 e_v 分别表示GNSS量测的位置误差和速度误差; l_{GNSS}^b 为b系下的GNSS 天线杆臂矢量,表示GNSS天线在以IMU测量中心为原点的b系下的位置矢量; 式中 \mathbf{D}_R^{-1} 为转换矩阵,其定义如式(2.82)。



2.5 视觉导航基础

2.5.1 相机模型

光学相机是视觉导航常用的传感器之一,相机主要由感光元器件和镜头两大 部分组成。相机成像模型分为很多种类,本文采用的是针孔相机模型,采用径向 畸变和切向畸变对光学镜头的畸变建模。

2.5.1.1 针孔相机模型

针孔相机模型简单的说就是小孔成像,远处的物体的光线通过针孔最后在像 平面成倒立的像。成像过程中,涉及到物方点、像点和投影中心,三者共线且满 足几何投影关系。如图 2-8 所示, *o*_c为投影中心,即相机光心,是相机坐标系*x*_c*y*_c*z*_c 的原点,相机坐标系(Camera Frame)简称为*c*系,其*z*_c沿光轴指向相机前方,*x*_c 轴向右,*y*_c向下。像素坐标系(Pixel Frame)*p*系垂直于光轴,相交于主点(*c*_x,*c*_y), *p*系即成像平面,其原点为成像左上角,像素坐标表示为(*u*,*v*)。世界坐标系 (World Frame) w系是一个真实物理空间的三维直角坐标系,其定义并无统一。



图 2-8 针孔相机透视投影模型

三维空间点 P 在相机坐标系 c 系的坐标(X,Y,Z),其在像平面的投影点 p(u,v),它是相机光心o_c与P的连线与像平面的交点,空间点P、投影点p以及 光心o_c三点共线。根据透视几何原理,针孔相机投影方程为

$$u = f_x \frac{X}{Z} + c_x \tag{2.83}$$

$$v = f_y \frac{Y}{Z} + c_y \tag{2.84}$$

采用齐次坐标的形式,定义相机内参矩阵K和像平面齐次坐标p

$$\boldsymbol{K} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$
(2.85)

$$\boldsymbol{p} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix}$$
(2.86)

则可以将式(2.83)和式(2.84)写作 p = KP,即

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$$
(2.87)

上式展开会发现w = Z,对齐次坐标p除以深度Z就可以得到像素坐标(u,v)。

2.5.1.2 镜头畸变

相机镜头一般为光学镜片组,由于生产制造工艺的问题,镜头都存在畸变。 畸变模型也有很多种类,本文只考虑径向畸变和切向畸变两种(Fryer, 1986; Duane, 1971)。径向畸变是由于镜头的形状而产生的,光心处没有畸变,从光 心到镜头的边缘,畸变越来越大。切向畸变则是在相机镜头装配过程中,镜头不 完全平行与成像平面而产生的。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$$
(2.88)

上式为径向畸变校正方程, (x_c, y_c) 为校正径向畸变后的坐标, k_1, k_2, k_3 为径向畸变系数, 半径r满足 $r^2 = x^2 + y^2$ 。一般情况下, 使用两参数 k_1, k_2 进行校正即可, 只有当径向畸变较为严重时才使用三参数。

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 2p_1 xy + p_2 (r^2 + 2x^2) \\ p_1 (r^2 + 2y^2) + 2p_2 xy \end{bmatrix}$$
(2.89)

式(2.89)为切向畸变校正方程,其中参数 p1, p2 为切向畸变参数。

2.5.2 相机标定

由针孔相机模型式(2.87),要建立起图像与真实三维空间的关系,需要获取 相机内参矩阵**K**。与此同时,由于镜头畸变,实际的像素坐标不准确,还需要 获取相机的畸变参数*k*₁,*k*₂(,*k*₃),*p*₁,*p*₂,才能够建立准确的转换关系。相机标定就 是求解相机内参矩阵和畸变参数的过程。





本文采用张正友(Zhang, 1999)标定法对相机进行标定,该方法从多个不同的方向对标定板进行拍摄,通过标定板上的特征点与像素平面坐标的对应关系,解算出标定参数。标定板一般采用棋盘格标定板,如图 2-9a 为棋盘格标定板,本文采用9x10棋盘格以适应工业相机镜头较大的视场角。图 2-9b 给出了相机标定每张图像的平均重投影误差分布,30 张图像的平均重投影误差只有 0.193 个像素,表明标定效果较好。

2.6 本章小结

本章围绕 GNSS/INS/视觉融合定位技术基础展开,从导航参数的姿态讲起,
介绍了欧拉角、方向余弦矩阵、四元数和等效旋转矢量这四种姿态表达式及其相 互转换关系。然后,对捷联惯性导航算法中的参考坐标系进行了介绍,给出了*i*系、 *e*系、*n*系、*b*系等参考坐标系的定义及其相互关系。利用姿态表达式和参考坐 标系这两个工具,从连续时间的微分方程出发,推导出离散时间的捷联惯性导航 算法。接着,对 GNSS/INS 组合导航系统进行 EKF 建模,建立了系统误差状态 模型和 GNSS 量测模型。最后,对视觉传感器相机进行了介绍,包括相机模型和 相机标定方法。在后续的章节中,将以此为基础,分别从轮式机器人载体信息辅 助的实时组合定位技术和基于视觉路标辅助的多源融合定位技术两个方面展开 研究。

第三章 轮式机器人实时组合定位技术

本章将围绕轮式机器人实时组合定位技术展开,首先充分利用轮式机器人载 体平台特征及信息,在经典 GNSS/INS 组合导航模型基础上,建立零速修正、零 角速率修正、非完整性约束、里程计辅助和 GNSS 双天线航向辅助量测模型。然 后,设计适应于实时性的高精度时间同步算法,并对 GNSS 延时更新算法进行研 究。最后,对轮式机器人组合定位技术和初始对准技术,进行实测验证,分析评 估初始对准技术和轮式机器人信息辅助的量测效果。

3.1 轮式机器人信息量测模型

本文设计的轮式机器人平台,其载体由六个独立全转向轮驱动,运动灵活, 不存在四轮差速机器人的"干磨"转弯现象。因而本文的轮式机器人天然满足非 完整性约束,加上两路增量式编码器构成的里程计,配合易用的零速修正,以及 GNSS 双天线航向辅助,能够显著提升轮式机器人在综合复杂场景下定位的精度 和连续性。本节将介绍轮式机器人采用的几种约束和辅助信息,并建立相应的量 测模型。

3.1.1 零速修正

惯性导航的误差随时间逐渐发散,受载体运动状态影响较小。但是,载体静止不动时,其速度为零是一个事实,如果能够检测到静止条件,就可以构建一个零速度观测,从而约束惯导的发散,称为零速修正(Zero Velocity Update, ZUPT)。轮式机器人载体使用电机驱动,静止停车时不存在机械抖动,因而具有良好的零速条件。轮式机器人零速检测是一个经典的检测问题(Skog, 2010),即零速检测的结果只有 H_0 和 H_1 两种假设。

$$H_0$$
: IMU is moving
 H_1 : IMU is stationary (3.1)

经典的零速检测通常采用评估 IMU 原始数据的噪声的方式,如图 3-1a,通 过对 1s 内的加表数据求标准偏差,设置合适的门限,得到静止与运动的判定, 可以明显看出 27880s 时刻前为静止状态。轮式机器人载体由于其轮式结构,也 可以通过里程计进行零速检测,如图 3-1b,里程计由于其精度较高,检测概率较 高,虚警率和漏检率都较低。零速修正的基本原理是假定载体速度为零,把零速 度作为速度观测值,零速修正的观测方程为

$$\hat{\boldsymbol{v}}_{IMU}^n = \boldsymbol{v}_{IMU}^n + \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{v}_{IMU}^n \tag{3.2}$$

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{IMU}^n = \boldsymbol{e}_v \tag{3.3}$$

$$\boldsymbol{z}_{v} = \hat{\boldsymbol{v}}_{IMU}^{n} - \tilde{\boldsymbol{v}}_{IMU}^{n}$$
$$= \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{v}_{IMU}^{n} - \boldsymbol{e}_{v}$$
(3.4)

其中*e*。表示零速观测噪声,由于轮式机器人载体速度较慢,观测标准差可以取 0.05*m*/*s*左右,但不宜过小,否则容易导致卡尔曼滤波器的不稳定。零速修正 结构简单,对速度漂移具有很好的抑制作用。与此同时,零速条件下,还可以对 GNSS 进行质量控制,对于质量较差的定位结果要么直接舍弃,要么降权使用, 由于零速修正的约束,并不会导致较大的位置漂移。



图 3-1 零速检测

3.1.2 零角速率修正

零速条件下,通过使用零速修正 ZUPT 可以有效的约束横滚和俯仰角的发散, 但是对于低成本 MEMS IMU,其航向角可观测性较差,仍然会逐渐发散。航向 角主要受航向陀螺影响,即z轴陀螺,考虑到零速条件下,载体速度为零,牵连 角速度也为零,对于低成本 MEMS IMU,可以忽略地球自转,把零角速度作为 观测值,称为零角速率修正(Zero Angular Rate Update, ZARU)。

$$\hat{\boldsymbol{b}}_{g} = \boldsymbol{w}_{ib}^{b} + \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{b}_{g} \tag{3.5}$$

$$\boldsymbol{b}_g = \boldsymbol{e}_{b_g} \tag{3.6}$$

$$\boldsymbol{z}_{\boldsymbol{b}_{g}} = \hat{\boldsymbol{b}}_{g} - \tilde{\boldsymbol{b}}_{g}$$

$$= \boldsymbol{\delta}\boldsymbol{b}_{g} - \boldsymbol{e}_{g} \qquad (3.7)$$

其中**w**^b_b为补偿过初始零偏的陀螺角速度;**e**_b为零角速度观测噪声,根据 MEMS 惯导器件的噪声水平设置观测值标准差,可以取0.1*deg/s*;上式中给出了三维 观测,实际上可以仅仅对航向陀螺建立观测,从而减小计算量。采用零角速率修 正可以有效的估计航向陀螺零偏,约束航向的发散。

3.1.3 非完整性约束

非完整性约束(Non-Holonomic Constraints, NHC)(XIAOJI, 2007)是针 对轮式载体的速度约束, 其基本原理是假定轮式载体只存在前向速度, 其侧向速 度和垂向速度为零。NHC 约束可以构建两维度的v系(车体坐标系)速度观测, 配合里程计的v系前向速度观测,构成三维v系速度观测。

$$\hat{\boldsymbol{v}}_{wheel}^{v} = \mathbf{C}_{b}^{v} \mathbf{C}_{n}^{b} \hat{\boldsymbol{v}}_{IMU}^{n} + \mathbf{C}_{b}^{v} (\hat{\boldsymbol{w}}_{nb}^{b} \times) \boldsymbol{l}_{wheel}^{b}$$
(3.8)

$$\tilde{\boldsymbol{v}}_{wheel}^{v} = \boldsymbol{v}_{wheel}^{v} + \boldsymbol{e}_{v} \tag{3.9}$$

$$\boldsymbol{v}_{wheel}^{v} = \begin{bmatrix} v_{odo}^{v} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$
(3.10)

$$\boldsymbol{z}_{v} = \hat{\boldsymbol{v}}_{wheel}^{v} - \tilde{\boldsymbol{v}}_{wheel}^{v}$$

$$= \boldsymbol{C}_{n}^{b} \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{v}_{IMU}^{n} - \boldsymbol{C}_{b}^{v} \boldsymbol{C}_{n}^{b} (\boldsymbol{v}_{IMU}^{n} \times) \boldsymbol{\psi}$$

$$- \boldsymbol{C}_{b}^{v} (\boldsymbol{l}_{wheel}^{b} \times) \boldsymbol{\delta} \boldsymbol{b}_{g} - \boldsymbol{e}_{v}$$
(3.11)

式中**v**^odo</sub>为里程计速度,表示里程计在车体坐标系下的前向速度;**C**^b_b为b系和v系之间的微小姿态偏差,称为安装角,可以通过后处理估计得到;**l**^b_{wheel}为NHC约束和里程计辅助量测中心在b系下的杆臂,称为里程计杆臂;**e**_v为速度量测噪声,其标准差可以根据里程计的精度设定,对于轮式机器人设为0.05*m/s*。NHC约束基于侧向速度和垂向速度为零这两个假设,对于轮式机器人而言,意味着不能发生侧滑和上下颠簸,否则会影响组合定位精度。NHC约束对航向具有很好的约束作用,因此能够有效改善GNSS中断期间的定位精度,但也意味着对安装角估计的精度要求很高。里程计速度观测由高精度编码器得到,精度较高,能够提供很好的前向速度辅助。NHC约束和里程计共同辅助,对提高轮式机器人在复杂场景下的导航定位性能具有重要作用。

3.1.4 里程计辅助

里程计辅助是*v*系下的前向速度观测,其观测方程如式(3.11)所示。轮式机器 人采用的里程计实际上为两路增量式编码器,其原始测量值为脉冲计数。机器人 的车轮每转过一圈,产生的脉冲计数为*P*,称为编码器的分辨率(Pulse Per Revolution, PPR)。里程计与 IMU 同频 50Hz 采样,以提高精度,两个历元之 间的脉冲计数值为*c*,则可以通过下式计算速度值

$$\tilde{v}_{odo}^v = \frac{c\pi D}{P\,\Delta t} \tag{3.12}$$

式中*D*为车轮直径; Δ*t*为采样间隔。从(3.12)式可以看出,里程计的速度测量值, 实际上是这段时间内的平均速度。

里程计的速度值与车轮直径成正比,因而加工测量、温度变化等导致的车轮 直径变化或者不准确,会直接影响里程计的速度观测。因此,需要考虑里程计的 比例因子误差,本文把里程计比例因子误差δsodo建模为随机游走,通过状态扩维, 对其进行在线估计和校正,如下式。

$$\tilde{v}_{odo}^{v} = (1 + \delta s_{odo}) v_{odo}^{v} + e_{v}$$
 (3.13)

$$\delta \dot{s}_{odo} = \eta_{odo} \tag{3.14}$$

(3.15)

式中*ŋ_{odo}*为里程计比例因子驱动白噪声,其标准差可以根据里程计的分辨率进行 设定。



本文采用的六轮机器人结构如图 3-2 所示,通过前后四个转向轮控制机器人的转向,中间两轮为非转向轮,起载体平衡作用。轮W3和轮W4分别接入增量 式编码器,满足 NHC 约束的量测中心为,中间两轮中心并且贴近地面测量点。 取两轮的平均速度作为轮式机器人的里程计观测速度,如图 3-3。里程计速度量 化噪声较大,一般通过进一步求平均降采样,得到更平滑的速度再进行量测更新。

> Odometry Velocity 1.8 W3 W4 1.7 Velocity / m/s 1.1 1.2 14 1.3 1.2 28080 28090 28100 28110 28120 28130 Time / s

 $v_{wheel}^v = (v_{W_3} + v_{W_4})/2$

图 3-3 左右里程计速度及其平均速度

里程计辅助和非完整性约束对轮式机器人的漂移和打滑及其敏感,漂移和打 滑破坏了里程计辅助和非完整性约束的使用前提假设,将严重影响导航定位的精 度。本文采用的是六轮机器人,因为相对而言摩擦阻力较大,与此同时,机器人 的速度仅 1.5m/s,加速度也较小,因为发生漂移和打滑的概率极低,有效的保障 了里程计辅助和非完整性约束的有效性,从而保障了导航定位的精度。

3.1.5 双天线航向辅助

低成本 MEMS 惯导器件噪声水平较大,无法通过静基座感应地球自转完成

航向的初始对准。GNSS 不仅能够提供高精度的 RTK 定位测速量测,同时采用 双天线的方式,还能够实现姿态的测量。采用双天线 GNSS 板卡,能够实时提供 高精度的姿态,不仅可以有效的辅助惯导完成初始对准,还能够加速组合系统误 差收敛,提高组合导航的精度。在轮式机器人的前后分别安装 GNSS 天线,天线 之间的基线长度为0.69m,能够得到高精度的绝对航向角。由于惯导安装偏差, 双天线安装偏差以及天线相位中心偏差等原因,GNSS 双天线航向和惯导系统并 不对应。本文把双天线测得的航向称为 \tilde{C}_a^n ,坐标系a系称为双天线坐标系, C_b^c 为 载体坐标系和双天线坐标系之间的安装角。双天线航向辅助的直接观测对象即为 航向角,捷联惯性导航机械编排预测的航向角为

$$\hat{\mathbf{C}}_{a}^{n} = \hat{\mathbf{C}}_{b}^{n} (\mathbf{C}_{b}^{a})^{T} = (\mathbf{I} - (\boldsymbol{\phi} \times)) \mathbf{C}_{b}^{n} (\mathbf{C}_{b}^{a})^{T}$$
(3.16)

设 \hat{a}_{ij} , b_{ij} 和 c_{ij} 分别表示 \hat{C}_a^n , \hat{C}_b^a 和 \hat{C}_b^n 第ij ($i,j \in [1,3]$)个元素。由方向余弦 矩阵计算欧拉角

$$\hat{\psi} = \tan^{-1}(\hat{a}_{21}/\hat{a}_{11})$$
 (3.17)

其中â11和â21表达如下

$$\hat{a}_{11} = b_{11} (c_{11} + c_{21}\phi_z - c_{31}\phi_y) + b_{12} (c_{12} + c_{22}\phi_z - c_{32}\phi_y) + b_{13} (c_{13} + c_{23}\phi_z - c_{33}\phi_y)$$
(3.18)

$$\hat{a}_{21} = b_{11} (c_{21} + c_{31}\phi_x - c_{11}\phi_z) + b_{12} (c_{22} + c_{32}\phi_x - c_{12}\phi_z) + b_{13} (c_{23} + c_{33}\phi_x - c_{13}\phi_z)$$
(3.19)

因此,双天线航向辅助的量测方程可以写作

$$z_{\psi} = \left[\frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \phi_x} \quad \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \phi_y} \quad \frac{\partial \hat{\psi}}{\partial \phi_z} \right] \boldsymbol{\phi} + e_{\psi}$$
(3.20)

其中e_v为航向测量噪声,量测矩阵表示为

$$\frac{\partial \psi}{\partial \phi_x} = \frac{\hat{a}_{11} \left(b_{11} \hat{c}_{31} + b_{12} \hat{c}_{32} + b_{13} \hat{c}_{33} \right)}{\hat{a}_{11}^2 + \hat{a}_{21}^2}$$
(3.21)

$$\frac{\partial \dot{\psi}}{\partial \phi_y} = \frac{\hat{a}_{21}(b_{11}\hat{c}_{31} + b_{12}\hat{c}_{32} + b_{13}\hat{c}_{33})}{\hat{a}_{11}^2 + \hat{a}_{21}^2}$$
(3.22)

$$\frac{\partial \psi}{\partial \phi_z} = -\frac{\hat{a}_{11}(b_{11}\hat{c}_{11} + b_{12}\hat{c}_{12} + b_{13}\hat{c}_{13})}{\hat{a}_{11}^2 + \hat{a}_{21}^2} \\
-\frac{\hat{a}_{21}(b_{11}\hat{c}_{21} + b_{12}\hat{c}_{22} + b_{13}\hat{c}_{33})}{\hat{a}_{11}^2 + \hat{a}_{21}^2}$$
(3.23)

3.2 组合定位实时性优化技术

INS-Probe 是本文研制的一款低成本、低功耗、高精度 MEMS 组合定位系统,如图 3-4,内置高精度 GNSS 接收机模块和 MEMS 惯导,可以输出 50Hz 的实时高精度三维位置、速度、姿态信息,同时支持传感器 50Hz 原始数据输出和后处理解算。INS-Probe 的软硬件系统将在第五章进行介绍。



图 3-4 INS-Probe 实物图

为了保证组合定位模块 INS-Probe 实时定位的精度,研究实现了满足实时性 需求的算法,包括高精度的时间同步算法和 GNSS 延时更新状态转移算法。本节 将介绍 INS-Probe 采用的这两种实时性优化算法,从算法层面解决硬件的局限, 以保证实时定位精度。

3.2.1 高精度时间同步

高精度稳定的时间系统是影响多源融合定位精度的重要因素之一,对于实时系统尤为重要。本文基于有源晶振和 GNSS 定位模块时间脉冲信号,为 INS-Probe 设计并实现了一个微秒级的高精度时间系统,以满足多源传感器系统之间的精准时间同步需求。

有源晶振是相对于无源晶振而言的,区别在于有源晶振需要供电,其内部集成了振荡电路和石英晶体,上电稳定之后就能够产生时钟信号;而无源晶振本身就只是一个石英晶振,需要接入特殊的振荡电路,才能够产生时钟信号。有源晶振无论是从短期稳定度还是温度稳定度都较好,因此本文采用 EPSON 有源晶振 SG-310SCF 作为 INS-Probe 的基本时钟源,频率稳定度为±50PPM。晶振工作稳定之后,其频率稳定度极高,在一定时间段内时钟频率变化极小,且不存在随机扰动误差。但是,晶振产生的时钟不是绝对准确的,不仅存在偏差,而且极易受到温度变化的影响而出现温漂,因而存在时间累积误差。

GNSS 导航卫星一般安装有多台极高精度的原子钟系统,同时其地面站还能够进行实时监控并校准(谢刚,2009)。GNSS 接收机通过相关运算实现本地时间和卫星时间同步,再通过接收机内部的时钟校准算法,可以产生亚纳秒级精度

的绝对时钟信号。利用 GNSS 接收机输出的时钟脉冲信号对外部设备进行授时服务,1Hz 的时间脉冲信号 1PPS 最为常用,1PPS 信号的上升沿与整秒时刻对齐。 1PPS 信号具有极高的精度,以 NEO-M8P 定位模块为例,其 1PPS 信号的精度优于 30ns(u-blox,2017)。1PPS 信号提供的是绝对同步的时间,只存在极小的随机误差,不存在累积误差。但是 1PPS 信号依赖于 GNSS 接收机模块,一旦卫星信号失锁,将不能提供授时服务。

综合考虑晶振和 1PPS 信号的优缺点,本文设计了一种利用 1PPS 信号对晶振 误差进行补偿的方法,可以为多源传感器系统提供一个精准的本地时间。微秒级 的时间精度满足传感器的时间同步精度需求,而 GNSS 定位模块 1PPS 信号时间 精度优于 1us,因此可以认为 GNSS 定位模块提供的 1PPS 信号是绝对准确的。 系统本地时钟由一个 1MHz 的 32 位定时器提供,通过统计连续两个 1PPS 信号 之间的计数值,就可以计算出晶振的漂移,本文假定这种漂移误差是一个线性比 例误差。如图 3-4, T_1 时刻和 T_3 时刻分别对应两个连续的 1PPS 信号采样时刻, 分别有本地时钟计数 C_1 和 C_2 。那么就可以通过式(3.24)计算得到晶振误差比例系 数 δs ,这是一个数值约为 1 的系数,数值较小,数值计算可以充分保障精度。 对于任意一个时刻 T_k ,通过补偿晶振误差,可以得到其与上一个整秒时刻 T_1 的 时间间隔 Δt_k ,进而得到 T_k 的时间。

$$\Delta t_k = \delta s (C_k - C_1) \times 10^{-6}$$
(3.26)

$$T_k = T_1 + \Delta t_k \tag{3.27}$$

为了实现传感器的精准时间同步,往往采用的是硬件同步的形式,即通过硬件触发的方式。以IMU采集为例,如图 3-5 中,每一个 IMU 数据采集完成, IMU

芯片触发一个脉冲,对应 IMU 采集完成时刻。 T_2 时刻对应一个 IMU 数据,则 IMU 数据的时间标可通过式(3.26)和式(3.27)计算得到。由此实现了 IMU 数据和 GNSS 数据在时间上的精确同步。



a 未补偿晶振频率漂移

b 补偿晶振频率漂移

80

图 3-6 是否补偿晶振频率漂移的 IMU 数据时间间隔

如图 3-6,给出了晶振频率漂移对 IMU 时间精度的影响。补偿 INS-Probe 的 晶振漂移之后, IMU 采样间隔波动仅为±2us, 呈现随机状态; 反之, 每秒产生 的漂移则有10us,表现出 INS-Probe 晶振漂移值。如果机器人进入室内等无 GNSS 的场景, 1PPS 信号无效, 那么时间误差将迅速累积, 从而大大影响导航定位的 精度。

3.2.2 GNSS 延时更新算法

GNSS 接收机从卫星信号中解出原始测量值,然后进行定位解算,最后还需 要通过通讯接口发送给终端,整个过程消耗的时间少则几十毫秒,多则上百毫秒。 简而言之, MCU 获取到整秒时刻的定位结果时, 存在较大且不确定时间延时。 如果直接进行卡尔曼组合更新,会明显降低系统的精度。





本文采用状态转移算法对 GNSS 延时进行有效处理,即在完成滞后的 GNSS 量测更新后,将误差状态向量一步转移到当前时刻,并进行状态误差反馈。前人 研究工作表明,没有 GNSS 延迟的组合导航处理和 GNSS 有 0.9s 人为延迟但采 用状态转移算法的组合导航处理具有一致的精度(章红平,2016)。INS-Probe 具有强大的浮点计算能力,确保能够在一个 IMU 间隔内完成捷联惯性导航解算,

卡尔曼预测,卡尔曼量测更新,进行状态转移并反馈系统状态误差,有效的保障 了导航定位的精度和实时性。

状态转移过程可以由累积状态转移矩阵和状态噪声阵得到(章红平,2016), 如图 3-7,GNSS 采样时刻为 t_k 时刻,在GNSS 数据接收到之前,缓存 t_k 的状态, 在 t_{k+n} 时刻进行卡尔曼组合更新,把 t_k 时刻的状态向量即状态协方差估计量转移 到 t_{k+n} 时刻,进而对状态误差进行反馈,更新导航状态以及IMU误差。在状态 转移区间,通过式(3.28)累积状态转移矩阵 Φ ,通过式(3.29)累积系统状态噪声, 展开式(3.29),如式(3.30)所示。组合更新之后的状态量及其协方差矩阵分别为 $x_{k|k}$ 和 $P_{k|k}$,通过式(3.31)和(3.32),即可将状态量及其协方差矩阵转移到当前 t_{k+n} 时 刻,即 $\hat{x}_{k+n|k}$ 和 $\hat{P}_{k+n|k}$,再进行误差反馈,以修正导航状态误差及IMU 传感器误 差。

$$\boldsymbol{\Phi}_{k+n|k} = \prod_{m=k+1}^{k+n} \boldsymbol{\Phi}_{m|m-1}$$
(3.28)

$$\boldsymbol{M}_{k+n|k+1} = \sum_{m=k+1}^{k+n} \boldsymbol{\Phi}_{k+n|m} \boldsymbol{Q}_{m-1} \boldsymbol{\Phi}_{k+n|m}^{T}$$
(3.29)

$$\boldsymbol{M}_{m|k+1} = \begin{cases} \boldsymbol{Q}_{m-1} + \boldsymbol{\Phi}_{m|m-1} \boldsymbol{M}_{m-1|k+1} \boldsymbol{\Phi}_{m|m-1}^{T} & m \in [k+2,k+n] \\ \boldsymbol{Q}_{k} & m = k+1 \end{cases}$$
(3.30)

$$\hat{\boldsymbol{x}}_{k+n|k} = \boldsymbol{\Phi}_{k+n|k} \boldsymbol{x}_{k|k} \tag{3.31}$$

$$\vec{\boldsymbol{P}}_{k+n|k} = \boldsymbol{\Phi}_{k+n|k} \boldsymbol{P}_{k|k} \boldsymbol{\Phi}_{k+n|k}^{T} + \boldsymbol{M}_{k+n|k+1}$$
(3.32)

3.3 轮式机器人组合定位算法测试验证



图 3-8 轮式机器人组合定位算法测试轨迹图

本章提出的轮式机器人实时组合定位技术,都基于实时组合定位模块 INS-Probe实现。本节将就轮式机器人组合定位算法进行测试分析,包括初始对 准和轮式机器人辅助信息量测。本文采用仿真 GNSS 中断(Niu, 2006)的方式, 以评估辅助信息的量测效果,并给出定量的指标参数。测试于武汉大学信息学部 友谊广场进行,为开阔天空场景,GNSS 卫星观测质量良好,如图 3-8 为测试轨 迹,测试的具体参数如下表 3-1。

类型	对象	描述
参考系统	耐威科技 POS620	GNSS: 天宝双频板卡 IMU: 光纤陀螺+石英加速度计
待测对象	INS-Probe	GNSS:外接 NovAtel 板卡 OEM-718D IMU:板载 MEMS 惯导 ADIS16465
测试载体	自研轮式机器人平台	六轮全转向,双里程计
测试场地	武汉大学信息学部 友谊广场	开阔天空,GNSS 观测良好
RTK 服务	千寻位置网络 RTK	使用 INS-Probe 实时 RTK 定位测姿数据
处理方式	后处理解算	进行仿真 GNSS 中断评估算法性能

表 3-1 算法测试数据描述

3.3.1 零速修正测试

零速测试需要轮式机器人保持静止状态,为了更好的表现零速修正算法的效果,需要首先进行动态测试,待 IMU 误差收敛之后再进行停车测试,并且在静止时段中断 GNSS 量测更新,以表现惯导的原始特性。如图 3-9 和 3-10,静止时段为 550005s~550045s,静止时长为 40s。





静止期间,没有 GNSS 量测,速度误差迅速发散,如图 3-9a,由原本的 0.025m/s 增长到 0.1m/s,并且还有迅速增大的趋势,速度误差的增大意味着位置误差更加 显著的变大。采用零速修正量测更新,如图 3-9b,速度误差没有出现明显的增长,在一个有限的区域内波动。

航向误差发散水平与航向陀螺误差的收敛水平相关,如图 3-10a,停车期间, 航向误差出现较大的漂移,变化约 0.05 度。使用零速修正和零角速率修正量测, 航向误差变化减小到约 0.02 度,如图 3-10b,航向误差发散速度明显变缓,表明 零角速率修正量测对约束航向角发散具有较好的作用。



图 3-10 是否使用零角速率修正航向误差比较

无论是速度误差还是航向误差,其变化增长趋势和 IMU 误差收敛的精度有关。但是,零速修正和零角速率修正,对改善组合定位系统性能提升是有显著作用的,与此同时,通过零速检测判断的静止条件,对 GNSS 质量控制也具有重要参考作用。



3.3.2 非完整性约束及里程计辅助测试

图 3-11 无辅助条件下的位置误差漂移

NHC 约束和里程计辅助能够大大提高组合导航系统在 GNSS 失效时的导航 定位性能,本节将采用仿真 GNSS 中断的方式以评估两者的量测效果。组合导航 系统完成初始对准,不使用其他任何外部辅助或约束,待误差收敛之后,每隔 90秒,进行 30秒的 GNSS 仿真中断,共9处中断。定位误差如图 3-11, GNSS 中断期间,北东地三个方向的误差都逐渐变大,北东两个方向的误差更大,地向 误差变化不大,这与机器人的运动相关。

分别使用 NHC 约束、使用 NHC 约束和里程计辅助,进行组合导航解算,位 置漂移如图 3-12。如图 3-12a,NHC 约束基于没有横向和垂向速度的假设,其垂 向误差基本不明显发散,北东两个方向的误差跟机器人的运动方向相关,每处 GNSS 中断期间,基本只有北向或者东向某一个方向漂移较大,最大误差小于 0.8m,由 NHC 约束的假设,误差漂移较大的方向即为机器人前进方向。NHC 约 束配合上里程计前向速度辅助,如图 3-12b,三维位置误差漂移都显著变小,最 大单方向误差约为 0.3m,即 30s 的 GNSS 中断,组合系统仍然能够维持分米级 的定位精度。





a 使用 NHC 约束 b 使用 NHC 约束和里程计辅助 图 3-12 使用 NHC 约束和里程计辅助的位置误差漂移

处理方式	北向		东	向	RMS 改进比例	
	MAX	RMS	MAX	RMS	北向	东向
无	2.241	1.203	1.415	0.819	-	-
NHC	0.736	0.411	0.752	0.422	65.8%	48.5%
NHC/ODO	0.314	0.180	0.327	0.215	85.0%	73.7%

表 3-2 使用 NHC 约束和里程计辅助位置误差漂移统计(m)

基于以上定性分析结果,进行定量分析,统计9处30秒 GNSS 中断期间的 最大误差漂移,给出9个最大误差中的最大值及 RMS 统计值,RMS 改进比例都 是相对无辅助的处理方式而言的。如表 3-2,NHC 约束和里程计辅助能够显著提 升惯导的漂移性能。只使用 NHC 约束北东方向 RMS 改善比例分别为 68.5%和 48.5%,水平漂移误差 RMS 小于 0.6m。使用 NHC 约束和里程计辅助,RMS 改 善比例分别为 85%和 73.5%,水平漂移误差 RMS 小于 0.3m,满足轮式机器人高 精度定位的需求。一般地,惯性导航误差随时间的二次方发散;基于 NHC 约束 和里程计的三维车体系速度观测,组合系统误差发散速度显著减小,呈现随时间 的线性发散。

3.3.3 双天线航向辅助测试



图 3-13 双天线航向安装偏差

由于双天线航向测量与惯导系统存在安装角C⁶,需要对安装角进行估计,可 以假定安装角只有一维航向偏差。进行 RTS 反向平滑处理组合导航数据,得到 较高精度的航向,与 GNSS 双天线航向测量进行误差求解,统计误差常值作为航 向安装偏差。如图 3-13 为双天线测量航向与反向平滑处理航向的差异,可以看 出误差基本呈现随机分布,误差常值为0.386°。





首先,对比给出整段数据使用和不使用双天线航向辅助的姿态误差,如图 3-14。使用双天线航向辅助,整段航向误差幅度较小,且初始收敛较快。

表 3-3 给出了定量分析的结果,分别统计不同处理模式下的最大航向误差和 均方根误差。双天线航向辅助的改进效果,最大误差改进21.5%,均方根误差 改进15.9%。双天线航向辅助下的航向误差 RMS 值接近0.1°,误差波动范围约 ±0.25°,表明组合定位系统能够为轮式机器人提供高精度的姿态信息。

表 3-3 双天线航向辅助姿态误差对比

类型	无航向辅助	航向辅助	航向辅助改进比例	
最大误差 (度)	0.4591	0.3604	21.5%	
均方根误差(度)	0.1254	0.1054	15.9%	

3.3.4 初始对准测试

采用 GNSS 双天线航向辅助组合导航的航向初始对准,能够实现优于0.5°的 初始航向对准。航向角ψ通过 GNSS 双天线实现间接初始对准,横滚角φ和俯仰 角θ通过重力调平实现初始化,如式(3.33)所示。

$$\phi = \operatorname{sign}(f_z) \operatorname{sin}^{-1}(f_y/g)$$

$$\theta = -\operatorname{sign}(f_z) \operatorname{sin}^{-1}(f_x/g)$$
(3.33)

其中, $f^{b} = [f_{x} f_{y} f_{z}]^{T}$ 为比力测量值; sign(·)表示数值的正负号; g为当地重力值。为了实现较高精度的初始对准, 往往会补偿惯导的初始常值零偏。轮式机器人速度较低, 动态较小, 使用双天线航向辅助, 可以加快惯导收敛的速度和精度。



图 3-15 初始对准姿态误差变化

如图 3-15,初始航向误差小于0.1°,重力调平实现的横滚俯仰初始误差小于 0.05°。如图 3-15a,未使用双天线航向辅助,航向误差存在较大波动,最大误 差大于0.3°,时刻 27760s 附近,航向误差收敛到±0.2°以内;如图 3-15b,双 天线航向的辅助下,航向误差迅速收敛,整体航向误差基本分布在±0.2°以内。

本小节实现的初始对准技术,能够实现高精度的初始航向对准,采用双天线 航向辅助能够进一步加快航向误差收敛,从而为组合定位系统提供高精度的初始 条件。

3.4 本章小结

本章以 GNSS/INS 组合导航定位技术为基础,一方面,针对轮式机器人对连续高精度定位的需求,建立了零速修正、零角速率修正、非完整性约束、里程计辅助和双天线航向辅助的量测模型,显著提高了 GNSS 失效期间机器人的定位的精度和连续性。另一方面,针对机器人对定位的实时性需求,设计实现了高精度时间同步技术和 GNSS 延时更新技术。通过实测验证,进一步展示了轮式机器人实时组合定位技术的优越性。

实时组合定位系统依靠双天线 GNSS 实现高精度的初始对准,并在 GNSS 定 位和双天线航向的辅助下迅速收敛。一旦 GNSS 信号中断,无法实现高精度定位, 依靠里程计辅助和非完整性约束,组合定位系统在 30 秒内仍然能够维持分米级 的水平定位精度,但是随着行驶里程的增加,组合定位精度也会逐渐退化。因此, 为了确保 GNSS 长时间失效时机器人连续定位精度,需要为轮式机器人提供一个 绝对定位辅助信息。下一章将在本章轮式机器人实时组合导航技术技术上,引入 视觉路标辅助,研究基于视觉路标辅助的机器人组合导航技术,进一步完善轮式 机器人连续高精度定位方案。

第四章 视觉路标辅助机器人组合定位技术

第三章提出了轮式机器人实时组合定位技术,从测试结果看出,GNSS/INS 组合定位系统融合 NHC 约束、里程计辅助、双天线航向辅助等信息,能够为轮 式机器人提供一个 GNSS 失效时发散水平较低的定位信息,如果进一步采用稀疏 的视觉路标绝对定位辅助,就能够实现连续可靠的高精度定位。本章将引入视觉 路标辅助,研究视觉路标辅助机器人组合定位技术。首先将阐述相机和 IMU 的 传感器时空同步技术;然后,建立视觉辅助惯导的松组合和紧组合量测模型;最 后通过设计实测实验,对视觉路标辅助机器人组合定位技术进行验证分析。

4.1 相机与 IMU 的时空同步技术

相机和 IMU,作为两种独立的导航传感器,为了满足高精度定位的需求,必须建立起它们之间精准的时空同步关系。时空同步由两个部分组成,一是相机和惯导数据的高精度时间同步;另一个,则是两者空间上精确的相对安装关系,称为空间同步。

4.1.1 时间同步

第三章设计实现了基于 INS-Probe 的高精度时间系统,实现了 GNSS 与 IMU 的微秒级时间同步。本文采用硬件触发的方式,实现相机与 IMU 的时间同步,统一到高精度 GNSS 时间基准上。本文采用 Allied Vision 生产的 Mako G-131 彩 色工业相机(2019),分辨率为 1280*1024,提供外部硬件触发同步接口。如图 4-1 为相机时间同步简易框图,实现 INS-Probe 控制 G-131 曝光采样。INS-Probe 通过 GPIO (General Purpose Input Output)给出触发信号,G-131 响应触发开始 曝光,并给出曝光脉冲,INS-Probe 采样 GPIO 曝光信号,精确的记录曝光起始 和结束时刻时间,从而实现 G-131 与 INS-Probe 系统的高精度时间同步。





如图 4-2 为相机曝光时序图,相机曝光的过程即图像采样的过程。INS-Probe 释放触发信号,由于硬件时延,经过一段触发延时 Δt_l 之后,相机开始曝光采样, 相机曝光信号释放,并持续曝光时间 Δt_e 。INS-Probe 采集曝光开始时间 t_s 和结 束时间 t_e ,由于相机曝光采样持续一段时间,取平均时间 t_e 作为当帧图像的采样 时间。考虑到轮式机器人的动态大小,一般曝光时间不宜过长,一般取1ms以内。



4.1.2 空间同步

相机与 IMU 的空间同步,即相机与 IMU 的相对安装关系,具体而言为相对 平移和相对旋转,也称为相机的外部参数——外参。在许多算法实现中,外参往 往作为待估参数进行在线估计。本文采用基于视觉路标的视觉导航技术,仅利用 稀疏的人工标志作为视觉对象,特征较少;轮式机器人的运动方式单一,也决定 了相机外参的低可观性。因此,本文采用离线标定的方式,即同时采集相机和惯 导的丰富动态数据,进行后处理解算,从而对两者的空间安装关系进行估计。



图 4-3 相机与 IMU 标定重投影误差

相机与 IMU 之间的外参, 描述的是相机坐标系c 系和 IMU 所在的载体坐标 系b 系的相对旋转 **R** 和相对平移**t**。**R** 为3x3 的方向余弦矩阵, **t** 为三维平移矢 量,式(4.2)为欧式空间的坐标变换关系式。将式(4.2)中的参数表示为方向余弦矩 阵和位移矢量,如式(4.3)。本文采用开源软件 kalibr (Rehder, 2016)进行外参 标定,如图 4-5 为惯导相机外参标定的重投影误差,可以看到,重投影误差基本 在±1个像素以内,标定精度高。

$$\boldsymbol{P}_c = \boldsymbol{R} \boldsymbol{P}_b + t \tag{4.2}$$

$$\mathbf{C}_b^c = oldsymbol{R}$$

$$\boldsymbol{r}_{cb}^{c} = \boldsymbol{t} \tag{4.3}$$

4.2 视觉路标特征点提取与匹配

本文采用自定义设计的视觉路标作为视觉绝对定位的人工标志,如图 4-4。 视觉路标以白色为底色,整体为黑色方形框,方形框内有三个"品"字形分布的 黑色方形。目标特征点为方形框的内侧和外侧,共 8 个特征点,三个黑色方形仅 用于视觉路标的检测识别。



图 4-4 视觉路标图案

针对设计的视觉路标,本文设计并实现了专用的检测算法,从相机拍摄的图像中,检测视觉路标,并提取出与已知绝对坐标相匹配的视觉特征点。算法流程如图 4-5 所示,首先,进行算法初始化,完成相关参数配置;接着,从相机实时获取一帧图像,或者后处理读取一帧图像;然后,进行图像的预处理工作,包括降噪、畸变校正、灰度变换及直方图均衡化等过程;接着,对预处理后的图像进行边缘检测,使定位的图案的边缘暴露出来;然后,通过寻找轮廓的方式,初步检测出视觉路标;在轮廓中按照视觉路标的几何特征筛选出可能的轮廓,再通过检测三个方形区域,确认检测无误;检测确认后,采用多边形逼近算法,提取出特征点,并评估提取精度,精度较差则舍去;有效检测并提取的特征点,进行最后的几何位置匹配,以实现图像提取特征点与物理图案特征的匹配。



图 4-5 视觉路标检测算法流程

图 4-6 给出了两幅特征点提取的效果图,其中绿色框为视觉路标区域,蓝色圆圈表示外边框特征点,绿色圆圈表示内边框特征点,可以看到特征点检测的精

度大约为 1~2 个像素,检测效果较好。但是,检测的精度与诸多因素相关,如相 机的分辨率、相机与视觉路标的距离、相机拍摄的角度等等,在实际应用中,还 需要对检测到的视觉路标作进一步有效性判断,才能够为惯导提供高精度的量测 信息。





图 4-6 视觉路标特征点提取效果(局部放大图)

众所周知,视觉系统对光线的变化及其敏感,因而光线变化对视觉路标的检测的可靠性和稳定性都很有挑战。本文在视觉路标的设计和检测算法中,从诸多方面考虑,从而保障视觉检测的可靠性,避免错误的检测导致的组合定位系统的奔溃。首先,本文设计的视觉路标,以光亮的白色为底色,黑色的图案,纹理清晰,大大提高了视觉检测的可靠性。其次,在检测算法中,实现了自适应阈值, 实现图像的亮暗调整,确保不同的的光线强度都能够有效检测。最后,充分利用视觉路标的内部的三个小方形特征,在检测算法中通过验证小方形的数量,确保 检测的万无一失。通过这些方法,一方面提高了检测成功的概率,另一方面避免 了错误的视觉路标检测。

4.3 视觉/惯导组合卡尔曼滤波建模

基于视觉路标的视觉多源融合定位技术,视觉路标以绝对定位的形式辅助惯导。已知特征点表示视觉路标中特征点在特定地理空间坐标系的绝对位置坐标,从而形成 3D(三维空间坐标系)到 2D(图像)的一一对应关系。一方面,这是一个 PnP(Perspective-n-Point)问题,至少三个的 3D 到 2D 特征点对可以估计相机的位姿,以绝对位姿的形式辅助惯导;另一方面,针孔相机投影方程建立了空间三维点与图像投影点的关系,因而惯导可以预测出空间三维点在图像中的位置,从而在像素坐标层面建立量测模型。本文根据利用视觉信息的层次,将视觉辅助惯导的量测模型分为松组合和紧组合。在图像原始观测信息即像素坐标层次的融合称为紧组合,利用图像原始观测即 3D 到 2D 特征点对解算出绝对位姿的层次的融合称为松组合。

 $\boldsymbol{x} = \begin{bmatrix} (\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{r}^c)^T & (\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{v}^c)^T & \boldsymbol{\psi}^T & (\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{b}_g)^T & (\boldsymbol{\delta}\boldsymbol{b}_a)^T \end{bmatrix}^T$ (4.4)

本文采用统一的系统状态模型,如式(4.4),建立 GNSS/INS/视觉路标多源融 合定位模型。系统状态向量分别为惯导在导航坐标系的位置、速度、姿态及 IMU 传感器零偏误差。

4.3.1 视觉/惯导松组合量测模型

视觉/惯导松组合算法中,首先需要从视觉路标提取已知的特征点,并与已知 三维坐标匹配。对匹配的 3D-2D 点对求解 PnP 问题,就可以解算出相机的绝对 位姿。PnP 问题有很多种求解方法,如用三对点估计位姿的 P3P,直接线性变换 (DLT),EPnP(Efficient PnP)等等(高翔,2017)。本文设计的视觉路标共 有 8 个 3D-2D 点对,为了综合利用所有的测量值,本文采用 EPnP(Lepetit,2009) 算法求解 PnP 问题,解算出相机的绝对位置坐标,得到量测值如式(4.5),其中*e*_r 为相机绝对位置的噪声。

$$\tilde{\boldsymbol{r}}_c^n = \boldsymbol{r}_c^n + \boldsymbol{e}_r \tag{4.5}$$

利用相机外参 \mathbf{C}_{b}^{c} , \mathbf{r}_{bc}^{b} ,由 INS 机械编排结果, \mathbf{r}_{IMU}^{n} 经过杆臂补偿可以预测出相机的位置,如式(4.6)。

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{c}^{n} = \hat{\boldsymbol{r}}_{IMU}^{n} + \mathbf{D}_{R}^{-1} \hat{\mathbf{C}}_{b}^{n} \boldsymbol{r}_{bc}^{b}$$

$$(4.6)$$

视觉/惯导的松组合量测模型如图 4-7,对式(4.5)进行误差扰动分析。由 INS 预测的相机位置和 PnP 解算的位置求差,得到松组合的量测方程**z** = **Hx** + **v** 如 下



4.3.2 视觉/惯导紧组合量测模型

视觉/惯导紧组合算法中,直接在视觉处理提取的特征点像素坐标层面进行卡尔曼量测更新。绝对坐标已知的特征点*p*_k(*k*为特征点序号),其测量像素坐标值为(*ū*_k,*v*_k),如式(4.8),其中*e*_u,*e*_v分别为*u*,*v*方向的像素坐标量测误差。

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_k \\ \tilde{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_k \\ u_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix}$$
(4.8)

如图 4-8,建立起惯导载体坐标系b系、相机坐标系c系、世界坐标系w系和 像素坐标系p系的相对转换关系。其中,b系、c系和w系由相对的旋转及平移 建立联系,c系、p系和w系中三维特征点则由针孔相机透视投影模型建立转换 关系。它们的关系可以表达如下式(4.9)和式(4.10)



图 4-8 视觉/惯导紧组合坐标转换示意图

$$\begin{bmatrix} \hat{u}_k \\ \hat{v}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x \frac{\dot{r}_{cp_k,x}^c}{\hat{r}_{cp_k,z}^c} + c_x \\ f_x \frac{\dot{\hat{r}}_{cp_k,z}^c}{\hat{r}_{cp_k,z}^c} + c_y \end{bmatrix}$$
(4.9)

$$\hat{\boldsymbol{r}}_{cp_{k}}^{c} = \mathbf{C}_{b}^{c} \left(\hat{\mathbf{C}}_{w}^{b} \left(\boldsymbol{r}_{wp_{k}}^{w} - \hat{\boldsymbol{r}}_{wb}^{w} \right) - \boldsymbol{r}_{bc}^{b} \right)$$

$$(4.10)$$

 $\hat{r}_{cp_{k}}^{c}$ 表示已知三维空间特征点在相机坐标系下的坐标,是针孔相机投影方程的关键参数。而通过相对安装关系,可以建立 $\hat{r}_{cp_{k}}^{c}$ 与惯导的关系。其中 $\mathbf{C}_{b}^{c}, \mathbf{r}_{bc}^{b}$ 为相机外参; $\hat{\mathbf{C}}_{w}^{b}, \hat{r}_{wb}^{w}$ 为世界坐标系与载体之间的相对参数,与当前的导航状态相关。 式(4.9)及(4.10)为 INS 预测的已知特征点在像素坐标系下的坐标,通过与视觉处理提取的像素坐标量测值求差,即可得到视觉惯导紧组合的量测方程,如式(4.11),紧组合框图如图 4-9。



图 4-9 视觉/惯导紧组合量测模型框图

$$\boldsymbol{z} = \begin{bmatrix} \hat{u}_k - \tilde{u}_k \\ \hat{v}_k - \tilde{v}_k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_u \\ e_v \end{bmatrix}$$

$$= \boldsymbol{H}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{v}$$
(4.11)

式(4.9)与传统组合导航系统的量测源差异较大,无法通过误差扰动的方式计 算量测矩阵。采用求偏导数的方法计算量测矩阵,即令 $z = H_1 \delta r_{cp_s}^c$,其中雅可 比矩阵 H_1 为

$$\boldsymbol{H}_{1} = \begin{bmatrix} \frac{f_{x}}{r_{cp_{k},z}^{c}} & 0 & -\frac{f_{x}r_{cp_{k},x}^{c}}{(r_{cp_{k},z}^{c})^{2}} \\ 0 & \frac{f_{y}}{r_{cp_{k},z}^{c}} & -\frac{f_{y}r_{cp_{k},y}^{c}}{(r_{cp_{k},z}^{c})^{2}} \end{bmatrix}$$
(4.12)

本文定义的世界坐标系*w*系实际为一站心坐标系,以特征点的绝对地理位置坐标展开得到,轮式机器人相机的视野有效区域一般为 10 米左右,*w*系和*n*系距离较近,近似有 $\mathbf{C}_{b}^{n} \approx \mathbf{C}_{b}^{w}$ 。可以通过误差扰动的方式对式(4.10)进行量测建模,进而求取 \mathbf{H}_{2} 使, $\mathbf{z} = \mathbf{H}_{1}\mathbf{H}_{2}\mathbf{x}$, \mathbf{H}_{2} 如下

$$\boldsymbol{H}_{2} = \begin{bmatrix} -\mathbf{C}_{b}^{c} \mathbf{C}_{w}^{b} & \mathbf{0}_{3\times3} & -\mathbf{C}_{b}^{c} \mathbf{C}_{w}^{b} \begin{bmatrix} (\boldsymbol{r}_{wp_{k}}^{w} - \boldsymbol{r}_{wb}^{w}) \times \end{bmatrix} & \mathbf{0}_{3\times3} & \mathbf{0}_{3\times3} \end{bmatrix}$$
(4.13)

视觉/惯导紧组合算法较松组合算法,量测层次更深,因而具有较高的精度。 但是,紧组合算法量测方程的非线性误差较大,因而较松组合不稳定。如果线性 化状态量的初值误差较大会导致卡尔曼滤波器发散,采用迭代扩展卡尔曼滤波器 可减少非线性误差。与此同时,本文设计的视觉路标有8个特征点,单帧图像就 具有较好的可观测性(王力,2015),采用序贯卡尔曼更新的方式,能够显著提 高滤波器的稳定性。

4.4 视觉融合定位算法实测验证

基于上文提出的视觉/惯导卡尔曼滤波量测模型,本节将设计实测实验以验证 算法的性能。本节分为三个部分,首先将介绍实测的条件、实验设计及处理方法; 然后,对松组合算法进行评估,先对绝对位置观测量的精度进行统计评估,再进 行松组合效果评估;最后,对紧组合算法进行评估,同样先对像素坐标量测信息 的质量进行评估,再对紧组合效果进行评估。

4.4.1 实验说明

实验基于自研六轮机器人平台,测试使用的主要设备和测试条件如下表 4-1。 测试场地为开阔天空环境,采用仿真 GNSS 中断(Niu, 2006)的方式评估视觉 量测的效果。

类型	对象	描述
参考系统	耐威科技 POS620	GNSS: 天宝双频板卡 IMU: 光纤陀螺+石英加速度计
六轮机器人	INS-Probe Mako G-131 彩色工业相机	OEM-718D, ADIS16465 双路里程计,工业相机
已知特征点 人工设计视觉路标		RTK 测量控制点坐标 全站仪测量绝对位置
测试场地	武汉大学信息学部 友谊广场	开阔天空, GNSS 观测良好

表 4-1 算法测试数据描述

测试使用两幅同样尺寸的视觉路标,视觉路标长和宽都为0.56米,张贴于测试场地雕像墙面,墙面与东南西北方向一一对应,视觉路标分别张贴于北侧和东侧墙面,如图4-10所示。实验过程中,驱动轮式机器人对视觉路标进行拍照,测试的轨迹如图4-11,箭头指明了机器人移动的方向。轮式机器人沿着几乎固定的轨迹运动,速度约为0.8m/s,每一圈分别会对两个视觉路标进行拍照,每次能够有效检测视觉路标的时间约为5s。



图 4-10 视觉路标张贴实景图



在实测环境下,往往需要根据场景调节相机镜头的清晰度和光圈大小,一旦 镜头经过调整,其内参系数和畸变系数就会发生变化。为此,在动态测试完成之 后,进行了相机标定实验,以得到精确的相机参数,本次测试的相机参数如表 4-2 所示。与此同时,还需要对相机与 IMU 的空间同步进行标定实验,以齐次坐 标表示的相机与惯导之间的安装参数如式(4.21)。

内参	数值	畸变系数	数值
f_x	687.6681 mm	k_1	-0.0323
f_y	688.2825 mm	k_2	0.0525
c_x	667.4636 pixels	p_1	-0.0012
\mathcal{C}_y	521.4965 pixels	p_2	0.0011

表 4-2 相机内参和畸变标定结果

	[-0.023846]	0.999634	-0.012730	0.068577]	
m c	-0.004569	0.012624	0.999909	0.020326	
$\mathbf{I}_{i} =$	0.999705	0.023902	0.004267	-0.090027	(4.21)
	0	0	0	1 _	

为了验证视觉融合定位的精度,采用仿真 GNSS 中断的方式进行评估。在约 5 秒的视觉有效检测时间段前后每次进行 20 秒仿真 GNSS 中断,共 20 处中断。 当轮式机器人无法拍摄到视觉路标时,恢复 GNSS,平均恢复时间也约为 20 秒。



图 4-12 视觉融合实验仿真 GNSS 中断时间间隔

4.4.2 视觉/惯导松组合评估

轮式机器人对视觉路标拍照,从图像中提取特征点,并与已知绝对位置的特征点匹配,通过求解 PnP 问题,进而解算出相机的位姿,以绝对位姿对惯导进行辅助。为了实现高精度的辅助效果,在进行视觉/惯导松组合效果评估前,需

要对相机绝对位姿的精度进行评估。

4.4.2.1 相机绝对位置精度评估

本文采用站心坐标系(北东地(NED)坐标系)作为视觉处理的世界坐标系, 以视觉路标的外侧左上角第一个特征点作为世界坐标系的原点。采用 EPnP 算法 求解得到相机与世界坐标系的旋转平移**R**,**t**,它们满足如下关系

$$\boldsymbol{P}_c = \boldsymbol{R} \boldsymbol{P}_w + \boldsymbol{t} \tag{4.14}$$

其中, P_w , P_c 分别表示世界坐标系w系和相机坐标系c系下的坐标, (4.14)式描述 了w系和c系下坐标转换关系。为了求解得到相机的绝对位置 r_{wc}^w , 令 $P_c = 0$ 得

$$\boldsymbol{r}_{wc}^{w} = -\boldsymbol{R}^{-1}\boldsymbol{t} \tag{4.15}$$

视觉路标所在世界坐标系的原点的绝对地理坐标为**r**₀,那么就可以计算出相 机的绝对地理坐标,即

$$\boldsymbol{r}_c = \boldsymbol{r}_0 + \boldsymbol{D}_R^{-1} \boldsymbol{r}_{wc}^w \tag{4.16}$$

利用高精度 POS 系统,对视觉求解得到的绝对位置坐标精度进行评估。一般地,轮式机器人距离视觉路标越远,视觉路标在图像中的区域越小,因而由特征 点提取误差导致的 PnP 位姿求解精度越低。注意到,直视视觉路标方向的绝对 位置误差较小,通过设定合适的阈值,对结果进行筛选。本文设置直视距离为 6 米,筛选后的相机绝对位置误差如下图 4-13 所示,北东地误差基本分布在±1.0 米以内,且呈现一定的规律性。





卡尔曼滤波算法是一种最优估计算法,如何有效的设定量测噪声的方差显得 尤为重要。本文对相机的绝对位置误差进行统计分析,从而确定较为准确的量测 噪声方差。首先,针对北侧和东侧视觉路标的差异性进行分析,如图 4-14。对比 可以发现,机器人朝向视觉路标方向的位置误差相对较小,误差分布较均匀,基 本分布于±0.05米以内,符合视觉路标中8个特征点同平面的特性。具体而言, 北侧视觉路标解算的相机位置,其北向误差较小;东侧视觉路标解算的相机位置, 其东向误差较小。同时也注意到,其他两个方向误差较大,但是随着与视觉路标



距离减小(机器人总是由远及近对视觉路标拍照),误差呈现明显变小的趋势。

图 4-14 北侧和东侧视觉路标相机位置误差



c 距离 2.613 米

图 4-15 不同距离的相机绝对定位误差分布直方图

为了进一步了解相机绝对位置误差的统计特性,采用静态测试的方法,评估 不同距离拍摄视觉路标时,相机位置误差分布情况。如图 4-15,显示了机器人距 离视觉路标不同距离,拍摄北侧视觉路标的相机绝对位置误差分布直方图,三处 拍照距离间隔约为 1.4 米。从三个直方图中,可以得出以下结论,1)不同距离 的北向误差,即机器人的朝向方向,相机位置误差都很小,最大误差约为 0.05 米,图中的蓝色直方图;2)东向和垂向误差相对北向误差大很多,且波动较大, 绿色和红色直方图;3)随着机器人与视觉路标距离的减少,东向和垂向误差显 著减小,由最大的 0.75 米,减小到 0.1 米以内。 对三个不同距离的位置误差进行 RMS 统计,如表 4-3 所示。从统计结果来 看,同样符合以上三点结论。需要说明的是,由于是静态测试,因而误差分布具 有一定的前后相关性,但是这对以上三点结论的影响较小。事实上,由于 8 个特 征点共面,因而在求解 PnP 问题的过程中,直视距离的精度较高;又因为由于 近大远小的成像原理,距离较远时,特征点在图像中的几何分布越集中,类似于 GNSS 定位,因此非直视方向的误差较大,且随着距离变小而变小。根据以上统 计结果以及结论,可以对相机绝对定位量测进行合理的噪声误差建模,给出最合 适的方差系数,从而提高视觉/惯导松组合融合定位的精度及稳定性。

平均距离(北向)	北向) 北向误差 RMS 东向误差 RMS		地向误差 RMS
5.430	0.042	0.236	0.381
4.056	0.051	0.190	0.049
2.613	0.025	0.067	0.045

表 4-3 相机绝对定位误差分布统计(m)

4.4.2.2 松组合定位性能评估

上一小节对视觉解算的相机绝对位置误差进行了定量和定性分析,通过评估 误差分布,得出能够有效评估相机绝对位置量测的噪声方差特性。本节将对相机 绝对位置量测效果进行评估和分析,采用仿真 GNSS 中断的方式,验证视觉/惯 导松组合算法的性能。



图 4-16 无 NHC 约束/里程计辅助的视觉松组合位置误差漂移 如图 4-16,对比给出在不使用 NHC 约束和里程计辅助的情况下,有无视觉 松组合的位置误差漂移曲线。在 GNSS 中断的 20 秒期间,位置误差迅速增大, 无视觉辅助的情况下,多个时段的最大误差漂移大于 0.5 米;采用视觉松组合的 辅助,所有中断区间最大误差漂移都小于 0.5 米,因而视觉松组合对组合系统位 置误差漂移减小有较大的改善效果。

配合 NHC 约束,可以有效的改善 GNSS 中断的性能,如图 4-17 所示。没有 视觉辅助的情况下,最大位置误差漂移仅 0.5 米左右,基本都在 0.3 米以内,如 图 4-17a;使用视觉松组合的辅助,同样能够明显改善 NHC 约束辅助下的位置 误差漂移,如图 4-17b,最大位置误差漂移小于 0.4 米,绝大部分误差漂移小于 0.2 米。同时也注意到,视觉松组合在某些时段不仅没有改善漂移性能,误差反 而变大,这和观测质量相关,存在部分定权不合理的观测值。



a 无视觉辅助

b 视觉松组合

图 4-17 使用 NHC 约束的视觉松组合位置误差漂移

里程计是轮式机器人的低成本导航传感器,能够显著改善GNSS 中断期间组 合导航系统的性能。如图 4-18a,使用里程计辅助,最大位置误差漂移小于 0.3 米,与只使用 NHC 约束情况相比,效果改善明显。视觉松组合在使用里程计辅 助的情况下,改善效果不明显,这也暴露出视觉松组合的缺陷,由于观测值为基 于原始特征点解算的绝对位置,观测层次较低,因而精度较差。





b 视觉松组合

图 4-18 使用 NHC 约束和里程计辅助的视觉松组合位置误差漂移

对 GNSS 中断期间的每个区间的最大位置误差漂移进行统计,进一步评估视 觉松组合的量测效果。如表 4-4 所示,定量分析结果表明,在没有其他辅助和只 使用 NHC 约束的情况下,使用视觉松组合能够显著改善组合系统的性能;在使 用了 NHC 约束和里程计辅助的情况下,视觉松组合的改善效果不明显,改进比 例小于 10%。总的来说,视觉/惯导松组合算法能够较好的提升组合系统在 GNSS 失效期间的精度,在使用里程计辅助的情况下,短时间的 GNSS 中断,受限于视觉/惯导松组合算法的精度,视觉辅助效果不明显,组合系统性能还有进一步提高的空间,需要采用更高精度的视觉/惯导紧组合算法。但是对于相对较长时间的 GNSS 中断,里程计无法有效维持组合系统精度,此时视觉松组合算法同样能够发挥巨大作用。

处理方式		北向		东向			
辅助	视觉	MAX	RMS	RMS 改进比例	MAX	RMS	RMS 改进比例
于	无	0.7950	0.3801	33.49%	0.7021	0.3693	• 55.13%
二	松组合	0.4736	0.2528		0.2990	0.1657	
NHC	无	0.4632	0.2215	7.99%	0.3485	0.2150	37.45%
	松组合	0.3520	0.2038		0.2515	0.1344	
NHC/ODO	无	0.2683	0.1756	0.45%	0.2102	0.1263	0.000/
	松组合	0.2599	0.1713	2.43%	0.1929	0.1138	9.90%

表 4-4 视觉松组合位置误差漂移统计(m)

4.4.3 视觉/惯导紧组合评估

上一小节对视觉/惯导松组合算法进行了实测评估,结果表明,松组合算法能够有效改善GNSS中断期间组合系统的性能,但是并没有充分发挥出视觉导航的优势。本节将对视觉/惯导紧组合算法进行实测评估,同样从量测信息的评估和组合效果两个方面评估。





图 4-19 视觉融合测试 GNSS/INS 组合导航位姿误差

紧组合的量测信息即已知绝对地理位置的图像特征点像素坐标,为了评估特征点像素坐标的精度,需要保障组合导航的位姿精度。由于存在空间同步的问题, 无法使用高精度参考系统对特征点像素坐标精度进行评估。高精度 GNSS RTK 定位能够实现厘米级的定位,组合导航系统能够实现较高的位姿精度。如图 4-19 为组合导航系统的位姿误差,"北-东-地"位置误差 RMS 值分别为 0.027 米、0.023 米和 0.011 米,定位精度为厘米级;横滚俯仰姿态误差 RMS 值为 0.0095 度、0.0089 度,其中最关键的航向角误差也仅为 0.157 度,姿态精度较高。因而可以直接利 用组合导航预测的像素坐标,来评估视觉处理量测的特征点像素坐标。

利用式(4.9)及(4.10),由高精度的组合导航预测出已知特征点的像素坐标,与量测的像素坐标求差,它们的差异如图 4-20 所示。*u*,*v*两个方向的像素差异基本都在±7.5个像素内,由于预测和量测都存在误差,因此从差异图上来看,属于较高精度水平。





b v方向像素差异





为了进一步评估量测像素坐标的质量,对像素坐标差异进行统计分析。将u,v 两个方向的所有特征点的像素的差异进行统计,得到如图 4-21 所示的直方图。 总体来看,u,v两个方向像素误差基本呈现零均值高斯分布,误差分布标准差为 2 个像素。通过对量测与预测像素坐标差异的分析,能够有效保障在视觉/惯导紧 组合算法中,设置合理的量测噪声方差σ²。

4.4.3.2 紧组合定位性能评估

在充分掌握视觉像素坐标量测误差分布的情况下,进行视觉/惯导紧组合算法 测试,评估组合性能。首先,在不使用 NHC 约束和里程计辅助的情况下,进行 GNSS 仿真中断处理,对组合系统预测的像素坐标与量测坐标差异进行比较分 析,如图 4-22。可以看到,失去了高精度 GNSS 的辅助,组合系统位姿误差逐 渐增大,导致预测的像素坐标差异迅速增大。在有效检测视觉路标的区域,水平 方向即u方向误差增长较大,最大误差达到 75 个像素,水平误差受水平定位漂 移和航向漂移影响较大;v方向相对漂移较小,主要受横滚俯仰角和高程漂移影 响。







图 4-22 仿真 GNSS 中断处理的像素坐标差异

同样,在不使用 NHC 约束和里程计辅助的情况下,进行视觉/惯导紧组合融 合定位。对比图 4-23 中两幅位置差异图可以看出,视觉紧组合能够显著改善 GNSS 中断期间的组合系统性能,无视觉辅助的情况下,最大误差漂移接近 0.75 米,采用视觉紧组合辅助的情况下,最大误差仅 0.25 米左右。



a 无视觉辅助

b 视觉紧组合

图 4-23 不使用 NHC 约束和里程计辅助的视觉紧组合位置误差漂移

对比给出采用视觉/惯导紧组合算法处理情况下的新息分布,如图 4-24。本 文采用序贯更新的方式,对 8 对特征点进行逐点更新并反馈误差状态。图中蓝色 点为第一个更新的特征点,可以看到其新息大小最大,但是经过第一点更新反馈 误差后,剩下的特征点新息几乎都在±2个像素以内。无论是位置误差漂移曲线 还是新息误差,都表明视觉/惯导紧组合都具有较好的辅助效果。





b v方向新息









b NHC/ODO 辅助视觉紧组合

图 4-25 使用 NHC 约束和里程计辅助的视觉紧组合位置误差漂移

在使用 NHC 约束和里程计辅助的情况下,进行视觉/惯导紧组合算法处理, 位置误差漂移如图 4-25 所示。可以看到,NHC 约束能够改善视觉紧组合处理下 的位置误差漂移,但是改进的比例较小;对比可以看到,里程计并没有显著改善 效果,视觉紧组合配合 NHC 约束几乎把组合系统的性能发挥到极致,里程计的 改进空间较小。

处理方式		北向			东向		
辅助	视觉	MAX	RMS	RMS 改进比例	MAX	RMS	RMS 改进比例
于	松组合	0.4736	0.2528	22 520/	0.2990	0.1657	26.67%
二	紧组合	0.2434	0.1706	32.52%	0.2066	0.1215	
NUC	松组合	0.3520	0.2038	30.62%	0.2515	0.1344	21.72%
NHC	紧组合	0.2042	0.1414		0.1656	0.1052	
NHC/ODO	松组合	0.2599	0.1713	20.00%	0.1929	0.1138	15 200/
	紧组合	0.1989	0.1355	20.90%	0.1527	0.0965	13.20%

表 4-5 视觉松组合与紧组合位置误差漂移统计对比(m)

对以上处理结果进行定量统计分析,如表 4-5 为视觉/惯导松组合算法和紧组 合算法在不同辅助条件下的位置误差漂移统计。视觉/惯导松组合算法在性能上 与紧组合算法差异较大,在不同的辅助条件下,紧组合较松组合算法改进效果明 显。在不使用里程计辅助的情况下,紧组合算法较松组合算法有 20%以上的改进; 在使用里程计的情况下,紧组合算法也有 15%以上的改进。注意到,表 4-5 中, 紧组合算法在不同的辅助条件下都优于松组合算法,且改进比例较大。但是在紧 组合算法中,NHC 约束和里程计辅助对系统性能的改进较小,从另一个方面说 明视觉紧组合算法的高精度特点。

实际上,由于松组合使用的是 PnP 问题求解得到的相机绝对位置,在求解 PnP 问题的过程中定位误差随距离视觉路标的距离变化,实际上一定程度上造成 了精度的丢失。而紧组合算法的观测层次更深更直接,直接使用视觉检测提取的 特征点像素坐标,并且提取的精度是有保障的,不随距离视觉路标的距离变化而 变化。因而无论是从事实依据还是实验结果,都可以证明视觉紧组合算法的性能 要明显优于视觉松组合算法。



图 4-26 视觉融合方式在不同辅助条件下的水平位置漂移统计

如图 4-26,可以更加直观的看到视觉紧组合与松组合在不同辅助条件下的水平位置漂移。视觉/惯导松组合组合处理模式下,使用 NHC 约束和里程计辅助对系统性能的改进比例是显著的,使用 NHC 约束,误差减小了约 0.06 米,再配合里程计的辅助,误差继续减小了约 0.04 米。而紧组合处理模式下,NHC 约束和里程计辅助较无辅助情况下仅改进了约 0.04 米。值得注意的是,紧组合处理模式下,不使用 NHC 约束和里程计辅助的情况,组合系统性能接近使用松组合处理且使用 NHC 约束和里程计辅助。在使用 NHC 约束及里程计辅助的极限条件下,紧组合算法较松组合算法仍然有 0.04 米的改进,水平位置漂移优于 0.18 米。

里程计作为一种相对导航信息,仍然具有一定的误差,仅仅是降低惯导的发散速度;基于视觉路标的视觉/INS 紧组合,为 INS 提供绝对定位辅助,对融合定位精度改善明显。

4.5 本章小结

本章主要围绕相机和视觉导航展开,建立了相机与 IMU 连接的桥梁,实现 了以 IMU 为核心的视觉多源融合定位。首先,阐述了相机与 IMU 的传感器连接 关系,建立了精确的时空同步关系。然后,建立了视觉/惯导组合的卡尔曼滤波 算法模型,从相机绝对定位量测和图像像素坐标两个层次,建立起多源融合定位 的量测方程。接着,设计了满足需要的视觉路标,实现了特征点提取和匹配算法。 最后,设计实测实验,对视觉/惯导融合定位算法进行验证分析。实测验证主要 分为两个部分,一是对量测信息的质量进行了误差统计分析,从而建立起较为准 确的量测噪声模型;二是对融合定位进行仿真 GNSS 中断评估,对比了在不同辅 助条件下的视觉融合定位质量。结果表明,无论是视觉/惯导松组合算法,还是 紧组合算法,都能够显著改善 GNSS 中断期间的组合定位系统性能。紧组合算法 观测层次更深,因而精度更高、效果更优,能够充分发挥多源融合定位系统的性 能。因此,本文以 GNSS/INS 组合导航为基础,融合里程计、NHC 约束等轮式 机器人辅助信息,再辅以稀疏的视觉绝对定位,采用视觉/惯导紧组合建模,建 立了可行的连续高精度多源融合定位解决方案。

第五章 轮式机器人多源实时精密定位系统

在经典 GNSS/INS 组合导航定位技术基础上,本文设计实现了轮式机器人实时组合定位技术、视觉路标辅助机器人组合定位技术,从而为轮式机器人的连续高精度定位提供了有效解决方案。本章,将基于上文研究的多源融合定位技术,研制可用的轮式机器人多源实时精密定位系统。首先,自主研制 GNSS/INS 实时组合定位模块 INS-Probe,再以该模块为核心,建立轮式机器人多源实时精密定 位系统,最后通过实时实验以评估实时组合定位模块和多源实时精密定位系统的性能。

5.1 低成本 GNSS/INS 组合定位模块研制

INS-Probe 是本文研制的一款低成本、低功耗、高精度 GNSS/INS 组合定位系统。本节将从硬件系统设计和软件系统实现两个方面,阐述 INS-Probe 的系统结构。



5.1.1 模块硬件设计与实现

图 5-1 INS-Probe 硬件结构框图

INS-Probe 集数据采集存储、导航解算、通讯于一体,是一个完整的 GNSS/INS 组合导航系统,如图 5-1 是 INS-Probe 内部结构框图。按照功能进行划分,整个 系统可以划分为五个部分,分别为处理器、电源管理系统、传感器系统、数据存 储接口和通讯转换接口。系统以高性能微控制器(Microcontroller Unit, MCU) 为控制处理核心,通过其丰富的数据接口可以便捷的采集板载和外部传感器数 据;强大的浮点计算能力,为实时导航解算提供保障;灵活的通讯接口,能够有 效地将实时导航定位信息传输给机器人控制系统,同时也能够接入外部定位辅助
数据。电源管理是系统稳定工作的基础,电源管理对输入系统的供电进行转换处理,为处理器和传感器等的模拟和数字系统提供稳定的直流电源。传感器系统包括板载的 MEMS IMU 和 GNSS 模块;也包括可接入的外部传感器,如里程编码器、高精度惯导及高精度 GNSS 板卡。存储接口采用小巧的 TF 卡接口,通过 MCU 的高速 SDMMC 接口进行数据读写。INS-Probe 采用 USB 接口与上位机进行通讯,通过 USB 转换器与两路串行通讯接口相连,实现导航信息的实时输出、控制命令接入、RTCM 数据流接入等通讯功能。

根据低成本、低功耗、高精度的设计要求,对 INS-Probe 系统的主要传感器 进行了选型。MEMS IMU 采用 ADI 公司的 ADIS16465(2019),属于工业级 MEMS IMU,性能精度较好。GNSS 定位模块采用 NEO-M8P(u-blox, 2017) 单频 RTK 模块,支持实时 RTK 解算,采用 GPS/北斗双系统工作,开阔天空下 RTK 固定解为厘米级精度。MCU 采用 STM32F767(ST Microelectronics, 2017) 微处理器,基于 ARM Cortex-M7 内核,支持硬件双精度浮点运算,主频 216MHz, 具有丰富多样的接口。

5.1.2 模块嵌入式软件实现

基于 INS-Probe 硬件系统,开发了面向实时组合导航的软件系统,如图 5-2 所示,软件系统主要分为 IMU 数据采集、GNSS 数据采集、时间同步、导航解 算和导航输出控制五个部分。



图 5-2 INS-Probe 实时软件系统框图

(1) IMU 数据采集

基于 DMA 控制器通过 SPI 总线,实现 MCU 对 IMU 的原始数据采集。轮式 机器人运动丰富,必须保障 IMU 的原始采样足够高,才能够更好的保留轮式机器人的运动信息。通过求平均值的方式将高频的惯导数据降采样,进行低频的 INS 机械编排,不会明显影响组合导航的性能(蔡磊,2016)。综合考虑 MCU

的计算性能、组合导航性能及轮式机器人定位需求,以 2kHz 的原始采样率采集 MEMS 惯导数据,再通过求平均降采样到 50Hz 进行实时导航解算。

(2) GNSS 数据采集

通过异步串行通讯硬件中断的方式,实现 MCU 对 GNSS 模块高精度定位数据的获取。GNSS 定位模块使用 GPS/北斗双系统同时工作,以充分利用北斗卫星导航系统在亚太地区的优势(宁津生,2013)。NEO-M8P 输出 1Hz 的 NMEA消息,MCU 实时接收并解码 GNSS 信息,并通过 MCU 对来自主机的 RTCM 数据流进行转发,以实现厘米级的 RTK 定位。

(3) 时间同步

定位的精准源自时间的精准,只有充分保障 GNSS 定位和 IMU 数据的精准 同步,才能够保证组合导航的精度。利用有源晶振和 GNSS 定位模块的时间同步 信号,本文设计了一个高精度时间同步方案,能够实现 GNSS 和 IMU 之间微秒 级精度的时间同步,在 3.2.1 节已经介绍。

(4) 导航解算

INS-Probe 的核心功能模块。首先,利用各种先验信息或者外部辅助,实现 组合导航的初始对准。然后,对连续的 50Hz 惯导数据,进行捷联惯性导航解算 及卡尔曼滤波时间更新。当 GNSS 定位有效时,进行卡尔曼滤波量测更新,对系 统状态误差进行修正。导航解算模块充分考虑了 GNSS 延时对导航定位的影响, 设计实现了 GNSS 延时更新算法。与此同时,还预留了丰富的外部辅助信息输入 接口,以实现实时多源融合定位。

(5) 导航输出控制

实时导航定位信息的分发和存储。一方面,实时的导航定位信息通过主机接口发送给机器人控制系统,以实现机器人的导航控制。另一方面,对包括原始数据在内的导航数据进行在线存储。存储通过 FatFs 模块接口,通过 DMA 控制器,实现多种数据的实时快速存储。

5.2 机器人多源精密定位系统研制

基于轮式机器人载体的多源实时精密定位系统不仅包括多源传感器集成技术,同时包含复杂的软件架构系统。硬件系统,涵盖传感器数据采集、多源数据时空同步、通信传输链路等模块;软件系统,不仅有多源融合定位导航解算,同时还包括传感器同步采集算法、多平台数据协同处理算法等等。

5.2.1 硬件系统设计

本文设计的轮式机器人多源实时融合定位系统,以六轮底盘为载体,搭载多

63

源导航传感器、高精度 POS 参考系统、导航计算机、网络管理系统、电源系统 等设备。如图 5-3,为轮式机器人实物图,其中标注了主要的设备和传感器系统。



图 5-3 轮式机器人实物图

设备	用途	描述	
六轮机器人底盘	轮式机器人载体	双路里程编码器接入 INS-Probe	
INS-Probe	实时多源融合平台	集成 ADIS16465;接入外部 GNSS 板卡; 接入 AI 计算机;接入六轮底盘;时间同步	
AI 计算机	视觉图像处理; 数据通讯控制	NVIDIA Xavier;图像采集处理存储; 接入 OEM-718D;接入 INS-Probe	
4G 路由器	移动网络连接;远程控制	网络 RTK; 局域网远程控制	
相机	视觉导航传感器	Allied Vision Mako G-131 分辨率 1280x1024	
GNSS 双天线	双天线 GNSS 定位测向	OEM-718D 双天线板卡	
POS620	高精度参考系统	GNSS: 天宝双频板卡 IMU: 光纤陀螺+石英加速度计	

表 5-1 轮式机器人主要组件功能描述

六轮机器人底盘是整个系统的载体平台,集成独立的运动控制系统,引出中部两路里程编码信号接入 INS-Probe。INS-Probe 是多源传感融合定位平台,集成

MEMS 惯导 ADIS16465, 接入六轮底盘里程编码信号, 接入高精度双天线板卡 OEM-718D, 接入 AI 计算机视觉导航结果,同时肩负多源传感器时间同步功能。 AI 计算机是多源融合定位系统的大数据交换中心,采用 NVIDIA 公司的 Xavier 处理器,同步采集高带宽的相机图像数据,完成复杂的图像处理工作并将视觉导 航结果传入 INS-Probe; 实现网络 RTK 客户端将 RTCM 数据流传入 GNSS 接收 机。4G 路由一方面连接移动网络, 接入网络 RTK 服务器; 另一方面, 组成局域 网系统,实现对 AI 计算机的远程控制。工业相机 G-131 是本文使用的视觉导航 传感器,用于视觉路标的检测识别,经 INS-Probe 同步的图像和时间数据接入 AI 计算机处理。双天线 GNSS 板卡 OEM-718D 从 AI 计算机接入 RTCM 数据实 现高精度 RTK 定位和双天线测姿,定位定姿结果和时间同步信号 1PPS 接入 INS-Probe。POS620 是导航定位系统的高精度参考系统,能够在复杂环境下提供 高精度的参考位姿。表 5-1 中,对主要组件的用途进行了汇总。

对轮式机器人多源融合定位系统各组件之间的连接关系进行整理,如图 5-4 为系统的数据流框图。



图 5-4 轮式机器人数据流框图

由上图, 整个系统中, INS-Probe 和 AI 计算机是两大核心部件, 它们承担了 系统中的最重要的数据吞吐任务:同时作为两个可编程平台,它们也是系统中的 多源融合导航定位解算中心,系统的软件架构因此也分为两大部分。相机同时与 嵌入式导航模块 INS-Probe 和 Xavier 建立连接关系,一方面,为了实现高精度时 间同步,需要 INS-Probe 提供高精度授时;另一方面,大吞吐量数据需要接入 Xavier 采集解算,同时 INS-Probe 授时数据也要发送给 Xavier,实现图像和时间 的统一。GNSS 板卡 OEM-718D 数据链路同样复杂,一方面,需要实现高精度 RTK 定位, 需要提供 NMEA GGA 消息给 Xavier 以返回 RTCM 数据流; 另一方 面,作为高精度定位测姿及授时系统,输出高精度的绝对定位、绝对航向、绝对 时间等,从而在INS-Probe上实现多源传感器时间同步及多源融合定位导航解算。

5.2.2 软件系统设计

上一小节,介绍了轮式机器人的硬件结构设计,INS-Probe 和 AI 计算机 Xavier 是两大解算处理模块,因而软件系统也分为两部分,即多源融合导航定位解算软 件和图像同步采集检测软件。INS-Probe 终端运行多源融合导航定位解算软件, 负责传感器数据采集(IMU、GNSS 和里程编码器)、传感器时间同步、多源融 合定位解算任务等。Xavier 终端运行图像同步采集检测软件,实现相机传感器数 据采集、图像时间同步处理、视觉路标检测等功能。



图 5-5 多源融合导航定位解算软件流程图

如图 5-5 为 INS-Probe 上运行的多源融合导航定位软件流程图,可以看到这 是一个相当复杂的软件系统架构。作为一个嵌入式 MCU,许多简单的处理任务 直接在中断服务程序中执行;对于计算消耗型的任务,如导航定位解算、数据存 储等,采用实时操作系统 FreeRTOS 实现多任务。具体而言,IMU 同步采集、 GNSS 串口数据接收、时间同步系统、Xavier 主机接口、相机同步接口等与硬件

设备相关的任务,其计算量小,任务简单,通过硬件中断的方式,在中断服务程 序中即可完成。而 GNSS 数据解码、多源融合导航定位解算、数据存储等计算和 资源消耗型任务,必须通过操作系统进行调度,FreeRTOS 根据任务优先级抢占 式运行任务。

核心多源融合导航定位解算任务,通过信号量等同步方式,实现多源数据的 协同处理。解算任务创建开始执行,首先需要完成组合导航系统的初始对准,初 始化采用 GNSS 传递对准,需等待 GNSS 定位定姿结果解码完成,以实现导航 初始对准。然后,开始正常的导航解算任务,任务由 IMU 数据采集驱动,每采 集一个历元 IMU 数据,首先进行 INS 机械编排计算,然后进行卡尔曼滤波时间 更新。由于 GNSS 数据延时,采用状态转移算法,从整秒时刻累积状态转移矩阵 和系统协方差阵。NHC 约束和里程计辅助可以在一秒内的任何时刻进行更新, 因而可以很方便的在整秒时刻完成NHC约束和里程计辅助量测更新。等待GNSS 数据接收完成有效的时刻,进行 GNSS 位置量测更新,进行状态转移更新系统状 态向量和协方差阵,进而进行误差反馈,修正导航误差和 IMU 传感器误差。当 轮式机器人采集到视觉路标的图像后,经 Xavier 处理提取视觉特征点传输到 INS-Probe,进行视觉/惯导的紧组合量测更新。最后,多源融合导航定位结果再 反馈回 Xavier,用于轮式机器人的导航控制。



图 5-6 图像同步采集检测软件流程图

相对 INS-Probe 端的软件,Xavier 主机端运行的图像同步采集检测软件结构 较为简单,但是由于相机图像分辨率较高,因此计算量大,资源消耗高。如图 5-6 为图像同步采集检测软件流程图,软件由四个线程组成,分别完成相机图像 同步采集、图像时标读取、图像检测传输、图像存储。其中主线程负责相机图像 采集,读取经过 INS-Probe 触发曝光的图像,并和来自 INS-Probe 的时间标匹配 对齐,从而获取到同步的图像帧,并将数据发送给处理线程。相机触发同步由 INS-Probe 完成,采样曝光信号,获得图像时间,通过串行接口发送给主机 Xavier, 图像时标读取线程即读取串口中的时间数据,并解码发送给采集线程。图像检测 传输线程接收到同步的图像帧,运行视觉路标检测算法,将有效的检测结果再由 串口发送回 INS-Probe 进行组合解算。存储线程主要对大数据的图像序列进行存 储,方便进行后处理解算分析。

5.3 机器人实时组合定位性能测试

本节将对轮式机器人信息辅助实时组合定位技术进行实测验证,实时组合定 位算法运行在 INS-Probe 模块上。实测验证分为两个场景,分别是开阔天空场景 和综合复杂场景,以评估组合定位模块的实时精度。

5.3.1 开阔天空场景测试

在武汉大学信息学部友谊广场进行了开阔天空场景实时测试,如图 5-7 为测 试轨迹。测试使用 GNSS RTK 定位完成位置初始化,初始静止速度为零,GNSS 双天线实现航向初始化,通过重力调平实现横滚和俯仰角对准。测试过程中,使 用了轮式机器人信息辅助,包括零速修正、零角速率修正、非完整性约束、里程 计辅助和 GNSS 双天线航向辅助,充分发挥了轮式机器人的辅助信息优势。



图 5-7 开阔天空场景实时测试轨迹





如上图 5-8 为实测的位置误差,可以看到单方向位置误差都小于 0.1 米,即 组合定位系统的实时定位精度为厘米级。得益于 GNSS RTK 厘米级高精度的绝 对定位,从而保证组合系统在开阔场景下能够迅速收敛,显著提高了组合系统的 性能。





图 5-9 开阔天空场景实测速度误差

图 5-10 开阔天空场景实测姿态误差

如图 5-9 为速度误差曲线,北东方向最大速度误差基本都小于 0.1m/s,地向速度误差小于 0.05m/s,表明轮式机器人信息辅助下的实时组合系统速度精度较高。如图 5-10 为姿态误差曲线,可以看到,通过重力调平对准后的横滚和俯仰角收敛较好,误差处于很低的水平;最重要的航向角,其最大误差也仅约为 0.4 度,能够为机器人的导航控制提供高精度的航向信息。

表 5-2 给出了开阔天空场景测试的误差统计,分别展示了最大绝对误差和均 方误差值。从均方误差统计值来看,北东地方向的误差分别为 0.0237m、0.0226 米和 0.0124m,定位精度较高。横滚角和俯仰角的统计误差仅有 0.01 度左右,航 向误差也仅有 0.1199 度,最大误差约为 0.4 度。

类型 -	位置误差		速度误差		姿态误差	
	MAX	RMS	MAX	RMS	MAX	RMS
北向/横滚	0.0695	0.0237	0.1204	0.0216	0.0470	0.0102
东向/俯仰	0.0868	0.0226	0.1036	0.0215	0.0508	0.0107
地向/航向	0.0364	0.0124	0.0329	0.0060	0.4023	0.1199

表 5-2 开阔天空场景测试误差统计(m, deg)

注: MAX 指最大绝对误差; RMS 指均方误差。

总的来说,开阔天空场景下,组合定位系统的高精度定位源于 GNSS RTK 定位。高精度的 GNSS 定位辅助,使 IMU 传感器误差迅速收敛到较高精度,能够有效保障组合系统在复杂环境下的连续高精度定位。

5.3.2 综合复杂场景测试

为了验证组合系统在综合复杂场景的连续稳定性,在武汉大学信息学部第一 教学楼南侧停车场进行了实测验证,如图 5-11 为测试轨迹。测试场景中,西南 方向为相对开阔场景,北侧和东侧都是大楼和树荫密集区域,南侧为稀疏林荫道。 测试过程中,在西南侧开阔场景完成组合系统初始化,然后穿越遮挡区域两次



图 5-11 综合复杂场景实时测试轨迹

首先,给出实测场景的 GNSS 定位误差散点图,如图 5-12。可以看到,得益 于双频多系统 GNSS 的优势,GNSS 定位连续,只要还有足够的可见卫星,就可 以实现定位。但是,在较复杂的区域,可观测卫星数量骤减、分布较集中,定位 精度显著下降,从 RTK 定位逐渐退化为较低精度的米级的单点定位,已经无法 满足机器人的导航定位需求。



图 5-12 复杂场景 GNSS 定位误差

如图 5-13 和图 5-14 为组合系统实时定位误差和姿态误差,组合定位系统使 用了轮式机器人信息辅助,即零速修正、零角速率修正、非完整性约束、里程计 辅助和 GNSS 双天线航向辅助。由图 5-13 可以看到,北东地方向的最大位置误 差约为 0.3m,仅在 GNSS 恶化的情况下组合定位精度由厘米级退化为分米级。 两次穿越复杂区域时,不可用 GNSS 定位时间约为 60 秒,但是单方向最大误差 仅 0.3m 左右,表明组合系统可以实现连续分米级高精度定位。



图 5-13 综合复杂场景实测位置误差



图 5-14 综合复杂场景实测姿态误差

图 5-14 给出了姿态误差曲线,可以看到,整体航向误差分布在±0.65°以内, 横滚俯仰角仍然保持了很好的精度。初始对准之后存在一个0.4°左右的航向偏 差,这和 GNSS 双天线测姿的精度有关,由于测试场地卫星观测质量不是很好, 测姿精度有限。注意到在时刻 32290s 附近出现一个约 0.65 度的航向误差峰值, 检查 IMU 原始数据,如图 5-15 所示,航向陀螺即 z 轴以约 35deg/s 的角速度持 续旋转了 5s 左右,表明机器人进行了急转弯运动。转弯过程中,由于陀螺残余 误差的影响,从而导致航向误差迅速累积,与此同时,旋转时 GNSS 对航向陀螺 误差的可观测性也较差,进而表现出较大的航向漂移。一旦旋转停止,轮式机器 人具有较大的前进速度,GNSS 定位和双天线航向量测都能够有效的估计 IMU 传感器误差,同时修正航向。



图 5-15 时间 32290s 附近陀螺仪数据

总的来说,在综合复杂场景下,轮式机器人信息辅助的实时组合定位系统, 能够有效的维持 GNSS 恶化条件下位姿精度,一分钟左右的 GNSS 恶化,组合 系统仍然能够维持分米级的定位精度。

Position 10 5 0 North / m -5 -10 东侧定位图案 -15 -20 -10 -5 Ò 5 10 East / m

5.4 多源实时精密定位系统性能测试



多源融合定位系统实时测试采用与 4.3 节所示同样的测试方案,在武汉大学 信息学部友谊广场进行,使用张贴于雕像基座北侧和东侧的两个视觉路标,测试 轨迹如图 5-16 所示。实测分为两个阶段,第一阶段为初始化阶段,系统启动之 后,完成初始对准,然后驱动轮式机器人绕大圈运动,图 5-16 中的外围轨迹; 第二阶段为融合定位阶段,沿着几乎固定的轨迹运动,每一圈运动,机器人将分 别直视两个视觉路标并拍照。测试过程中,使用轮式机器人信息辅助(不包括双 天线航向辅助),采用基于像素层面量测的视觉紧组合方案。如图 5-17 为多源 融合定位的位置误差曲线,图 5-18 为融合定位姿态误差,其中时段 550510s~550720s 为初始化阶段,没有视觉路标辅助;时段 550720s~结束视觉路







图 5-18 多源融合定位姿态误差

由于高精度 GNSS RTK 定位辅助,多源融合定位位置误差分布在±0.1m 以内,定位精度为厘米级。注意到,多源融合定位时段的航向误差波动很小,基本都在±0.2°以内,这是由于基于视觉路标的紧组合算法对姿态误差具有良好的可观测性。截取融合定位时段的姿态误差曲线如图 5-19,统计航向角均方误差统计值为0.0739°,而在 5.3.1 节中开阔天空场景下组合定位航向角均方误差统计值为0.1199°,视觉融合定位将航向角误差降低了 38.4%,因此可以说基于视觉路标的多源融合定位系统具有显著的优势。





总的来说,本节的系统实测结果表明:1)机器人多源精密定位系统结构完整,软硬件系统工作正常稳定;2)多源融合系统实时具有很高的定位定姿精度,在 GNSS 定位有效时,能够显著提高航向角精度。

受疫情影响,没有条件进行 GNSS 复杂场景下的综合测试。根据 4.4.3 节中

的数据后处理结果,预期在 GNSS 综合复杂环境下,多源融合定位系统也能够实现实时、连续、精准定位。

5.5 本章小结

在轮式机器人实时组合定位技术和视觉路标辅助机器人组合定位技术的支 撑下,本章描述了自主研制的轮式机器人多源实时精密定位系统,并通过实时测 试对系统的综合性能进行了验证。首先,研制了系统的核心组件,低成本 GNSS/INS 组合定位模块 INS-Probe,包括硬件电路和嵌入式软件设计实现, INS-Probe 是融合定位系统的传感器数据采集、时间同步和导航解算中心。然后, 基于 INS-Probe,自主研发了轮式机器人平台,以实时多源融合定位为目标,设 计了硬件系统结构,并以此设计实现了多源融合导航定位软件和图像同步采集检 测软件,建立了完整的软硬件解决方案。最后,通过实时测试,分别对机器人实 时组合定位和视觉路标辅助机器人实时精密定位进行了性能评估。测试结果表 明,本文研制的多源实时精密定位系统实时性好、稳定性强、精度高,满足轮式 机器人对连续、实时、精准定位的需求。

第六章 总结与展望

6.1 工作总结

针对轮式机器人对连续、实时、精准的低成本定位技术的迫切需求,本文开展了基于 GNSS、INS、里程计、视觉等导航手段的多源组合定位技术研究,建 立了多源融合定位算法模型,并研制了轮式机器人多源实时精密定位系统,最后 通过实测实验进行了验证。本文的主要研究内容和主要成果如下:

- 为了增强 GNSS/INS 组合定位系统的稳健性,提高在 GNSS 复杂环境下的高 精度定位性能,设计并实现了轮式机器人载体信息辅助的 GNSS/INS 实时组 合定位方案,即机器人组合定位方案。首先,在 GNSS/INS 组合导航的经典 状态模型和量测模型基础上,建立 GNSS 双天线航向辅助、轮式里程计辅助、 非完整性约束和零速修正的量测模型;然后,面向实时性需求,设计了 GNSS 和 IMU 高精度时间同步技术,并采用了 GNSS 延时更新算法;最后,对研 制的组合定位模块进行实测数据验证和分析。实测结果表明,GNSS/INS/机 器人信息组合定位系统,能够实现优于 0.5°的初始航向对准;开阔天空场 景下定位精度为厘米级,航向精度优于 0.12°; GNSS 失效 30s 时,组合系 统能够维持优于 0.3m 的水平定位精度。
- 2. 为了进一步提高GNSS/INS/机器人信息组合定位系统在综合复杂场景高精度 定位的连续性,设计并实现了基于视觉路标辅助的机器人组合定位方案。首 先,建立相机和 IMU 的时空同步框架,实现相机和 IMU 时间和空间上的同 步。接着,针对视觉和惯导组合的层次,分别建立视觉/惯导松组合、紧组合 卡尔曼滤波量测模型。然后,设计人工视觉路标,实现视觉路标的特征点提 取和匹配算法。最后,基于轮式机器人平台采集实测数据,对视觉融合算法 的量测效果进行了定量的评估分析。实测结果表明,无论是视觉/惯导松组合 还是紧组合算法,都能够显著改善GNSS 中断期间的组合定位系统性能,但 是视觉/惯导紧组合算法精度更高、效果更优。在 GNSS 中断 20s 时间段内, 连续约 5s 的视觉路标辅助,采用视觉/惯导紧组合算法,GNSS/INS/机器人 信息/视觉路标组合定位系统能够维持优于 0.18m 的水平定位精度。
- 3. 基于上述机器人组合定位理论与方法,研制了轮式机器人多源实时精密定位 系统。首先,基于轮式机器人载体信息辅助的 GNSS/INS 实时组合定位技术, 研制了实时组合导航模块 INS-Probe。然后,以 INS-Probe 为核心,基于轮式 机器人平台,采用基于视觉路标的视觉/惯导紧组合技术,建立 GNSS/INS/ 机器人信息/视觉路标组合定位系统。最后在综合复杂场景下,评估了组合导

航模块和多源融合定位系统的实时性能。实测结果表明,多源融合定位系统 软硬件系统结构完整,实时多源融合定位软件运行稳定,能够为轮式机器人 提供连续、实时、精准定位。

综上所述,针对轮式机器人定位导航需求,本文对 GNSS/INS/机器人信息/ 视觉路标组合定位技术进行了深入研究,建立了完整的滤波融合模型;研制了 GNSS/INS/机器人信息实时组合导航模块,并以此研制了轮式机器人多源实时精 密定位系统;通过实测数据对算法模型和硬件系统进行了全面验证和分析。本文 的研究将为综合复杂环境下轮式机器人的连续、实时、精准定位提供可靠的参考 方案。

6.2 研究展望

机器人的多源融合定位技术是一项非常有挑战性和开放性的研究课题,一方面,可用的传感器众多,本文仅使用了 GNSS、IMU、里程计和相机这四种传感器。另一方面,多源融合定位算法的理论丰富,传感器模型众多,本文使用基于视觉路标的 GNSS/INS/机器人信息/视觉卡尔曼滤波多源融合定位技术,侧重于算法的实时实现。本文提供的解决方案具有很强的实用性,但仍然有许多问题需要解决,有一些地方可以改进,有更多技术值得尝试。在攻读博士学位期间,可以对以下几方面做进一步深入研究:

1.本文的测试环境具有一定的局限性,一个好的机器人导航定位解决方案应 该具有相当的环境适应性。可以在更多不同的场景下进行综合测试,提高多源融 合定位系统的成熟度,使其能够适应不同的复杂场景。与此同时,本文的解决方 案不仅适用于室外环境,同样适应于室内环境,可以在方案中补充室内定位信息 源(如无线基站信号),尝试建立室内外无缝定位,实现机器人室内外一体化导 航定位方案。

2.本文采用的基于视觉路标的视觉绝对定位,具有较高的精度和稳定性,但 依赖预先测绘的高精度地图,因而具有一定局限性,无法应用于未知的场景。随 着计算机计算能力的增强以及成本的降低,可以采用计算量较大的 SLAM 技术, 以提高系统在未知场景的适应性。可以采用非线性优化的方式,融合 GNSS、 IMU、ODO 和相机等多源传感器数据,提高 SLAM 系统的定位精度和环境适应 性。

3.在多源融合定位系统中,往往需要对多个参数同时调整以达到最优的效果, 从而提高定位的精度和稳定性。随着人工智能技术的发展,自主无人系统面向复 杂环境的适应性智能导航定位技术是当前的一个研究热点。通过机器学习的方 式,可以实现参数的自适应调整,将大大提高多源融合定位系统的稳健性。与此

77

同时,本文的多源融合定位方案,基于人工设计的视觉路标,可以采用机器学习 技术识别许多自然路标用于融合定位,从而省去了人工布设成本,大大提高了系 统的适用性。

参考文献

[1] 蔡磊, 牛小骥, 张提升, 等. MEMS 惯导在旋翼飞行器中导航性能的实验分析[J]. 传感技术学报, 2016, 29(5): 711-715.

[2] 邓中亮. 室内外无线定位与导航[M]. 北京邮电大学出版社, 2003.

[3] 邸凯昌, 万文辉, 赵红颖, 等. 视觉 SLAM 技术的进展与应用[J]. 2018.

[4] 高翔, 张涛, 颜沁睿, 刘毅. 视觉 SLAM 十四讲:从理论到实践[M]. 电子工业出版社. 2 017.

[5] 李成进, 王芳. 智能移动机器人导航控制技术综述[J]. 导航定位与授时, 2016, 3(5): 22-26.

[6] 李珊珊. 低成本 MEMS-INS/GNSS 组合导航动基座初始对准技术研究[D]: 武汉大学, 2018.

[7] 宁津生, 姚宜斌, 张小红. 全球导航卫星系统发展综述[J]. 导航定位学报, 2013 (1): 3-8.

[8] 秦永元. 惯性导航[M]. 科学出版社, 2014.

[9] 唐海亮, 张提升, 包林封, et al. 面向旋翼无人机的高精度组合导航模块设计与评估[J]. 传感技术学报, 2019(6).

[10] 王力. 影像/GNSS/INS 组合精密定位定姿方法研究[D]: 武汉大学, 2015.

[11] 谢刚. GPS 原理与接收机设计[M]. 北京: 电子工业出版社. 2009.

[12] 严恭敏. 车载自主定位定向系统研究[D]:[博士]. 西安: 西北工业大学. 2006.

[13] 严恭敏. 惯性仪器测试与数据分析[M]. 国防工业出版社, 2012.

[14] 杨元喜. 综合 PNT 系及其关键技术[J]. 2016.

[15] 张提升. GNSS/INS 标量深组合跟踪技术研究与原型系统验证[D]: 武汉大学, 2013.

[16] 章红平,常乐,汪宏晨,等.GNSS/INS 紧组合算法实时性改进与嵌入式验证[J].东南 大学学报 (自然科学版),2016,46(4):695-701.

[17] ADI. ADIS16465 DataSheet [EB/OL].https://www.analog.com/media/en/technical-docume ntation/data-sheets/adis16465.pdf, 2019.

[18] Alarifi A, Al-Salman A M, Alsaleh M, et al. Ultra wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances[J]. Sensors, 2016, 16(5): 707.

[19] Allied Vision. Mako G Technical Manual. [2019-08-25]. http://china.alliedvision.com/fil eadmin/content/documents/products/cameras/Mako/techman/Mako TechMan en.pdf.

[20] Bloesch M, Omari S, Hutter M, et al. Robust visual inertial odometry using a direct EKF-based approach[C]//2015 IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). IEEE, 2015: 298-304.

[21] Bose A, Foh C H. A practical path loss model for indoor WiFi positioning

enhancement[C]//2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing. IEEE, 2007: 1-5.

[22] Bouet M, Dos Santos A L. RFID tags: Positioning principles and localization techniques[C]//2008 1st IFIP Wireless Days. Ieee, 2008: 1-5.

[23] Chu C C, Lie F A P, Lemay L, et al. Performance comparison of tight and loose INS-Camera integration[C]//24th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation 2011, ION GNSS 2011. 2011: 3516-3526.

[24] Corke P, Lobo J, Dias J. An introduction to inertial and visual sensing[J]. 2007.

[25] Davison A J, Reid I D, Molton N D, et al. MonoSLAM: Real-time single camera SLAM[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2007, 29(6): 1052-1067.

[26] Duane C B. Close-range camera calibration[J]. Photogramm. Eng, 1971, 37(8): 855-866.

[27] El-Sheimy N, Hou H, Niu X. Analysis and modeling of inertial sensors using Allan variance[J]. IEEE Transactions on instrumentation and measurement, 2007, 57(1): 140-149.

[28] Engel J, Schöps T, Cremers D. LSD-SLAM: Large-scale direct monocular SLAM[C]//European conference on computer vision. Springer, Cham, 2014: 834-849.

[29] Engel J, Stückler J, Cremers D. Large-scale direct SLAM with stereo cameras[C]//2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2015: 1935-1942.

[30] Forster C, Zhang Z, Gassner M, et al. SVO: Semidirect visual odometry for monocular and multicamera systems[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2016, 33(2): 249-265.

[31] Fraundorfer F, Scaramuzza D. Visual odometry: Part i: The first 30 years and fundamentals[J]. IEEE Robotics and Automation Magazine, 2011, 18(4): 80-92.

[32] Fryer J G, Brown D C. Lens distortion for close-range photogrammetry[J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 1986, 52(1): 51-58.

[33] Grisetti G, Stachniss C, Burgard W. Improved techniques for grid mapping with rao-blackwellized particle filters[J]. IEEE transactions on Robotics, 2007, 23(1): 34-46.

[34] Hallberg J, Nilsson M, Synnes K. Positioning with bluetooth[C]//10th International Conference on Telecommunications, 2003. ICT 2003. IEEE, 2003, 2: 954-958.

[35] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 1271-1278.

[36] Hess W, Kohler D, Rapp H, et al. Real-time loop closure in 2D LIDAR SLAM[C]//2016IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 1271-1278.

[37] Karlsson N, Di Bernardo E, Ostrowski J, et al. The vSLAM algorithm for robust localization and mapping[C]//Proceedings of the 2005 IEEE international conference on robotics and

automation. IEEE, 2005: 24-29.

[38] Kerl C, Sturm J, Cremers D. Dense visual SLAM for RGB-D cameras[C]//2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2013: 2100-2106.

[39] Kim J, Sukkarieh S. Real-time implementation of airborne inertial-SLAM[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2007, 55(1): 62-71.

[40] Kim Y, Hwang D H. Vision/INS integrated navigation system for poor vision navigation environments[J]. Sensors, 2016, 16(10): 1672.

[41] Klein G, Murray D. Parallel tracking and mapping for small AR workspaces[C]//2007 6th IEEE and ACM international symposium on mixed and augmented reality. IEEE, 2007: 225-234.

[42] Kohlbrecher S, Von Stryk O, Meyer J, et al. A flexible and scalable slam system with full 3d motion estimation[C]//2011 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics. IEEE, 2011: 155-160.

[43] Lee J S, Su Y W, Shen C C. A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi[C]//IECON 2007-33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Ieee, 2007: 46-51.

[44] Lemay L, Chu C C, Egziabher D G, et al. Precise input and output error characterization for loosely integrated ins/gps/camera navigation system[C]//Institute of Navigation-International Technical Meeting 2011, ITM 2011. 2011: 880-894.

[45] Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P. Epnp: An accurate o (n) solution to the pnp pro blem[J]. International journal of computer vision, 2009, 81(2): 155.

[46] Leutenegger S, Lynen S, Bosse M, et al. Keyframe-based visual-inertial odometry using nonlinear optimization[J]. The International Journal of Robotics Research, 2015, 34(3): 314-334.

[47] Li M, Mourikis A I. Consistency of EKF-based visual-inertial odometry[J]. University of California Riverside, Tech Rep, 2011.

[48] Li M, Mourikis A I. High-precision, consistent EKF-based visual-inertial odometry[J]. The International Journal of Robotics Research, 2013, 32(6): 690-711.

[49] Moravec H P. Obstacle avoidance and navigation in the real world by a seeing robot rover[R].Stanford Univ Ca Dept of Computer Science, 1980.

[50] Mourikis A I, Roumeliotis S I. A multi-state constraint Kalman filter for vision-aided inertial navigation[C]//Proceedings 2007 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2007: 3565-3572.

[51] Mur-Artal R, Montiel J M M, Tardos J D. ORB-SLAM: a versatile and accurate monocular SLAM system[J]. IEEE transactions on robotics, 2015, 31(5): 1147-1163.

[52] Mur-Artal R, Tardós J D. Orb-slam2: An open-source slam system for monocular, stereo, and

rgb-d cameras[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2017, 33(5): 1255-1262.

[53] Nistér D, Naroditsky O, Bergen J. Visual odometry[C]//Proceedings of the 2004 IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2004. CVPR 2004. Ieee, 2004, 1: I-I.

[54] Niu X, Goodall C, Nassar S, et al. An efficient method for evaluating the performance of MEMS IMUs[C]//2006 IEEE/ION Position, Location, And Navigation Symposium. IEEE, 2006: 766-771.

[55] Niu X, Nassar S, El-Sheimy N. An Accurate Land-Vehicle MEMS IMU/GPS Navigation System Using 3D Auxiliary Velocity Updates[J]. Navigation, 2007, 54(3):177-188.

[56] Olesk A, Wang J. Geometric and error analysis for 3D map-matching[C]//IGNSS Symp. 2009.

[57] Qin T, Li P, Shen S. Vins-mono: A robust and versatile monocular visual-inertial state estimator[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2018, 34(4): 1004-1020.

[58] Rehder J, Nikolic J, Schneider T, et al. Extending kalibr: Calibrating the extrinsics of multiple IMUs and of individual axes[C]//2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). IEEE, 2016: 4304-4311.

[59] Savage P G. Strapdown analytics[M]. Maple Plain, MN: Strapdown Associates, 2000.

[60] Shin E H. Estimation techniques for low-cost inertial navigation[J]. UCGE report, 2005, 20219.

[61] Skog I, Handel P, Nilsson J O, et al. Zero-Velocity Detection—An Algorithm Evaluation[J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2010, 57(11):2657-2666.

[62] Springer handbook of global navigation satellite systems[M]. Springer, 2017.

[63] ST Microelectronics. STM32F765xx/STM32F767xx/STM32F768Axx/STM32F769xx Datasheet [EB/OL]. https://ww.st.com/resource/en/datasheet/stm32f767vg.pdf, 2017.

[64] Tardif J P, George M, Laverne M, et al. A new approach to vision-aided inertial navigation[C]//2010 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2010: 4161-4168.

[65] u-blox. NEO-M8P Data Sheet [EB/OL]. https://www.u-blox.com/sites/default/files/NEO-M8P DataSheet %28UBX-15016656%29.pdf, 2017.

[66] Wang L, Niu X J, Zhang Q, et al. A Camera/IMU Tightly-Coupled Navigation Algorithm and Verification by Hybrid Simulation[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2013 (6): 12.

[67] Yang S H, Jeong E M, Kim D R, et al. Indoor three-dimensional location estimation based on LED visible light communication[J]. Electronics Letters, 2013, 49(1): 54-56.

[68] Zhang J, Singh S. LOAM: Lidar Odometry and Mapping in Real-time[C]//Robotics: Science

and Systems. 2014, 2(9).

[69] Zhang R, Zhong W D, Qian K, et al. Image sensor based visible light positioning system with improved positioning algorithm[J]. IEEE Access, 2017, 5: 6087-6094.

[70] Zhang Z. Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations[C]//Proceedings of the Seventh IEEE International Conference on Computer Vision. Ieee, 1999, 1: 666-673.

[71] Zhanshe G, Fucheng C, Boyu L, et al. Research development of silicon MEMS gyroscopes: a review[J]. Microsystem Technologies, 2015, 21(10): 2053-2066.

致谢

从未想过,在求学的道路上能走这么远,我想首先应该感谢我们伟大的祖国 母亲,是她给了我们宝贵的学习机会。2013 年我初到武汉大学,正值武大一百 二十周年校庆,转眼间,我已经在珞珈山度过了七年个年头,这是我人生中最美 好的一段时光。武汉大学不仅仅是全国最美丽的大学,她还散发着独特浓厚的人 文气息,"自强弘毅,求是拓新"八字校训时刻激励着我们武大人奋发拼搏,勇 往直前。感谢武汉大学,感恩武大,这里是我求学科研的学堂,也是我成长生活 的乐土。

特别感谢刘经南院士,虽然没有直接指导我,但是他的一言一行都深深的影响着我,让我坚定了从事卫星导航事业的决心。每次聆听刘院士的讲座我都感触 良多,刘院士以其高尚的人格魅力,敏锐的科学洞察力深深的影响着我。

感谢我的恩师牛小骥教授和张提升副教授,两位导师对我人生道路上的指 引、学业上的教诲、生活上的关心,不断地激励着我要勇往直前。牛老师知识渊 博,治学严谨,待人友善,敬业奉献,使我在学习和生活中受益匪浅。硕士三年 时间,牛老师对我的学习和生活倾注了大量的心血。每每当我再科研上越到困境 和瓶颈的时候,牛老师都会耐心细致的和我讨论,经常错过吃饭时间,甚至到深 夜。我衷心感激牛老师,是他让我学会了对待生活的乐观,对待科研的严谨。张 提升老师是我从事导航专业的领路人,本科测控背景的我,是在张老师的带领下, 一步步迈进了导航圈。张老师工作严谨,但又和蔼可亲,是良师益友,由衷的感 谢张老师对我的付出。在两位导师的带领下,我和几位师弟开辟了机器人导航这 个新方向,这既是对我的肯定,也是激励我前进的动力,再一次感谢两位老师。

感谢导航组这个大家庭,每一位老师和每一位同门都是我学习的榜样。感谢 章红平老师、唐健老师、郭文飞老师、张全老师、陈起金老师和旷俭老师,感谢 他们在学习和生活上给予的帮助。感谢黄凤寒老师,黄老师是我们科研工作的后 勤总管,是我们学习和科研的坚强后盾。感谢李冰、金荣河、常乐、蒋郡祥、刘 天弋、刘韬、周禹琨等同门师兄,感谢他们曾经的帮助和指导。感谢吴宜斌、闫 伟、胡远迁、彭益堂、房伯乐和左延玉六位同班级同门,我们一起学习也一起欢 乐。感谢机器人导航方向的小伙伴们,感谢杜俊伟、张乐翔、张隽庚、王立强和 张再兴,感谢他们在科研工作中的配合,他们的研究工作也让我受益匪浅,大家 的齐心协力是取得成果的关键。感谢樊静、冯鑫、郭若南、葛文斐、李泰宇、赖 昌鑫、戴雨杭等师弟师妹们,感谢他们工作上的配合支持,他们在我的实验测试 过程中给予了巨大帮助。感谢严昆仑、李团、束远明、吴佳豪、祁发瑞、李卓、 程风等已经毕业的同门师兄姐们,他们也曾给予我许多帮助。 感谢辛绍铭、江恩铭和傅之遥三位可爱的室友,他们学习工作认真,生活积 极乐观,无时无刻不激励着我,感谢他们的一路陪伴。

感谢卫星导航定位技术研究中心 2017 级硕士班的方文涛、常华、叶文芳、 储超、方伟、张天、温强等同学,大家的相互激励和帮助,是我们一起进步的动 力源泉。

感谢卫星导航定位技术研究中心各位老师的辛勤工作,感谢郭迟、戚颖华、 高柯夫、王群、何小丹、汪志明、方荣新等老师给与的关心和帮助。特别感谢郭 迟老师,在郭迟老师的指导下,我所在的团队获得湖北省创新创业大赛一等奖, 感谢郭迟老师的辛勤指导。特别感谢戚颖华和高柯夫老师,感谢他们在教学教务 方面给与我巨大帮助。

最后还要感谢我的父母,感谢父母多年来的无私关切和默默支持,你们永远 是我前行的动力。还要感谢两位姐姐,她们在生活上给予我非常大的帮助。

山水一程,三生有幸!感恩珞珈,感谢大家!

武汉大学学位论文使用授权协议书

(一式两份,一份论文作者保存,一份留学校存档)

本学位论文作者愿意遵守武汉大学关于保存、使用学位论文的管理办法及规 定,即:学校有权保存学位论文的印刷本和电子版,并提供文献检索与阅览服务; 学校可以采用影印、缩印、数字化或其它复制手段保存论文;在以教学与科研服 务为目的前提下,学校可以在校园网内公布部分及全部内容。

- 在本论文提交当年,同意在校园网内以及中国高等教育文献保障系统 (CALIS)高校学位论文系统提供查询及前十六页浏览服务。
- 2、 在本论文提交□当年/☑一年/□两年/□三年以后,同意在校园网内允 许读者在线浏览并下载全文,学校可以为存在馆际合作关系的兄弟高 校用户提供文献传递服务和交换服务。(保密论文解密后遵守此规定)

论文作者	(签名)	:	 喜海亮

- 学院: 卫星导航定位技术研究中心

日期: 2020年5月20日