



未知环境下智能机器人自主导航 定位方法 **与** 应用

曲丽萍 王宏健 著



哈尔滨工业大学出版社
HARBIN INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

未知环境下智能机器人自主 导航定位方法与应用

曲丽萍 王宏健 著

哈尔滨工业大学出版社

内 容 简 介

本书以智能机器人自主导航定位技术的理论和方法作为研究内容展开论述。本书共分九章,主要包括六方面内容:智能机器人与 SLAM 问题描述、环境特征提取、EKF-SLAM 改进方法、FastSLAM 改进方法、数据关联改进方法及智能机器人研究展望。全书以移动机器人为主线,系统地展现了 SLAM 技术内涵、环境特征表示、环境特征提取、EKF-SLAM、FastSLAM、数据关联等机器人导航定位研究的基础理论,并依据国际标准数据库和仿真实验,给出了相应各改进算法的验证结论。之后,作为 SLAM 技术研究的延伸和扩展,本书阐述了自主水下航行器特定环境下、特有传感器、特殊的海试数据基础上的 SLAM 关键技术的各项研究成果。全书学术思想较新颖、研究内容较经济改革翔实,理论实际结合较紧密,可读性较强。

本书可作为智能机器人研究和教学的参考书,也可供从事智能机器人、人工智能、智能控制和智能系统研究、设计及应用的科技人员以及高等院校教师阅读和参考。

图书在版编目(CIP)数据

未知环境下智能机器人自主导航定位方法与应用/曲丽萍,
王宏健著. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2017.2
ISBN 978-7-5603-6111-6

I. ①未… II. ①曲… ②王… III. ①智能机器人-
导航-定位-研究 IV. ①TP242.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 158185 号

策划编辑 杨秀华
责任编辑 刘 瑶
封面设计 刘长友
出版发行 哈尔滨工业大学出版社
社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006
传 真 0451-86414749
网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>
印 刷 哈尔滨市工大节能印刷厂
开 本 787mm×1092mm 1/16 印张 12.5 字数 284 千字
版 次 2017 年 2 月第 1 版 2017 年 2 月第 1 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5603-6111-6
定 价 45.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

前 言

智能机器人导航定位技术的研究,是人工智能和智能控制界的前沿课题,也是机器人学研究的热点和难点问题之一。在部分已知和完全未知的环境中,机器人先验信息匮乏,自身位置也不能确定,机器人只能利用自身装载的传感器,探测环境、获取信息、构建地图,并且应用所生成的增量式环境地图实现完备的自主定位。这种无须先验地图的导航手段就是同步定位与地图构建(简称 SLAM),被认为是机器人真正实现自主作业的关键和基础。

近年来,本课题研究团队在王宏健教授的带领下,依托国家自然科学基金项目“小型自主水下航行器群体协同地形勘察关键技术研究”,从移动机器人 SLAM 关键技术入手,逐渐延伸至自主水下航行器的 SLAM 技术领域,先后取得了圆型类环境特征表示法、角度-距离复合聚类特征提取方法、模糊自适应 Hough 变换特征提取方法、组合自适应 EKF-SLAM 方法、多样性启发因子粒子群优化的 FastSLAM 方法、线性优化重采样 FastSLAM 方法、蚁群优化联合数据关联方法、灰色预测 ICNN-JCBB 快速切换数据关联方法等一批研究成果,在领域内重要期刊及重要的国际会议上发表了系列学术论文。这些成果形式比较分散,不便于交流和查阅,故著者做了进一步的梳理,以专著形式呈现给广大机器人学的研究者们。

本书共分九章,主要包括六方面内容:智能机器人与 SLAM 问题描述、环境特征提取、EKF-SLAM 改进方法、FastSLAM 改进方法、数据关联改进方法、智能机器人研究展望。全书以移动机器人为主线,系统展现了 SLAM 技术内涵、环境特征表示、环境特征提取、EKF-SLAM、FastSLAM、数据关联等机器人导航定位研究的基础理论,并依据国际标准数据库和仿真实验,给出了相应各改进算法的验证结论。之后,作为 SLAM 技术研究的延伸和扩展,本书阐述了自主水下航行器特定环境下、特有传感器、特殊的海试数据基础上的 SLAM 关键技术的各项研究成果。全书学术思想较新颖、研究内容较翔实,理论实际结合较紧密,可读性较强。

本书由曲丽萍、王宏健撰写,王晶博士参与部分书稿撰写工作。本书在撰写过程中得到了王科俊、边信黔、严浙平、夏国清、付明玉、黄卫权、陈雄、戚大伟、张伟森、张勋、周佳加、张伟、徐健、李娟等专家学者的指导和帮助,在此表示深深的谢意。另外,特别感谢王宏健教授多年来在学术上的引领和指导。感谢傅桂霞博士、李村博士、赵一路博士、王翠平硕士、肖本洁硕士、孟妍硕士、薛静然硕士、薛海波高级工程师等为书稿所做的整理工作。感谢国家自然科学基金(50979017/E091002)的资助。感谢澳大利亚悉尼大学地面

机器人研究中心(ACFR)提供的 Victoria Park 的实地数据集、西班牙 Girona 大学提供的港口实地数据集等的大力支持。

由于作者水平有限,加之本书涉及智能机器人研究的热点和难点问题,难免存在不妥之处,在此诚恳地希望各位专家、读者不吝赐教和批评指正,对此,我们表示衷心的感谢。

著 者
2017 年 1 月

目 录

第 1 章 智能机器人与 SLAM 问题描述	1
1.1 智能机器人的分类	1
1.2 智能机器人导航与定位	2
1.3 SLAM 技术概述	5
1.4 SLAM 技术在国内外的研究现状	7
参考文献	13
第 2 章 移动机器人环境特征提取方法	18
2.1 移动机器人系统模型研究平台的建立	18
2.2 环境特征表示法	22
2.3 移动机器人环境特征提取的原理	24
2.4 基于角度-距离复合聚类的环境特征提取方法	25
2.5 实验结果与分析	31
参考文献	38
第 3 章 移动机器人扩展卡尔曼滤波同步定位与地图构建	39
3.1 扩展卡尔曼滤波理论	39
3.2 基于扩展卡尔曼的滤波同步定位与地图构建	40
3.3 实验结果与分析	42
参考文献	46
第 4 章 移动机器人群智能优化的同步定位与地图构建	48
4.1 粒子滤波理论及其算法实现	49
4.2 基于粒子滤波的同步定位与地图构建	53
4.3 基于粒子群改进的同步定位与地图构建	58
参考文献	71
第 5 章 移动机器人同步定位与地图构建的数据关联	74
5.1 移动机器人 SLAM 数据关联问题描述	74
5.2 移动机器人 SLAM 数据关联的概念和原理	76
5.3 单一兼容数据关联	82
5.4 联合兼容数据关联	85
5.5 基于群智能优化的数据关联	88

5.6 实验结果与分析.....	91
参考文献.....	104
第6章 水下航行器特征提取与数据关联方法设计实现.....	106
6.1 水下航行器基础模型系统	106
6.2 环境感知声呐数据处理	113
6.3 基于模糊自适应 Hough 变换的特征提取方法设计与实现	117
6.4 灰色预测 ICNN-JCBB 快速切换数据关联方法.....	125
参考文献.....	132
第7章 水下航行器组合自适应 EKF-SLAM 方法设计实现	135
7.1 水下航行器 EKF-SLAM 方法设计与实现	135
7.2 Sage-Husa 自适应 EKF-SLAM 方法	140
7.3 强跟踪 EKF-SLAM 方法	150
7.4 组合自适应 EKF-SLAM 方法	154
参考文献.....	158
第8章 水下航行器改进 FastSLAM 方法设计实现	160
8.1 水下航行器 FastSLAM 方法研究	160
8.2 线性优化重采样 FastSLAM 方法设计与实现	170
8.3 模拟退火方差缩减 FastSLAM 方法设计与实现	179
参考文献.....	184
第9章 智能机器人研究发展方向.....	186
9.1 智能移动机器人研究发展方向	186
9.2 自主水下航行器研究发展方向	190
参考文献.....	191

第 1 章 智能机器人与 SLAM 问题描述

1.1 智能机器人的分类

智能机器人是指具有感知、思维和行动,能够获取、处理、识别多种信息,自主完成较为复杂操作任务的机器人^[1]。智能机器人具有不同程度的“感知”周围环境的能力,具有识别、推理、规划和学习的智能机制,能够把感知和行动智能化结合起来,完成非特定环境作业^[2]。智能机器人按其运动形式及运动空间常分为移动机器人和多自由度机器人(如空中无人机、自主水下航行器等)。

1.1.1 移动机器人

移动机器人能在陆地自主行走,常称为地面无人车,即自主陆地车辆(Autonomous Land Vehicle, ALV)。20世纪80年代初期,美国卡内基·梅隆大学、斯坦福大学和麻省理工学院等相继进行无人车自主导航运动的研究。我国在“八五”期间开始此项研究,发展迅速,由清华大学研发的 THMR 地面无人车已达到了国际先进水平。

地面无人车典型代表有 NabLab 系统、Stanley 系统及清华大学的 THMR 系统。

美国喷气推进实验室(JPL)研制的“勇气”号火星车和“机遇”号火星车从严格意义上讲,也属自主陆地车辆系列。

1.1.2 多自由度机器人

1. 空中无人机

高空长航时无人机技术非常具有挑战性^[3],美国“全球鹰”无人机的最长航程可达 25 000 km^[4]，“全球漫游者”无人机可实现 22 km 高空飞行。国内无人机技术发展迅速,中航一集团研制的“翔龙”无人机和“千里眼”无人侦察机已经问世,前者飞行速度可达 700 km/h,飞行高度可达 20 000 m;后者航程可达 2 000 km。

2. 自主水下航行器

无人水下航行器(Unmanned Underwater Vehicle, UUV)是一种以潜艇或水面舰船为支援平台,能够在水下自主远航的新概念武器,又被称为水下机器人。由于 UUV 具有作战用途广、智能化程度高、隐身性能好、机动能力强、费效比高等特点,它将以一种独特的作战力量,打破水下作战平台长期由潜艇一统天下的局面。

UUV 按其与水面支持设备(母船或平台)的联系方式的不同,大致可以分为无人遥控潜航器(Remotely Operated Vehicle, ROV)和自主水下航行器(Autonomous Underwater Vehicle, AUV)。AUV 具有无缆、自主航行等优势,已广泛应用于军事、民用领域,且在同步定

位与地图构建 SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) 领域已有应用。AUV 可以完成诸如水下威胁目标侦察(如水雷、潜艇等)、战术海洋学调查、水下情报搜集、近岸监视、海上预警、远程通信中继、攻击敌舰和潜艇等军事应用;可以完成资源及地形探测、水下光缆等设施的维护及打捞等民用应用,在国家领海防御和海洋资源开发等方面发挥着日益重要的作用。

本书后续内容涉及多自由度机器人方面的,皆以水下航行器为例进行分析研究。

1.2 智能机器人导航与定位

1.2.1 导航与定位

导航是指人们对即将抵达目的地的船舶所进行的导引,而自主导航近年来已经成为智能机器人研究领域的热点。

Leonard 和 Durrant-Whyte 将机器人导航归纳为“我在哪里?”“我要去哪里?”“我如何到达?”^[5-9]。前两个问题需要机器人通过内部、外部传感器,感知自身状态和周围环境,并确定其本身在移动环境中的精确位置,这就是定位。而环境模型,即环境地图,是对环境路标的空间坐标位置及其属性的准确描述。机器人定位与环境模型建立是密不可分的^[10]。只有精准的环境模型才能保证精确定位,而精确定位又会增强环境模型的准确性。第三个问题是路径规划与决策,如果机器人系统能够提供精确的环境模型,并且能够保证机器人精确定位,这个问题就顺理成章地解决了。因此,定位与环境模型的建立是机器人自主导航的关键所在^[11,12]。

1.2.2 智能移动机器人导航与定位

智能移动机器人是一类能够通过机载传感器感知环境和自身状态,实现在有路标(或障碍物)的工作环境中,面向目标自主运动,进而完成特定作业功能的移动机器人系统^[13,14]。

智能移动机器人在已知部分信息的环境中,可以依据事先的环境地图或者已知的环境特征信息进行定位和感知环境。但在完全未知的环境中,这里既没有可以跟踪的已知目标信息,也不存在先验地图信息,而且在动态、时变的环境干扰下,智能移动机器人会呈现复杂的动态特性,并且位姿(包括位置和方位角)测量与环境地图方面都会具有不确定性。如果只是依据内部传感器所提供的自身状态信息进行定位和环境建模,就很可能产生较大的误差累计。因此,为克服上述不利状况,保证定位和建图的准确性,智能移动机器人必须采用能够精确修正系统误差的辅助手段,对导航系统实施修正性的自主辅助导航,即利用自身携带的传感器感知环境、建立地图,实现精确定位和路径规划,进而有效地完成特定任务。

智能移动机器人常用的传感器可分为两类:一类是惯导(INS)、陀螺仪、里程计等,机器人系统利用这些传感器感知自身运动信息,并结合机器人的运动模型,基于航位推算方法,实现对自身位置的预测估计。但这类传感器由于自身固有的原因存在漂移误差,并且

这种误差会随时间不断累积,定位精度不够。另一类是激光雷达、毫米波雷达(Millimeter Wave Radar, MMWR)、声呐、视觉系统及全球定位系统(Global Positioning System, GPS)等,用于实现对机器人周围环境的精确感知。智能移动机器人正是通过上述第二类传感器对于周围环境的精确感知的辅助导航作用,实施对机器人系统定位的累积误差进行校正,进而实现精确的环境建模和定位。

移动机器人感知外部环境的传感器具有如下性能:

(1) 全球定位系统。

全球定位系统具有全天候、全球性特点,并且能够连续不断地提供三维定位导航数据,而且误差有界。但在现代化城市中,由于建筑群、立交桥、高大树木及地标的遮挡,常常会造成GPS接收信号失误和多路径效应。尤其在某些地段和时段,GPS接收机能够捕获到的卫星数目会少于4颗,导致GPS不能提供实时的定位导航信息。

(2) 毫米波雷达。

毫米波雷达的工作原理,是通过发射并接收电磁波来测量传感器到目标对象的距离。毫米波雷达测量距离远,精度高,并且不受天气条件限制,但这种传感器尺寸大,成本高,比激光雷达衰减速度要快一些。

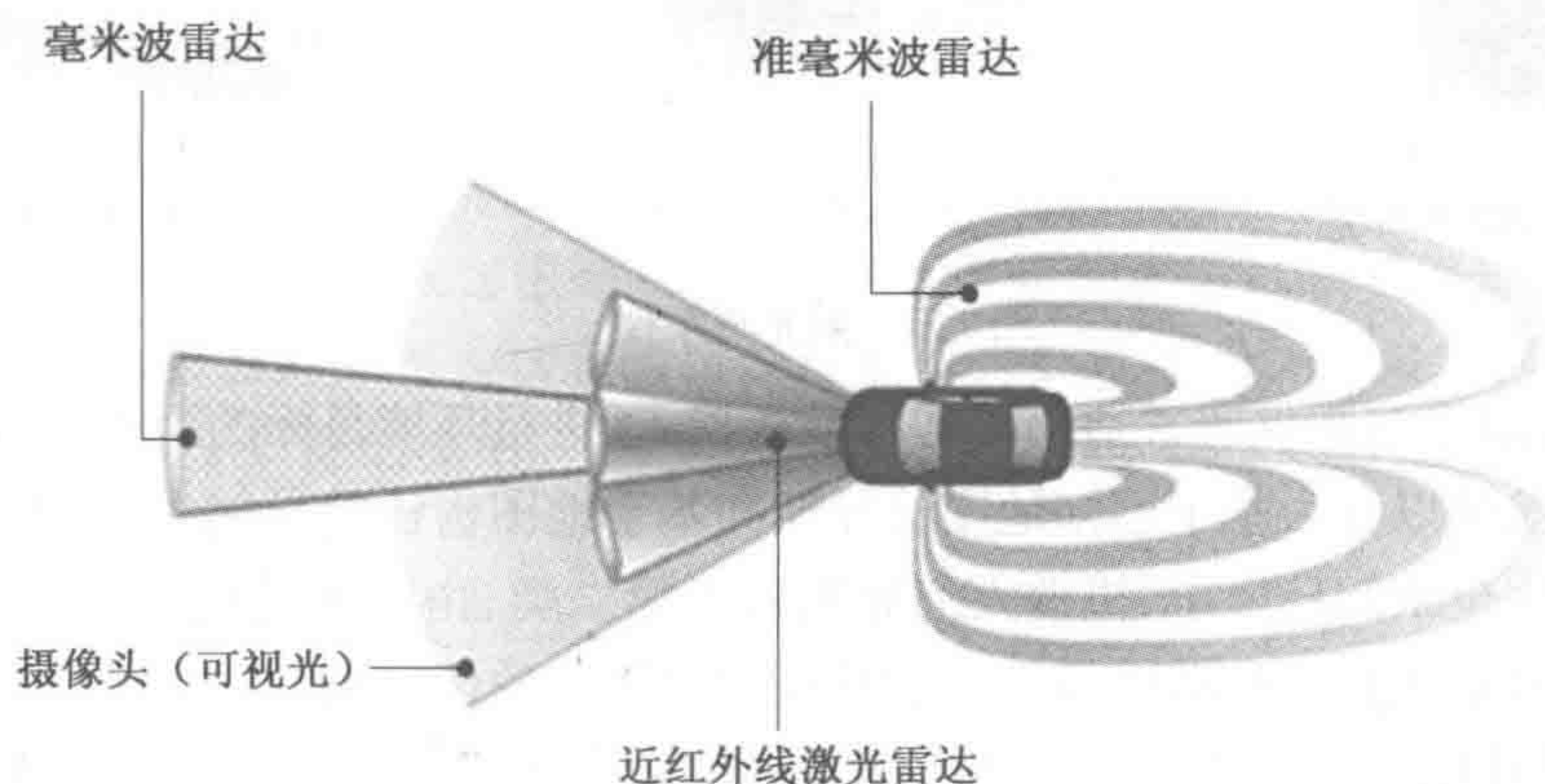


图 1.1 毫米波雷达

(3) 声呐系统。

声呐系统是通过发射脉冲声波和检测回波来计算传感器到目标对象之间的距离。声呐系统具有价格低、任何光照条件下都能使用的特点,但由于回波信息弱,波束宽,角度分辨率差,测量范围小,因此应用范围受到限制。声呐系统如图 1.2 所示。

(4) 视觉系统。

视觉系统包括单目视觉系统、双目视觉系统和全景视觉系统,是通过摄像机实现环境感知,感知信息量大,并且能够探测得到环境的 3D 信息。但是提取图像中距离信息的计算工作量很大,而且在光照较差的环境中无法使用,因此视觉系统还不尽理想。

(5) 激光测距仪。

激光测距仪(图 1.3)的探测范围广,采样的频率高,激光数据点的角度间隔小,距离探测精度高,对电磁干扰不敏感,抗干扰能力强,而且不依赖于光照条件,白天和夜晚都能够工作。激光的发散角小、能量集中,能够实现极高的探测灵敏度和分辨率,其极短的波长使得天线和系统尺寸可以很小^[15]。

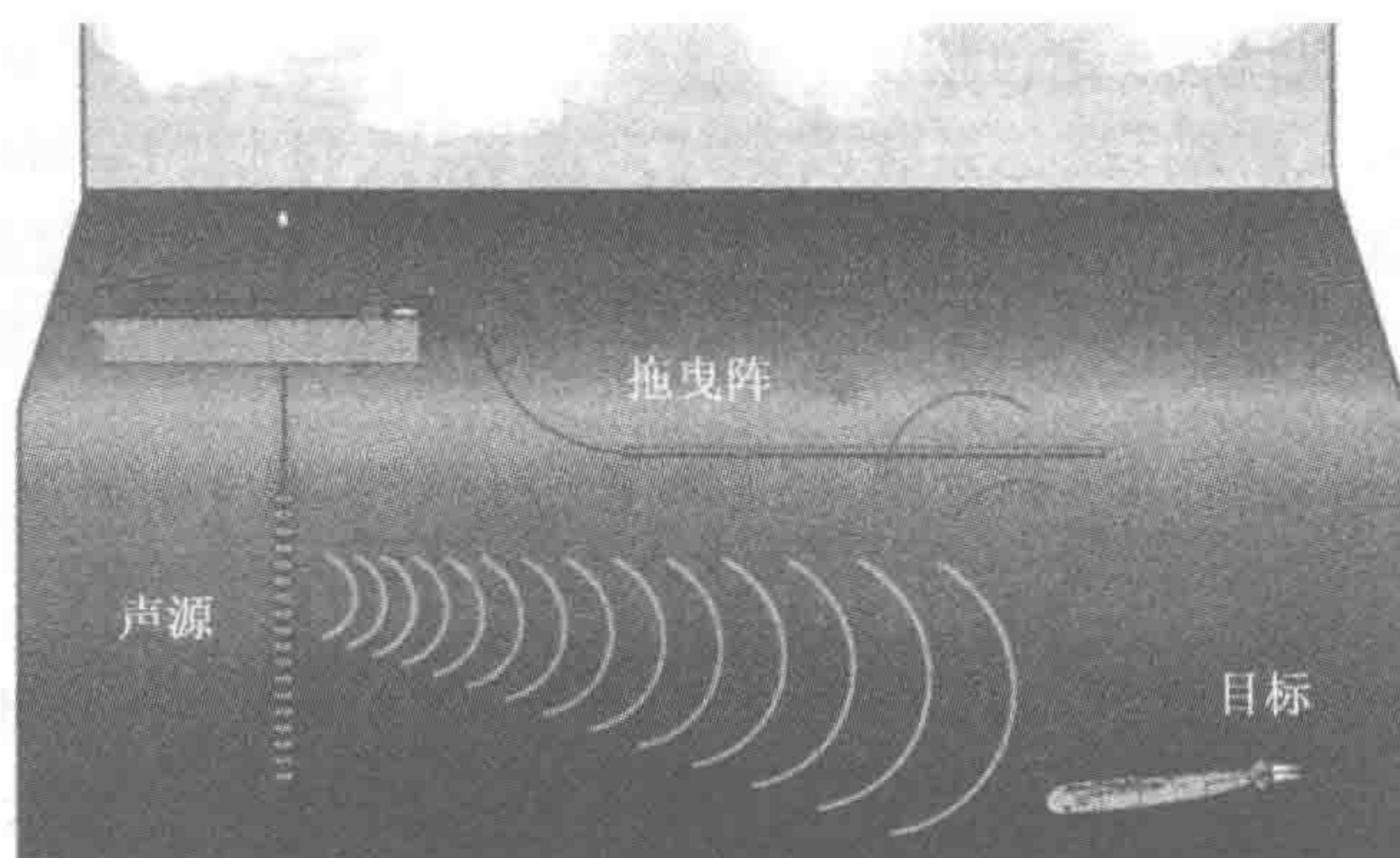


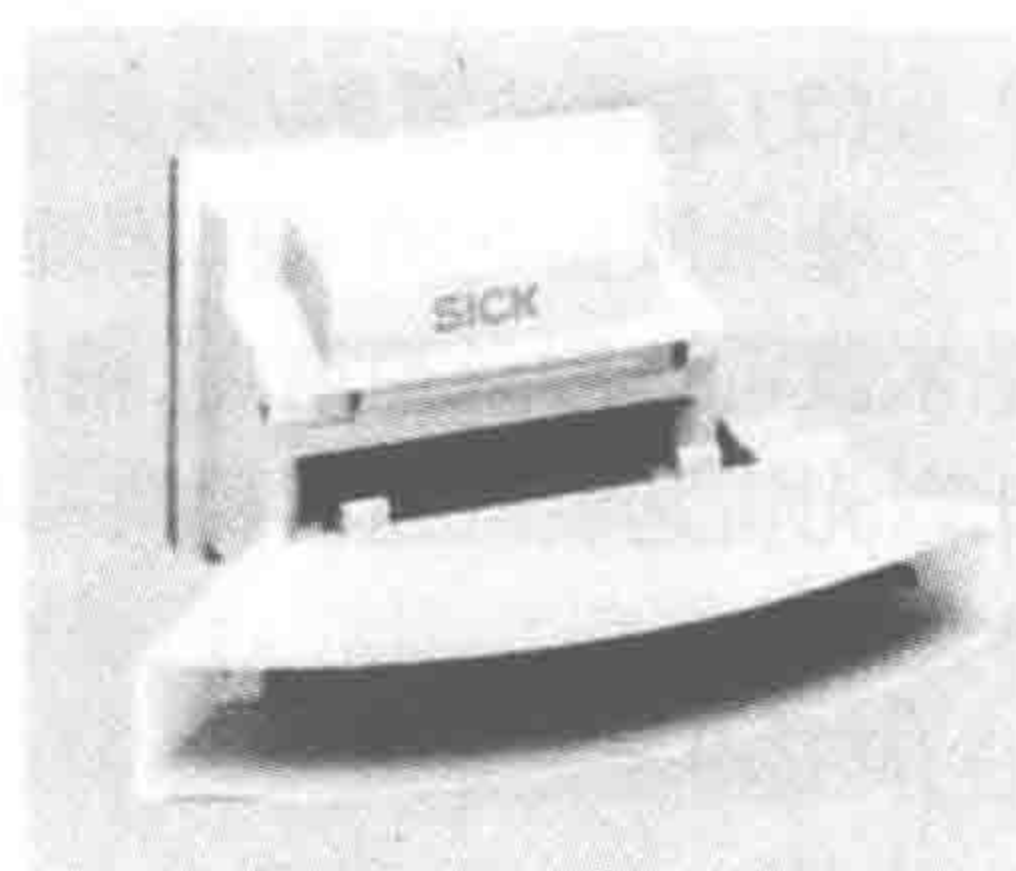
图 1.2 声呐系统



(a) LMS 200 室内型



(b) LMS 220 室内型



(c) LMS 211 室内型

图 1.3 激光测距仪

综上所述,激光测距仪非常适合搭载移动机器人,进行环境目标的距离探测。

机器人导航可以分为基于已知地图的导航和基于地图构建的导航与无地图导航^[16]。在部分已知或完全未知环境中,机器人的导航属于第二类,由于先验信息匮乏,机器人自身位置也不能确定,因此,移动机器人只能利用自身装载的传感器来探测环境、获取信息、构建地图,并且应用所生成的增量式环境地图来实现完备的自主定位。移动机器人的自主定位与环境地图构建是密不可分的,准确的环境地图依赖于精确的定位,而精确的自主定位又离不开准确的环境地图构建,这就是同步定位与地图构建思想的基本出发点。

移动机器人同步定位与地图构建(Simultaneous Localization and Mapping, SLAM),是指机器人在自身位置不确定的条件下,在部分已知或完全未知的环境中运动时,根据位置估计和传感器探测数据进行自定位,同时建造增量式地图^[17-21]。这种构建地图同时利用地图进行自主定位和导航的能力,被认为是机器人真正实现自主作业的关键和基础。

1.2.3 水下航行器导航与定位

与陆地及空中导航相比,水下导航具有航时长、环境多变、预知信息有限等特点。水下航行器导航方法主要分为两种,即借助于外部信号的非自主导航及基于自身携带传感器信息的自主导航。

非自主导航方式中只有 GPS 覆盖了全球,并具有较高的全球导航能力。然而,非自主导航方式均基于无线电技术,而无线电在水中传播衰减率较大,所以非自主导航方式在

AUV 执行水下任务时均受到很大的限制,难以取得良好的导航效果。

自主导航不依赖外界信号源,仅通过自身携带的速度(DVL等)、姿态(Compass等)及环境感知传感器(声呐等)即可在复杂的海洋环境中实现相对准确的导航,但对导航算法要求较高,是AUV导航领域研究的热点。

航位推算(Dead Reckoning, DR)根据测速传感器测量到的AUV的速度和姿态传感器测量到的航向信息,在已知前一时刻位置的情况下,考虑风、流引起的位置偏差影响,将速度对时间积分获得AUV的位置^[22,23]。

惯性导航系统(Inertial Navigation System, INS)利用惯性传感器测量AUV运动参数^[24-28],已知在初始位置条件下,根据牛顿运动定律,通过将加速度对时间进行二次积分,推算出AUV的瞬时速度和位置^[29]。

声学导航(Acoustic Navigation)通过预先布置好的声学基阵,测量AUV相对于各参考点的距离及方位角来获得AUV的位置。

组合导航(Iterated Navigation)系统通常以惯性导航系统为主,辅助以GPS、无线电导航、天文导航、卫星导航等系统中的一个或几个形成组合导航系统,以提高导航精度^[30,31]。

地球物理导航(Geophysical Navigation)将通过传感器测量得到的地球物理参数与先验环境测绘图进行匹配,得到AUV在地球上的位置估计^[32]。地球物理导航包括地形辅助导航、重力辅助导航及地磁辅助导航。

SLAM来自于移动机器人自主导航,无须具有预知地形信息或辅助外部定位基阵等设备,即可得到较可靠的机器人状态估计及环境信息。近年来,SLAM在无人机、水下航行器等领域均得到了广泛的应用。

1.3 SLAM 技术概述

SLAM问题是指系统运动模型已知、初始位姿未知的移动机器人,在具有若干路标特征的二维环境中运动时,利用自身携带的传感器感知到机器人信息与环境信息,确定环境路标特征的二维的位置坐标和自身三维的位姿向量,如图1.4所示^[33-35]。

SLAM研究最经典、最主流的方法就是基于概率的SLAM方法。该方法是应用概率理论,将机器人所有可能存在的位置描述为概率分布范围。机器人系统在环境中运动的同时,不断获取环境信息,根据这些信息并通过相应算法,机器人存在位置的概率分布不断地动态更新,位姿估计的不确定性趋于动态减小,估计精度趋于动态提高。下面对比做进一步展开分析,以获得更为清晰的SLAM内涵。

假设机器人在未知的环境中运动,机器人对于环境的影响,就是机器人系统对自身运动的“控制”;环境对于机器人的影响,就是机器人系统对环境的“观测”。而“控制”和“观测”都会受到噪声干扰,SLAM正是在这种情况下要同时解决定位和建图的双重难题。

假定机器人在静态环境中运动,该环境中存在 N 个不可移动路标,路标的信息可通过机器人传感器探测获得。机器人在 $x-y$ 直角坐标系中运动,其状态向量(即位姿向量)包含机器人的坐标位置和方位角,机器人 t 时刻的状态向量假定为 s' 。每个环境路标都

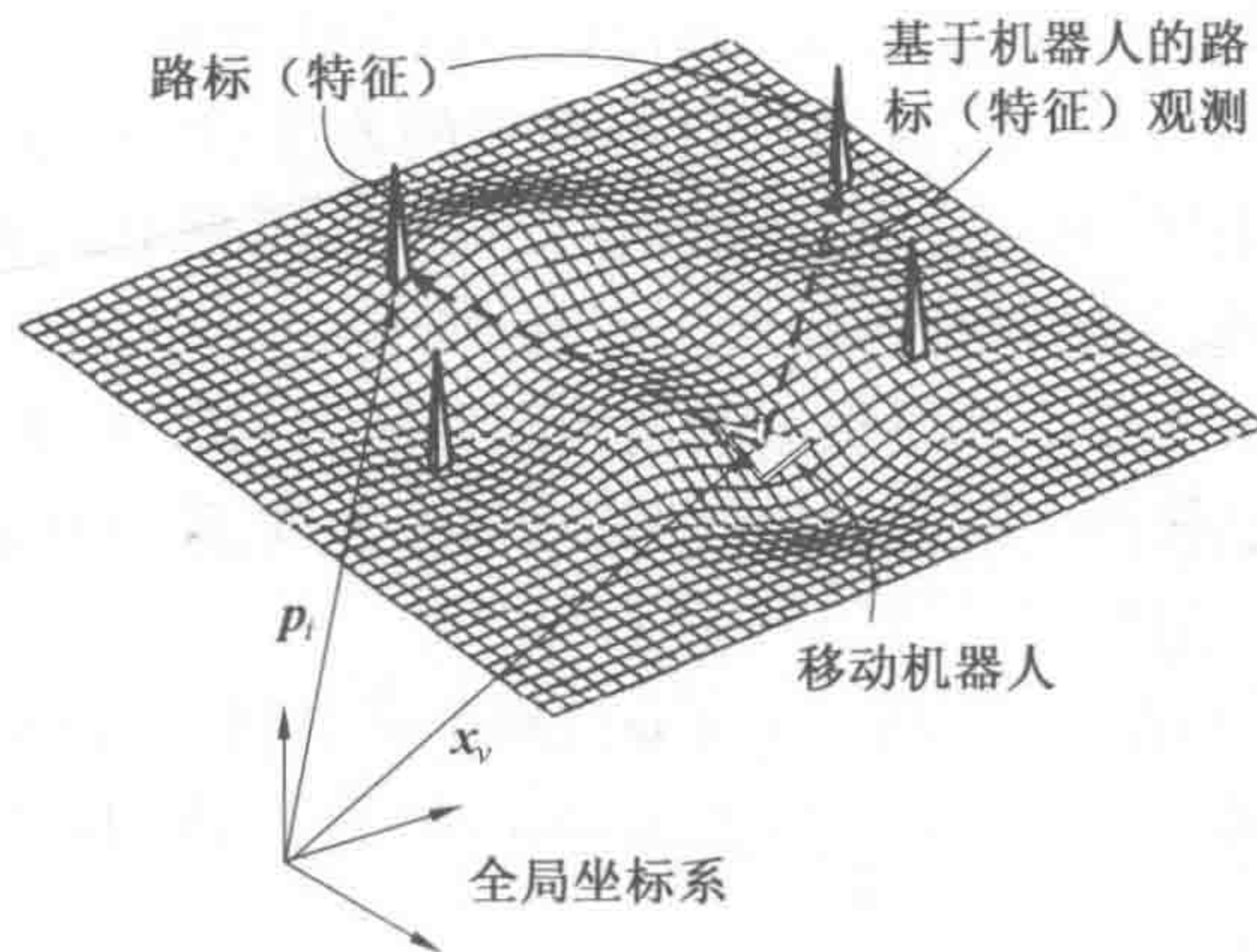


图 1.4 移动机器人 SLAM 问题描述

看作是一个特征点 B , 环境路标集合假定为 $[B_1, B_2, \dots, B_n]$ 。

机器人在环境中运动时,一方面,机器人系统会获取自身在环境中的运动信息,并在每一时刻产生一个控制量 u^t ;另一方面,机器人系统也会观测环境中的路标特征,假定获得的路标相对于传感器的距离和夹角的信息为 z^t ,机器人计算得到的路标之间的相互关联关系为 n^t ,则 SLAM 问题的数学定义^[36]可描述为

$$p(s^t, B | s^{t-1}, z^t, u^t, n^t) \quad (1.1)$$

由式(1.1)可以看出,所谓移动机器人 SLAM 问题,其实质就是依据前一时刻的移动机器人位姿 s^{t-1} ,机器人运动控制量 u^t ,机器人对环境的观测信息 z^t ,环境中路标间的关联关系 n^t ,不断在线估计出机器人当前时刻的位姿 s^t 和路标位置 B 的联合后验概率的过程。

由于未知环境本身就意味着环境的先验信息基本为零,而机器人在这种环境中运动,自然对自身位置的了解也会基本为零,此时机器人只有依靠自身携带的内部、外部传感器来获取自身的运动信息和环境的路标信息。然而机器人的运动和传感器对环境的感知又都具有不同程度的不确定性,基于上述状况,经过长期摸索,就形成了以下移动机器人 SLAM 问题的解决方案:应用系统运动模型和观测模型,通过不断的“估计-校正”,实现同步定位和建图。

具体来说,机器人系统在 SLAM 过程中需要完成如下工作:

(1) 机器人位姿预测。

利用机器人运动模型,根据上一时刻机器人位姿(位置和姿态)及当前时刻机器人输入(即线速度和角速度),预测机器人下一时刻的位姿。

(2) 环境路标特征位置预测(也称观测预测)。

利用系统观测模型,根据当前时刻机器人位姿向量预测值,估计机器人下一时刻可能探测到的环境路标特征位置。

(3) 计算新息向量,并对上面的位姿定位进行校正。

计算环境路标特征的实际观测值与观测预测值之间的偏差,并依据该偏差值对前面预测得到的机器人位姿进行校正。

(4) 系统地图的增广与更新。

增广新观测到的环境路标特征,并对系统地图进行更新。

移动机器人通过上述“预测—校正—增广”过程的循环往复,实现精确的定位和建图,即SLAM。

此外,移动机器人SLAM问题,还需要不断进行环境特征提取和数据关联。环境特征提取,就是机器人根据其自身携带的外部传感器对周围环境探测获得的观测量信息,提取出环境路标特征的坐标位置及其几何特征信息,并标注在环境地图中。而机器人在环境中的运动是连续的, t 时刻通过特征提取获得的地图路标,与 $t-1$ 时刻地图中已有的路标是否源自同一个路标实体, t 时刻有没有新路标出现, t 时刻地图如何进行更新,这些问题都属于数据关联范畴。

综上所述,SLAM技术内涵,就是移动机器人利用系统运动模型,不断计算其自身在新时刻的位置,利用其观测到的环境信息估计环境特征,同时根据实际观测和估计观测的差值,对前面计算得到的机器人位置进行校正,并将环境特征加入地图中。在此过程中,利用环境特征提取,获取环境路标信息并标注在地图中,利用数据关联,确认机器人当前时刻获取的路标与地图中已有路标之间的关联关系。通过上述不断循环迭代的过程,最终获得机器人的整个运动轨迹和运动环境的全局地图。目前常用的SLAM方法有基于扩展卡尔曼滤波的SLAM(Extended Kalman Filter SLAM, EKF-SLAM)和基于粒子滤波的SLAM(Particle Filter SLAM, PF-SLAM)。

1.4 SLAM 技术在国内外的研究现状

1.4.1 SLAM 技术的发展进程

SLAM技术的发展进程见表1.1。

表 1.1 SLAM 技术的发展进程

阶 段	事 件
第一个阶段 (20世纪80年代中期~ 20世纪90年代初期)	SLAM的数学方法没有完全确定,对SLAM问题中的不确定性没有充分认识。 Moravec和Elfes提出了基于栅格地图算法; 随后出现了基于特征建图方法; 应用随机估计理论,描述SLAM问题
第二阶段 (始于1988年)	SLAM研究正式开始,最突出的问题在于计算工作量大。 Smith等人提出采用随机估计问题形式表示SLAM问题,并提出Extended Kalman Filter(EKF); Durrant-Whyte引入了同步定位与建图的概念; 随后出现了基于Dempster的最大期望随机估计方法

续表 1.1

阶 段	事 件
第三阶段 (始于 21 世纪初期)	SLAM 发展异常迅速,研究焦点集中于减少计算工作量,力求将 SLAM 技术应用于大规模环境。 Guivant 和 Nebot 提出了 Compressed EKF(CEKF)方法; Frese 和 Duckett 提出了 Multilevel Relaxation(MLR)方法; Montemerlo 等人提出了 FastSLAM 算法; Thrun 等人提出了 Sparse Extended Information Filter(SEIF)方法; Thrun 等人提出了 GraphSLAM 方法

1.4.2 SLAM 技术的研究现状

移动机器人 SLAM 技术,总体来说,包括如下四项关键技术:

- ①导航定位关键技术;
- ②地图构建关键技术;
- ③特征提取关键技术;
- ④数据关联关键技术。

下面对 SLAM 这四项关键技术的研究现状分别给以阐述。

1. 导航定位关键技术的研究现状

(1) 导航定位方法及其研究现状。

导航定位是实现移动机器人自主导航的非常关键的技术。其目的就是确定机器人相对于世界坐标系自身的位置及运动方位角,即位姿。精确的位姿估计是实现移动机器人自主导航的必要条件^[37-39]。

①主要的导航定位方法。

移动机器人定位可分为三类:a. 相对定位(Relative Position Measurement),是指机器人利用传感器的感知信息,计算其自身在当前控制测量周期内的相对位移量及相对运动方向变化值;b. 绝对定位(Absolute Position Measurement),是指机器人根据传感器感知信息,获取其自身在全局坐标系中的位置;c. 组合定位(Combined Position Method),是相对定位的航位推算(Dead Reckoning, DR)与绝对定位的信息校正相结合的方法。

相对定位最经典的方法就是航位推算。该方法是在已知机器人初始位姿的情况下,如果每一时刻机器人的位移量都可以得到,则通过位移向量的累加计算,可以依次获得机器人后续各个时刻的位姿向量。航位推算按照运动位置累加原理得到新时刻位置,位置累加过程也会带来测量误差和计算误差的累积,从而造成定位精度下降。航位推算通常采用惯性传感器测量位移和航向角,采用里程计和加速度计来测量位移,采用角速率陀螺仪、磁罗盘和差动里程计来测量航向。长期研究发现,单独应用航位推算进行定位的效果并不理想,如果采用多传感器融合定位,就会得到相当不错的效果。

绝对定位,通常指 GPS 定位、信标定位和地图匹配定位^[40]。

GPS 定位方法是由美国国防部开发的,适合室外移动机器人全局定位。该定位方法可靠性强,覆盖范围广。一般只适于户外宽敞、开阔的环境,在遮蔽环境下,GPS 定位会失

效。

信标定位方法采用三角定位原理实现定位,由于求解非线性方程,因此计算复杂度较高,并且使用时一般需要掌握足够的先验环境信息。

地图匹配定位方法就是机器人利用机载传感器感知环境,构建地图,再将构建的地图与预先已存储在系统中的地图进行匹配,进而获取机器人的位置和方位角。

②定位方法的研究现状。

移动机器人在定位过程中存在很多不确定因素,如传感器误差累计、传感器噪声影响、不可预知的环境因素等,这些都使得机器人定位非常复杂、困难。近年来,人们致力于概率理论定位方法的研究,取得了丰硕的成果。

a. 卡尔曼滤波定位。

卡尔曼滤波(Kalman Filter, KF)定位,是在机器人位姿向量、系统噪声、观测噪声全部符合高斯分布的条件下,可实现线性运动系统机器人位姿估计的滤波算法。而实际系统大多为非线性系统,所以采用扩展卡尔曼滤波器,即用理想工作点处的Taylor(泰勒)级数展开式的一阶项,近似非线性系统线性化方法,实现机器人的定位估计。

b. 多假设定位。

多假设定位(Multiple Hypothesis Localization, MHL),是利用带有不同权重的高斯分布的加权和,来表示机器人当前位置的概率分布。在多假设定位中,每个高斯分布都是一个定位假设,最终取混合高斯分布中概率值最大的那个状态向量值作为定位结果^[39-41]。

c. 马尔可夫定位。

马尔可夫定位^[44](Markov Localization)就是利用机器人当前时刻可能存在的所有位置的概率分布,表示机器人当前所在位置的后验概率密度。这种定位方法包括基于栅格和基于拓扑两种,前者计算工作量过大,且计算复杂度随状态空间维数呈指数增长,很难用于高维状态空间;后者不必考虑各节点具体地理位置的分布,能够解决全局定位问题,但是准确度有限^[45]。

d. 粒子滤波定位。

粒子滤波(Particle Filter, PF)定位,就是用状态空间中带有权值的随机样本近似表示机器人系统状态的后验概率分布。该定位方法适合任意非线性、非高斯系统,对于绑架问题也有较好的解决效果。

但此定位方法存在两方面问题:一是样本枯竭,二是计算复杂度过高。因此,研究者提出很多改进方法,如模拟退火PF算法、遗传PF定位、自适应采样MCL(Monte Carlo Localization)^[46]、粒子聚类MCL等。

(2)导航定位研究的难点与未来发展方向。

近年来,国内外研究表明:移动机器人定位问题,由于感知传感器性能受限以及在运动环境中存在不确定性干扰等因素,因此机器人系统很难实现精确自定位。导致机器人定位的不确定性的主要因素如下:

①传感器噪声影响。

机器人内部传感器,如里程计、陀螺仪等,这些传感器本身的测量误差,会造成导航定位航迹推算的误差累积。机器人外部传感器,如激光测距仪、声呐等,受测量距离、物体表

面特性及角度分辨率等因素的影响,会造成不同程度的导航定位误差。

②复杂地形的建模难度。

移动机器人通过内部传感器感知自身的运动状态,推算出下一时刻的自身位姿。在地形较为平坦的二维环境中,机器人航迹推算的准确度较高。但在地形较为复杂的三维环境中,机器人建模就非常具有挑战性。

③环境的动态影响。

基于地图建立的导航定位,大多假设为静态环境,但实际应用环境是动态变化的。环境中物体的随机动态变化是环境不确定性的主要因素,经常导致机器人环境建图和真实的环境状况之间存在误差和不一致性。

④数据关联问题。

机器人利用外部传感器获取对环境的观测量,构建与实际环境相符合的地图,实现对定位结果的精确校正。在地图更新过程中,系统必须指明,每个观测值是已存特征、新特征,还是噪声数据,这就是数据关联。数据关联问题的计算复杂度与观测量数目之间呈指数规律变化。观测量越多,计算的复杂度越高,数据关联的不确定性就会越强,对环境建图及定位估计准确度的影响就会越大。

不确定性因素对于机器人自主定位影响之大,是目前机器人 SLAM 技术导航定位的研究难点,如何克服不确定性因素影响,减少不确定性误差应是未来机器人 SLAM 定位算法研究的重点^[47]。

2. 地图构建关键技术的研究现状

(1)常用的地图表示方法。

移动机器人 SLAM 地图构建,一方面是要标示环境特征在相应坐标系中的位置,即建立准确环境模型;另一方面是要通过准确的环境地图,实现对机器人自定位的准确校正。在 SLAM 算法研究中,经常采用尺度地图(包括栅格地图、特征地图)和拓扑地图。

①栅格地图。

栅格地图是指 2D 栅格地图,是将环境分割成大小均匀的若干个栅格单元,对每个栅格单元赋值来表示该栅格的状态是否被环境路标特征占据,如果该栅格被环境路标占据,则称该单元为占有(Occupied)状态;如果该栅格没有被环境路标占据,则称该栅格单元为空闲(Unoccupied)状态。如果栅格单元是占有状态,则赋值为 1;如果栅格单元是空闲状态,则赋值为 0。

②特征地图。

特征地图是由点、直线、圆周等几何原型来表示环境特征。例如,室内环境,可用线段表示墙面;户外环境,可用点特征表示环境中树木的位置;越野环境,可用曲面表示不平坦的路面^[48],但对于非常复杂的环境,该方法需要配合其他地图表示方法才能达到完备的效果。

③拓扑地图。

拓扑地图并不包含尺度信息,只是选取特定地点来描述环境。拓扑地图中的节点是地图构建者出于某种考虑而特别选择的地点,弧线则表示连接这些地点的路径。拓扑地